

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD

KATEDRA MECHANIKY – STAVBNÍ INŽENÝRSTVÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza nosníku z materiálu ABS, PET-G, PLA o „n“
polích

Vypracoval:

Bc. Miroslav Tábor

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Kesl

Akademický rok:

2017/2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta aplikovaných věd
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav TÁBOR**
Osobní číslo: **A17N0115P**
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Stavatelství**
Název tématu: **Analýza nosníku z materiálu ABS, PET-G, PLA o „n“ polích**
Zadávající katedra: **Katedra mechaniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Úvodní část s popisem řešeného nosníku.

1. Provedení a způsob rámových nosníků, koncepční řešení nosníků v návaznosti na konstrukci a koncepci s řešením vnitřních sil a kombinačních stavů vzniklých v konstrukci od zatížení.
2. Stavebně konstrukční řešení vybraných částí konstrukce, které jsou nezbytně nutné pro tvorbu analytické části a to posouzení dle EC3 zatížených a kombinačních návrhů.
3. Zpracujte rozbor vhodných statických řešení a na základě experimentu-zátěžová zkouška porovnejte s výpočtovým modelem a s EC3.

Rozsah grafických prací: **Práce skládající se z výkresů a textových částí**

Rozsah kvalifikační práce: **úvodní část 50 - 60 stran A4**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. ČSN EN 1990 - Zásady navrhování stavebních konstrukcí.
2. ČSN EN 1991 - Zatížení stavebních konstrukcí.
3. ČSN EN 1993 - Navrhování ocelových konstrukcí.
4. Faltus F.: Ocelové konstrukce pozemního stavitelství. Praha, 1960.
5. kol. autorů: Konstrukce pozemních staveb. Praha, 1968.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kesl**
Katedra mechaniky

Datum zadání diplomové práce: **3. července 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **5. ledna 2018**


Doc. Dr. Ing. Vlasta Radová
děkanka




Prof. Ing. Vladislav Laš, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 3. července 2017

Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma: „Analýza nosníku z ABS, PET-G, PLA o „n“ polích“ vypracoval samostatně, pod odborným vedením pana Ing. Petra Kesla a za pomoci literatury a zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu.

Veškerý použitý software pro vypracování diplomové práce byl získán legální cestou.

V Plzni dne 31. 8. 2018

.....

Bc. Miroslav Tábor

Poděkování

Touto cestou bych velmi rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Petru Keslovi za odbornou pomoc, rady a svůj vynaložený čas, který mi poskytl během konzultací.

Dále chci poděkovat své rodině, přítelkyni, přátelům a kolegům v práci, kteří při mně stáli a podporovali mě během celého studia na vysoké škole a tvorbě této práce.

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou Vierendeelova nosníku z hlediska historie, strukturální a statické analýzy, vývojovým problémům a použití v praxi. Současně se práce zabývá využitím 3D tisku ve stavebnictví a předkládá technologie, které jsou v dnešní době používané. Dále se zabývá současnými problémy, které je při 3D tisku nutné do budoucna řešit a odstranit je. Ve druhé části se práce zabývá využitím 3D tisku pro účely experimentální mechaniky ve stavitelství. Pro tento experiment byly vytištěny modely Vierendeelova nosníku z materiálů ABS, PLA a PET-G, které jsou podrobeny zatěžovacím zkouškám. Následně byly pomocí modelové podobnosti porovnávány s výpočtovým modelem z programu FIN 2D. Experimentální část se ve svém závěru zabývá taktéž vlivem nastavení tisku na výsledné měřené hodnoty. Za tímto účelem byly vytištěny dva zkušební vzorky nosníků s odlišným nastavením.

Klíčová slova

3D tisk, PLA, ABS, PET-G, plast, nosník, Vierendeel, Vierendeelův nosník, modelová podobnost, experimentální mechanika

Abstract

This diploma thesis deals with the issue of Vierendeel's beam in terms of history, structural and static analysis, development problems and application in practice. At the same time, the thesis deals with the use of 3D printing in the building industry and presents the technologies that are used today. It also deals with the current problems that need to be solved and eliminated in 3D printing. In the second part, the thesis deals with the use of 3D printing for the purpose of experimental mechanics in the building industry. For this experiment, Vierendeel beam models from ABS, PLA and PET-G have been printed and subjected to load tests. Subsequently, using model similarity, they were compared with the calculation model from FIN 2D. At the very end of this thesis, you can find the experimental part which deals with the effect of printing on the resulting measured values. For this purpose, two test specimens of beams with different settings were printed.

Keywords

3D print, PLA, ABS, PET-G, plastic, beam, Vierendeel, Vierendeel girder, model similarity, experimental mechanics

Bibliografická citace VŠKP

TÁBOR, Miroslav. *Analýza nosníku z materiálu ABS, PET-G, PLA o „n“ polích*. Plzeň, 2018. Diplomová práce. Západočeská univerzita v plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra mechaniky. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Kesl.

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíle práce	3
3	Hypotéza	3
4	Historie, použití a charakteristiky Vierendeelova nosníku.....	4
4.1	Charakteristika	4
4.2	Druhy Vierendeelova nosníku dle tvaru	5
4.3	Historie a vývoj	5
4.4	Problém křehkého lomu u prvních svařovaných Vierendeelovo mostů	10
4.5	Ukázky Vierendeelovo konstrukcí v České republice	14
4.6	Ukázky Vierendeelovo konstrukcí ve světě	17
5	Použití 3D tisku ve stavitelství	19
5.1	Technologické firmy zabývající se 3D tiskem stavebních konstrukcí.....	20
5.1.1	Contour Crafting	20
5.1.2	D-Shape	22
5.1.3	Concrete Printing	23
5.1.4	Apis Cor.....	24
5.1.5	WASP	25
5.1.6	WinSun	26
5.2	Omezení současné technologie 3D tisku betonových a konvenčních konstrukcí 27	
5.3	Možnosti vývoje 3D tisku stavebních a architektonických konstrukcí.....	28
6	Statická analýza Vierendeelova nosníku a vliv diagonálních prvků na průběhy vnitřních sil a deformace	29
6.1	Stupeň statické neurčitosti.....	30
6.2	Průběhy vnitřních sil a deformace.....	32
6.2.1	Normálové síly.....	32
6.2.2	Posouvající síly	34
6.2.3	Ohybové momenty.....	35
6.2.4	Deformace.....	36
6.3	Dimenzování, únosnost a celková váha konstrukce.....	37

6.3.1	Porovnání průhybů při mezním zatížení.....	38
6.3.2	Dimenzování a využití průřezů.....	39
6.3.3	Porovnání váhy konstrukce.....	43
6.3.4	Shrnutí vyplývající ze statické a konstrukční analýzy Vierendeelova nosníku	43
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....		44
Cíle experimentální části.....		44
7	Využití 3D tisku pro účely experimentální mechaniky ve stavitelství.....	44
7.1	Statické schéma experimentální konstrukce.....	44
7.2	Způsob výroby.....	45
7.3	Použité Materiály.....	47
7.3.1	Polyactic acid (PLA).....	47
7.3.2	Akrylonitril – butadien – styren (ABS).....	47
7.3.3	Polyetylentereftalát – glykol (PET-G).....	47
7.4	Rozměry nosníku a měřítka veličin.....	48
7.4.1	Rozměrová měřítka veličin [1].....	48
7.4.2	Fyzikální měřítka veličin [1].....	49
7.4.3	Metodika výpočtu.....	51
7.4.4	Stanovení rozměrů zkušebního prostého nosníku.....	52
7.5	Měření prostého nosníku a ověřování modulů pružnosti.....	53
7.6	Ověřování modelové podobnosti Vierendeelova nosníku o pěti polích.....	59
7.6.1	Zhodnocení výsledků.....	68
7.7	Ověřování modelové podobnosti Vierendeelova nosníku o pěti polích s vloženými diagonálami.....	68
7.7.1	Zhodnocení výsledků.....	72
7.8	Vliv nastavení tisku na výsledky modelové podobnosti.....	73
7.8.1	Měření nosníku č. 1.....	74
7.8.2	Měření nosníku č. 2.....	76
8	Výsledky práce a diskuze.....	79
9	Závěr.....	83
10	Seznam použité literatury.....	85
11	Seznam příloh.....	87

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázky

Obrázek 1 - Tvar Vierendeelova nosníku, 3D tisk	4
Obrázek 2 - Klasický Vierendeelův nosník.....	5
Obrázek 3 - Obloukový Vierendeelův nosník	5
Obrázek 4 - Zátěžový test prototypu Vierendeelova mostu ve městě Tervueren.....	6
Obrázek 5 – Stavba prvního mostu dle návrhu Arthura Vierendeela ve městě Aleghem7	
Obrázek 6 - Polohy Vierendeelovo mostů na Albertově kanálu	8
Obrázek 7 - První svařovaný Vierendeelův most na Albertově kanále, 1932.....	8
Obrázek 8 - Kolaps mostu v Hasseltu.....	9
Obrázek 9 – Vlevo: Model styčnicku mostu Schooten připraveného pro vysokocyklický stress test, 1934, Vpravo: Trhlina po 6 milionech cyklů zatížení, 1938.....	10
Obrázek 10 - Fragmenty spodní pásnice v místě porušení, 1939.....	11
Obrázek 11 - Trhlina na mostě Harenthals - Oolen, 1940.....	12
Obrázek 12 - Trhliny mostu v Kaullile, 1940.....	12
Obrázek 13 - Trhliny mostu Hermalle, 1940.....	13
Obrázek 14 - Most v Nových Heřminovech, 2017.....	15
Obrázek 15 - Most Sokolovských hrdinů, Darkov, 2012.....	15
Obrázek 16 - Most Kočičí oči, 2007	16
Obrázek 17 - Most Kočičí oči, 2007	16
Obrázek 18 - Budova bývalého Federálního shromáždění, 2014.....	17
Obrázek 19 - Vierendeelův most ve městě Grammene, 2006	18
Obrázek 20 - Most Monsin Island v Lutychu.....	18
Obrázek 21 - The Plaza Corporate center Building, Kansas City, 2014	19
Obrázek 22 - D-shape (a), Contour Crafting (b), Concrete Printing (c).....	20
Obrázek 23 – Vlevo - Technologie Contour Crafting, Vpravo - Detail tištěné stěny ...	21
Obrázek 24 - Skutečný model vesmírné základny (vlevo), vizualizace stavby na Měsíci (vpravo),.....	22
Obrázek 25 – Most pro pěší v Madridu vytištěný pomocí technologie D-Shape	23
Obrázek 26 - Segment vytištěný pomocí technologie Concrete printing.....	23
Obrázek 27 - Tiskárna firmy Apis Cor při tisku.....	24
Obrázek 28 - Vytištěný dům tiskárnou firmy Apis Cor	25

Obrázek 29 - Tiskárna BigDelta firmy WASP	25
Obrázek 30 - WinSun tisk a budova.....	26
Obrázek 31 - Stavba prefabrikátu firmy WinSun.....	26
Obrázek 32 - Statické schéma a rozměry klasického Vierendeelova nosníku	29
Obrázek 33 - Statické schéma a rozměry Vierendeelova nosníku s diagonálními prvky	30
Obrázek 34 - Průběhy normálových sil – Vierendeelův nosník.....	32
Obrázek 35 - Průběhy normálových sil – Vierendeelův nosník s diagonálami	33
Obrázek 36 - Průběhy normálových sil – Vierendeelův nosník s diagonálami (tažené)	33
Obrázek 37 - Průběhy posouvajících sil – Vierendeelův nosník.....	34
Obrázek 38 - Průběhy posouvajících sil – Vierendeelův nosník s diagonálami	34
Obrázek 39 - Průběhy posouvajících sil – Vierendeelův nosník s diagonálami (tažené)	35
Obrázek 40 - Průběhy momentových sil – Vierendeelův nosník	35
Obrázek 41 - Průběhy momentových sil – Vierendeelův nosník s diagonálami.....	36
Obrázek 42 - Deformace – Vierendeelův nosník	36
Obrázek 43 - Deformace – Vierendeelův nosník s diagonálami.....	37
Obrázek 44 - Zatížení Vierendeelova nosníku mezní silou 221,24 kN.....	38
Obrázek 45 - Zatížení Vierendeelova nosníku s diagonálami silou 221,24 kN	38
Obrázek 46 - Deformace – Vierendeelův nosník zatížen silou 221,24 kN.....	39
Obrázek 47 - Deformace – Vierendeelův nosník s diagonálami zatížen silou 221,24 kN	39
Obrázek 48 - Dimenzační prvky – Vierendeelův nosník zatížen silou 221,24 kN	39
Obrázek 49 - Dimenzační prvky – Vierendeelův nosník s diagonálami zatížen silou 221,24 kN.....	40
Obrázek 50 - Výstup z programu Ocel, Posouzení průřezu horní pásnice Vierendeelova nosníku.....	41
Obrázek 51 - Výstup z programu Ocel, Posouzení průřezu horní pásnice Vierendeelova nosníku s diagonálami	42
Obrázek 52 - Váha konstrukce Vierendeelova nosníku	43
Obrázek 53 - Váha konstrukce Vierendeelova nosníku s diagonálami.....	43
Obrázek 54 - Profil TO 250x200x25, Výstup ze statického softwaru FIN 2D	45
Obrázek 55 - Profil TO 200x200x20, Výstup ze statického softwaru FIN 2D	45

Obrázek 56 - Vytištěné vzorky variant Vierendeelova nosníku (černá – ABS, modrá/zelená - PET-G, červená - PLA) vč. nastavení.....	46
Obrázek 57 – Vlastnosti použitých materiálů	48
Obrázek 58 - Vytištěné vzorky prostých nosníků (černá – ABS, modrá - PET-G, červená - PLA) vč. Nastavení	54
Obrázek 59 - Zatížení prostého nosníku osamělou silou uprostřed a měřená deformace (schéma).....	54
Obrázek 60 - Zatížení prostého nosníku osamělou silou uprostřed (měřicí aparatura s úchylkoměrem)	55
Obrázek 61 - Průřez tisknutým vzorkem (3x horní a spodní vrstva, 4 obvodové perimetry, 25% procent výplň - Honeycomb)	58
Obrázek 62 - Vierendeelova nosníku osamělou silou uprostřed a měřená deformace (schéma)	60
Obrázek 63 - Osazený vzorek na měřicí stoličce a měřicí aparatura (vlevo PET-G, vpravo PLA)	60
Obrázek 64 - Vytištěné vzorky Vierendeelova nosníku s vloženými diagonálními prvky a měřený vzorek (PET-G).....	69
Obrázek 65 - Vliv směru vrstev z hlediska natočené neortogonálního prvku.....	70
Obrázek 66 - Modely Vierendeelova nosníku s diagonálami, materiál PET-G, nahoře - 2 obvodové perimetry, infill 25% honeycomb, dole - 4 obvodové perimetry, 100% infill	73
Obrázek 67 - Nastavení programu Simplify3D - (3x horní a spodní vrstva, 2 obvodové perimetry, 25% procent výplň - Honeycomb)	74
Obrázek 68 - Nastavení programu Simplify3D - (4 obvodové perimetry, 100% procent výplň - Rectilinear)	76

Tabulky

Tabulka 1 - Posouzení dle 1.MSÚ – Využití průřezů navržených variant nosníků	40
Tabulka 2 - Zatížení nosníku z PET-G, průhyb, modul pružnosti E.....	56
Tabulka 3 - Zatížení nosníku z ABS, průhyb, modul pružnosti E	57
Tabulka 4 - Zatížení Vierendeelova nosníku z PLA, průhyb	60
Tabulka 5 - Zatížení Vierendeelova nosníku z PET-G, průhyb	61
Tabulka 6 - Zatížení Vierendeelova nosníku z ABS, průhyb.....	62
Tabulka 7 - Výpočet působících sil na Vierendeelův nosník a měřítko modulu pružnosti (PLA)	63
Tabulka 8 - Výpočet působících sil na Vierendeelův nosník a měřítko modulu pružnosti (PET-G)	64
Tabulka 9 - Výpočet působících sil na Vierendeelův nosník a měřítko modulu pružnosti (ABS).....	64
Tabulka 10 - Porovnání měřeného a výpočtového modelu Vierendeelova nosníku (PLA).....	66
Tabulka 11 - Porovnání měřeného a výpočtového modelu Vierendeelova nosníku (PET-G).....	67
Tabulka 12 - Porovnání měřeného a výpočtového modelu Vierendeelova nosníku (ABS).....	67
Tabulka 13 - Výpočet působících sil na Vierendeelův nosník s diagonálami a měřítko modulu pružnosti (PET-G)	71
Tabulka 14 - Porovnání měřeného a výpočtového modelu Vierendeelova nosníku s diagonálami (PET-G).....	72
Tabulka 15 - Výpočty modelové podobnosti (2 obvodové perimetry)	75
Tabulka 16 - Výpočty modelové podobnosti (4 perimetry, 100 % výplň).....	76
Tabulka 17 - Vliv nastavení na průhyby experimentálních Vierendeelovo nosníků s diagonálami	77

Grafy

Graf 1 - Závislost modulu pružnosti na průhybu (PLA).....	56
Graf 2 - Závislost modulu pružnosti na průhybu - PET-G	57
Graf 3 - Závislost modulu pružnosti na průhybu – ABS	58

1 Úvod

Předkládaná práce pojednává o analýze nosníku z materiálu ABS, PLA a PET-G z hlediska využití tištěných konstrukcí ve stavební experimentální mechanice. Při návrhu vhodné konstrukce pro experimentální část bylo zvoleno řešení Vierendeelova nosníku, proto se jím zabývá teoretická část z hlediska historie, použití a statické analýzy. Koncept experimentální části pochází z již realizované diplomové práce inženýra Luboše Bischofa, který se zabýval analýzou konstrukce z materiálu ABS. Experimentální část byla touto prací značně rozšířena a dle nastavení programu lze experiment zopakovat.

Vierendeelův nosník je rámová konstrukce složená ze spodní a horní pásnice a vertikálních prvků. Na rozdíl od příhradových konstrukcí přenášejí všechny prvky nosníku veškeré vnitřní síly včetně ohybových momentů. Jeho vývoj začal na konci 19. století návrhem belgického inženýra Arthura Vierendeela. Hlavní motivací pro vývoj tohoto typu nosníku byly nedokonalé styčníky příhradových konstrukcí, které způsobovaly velké rozdíly mezi výpočtovými modely a reálnými konstrukcemi. Vierendeelovy nosníky byly používány zejména na mostní konstrukce a v prvopočátcích se pro spojování ocelových dílců používaly nýty. V první polovině dvacátého století zaznamenaly velký technologický pokrok techniky spojování materiálu, zejména svařování, které se rychle stalo běžnou součástí stavby Vierendeelovo mostních konstrukcí. Vzhledem k rychlému nástupu svařovaných spojů nebylo provedeno dostatečné množství testů a tento fakt zapříčinil konstrukční problémy, které vedli až ke zřícení mostu Hasselt. Tato událost nebyla nahodilá, neboť i ostatní svařované mosty začaly vykazovat strukturální problémy způsobené křehkým lomem v místě svařování.

Vzhledem k obsahu a struktuře diplomové práce zaměřené na kombinaci 3D tisku a stavebnictví bylo logické se alespoň částečně zmínit o současné problematice tištěných domů. Za základní technologii lze považovat Contour Crafting, která využívá standardní postup nanášení jednotlivých vrstev ve vertikálním směru. Ve většině případů používají tiskárny cementové směsi s urychlovači tuhnutí. Mezi významné společnosti zabývající se 3D tiskem stavebních konstrukcí patří například firma Apis Cor, se svým projektem domu s tiskovým časem 24 hodin. Další významnou

společností je čínská WinSun, která se vydala směrem prefabrikované výroby prvků, které se kompletují na stavbě. Současná omezení technologie zatím nedovolují tisk celých budov včetně rozvodů vody, elektřiny atd., nicméně koncepty na rozsáhlé autonomní výstavby již existují. V příštích deseti letech je očekáván velký růst segmentu 3D tisku budov a zařízení.

Práce se taktéž věnuje statické analýze již zmíněného Vierendeelova nosníku z hlediska průhybu a průběhu vnitřních sil. Předkládaná analýza porovnává vliv přidání diagonálních prvků do krajních polí, které ovlivňují celkové chování konstrukce.

Experimentální část diplomové práce je věnována testování Vierendeelovo nosníků vytištěných na 3D tiskárně. Hlavním cílem bylo ověřit možnost použití 3D tištěných modelů pro účely experimentální mechaniky ve stavební praxi. Experiment byl prováděn formou zátěžových testů, při kterých byl měřen průhyb pomocí úchylkoměru s přesností 0,01 mm. Od každého testovaného materiálu byly vytištěny a zatíženy dva zkušební vzorky. Ze získaných dat byly poté vypočítány skutečné průhyby konstrukce a porovnány se statickým modelem vytvořeným v programu FIN 2D.

Zdroje informací použité teoretické části diplomové práce pocházejí zejména ze zahraničí, neboť problematika Vierendeelovo nosníků a mostů u nás není téměř řešena. Jedná se zejména o analýzu strukturálních porušení a kolapsu prvních svařovaných mostů v Belgii. Část o využití 3D tisku pochází ze zahraniční literatury, která se touto problematikou zabývá již delší dobu. Informace o jednotlivých technologiích pocházejí zejména z internetových stránek jednotlivých společností.

2 Cíle práce

Hlavním cílem této diplomové práce je experimentální ověření modelové podobnosti na tištěných nosnících z různých druhů termoplastů a porovnání výsledků s ocelovou variantou dle výpočtového modelu z programu FIN 2D. Nedílnou součástí práce je i statický a historický rozbor Vierendeelova nosníku, který je předmětem experimentální části.

Dalšími cíli je ve stručnosti představit technologii 3D tisku, její využití ve stavebnictví a problémy, které z této technologie vyplývají.

3 Hypotéza

Hypotéza pro diplomovou práci byla stanovena následující:

Lze využít 3D tisk pro účely experimentální mechaniky stavebních konstrukcí?

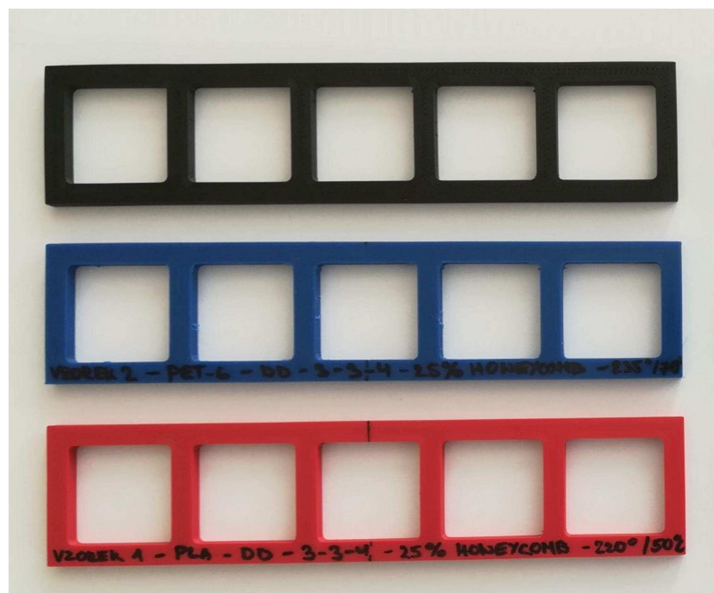
TEORETICKÁ ČÁST

4 Historie, použití a charakteristiky Vierendeelova nosníku

První kapitola diplomové práce pojednává o vzniku a použití nosníku, který bude v experimentální části podrobován měření modelové podobnosti. Jedná se o typ rámové konstrukce nazývanou Vierendeelův nosník.

4.1 Charakteristika

Obecně lze Vierendeelův nosník charakterizovat jako rámovou konstrukci se spodní a horní pásnicí propojenou vertikálními prvky. Všechny prvky soustavy Vierendeelova nosníku přenášejí kompletní vnitřní síly, tzn. normálové, smykové síly a ohybové momenty. Fakt, že se tato soustava chová odlišně od příhradové konstrukce, kde prvky nepřenášejí ohybové momenty, je způsoben přítomností tuhých rámových rohů. Typickým znakem konstrukce Vierendeelova nosníku jsou velmi masivní prvky, které mohou být tvořeny velkými H, I profily, popřípadě trubkovými prvky. Dalším z výrazných znaků je značná výška konstrukce, která může dosahovat několika metrů. Vzhledem k poměru délky a výšky pak konstrukce působí velmi masivně. [1]



Obrázek 1 - Tvar Vierendeelova nosníku, 3D tisk

(Zdroj: Autor diplomové práce)

4.2 Druhy Vierendeelova nosníku dle tvaru

Nejjednodušší a původní varianta Vierendeelova nosníku je klasická obdélníková. Jako taková se používá u mostních i pozemních staveb. Tato varianta nosníku byla užita v experimentální části diplomové práce.



Obrázek 2 - Klasický Vierendeelův nosník

(Zdroj: Diplomová práce, Bischof, 2017)

Druhou variantou je nosník s obloukovou pásnicí, který byl probírán v minulé kapitole v souvislosti se strukturálními problémy. Používá se u dopravních staveb, zejména mostů. Tento nosník lze najít ještě ve variantě s obloukovou horní i spodní pásnicí.



Obrázek 3 - Obloukový Vierendeelův nosník

(Zdroj: Diplomová práce, Bischof, 2017)

4.3 Historie a vývoj

Historicky sahají počátky Vierendeelova nosníku na konec 19. století, konkrétně do roku 1896, kdy belgický inženýr a později profesor na Univerzitě v Louvaine Arthur Vierendeel poprvé publikoval koncept ve své knize *Longerons en Treillis et Longerons a Arcade*. V době, kdy vznikaly první koncepty Vierendeelova nosníku, byly jako hlavní spojovací prvky používány ocelové nýty, které vyžadovaly styčnickové desky velkých rozměrů. Následkem byl vznik excentrických sil, které byly způsobovány mimosovým průřezem prutů. Vzhledem k faktu, že výpočty prutových konstrukcí spojených deskami s nýty ignorovaly přítomnost ohybových momentů, vznikaly ve výpočtových modelech chyby blížící se patnácti procentům oproti reálnému stavu konstrukce. [2]

Tyto nesrovnalosti výpočtových modelů s reálným chováním konstrukce vedlo profesora Vierendeela k návrhu obdélníkového rámu s tuhými rámovými rohy, kde by mohly být eliminovány excentricity a chyby výpočtových modelů z nich plynoucí. Návrh konstrukce profesora Vierendeela způsobil, že na počátku dvacátého století byly jeho konstrukce lehčí, než srovnatelné prutové příhradové konstrukce. Je třeba zmínit, že první konstrukce byly projektovány jako mostní konstrukce pro železniční dopravu.

Prvotní experimentální konstrukce vznikla roku 1897 v belgickém městě Tervueren, které leží na hranici s Brusel. Konstrukce s rozponem 29,3 metru byla testována zatížením, které odpovídalo běžnému zatížení od železniční dopravy té doby. Výsledkem zátěžového testu byla nosnost, která přenesla 2,73 krát více zatížení, než bylo původně požadováno a to vedlo k prohlášení Vierendeelovy konstrukce za srovnatelnou s příhradovými konstrukcemi. [2]



Obrázek 4 - Zátěžový test prototypu Vierendeelova mostu ve městě Tervueren

(Zdroj: Steel Construction, Ernst and Sohn, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/stco.201210029>)

Po úspěšných testech nic nebránilo vytvoření první mostní konstrukce dle návrhu profesora Vierendeela. Konkrétně se tak stalo roku 1901, kdy byl zprovozněn most s rozponem 39 metrů ve městě Avelghem. Roku 1910 následovalo otevření mostu o rozponu 41,5 metru ve městě Ousselghem. [2]

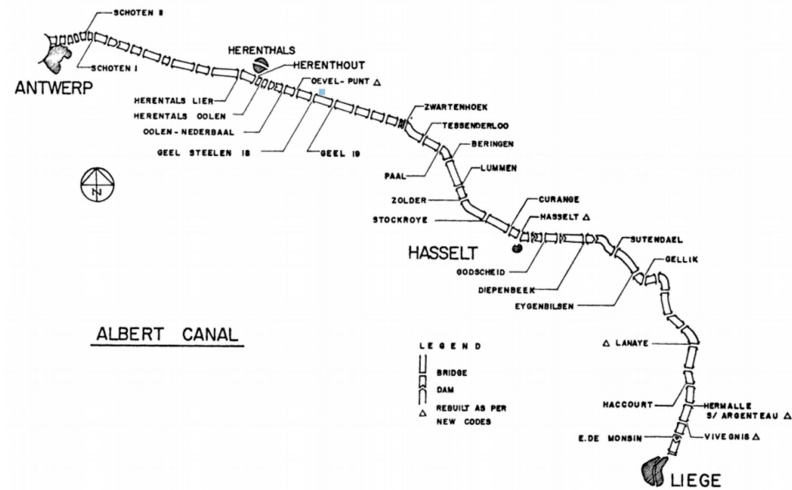


Obrázek 5 – Stavba prvního mostu dle návrhu Arthura Vierendeela ve městě Aalst

(Zdroj: <http://users.telenet.be/karel.roose/vierendeel/waterhoek/info.html>)

Brzy se ukázalo, že obdélníkové tvary konstrukce nejsou nejekonomičtější a koncentrace napětí ve spojích a pásnicích je příliš velká. Začaly se tak stavět konstrukce obloukové, které lépe zvládaly tlakové namáhání v extrémních místech konstrukce. Tyto charakteristiky nesou všechny rané Vierendeelovy konstrukce, kterých do roku 1930 bylo přes padesát v Belgii i belgickém Kongu. Vzhledem k poměrně malému rozpětí (30 – 90 metrů), bylo použití konstrukce Vierendeelova mostu omezené. Přesto se koncepce ujala i mimo Belgii a například v Německu a Československu vzniklo několik konstrukcí na stejné bázi. [2]

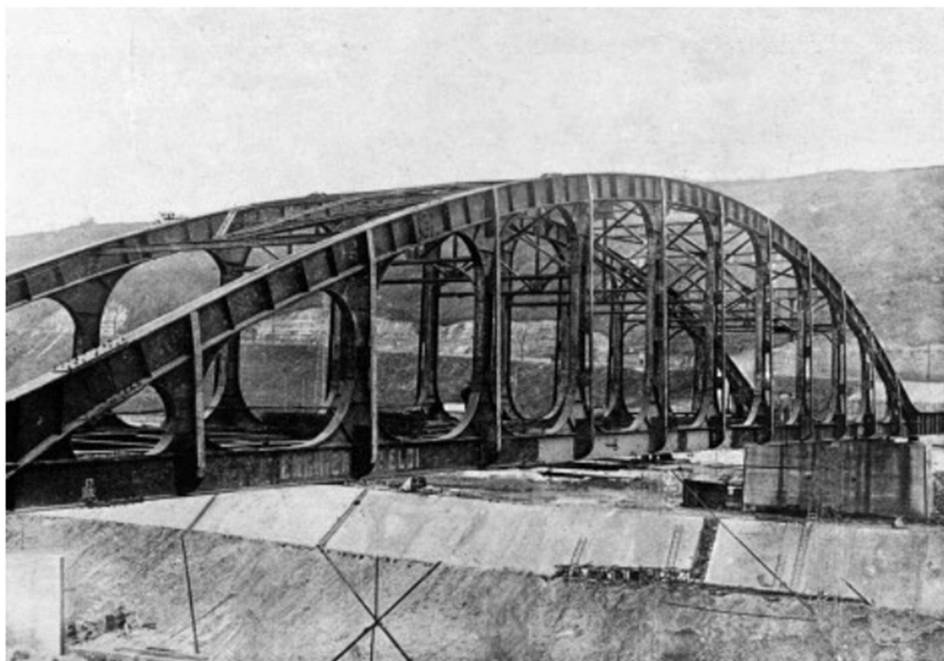
Roku 1929 došlo ke dvěma událostem, které zvýšily popularitu Vierendeelovy konstrukcí. Těmito událostmi byl rozhodnutí o zahájení inženýrských prací na 130 kilometrů dlouhém vodním kanálu z Antverp do Lutychu a rozšíření svařování ocelových konstrukcí pomocí elektrického oblouku. Albertův kanál, jak byl pojmenován, byl projektován se šedesáti pěti mosty, z nichž téměř polovinu tvořily Vierendeelovy konstrukce. [2]



Obrázek 6 - Polohy Vierendeelovo mostů na Albertově kanálu

(Zdroj: https://www.jstor.org/stable/988971?origin=JSTOR-pdf&seq=1#page_scan_tab_contents)

Možnosti obloukového svařování zjednodušilo provádění spojů a dovolilo provádět estetičtější konstrukční prvky. Tvarově je většina Vierendeelovo mostů přes kanál parabolická s proměnným průřezem, který využívá změn v průbězích napětí a efektivně pracuje s využitím průřezu. Typickým příkladem mostů přes Albertův kanál je most Lanaye s rozpětím 63,4 metru. Byl to první most, kde byla u všech spojů použita technologie sváření. Roku 1935 byl postaven ve městě Harenthal Vierendeelův most s největším rozpětím, konkrétně 89,9 metru. [2]



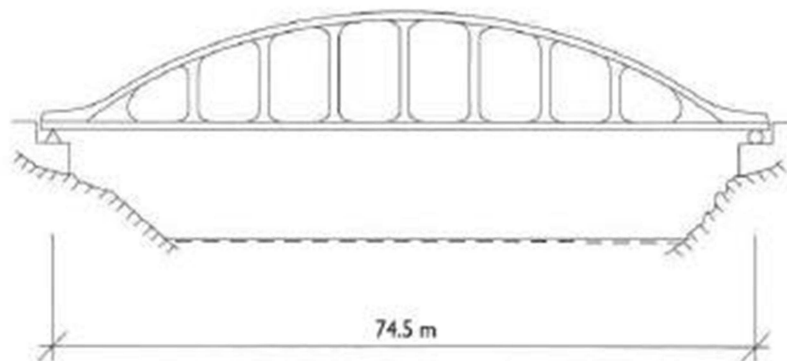
Obrázek 7 - První svařovaný Vierendeelův most na Albertově kanále, 1932

(Zdroj: Steel Construction 2012)

Tím největší rozkvět Vierendeelovo mostů končí, neboť se brzy začaly objevovat konstrukční chyby u předchozích návrhů. Tyto chyby byly způsobeny použitím nekvalitní oceli, která se při svařování ještě oslabila a také nesprávnými technologickými postupy stavby. Všechny tyto chyby vyústily roku 1938 ve zřícení 74,6 metru dlouhého mostu v Hasseltu. Výsledkem vyšetřování bylo zjištění, že za zřícením mostu stojí vysoké změny teploty, nekvalitně provedené svary a vibrace. Díky své vlastní tuhosti v kloubech se v konstrukci projevovaly vlivy zbytkového vnitřního napětí. Díky těmto problémům se výstavba svařovaných mostů v Belgii téměř zastavila, nicméně v Německu probíhala dále. K bezpečnému provádění byly upraveny technologické postupy a zdokonaleno svařování samotné. [2]



Fig. 5.1 The collapse in March 1938 of the Hasselt Road Bridge over the Albert Canal in Belgium.
(Stálbygge. Utdrag ur Stálbyggnad, programskrift I I)



Obrázek 8 - Kolaps mostu v Hasseltu

(Zdroj: https://www.reddit.com/r/civilengineering/comments/7oxxc1/dear_civil_engineers_this_ist_the_hasselt_road/, upraveno autorem DP)

Většina Vierendeelovo mostů v Belgii byla během druhé světové války zničena, nebo později přestavěna, proto jich v původní podobě dnes najdeme pouze minimální množství.

4.4 Problém křehkého lomu u prvních svařovaných Vierendeelovo mostů

Od samotného počátku použití svařovaných spojů na konstrukci Vierendeelovo mostů bylo jasné, že tato technologie sebou nese specifické problémy. V rámci probíhajícího výzkumu bylo zjištěno, že první svařované konstrukce vykazují velké nenadálé trhliny a deformace. Z tohoto důvodu byl výzkumem pověřen profesor Dustin z Bruselské univerzity. Podobný výzkum probíhal v té době také v Německu. Profesor Dustin vyrobil model styčnicku (obr. 7) shodného s tím, který byl použit na mostě Schooten a podrobil ho vysoko-cyklickému stress testu pomocí rezonančního pulsátoru Amsler, který vlastnila Belgická univerzita. [3]



Obrázek 9 – Vlevo: Model styčnicku mostu Schooten připraveného pro vysokocyklický stress test, 1934, Vpravo: Trhlina po 6 milionech cyklů zatížení, 1938

(Zdroj: Steel Construction, 2012)

Po rychlém nástupu technologie svařování a její implementaci při provádění mostních konstrukcí v letech 1933-1936 bylo jen otázkou času, než si neznalost technologie vybere svou daň. První velkou nehodou byl zřícení mostu v Hasseltu (obr. 5), jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole. Týmy inženýrů a techniků z Belgie i zahraničí započali průzkum zřícené konstrukce a došly k velmi překvapivému zjištění. Praskliny byly velmi atypické a vykazovali charakteristiky velmi křehkého poškození bez jakýchkoliv náznaků plastické deformace (obr. 8). [3]



Obrázek 10 - Fragментy spodní pásnice v místě porušení, 1939

(Zdroj: Steel Construction, 2012)

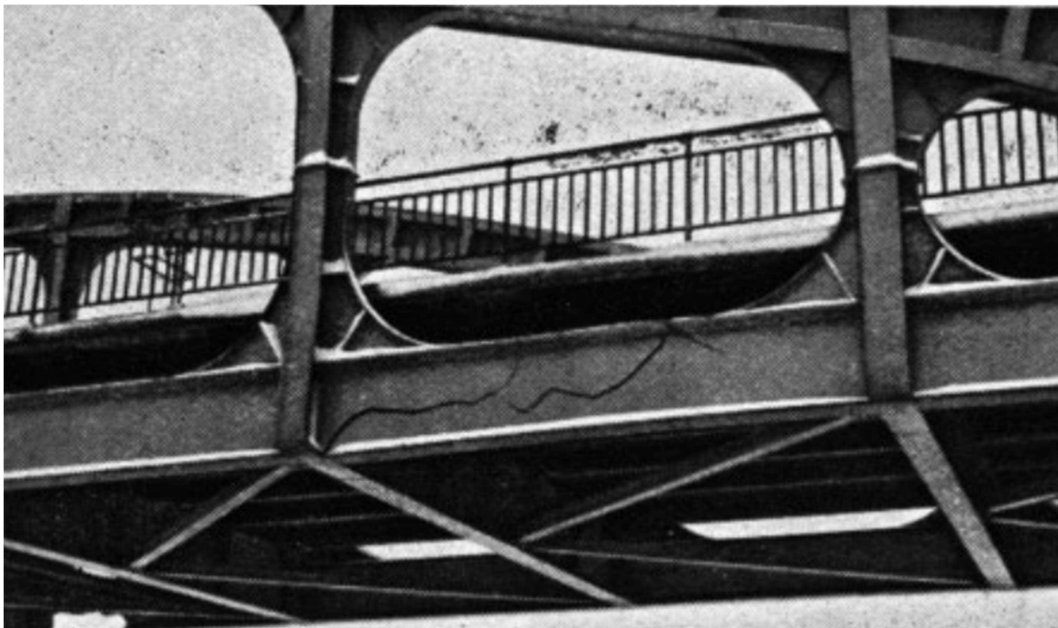
Toto velké selhání bez známé příčiny hluboce šokovalo inženýry v Belgii. Byla stanovena oficiální vyšetřovací komise, která měla za úkol zdůvodnit selhání takového rozsahu. Tato zpráva nikdy nebyla vydána, kvůli příchodu války. V souvislosti s touto nehodou bylo té době publikováno více než čtyřicet vědeckých článků, které se jí zabíraly, ale spolehlivé vysvětlení nebylo v prvních letech nalezeno. Již zmíněný Albertův kanál byl belgickou veřejností oslavován jako velkolepé dílo, ale mosty které na něm byly postaveny, se staly problémem, který musel být vyřešen. Postupem času bylo zjištěno, že podobný nárůst stresových napětí vzniká na dalších pěti Vierendeelovo mostech, které vedli k trhlinám v konstrukci podobných těm ze zříceného mostu Hasselt. [3]

V té době již bylo zřejmé, že kolaps mostu Hasselt nebyl náhoda a pravděpodobně budou následovat další. Roku 1940 byly zjištěny trhliny na dalších osmi ze šedesáti mostů v Belgii. Z dochovaných fotografií jsou zaznamenány trhliny na mostu spojující města Harenthals a Oolen (rozpětí 48 metrů, postaven 1935-1936, obr. 9), mostu Kaullile (rozpětí 48 metrů, postaven 1934-1935, obr. 10). [3]



Obrázek 11 - Trhlina na mostě Harenthals - Oolen, 1940

(Zdroj: Steel Construction, 2012)



Obrázek 12 - Trhliny mostu v Kaullile, 1940

(Zdroj: Steel Construction 2012)

Všechny výše zmíněné poruchy vznikly v lednu 1940, kdy teploty klesaly hluboko bod mrazu (průměrná teplota pro Brusel byla v lednu 1940 -10°C). Třetím mostem, který byl během zimy 1940 poškozen, byl most Hermalle (rozpětí 90 metrů, postaven roku 1936, obr. 11). [3]



Obrázek 13 - Trhliny mostu Hermalle, 1940

(Zdroj: Steel Construction, 2012)

V květnu 1940 započala invazi do Belgie německá armáda a všechny tyto mosty byly zničeny, pravděpodobně samotnými Belgičany, aby zpomalili postup německé invaze. I kdyby tato válečná destrukce nenastala, je pravděpodobné, že by většinu z nich čekal stejný osud jako most Hasselt. Konečná analýza důvodu poškození všech mostů nebyla nikdy dokončena a pravděpodobně to již dnes není ani možné, neboť se žádný původní most z té doby nedochoval. [3]

Dvě publikace, napsány belgickými inženýry, přibližují události a popisují kolapsy Vierendeelovo konstrukcí. Z těchto informací lze shrnout společné rysy, které spojovali porušení mostů Hasselt, Harentals – Oolen, Kaulille a Hermalle.

- Naprostá většina porušení vznikla v mostech, které byly celé vyrobeny pomocí svařování. Může za to zejména popularita konstrukce Vierendeelova mostu, který tvořil 5/6 všech celosvařovaných mostů postavených v Belgii. Dalším důvodem bylo pravděpodobně zbytkové napětí, které vznikalo při svařování konstrukce a díky vysoko-cyklickému namáhání časem narůstalo.
- Většina mechanických porušení se stala při nízkých venkovních teplotách. Typicky je to případ mostů, které byly porušeny v lednu roku 1940, kdy

průměrné teploty dosahovaly hodnoty -10°C . Proti tomuto tvrzení stojí fakt, že kolaps mostu Hasselt proběhl při běžné teplotě kolem $+5^{\circ}\text{C}$.

- Všechny tyto mosty zkolabovaly, nebo byly vážně poškozeny pouze při působení vlastní stálé tíhy. Žádné nadměrné zatížení na ně v době poškození nepůsobilo.
- U všech mostů byla použita Thomasova ocel o pevnosti 420 – 500 MPa.
- Všechny mosty trpěly poškozením spodní pásnice, kde se trhliny šířily v největší míře. Nejnamáhanějšími místy byly svařované spoje tuhých rohů, kde se hromadilo zbytkové napětí. Dalším problémem bylo zbytkové napětí při válcování vysokých nosných profilů (DIE 800, DIN 1000), které umocňovalo celkové namáhání konstrukce.

Dokonce 15 let po kolapsu mostu Hasselt nebyly známé přesné příčiny, strukturálních porušení. V průběhu let se kvalita ocele a techniky svařování výrazně zlepšily, nicméně vysvětlení problematiky křehkého lomu přinesl až výzkum mechaniky v osmdesátých letech. [3]

4.5 Ukázky Vierendeelovo konstrukcí v České republice

Jak již bylo zmíněno, Vierendeelův koncept se před druhou světovou válkou rozšířil do Německa a do Československa. Z tohoto důvodu jsou dodnes na našem území konstrukce, které využívají konstrukci Vierendeelova nosníku. Názorným příkladem je most v Nových Heřminovech (obr. 14) zbudovaný roku 1931. Využívá koncept obloukové konstrukce ze železobetonu. V současné době se mluví o jeho demolici kvůli plánované přehradní nádrži, která má v okolí vzniknout. [4]



Obrázek 14 - Most v Nových Heřminovech, 2017

(Zdroj: https://bruntalsky.denik.cz/zpravy_region/jurecka-sliboval-lepsi-komunikaci-s-herminovy-20171215.html)

Dalším zajímavým mostem je Most Sokolovských hrdinů (obr. 15), nejprve pojmenovaný most T. G. Masaryka. Postavený byl roku 1924 a jeho rozpětí činí 56 metrů. V roce 1991 byl zapsán jako národní technická kulturní památka. K výraznému poškození mostu došlo v roce 1997 stoletou povodní. V letech 2003 a 2004 došlo k velké rekonstrukci a zároveň ke zdvihnutí mostu o 2 metry. Dříve most pro automobily se rekonstrukcí změnil na most pro pěší. [5]



Obrázek 15- Most Sokolovských hrdinů, Darkov, 2012

(Zdroj: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Most_Sokolovsk%C3%BDch_hrdin%C5%AF_\(Darkov\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Most_Sokolovsk%C3%BDch_hrdin%C5%AF_(Darkov)))

Lze najít i nově vzniklé konstrukce, které používají jako nosný prvek Vierendeelův nosník. Lávka pro pěší Kočičí oči (obr. 16) na dálnici D8 spojuje Chlumecko a Všebořice. Cílem stavby bylo zaujmout netradičním designem a také nutnost vyhnout se střednímu nosnému pilíři, kvůli špatnému podloží. Konstrukčně se most skládá z prostých polí a dvou konzol, které se spojují ve středu a tím tlumí nerovnoměrné sedání podpor. Hlavní nosné prvky jsou tvořeny čtyřmi trubkami o průměru 406 mm s proměnnou tloušťkou 14 až 20 mm. Konstrukce získala roku 2007 ocenění European Steel Design Awards. [6]



Obrázek 16 - Most Kočičí oči, 2007

(Zdroj: https://www.casopisstavebnictvi.cz/kocici-oci-maji-cenu-eccs_A457_I10_07)



Obrázek 17 - Most Kočičí oči, 2007

(Zdroj: https://www.casopisstavebnictvi.cz/kocici-oci-maji-cenu-eccs_A457_I10_07)

Vierendeelovy nosníky lze najít i u pozemních staveb. U nás je pravděpodobně nejznámější budova Federálního shromáždění (obr. 17) v Praze. Architektury byli Karel Prager, Jiří Kadeřábek a Jiří Albrecht a dnes budova spadá pod správu Národního muzea. Jedná se o dvoupodlažní nástavbu budovy Peněžní burzy. Konstrukce byla sestavena na zemi a pomocí zdvihacích zařízení vyzvednuta do výšky a usazena. [7]



Obrázek 18 - Budova bývalého Federálního shromáždění, 2014

(Zdroj:[https://cs.wikipedia.org/wiki/Feder%C3%A1ln%C3%AD_shrom%C3%A1%C5%BEd%C4%9Bn%C3%AD_\(budova\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Feder%C3%A1ln%C3%AD_shrom%C3%A1%C5%BEd%C4%9Bn%C3%AD_(budova)))

4.6 Ukázky Vierendeelovo konstrukcí ve světě

Stejně jako v České republice lze i ve světě najít ukázkové konstrukce. Naprostá většina původních mostů v Belgii byla za války zničena a konstrukce, z konstrukcí, které byly svařované, se nedochovaly žádné. Přesto zbylo pár původních mostů, které byly spojované nýty. Příkladem je most ve městě Grammene (obr. 18) o rozpětí 56,16 metru, který byl vybudován roku 1922. Po druhé světové válce byl částečně přestavěn a od té doby chátral. Poslední velkou rekonstrukcí prošel v roce 2001 a byla mu navracena původní podoba. [8]



Obrázek 19 - Vierendeelův most ve městě Grammene, 2006

(Zdroj: https://en.wikipedia.org/wiki/Vierendeel_bridge)

Dalším zajímavým Vierendeelovo mostem je parabolický most pro železniční dopravu v belgickém Lutychu na ostrově Monsin Island (obr. 19). V současné době je tento most již mimo provoz.



Obrázek 20 - Most Monsin Island v Lutychu

(Zdroj: <https://structurae.net/structures/monsin-island-railroad-bridge>)

Poslední ukázkou použití Vierendeelova nosníku ve světě je budova The Plaza Corporate Center Building (obr. 20) ve městě Kansas City postavená roku 1963. Budova má sedm pater a je tvořena železobetonovým skeletem složených z Vierendeelovo nosníků. Na fotce budovy je patrné zúžení svislých prvků ve středu pole, kde je nulový ohybový moment a lze takto ušetřit materiál. [9]



Obrázek 21 - The Plaza Corporate center Building, Kansas City, 2014

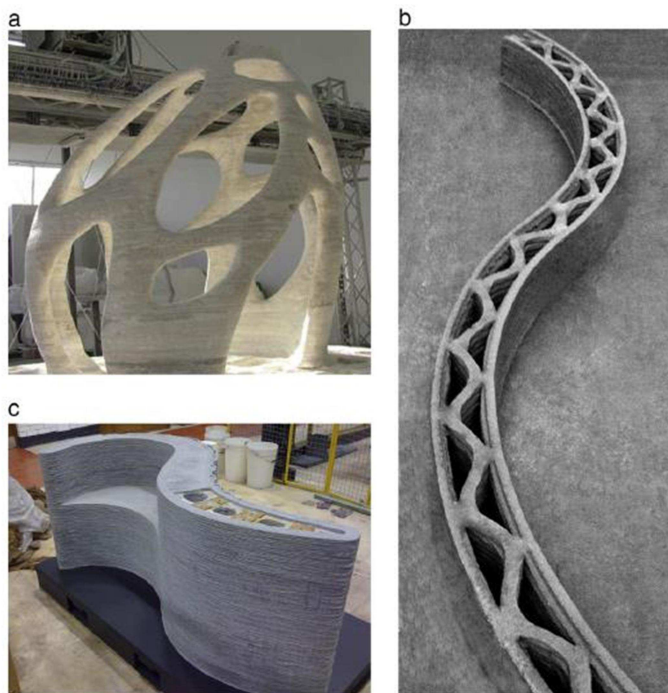
(Zdroj: <https://www.bizjournals.com/kansascity/news/2014/09/05/plaza-corporate-center.html>)

5 Použití 3D tisku ve stavitelství

Použití 3D tisku jako takového není žádná novinka. V posledních dvaceti letech se stal velmi používanou a zaběhlou technologií napříč všemi odvětvími průmyslu. Pro příklad lze uvést průmysl automobilový, zbrojní a nemalé zastoupení má i pro medicínské aplikace. V současnosti začíná pomalu pronikat i do průmyslu stavebního díky svým výhodám, kterých si začínají firmy postupně všímat. Určité formy 3D tisku se zcela jistě začnou na trhu prosazovat během příští dekády. [10]

V současnosti nejrozšířenějším materiálem, který se používá pro 3D tisk ve stavebnictví je beton, nebo směsi na jeho bázi. Nejprve byly testovány objekty menších rozměrů, ale nyní už tiskárny zvládají objekty ve velikosti běžných rodinných domů. Jedny z prvních společností na trhu s 3D tiskem budov byly firmy *Contour Crafting* (Univerzita Jižní Kalifornie – dále USC), *Concrete Printing* (univerzita Loughborough) *D-Shape* (podnikatel Enrico Dini) a. Všechny výše zmíněné firmy se zasloužily o rozšíření povědomí o této technologii mezi architekty, projektanty a stavební firmy. Stejně jako se běžný 3D tisk rozšiřuje do domácností, rozšiřují se i řady firem a jednotlivců, které se zabývají průmyslovým využitím ve stavitelství. [11]

[10]



Obrázek 22 - D-shape (a), Contour Crafting (b), Concrete Printing (c)

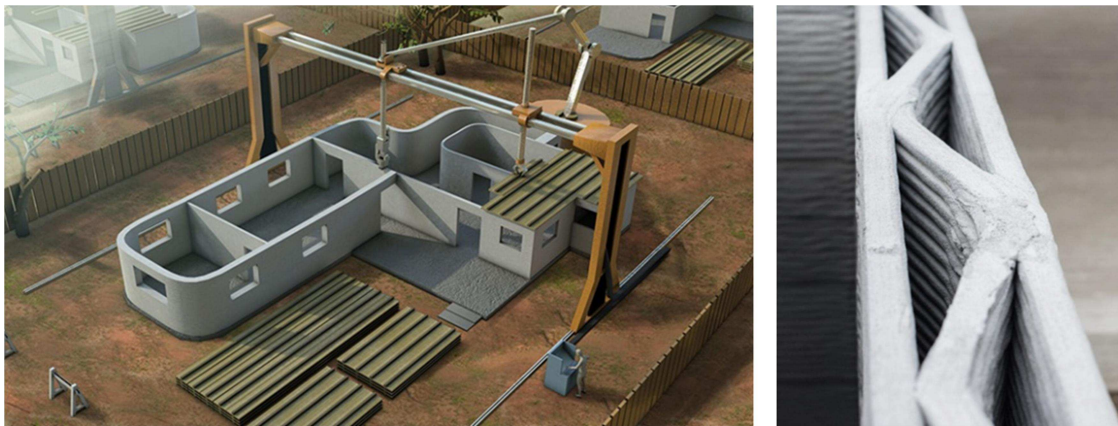
(Zdroj: www.researchgate.net/publication/303738799, 2016)

5.1 Technologické firmy zabývající se 3D tiskem stavebních konstrukcí

5.1.1 Contour Crafting

Contour Crafting (CC) je jedna z nejstarších dosud existujících technik 3D tisku betonu (obr. 23). První zmínky o této technologii sahají do roku 1998, kdy jí začal vyvíjet profesor USC Behrokh Knoshnevis. Od té doby technologie Contour Crafting prošla velkým zdokonalením ve vývoji. Jedná se o aditivní technologii, která vrství materiál a tím vzniká výsledná produkt. Díky současnému vyhlazování vrstev vzniká téměř hladký povrch, který může být později dále upravován. Směs, která je k tisku používaná se skládá z portlandského cementu typu 2, písku, vody a plastifikátorů. Složky jsou v poměrech 37 %, 41 %, 3 % a 19 %. Technologie umožňuje přidávat do směsi různé druhy vláken, které výrazně zlepšují celkové vlastnosti a chování konstrukce. Tisková hlava může sestávat z více průměrů a vlastností trysek, kdy je možné tisknout obvodové vrstvy jinak tlusté, popřípadě jinak vyztužené vlákny. Díky možnosti natočit trysku do libovolného sklonu lze tisknout jak ortogonální, tak

neortogonální tvary, jako například kupole a klenby. Výzkum a vývoj technologie na USC je rozdělen do tří fází. [10] [12] [13]



Obrázek 23 – Vlevo - Technologie Contour Crafting, Vpravo - Detail tištěné stěny

(Zdroj: <http://contourcrafting.com>, 2017), (Zdroj: www.huffingtonpost.com, 2015)

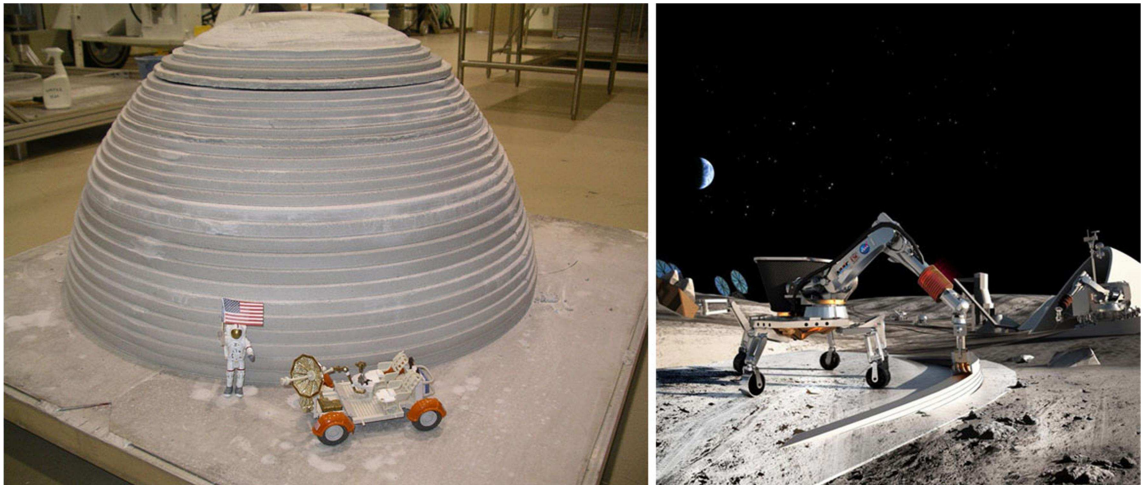
Cílem první fáze byl rozvoj základní CC technologie pro tisk jednoduchých struktur a samostatné stavby. Systém portálového jeřábu se pohybuje v jedné ose a tryska umístěná na pojezdovém mechanismu se pohybuje ve směru druhém. Změna výšky probíhá postupným zasouváním ramene ve svislém směru. Zároveň druhé osazené rameno vkládá výztuže, prostupy a jiné netisknutelné konstrukce (obr. 23). [10] [12]

Druhá fáze má za cíl rozšířit tisk na více budou současně, aby vznik tisk celé rezidenční čtvrti za pomoci stejné technologie. Zahrnut má být i automatický systém instalace nosníků, rozvodů elektřiny, topení a ZTI. Tímto způsobem by mohly být tištěné budovy většího rozsahu, například bytové domy, školy, administrativní celky atd. [12]

Třetí, konečná fáze, má za cíl technologii 3D tisku rozšířit jako běžný standard, spolu s ostatními moderními metodami stavby. Během tisku budou do konstrukcí zabudovávány veškeré technologie, rozvody chytrého domu, senzory pro real-time monitoring všech stavů, které mohou v průběhu užívání nastat.

Momentálně se technologie nachází v pozdní první fázi, kdy je možné pomocí 3D tisku vytvořit hrubou stavební kostru, která má k finálnímu domu ještě poměrně daleko.

Technologie Contour Crafting nemusí mít uplatnění pouze na zemi, ale i ve vesmíru. V posledních letech se do konstrukce staveb na bázi CC zapojila i americká NASA, která by díky této technologii mohla vybudovat základny na Měsíci i Marsu. Doprava velkých dílů je poměrně drahá a do budoucna by mohl 3D tisk snížit náklady na vesmírné expedice. Směs, ze které by mohly stavby vzniknout, je kombinací betonu na bázi síry a měsíčního prachu, kterého je na Měsíci dostatek. [14]



Obrázek 24 - Skutečný model vesmírné základny (vlevo), vizualizace stavby na Měsíci (vpravo),

(Zdroj: <https://thenewstack.io/3d-printed-buildings-made-by-robots-for-the-earth-moon-and-mars/>, 2014)

5.1.2 D-Shape

D-Shape je proces 3D tisku vyvinutý Enricem Dini, používající k tisku vytvrzování jednotlivých vrstev prášku za pomoci pojidla. Vrstvy písku se uloží v požadované tloušťce a poté vytvrdí pomocí tiskové hlavy, na které je uloženo 300 jednotlivých trysek. Tato tisková hlava je poté spojena s pevným hliníkovým rámem a usazena nad tiskovou plochu a do míst, které mají být výsledným tvarem, aplikuje pojidlo pro vytvrzení. Po dokončení procesu je výsledný výrobek vykopán a očištěn od okolního materiálu. Technologie D-Shape by mohla být užita pro výrobu prefabrikátů, popřípadě celých částí budovy přímo na stavbě. [12] [13]



Obrázek 25 – Most pro pěší v Madridu vytištěný pomocí technologie D-Shape

(Zdroj: <https://all3dp.com/3d-printed-pedestrian-bridge>, 2016)

5.1.3 Concrete Printing

Concrete Printing (CP) je aditivní proces založený na vytlačování materiálu a jeho postupném vrstvení. Technologie byla vynalezena na univerzitě Loughborough. Princip tisku je podobný jako u Contour Printing, nicméně pracuje s vyšším rozlišením, které dovoluje tvořit více volných tvarů. Kvalita povrchu je velmi závislá na tloušťce tisknuté vrstvy, stejně jako u běžného 3D tisku. [12] [13]



Obrázek 26 - Segment vytištěný pomocí technologie Concrete printing

(Zdroj: <http://www.lboro.ac.uk/enterprise/3dcp/>, 2016)

Pro účely této tiskové metody byla na oddělení pozemního stavitelství na univerzitě Loughborough vyvinuta speciální betonová směs. Po rozsáhlých testech vykazovala výsledná použitá směs pevnosti 100 MPa v tlaku a 12 MPa v ohybu po osmadvaceti dnech. Bohužel jsou zatím tisknuté části podstatně slabší, než prefabrikované dílce. [12]

5.1.4 Apis Cor

Apis Cor je ruská společnost se základnou v San Francisku, která navrhla dům s tiskovým časem necelých 24 hodin (obr. 29). Tiskárna je 4,5 metru dlouhá, 1,5 metru vysoká a váží téměř 2 000 kg. Lze ji jednoduše transportovat za pomoci jeřábu a nákladního auta. Jedná se o tzv. polární 3D tiskárnu, která se otáčí na centrálním pilíři a je schopna pokrýt tiskovou plochu o obsahu 132 m², navíc lze tiskárnu postavit za pouhých 30 minut (obr. 28). [15] [13]



Obrázek 27 - Tiskárna firmy Apis Cor při tisku

(Zdroj: <http://apis-cor.com>, 2017)

Testovací dům o rozloze 38 m² byl „postaven“ v ruském městě Stupino. Celý objekt byl vtištěn v jednom kuse za necelých 24 hodin. Tým Apis Cor ho poté osadil výplňovými konstrukcemi, vybavil a vymaloval. Celková cena se poté pohybovala kolem částky 10 tisíc dolarů (přibližně 260 tisíc korun). Dle tvrzení firmy Apis Cor lze touto technologií ušetřit až sedmdesát procent celkových nákladů na stavbu. Uplatnění by domy tyto domy mohly najít v místech, kde je potřeba velmi rychle vystavět obydlí, typicky po přírodních katastrofách, nebo při současném nedostatku pracovních sil a bytů. [15] [13]



Obrázek 28 - Vytisknutý dům tiskárnou firmy Apis Cor

(Zdroj:<https://sanfrancisco.cbslocal.com/2017/03/07/3-d-printed-house-apis-cor-san-francisco-bay-area-startup/>, 2017)

5.1.5 WASP

Tiskárna italské firmy WASP (obr. 30) je největší tiskárnou delta typu na světě a je příznačně nazývána BigDelta. Její konstrukce je složena z příhradových nosníků o výšce 12 metrů s tiskovou plochou o průměru 7 metrů. Jako stavební materiál nepoužívá běžné směsi betonu, nýbrž směs písku, hlíny a bláta. Cílem projektu WASP (World's Advanced Saving Project) je vyvinout levný způsob výroby domů v zemích třetího světa. Pro tento účel byla postavena delta tiskárna o výšce 6 metrů, z důvodu snadného transportu. [12] [13]



Obrázek 29 - Tiskárna BigDelta firmy WASP

(Zdroj:<https://www.3ders.org/articles/20160810-wasp-advances-work-on-3d-printed-eco-village-with-the-massive-bigdelta-3d-printer.html>, 2016)

5.1.6 WinSun

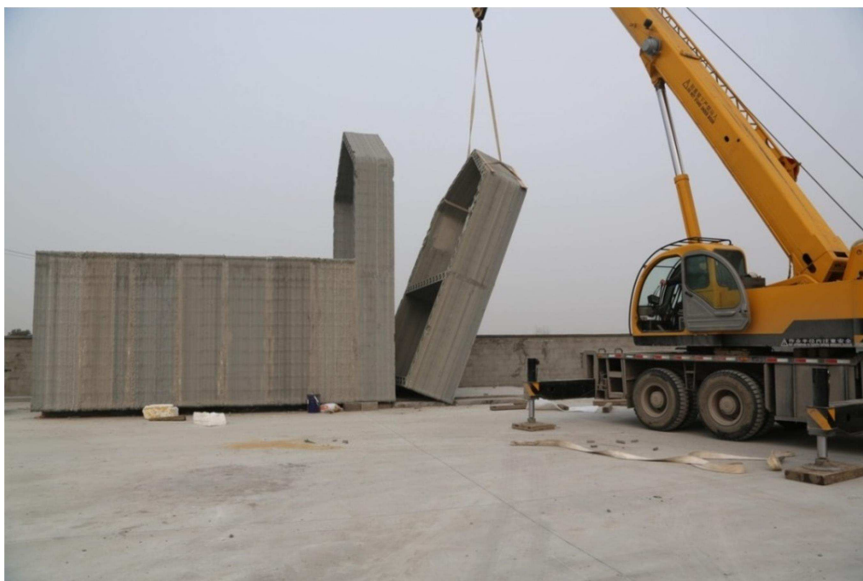
WinSun, dříve známá pod názvem Yingchuang, je čínská společnost, která jako první v roce 2014 dokázala vytisknout celý dům. Používají technologii na stejné bázi jako Contour Printing a další, tzn. postupné vrstvení materiálu a pro výplň je použit vzor „zig-zag“. [12] [13]



Obrázek 30 - WinSun tisk a budova

(Zdroj: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-house-companies-120220184>, 2018)

Pro tisk používají směs cementu, písku a vláken. Zejména skelná vlákna a ocelové výztuže dodávají konstrukcím dostatečnou pevnost pro tisk velkých celků. Touto technikou dokázali vytisknout několik velkých domů o pěti patrech. Přístup firmy ke stavbě je odlišný od ostatních firem, které se snaží většinou vytisknout celý dům v jednom kuse. Firma WinSun používá 3D tisk k výrobě prefabrikovaných segmentů, které potom převáží a montuje přímo na staveništi. [12] [13]



Obrázek 31 - Stavba prefabrikátu firmy WinSun

(Zdroj: <http://www.earch.cz/cs/stavitelstvi/technologie-3d-tisku-v-architekture-stavebnictvi>, 2018)

5.2 Omezení současné technologie 3D tisku betonových a konvenčních konstrukcí

I přes obrovské rozšíření konvenčního tisku a tisku cementových směsí, stále nemohou současné technologie konkurovat standardní monolitické betonáži a výrobě prefabrikovaných konstrukcí. Problémem zůstává i vyztužování u konstrukcí namáhaných tahem a ohybem. Nejslibnějším vývojem těchto konstrukcí se zdá dodatečné vkládání předpínacích lan do vytištěných prefabrikátů. Dalším možným řešením u méně namáhaných konstrukcí by mohlo být vkládání, či nastřelování ocelových výztuží do tištěné směsi. [16]

Dalším problémem při FDM tisku cementových směsí je celková nehomogenita výsledné konstrukce. Tato je řešitelná pomocí dodatečného zhutňování, nicméně tisknutá konstrukce je velmi náchylná k vibracím dle chvíle, než získá výslednou pevnost. Nehomogenitu je nutné řešit i z dalších hledisek. Výsledná plocha není hladká a je potřeba ji nějakým způsobem upravit a ošetřit. Jednoduchým řešením by mohlo být omítání, nicméně při dalším zásahu lidské síly se ztrácí předpokládaná výhoda 3D tisku a tou je nízká cena oproti konvenčním konstrukcím. Dalším následkem nehomogenity výsledné konstrukce je i její náchylnost vůči pronikání vlhkosti, klimatickým vlivům a tím snížená trvanlivost konstrukce. [16]

Technologické omezení současných tiskáren spočívá i v tisku šikmých stěn a konstrukčních přesahů. Tento nedostatek je poměrně snadno řešitelný souběžným tiskem podpůrného materiálu, ale tím vzniká nežádoucí odpadní materiál, který se snaží 3D tisk omezit na minimum. Cena tiskových cementových směsí je nyní poměrně vysoká, díky nutnosti užívat kamenivo drobné frakce. Řešením tohoto cenového problému by mohlo být nahrazení drceného kameniva betonovým recyklátem, jako u konvenčních směsí. Pro budoucí použití recyklátu je nicméně nutné vyřešit nasákavost a pevnost, která v současnosti není certifikována. [16]

Velkým problémem tištěných konstrukcí je neexistující kontrola kvality, která probíhá u běžně používaných materiálů a technologií. Pro navrhování tištěných konstrukcí též neexistují normy, které udávají metodiku zkoušení, tepelnětechnické návrhy či návrhy statické. [16]

Pokud se zaměříme na konvenční konstrukce, vyhlídky jsou zde poměrně slibné, neboť zde lze efektivně produkovat typizované stavební dílce. Jedná se převážně o ortogonální stěnové a stropní konstrukce, kde nejsou kladeny takové nároky na únosnost a využití průřezu. Hlavní výhodou by zde mohlo být omezení lidské práce, jejíž cena neustále stoupá a prodražuje tak výrobu i produkty. V návaznosti na kompletní automatizaci lze přičíst k plusům i omezení celkového času na výrobu jednotlivých prvků. Pokud již byla zmíněna výroba ortogonálních konstrukčních prvků, je potřeba zmínit i efektivní výrobu atypických konstrukcí, které doplní běžně používané dílce. [16]

5.3 Možnosti vývoje 3D tisku stavebních a architektonických konstrukcí

Pro plné využití prvků vyrobených technologií 3D tisku je nutné vyřešit výše zmíněné problémy, zejména pak výroba prvků namáhaných ohybem a tahem. Dalším velkým cílem bude též zvýšení tiskové rychlosti, která je závislá na tuhosti konstrukce tiskárny a potenciálu tuhnutí tiskových cementových směsí. Využití technologie 3D tisku je velmi reálné u prefabrikovaných sendvičových panelů s vloženou izolací, které jsou na výrobu poměrně jednoduché a rychlé. [16]

Všechny výše zmíněné metody a technologie využívají pro tisk cementové směsi a jejich deriváty. Pravděpodobnější variantou se jeví užití kompozitních materiálů, které jsou na vzestupu a neustále se vyvíjejí. Pro příklad lze uvést tzv. funkčně gradované materiály, které umožňují rozmístění prvků s odlišnými vlastnostmi napříč celou konstrukcí. V praxi by to mohlo znamenat lokální vyztužení velmi namáhaných míst, přičemž v jiné části konstrukce by mohl mít materiál zvýšené tepelněizolační vlastnosti, či odolnost proti chemickým látkám. [16]

Dalším směrem, kterým by se technologie 3D tisku mohla zabývat je snížení ekologické zátěže využitím recyklovaných surovin a tím snížit potřebu základních surovin potřebných ke stavbě. Velmi slibnou možností využití jsou v současnosti zkoumané tzv. 4D materiály, které umožňují změnu vlastností v závislosti na okrajových podmínkách, kterými mohou být teplota, dynamické zatížení apod. [16]

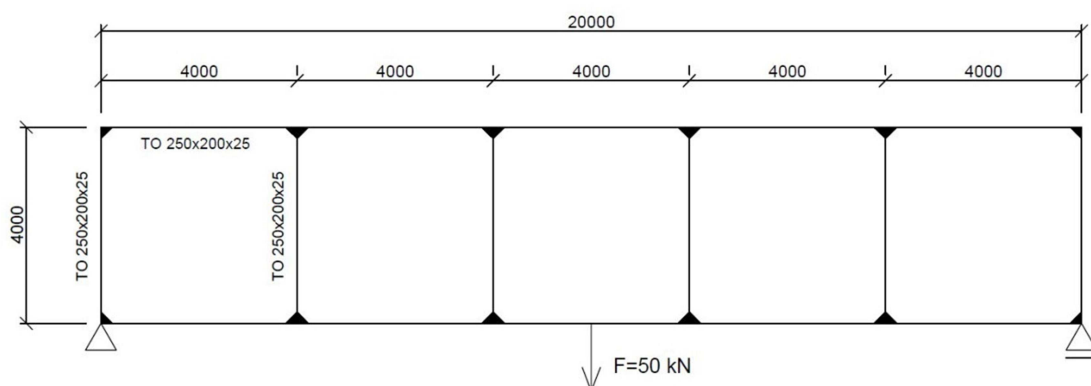
6 Statická analýza Vierendeelova nosníku a vliv diagonálních prvků na průběhy vnitřních sil a deformace

Tato kapitola se zabývá rozбором statických vlastností Vierendeelova nosníku z hlediska vnější a zejména vnitřní statické neurčitosti, průběhem vnitřních sil a průhybem. Důležitou částí je porovnání dvou typů nosníků. První variantou je klasický Vierendeelův nosník se svislými diagonálami a poté varianta s přidáním tlačných diagonálních prvků, které výrazně ovlivní celkové chování konstrukce a její vlastnosti.

Staticky lze konstrukci Vierendeelova nosníku považovat za rovinnou staticky neurčitou prutovou soustavu s tuhými rámovými rohy. Tuhost rohů je dána celkovou koncepcí, kdy svislé prvky přenášejí všechny druhy vnitřních sil, tzn. normálové, posouvající a momentové.

Pro statickou analýzu je třeba definovat konstrukci a všechny okrajové podmínky, které do tohoto vstupují. Z důvodu návaznosti na experimentální část této práce vychází vzorová statická konstrukce z rozměrových omezení 3D tiskárny, na které budou vzorky tištěny.

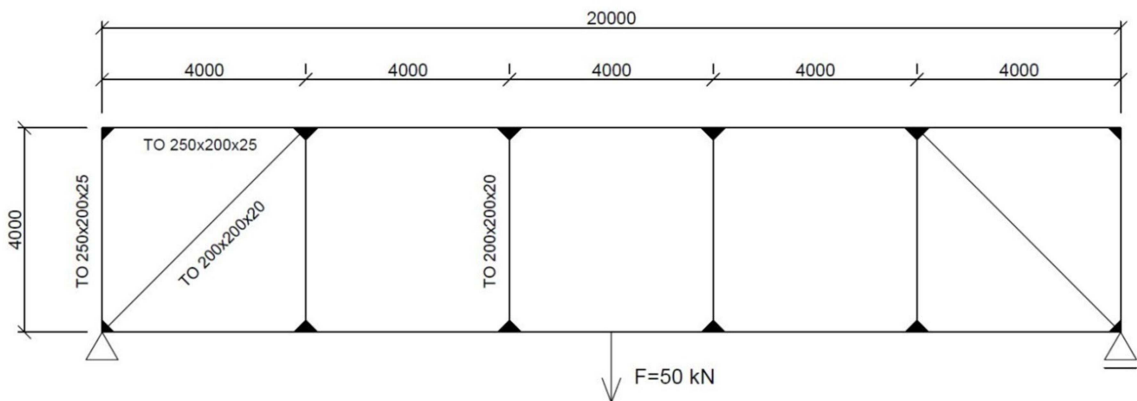
První zkoumaná konstrukce tedy bude Vierendeelův nosník o pěti polích, délce 20 m, výšce 4 m a zatíženého silou uprostřed spodní pásnice. Jako materiál je zvolena ocel s profilem TO 250x200x25 pro všechny prvky.



Obrázek 32 - Statické schéma a rozměry klasického Vierendeelova nosníku

(Zdroj: autor Diplomové práce)

Druhou variantou bude rozměrově totožný nosník, pouze jsou do krajních polí přidány diagonální prvky. Dále jsou pro výplňové svislé prvky využity pruty o subtilnějším profilu, konkrétně TO 200x200x20. Tento profil je též použit u přidávaných diagonálních prvků.



Obrázek 33 - Statické schéma a rozměry Vierendeelova nosníku s diagonálními prvky

(Zdroj: autor Diplomové práce)

6.1 Stupeň statické neurčitosti

Stupeň statické neurčitosti uzavřené prutové soustavy, v níž střednice prutů vytváření uzavřené obrazce – příhrady (obdélník, čtverec, trojúhelník, lichoběžník, kruh aj.), lze vyjádřit vztahem [17]

$$n_s = s = 3u - p_k + (a - 3), \quad (1)$$

kde

u – počet uzavřených příhrad

p_k – počet vnitřních kloubových připojení přepočtených na jednoduché vnitřní klouby

Rovnici (1) lze rozdělit na část vnitřní a vnější statické neurčitosti, které po součtu tvoří celkovou statickou neurčitost soustavy.

Vnitřní statickou neurčitost lze tedy vyjádřit vztahem

$$n_{s,v} = 3u - p_k, \quad (2)$$

vnější statická neurčitost je pak

$$n_{s,z} = a - 3 = a_1 + 2a_2 + 3a_3 - 3, \quad (3)$$

pak

$$n_s = n_{s,v} + n_{s,z} \quad (4)$$

Z výše definovaných rovnic lze vyjádřit statickou neurčitost pro oba typy nosníku. Pro klasický Vierendeelův nosník o pěti polích je tedy statická neurčitost rovna

$$n_s = 3 * 5 - 0 + (3 - 3) = 15 \quad (5)$$

$$n_{s,v} = 15 \quad (6)$$

$$n_{s,z} = 0 \quad (7)$$

Definovaný nosník o pěti polích je tedy vnějšně staticky určitý a vnitřně patnáctkrát staticky neurčitý. Vnitřní statická neurčitost narůstá přidáním každého dalšího pole o tři staticky neurčité veličiny.

Pro variantu Vierendeelova nosníku o pěti polích s vnitřními diagonálami je tedy statická neurčitost rovna

$$n_s = 3 * 7 - 0 + (3 - 3) = 21 \quad (8)$$

$$n_{s,v} = 21 \quad (9)$$

$$n_{s,z} = 0 \quad (10)$$

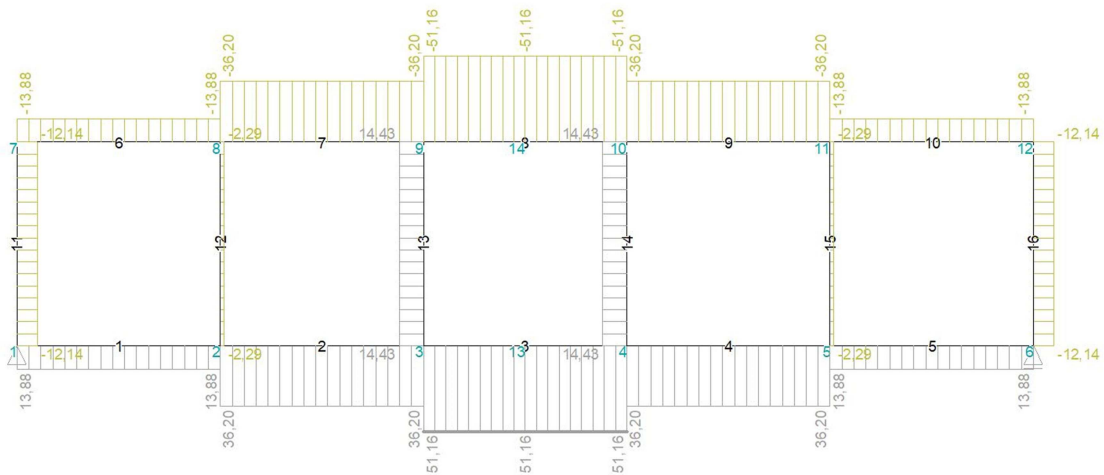
Definovaný nosník o pěti polích s vnitřními diagonálami je tedy vnějšně staticky určitý a vnitřně jednadvacetkrát staticky neurčitý.

6.2 Průběhy vnitřních sil a deformace

Při porovnávání výstupů ze statického programu FIN 2D je nutné uvážit okrajové podmínky celkové statické analýzy. Jedná se zejména o metodiku výpočtu, kterou používá výpočtový program. Dle ČSN EN 1990 uvažuje metodiku mezních stavů, kde pro stálé silové zatížení uvažuje s koeficientem 1,35. Za běžných okolností by výpočet vnitřních sil probíhal z mezního stavu únosnosti, ale vzhledem k tomu, že analýza je prováděna čistě staticky, budou prezentovány průběhy vnitřních sil bez normových koeficientů, tzn. v tomto případě z mezního stavu použitelnosti. [18]

6.2.1 Normálové síly

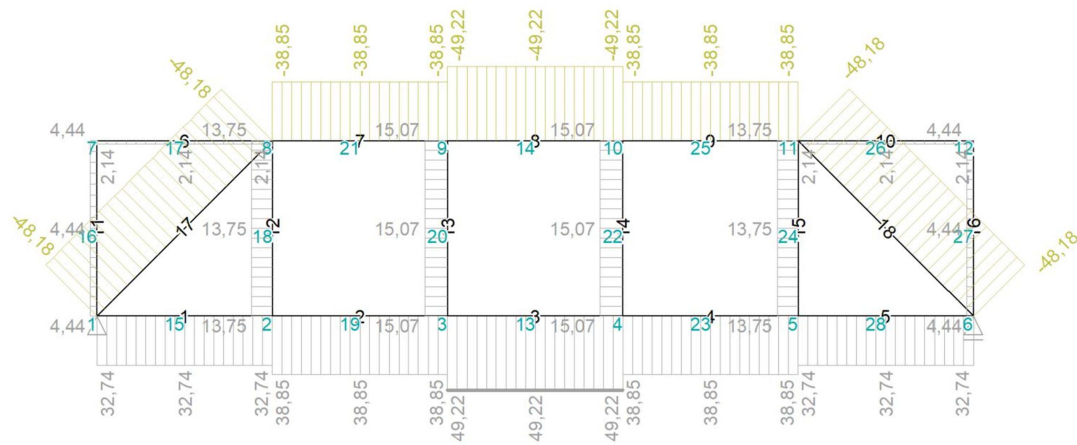
Název: (N Rea/ZS G1 silové-stálé MSP)



Obrázek 34 - Průběhy normálových sil – Vierendeelův nosník

(Zdroj: autor Diplomové práce)

Název: (N Rea/ZS G1 silové-stálé MSP)



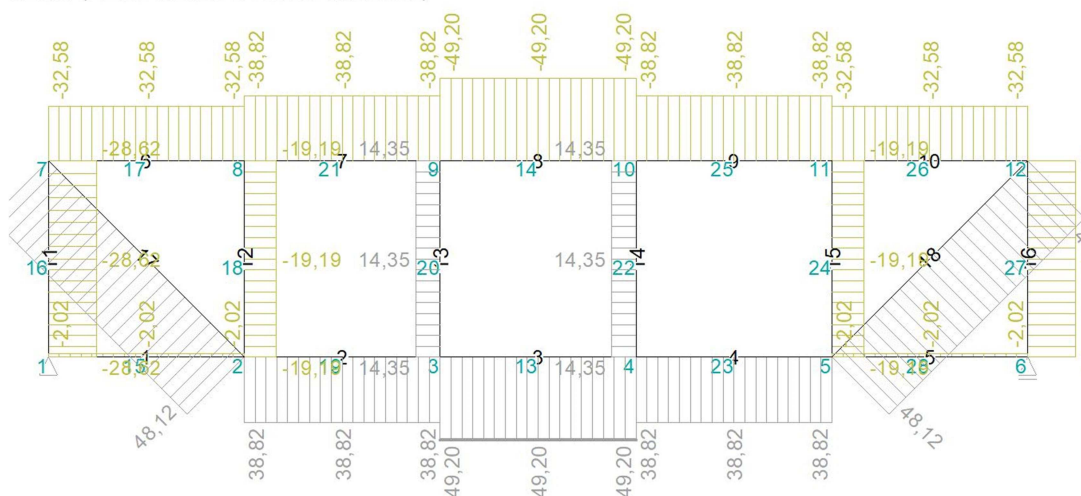
Obrázek 35 - Průběhy normálových sil – Vierendeelův nosník s diagonálami

(Zdroj: autor Diplomové práce)

Při porovnání průběhu normálových sil po průřezu prvků celé konstrukce je na první pohled patrné, že přidané diagonální prvky přebraly nosnou funkci celého pole, do kterého byly vloženy.

Další výraznou změnu lze pozorovat v rozložení tahových napětí ve spodní pásnici konstrukce. Došlo ke zvýšení tahových napětí krajních polí spodní pásnice. Na první pohled by se toto mohlo zdát jako nevýhoda, nicméně u klasického Vierendeelova nosníku jsou prvky předimenzovány, kdežto střední pole se bude pohybovat na hranici mezních stavů. Díky převodu napětí lze také použít subtilnější profily na pole, kam byly vloženy diagonální prvky, což znamená úsporu materiálu.

Název: (N KN3 Rea/ZS G1 silové-stálé MSP)



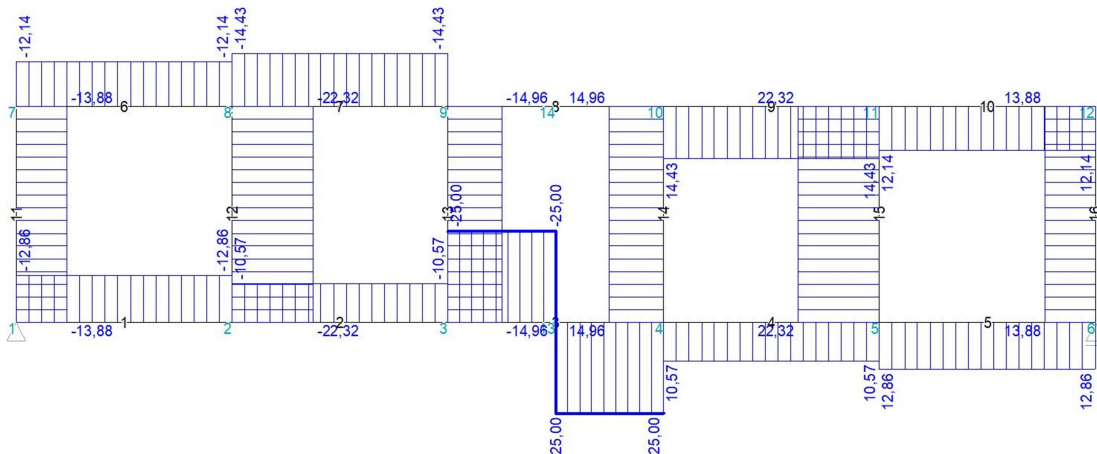
Obrázek 36 - Průběhy normálových sil – Vierendeelův nosník s diagonálami (tažené)

(Zdroj: autor Diplomové práce)

Pro porovnání průběhu normálových sil je uvedena i varianta, kdy jsou vloženy diagonální prvky v obráceném směru (obr. 37). Touto změnou dojde k transformaci tlakových sil v těchto prvcích. Toto řešení může být výhodné pro určité typy konstrukcí, kde při vyšším zatížení bude narůstat vliv vzpěrného tlaku. Tyto prvky lze tedy efektivně nahradit jednoduchým táhlem.

6.2.2 Posouvající síly

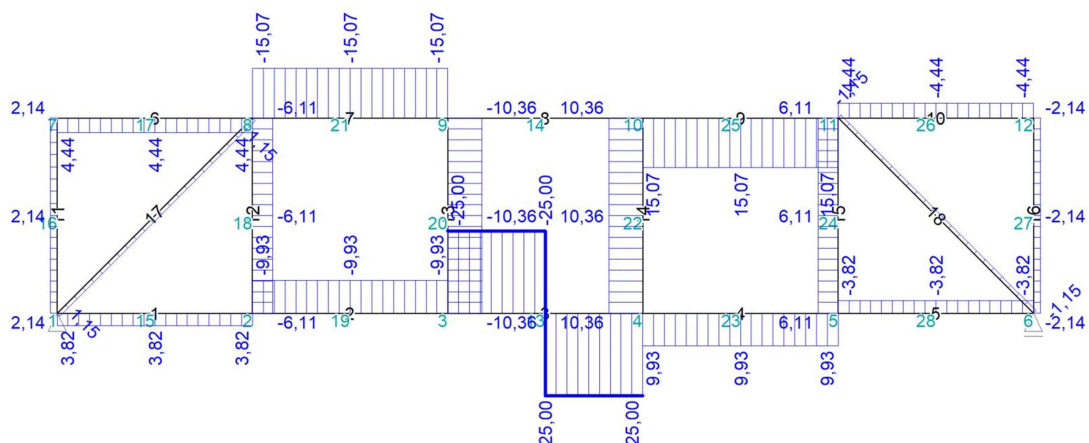
Název: (V3 Rea/ZS G1 silové-stálé MSP)



Obrázek 37 - Průběhy posouvajících sil – Vierendeelův nosník

(Zdroj: autor Diplomové práce)

Název: (V3 Rea/ZS G1 silové-stálé MSP)

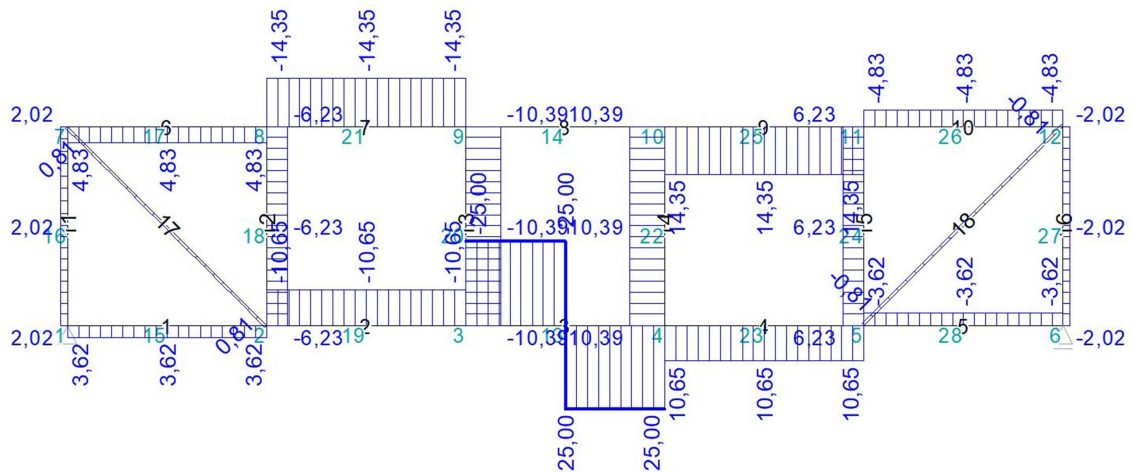


Obrázek 38 - Průběhy posouvajících sil – Vierendeelův nosník s diagonálami

(Zdroj: autor Diplomové práce)

Při porovnání průběhu posouvajících sil je opět jako u normálových napětí vidět výrazný úbytek v polích s vloženými diagonálními prvky. Na tyto prvky nepůsobí téměř žádné posouvající síly. Vzhledem ke způsobu zatížení osamělou silou uprostřed pole jsou smykové síly největší v místě jejího působení, kde významně přispívají k namáhání konstrukce a oslabení spodní pásnice.

Název: (V3 KN3 Rea/ZS G1 silové-stálé MSP)



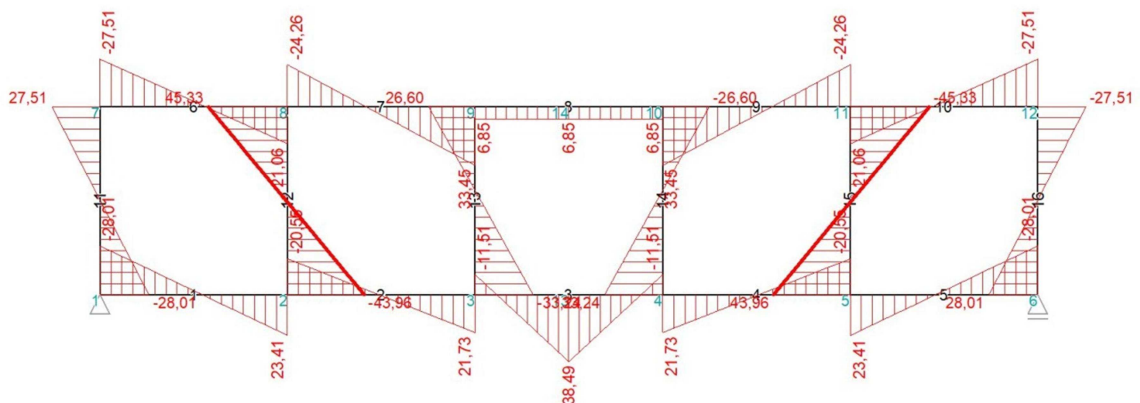
Obrázek 39 - Průběhy posouvajících sil – Vierendeelův nosník s diagonálami (tažené)

(Zdroj: autor Diplomové práce)

Opět je zde pro porovnání vlivu směru diagonály výstup průběhu posouvajících sil. V tomto případě jsou rozdíly oproti variantě s tlačnými prvky minimální rozdíly.

6.2.3 Ohybové momenty

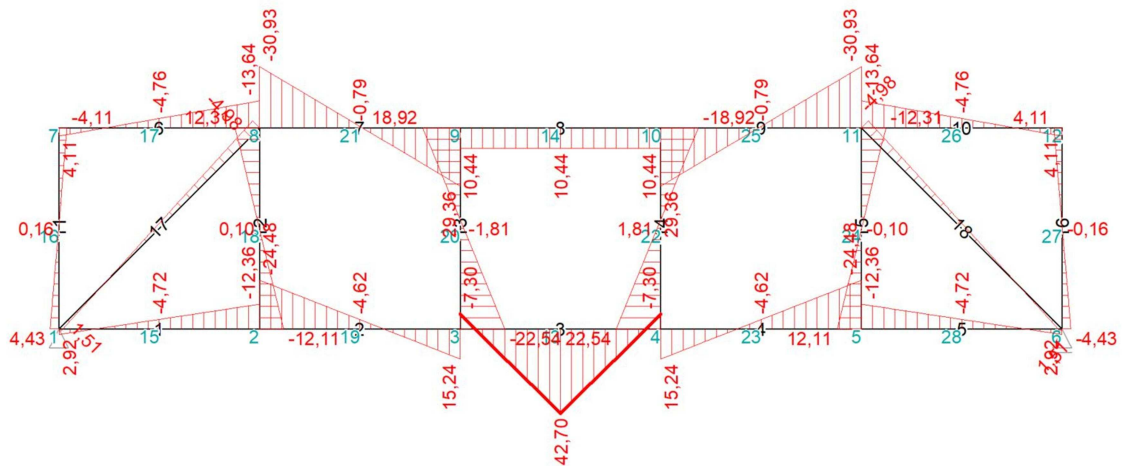
Název: (M2 Rea/ZS G1 silové-stálé MSP)



Obrázek 40 - Průběhy momentových sil – Vierendeelův nosník

(Zdroj: autor Diplomové práce)

Název: (M2 Rea/ZS G1 silové-stálé MSP)



Obrázek 41 - Průběhy momentových sil – Vierendeelův nosník s diagonálami

(Zdroj: autor Diplomové práce)

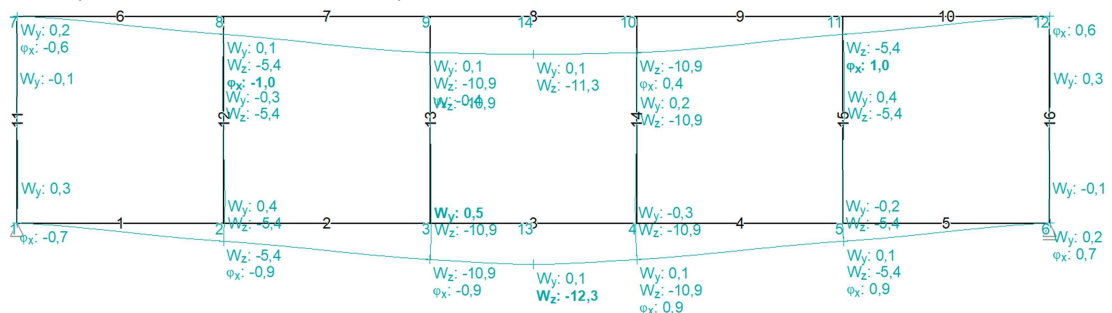
Vliv vloženého diagonálního prvku se významně projevuje na průběhu ohybových momentů. Zde lze pozorovat výraznou distribuci ohybových momentů ze svislých prvků Vierendeelova nosníku do horní a spodní pásnice. Tato distribuce dovoluje návrh subtilnějších vnitřních profilů celkové konstrukce a snížení hmotnosti.

Kritickým prvkem, na který je třeba při dimenzování konstrukce s ohledem na průběh ohybových momentů bude v tomto případě již zmíněná spodní pásnice.

6.2.4 Deformace

Z hlediska stavební praxe jsou deformace konstrukce stejně důležité jako průběhy vnitřních sil, ze kterých vychází únosnost. Ve většině stavebních konstrukcí jsou nejdůležitějšími deformacemi svislé průhyby, které jsou dány normou ČSN EN 1993-1-1. [19]

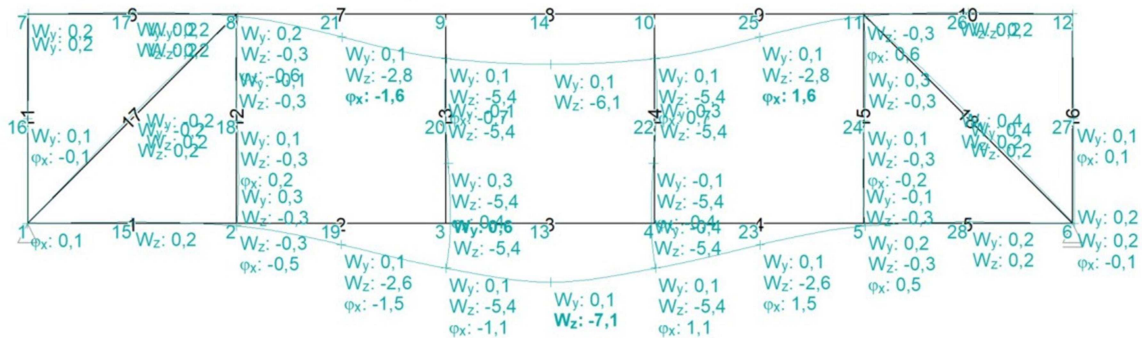
Název: (Rea Def/ZS G1 silové-stálé MSP)



Obrázek 42 - Deformace – Vierendeelův nosník

(Zdroj: autor Diplomové práce)

Název: (Rea Def/ZS G1 silové-stálé MSP)



Obrázek 43 - Deformace – Vierendeelův nosník s diagonálami

(Zdroj: autor Diplomové práce)

Nejzásadnějším argumentem pro použití varianty je porovnání průhybů obou variant navrženého nosníku. Klasický Vierendeelův nosník se při zatížení osamělou silou uprostřed prohne o 11,3 mm, kdežto stejný nosník se subtilnějšími vnitřními prvky pouze o 6,1 mm, tzn. o 44 % méně. Z důvodů pozdějšího měření byl uvažován průhyb horní pásnice.

Z analýzy vykreslených deformací lze také usoudit, proč se ve většině případů stavební praxe užívají příhradové konstrukce, místo nosníku Vierendeelova typu. V polích, kde jsou vloženy diagonální prvky je deformace téměř zanedbatelná, kdežto v prázdných polích se kumulují jak vnitřní síly, tak deformace.

6.3 Dimenzování, únosnost a celková váha konstrukce

Cílem této kapitoly je porovnání obou variant navrženého řešení z hlediska únosnosti a celkového dimenzování prvků. Výpočty byly provedeny v dimenzačním modulu Ocel, který pracuje se statickým modelem použitým pro porovnání v kapitole 6.2.

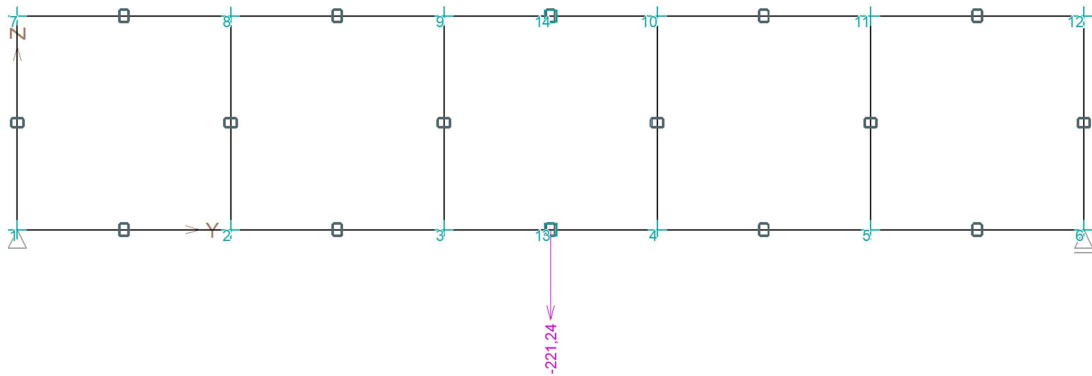
Porovnání statických modelů probíhalo bez přítomnosti součinitelů dle ČSN EN 1990, nicméně pro dimenzační výpočty je již nutné dodržet metodiku mezních stavů, která pracuje se součiniteli materiálu a zejména zatížení. V tomto případě platí pro dílčí součinitele $\gamma_{M,ocel} = 1$ a $\gamma_G = 1,35$.

6.3.1 Porovnání průhybů při mezním zatížení

Dimenzování bude pro názornost prováděno při vyšším zatížení, aby rozdíly únosnosti byly patrnější. Z tohoto důvodu bylo zvoleno zatížení, které způsobí průhyb horní pásnice 50 mm. Tento průhyb vychází z předpokládaného omezení $L/400$, které bylo pro tyto výpočty zvoleno. Tato čísla nejsou zvolena náhodně, ale vychází z nich experiment modelové podobnosti, který byl na těchto konstrukcích prováděn. Výsledná síla pak vychází ze vzorce

$$F = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ref}} * F_{ref} = \frac{50}{11,3} * 50 = 221,24 \text{ kN [1]} \quad (10)$$

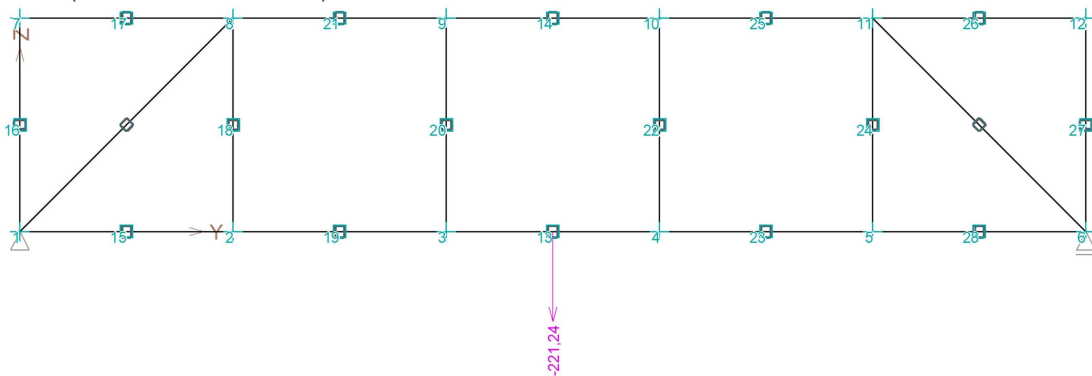
Název: (SZ DZ/ZS G1 silové-stálé)



Obrázek 44 - Zatížení Vierendeelova nosníku mezní silou 221,24 kN

(Zdroj: autor Diplomové práce)

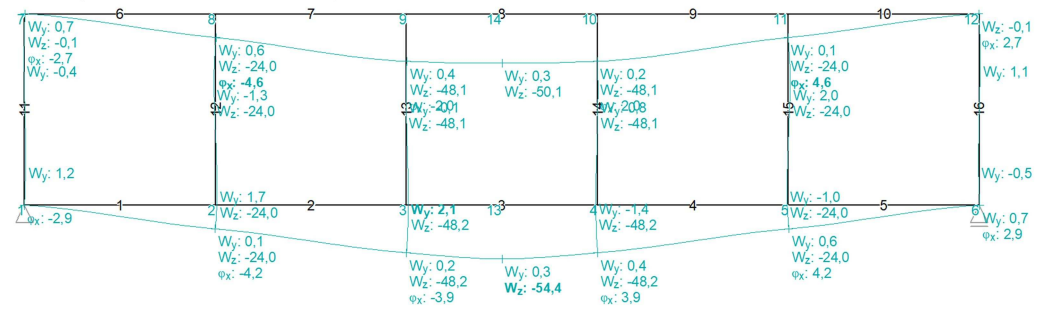
Název: (SZ DZ/ZS G1 silové-stálé)



Obrázek 45 - Zatížení Vierendeelova nosníku s diagonálami silou 221,24 kN

(Zdroj: autor Diplomové práce)

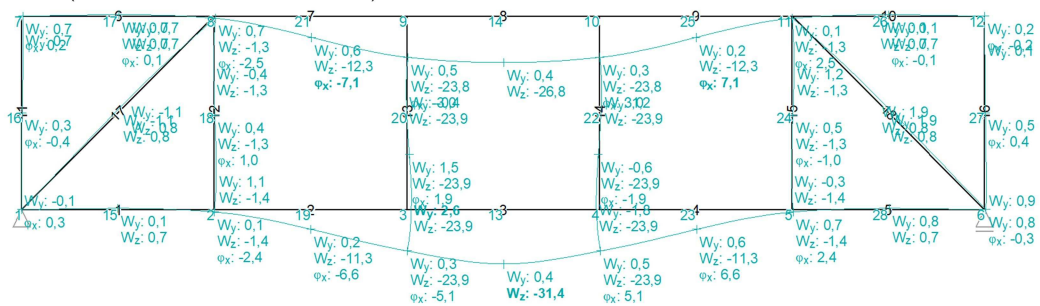
Název: (Def/ZS G1 silové-stálé MSP)



Obrázek 46 - Deformace – Vierendeelův nosník zatížen silou 221,24 kN

(Zdroj: autor Diplomové práce)

Název: (Rea Def/ZS G1 silové-stálé MSP)



Obrázek 47 - Deformace – Vierendeelův nosník s diagonálami zatížen silou 221,24 kN

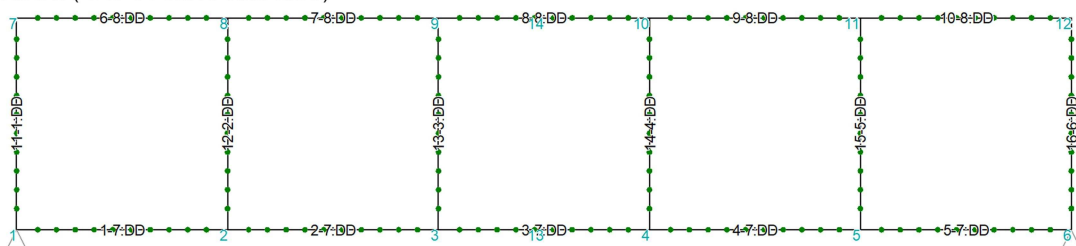
(Zdroj: autor Diplomové práce)

Vzhledem k závislosti průhybu na působící síle jsou zde rozdíly totožné jako u referenčního zatížení. Z výpočtových hodnot obou variant jednoznačně vychází, že při stejném zatížení má Vierendeelův nosník s vloženými diagonálami znatelně nižší průhyb.

6.3.2 Dimenzování a využití průřezů

Kompletní posouzení z modulu Ocel programu FIN EC je součástí přílohy této diplomové práce. Pro názornost je zde porovnáno využití spodní pásnice u obou variant.

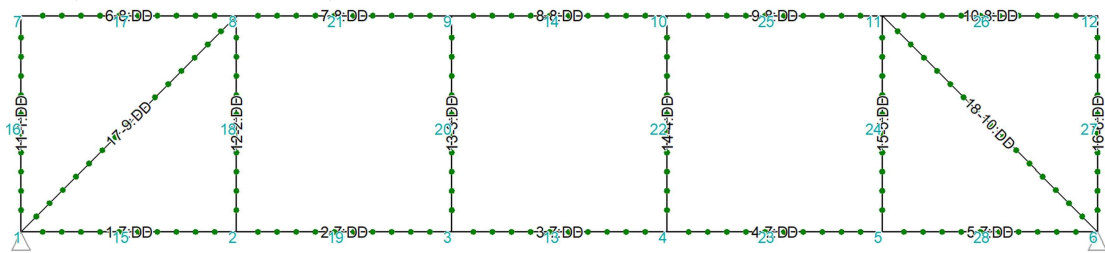
Název: (-/ZS G1 silové-stálé MSU)



Obrázek 48 - Dimenzační prvky – Vierendeelův nosník zatížen silou 221,24 kN

(Zdroj: autor Diplomové práce)

Název: (-/ZS G1 silové-stálé MSÚ)

**Obrázek 49** - Dimenzační prvky – Vierendeelův nosník s diagonálami zatížen silou 221,24 kN

(Zdroj: autor Diplomové práce)

Tabulka 1 - Posouzení dle 1.MSÚ – Využití průřezů navržených variant nosníků

(Zdroj: autor Diplomové práce)

Vierendeelův nosník			Vierendeelův nosník s diagonálami		
Dimenzační dílec	Posouzení	Využití průřezu %	Dimenzační dílec	Posouzení	Využití průřezu %
1:DD	Vyhovuje	48,5	1:DD	Vyhovuje	8,0
2:DD	Vyhovuje	76,2	2:DD	Vyhovuje	36,5
3:DD	Vyhovuje	57,6	3:DD	Vyhovuje	64,9
4:DD	Vyhovuje	57,6	4:DD	Vyhovuje	64,9
5:DD	Vyhovuje	76,2	5:DD	Vyhovuje	36,5
6:DD	Vyhovuje	48,5	6:DD	Vyhovuje	8,0
7:DD	Vyhovuje	71,2	7:DD	Vyhovuje	78,0
8:DD	Vyhovuje	60,8	8:DD	Vyhovuje	56,9
			9:DD	Vyhovuje	22,6
			10:DD	Vyhovuje	22,6

Z vypočtených hodnot v tabulce 1 využití všech prvků průřezu si lze jednoznačně udělat obrázek o náročnosti jednotlivých variant na dimenzování. V případě jednoduchého Vierendeelova nosníku byly nejvíce namáhanými prvky ty svislé v prvním poli a postupně se maximální síly rozkládaly směrem ke středu spodní pásnice nosníku. Při celkovém pohledu na Vierendeelův nosník ale lze tvrdit, že náročnost na dimenzování je díky rovnoměrnému využití kladena na všechny prvky soustavy.

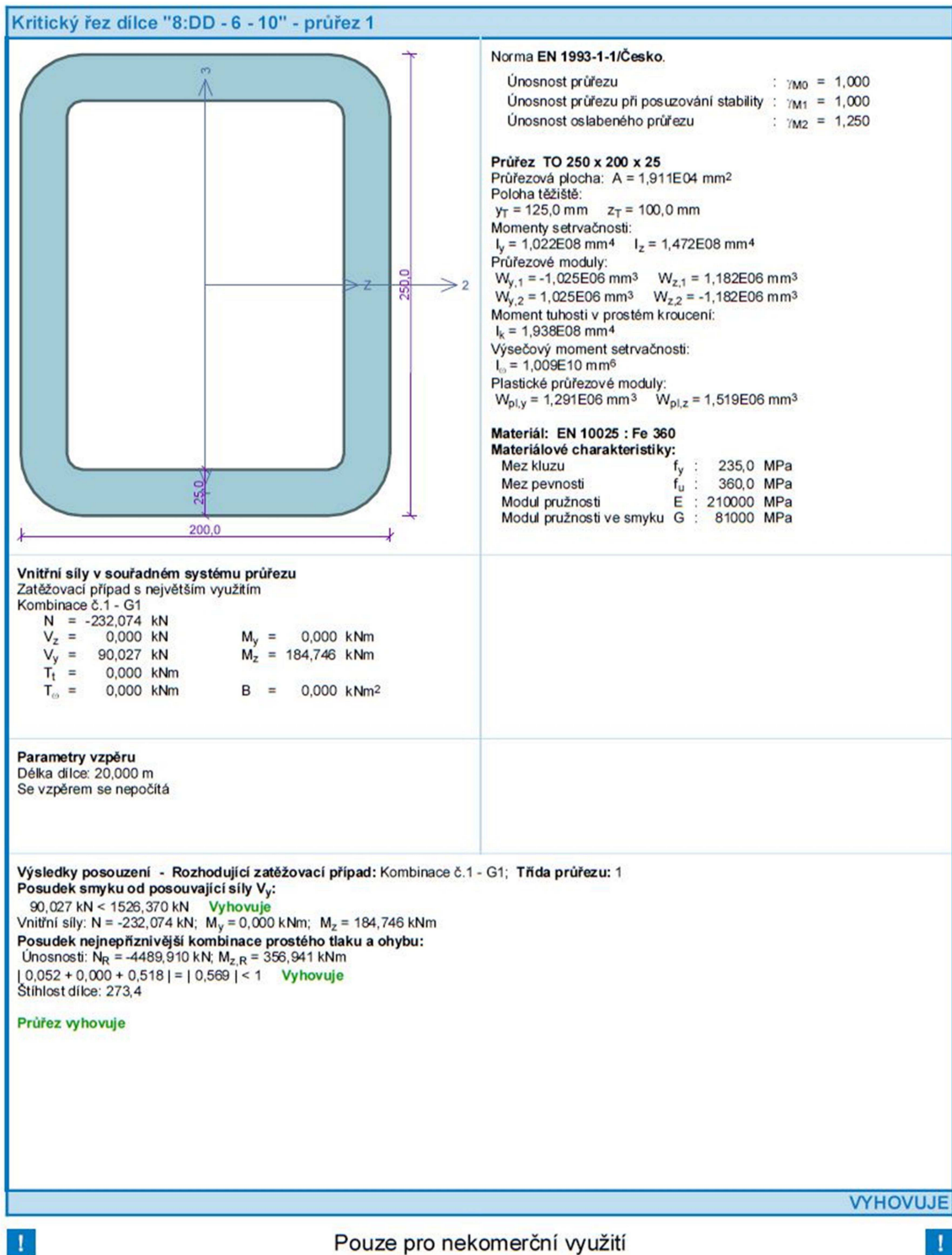
Po přidání diagonálních prvků do krajních polí proběhla redistribuce všech vnitřních sil a tím i změna využití jednotlivých průřezů. Svislé prvky a část horní

pásnice v krajním poli s diagonálou jsou téměř bez namáhání a většinu sil přebrala tlačena příhrada. Z výsledků lze také soudit, že přidáním příhrad se zvyšuje náročnost na průřez spodní pásnice.

Kritický řez dílce "8:DD - 6 - 10" - průřez 1										
	<p>Norma EN 1993-1-1/Česko.</p> <p>Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$ Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$ Únosnost oslaběného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$</p> <p>Průřez TO 250 x 200 x 25 Průřezová plocha: $A = 1,911E04 \text{ mm}^2$ Poloha těžiště: $y_T = 125,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$ Momenty setrvačnosti: $I_y = 1,022E08 \text{ mm}^4$ $I_z = 1,472E08 \text{ mm}^4$ Průřezové moduly: $W_{y,1} = -1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 1,182E06 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -1,182E06 \text{ mm}^3$ Moment tuhosti v prostém kroucení: $I_k = 1,938E08 \text{ mm}^4$ Výšečový moment setrvačnosti: $I_{\omega} = 1,009E10 \text{ mm}^6$ Plastické průřezové moduly: $W_{pl,y} = 1,291E06 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 1,519E06 \text{ mm}^3$</p> <p>Materiál: EN 10025 : Fe 360 Materiálové charakteristiky: Mez kluzu f_y : 235,0 MPa Mez pevnosti f_u : 360,0 MPa Modul pružnosti E : 210000 MPa Modul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa</p>									
	<p>Vnitřní síly v souřadném systému průřezu Zatěžovací případ s největším využitím Kombinace č.1 - G1</p> <table> <tr> <td>$N = -216,260 \text{ kN}$</td> <td>$M_y = 0,000 \text{ kNm}$</td> </tr> <tr> <td>$V_z = 0,000 \text{ kN}$</td> <td>$M_z = -199,836 \text{ kNm}$</td> </tr> <tr> <td>$V_y = 86,195 \text{ kN}$</td> <td>$B = 0,000 \text{ kNm}^2$</td> </tr> <tr> <td>$T_t = 0,000 \text{ kNm}$</td> <td></td> </tr> <tr> <td>$T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$</td> <td></td> </tr> </table>	$N = -216,260 \text{ kN}$	$M_y = 0,000 \text{ kNm}$	$V_z = 0,000 \text{ kN}$	$M_z = -199,836 \text{ kNm}$	$V_y = 86,195 \text{ kN}$	$B = 0,000 \text{ kNm}^2$	$T_t = 0,000 \text{ kNm}$		$T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$
$N = -216,260 \text{ kN}$	$M_y = 0,000 \text{ kNm}$									
$V_z = 0,000 \text{ kN}$	$M_z = -199,836 \text{ kNm}$									
$V_y = 86,195 \text{ kN}$	$B = 0,000 \text{ kNm}^2$									
$T_t = 0,000 \text{ kNm}$										
$T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$										
<p>Parametry vzpěru Délka dílce: 20,000 m Se vzpěrem se nepočítá</p>										
<p>Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1 Posudek smyku od posouvající síly V_y: $86,195 \text{ kN} < 1526,370 \text{ kN}$ Vyhovuje Vnitřní síly: $N = -216,260 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = -199,836 \text{ kNm}$ Posudek nejnepriznivější kombinace prostého tlaku a ohybu: Únosnosti: $N_R = -4489,910 \text{ kN}$; $M_{z,R} = -356,941 \text{ kNm}$ $0,048 + 0,000 + 0,560 = 0,608 < 1$ Vyhovuje Štíhlost dílce: 273,4</p> <p>Průřez vyhovuje</p>										
<p>! Pouze pro nekomerční využití !</p>										

Obrázek 50 - Výstup z programu Ocel, Posouzení průřezu horní pásnice Vierendeelova nosníku

(Zdroj: autor Diplomové práce)



Obrázek 51 - Výstup z programu Ocel, Posouzení průřezu horní pásnice Vierendeelova nosníku s diagonálami

(Zdroj: autor Diplomové práce)

6.3.3 Porovnání váhy konstrukce

Při optimalizaci obou konstrukcí byl kladen důraz na zachování přibližně stejné hmotnosti, aby bylo možné porovnávat i efektivitu konstrukce. Po nahrazení vnitřních prvků Vierendeelova nosníku subtilnějšími profily a přidání diagonál vzrostla váha pouze o 570,33 kg, tj. o 5,6 % (obr. 52, 53). Tento nepatrný nárůst hmotnosti samozřejmě může znamenat i nárůst celkové ceny konstrukce, ale hlavním bonusem poměrně vysoká redukce průhybu původní konstrukce.

Hmotnost konstrukce

	celkem [kg]
Ocelové prvky	9598,85
Celková hmotnost	9598,85

Nátěrová plocha

	celkem [m ²]
Ocelové prvky	53,941
Celková plocha	53,941

Obrázek 52 - Váha konstrukce Vierendeelova nosníku
(Zdroj: autor Diplomové práce)

Hmotnost konstrukce

	celkem [kg]
Ocelové prvky	10169,18
Celková hmotnost	10169,18

Nátěrová plocha

	celkem [m ²]
Ocelové prvky	61,055
Celková plocha	61,055

Obrázek 53 - Váha konstrukce Vierendeelova nosníku
s diagonálami

6.3.4 Shrnutí vyplývající ze statické a konstrukční analýzy Vierendeelova nosníku

Šestá kapitola této práce byla věnována analýze základního typu Vierendeelova nosníku a jeho variace s vloženými diagonálami. Cílem bylo dostatečně názorně dokázat, proč není konstrukce Vierendeelova nosníku v současnosti více využívaná oproti příhradovým konstrukcím.

Důvodem je vysoká náročnost na tuhé spoje, dimenze velmi masivních prvků a také vysoké průhyby. Při porovnání navržených variant byl kladen důraz na co nejmenší konstrukční změny oproti klasické variantě nosníku a bylo dokázáno, že přidáním pouhých dvou diagonálních prvků lze velmi výrazně (o více než 40 %) zredukovat celkový průhyb konstrukce, který je ve většině případů nežádoucí. Z hlediska dimenzování jednotlivých prvků je možné navrhnout subtilnější průřezy, mezi které se redistribuují vnitřní síly. Důležité bylo i zjištění, že lze při téměř stejné váze konstrukce dosáhnout vyšší efektivity, proto jsou příhradové konstrukce ekonomičtější.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části diplomové práce je řešena aplikace 3D tisku na použití pro modelovou podobnost stavebních konstrukcí. Pro experimentální měření a aplikaci jsou užity teoretické znalosti, které byly prezentovány v předchozích kapitolách, proto reálné modely nosníků budou vycházet ze statických schémat definovaných v kapitole 6. [1]

Cíle experimentální části

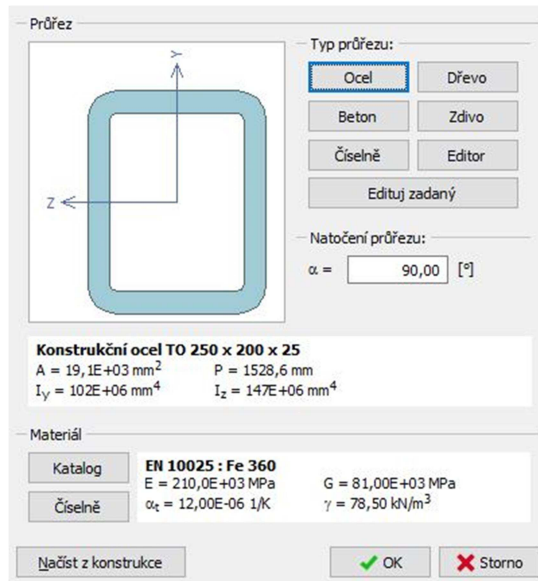
- Cíle pro experimentální tisk a měření byly stanoveny následující.
- Ověření použitelnosti základních materiálu pro 3D tisk (PLA, PET-G, ABS) z hlediska použitelnosti pro konstrukce modelové podobnosti.
- Ověření modulu pružnosti jednotlivých druhů plastů.
- Definování tiskových parametrů pro možnost opakování pokusu.
- Analýza nastavení tištěného prvku z hlediska množství obvodového a výplňového materiálu ve vztahu k pevnosti a konečnému průhybu.

7 Využití 3D tisku pro účely experimentální mechaniky ve stavitelství

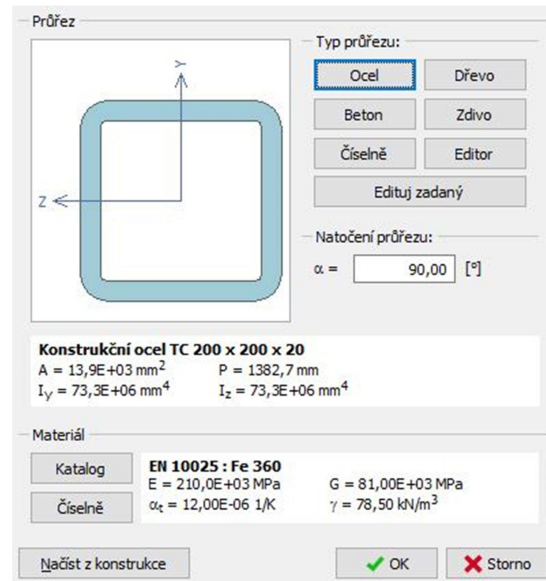
7.1 Statické schéma experimentální konstrukce

Statické schéma je shodné s tím, které bylo analyzováno v předchozí kapitole (obr. 32 a 33). Rozdílné jsou samozřejmě zatěžovací síly a rozměry konstrukce. Tyto je potřeba stanovit s přihlédnutím na možnosti samotného 3D tisku.

Protože v analytické části nebylo třeba detailněji definovat vlastnosti jednotlivých průřezů z důvodu využití statického programu, je nyní potřeba tyto vlastnosti a hodnoty kvantifikovat.



Obrázek 54 - Profil TO 250x200x25, Výstup ze statického softwaru FIN 2D
(Zdroj: autor Diplomové práce)



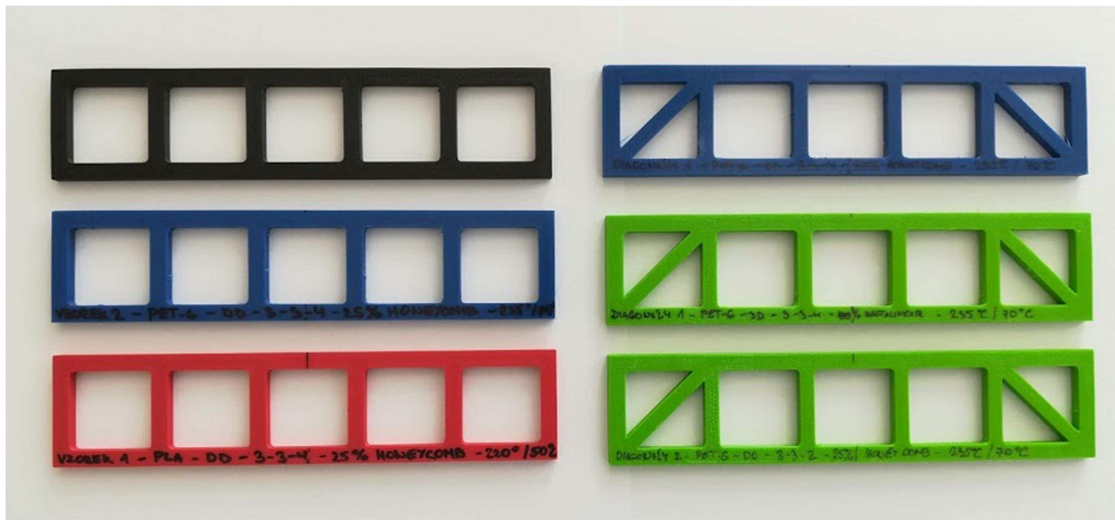
Obrázek 55 - Profil TO 200x200x20, Výstup ze statického softwaru FIN 2D
(Zdroj: autor Diplomové práce)

Hodnoty průřezových charakteristik z obrázků 54 a 55 budou použity pro určení průřezů prvků experimentálních nosníků.

7.2 Způsob výroby

Pro experimentální část diplomové práce přicházelo v úvahu několik variant výroby a použití materiálu. Původní myšlenka byla užití dřevěného příhradového nosníku, ale vzhledem k požadavku na tuhé spoje, byla tato varianta velmi těžko proveditelná. Další variantou bylo vytvoření plnohodnotného experimentálního nosníku z oceli za pomoci svařování prvků. Při zachování stejných vlastností jako statický model by poměrové výpočty byly velmi přesné. Nevýhodou tohoto řešení je vysoká pracnost a velké zatěžovací síly, které by musely být použity.

Po sumarizaci výhod a nevýhod jednotlivých způsobů výroby jsem přistoupil k variantě 3D tisku. Jelikož vlastním 3D tiskárnu, bylo toto řešení z hlediska testování a výroby nejjednodušší a nejefektivnější.



Obrázek 56 - Vytiskněné vzorky variant Vierendeelova nosníku (černá – ABS, modrá/zelená - PET-G, červená - PLA) vč. nastavení

3D tiskárna, která bude pro výrobu experimentálního modelu použita, pracuje na bázi FFF (Fused Filament Fabrication) technologie. Původním tvůrcem celé technologie aditivního 3D tisku byl S. Scott Crump, který si v roce 1989 nechal patentovat tuto technologii pod názvem FDM (Fused Deposition Modeling). Po vypršení patentového práva v roce 2009 se 3D tisk začal velmi rychle šířit mezi veřejnost pod označením FFF, které bylo již výše zmíněno. [20]

Principem metody FFF je natavování termoplastů navinutých na role v podobě dlouhé struny o určité tloušťce. Tato struna je natlačována do tavící trysky pomocí soustavy ozubených kol (extruderu) a vytlačována na výtisk. Po nanesení vrstvy materiál na vzduchu tuhne a celý proces se opakuje. [20]

Velkou výhodou této technologie je poměrně nízká pořizovací cena a nízké procento vzniklého odpadu. Další výhodou je použití široké škály materiálů o různých vlastnostech. Lze použít materiály biologicky odbouratelné, odolné vůči vysoké teplotě či s příměsí karbonových vláken pro lepší mechanické vlastnosti.

Vzhledem k technologickým omezením má tato technologie samozřejmě i nevýhody. Mezi nejpálčivější problémy patří poměrně dlouhé doby tisku, které jsou způsobeny omezenou schopností trysky dostatečně rychle natavovat materiál a poté ho na výtisku chladit. Dalším faktorem ovlivňující rychlost je celková tuhost konstrukce, která omezuje kmitání a vibrace. [20]

7.3 Použité Materiály

Pro experimentální část této práce byly vybrány tři nejčastěji používané materiály, které se používají pro 3D tisk. Každý materiál je specifický a užívá se pro různé účely. Podrobné vlastnosti použitých materiálů jsou uvedeny na obrázku č. 56.

7.3.1 Polyactic acid (PLA)

Materiál PLA neboli kyselina polymléčná je druh plastu, který je vyráběn z kukuřičného škrobu. Je biologicky rozložitelný, a je šetrnější k přírodě než jiné používané materiály pro 3D tisk. Taví se při teplotách v rozmezí 180–230 ° C, ale měkne již při teplotě 50 ° C, proto se příliš nehodí pro venkovní použití, kde při vyšších teplotách velmi rychle degraduje. Je rozšířen zejména pro svůj snadný tisk a možnost použití ve styku s potravinami. Při jeho tisku není potřeba uzavřená komora ani vyhřívaná podložka pro lepší přilnavost výtisku. [20] [21]

7.3.2 Akrylonitril – butadien – styren (ABS)

Materiál ABS je termoplast, který je velmi rozšířen ve všech odvětvích průmyslu. Není biologicky odbouratelný a při jeho tisku vznikají toxické výpary. Oproti PLA má vyšší teplotní odolnost, proto je vhodný k použití teplotně namáhaných částí. Teplota, při které ABS degraduje, se pohybuje okolo 100 ° C. Tisk ABS je náročnější než PLA, protože má vyšší smrštitivost a přilnavost k tiskové ploše. Materiál ABS se taví při teplotách v rozmezí 210–250 ° C a teplota vyhřívané podložky se pohybuje v rozmezí 90–100 ° C. [20] [21]

7.3.3 Polyetylentereftalát – glykol (PET-G)

Posledním materiálem, který byl použit pro experiment je PET-G. Jedná se o derivát nejpoužívanějšího plastu na světě (PET). *PET-G je upravená verze PET. "G" znamená "modifikovaný glykol", který se přidává k materiálové kompozici během polymerace.* Touto změnou dojde k navýšení pevnosti, odolnosti proti nárazu a odolnosti vůči chemickým látkám. Kombinuje vlastnosti PLA (snadný tisk) a ABS (odolnost proti vyšším teplotám, chemickým látkám, nárazům). Materiál PET-G se taví při teplotách v rozmezí 220–260 ° C a teplota vyhřívané podložky se pohybuje v rozmezí 60 – 90 ° C. [22]

	PLA	ABS	PET-G
Teplota trysky	180 - 230 °C	210 - 250 °C	220 - 260 °C
Teplota podložky	20 - 60 °C	80 - 110 °C	60 - 90 °C
Tisková podložka	Nepovinná	Povinná	Doporučuje se
Komora při tisku	Nepovinná	Doporučuje se	Nepovinná
Přilnutí první vrstvy	Dobré	Drobné problémy	Drobné problémy
Výpary	Skoro žádné	Silné	Silné
Absorbce vlhkosti	Ano	Ano	Ano
Youngův modul (GPa)	3,5	2,4	2,2
Modul pružnosti (GPa)	4	2,2	1,9
Pevnost v ohybu (MPa)	80	65	64
Poměr pevnosti k hmotnosti (kN*m/kg)	40	31-80	42
Pevnost v tahu (MPa)	110	37-110	53
Odolnost proti nárazu (J/m)	-	70-370	77
Tvrdost Rockwell R	-	94	108
Teplota skelného přechodu (°C)	60	105	81
Deformace při teplotě (°C)	65	100	70
Teplota tání (°C)	160	-	140
Teplná kapacita (J/kg*K)	1800	1470	1200
Teplná vodivost (W/m*K)	0,13	0,17	0,29
Teplná difuzivita (m ² /s)	0,058	0,12	0,19

Obrázek 57 – Vlastnosti použitých materiálů

(Zdroj: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>)

7.4 Rozměry nosníku a měřítka veličin

Pro správné stanovení konkrétního měřítka je zapotřebí vzít v úvahu technologické možnosti výroby experimentálního nosníku. Vzhledem k faktu, že má 3D tiskárna disponuje tiskovou plochou o rozměrech 200 x 200 x 200 mm, bylo zvoleno měřítko 1:100. Statický model ocelového nosníku má celkovou délku 20 m, proto experimentální model bude při užití výše zmíněného měřítka 200 mm dlouhý a 40 mm vysoký. Dimenze jednotlivých prvků budou stanoveny poměrovým výpočtem z momentů setrvačnosti.

7.4.1 Rozměrová měřítka veličin [1]

7.4.1.1 Délky

$$m_l = \frac{l_r}{l_{exp}} = 100 \quad (11)$$

kde l_r – délka skutečného nosníku a l_{exp} - délka experimentálního nosníku

7.4.1.2 Deformace

$$m_\varepsilon = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_{exp}} = 100 \quad (12)$$

kde ε_r - deformace skutečného nosníku a ε_{exp} - deformace experimentálního nosníku

7.4.2 Fyzikální měřítka veličin [1]

Stejně jako u měřítka rozměrových parametrů experimentálního nosníku je potřeba stanovit i měřítka fyzikální. Opět vycházejí z možností měření a použitých zařízení.

7.4.2.1 Zatížení

Skutečný ocelový nosník byl zatěžován silou v řádu kilo Newtonů. To samozřejmě nelze u experimentálního nosníku reprodukovat, proto by se nabízela možnost využít opět měřítka 1:100, pro zjednodušení celé koncepce. Bohužel po zběžné úvaze by při použití tohoto měřítka dosahovala síla, kterou je nutné zatížit experimentální nosník hodnoty 18 kg. Vzhledem k rozměrům a vlastnostem použitých plastů je nereálné takový experiment provést. Výsledné měřítka bylo tedy zvoleno 1:10 000, tzn. zatížení experimentálního nosníku v maximu hodnotou přibližně 1,8 kilogramu.

$$m_F = \frac{F_r}{F_{exp}} = 10\,000 \quad (13)$$

kde F_r – zatížení skutečného nosníku a F_{exp} – zatížení experimentálního nosníku

7.4.2.2 Modul pružnosti

Měřítka modulu pružnosti tentokrát vychází pouze jako poměr mezi skutečným modulem pružnosti oceli a použitého druhu plastu (PLA, ABS, PET-G). Rozmezí modulů pružnosti testovaných materiálů se pohybuje v rozmezí 1 600 – 4 000 MPa, proto volím měřítka

$$m_E = \frac{E_r}{E_{exp}} = 100 \quad (14)$$

kde E_r – modul pružnosti skutečného nosníku a E_{exp} – modul pružnosti experimentálního nosníku z příslušného plastu

7.4.2.3 Síla

Měřítka síly je určeno vztahem:

$$m_F = \frac{F_r}{F_{exp}} \quad (15)$$

kde F_r – síla působící na skutečný nosník a F_{exp} – síla působící na experimentální nosník

7.4.2.4 Průřez modelu experimentálního nosníku

Měřítka průřezu je určeno vztahem:

$$m_{b,h} = \frac{b_r}{b_{exp}} \quad (16)$$

$$m_{b,h} = \frac{h_r}{h_{exp}} \quad (17)$$

kde b/h_r – délky stran skutečného nosníku a F_{exp} – délky stran experimentálního nosníku

7.4.2.5 Kvadratický moment setrvačnost

Jelikož je pro experiment vybrán průřez obdélníkového profilu, je nutné ještě definovat jeho moment setrvačnosti. Vychází z obecně známého vztahu, kde b a h jsou délky stran průřezu.

$$I_y = \frac{1}{12} * b * h^3, I_z = \frac{1}{12} * h * b^3 \quad (18)$$

Po dosazení měřítkových rozměrů za veličiny ze vztahů (16) a (17) pak dostáváme

$$I_{y,exp} = \frac{1}{12} * \frac{b}{m_{b,h}} * \left(\frac{h}{m_{b,h}} \right)^3 \quad (19)$$

Zjednodušením vztahu (19) získáváme zjednodušený vzorec pro moment setrvačnosti modelového průřezu

$$I_{y,exp} = \frac{I_y}{m_{b,h}^4} \quad (20)$$

7.4.3 Metodika výpočtu

Všechna výše definovaná měřítka bylo možné určit z úvahy pro měření. Ostatní měřítka je nutné dopočítat. Pro tento účel je možné definovat modelový nosník, který bude uprostřed zatížen osamělou silou. Dalším přínosem měření průhybu prostého nosníku zatíženého silou bude kontrola modelových vlastností použitého plastu. Z této úvahy lze poté použít vzorec pro průhyb tohoto nosníku.

$$\varepsilon = \frac{F * l^3}{48 * E * I} \quad (21)$$

kde F – síla působící, l – délka nosníku, E – modul pružnosti, I – moment setrvačnosti

Po dosazení poměrových měřítek do vzorce průhybu (12) dostáváme

$$\frac{F * l^3}{48 * E * I_y} = \frac{\varepsilon}{m_\varepsilon} \quad (22)$$

Dosazením ze vztahů (13), (14), (20) a (21) dostáváme rovnici vyjadřující poměr mezi experimentálním nosníkem v měřítku a nosníkem skutečným. Po matematických úpravách získáváme

$$\frac{\frac{F}{m_F} * \left(\frac{l}{m_l}\right)^3}{48 * \frac{E}{m_E} * \frac{I_y}{m_{b,h}^4}} = \frac{F * l^3}{48 * E * I_y} * \frac{1}{m_\varepsilon} \quad (23)$$

$$\frac{F}{m_F} * \left(\frac{l}{m_l}\right)^3 * \frac{1}{48} * \frac{m_E}{E} * \frac{m_{b,h}^4}{I_y} = \frac{F * l^3}{48 * E * I_y} * \frac{1}{m_\varepsilon} \quad (24)$$

$$\frac{m_E * m_{b,h}^4}{m_F * m_l^3} = \frac{1}{m_\varepsilon} \quad (25)$$

Z úpravy v bodě (25) je zřejmé, že pro určení celkového měřítka průřezu experimentálního nosníku je nutné, aby byla použita výše definovaná měřítka. Ze vztahu (25) zbývá vyjádřit neznámou $m_{b,h}$.

$$m_{b,h}^4 = \frac{m_F * m_l^3}{m_E * m_\varepsilon} \quad (26)$$

$$m_{b,h} = \sqrt[4]{\frac{m_F * m_l^3}{m_E * m_\delta}} \quad (27)$$

Dosazením definovaných měřítek získáváme

$$m_{bh} = \sqrt[4]{\frac{10\,000 * 100^3}{100 * 100}} = \sqrt[4]{1\,000\,000} = \sqrt[4]{100^3} \quad (28)$$

7.4.4 Stanovení rozměrů zkušebního prostého nosníku

Stanovení poměrových rozměrů nosníku vychází z momentu setrvačnosti skutečného průřezu TO 250x200x25. Protože by bylo příliš složité tisknout dutý průřez, je potřeba vypočítat rozměry shodného průřezu ve tvaru plného obdélníku.

$$I_{y,r} = 147 * 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{z,r} = 102 * 10^6 \text{ mm}^4$$

Ze vztahu (20) již známe vzorec pro výpočet momentů setrvačnosti experimentálního nosníku a můžeme tedy dosadit hodnoty měřítka (28) a číselné hodnoty skutečných momentů reálného průřezu.

$$I_{y,exp} = \frac{I_y}{m_{b,h}^4} = \frac{147 * 10^6}{100^3} = 147 \text{ mm}^4 \quad (29)$$

$$I_{z,exp} = \frac{I_z}{m_{b,h}^4} = \frac{102 * 10^6}{100^3} = 102 \text{ mm}^4 \quad (30)$$

Nyní již lze vypočítat rozměry experimentálního nosníku. To provedeme vyjádřením neznámé z rovnice (18). Jako nejjednodušší způsob se jeví vyjádření rozměru „b“ a poté dopočítání rozměru „h“.

$$b = \frac{12 * I_y}{h^3} \quad (31)$$

Dosazením do rovnice (18) za „b“ dostáváme tvar rovnice ve tvaru

Matematickými úpravami získáváme konečný vzorec pro výpočet obou rozměrů skutečného nosníku.

$$b = \sqrt[8]{\frac{12^2 * I_z^3}{I_y}} \quad (32)$$

$$h = \frac{12 * I_y}{b^3} \quad (33)$$

Ze vztahů (32) a (33) plyne, že rozměry experimentálního nosníku stanovíme shodně.

$$b_{exp} = \sqrt[8]{12^2 * \frac{I_{exp,z}^3}{I_{exp,y}}} = \sqrt[8]{\frac{12^2 * 102^3}{147}} = 6,78 \text{ mm, pro model volím } \mathbf{6,8 \text{ mm}} \quad (34)$$

$$h_{exp} = \sqrt[3]{\frac{12 * I_{exp,y}}{b^3}} = \sqrt[3]{\frac{12 * 147}{6,78^3}} = 5,65 \text{ mm, pro model volím } \mathbf{5,6 \text{ mm}} \quad (35)$$

7.5 Měření prostého nosníku a ověřování modulů pružnosti

Pro samotný výpočet prostého nosníku a Vierendeelova nosníku je nutné ověřit, zda tištěné části splňují alespoň orientačně předpokládaný modul pružnosti. Pro tento předpoklad jsem zvolil nastavení 3D tisku takové, které vykazuje nejlepší pevnostní vlastnosti. Nastavení jednotlivých materiálů v programu Simplify3D je součástí přílohy této práce.

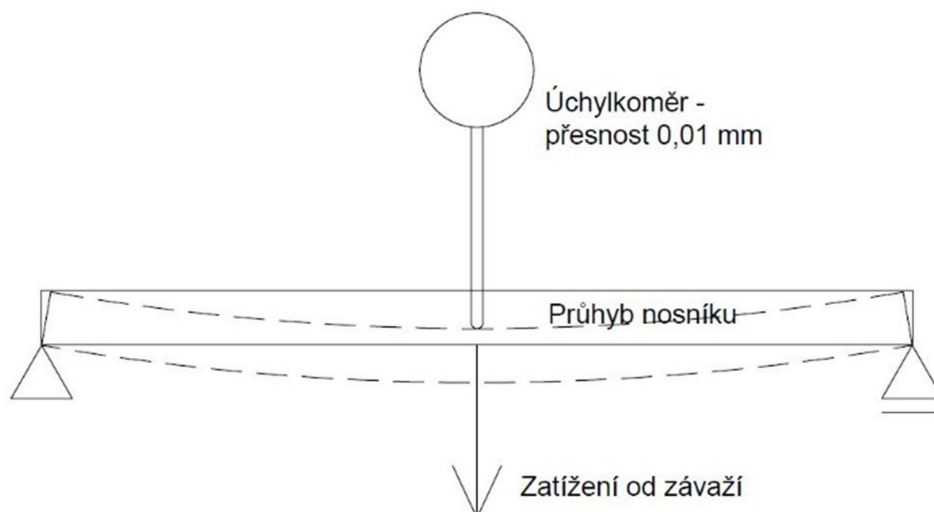


Obrázek 58 - Vytisknuté vzorky prostých nosníků (černá – ABS, modrá - PET-G, červená - PLA) vč. Nastavení

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

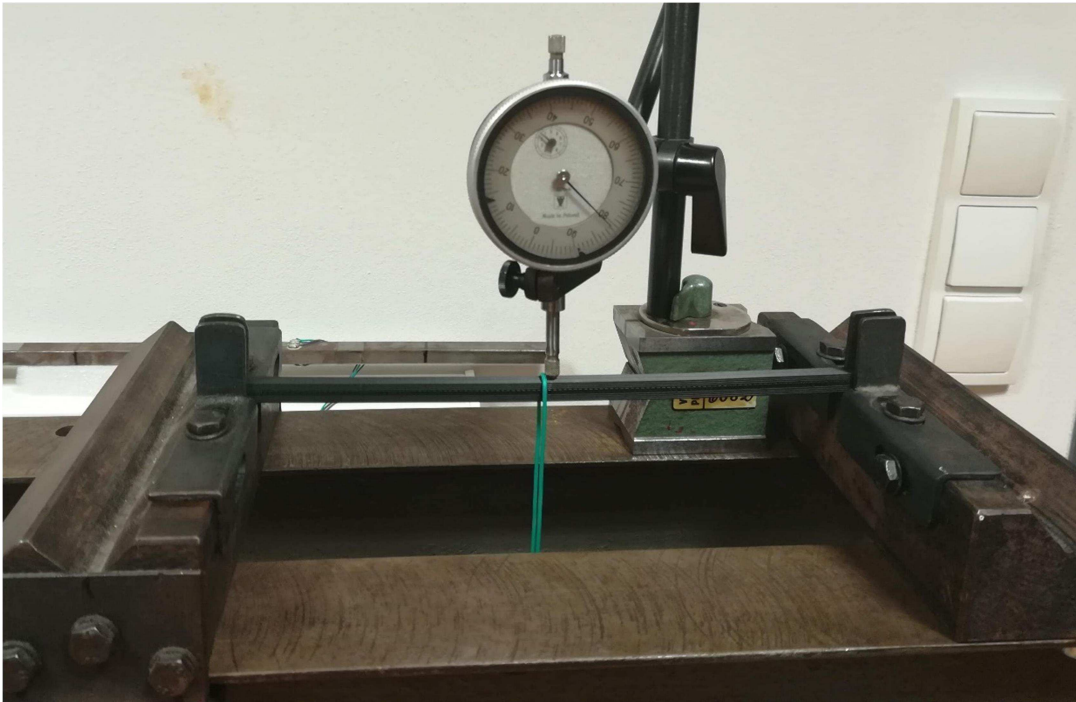
Každý vzorek byl postupně zatěžován a úchylkoměrem s přesností 0,01 mm měřeny jeho průhyby. Poté byly spočítány moduly pružnosti jednotlivých materiálů dle vzorce odvozeného z rovnice pro průhyb.

$$E = \frac{F_{exp} * l_{exp}^3}{48 * \epsilon_{exp} * I_{y,exp}} \quad (36)$$



Obrázek 59 - Zatížení prostého nosníku osamělou silou uprostřed a měřené deformace (schéma)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)



Obrázek 60 - Zatížení prostého nosníku osamělou silou uprostřed (měřící aparatura s úchylkoměrem)

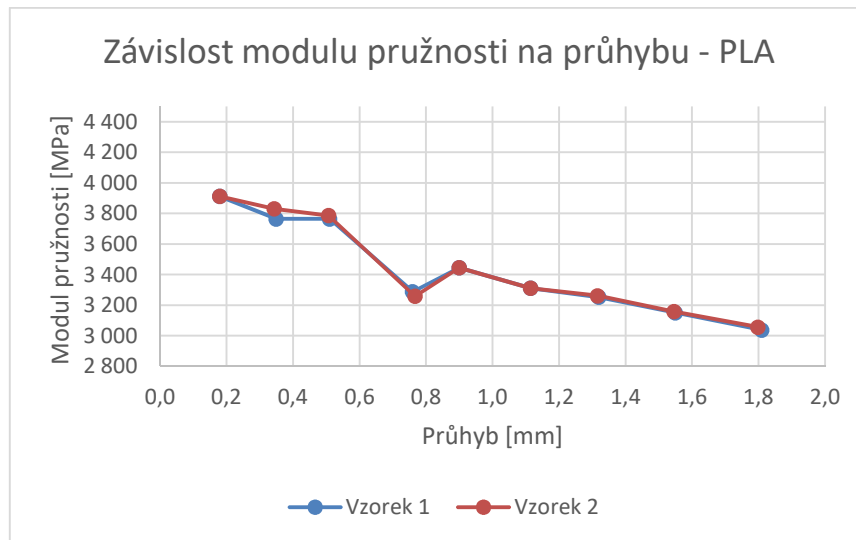
(Zdroj: Autor Diplomové práce)

$$E = \frac{0,62 \cdot 200^3}{48 \cdot 0,145 \cdot 146,73} = 4\,856,67 \text{ MPa} \quad (37)$$

Tabulka 1 - Zatížení nosníku z PLA, průhyb, modul pružnosti E

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Č. m.	Zatížení [g]	Síla [N]	PLA - průhyb [mm]		Modul pružnosti [MPa]	
			Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 1	Vzorek 2
1	62	0,62	0,145	0,145	4 856,674	4 856,674
2	116	1,16	0,280	0,275	4 705,602	4 788,156
3	169	1,69	0,510	0,507	3 763,845	3 786,249
4	220	2,2	0,760	0,767	3 287,943	3 258,322
5	273	2,73	0,900	0,900	3 445,366	3 445,366
6	325	3,25	1,115	1,115	3 310,730	3 310,730
7	378	3,78	1,320	1,317	3 252,618	3 261,246
8	430	4,3	1,550	1,546	3 151,026	3 158,371
9	484	4,84	1,810	1,799	3 037,260	3 056,204



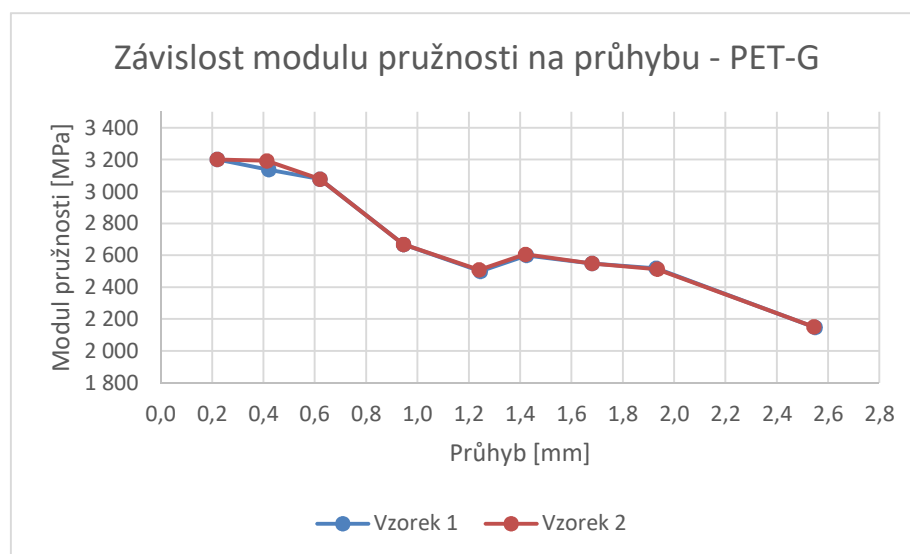
Graf 1 - Závislost modulu pružnosti na průhybu (PLA)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Tabulka 2 - Zatížení nosníku z PET-G, průhyb, modul pružnosti E

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Č.	Zatížení [g]	Síla [N]	PET-G - průhyb [mm]		Modul pružnosti [MPa]	
			Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 1	Vzorek 2
1	62	0,62	0,205	0,205	3 435,208	3 435,208
2	116	1,16	0,380	0,373	3 467,286	3 528,115
3	168	1,68	0,620	0,620	3 077,746	3 077,746
4	222	2,22	0,945	0,945	2 668,311	2 668,311
5	274	2,74	1,245	1,240	2 499,749	2 508,906
6	326	3,26	1,425	1,421	2 598,472	2 606,467
7	377	3,77	1,680	1,680	2 548,868	2 548,868
8	428	4,28	1,930	1,935	2 518,846	2 512,975
9	482	4,82	2,550	2,545	2 146,951	2 151,414



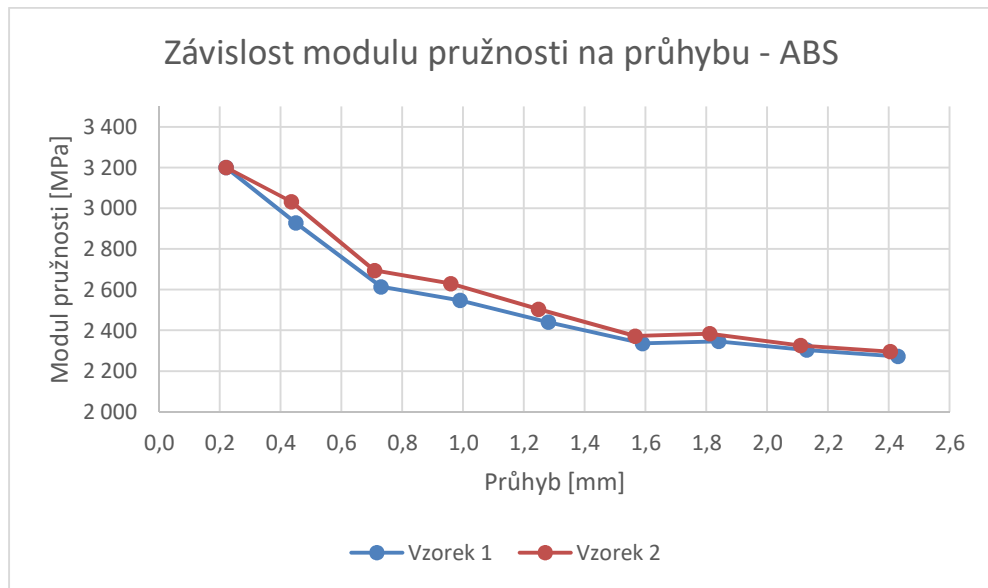
Graf 2 - Závislost modulu pružnosti na průhybu - PET-G

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Tabulka 3 - Zatížení nosníku z ABS, průhyb, modul pružnosti E

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Č. m.	Zatížení [g]	Síla [N]	ABS - průhyb [mm]		Modul pružnosti [MPa]	
			Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 1	Vzorek 2
1	62	0,62	0,220	0,220	3 200,989	3 200,989
2	116	1,16	0,450	0,434	2 927,930	3 032,499
3	168	1,68	0,730	0,708	2 613,976	2 694,160
4	222	2,22	0,990	0,959	2 547,024	2 629,950
5	275	2,75	1,280	1,247	2 440,270	2 504,009
6	327	3,27	1,590	1,566	2 335,962	2 372,235
7	380	3,8	1,840	1,811	2 345,746	2 383,378
8	432	4,32	2,130	2,110	2 303,665	2 325,195
9	486	4,86	2,430	2,405	2 271,670	2 295,284

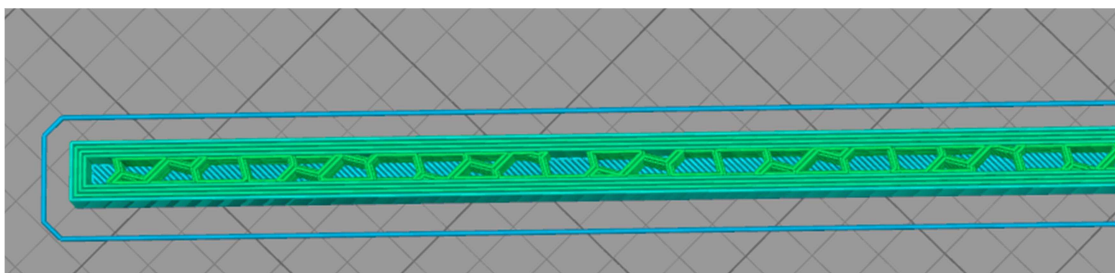


Graf 3 - Závislost modulu pružnosti na průhybu – ABS

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Naměřené hodnoty pro oba vzorky nosníku od každého materiálu ukazují, že vlastnosti obou vzorků jsou téměř identické. Z toho důvodu lze samotný tisk všech vzorků považovat za úspěšný. Problémem je, že při měření samotném se pravděpodobně projevila chybně zvolená metoda měření, neboť se jednotlivé nosníky deformovaly již při instalaci úchylkoměru.

Dále z naměřených hodnot a z nich vycházejících grafů závislosti je patrné, že modul pružnosti všech testovaných materiálů klesá s rostoucím průhybem. Tento fakt dokazuje, že u konstrukce, jakou je prostý nosník, je vliv nastavení tisku a výplně klíčový faktor ovlivňující měření.



Obrázek 61 - Průřez tisknutým vzorkem (3x horní a spodní vrstva, 4 obvodové perimetry, 25% procent výplň - Honeycomb)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

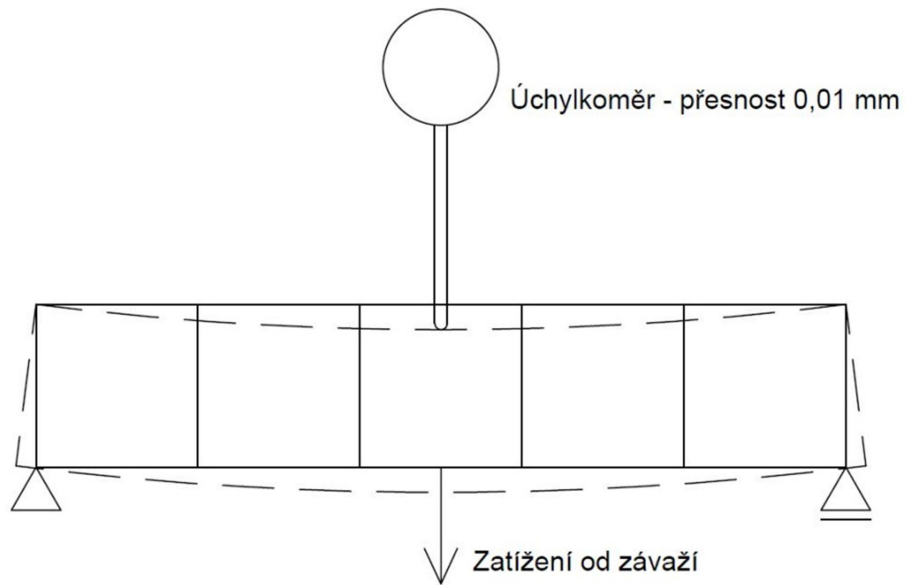
Tím, že bylo toto měření prováděno na subtilním a dlouhém prvku, je vliv zkrácení hodnot umocněn. Z naměřených hodnot se jako nejvhodnější pro modelovou podobnost jeví PET-G a ABS. Měření těchto materiálů prokázalo nejmenší rozdíly mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami modulu pružnosti.

Nosník, který bude zkoumán v hlavní části této práce, má vhodnější konstrukci pro získání relevantních výsledků. Jednotlivé prutové prvky mají délku pouze 4 centimetry, proto lze předpokládat, že se vliv částečně dutého profilu na celkové výsledky měření neprojeví v takové míře, v jaké se projevil u testovacích vzorků prostého nosníku.

7.6 Ověřování modelové podobnosti Vierendeelova nosníku o pěti polích

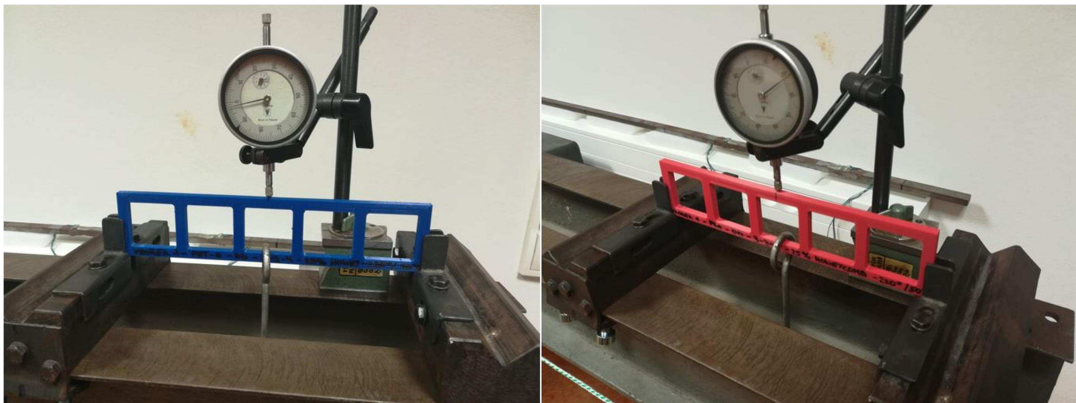
Měření hlavních nosníků pro tuto práci bylo prováděno stejně jako u prostých nosníků v laboratoři katedry mechaniky Západočeské univerzity v Plzni. Bylo užito ocelové měřicí stolice, která má posuvné podpory, aby bylo možné nastavit přesnou rozteč pro nosník. V tomto případě byla rozteč 200 milimetrů osově. Pro měření průhybu byl použit úchylkoměr Kinex o přesnosti 0,01 mm na magnetickém stojánku, který byl uchycen k ocelové stolici.

Modely nosníků byly postupně zatěžovány přidáváním ocelových závaží o daných vahách na konstrukci kyvadla a hodnoty odečítány z úchylkoměru stejně jako v případě měření prostých nosníků. Pro přesnost celkového měření byly vytištěny dva kusy od každého materiálu. Celkem tedy měření probíhalo na šesti vytištěných vzorcích.



Obrázek 62 – Vierendeelova nosníku osamělou silou uprostřed a měřená deformace (schéma)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)



Obrázek 63 - Osazený vzorek na měřící stoličce a měřící aparatura (vlevo PET-G, vpravo PLA)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Z hodnot průhybů, které byly naměřeny v laboratoři, lze z tabulek 4, 5 a 6 usoudit, že oba vzorky měly téměř shodné tiskové vlastnosti. Toto tvrzení lze podložit téměř shodnými průhyby, které byly naměřeny úchylkoměrem.

Tabulka 4 - Zatížení Vierendeelova nosníku z PLA, průhyb

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Č. m.	Zatížení [g]	Síla [N]	PLA - průhyb [mm]	
			Vzorek 1	Vzorek 2
1	118	1,18	0,022	0,020
2	227	2,27	0,040	0,035
3	328	3,28	0,060	0,050

4	428	4,28	0,078	0,070
5	530	5,30	0,090	0,090
6	629	6,29	0,105	0,105
7	731	7,31	0,130	0,120
8	833	8,33	0,152	0,140
9	933	9,33	0,162	0,150
10	1033	10,33	0,190	0,182
11	1133	11,33	0,215	0,198
12	1233	12,33	0,240	0,213
13	1333	13,33	0,250	0,240
14	1433	14,33	0,270	0,260
15	1533	15,33	0,290	0,280
16	2035	20,35	0,350	0,360
17	2538	25,38	0,440	0,440
18	3040	30,40	0,520	0,535
19	3545	35,45	0,610	0,615
20	4047	40,47	0,695	0,700
21	4551	45,51	0,780	0,780

Tabulka 5 - Zatížení Vierendeelova nosníku z PET-G, průhyb

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Č. m.	Zatížení [g]	Síla [N]	PET-G - průhyb [mm]	
			Vzorek 1	Vzorek 2
1	118	1,18	0,025	0,025
2	227	2,27	0,050	0,048
3	328	3,28	0,075	0,070
4	428	4,28	0,100	0,090
5	530	5,30	0,120	0,114
6	629	6,29	0,145	0,140
7	731	7,31	0,165	0,162
8	833	8,33	0,190	0,190
9	933	9,33	0,215	0,210
10	1033	10,33	0,240	0,238
11	1133	11,33	0,260	0,265
12	1233	12,33	0,290	0,290
13	1333	13,33	0,315	0,310
14	1433	14,33	0,340	0,330
15	1533	15,33	0,355	0,355
16	2035	20,35	0,480	0,470
17	2538	25,38	0,600	0,590
18	3040	30,40	0,730	0,690
19	3545	35,45	0,86	0,8
20	4047	40,47	0,98	0,93

21	4551	45,51	1,04	1,03
----	------	-------	------	------

Tabulka 6 - Zatížení Vierendeelova nosníku z ABS, průhyb

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Č. m.	Zatížení [g]	Síla [N]	ABS - průhyb [mm]	
			Vzorek 1	Vzorek 2
1	118	1,18	0,025	0,025
2	227	2,27	0,055	0,055
3	328	3,28	0,075	0,070
4	428	4,28	0,105	0,100
5	530	5,30	0,140	0,134
6	629	6,29	0,160	0,158
7	731	7,31	0,188	0,184
8	833	8,33	0,205	0,208
9	933	9,33	0,230	0,228
10	1033	10,33	0,255	0,250
11	1133	11,33	0,280	0,279
12	1233	12,33	0,300	0,300
13	1333	13,33	0,325	0,325
14	1433	14,33	0,355	0,350
15	1533	15,33	0,380	0,379
16	2035	20,35	0,490	0,495
17	2538	25,38	0,610	0,620
18	3040	30,40	0,730	0,740
19	3545	35,45	0,850	0,860
20	4047	40,47	0,980	0,985
21	4551	45,51	1,100	1,110

Z naměřených hodnot se dále jednoznačně potvrzuje měření modulu pružnosti na prostých nosnících, kde vzorky z materiálu PLA mají nejvyšší tuhost a PET-G společně s ABS mají tuhost přibližně stejnou.

Aby bylo možné porovnat model experimentálního nosníku a nosníku skutečného, je třeba stanovit celkové měřítko modulu pružnosti pro kontrolu správnosti výpočtu. Toto porovnání bude provedeno pro každý materiál zvlášť, protože díky rozdílným modulům pružnosti bude pro každý materiál jiné měřítko.

Jak již bylo výše definováno, průhyb je lineárně závislý na zatížení, proto tento fakt lze využít k přepočtu poměru naměřených průhybů na skutečné působící zatížení. Výpočet vychází z předpokladu, že při působení síly 221,24 kN se nosník prohne

o 50 mm. Tato hodnota byla stanovena z limitního průhybu stanoveného normou na hodnotu $L/400$.

Síly působící na skutečný nosník lze tedy vyjádřit vzorcem

$$F_n = \frac{F_r}{\varepsilon_r} * \varepsilon_{exp} * m_\varepsilon \quad (38)$$

kde F_r - zatížení skutečného nosníku (221,24 kN) a ε_r - deformace skutečného nosníku (50 mm), ε_{exp} - deformace experimentálního nosníku od zatížení, m_r - měřítko deformací – dle (11) = 100

$$F_n = \frac{221,24}{50} * 0,022 * 100 = 9,73 \text{ kN} \quad (39)$$

Tabulka 7 - Výpočet působících sil na Vierendeelův nosník a měřítko modulu pružnosti (PLA)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Síla [N]	PLA - průhyb [mm]		F_n [kN]		m_E [-]	
	Nosník 1	Nosník 2	Nosník 1	Nosník 2	Nosník 1	Nosník 2
1,18	0,022	0,020	9,73	8,85	82,50	75,00
2,27	0,040	0,035	17,70	15,49	77,97	68,22
3,28	0,060	0,050	26,55	22,12	80,94	67,45
4,28	0,078	0,070	34,51	30,97	80,64	72,37
5,30	0,090	0,090	39,82	39,82	75,14	75,14
6,29	0,105	0,105	46,46	46,46	73,86	73,86
7,31	0,130	0,120	57,52	53,10	78,69	72,64
8,33	0,152	0,140	67,26	61,95	80,74	74,37
9,33	0,162	0,150	71,68	66,37	76,83	71,14
10,33	0,190	0,182	84,07	80,53	81,39	77,96
11,33	0,215	0,198	95,13	87,61	83,97	77,33
12,33	0,240	0,213	106,20	94,25	86,13	76,44
13,33	0,250	0,240	110,62	106,20	82,99	79,67
14,33	0,270	0,260	119,47	115,04	83,37	80,28
15,33	0,290	0,280	128,32	123,89	83,70	80,82
20,35	0,350	0,360	154,87	159,29	76,10	78,28
25,38	0,440	0,440	194,69	194,69	76,71	76,71
30,40	0,520	0,535	230,09	236,73	75,69	77,87
35,45	0,610	0,615	269,91	272,13	76,14	76,76
40,47	0,695	0,700	307,52	309,74	75,99	76,53
45,51	0,780	0,780	345,13	345,13	75,84	75,84

Tabulka 8 - Výpočet působících sil na Vierendeelův nosník a měřítko modulu pružnosti (PET-G)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Síla [N]	PET-G - průhyb [mm]		F_n [kN]		m_E [-]	
	Nosník 1	Nosník 2	Nosník 1	Nosník 2	Nosník 1	Nosník 2
1,18	0,025	0,025	11,06	11,06	93,75	93,75
2,27	0,050	0,048	22,12	21,24	97,46	93,56
3,28	0,075	0,070	33,19	30,97	101,18	94,43
4,28	0,100	0,090	44,25	39,82	103,38	93,04
5,30	0,120	0,114	53,10	50,44	100,18	95,17
6,29	0,145	0,140	64,16	61,95	102,00	98,49
7,31	0,165	0,162	73,01	71,68	99,88	98,06
8,33	0,190	0,190	84,07	84,07	100,93	100,93
9,33	0,215	0,210	95,13	92,92	101,96	99,59
10,33	0,240	0,238	106,20	105,31	102,80	101,95
11,33	0,260	0,265	115,04	117,26	101,54	103,49
12,33	0,290	0,290	128,32	128,32	104,07	104,07
13,33	0,315	0,310	139,38	137,17	104,56	102,90
14,33	0,340	0,330	150,44	146,02	104,98	101,90
15,33	0,355	0,355	157,08	157,08	102,47	102,47
20,35	0,480	0,470	212,39	207,97	104,37	102,19
25,38	0,600	0,590	265,49	261,06	104,61	102,86
30,40	0,730	0,690	323,01	305,31	106,25	100,43
35,45	0,860	0,800	380,53	353,98	107,34	99,85
40,47	0,980	0,930	433,63	411,51	107,15	101,68
45,51	1,040	1,030	460,18	455,75	101,12	100,14

Tabulka 9 - Výpočet působících sil na Vierendeelův nosník a měřítko modulu pružnosti (ABS)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Síla [N]	ABS - průhyb [mm]		F_n [kN]		m_E [-]	
	Nosník 1	Nosník 2	Nosník 1	Nosník 2	Nosník 1	Nosník 2
1,18	0,025	0,025	11,06	11,06	93,75	93,75
2,27	0,055	0,055	24,34	24,34	107,21	107,21
3,28	0,075	0,070	33,19	30,97	101,18	94,43
4,28	0,105	0,100	46,46	44,25	108,55	103,38
5,30	0,140	0,134	61,95	59,29	116,88	111,87
6,29	0,160	0,158	70,80	69,91	112,55	111,15
7,31	0,188	0,184	83,19	81,42	113,80	111,38
8,33	0,205	0,208	90,71	92,04	108,89	110,49
9,33	0,230	0,228	101,77	100,89	109,08	108,13
10,33	0,255	0,250	112,83	110,62	109,23	107,09
11,33	0,280	0,279	123,89	123,45	109,35	108,96

12,33	0,300	0,300	132,74	132,74	107,66	107,66
13,33	0,325	0,325	143,81	143,81	107,88	107,88
14,33	0,355	0,350	157,08	154,87	109,62	108,07
15,33	0,380	0,379	168,14	167,70	109,68	109,39
20,35	0,490	0,495	216,82	219,03	106,54	107,63
25,38	0,610	0,620	269,91	274,34	106,35	108,09
30,40	0,730	0,740	323,01	327,44	106,25	107,71
35,45	0,850	0,860	376,11	380,53	106,10	107,34
40,47	0,980	0,985	433,63	435,84	107,15	107,70
45,51	1,100	1,110	486,73	491,15	106,95	107,92

Ze získaných průměrných měřítek modulů pružnosti lze zpětně vypočítat modul pružnosti konkrétního použitého plastu. Tento výpočet vychází z předpokladu známého modulu pružnosti oceli, kde $E = 210\,000\text{ MPa}$, který lze vydělit průměrným měřítkem modulu pružnosti konstrukce vypočteným z experimentálního nosníku.

Průměrné měřítko modulu pružnosti konstrukce PLA: $m_{E,PLA} = 77,38$

Průměrné měřítko modulu pružnosti konstrukce PET-G: $m_{E,PET-G} = 101,02$

Průměrné měřítko modulu pružnosti konstrukce ABS: $m_{E,ABS} = 107,43$

Pak tedy výpočtem dostáváme hodnoty modulu pružnosti jednotlivých plastů závislých na pevnosti konstrukce:

$$E_{PLA} = \frac{210\,000}{77,38} = 2\,713,86\text{ MPa} \quad (40)$$

$$E_{PET-G} = \frac{210\,000}{101,02} = 2\,078,74\text{ MPa} \quad (42)$$

$$E_{ABS} = \frac{210\,000}{107,43} = 1\,954,84\text{ MPa} \quad (43)$$

Tyto hodnoty se shodují s předpokladem rozptylu modulu pružnosti v kapitole materiálových vlastností a potvrzují hodnoty z měření prostého nosníku.

Ze všech předchozích výpočtů lze nyní již za pomoci měřítek dopočítat poměrové síly a porovnat je se silami, které působí na nosník ve výpočtovém modelu.

Pro tuto hodnotu je definována veličina $F_{exp, měřítko 1:1}$. Hodnota těchto sil je definována vztahem

$$F_{exp, měřítko 1:1} = F_{exp} * m_F * m_E \quad (42)$$

kde F_{exp} – síla působící na experimentální nosník [N], m_F – měřítko síly [100], m_E - celkové měřítko modulu pružnosti pro daný materiál [-]

$$F_{exp, měřítko 1:1} = 1,18 * 100 * 77,38 = 9,73 \text{ kN} \quad (43)$$

Porovnáním síly, která působí na statický model a síly, které je přepočtena na model experimentální v měřítku, lze poté určit rozdíl v procentech.

Tabulka 10 - Porovnání měřeného a výpočtového modelu Vierendeelova nosníku (PLA)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Síla [N]	$F_{exp, měřítko 1:1}$	F_n [kN]		Rozdíl [%]	
		Nosník 1	Nosník 2	Nosník 1	Nosník 2
1,18	9,13	9,73	8,85	6,2	3,2
2,27	17,57	17,70	15,49	0,8	13,4
3,28	25,38	26,55	22,12	4,4	14,7
4,28	33,12	34,51	30,97	4,0	6,9
5,30	41,01	39,82	39,82	3,0	3,0
6,29	48,67	46,46	46,46	4,8	4,8
7,31	56,57	57,52	53,10	1,7	6,5
8,33	64,46	67,26	61,95	4,2	4,1
9,33	72,20	71,68	66,37	0,7	8,8
10,33	79,93	84,07	80,53	4,9	0,7
11,33	87,67	95,13	87,61	7,8	0,1
12,33	95,41	106,20	94,25	10,2	1,2
13,33	103,15	110,62	106,20	6,8	2,9
14,33	110,89	119,47	115,04	7,2	3,6
15,33	118,62	128,32	123,89	7,6	4,3
20,35	157,47	154,87	159,29	1,7	1,1
25,38	196,39	194,69	194,69	0,9	0,9
30,40	235,24	230,09	236,73	2,2	0,6
35,45	274,31	269,91	272,13	1,6	0,8
40,47	313,16	307,52	309,74	1,8	1,1
45,51	352,16	345,13	345,13	2,0	2,0

Tabulka 11 - Porovnání měřeného a výpočtového modelu Vierendeelova nosníku (PET-G)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Síla [N]	$F_{\text{exp. měřítko 1:1}}$	Fn [kN]		Rozdíl [%]	
		Nosník 1	Nosník 2	Nosník 1	Nosník 2
1,18	11,83	8,85	8,85	33,6	33,6
2,27	22,75	22,12	19,03	2,8	19,6
3,28	32,87	37,61	30,97	12,6	6,1
4,28	42,89	44,25	39,82	3,1	7,7
5,30	53,12	53,10	50,44	0,0	5,3
6,29	63,04	64,16	61,95	1,7	1,8
7,31	73,26	73,01	71,68	0,3	2,2
8,33	83,48	84,07	84,07	0,7	0,7
9,33	93,50	95,13	92,92	1,7	0,6
10,33	103,53	106,20	105,31	2,5	1,7
11,33	113,55	115,04	117,26	1,3	3,2
12,33	123,57	128,32	128,32	3,7	3,7
13,33	133,59	139,38	137,17	4,2	2,6
14,33	143,61	150,44	146,02	4,5	1,6
15,33	153,64	157,08	157,08	2,2	2,2
20,35	203,95	212,39	207,97	4,0	1,9
25,38	254,36	265,49	261,06	4,2	2,6
30,40	304,67	323,01	305,31	5,7	0,2
35,45	355,28	380,53	353,98	6,6	0,4
40,47	405,59	433,63	411,51	6,5	1,4
45,51	456,10	460,18	455,75	0,9	0,1

Tabulka 12 - Porovnání měřeného a výpočtového modelu Vierendeelova nosníku (ABS)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Síla [N]	$F_{\text{exp. měřítko 1:1}}$	Fn [kN]		Rozdíl [%]	
		Nosník 1	Nosník 2	Nosník 1	Nosník 2
1,18	12,68	11,06	11,06	14,6	14,6
2,27	24,39	24,34	24,34	0,2	0,2
3,28	35,24	33,19	30,97	6,2	13,8
4,28	45,98	46,46	44,25	1,0	3,9
5,30	56,94	61,95	59,29	8,1	4,0
6,29	67,57	70,80	69,91	4,6	3,3
7,31	78,53	83,19	81,42	5,6	3,5
8,33	89,49	90,71	92,04	1,3	2,8
9,33	100,23	101,77	100,89	1,5	0,7
10,33	110,97	112,83	110,62	1,7	0,3
11,33	121,71	123,89	123,45	1,8	1,4

12,33	132,46	132,74	132,74	0,2	0,2
13,33	143,20	143,81	143,81	0,4	0,4
14,33	153,94	157,08	154,87	2,0	0,6
15,33	164,68	168,14	167,70	2,1	1,8
20,35	218,61	216,82	219,03	0,8	0,2
25,38	272,65	269,91	274,34	1,0	0,6
30,40	326,57	323,01	327,44	1,1	0,3
35,45	380,82	376,11	380,53	1,3	0,1
40,47	434,75	433,63	435,84	0,3	0,3
45,51	488,89	486,73	491,15	0,4	0,5

7.6.1 Zhodnocení výsledků

Procentuální rozdíly z tabulky 11,12 a 13 se pohybují v rozpětí téměř od nuly do chyby čtrnácti procent. Z vypočtených hodnot lze pomocí statistických funkcí vypočítat průměrnou procentuální odchylku od skutečného zatížení, nicméně v tomto případě považuji za správnější variantu použít medián, který udává střední hodnotu.

$$Med_{\%(PLA)} = 3,1 \%$$

$$Med_{\%(PET-G)} = 1,8 \%$$

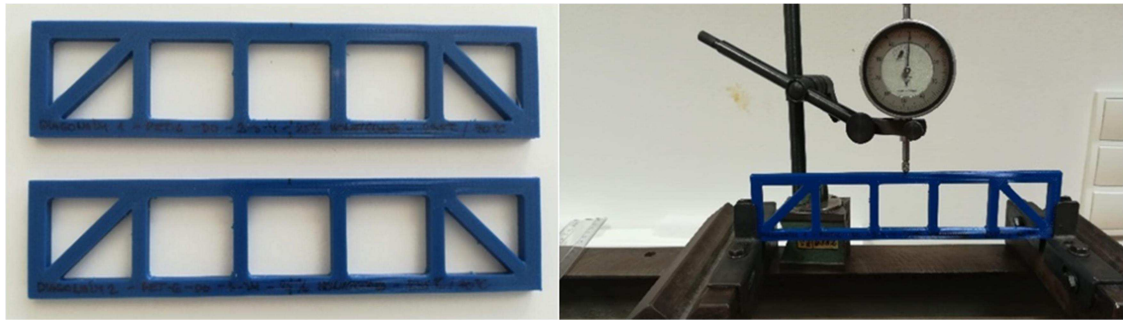
$$Med_{\%(ABS)} = 1,2 \%$$

Rozptyl procentuální odchylky se pohybuje u hodnoty tři procenta u materiálu PLA, do dvou procent u PET-G a nejmenší odchylka je u materiálu ABS. Z výsledných hodnot mediánu procentuální chyby lze měření a výpočty modelové podobnosti Vierendeelova nosníku považovat za úspěšné.

7.7 Ověřování modelové podobnosti Vierendeelova nosníku o pěti polích s vloženými diagonálami

Metodika měření a výpočtu je shodná jako u klasického Vierendeelova nosníku. Cílem bude opět porovnat za pomoci měřítka modulu pružnosti průhyby experimentálního nosníku a statického modelu (obr. 33).

Pro další experimentální měření bude použit pouze materiál PET-G z důvodu snadnějšího tisku a redukce množství naměřených dat.



Obrázek 64 - Vytisknuté vzorky Vierendeelova nosníku s vloženými diagonálními prvky a měřený vzorek (PET-G)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Jelikož průřezy diagonálních a výplňových prvků jsou v této variantě subtilnější oproti variantě klasického Vierendeelova nosníku, je potřeba opět převést průřezové charakteristiky profilu TO 200x200x20 na rozměry tištěného modelu. Výpočet rozměrů bude probíhat analogicky jako v předchozí kapitole.

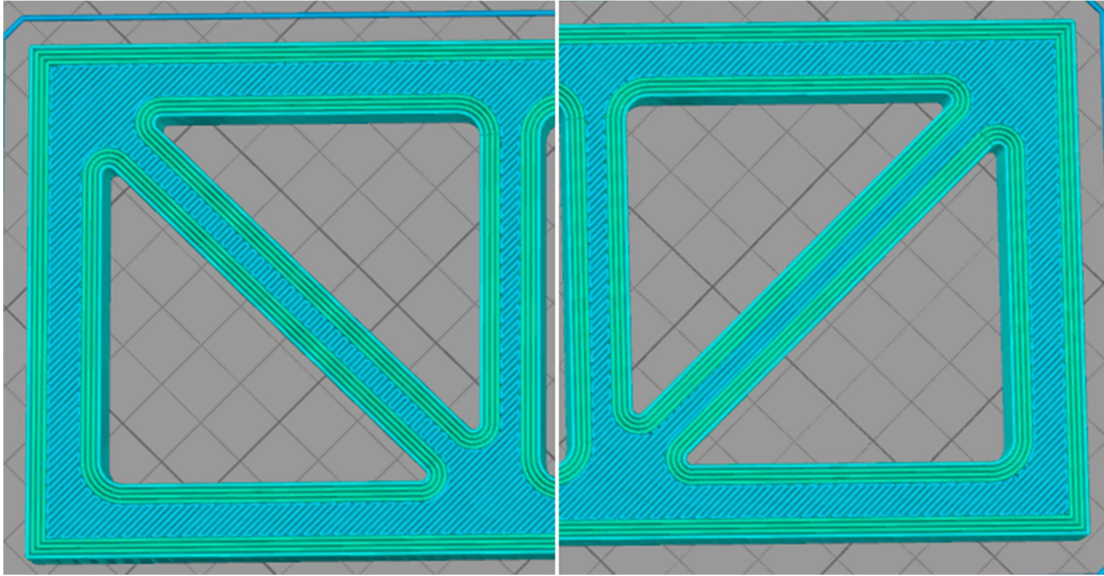
$$I_{z,r} = I_{y,r} = 73,3 * 10^6 \text{ mm}^4 \quad (44)$$

$$I_{yz,exp} = \frac{I_{yz}}{m_{b,h}^4} = \frac{73,3 * 10^6}{100^3} = 73,3 \text{ mm}^4 \quad (45)$$

$$bh_{exp} = \sqrt[8]{12^2 * \frac{I_{exp,yz}^3}{I_{exp,yz}}} = \sqrt[8]{\frac{12^2 * 73,3^3}{73,3}} = 5,45 \text{ mm} \Rightarrow \mathbf{5,6 \text{ mm}} \quad (46)$$

Z hlediska zachování geometrie není možné spolehlivě tisknout profil o výšce 5,44 mm, protože celková výška tisknutého modelu je 5,6 mm. Z tohoto důvodu bylo nutné výplňové prvky tisknout se stejnou výškou. Je potřeba zmínit, že pojmem výška je zde myšlen rozměr ve směru tisku.

Zde vyvstává další problém 3D tištěných konstrukcí. Díky přítomnosti neortogonálních prvků nelze nyní zaručit rovnoměrný směr výplňových vrstev a lze očekávat rozdíly ve výsledném porovnání pevností s ocelovou variantou nosníku, kde jsou ve všech směrech uvažovány stejné vlastnosti.



Obrázek 65 - Vliv směru vrstev z hlediska natočené neortogonálního prvku

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Při výpočtech modelové podobnosti u nosníku s diagonálami je potřeba vzít v úvahu jiný poměr působící síly a průhybu. Zde budou výpočty vycházet z hodnot, které byly získány programem FIN 2D (obr. 43). Při zatížení silou 221,24 kN se nosník zdeformuje o 26,8 mm na horní pásnici, která je předmětem měření úchylkoměrem.

Síly působící na skutečný nosník lze tedy vyjádřit vzorcem

$$F_n = \frac{F_r}{\varepsilon_r} * \varepsilon_{exp} * m_\varepsilon \quad (47)$$

kde F_r - zatížení skutečného nosníku (221,24 kN) a ε_r - deformace skutečného nosníku (26,8 mm), ε_{exp} - deformace experimentálního nosníku od zatížení, m_ε - měřítko deformací – dle (3) = 100

$$F_n = \frac{221,24}{26,8} * 0,017 * 100 = 14,03 \text{ kN} \quad (48)$$

Tabulka 13 - Výpočet působících sil na Vierendeelův nosník s diagonálami a měřítko modulu pružnosti (PET-G)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Síla [N]	PET-G - průhyb [mm]		F _n [kN]		m _E [-]	
	Nosník 1	Nosník 2	Nosník 1	Nosník 2	Nosník 1	Nosník 2
1,18	0,017	0,018	14,03	14,86	118,93	125,93
2,27	0,035	0,035	28,89	28,89	127,28	127,28
3,28	0,050	0,050	41,28	41,28	125,84	125,84
4,28	0,060	0,062	49,53	51,18	115,73	119,59
5,30	0,085	0,085	70,17	70,17	132,40	132,40
6,29	0,102	0,100	84,20	82,55	133,87	131,24
7,31	0,115	0,110	94,94	90,81	129,87	124,22
8,33	0,125	0,122	103,19	100,71	123,88	120,90
9,33	0,140	0,139	115,57	114,75	123,87	122,99
10,33	0,155	0,150	127,96	123,83	123,87	119,87
11,33	0,170	0,169	140,34	139,51	123,86	123,14
12,33	0,175	0,180	144,47	148,59	117,17	120,51
13,33	0,205	0,192	169,23	158,50	126,96	118,90
14,33	0,215	0,209	177,49	172,53	123,86	120,40
15,33	0,230	0,224	189,87	184,92	123,86	120,62
20,35	0,295	0,290	243,53	239,40	119,67	117,64
25,38	0,390	0,380	321,95	313,70	126,85	123,60
30,40	0,480	0,480	396,25	396,25	130,35	130,35
35,45	0,542	0,540	447,43	445,78	126,22	125,75
40,47	0,610	0,610	503,57	503,57	124,43	124,43
45,51	0,675	0,688	557,23	567,96	122,44	124,80

Průměrné měřítko modulu pružnosti konstrukce PET-G:

$$m_{E,PET-G} = 124,32$$

Opět tedy výpočtem dostáváme hodnoty modulu pružnosti jednotlivých plastů závislých na pevnosti konstrukce:

$$E_{PLA} = \frac{210\,000}{124,32} = 1\,689,14 \text{ MPa} \quad (49)$$

Opět lze porovnáním síly, která působí na statický model a síly, které je přepočtena na model experimentální v měřítku, lze poté určit rozdíl v procentech.

$$F_{exp,měřítko\ 1:1} = F_{exp} * m_F * m_E \quad (50)$$

kde F_{exp} - síla působící na experimentální nosník [N], m_F - měřítko síly [100], m_E - celkové měřítko modulu pružnosti pro daný materiál [-]

$$F_{exp, měřítko 1:1} = 1,18 * 100 * 124,34 = 14,67 \text{ kN} \quad (51)$$

Porovnáním síly, která působí na statický model a síly, které je přepočtena na model experimentální v měřítku, lze poté určit rozdíl v procentech.

Tabulka 14 - Porovnání měřeného a výpočtového modelu Vierendeelova nosníku s diagonálami (PET-G)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Síla [N]	$F_{exp, měřítko 1:1}$	Fn [kN]		Rozdíl [%]	
		Nosník 1	Nosník 2	Nosník 1	Nosník 2
1,18	14,67	14,03	14,86	4,53	1,27
2,27	28,22	28,89	28,89	2,32	2,32
3,28	40,78	41,28	41,28	1,21	1,21
4,28	53,21	49,53	51,18	7,43	3,96
5,30	65,89	70,17	70,17	6,10	6,10
6,29	78,20	84,20	82,55	7,13	5,27
7,31	90,88	94,94	90,81	4,27	0,08
8,33	103,56	103,19	100,71	0,36	2,83
9,33	115,99	115,57	114,75	0,36	1,09
10,33	128,43	127,96	123,83	0,37	3,71
11,33	140,86	140,34	139,51	0,37	0,96
12,33	153,29	144,47	148,59	6,11	3,16
13,33	165,72	169,23	158,50	2,07	4,56
14,33	178,16	177,49	172,53	0,38	3,26
15,33	190,59	189,87	184,92	0,38	3,07
20,35	253,00	243,53	239,40	3,89	5,68
25,38	315,53	321,95	313,70	1,99	0,59
30,40	377,94	396,25	396,25	4,62	4,62
35,45	440,73	447,43	445,78	1,50	1,13
40,47	503,14	503,57	503,57	0,09	0,09
45,51	565,80	557,23	567,96	1,54	0,38

7.7.1 Zhodnocení výsledků

Procentuální rozdíly z tabulky 14 se pohybují v rozpětí téměř od nuly do chyby čtrnácti procent. Z vypočtených hodnot lze pomocí statistických funkcí vypočítat průměrnou procentuální odchylku od skutečného zatížení, nicméně v tomto případě považují za správnější variantu použít medián, který udává střední hodnotu.

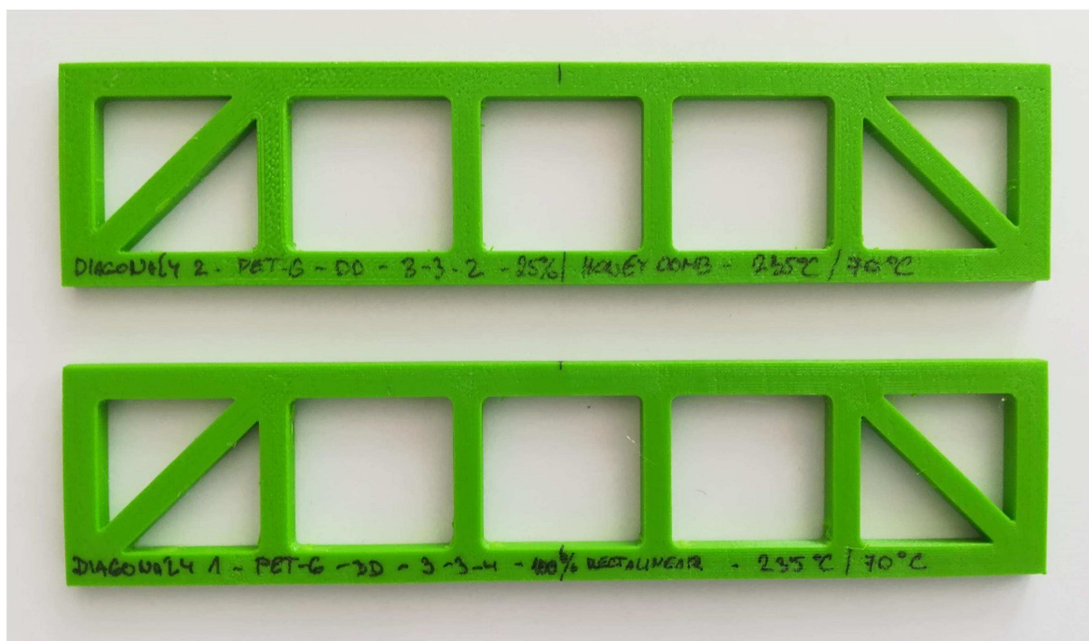
$$Med_{\%(PET-G)} = 2,2 \%$$

Rozptyl procentuální odchylky u Vierendeelova nosníku s diagonálami výpočtově vyšel okolo dvou procent. Dle původních očekávání se zkreslení způsobené tiskem diagonál příliš neprojevilo, neboť z výsledných hodnot mediánu procentuální chyby lze měření a výpočty modelové podobnosti Vierendeelova nosníku s diagonálami považovat za úspěšné.

7.8 Vliv nastavení tisku na výsledky modelové podobnosti

Měření, která byla v předchozích kapitolách prováděna, měla stejná nastavení základních hodnot tisku, které vycházejí ze zkušeností. Jedná se zejména o počet obvodových perimetrů, množství a tvar výplně a teploty tavení termoplastu. Po předcházejících měřeních ovšem vyvstává otázka, zda změna těchto parametrů zásadně ovlivní celkovou tuhost konstrukce zkreslení výsledků.

Z toho důvodu se následující část experimentu zabývá ověřením vlivu nastavení základních parametrů 3D tisku na výsledné hodnoty přesnosti v porovnání s předchozími variantami.



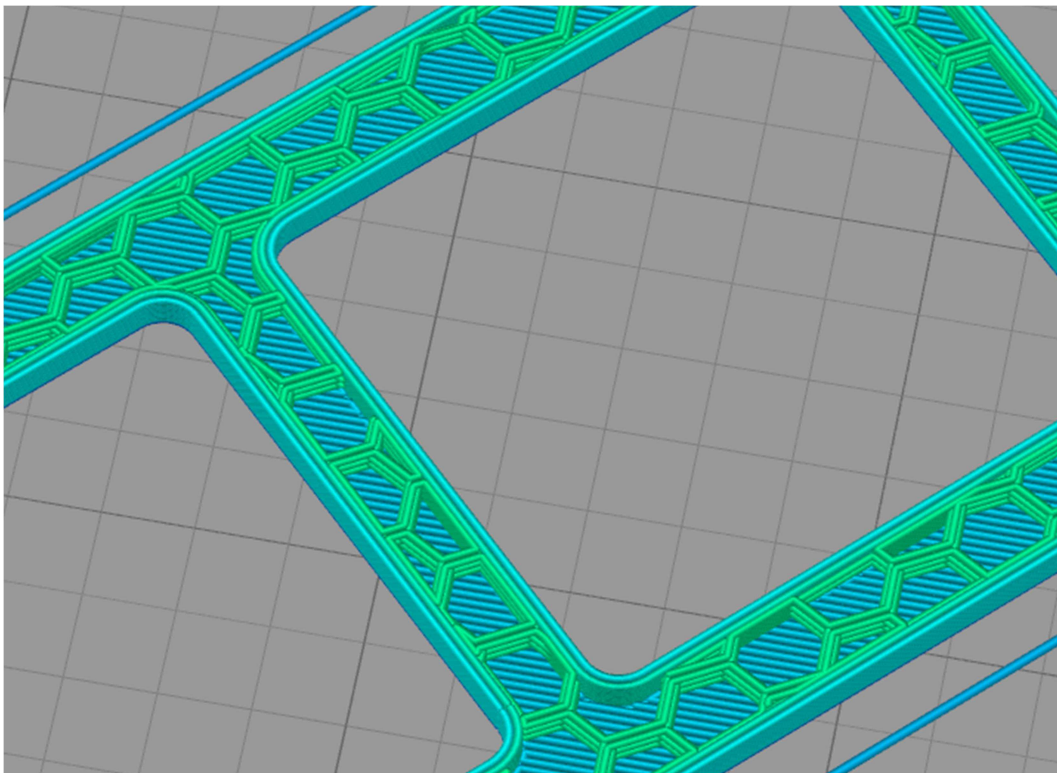
Obrázek 66 - Modely Vierendeelova nosníku s diagonálami, materiál PET-G, nahoře - 2 obvodové perimetry, infill 25% honeycomb, dole - 4 obvodové perimetry, 100% infill

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Měřené experimentální modely (obr. 66) mají stejné rozměry jako již měřený Vierendeelův nosník s diagonálami, pouze je pozměněno nastavení základních pevnostních vlastností, tj. počet obvodových perimetrů a hustota infillu (výplně).

7.8.1 Měření nosníku č. 1

Při nastavení nosníku č. 1 byl kladen důraz na celkové snížení tuhosti konstrukce, kterou u 3D tisku ovlivňuje zejména počet obvodových perimetrů, které tvoří hlavní pevnostní složku. Z tohoto důvodu bylo zvoleno nastavení dvou obvodových perimetrů a infill zůstal shodně s ostatními měřenými vzorky s nastavením 25 % vzorem honeycomb.



Obrázek 67 - Nastavení programu Simplify3D - (3x horní a spodní vrstva, 2 obvodové perimetry, 25% procent výplň - Honeycomb)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Na obrázku 67 lze vidět obrazový výstup z programu Simplify3D, který byl pro tuto práci použit. Je jasně patrné, že po užití dvou obvodových perimetrů zbývá více prostorů pro výplň, a konstrukce je z tohoto důvodu subtilnější než u silnostěnné varianty. Výpočty jsou shodné jako u předchozích variant, proto budou uvedeny pouze tabulkové výsledky

Tabulka 15 - Výpočty modelové podobnosti (2 obvodové perimetry)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Síla [N]	PET-G - průhyb [mm]	F_n [kN]	m_E [-]	$F_{exp, měřítko}$ 1:1	Rozdíl [%]
1,18	0,020	16,51	139,92	16,91	2,4
2,27	0,038	31,37	138,19	32,53	3,7
3,28	0,060	49,53	151,01	47,01	5,1
4,28	0,080	66,04	154,30	61,34	7,1
5,30	0,098	80,90	152,64	75,96	6,1
6,29	0,115	94,94	150,93	90,14	5,0
7,31	0,130	107,32	146,81	104,76	2,4
8,33	0,150	123,83	148,65	119,38	3,6
9,33	0,164	135,39	145,11	133,71	1,2
10,33	0,180	148,59	143,85	148,04	0,4
11,33	0,200	165,10	145,72	162,38	1,7
12,33	0,210	173,36	140,60	176,71	1,9
13,33	0,230	189,87	142,44	191,04	0,6
14,33	0,250	206,38	144,02	205,37	0,5
15,33	0,265	218,76	142,70	219,70	0,4
20,35	0,360	297,19	146,04	291,65	1,9
25,38	0,425	350,85	138,24	363,73	3,7
30,40	0,500	412,76	135,78	435,68	5,6
35,45	0,580	478,80	135,06	508,05	6,1
40,47	0,660	544,84	134,63	579,99	6,5
45,51	0,733	605,11	132,96	652,23	7,8

Průměrné měřítko modulu pružnosti konstrukce PET-G:

$$m_{E,PET-G} = 143,85$$

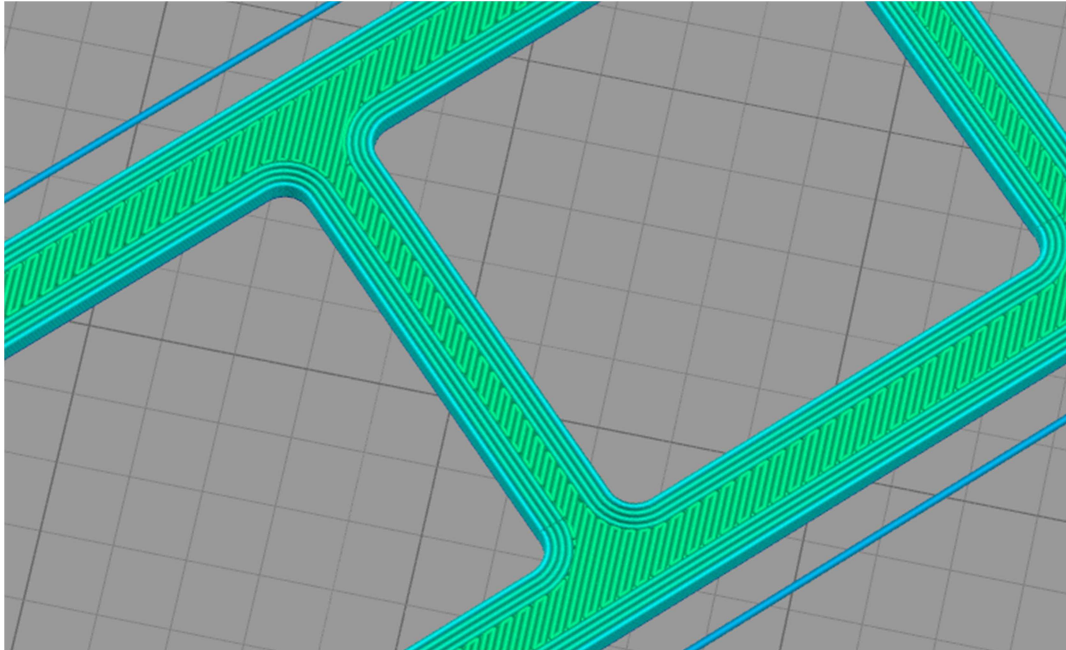
Výpočtem dostáváme hodnoty modulu pružnosti jednotlivých plastů závislých na pevnosti konstrukce:

$$E_{PET-G,2\ perimetry} = \frac{210\ 000}{124,32} = 1\ 689,14\ MPa \quad (52)$$

$$Med_{\%(PET-G,2\ perimetry)} = 3,6\ \%$$

7.8.2 Měření nosníku č. 2

Nastavení nosníku č. 2 je koncipováno jako plnostěnný průřez se čtyřmi obvodovými perimetry.



Obrázek 68 - Nastavení programu Simplify3D - (4 obvodové perimetry, 100% procent výplň - Rectalinear)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Z obrázku 68 lze posoudit rozdíl proti původním variantám. Jsou použity čtyři obvodové perimetry a 100% výplň, kterou tvoří vrstvy ve vzájemné poloze 45 stupňů. V tomto případě lze očekávat nižší průhyby a vyšší tuhost konstrukce.

Tabulka 16 - Výpočty modelové podobnosti (4 perimetry, 100 % výplň)

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Síla [N]	PET-G - průhyb [mm]	F_n [kN]	m_E [-]	$F_{exp, měřítko}$ 1:1	Rozdíl [%]
1,18	0,012	9,91	83,95	11,58	16,89
2,27	0,035	28,89	127,28	22,28	22,90
3,28	0,050	41,28	125,84	32,19	22,02
4,28	0,061	50,36	117,66	42,00	16,59
5,30	0,072	59,44	112,15	52,01	12,49
6,29	0,080	66,04	104,99	61,73	6,53
7,31	0,092	75,95	103,90	71,74	5,55
8,33	0,100	82,55	99,10	81,75	0,98
9,33	0,114	94,11	100,87	91,56	2,71
10,33	0,122	100,71	97,50	101,37	0,65

11,33	0,134	110,62	97,63	111,19	0,51
12,33	0,142	117,22	95,07	121,00	3,22
13,33	0,152	125,48	94,13	130,81	4,25
14,33	0,162	133,73	93,32	140,63	5,15
15,33	0,172	141,99	92,62	150,44	5,95
20,35	0,220	181,61	89,25	199,70	9,96
25,38	0,268	221,24	87,17	249,07	12,58
30,40	0,315	260,04	85,54	298,33	14,72
35,45	0,365	301,32	85,00	347,89	15,46
40,47	0,412	340,12	84,04	397,15	16,77
45,51	0,462	381,39	83,80	446,61	17,10

Průměrné měřítko modulu pružnosti konstrukce PET-G:

$$m_{E,PET-G} = 98,13$$

$$Med_{\%(PET-G, 2 \text{ perimetry})} = 10 \%$$

$$E_{PET-G, plný} = \frac{210\,000}{98,13} = 2\,139,92 \text{ MPa} \quad (53)$$

Tabulka 17 - Vliv nastavení na průhyby experimentálních Vierendeelovo nosníků s diagonálami

(Zdroj: Autor Diplomové práce)

Porovnání průhybů experimentálních nosníků s diagonálami			
Síla [N]	PET-G – nastavení (4 perimetry, 25% výplň) [mm]	PET-G – nastavení (2 perimetry, 25% výplň) [mm]	PET-G – nastavení (4 perimetry, 100% výplň) [mm]
1,18	0,017	0,020	0,012
2,27	0,035	0,038	0,035
3,28	0,050	0,060	0,050
4,28	0,060	0,080	0,061
5,30	0,085	0,098	0,072
6,29	0,102	0,115	0,080
7,31	0,115	0,130	0,092
8,33	0,125	0,150	0,100
9,33	0,140	0,164	0,114
10,33	0,155	0,180	0,122
11,33	0,170	0,200	0,134
12,33	0,175	0,210	0,142
13,33	0,205	0,230	0,152
14,33	0,215	0,250	0,162
15,33	0,230	0,265	0,172
20,35	0,295	0,360	0,220
25,38	0,390	0,425	0,268
30,40	0,480	0,500	0,315
35,45	0,542	0,580	0,365
40,47	0,610	0,660	0,412
45,51	0,675	0,733	0,462

Z hodnot v tabulce 17 je jednoznačně prokazatelné, že průhyby experimentálního nosníku jsou přímo závislé na nastavení parametrů 3D tisku. Největší průhyby nastaly dle očekávání u varianty s nejnižším počtem obvodových perimetrů, ve středu se nachází nastavení, která byla testována na všech nosnících, a nejnižší průhyby byly naměřeny u varianty, která byla vytištěna s plnou plochou průřezu.

Poslední měření nosníků vykazuje největší chyby, které se zvětšují směrem ke krajním hodnotám zatížení. Vzhledem k experimentálnímu měření pouze jednoho nosníku nelze s přesností určit, zda se jedná pouze o chybu měření, či platnost profilu s plným průřezem.

8 Výsledky práce a diskuze

Výsledky předkládané diplomové práce lze rozdělit na část teoretickou a část praktickou. Teoretická část je rozdělena do několika kapitol, které se věnují historii, vývoji a statické analýze Vierendeelova nosníku. Dále je prezentována problematika 3D tisku pro stavební využití.

Po zkoumání historie a použití Vierendeelova nosníku lze udělat jednoznačné závěry hned v několika bodech. V počátcích svého vzniku byl tento druh nosníku plánovaný jako alternativa nedokonalých příhradových konstrukcí. Z důvodů nepřesných styčnickových spojů nebylo možné přesně spočítat průběhy vnitřních sil v příhradových konstrukcích a z toho plynuly problémy při samotné realizaci. Konstrukce Arthura Vierendeela tuto nevýhodu vymazala, protože všechny spoje byly koncipovány jako tuhé rámové rohy. Důsledkem tohoto technického řešení byla konstrukce, která přenáší všechny vnitřní síly. V době, kdy se jako hlavní spojovací prvky používaly nýty, fungovala konstrukce Vierendeelova nosníku výborně. Bohužel nástupem svařovaných konstrukcí se začaly projevovat nedostatky v podobě vysokého napětí v prvcích, nekvalitní oceli a z toho pramenící strukturální degradace. Slavná éra Vierendeelovo mostů skončila před druhou světovou válkou, kdy byla naprostá většina těchto konstrukcí zničena. Konstrukční řešení Vierendeelova nosníku mělo původ v Belgii, ale rozšířilo se i do Německa a Československa, kde je dodnes dochováno mnoho mostů, zejména ze železobetonu. V současné době se tento konstrukční typ nosníků používá výhradně pro architektonické účely, neboť vzhledem ke svým vlastnostem nemůže konkurovat vlastnostem příhradových nosníků.

V rámci statické analýzy Vierendeelova nosníku byla zvolena varianta s pěti poli, která byla zatěžována osamělou silou uprostřed. Ve druhé variantě pro porovnání byl použit nosník stejných vlastností, pouze s vloženými diagonálami v krajních polích. Výstupem je srovnání průběhů vnitřních sil a zejména průhybů, které jsou u velkorozponových konstrukcí většinou velmi problematické a nežádoucí. Přidáním pouhých dvou diagonálních prvků se maximální vnitřní síly v konstrukci příliš nezměnily. Co se však zredukovalo radikálně, byl výsledný průhyb. V původní variantě průhybová čára odpovídala prostému nosníku, kdežto u varianty s diagonálami se takto chová pouze nevyztužená střední část. Krajní pole, ve kterých byla vložena diagonála,

celou konstrukci zpevnily a výsledný průhyb se zredukoval původních 54,4 mm na 31,4 mm, tj. o 44 % méně. Výsledkem statického rozboru je tedy fakt, že příhradové konstrukce jsou mnohem efektivnější v poměru vlastní hmotnosti a výsledného průhybu. Pokud by byla v porovnání celopříhradová konstrukce, výsledkem by pravděpodobně bylo i vyšší možné zatížení konstrukce z hlediska únosnosti.

V teoretické části je též řešena problematika 3D tisku ve stavitelství, protože tato technologie v posledním desetiletí prošla velmi významným vývojem a nyní se používá napříč všemi odvětvími, strojním průmyslem počínaje a lékařstvím konče. Velmi významnou roli v segmentu tištěných staveb hrají soukromé firmy a celky, které pracují v rámci univerzit po celém světě. V současné fázi není ještě 3D tisk na tak vysoké úrovni, aby bylo možné tisknout celé stavby včetně technologií, nicméně koncepty počítají do budoucna s velkými technologickými celky vytištěnými přímo na staveništi. Nyní je možné tisk využít na přípravu prefabrikátů, jednoduchých obvodových konstrukcí domů popřípadě na atypické stavby v podobě předpjatých lávek. Velkým problémem jsou neexistující normy a kontrola kvality, které by standardizovaly výsledné konstrukce z hlediska statiky, popřípadě z hlediska tepelné techniky. I přes všechna tato omezení se 3D tisk jistě dostane i do běžné praxe ve stavitelství, neboť nabízí velmi široké možnosti kombinace druhů materiálu napříč celou stavební konstrukcí. Dalším bonusem by mohla být i nižší ekologická zátěž, protože výsledná stavba by vyprodukovala mnohem méně odpadního materiálu. Z hlediska ekologie bude tato úspora do budoucna velmi žádaná.

Velmi důležitou částí diplomové práce je experiment, který se snaží prokázat využitelnost 3D tisku pro účely experimentální mechaniky. Jak již bylo zmíněno v úvodu, tento experiment rozšiřuje původní práci inženýra Luboše Bischofa, který měřil průhyby Vierendeelova nosníku z materiálu ABS. Experiment, který je řešen v této práci, je rozšířen o materiály PLA a PET-G. Cílem prvního měření bylo porovnat tyto tři materiály z hlediska výpočtových modelů. Vstupní informace o modulech pružnosti jednotlivých materiálů vycházejí s obecných hodnot, které jsou dané pro jednotlivé druhy plastů, ale přímo výrobce tento údaj většinou neudává. Další proměnou, která do modulu pružnosti vstupuje, je teplota, při které se materiál tiskne a tím mění svou strukturu. Pro ověření modulů pružnosti jednotlivých materiálů byl zvolen prostý nosník zatížený osamělou silou uprostřed. Po dosazení do příslušných vzorců vyšly hodnoty jednotlivých modulů pružnosti vyšší, než bylo očekáváno.

Pravděpodobně to bylo způsobeno nesprávnou metodou měření a velmi subtilním prvkem, který byl zatěžován. Pro opakované měření bych doporučil laserovou technologii, která je násobně přesnější, než použité mechanické úchylkoměry.

Po zkušebním měření již bylo možné realizovat měření samotných Vierendeelovo nosníků z různých materiálů. Výsledné hodnoty fiktivních přepočítaných sil téměř odpovídaly skutečnému stavu, který byl reprezentován hodnotami zatížení a průhybu ve statickém programu FIN 2D. Z hlediska testovaných materiálů se jeví jako nejspolehlivější ABS, které vykazovalo nejmenší chyby měření. Použitá metoda měření nebyla pravděpodobně zvolena správně, neboť v průběhu výpočtů se ukázalo, že i pouhá změna průhybu modelu o 0,005 mm měla ve výsledku velký vliv na chybu měření. Pokud by se tento experiment realizoval znovu, doporučuji použít měřící metodu na bázi laseru.

Další částí experimentu bylo měření průhybů na nosníku s vloženými diagonálami. Tento experiment byl prováděn pouze s materiálem PET-G, který měl nejlepší tiskové vlastnosti ve velmi horkém létě, kdy bylo měření prováděno. Výsledky a přesnost téměř odpovídají původnímu měření a hodnoty fiktivních sil vyšly opět velmi přesně. Naměřené a vypočtené hodnoty potvrzují chování nosníku dle statického modelu a potvrzují nižší průhyby příhradových konstrukcí proti Vierendeelovo nosníku.

V tento moment by mohl být experiment prohlášen za úspěšně dokončený, ale na závěr bylo nutné ověřit ještě jeden zásadní faktor, který celou dobu provázel poměrové výpočty experimentálního nosníku. Tímto faktorem je poměrové měřítko modulu pružnosti materiálu E . V prvotní fázi se zdálo, že tato hodnota je ovlivněna pouze materiálem, nicméně toto tvrzení nebylo pravdivé. Pro ověření hypotézy byly vytištěny nosníky s velmi odlišným nastavením tisku, aby bylo možné objektivně zhodnotit tento velmi špatně předvídatelný faktor. První testovací nosník byl vytištěn s ohledem na nižší celkovou tuhost (2 obvodové perimetry, 25 % výplň) a druhý byl vytištěn jako plný průřez. Dle očekávání byly průhyby při odlišném nastavení velmi rozdílné. Nosník s plným průřezem měl nižší průhyby a vyšší celkovou tuhost. Také měřítko modulu pružnosti a modul pružnosti materiálu byl o hodně vyšší. V tu chvíli bylo jasné, že do poměrových výpočtů vstupuje i celková tuhost prvku, proto usuzuji, že za předpokládané měřítko modulu pružnosti materiálu ve skutečnosti reprezentuje modul pružnosti v závislosti na tuhosti konstrukce. Tento fakt potvrzují i přepočtené

hodnoty předpokládaného modulu pružnosti materiálu PET-G, které se liší téměř o 580 MPa. Tento rozdíl nemůže být způsoben chybou měření, ale potvrzuje předpoklad vlivu nastavení tištěné konstrukce.

Závěrem experimentu je tedy souhrn faktorů, které ovlivňují výsledné hodnoty tuhosti a průhybů konstrukcí zhotovených 3D tiskem. Těmito faktory tedy jsou nastavené vlastnosti tištěného objektu (počet obvodových perimetrů, množství výplně, směr vrstev), výstupní teplota, druh měřené konstrukce, přesnost měřícího zařízení a způsob zatěžování. Pro potvrzení těchto předpokladů by bylo nutné experiment zopakovat s vyšší přesností měření a za použití více vzorků. Pro tento účel je v přílohách přiloženo detailní nastavení tisku experimentálních nosníků.

9 Závěr

Cílem teoretické části diplomové práce je představení Vierendeelova nosníku z hlediska historie, použití, statické analýzy a zní vyplývajících konstrukčních problémů. Vznik Vierendeelova nosníku se datuje na konec devatenáctého století, kdy bylo třeba vyvinout alternativu k příhradovým konstrukcím, které nebylo možné přesně navrhovat díky nedokonalým styčnicům. Z tohoto důvodu měla Vierendeelova konstrukce místo styčniců tuhé rámové rohy. Zpočátku byly všechny Vierendeelovy mosty nýtované, ale s nástupem technologie svařování byly nýty vytěsněny. Z důvodu nedostatečných znalostí svařování, špatné kvality oceli a nedostatku zkušeností, začaly Vierendeelovy mosty vykazovat strukturální vady, které vedli až ke kolapsu mostu Hasselt. Hlavním viníkem byl křehký lom, který se tvořil v místech svařování a při působení nízkých teplot a vysokocyklického namáhání poškozoval konstrukce. Toto vysvětlení bylo podáno až v sedmdesátých letech, kdy se začaly prohlubovat znalosti mechaniky materiálů.

V části statické analýzy byly porovnávány dvě varianty nosníků, z nichž jeden byl Vierendeelovy konstrukce a druhý s vloženými diagonálními prvky. Z hlediska únosnosti na tom byly obě varianty podobně. V tomto bodě je potřeba zmínit, že ve variantě s diagonálami byly zmenšeny průřezy, aby byla zachována podobná váha. Velký rozdíl byl v průhybech, kde přidání pouhých dvou diagonálních prvků znamenalo redukci o 44 % při zachování téměř stejné váhy. Z toho lze usoudit, že příhradové konstrukce jsou efektivnější z hlediska poměru vlastní váhy a průhybu. Příhradová konstrukce má i podstatně lepší poměr mezi vlastní váhou a přeneseným zatížením, proto se prosadila navzdory jiným druhům konstrukcí.

Z důvodu zaměření diplomové práce na oblast 3D tisku je také řešena současná problematika tištěných staveb a možných směrů, kterým se může 3D tisk ve stavitelství ubírat. Kapitola shrnuje významné technologické firmy a společnosti, která se zabývají využitím tisku pro stavební účely. Ve většině případů využívají aditivní technologii, kdy postupně vrství materiál a tím vzniká samotná stavba. V současné době je tato technologie v rané fázi, ale do budoucna se počítá s tiskem velkých technologických celků. Cíle stanovené pro teoretickou část práce byly splněny.

Cíl experimentální práce spočíval v ověření hypotézy, zda lze využít tištěné konstrukce pro účely experimentální mechaniky ve stavitelství. Tiskárna, která byla pro tento účel využita, funguje na principu FFF, které je jednou z aditivních technologií. Spočívá v tavení termoplastu a postupném vrstvení ve vertikálním směru. Pro účely stanovení rozměrů modelových prvků byla stanovena poměrová měřítko skutečných veličin, která se poté využívala pro výpočet modelových sil. Výsledkem byly Vierendeelovy nosníky z materiálů ABS, PLA a PET-G, které byly zatěžovány a následně porovnávány. Výsledky modelové podobnosti vyšly u všech variant s přesností do šesti procent, proto lze tuto část experimentu považovat za úspěšnou. Jako nejvhodnější materiál pro experimentální prvky se jeví ABS, které má s ocelí nejvíce společných rysů. Sejným způsobem byly testovány i vzorky nosníků s diagonálami. Výsledky průhybů potvrdily shodné chování při zatěžování jako u výpočtových modelů.

Poslední část experimentu zkoumá vliv nastavení 3D tisku na výsledné pevnostní vlastnosti a průhyby. Měření nosníku s odlišným nastavením obvodových perimetrů a výplně přineslo naprosto odlišné výsledky průhybů a sil, nicméně poměrové měřítko modulu pružnosti materiálu a konstrukce tento rozdíl částečně redukovalo. Chyby měření byly největší u nosníků vytištěného plným průřezem, ale nelze jednoznačně určit, zda to byla chyba měřicího přístroje nebo vlastnost konstrukce. Pro relevantnější výsledné hodnoty by bylo zapotřebí použít násobně přesnější metody měření, než které byly využity v této práci. Ideálním se zdá být laserová technologie, která by výsledky velmi zpřesnila.

Stanovená hypotéza, zda lze využít 3D tisk pro účely experimentální mechaniky ve stavitelství byla potvrzena pouze částečně. Nelze ji potvrdit u prostých nosníků, kde byla jednoznačně zvolena chybná metodika měření, z důvodu průhybu konstrukce od úchytkoměru. V části testování Vierendeelovo nosníku byla hypotéza potvrzena, neboť se výsledné chyby pohybovaly v řádu jednotek procent. Při ověření vlivu nastavení na výsledné průhyby byly zjištěny značné rozdíly v přesnosti a z provedených měření nelze jednoznačně určit, z jakého důvodu nastaly.

Pro celkové potvrzení stanovené hypotézy by bylo nutné zhotovit desítky druhů konstrukcí s různým nastavením a tyto výsledky poté prezentovat jako celek.

10 Seznam použité literatury

- [1]. **BISCHOF, Luboš.** *Analýza Vierendeelova nosníku, řešeného dle EC s modelovou podobností.* Plzeň : Západočeská univerzita v plzni, 2017. Diplomová práce.
- [2]. **WICKERSHIMER, David J.** The Vierendeel. *Journal of the Society of Architectural Historians.* Vydání 35, 1976, Sv. Svazek 1, Květen 1976.
- [3]. **ESPION, Bernard.** The Vierendeel bridges over the Albert Canal, Belgium – their significance in the story of brittle failures. *Steel Construction.* 2012, 5.
- [4]. **MOTLOVÁ, Žaneta.** www.ostrava.idnes.cz. [Online] 23. Duben 2018. [Citace: 25. Srpen 2018.] Dostupné z: https://ostrava.idnes.cz/prehrada-nove-herminovy-povodi-odry-dvc-/ostrava-zpravy.aspx?c=A180421_397002_ostrava-zpravy_jog.
- [5]. **PŘÍSPĚVATELÉ, Wikipedie.** Most Sokolovských hrdinů (Darkov). *Wikipedie: Otevřená encyklopedie.* [Online] 12. Červenec 2018. [Citace: 10. Srpen 2018.] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Most_Sokolovsk%C3%BDch_hrdin%C5%AF_\(Darkov\)&oldid=16241784](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Most_Sokolovsk%C3%BDch_hrdin%C5%AF_(Darkov)&oldid=16241784). 16241784.
- [6]. **HOZNOUR, Vít.** Kočičí oči mají cenu ECCS. *časopis Stavebnictví.* [Online] Expodata Brno, Říjen 2007. [Citace: 21. Srpen 2018.] Dostupné z: https://www.casopisstavebnictvi.cz/kocici-oci-maji-cenu-eccs_A457_I10_07.
- [7]. **PŘÍSPĚVATELÉ, Wikipedie.** Federální shromáždění (budova). *Wikipedie: Otevřená encyklopedie.* [Online] 20. Srpen 2018. [Citace: 25. Srpen 2018.] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Feder%C3%A1ln%C3%AD_shrom%C3%A11%C5%BE%C4%9Bn%C3%AD_\(budova\)&oldid=16322283](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Feder%C3%A1ln%C3%AD_shrom%C3%A11%C5%BE%C4%9Bn%C3%AD_(budova)&oldid=16322283). 16322283.
- [8]. **ESPION, Bernard.** The Vierendeel Bridge at its Heyday: Rational Design, Experiments and Brittle Failure. *Technology / Metal Structures.* 2012, stránky 253-260.
- [9]. **ALONSO, Austin.** My Favorite Building: Plaza Corporate Center. *www.bizjournals.com.* [Online] Kansas City Business Journal, 5. Září 2014. [Citace: 2. Srpen 2018.] Dostupné z: <https://www.bizjournals.com/kansascity/news/2014/09/05/plaza-corporate-center.html>.

- [10]. **KHOSHNEVIS, Behrokh.** Mega-scale fabrication by contour crafting. *Int. J. Industrial and Systems Engineering*. 1, 14. Březen 2006, 3. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/5c9d/fl1a7667fc69c23ba5ecb224a6edc873311c6.pdf>.
- [11]. Home - CC-Corp. Home - CC-Corp [online]. *Contour Crafting Corporation*. [Online] 2017. [Citace: 13. 7 2018.] Dostupné z: <http://contourcrafting.com/>.
- [12]. **WOLFS, R.J.M.** *3D PRINTING OF CONCRETE STRUCTURES*. Eindhoven University of Technology. Eindhoven : autor neznámý, 2015. GRADUATION THESIS.
- [13]. **D., Jamie.** The 11 Best 3D Printed House Companies – 3D Printing Entire Buildings. *Dnatives. Impression 3D et Imprimante 3D : Meilleur Prix, Comparatif, News [online]*. [Online] 12. Únor 2018. [Citace: 25. Červenec 2018.] Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-house-companies-120220184/>.
- [14]. **KIMBERLEY, Mok.** 3D Printed Buildings Made By Robots for the Earth, Moon and Mars. *The New Stack*. [Online] 11. Říjen 2014. [Citace: 2. Srpen 2018.] Dostupné z: <https://thenewstack.io/3d-printed-buildings-made-by-robots-for-the-earth-moon-and-mars/>.
- [15]. Dům z tiskárny. Americký startup ho "postaví" za 24 hodin. *Euro.cz. Euro.cz / Ekonomika, byznys, finance [online]*. [Online] 6. Březen 2017. [Citace: 29. Červenec 2018.] Dostupné z: <https://www.euro.cz/byznys/dum-z-tiskarny-americky-startup-ho-postavi-za-24-hodin-1334512>.
- [16]. **KOVÁŘÍK, Michal, SVOBODA, Pavel, ŠTEMBERK, Petr.** Technologie 3D tisku v architektuře a stavebnictví. *EARCH.. [online]*. Copyright © Roland Halbe. [Online] 3. Srpen 2018. [Citace: 10. Srpen 2018.] Dostupné z: <http://www.earch.cz/cs/stavitelstvi/technologie-3d-tisku-v-architekture-stavebnictvi>.
- [17]. **KADLČÁK, Jaroslav a Jiří KYTÝR.** *Statika stavebních konstrukcí II*. 4. Brno : VUTIUM, 2007. ISBN 80-214-2631-4.
- [18]. Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. *ČSN EN 1990 (730002)*. 1. Duben 2004. 8590963694733.

[19]. Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. *ČSN EN 1993-1-1 (731401)*. 1. Prosinec 2006. 8590963774398.

[20]. **PRŮŠA, Josef**. Základy 3D tisku [online]. 1. Praha: Pusa Research s.r.o., 2014. [Online] 2014. [Citace: 15. Červenec 2018.] Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>.

[21]. Přehled dostupných materiálů. *na3D.cz - 3D tisk pro každého! [online]*. [Online] [Citace: 27. Červenec 2018.] Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/prehled-dostupnych-materialu>.

[22]. Rozdíl mezi ABS, PLA a PETG. *Materiály a doplňky pro 3D tisk - filamenty - Materialpro3d.cz [online]*, Copyright © Materialpro3d.cz, všechna práva vyhrazena. [Online] [Citace: 19. Červenec 2018.] Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>.

11 Seznam příloh

- **Nastavení tištěných nosníků z programu Simplify3D**
- **Výstup z programu FIN 2D a posouzení průřezů výpočtových variant**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD

KATEDRA MECHANIKY – STAVBNÍ INŽENÝRSTVÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Přílohová část 1 – nastavení tištěných nosníků z programu
Simplify3D

Vypracoval:

Bc. Miroslav Tábor

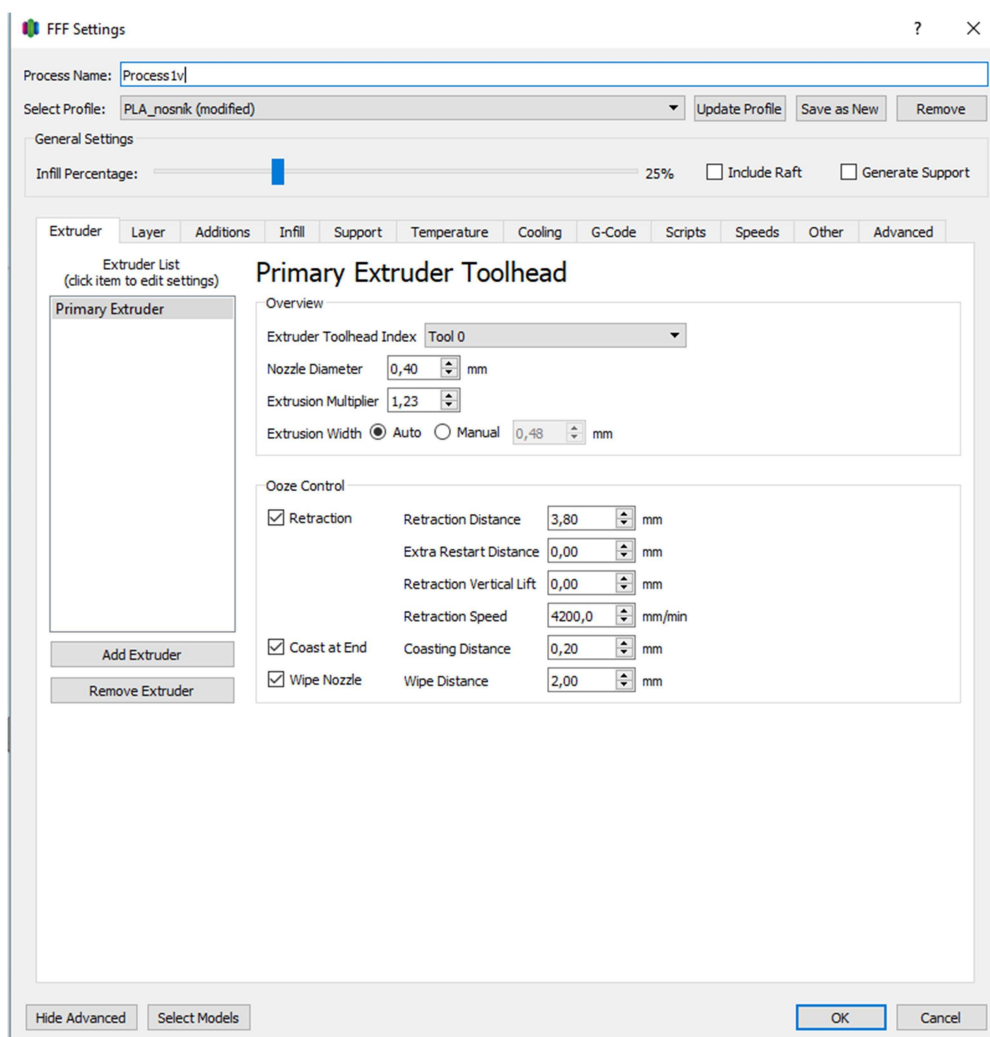
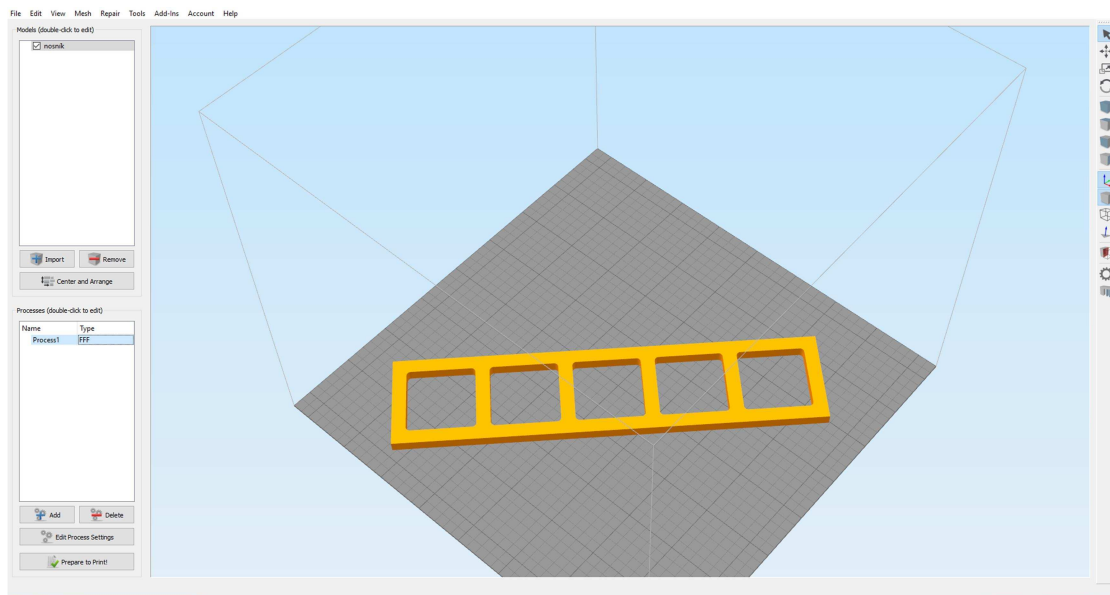
Vedoucí diplomové práce:

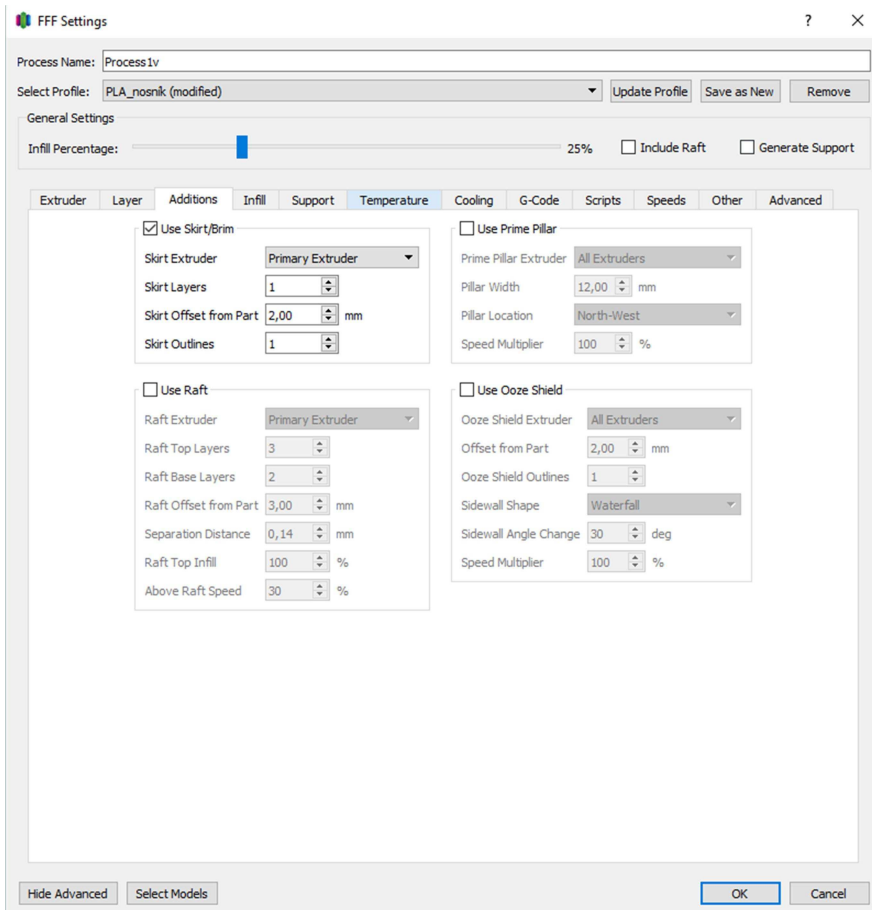
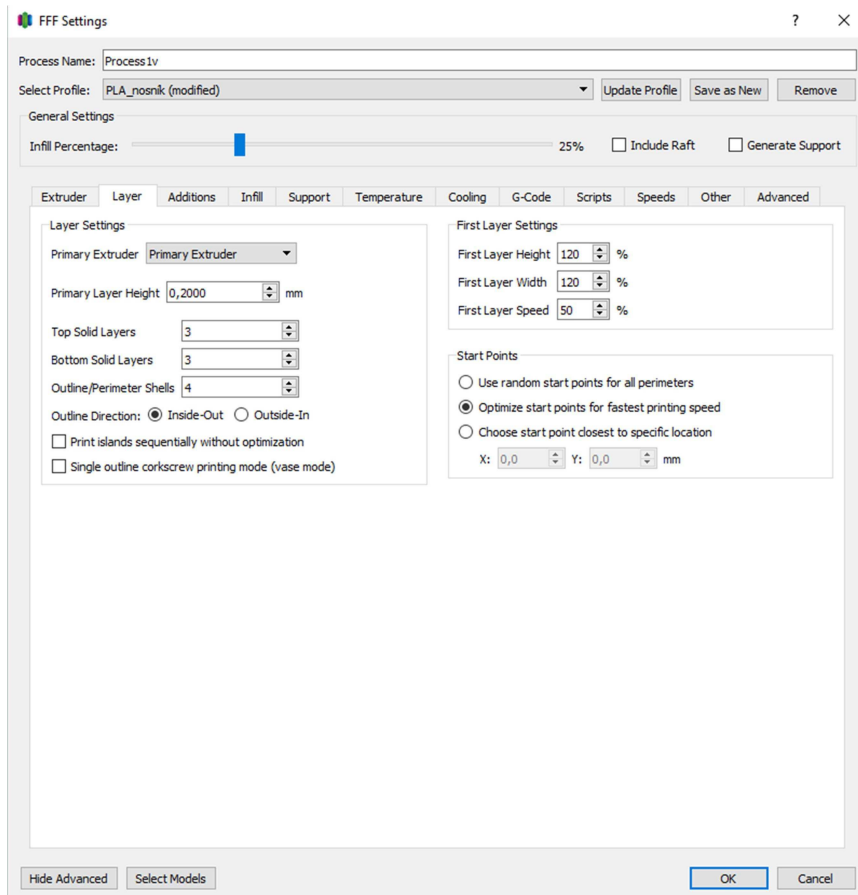
Ing. Petr Kesl

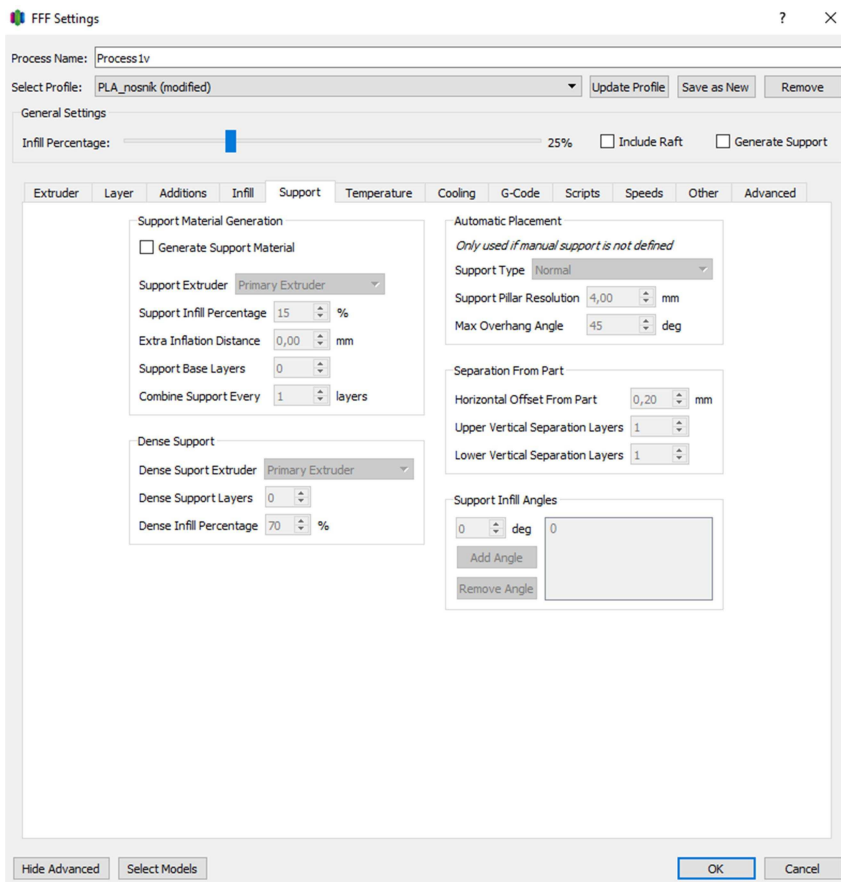
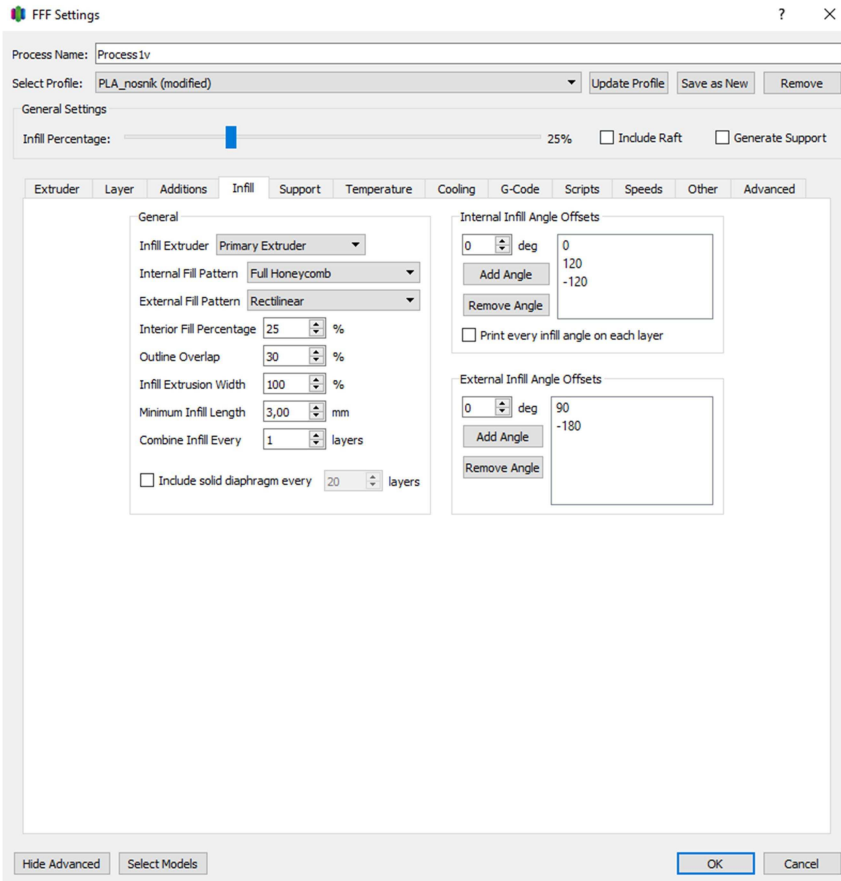
Akademický rok:

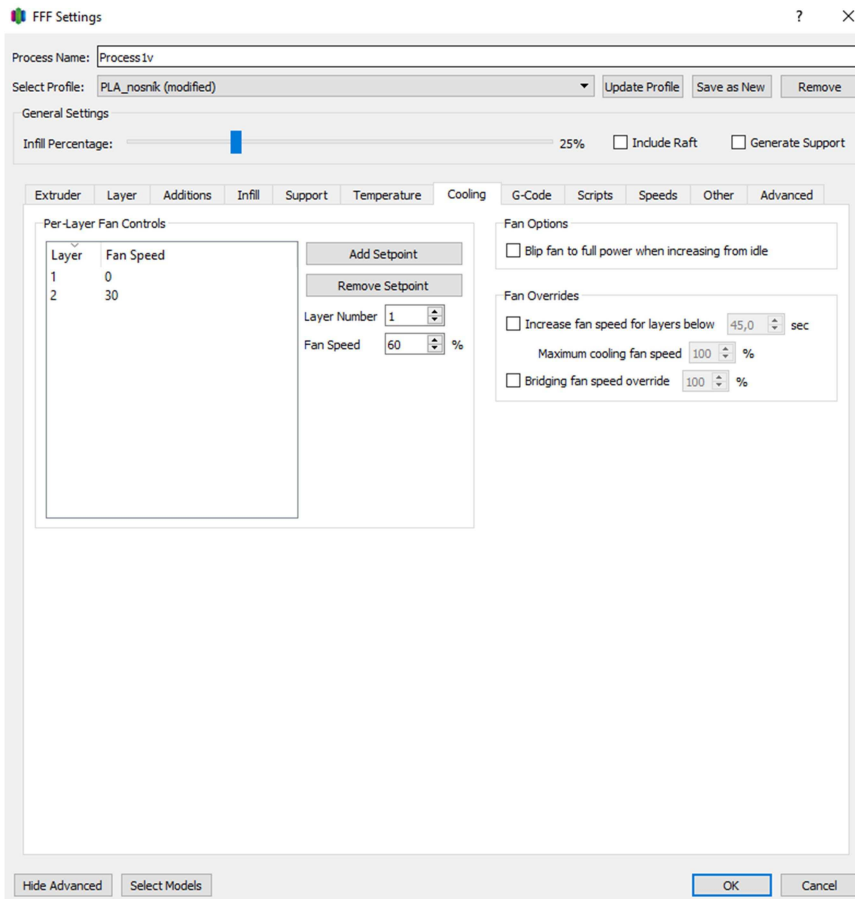
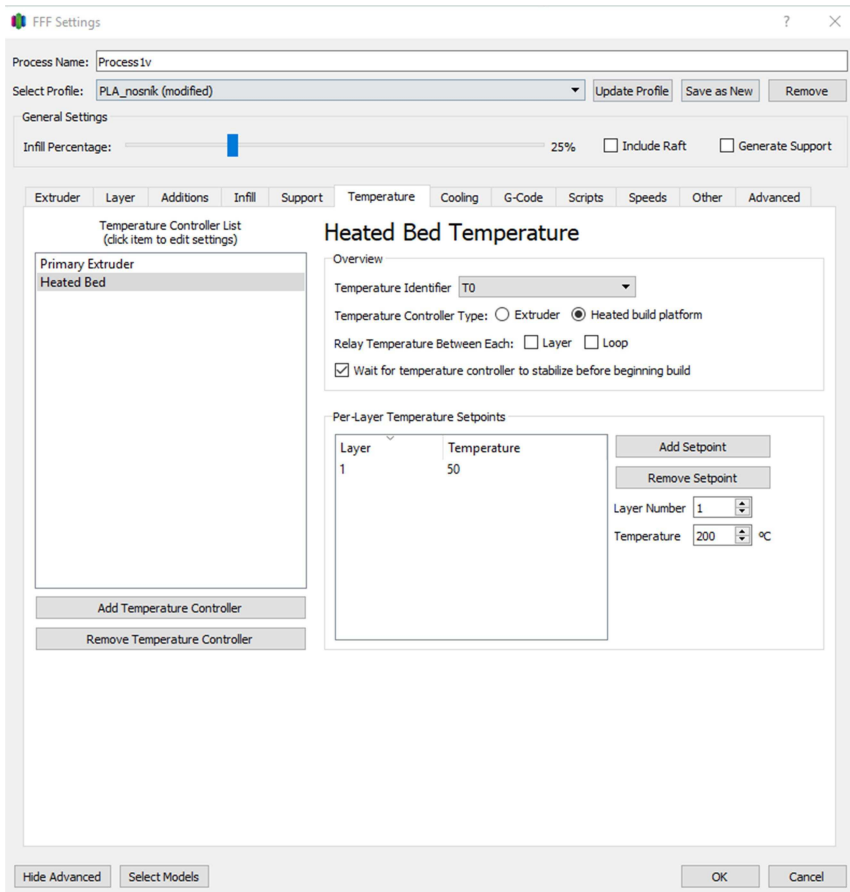
2017/2018

1 Nastavení tisku z programu Simplify3D (PLA)









FFF Settings

Process Name: Process 1v

Select Profile: PLA_nosnik (modified) Update Profile Save as New Remove

General Settings

Infill Percentage: 25% Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions Infill Support Temperature Cooling G-Code Scripts Speeds Other Advanced

Speeds

Default Printing Speed mm/min

Outline Underspeed %

Solid Infill Underspeed %

Support Structure Underspeed %

X/Y Axis Movement Speed mm/min

Z Axis Movement Speed mm/min

Speed Overrides

Adjust printing speed for layers below sec

Allow speed reductions down to %

Hide Advanced Select Models OK Cancel

FFF Settings

Process Name: Process 1v

Select Profile: PLA_nosnik (modified) Update Profile Save as New Remove

General Settings

Infill Percentage: 25% Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions Infill Support Temperature Cooling G-Code Scripts Speeds Other Advanced

Bridging

Unsupported area threshold sq mm

Extra inflation distance mm

Bridging extrusion multiplier %

Bridging speed multiplier %

Use fixed bridging infill angle deg

Apply bridging settings to perimeters

Dimensional Adjustments

Horizontal size compensation mm

Filament Properties

Filament Toolhead Index

Filament diameter mm

Filament price price/kg

Filament density grams/cm³

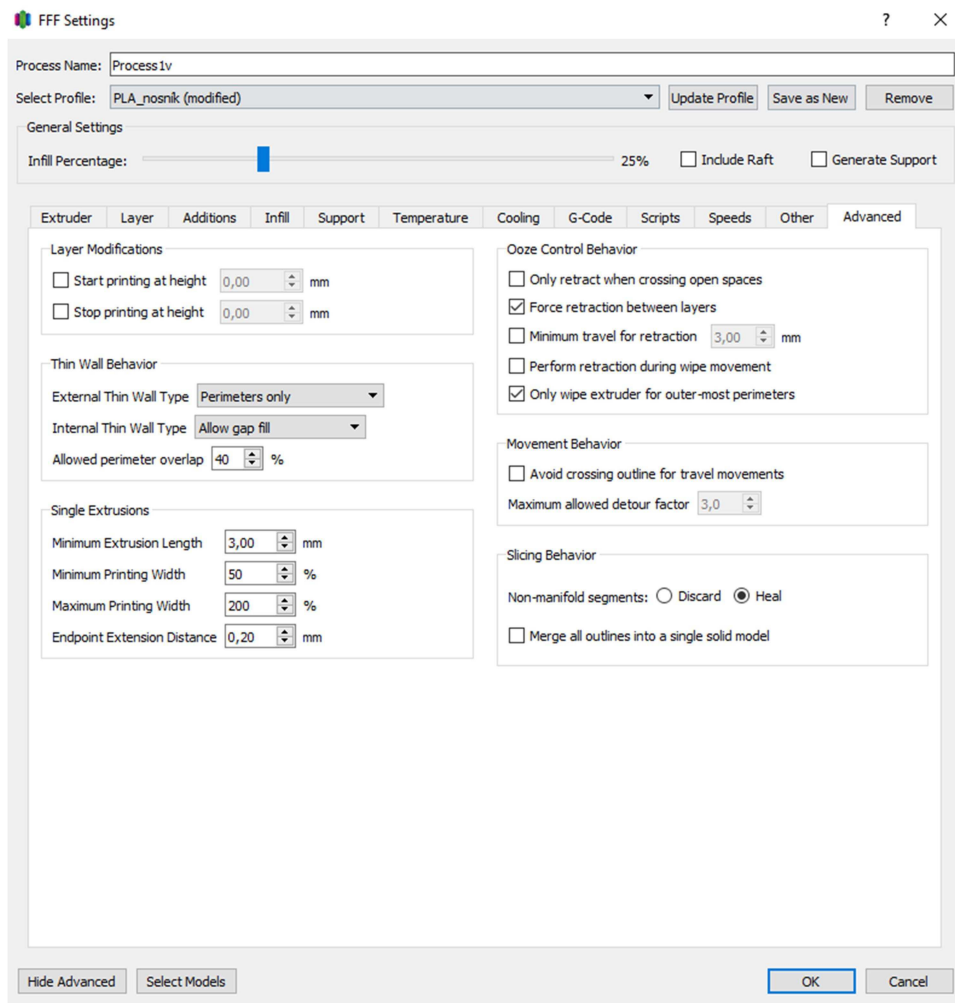
Tool Change Retraction

Tool change retraction distance mm

Tool change extra restart distance mm

Tool change retraction speed mm/min

Hide Advanced Select Models OK Cancel



2 Nastavení tisku z programu Simplify3D (ABS)

Nastavení je shodné, pouze se liší teplota tisku, která je nastavena na hodnotu 239 °C a teplota vyhřívání podložky je 100 °C.

3 Nastavení tisku z programu Simplify3D (PET-G)

Nastavení je shodné, pouze se liší teplota tisku, která je nastavena na hodnotu 235 °C a teplota vyhřívání podložky je 70 °C.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD

KATEDRA MECHANIKY – STAVBNÍ INŽENÝRSTVÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Přílohová část 2 – výstup z programu FIN 2D a posouzení
průřezů výpočtových variant

Vypracoval:

Bc. Miroslav Tábor

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Kesl

Akademický rok:

2017/2018

1 Projekt

Akce : Diplomová práce
Část : Vierendeelův nosník
Vypracoval : Miroslav Tábor
Datum : 15.7.2018

2 Výsledky

2.1 Deformace pro kombinace I.řádu, MSP

Kombinace nejsou zadané

2.2 Vnitřní síly v s. s. dílce pro zatěžovací stavy

2.2.1 Vnitřní síly po dílcích

Zatěžovací stav		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	61,42	-56,88	-123,93
		4,000	61,42	-56,88	103,61
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	160,19	-46,77	-90,92
		4,000	160,19	-46,77	96,16
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	226,39	-110,62	-50,93
		2,000	226,39	-110,62	170,31
		2,000	226,39	110,62	170,31
		4,000	226,39	110,62	-50,93
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	160,19	46,77	96,16
		4,000	160,19	46,77	-90,92
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	61,42	56,88	103,61
		4,000	61,42	56,88	-123,93
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-61,42	-53,74	-121,74
		4,000	-61,42	-53,74	93,20
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-160,19	-63,85	-107,37
		4,000	-160,19	-63,85	148,03
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-226,39	0,00	30,32
		4,000	-226,39	0,00	30,32
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-160,19	63,85	148,03
		4,000	-160,19	63,85	-107,37



Pouze pro nekomerční využití



Zatěžovací stav		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-61,42	53,74	93,20
		4,000	-61,42	53,74	-121,74
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-53,74	-61,42	-123,93
		4,000	-53,74	-61,42	121,74
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-10,11	-98,77	-194,53
		4,000	-10,11	-98,77	200,57
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	63,85	-66,20	-147,09
		4,000	63,85	-66,20	117,71
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	63,85	66,20	147,09
		4,000	63,85	66,20	-117,71
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-10,11	98,77	194,53
		4,000	-10,11	98,77	-200,57
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-53,74	61,42	123,93
		4,000	-53,74	61,42	-121,74

2.2.2 Vnitřní síly po zatěžovacích stavech

Dílec		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Popis dílce		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Zatěžovací stav č.1 - G1 silové-stálé					
1	1 ---- 2, délka 4,000 m	0,000	61,42	-56,88	-123,93
		4,000	61,42	-56,88	103,61
2	2 ---- 3, délka 4,000 m	0,000	160,19	-46,77	-90,92
		4,000	160,19	-46,77	96,16
3	3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000	226,39	-110,62	-50,93
		2,000	226,39	-110,62	170,31
		2,000	226,39	110,62	170,31
		4,000	226,39	110,62	-50,93
4	4 ---- 5, délka 4,000 m	0,000	160,19	46,77	96,16
		4,000	160,19	46,77	-90,92
5	5 ---- 6, délka 4,000 m	0,000	61,42	56,88	103,61
		4,000	61,42	56,88	-123,93
6	7 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	-61,42	-53,74	-121,74
		4,000	-61,42	-53,74	93,20
7	8 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	-160,19	-63,85	-107,37
		4,000	-160,19	-63,85	148,03
8	9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	-226,39	0,00	30,32
		4,000	-226,39	0,00	30,32
9	10 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	-160,19	63,85	148,03
		4,000	-160,19	63,85	-107,37

! Pouze pro nekomerční využití !

č.	Dílec Popis dílce	Pozice [m]	Vnitřní síly		
			N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
10	11 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	-61,42	53,74	93,20
		4,000	-61,42	53,74	-121,74
11	1 ---- 7, délka 4,000 m	0,000	-53,74	-61,42	-123,93
		4,000	-53,74	-61,42	121,74
12	2 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	-10,11	-98,77	-194,53
		4,000	-10,11	-98,77	200,57
13	3 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	63,85	-66,20	-147,09
		4,000	63,85	-66,20	117,71
14	4 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	63,85	66,20	147,09
		4,000	63,85	66,20	-117,71
15	5 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	-10,11	98,77	194,53
		4,000	-10,11	98,77	-200,57
16	6 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	-53,74	61,42	123,93
		4,000	-53,74	61,42	-121,74

2.2.3 Extrémy vnitřních sil

Kladné extrémy:

Síla	Zatěžovací stav	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000 m	226,39 kN
V ₃	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	2,000 m	110,62 kN
M ₂	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m	4,000 m	200,57 kNm

Záporné extrémy:

Síla	Zatěžovací stav	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000 m	-226,39 kN
V ₃	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000 m	-110,62 kN
M ₂	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m	4,000 m	-200,57 kNm

č.	Zatěžovací stav Název	Pozice [m]	Vnitřní síly		
			N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	61,42	-56,88	-123,93
1	G1 silové-stálé	4,000	61,42	-56,88	103,61
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	160,19	-46,77	-90,92
1	G1 silové-stálé	4,000	160,19	-46,77	96,16
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	226,39	-110,62	-50,93
1	G1 silové-stálé	2,000	226,39	110,62	170,31
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	160,19	46,77	96,16
1	G1 silové-stálé	4,000	160,19	46,77	-90,92
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	61,42	56,88	103,61
1	G1 silové-stálé	4,000	61,42	56,88	-123,93
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-61,42	-53,74	-121,74

! Pouze pro nekomerční využití **!**

Zatěžovací stav		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
1	G1 silové-stálé	4,000	-61,42	-53,74	93,20
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-160,19	-63,85	-107,37
1	G1 silové-stálé	4,000	-160,19	-63,85	148,03
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-226,39	0,00	30,32
1	G1 silové-stálé	4,000	-226,39	0,00	30,32
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-160,19	63,85	148,03
1	G1 silové-stálé	4,000	-160,19	63,85	-107,37
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-61,42	53,74	93,20
1	G1 silové-stálé	4,000	-61,42	53,74	-121,74
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-53,74	-61,42	-123,93
1	G1 silové-stálé	4,000	-53,74	-61,42	121,74
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-10,11	-98,77	-194,53
1	G1 silové-stálé	4,000	-10,11	-98,77	200,57
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	63,85	-66,20	-147,09
1	G1 silové-stálé	4,000	63,85	-66,20	117,71
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	63,85	66,20	147,09
1	G1 silové-stálé	4,000	63,85	66,20	-117,71
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-10,11	98,77	194,53
1	G1 silové-stálé	4,000	-10,11	98,77	-200,57
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-53,74	61,42	123,93
1	G1 silové-stálé	4,000	-53,74	61,42	-121,74

2.3 Vnitřní síly v s. s. dílce pro kombinace I.řádu, MSÚ

2.3.1 Vnitřní síly po dílcích

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Kombinace I.řád, MSÚ		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,91	-76,79	-167,30
		4,000	82,91	-76,79	139,87
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	216,26	-63,14	-122,75
		4,000	216,26	-63,14	129,82



Pouze pro nekomerční využití



Kombinace I.řád, MSÚ		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	305,63	-149,34	-68,75
		2,000	305,63	-149,34	229,93
		2,000	305,63	149,34	229,93
		4,000	305,63	149,34	-68,75
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	216,26	63,14	129,82
		4,000	216,26	63,14	-122,75
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,91	76,79	139,87
		4,000	82,91	76,79	-167,30
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-82,91	-72,54	-164,36
		4,000	-82,91	-72,54	125,82
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-216,26	-86,20	-144,94
		4,000	-216,26	-86,20	199,84
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-305,63	0,00	40,93
		4,000	-305,63	0,00	40,93
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-216,26	86,20	199,84
		4,000	-216,26	86,20	-144,94
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-82,91	72,54	125,82
		4,000	-82,91	72,54	-164,36
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-72,54	-82,91	-167,30
		4,000	-72,54	-82,91	164,36
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-13,65	-133,35	-262,61
		4,000	-13,65	-133,35	270,77
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	86,20	-89,37	-198,57
		4,000	86,20	-89,37	158,91
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	86,20	89,37	198,57
		4,000	86,20	89,37	-158,91
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-13,65	133,35	262,61
		4,000	-13,65	133,35	-270,77
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-72,54	82,91	167,30
		4,000	-72,54	82,91	-164,36



Pouze pro nekomerční využití



2.3.2 Vnitřní síly po kombinacích

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Dílec		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Popis dílce		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Kombinace č.1 - G1					
1	1 ---- 2, délka 4,000 m	0,000	82,91	-76,79	-167,30
		4,000	82,91	-76,79	139,87
2	2 ---- 3, délka 4,000 m	0,000	216,26	-63,14	-122,75
		4,000	216,26	-63,14	129,82
3	3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000	305,63	-149,34	-68,75
		2,000	305,63	-149,34	229,93
		2,000	305,63	149,34	229,93
		4,000	305,63	149,34	-68,75
4	4 ---- 5, délka 4,000 m	0,000	216,26	63,14	129,82
		4,000	216,26	63,14	-122,75
5	5 ---- 6, délka 4,000 m	0,000	82,91	76,79	139,87
		4,000	82,91	76,79	-167,30
6	7 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	-82,91	-72,54	-164,36
		4,000	-82,91	-72,54	125,82
7	8 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	-216,26	-86,20	-144,94
		4,000	-216,26	-86,20	199,84
8	9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	-305,63	0,00	40,93
		4,000	-305,63	0,00	40,93
9	10 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	-216,26	86,20	199,84
		4,000	-216,26	86,20	-144,94
10	11 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	-82,91	72,54	125,82
		4,000	-82,91	72,54	-164,36
11	1 ---- 7, délka 4,000 m	0,000	-72,54	-82,91	-167,30
		4,000	-72,54	-82,91	164,36
12	2 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	-13,65	-133,35	-262,61
		4,000	-13,65	-133,35	270,77
13	3 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	86,20	-89,37	-198,57
		4,000	86,20	-89,37	158,91
14	4 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	86,20	89,37	198,57
		4,000	86,20	89,37	-158,91
15	5 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	-13,65	133,35	262,61
		4,000	-13,65	133,35	-270,77
16	6 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	-72,54	82,91	167,30
		4,000	-72,54	82,91	-164,36

2.3.3 Extrémy vnitřních sil

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Kladné extrémy:

Síla	Kombinace I.řád, MSÚ	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Kombinace č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000 m	305,63 kN
V ₃	Kombinace č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	2,000 m	149,34 kN
M ₂	Kombinace č.1	Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m	4,000 m	270,77 kNm



Pouze pro nekomerční využití



Záporné extrémy:

Síla	Kombinace I.řád, MSÚ	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Kombinace č.1	Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000 m	-305,63 kN
V ₃	Kombinace č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000 m	-149,34 kN
M ₂	Kombinace č.1	Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m	4,000 m	-270,77 kNm

Kombinace I.řád, MSÚ		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,91	-76,79	-167,30
1	G1	4,000	82,91	-76,79	139,87
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	216,26	-63,14	-122,75
1	G1	4,000	216,26	-63,14	129,82
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	305,63	-149,34	-68,75
1	G1	2,000	305,63	149,34	229,93
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	216,26	63,14	129,82
1	G1	4,000	216,26	63,14	-122,75
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,91	76,79	139,87
1	G1	4,000	82,91	76,79	-167,30
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-82,91	-72,54	-164,36
1	G1	4,000	-82,91	-72,54	125,82
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-216,26	-86,20	-144,94
1	G1	4,000	-216,26	-86,20	199,84
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-305,63	0,00	40,93
1	G1	4,000	-305,63	0,00	40,93
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-216,26	86,20	199,84
1	G1	4,000	-216,26	86,20	-144,94
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-82,91	72,54	125,82
1	G1	4,000	-82,91	72,54	-164,36
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-72,54	-82,91	-167,30
1	G1	4,000	-72,54	-82,91	164,36
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-13,65	-133,35	-262,61
1	G1	4,000	-13,65	-133,35	270,77
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	86,20	-89,37	-198,57
1	G1	4,000	86,20	-89,37	158,91



Pouze pro nekomerční využití



Kombinace I.řád, MSÚ		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	86,20	89,37	198,57
1	G1	4,000	86,20	89,37	-158,91
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-13,65	133,35	262,61
1	G1	4,000	-13,65	133,35	-270,77
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-72,54	82,91	167,30
1	G1	4,000	-72,54	82,91	-164,36

2.4 Vnitřní síly v s. s. dílce pro kombinace I.řádu, MSP

Kombinace nejsou zadane

2.5 Vnitřní síly v s. s. průřezu pro zatěžovací stavy

2.5.1 Vnitřní síly po dílcích

Zatěžovací stav		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	61,42	0,00	0,00
		4,000	61,42	0,00	0,00
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	160,19	0,00	0,00
		4,000	160,19	0,00	0,00
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	226,39	0,00	0,00
		4,000	226,39	0,00	0,00
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	160,19	0,00	0,00
		4,000	160,19	0,00	0,00
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	61,42	0,00	0,00
		4,000	61,42	0,00	0,00
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-61,42	0,00	0,00
		4,000	-61,42	0,00	0,00
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-160,19	0,00	0,00
		4,000	-160,19	0,00	0,00
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-226,39	0,00	0,00
		4,000	-226,39	0,00	0,00
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-160,19	0,00	0,00
		4,000	-160,19	0,00	0,00



Pouze pro nekomerční využití



Zatěžovací stav		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-61,42	0,00	0,00
		4,000	-61,42	0,00	0,00
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-53,74	0,00	0,00
		4,000	-53,74	0,00	0,00
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-10,11	0,00	0,00
		4,000	-10,11	0,00	0,00
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	63,85	0,00	0,00
		4,000	63,85	0,00	0,00
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	63,85	0,00	0,00
		4,000	63,85	0,00	0,00
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-10,11	0,00	0,00
		4,000	-10,11	0,00	0,00
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-53,74	0,00	0,00
		4,000	-53,74	0,00	0,00

2.5.2 Vnitřní síly po zatěžovacích stavech

Dílec		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Popis dílce		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Zatěžovací stav č.1 - G1 silové-stálé					
1	1 ---- 2, délka 4,000 m	0,000	61,42	0,00	0,00
		4,000	61,42	0,00	0,00
2	2 ---- 3, délka 4,000 m	0,000	160,19	0,00	0,00
		4,000	160,19	0,00	0,00
3	3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000	226,39	0,00	0,00
		4,000	226,39	0,00	0,00
4	4 ---- 5, délka 4,000 m	0,000	160,19	0,00	0,00
		4,000	160,19	0,00	0,00
5	5 ---- 6, délka 4,000 m	0,000	61,42	0,00	0,00
		4,000	61,42	0,00	0,00
6	7 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	-61,42	0,00	0,00
		4,000	-61,42	0,00	0,00
7	8 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	-160,19	0,00	0,00
		4,000	-160,19	0,00	0,00
8	9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	-226,39	0,00	0,00
		4,000	-226,39	0,00	0,00
9	10 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	-160,19	0,00	0,00
		4,000	-160,19	0,00	0,00
10	11 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	-61,42	0,00	0,00
		4,000	-61,42	0,00	0,00

! Pouze pro nekomerční využití !

č.	Dílec Popis dílce	Pozice [m]	Vnitřní síly		
			N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
11	1 ---- 7, délka 4,000 m	0,000	-53,74	0,00	0,00
		4,000	-53,74	0,00	0,00
12	2 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	-10,11	0,00	0,00
		4,000	-10,11	0,00	0,00
13	3 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	63,85	0,00	0,00
		4,000	63,85	0,00	0,00
14	4 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	63,85	0,00	0,00
		4,000	63,85	0,00	0,00
15	5 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	-10,11	0,00	0,00
		4,000	-10,11	0,00	0,00
16	6 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	-53,74	0,00	0,00
		4,000	-53,74	0,00	0,00

2.5.3 Extrémy vnitřních sil

Kladné extrémy:

Síla	Zatěžovací stav	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000 m	226,39 kN
V _z				
M _y				

Záporné extrémy:

Síla	Zatěžovací stav	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000 m	-226,39 kN
V _z				
M _y				

č.	Zatěžovací stav Název	Pozice [m]	Vnitřní síly		
			N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	61,42	0,00	0,00
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	160,19	0,00	0,00
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	226,39	0,00	0,00
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	160,19	0,00	0,00
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	61,42	0,00	0,00
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-61,42	0,00	0,00
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-160,19	0,00	0,00
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-226,39	0,00	0,00
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-160,19	0,00	0,00



Pouze pro nekomerční využití



Zatěžovací stav		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-61,42	0,00	0,00
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-53,74	0,00	0,00
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-10,11	0,00	0,00
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	63,85	0,00	0,00
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	63,85	0,00	0,00
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-10,11	0,00	0,00
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-53,74	0,00	0,00

2.6 Vnitřní síly v s. s. průřezu pro kombinace I.řádu, MSÚ

2.6.1 Vnitřní síly po dílcích

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Kombinace I.řád, MSÚ		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,91	0,00	0,00
		4,000	82,91	0,00	0,00
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	216,26	0,00	0,00
		4,000	216,26	0,00	0,00
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	305,63	0,00	0,00
		4,000	305,63	0,00	0,00
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	216,26	0,00	0,00
		4,000	216,26	0,00	0,00
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,91	0,00	0,00
		4,000	82,91	0,00	0,00
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-82,91	0,00	0,00
		4,000	-82,91	0,00	0,00
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-216,26	0,00	0,00
		4,000	-216,26	0,00	0,00
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-305,63	0,00	0,00
		4,000	-305,63	0,00	0,00



Pouze pro nekomerční využití



Kombinace I.řád, MSÚ		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-216,26	0,00	0,00
		4,000	-216,26	0,00	0,00
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-82,91	0,00	0,00
		4,000	-82,91	0,00	0,00
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-72,54	0,00	0,00
		4,000	-72,54	0,00	0,00
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-13,65	0,00	0,00
		4,000	-13,65	0,00	0,00
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	86,20	0,00	0,00
		4,000	86,20	0,00	0,00
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	86,20	0,00	0,00
		4,000	86,20	0,00	0,00
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-13,65	0,00	0,00
		4,000	-13,65	0,00	0,00
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-72,54	0,00	0,00
		4,000	-72,54	0,00	0,00

2.6.2 Vnitřní síly po kombinacích

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Dílec		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Popis dílce		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Kombinace č.1 - G1					
1	1 ---- 2, délka 4,000 m	0,000	82,91	0,00	0,00
		4,000	82,91	0,00	0,00
2	2 ---- 3, délka 4,000 m	0,000	216,26	0,00	0,00
		4,000	216,26	0,00	0,00
3	3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000	305,63	0,00	0,00
		4,000	305,63	0,00	0,00
4	4 ---- 5, délka 4,000 m	0,000	216,26	0,00	0,00
		4,000	216,26	0,00	0,00
5	5 ---- 6, délka 4,000 m	0,000	82,91	0,00	0,00
		4,000	82,91	0,00	0,00
6	7 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	-82,91	0,00	0,00
		4,000	-82,91	0,00	0,00
7	8 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	-216,26	0,00	0,00
		4,000	-216,26	0,00	0,00
8	9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	-305,63	0,00	0,00
		4,000	-305,63	0,00	0,00



Pouze pro nekomerční využití



č.	Dílec Popis dílce	Pozice [m]	Vnitřní síly		
			N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
9	10 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	-216,26	0,00	0,00
		4,000	-216,26	0,00	0,00
10	11 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	-82,91	0,00	0,00
		4,000	-82,91	0,00	0,00
11	1 ---- 7, délka 4,000 m	0,000	-72,54	0,00	0,00
		4,000	-72,54	0,00	0,00
12	2 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	-13,65	0,00	0,00
		4,000	-13,65	0,00	0,00
13	3 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	86,20	0,00	0,00
		4,000	86,20	0,00	0,00
14	4 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	86,20	0,00	0,00
		4,000	86,20	0,00	0,00
15	5 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	-13,65	0,00	0,00
		4,000	-13,65	0,00	0,00
16	6 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	-72,54	0,00	0,00
		4,000	-72,54	0,00	0,00

2.6.3 Extrémy vnitřních sil

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Kladné extrémy:

Síla	Kombinace I.řád, MSÚ	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Kombinace č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000 m	305,63 kN
V _z				
M _y				

Záporné extrémy:

Síla	Kombinace I.řád, MSÚ	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Kombinace č.1	Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000 m	-305,63 kN
V _z				
M _y				

č.	Kombinace I.řád, MSÚ Název	Pozice [m]	Vnitřní síly		
			N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,91	0,00	0,00
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	216,26	0,00	0,00
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	305,63	0,00	0,00
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	216,26	0,00	0,00
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,91	0,00	0,00
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-82,91	0,00	0,00
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-216,26	0,00	0,00



Pouze pro nekomerční využití



Kombinace I.řád, MSÚ		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-305,63	0,00	0,00
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-216,26	0,00	0,00
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-82,91	0,00	0,00
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-72,54	0,00	0,00
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-13,65	0,00	0,00
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	86,20	0,00	0,00
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	86,20	0,00	0,00
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-13,65	0,00	0,00
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-72,54	0,00	0,00

2.7 Reakce pro zatěžovací stavy

2.7.1 Reakce po styčnicích

Zatěžovací stav		Reakce		
č.	Název	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Styčnick č.1 - abs. Y: 0,000 m Z: 0,000 m				
1	G1 silové-stálé	0,00	110,62	-
Styčnick č.6 - abs. Y: 20,000 m Z: 0,000 m				
1	G1 silové-stálé	-	110,62	-

2.7.2 Reakce po zatěžovacích stavech

Styčnick			Reakce		
č.	Popis styčnicku	Natočení [°]	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Zatěžovací stav č.1 - G1 silové-stálé					
1	abs. Y: 0,000 m Z: 0,000 m		0,00	110,62	-
6	abs. Y: 20,000 m Z: 0,000 m		-	110,62	-

2.7.3 Extrémy reakcí

Kladné extrémy:

Max. reakce	Zatěžovací stav	Styčnick	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Max.R _y	Zatěžovací stav 1	1	0,00	110,62	-
Max.R _z	Zatěžovací stav 1	6	-	110,62	-



Pouze pro nekomerční využití



Záporné extrémy:

Max. reakce	Zatěžovací stav	Styčnick	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Min.R _y	Zatěžovací stav 1	1	0,00	110,62	-
Min.R _z	Zatěžovací stav 1	1	0,00	110,62	-

Extrémy po styčnicích:

Max. reakce	Zatěžovací stav	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Styčnick č.1 - abs. Y: 0,000 m Z: 0,000 m				
Max.R _y ,R _z	Zatěžovací stav 1	0,00	110,62	-
Min.R _y ,R _z	Zatěžovací stav 1	0,00	110,62	-
Styčnick č.6 - abs. Y: 20,000 m Z: 0,000 m				
Max.R _z	Zatěžovací stav 1	-	110,62	-
Min.R _z	Zatěžovací stav 1	-	110,62	-

2.7.4 Součty reakcí ve směrech globálních os

Zatěžovací stav	Ve směru osy Y [kN]	Ve směru osy Z [kN]
Zatěžovací stav 1	0,00	221,24

2.8 Reakce pro kombinace I.řádu, MSÚ

2.8.1 Reakce po styčnicích

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Kombinace I.řád, MSÚ		Reakce		
č.	Název	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Styčnick č.1 - abs. Y: 0,000 m Z: 0,000 m				
1	G1	0,00	149,34	-
Styčnick č.6 - abs. Y: 20,000 m Z: 0,000 m				
1	G1	-	149,34	-

2.8.2 Reakce po kombinacích

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Styčnick			Reakce		
č.	Popis styčnicku	Natočení [°]	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Kombinace č.1 - G1					
1	abs. Y: 0,000 m Z: 0,000 m		0,00	149,34	-
6	abs. Y: 20,000 m Z: 0,000 m		-	149,34	-

2.8.3 Extrémy reakcí

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Kladné extrémy:

Max. reakce	Kombinace	Styčnick	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Max.R _y	Kombinace 1	1	0,00	149,34	-
Max.R _z	Kombinace 1	6	-	149,34	-



Pouze pro nekomerční využití



Záporné extrém:

Max. reakce	Kombinace	Styčník	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Min.R _y	Kombinace 1	1	0,00	149,34	-
Min.R _z	Kombinace 1	1	0,00	149,34	-

Extrémy po styčnicích:

Max. reakce	Kombinace	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Styčník č.1 - abs. Y: 0,000 m Z: 0,000 m				
Max.R _y ,R _z	Kombinace 1	0,00	149,34	-
Min.R _y ,R _z	Kombinace 1	0,00	149,34	-
Styčník č.6 - abs. Y: 20,000 m Z: 0,000 m				
Max.R _z	Kombinace 1	-	149,34	-
Min.R _z	Kombinace 1	-	149,34	-

2.8.4 Součty reakcí ve směrech globálních os

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Kombinace	Ve směru osy Y [kN]	Ve směru osy Z [kN]
Kombinace č.1	0,00	298,67



Pouze pro nekomerční využití



Projekt

Akce : Diplomová práce
Část : Vierendeelův nosník
Vypracoval : Miroslav Tábor
Datum : 15.07.2018

Norma

Norma **EN 1993-1-1, EN 1993-1-4/Česko.**

Součinitele pro ocelové konstrukce

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$

Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$

Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

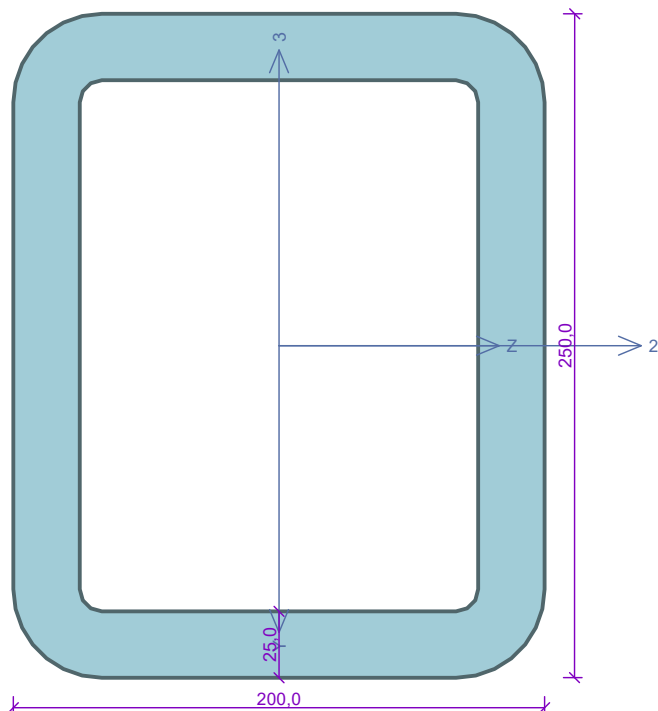
Součinitele pro korozivzdornou ocel

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,100$

Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,100$

Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Kritický řez dílce "1:DD - 11" - průřez 1

Norma **EN 1993-1-1/Česko**.

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$
 Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$
 Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TO 250 x 200 x 25Průřezová plocha: $A = 1,911E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 125,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 1,022E08 \text{ mm}^4$ $I_z = 1,472E08 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 1,182E06 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -1,182E06 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,938E08 \text{ mm}^4$

Výšečový moment setrvačnosti:

 $I_{\omega} = 1,009E10 \text{ mm}^6$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 1,291E06 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 1,519E06 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**Mez kluzu f_y : 235,0 MPaMez pevnosti f_u : 360,0 MPaModul pružnosti E : 210000 MPaModul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa**Vnitřní síly v souřadném systému průřezu**

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

 $N = -72,545 \text{ kN}$ $V_z = 0,000 \text{ kN}$ $M_y = 0,000 \text{ kNm}$ $V_y = -82,914 \text{ kN}$ $M_z = 167,301 \text{ kNm}$ $T_t = 0,000 \text{ kNm}$ $T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$ $B = 0,000 \text{ kNm}^2$ **Parametry vzpěru**

Délka dílce: 4,000 m

 $L_z = 4,000 \text{ m}$ $k_z = 1,000$ $L_{cr,z}$ - bráněno $L_y = 4,000 \text{ m}$ $L_{cr,y}$ - bráněno**Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1****Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $82,914 \text{ kN} < 1526,370 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = -72,545 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = 167,301 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace vzpěrného tlaku a ohybu:**Únosnosti: $N_R = -4489,910 \text{ kN}$; $M_{z,R} = 356,941 \text{ kNm}$ $|0,016 + 0,000 + 0,469| = |0,485| < 1$ **Vyhovuje**

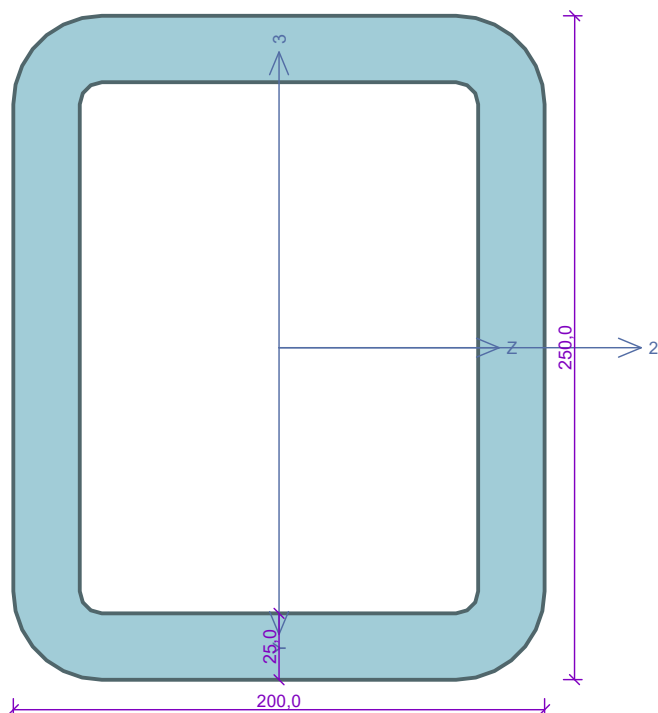
Stíhlost dílce: 54,7

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "2:DD - 12" - průřez 1

Norma **EN 1993-1-1/Česko**.

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$
 Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$
 Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TO 250 x 200 x 25Průřezová plocha: $A = 1,911E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 125,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 1,022E08 \text{ mm}^4$ $I_z = 1,472E08 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 1,182E06 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -1,182E06 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,938E08 \text{ mm}^4$

Výšečový moment setrvačnosti:

 $I_{\omega} = 1,009E10 \text{ mm}^6$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 1,291E06 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 1,519E06 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**Mez kluzu f_y : 235,0 MPaMez pevnosti f_u : 360,0 MPaModul pružnosti E : 210000 MPaModul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa**Vnitřní síly v souřadném systému průřezu**

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

 $N = -13,650 \text{ kN}$ $V_z = 0,000 \text{ kN}$ $V_y = -133,346 \text{ kN}$ $T_t = 0,000 \text{ kNm}$ $T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$ $M_y = 0,000 \text{ kNm}$ $M_z = -270,768 \text{ kNm}$ $B = 0,000 \text{ kNm}^2$ **Parametry vzpěru**

Délka dílce: 4,000 m

Se vzpěrem se nepočítá

Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1**Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $133,346 \text{ kN} < 1526,370 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = -13,650 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = -270,768 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace prostého tlaku a ohybu:**Únosnosti: $N_R = -4489,910 \text{ kN}$; $M_{z,R} = -356,941 \text{ kNm}$ $|0,003 + 0,000 + 0,759| = |0,762| < 1$ **Vyhovuje**

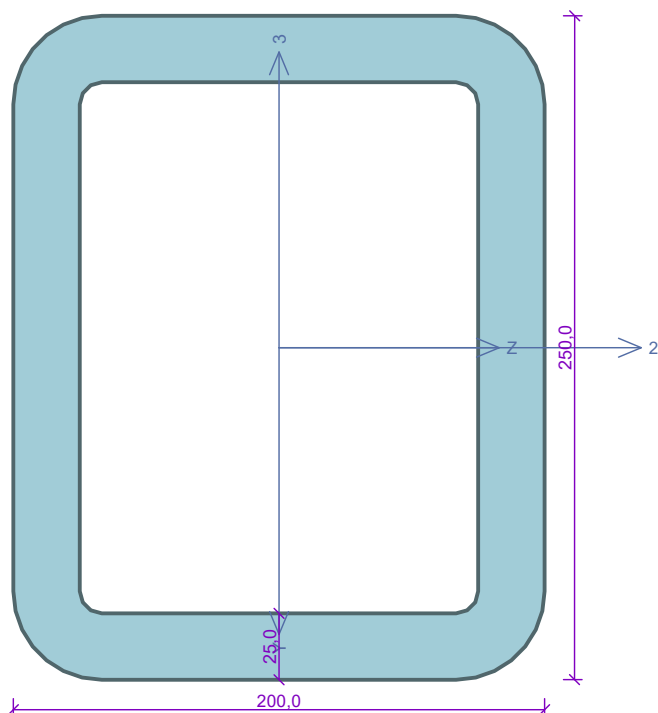
Stíhlost dílce: 54,7

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "3:DD - 13" - průřez 1

Norma **EN 1993-1-1/Česko**.

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$
 Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$
 Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TO 250 x 200 x 25Průřezová plocha: $A = 1,911E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 125,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 1,022E08 \text{ mm}^4$ $I_z = 1,472E08 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 1,182E06 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -1,182E06 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,938E08 \text{ mm}^4$

Výšečový moment setrvačnosti:

 $I_{\omega} = 1,009E10 \text{ mm}^6$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 1,291E06 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 1,519E06 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**Mez kluzu f_y : 235,0 MPaMez pevnosti f_u : 360,0 MPaModul pružnosti E : 210000 MPaModul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa**Vnitřní síly v souřadném systému průřezu**

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

 $N = 86,195 \text{ kN}$ $V_z = 0,000 \text{ kN}$ $V_y = -89,370 \text{ kN}$ $T_t = 0,000 \text{ kNm}$ $T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$ $M_y = 0,000 \text{ kNm}$ $M_z = 198,570 \text{ kNm}$ $B = 0,000 \text{ kNm}^2$ **Parametry vzpěru**

Délka dílce: 4,000 m

 $L_z = 4,000 \text{ m}$ $L_y = 4,000 \text{ m}$ **Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1****Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $89,370 \text{ kN} < 1526,370 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = 86,195 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = 198,570 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace prostého tahu a ohybu:**Únosnosti: $N_R = 4489,910 \text{ kN}$; $M_{z,R} = 356,941 \text{ kNm}$ $|0,019 + 0,000 + 0,556| = |0,576| < 1$ **Vyhovuje**

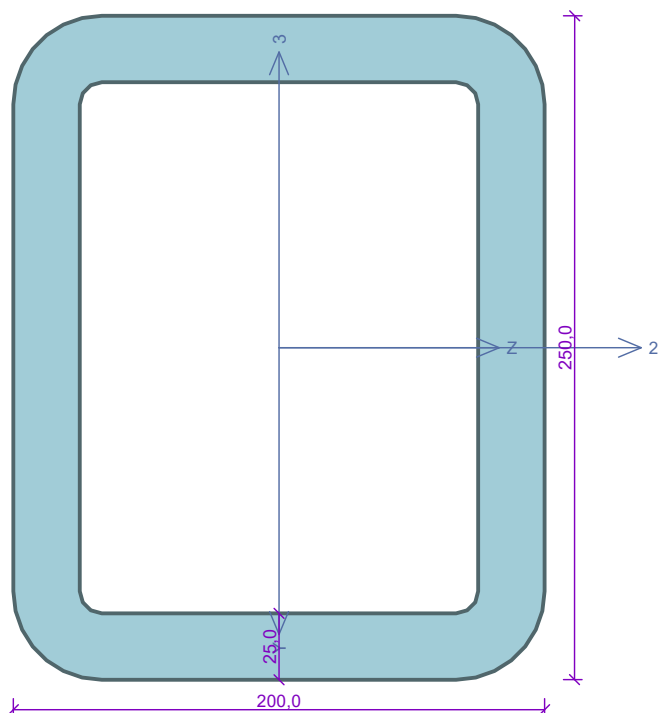
Stíhlost dílce: 54,7

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "4:DD - 14" - průřez 1



Norma EN 1993-1-1/Česko.

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$
 Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$
 Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TO 250 x 200 x 25Průřezová plocha: $A = 1,911E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 125,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 1,022E08 \text{ mm}^4$ $I_z = 1,472E08 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 1,182E06 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -1,182E06 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,938E08 \text{ mm}^4$

Výšečový moment setrvačnosti:

 $I_{\omega} = 1,009E10 \text{ mm}^6$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 1,291E06 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 1,519E06 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**Mez kluzu f_y : 235,0 MPaMez pevnosti f_u : 360,0 MPaModul pružnosti E : 210000 MPaModul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa**Vnitřní síly v souřadném systému průřezu**

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

 $N = 86,195 \text{ kN}$ $V_z = 0,000 \text{ kN}$ $V_y = 89,370 \text{ kN}$ $T_t = 0,000 \text{ kNm}$ $T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$ $M_y = 0,000 \text{ kNm}$ $M_z = -198,570 \text{ kNm}$ $B = 0,000 \text{ kNm}^2$ **Parametry vzpěru**

Délka dílce: 4,000 m

 $L_z = 4,000 \text{ m}$ $L_y = 4,000 \text{ m}$ **Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1****Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $89,370 \text{ kN} < 1526,370 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = 86,195 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = -198,570 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace prostého tahu a ohybu:**Únosnosti: $N_R = 4489,910 \text{ kN}$; $M_{z,R} = -356,941 \text{ kNm}$ $|0,019 + 0,000 + 0,556| = |0,576| < 1$ **Vyhovuje**

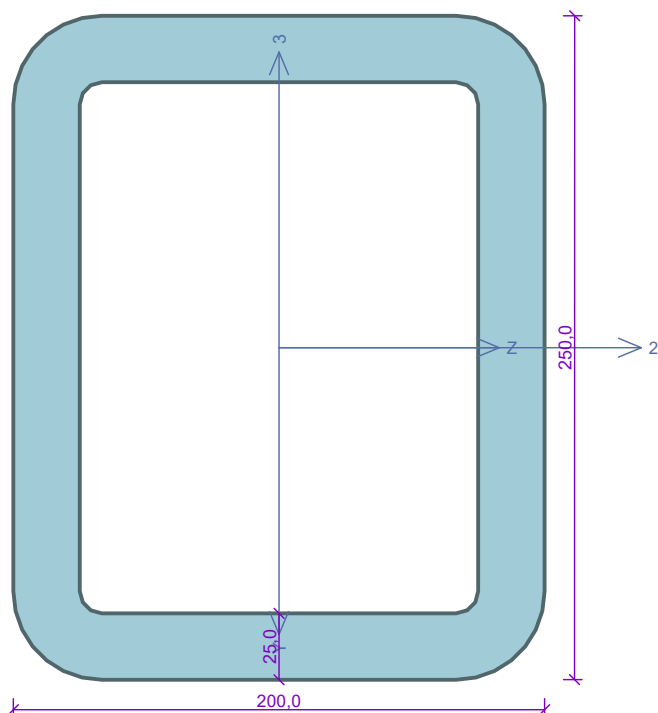
Stíhlost dílce: 54,7

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "5:DD - 15" - průřez 1



Norma EN 1993-1-1/Česko.

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$
 Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$
 Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TO 250 x 200 x 25Průřezová plocha: $A = 1,911E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 125,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 1,022E08 \text{ mm}^4$ $I_z = 1,472E08 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 1,182E06 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -1,182E06 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,938E08 \text{ mm}^4$

Výšečový moment setrvačnosti:

 $I_{\omega} = 1,009E10 \text{ mm}^6$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 1,291E06 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 1,519E06 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**Mez kluzu f_y : 235,0 MPaMez pevnosti f_u : 360,0 MPaModul pružnosti E : 210000 MPaModul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa**Vnitřní síly v souřadném systému průřezu**

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

 $N = -13,650 \text{ kN}$ $V_z = 0,000 \text{ kN}$ $V_y = 133,346 \text{ kN}$ $T_t = 0,000 \text{ kNm}$ $T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$ $M_y = 0,000 \text{ kNm}$ $M_z = 270,768 \text{ kNm}$ $B = 0,000 \text{ kNm}^2$ **Parametry vzpěru**

Délka dílce: 4,000 m

Se vzpěrem se nepočítá

Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1**Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $133,346 \text{ kN} < 1526,370 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = -13,650 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = 270,768 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace prostého tlaku a ohybu:**Únosnosti: $N_R = -4489,910 \text{ kN}$; $M_{z,R} = 356,941 \text{ kNm}$ $|0,003 + 0,000 + 0,759| = |0,762| < 1$ **Vyhovuje**

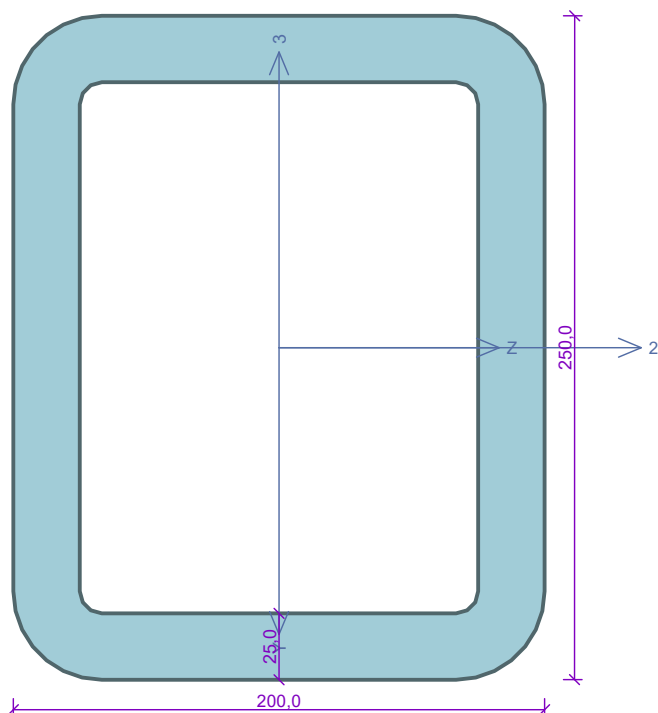
Stíhlost dílce: 54,7

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "6:DD - 16" - průřez 1

Norma **EN 1993-1-1/Česko**.

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$
 Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$
 Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TO 250 x 200 x 25Průřezová plocha: $A = 1,911E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 125,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 1,022E08 \text{ mm}^4$ $I_z = 1,472E08 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 1,182E06 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -1,182E06 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,938E08 \text{ mm}^4$

Výšečový moment setrvačnosti:

 $I_{\omega} = 1,009E10 \text{ mm}^6$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 1,291E06 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 1,519E06 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**Mez kluzu f_y : 235,0 MPaMez pevnosti f_u : 360,0 MPaModul pružnosti E : 210000 MPaModul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa**Vnitřní síly v souřadném systému průřezu**

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

 $N = -72,545 \text{ kN}$ $V_z = 0,000 \text{ kN}$ $V_y = 82,914 \text{ kN}$ $T_t = 0,000 \text{ kNm}$ $T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$ $M_y = 0,000 \text{ kNm}$ $M_z = -167,301 \text{ kNm}$ $B = 0,000 \text{ kNm}^2$ **Parametry vzpěru**

Délka dílce: 4,000 m

Se vzpěrem se nepočítá

Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1**Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $82,914 \text{ kN} < 1526,370 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = -72,545 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = -167,301 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace prostého tlaku a ohybu:**Únosnosti: $N_R = -4489,910 \text{ kN}$; $M_{z,R} = -356,941 \text{ kNm}$ $|0,016 + 0,000 + 0,469| = |0,485| < 1$ **Vyhovuje**

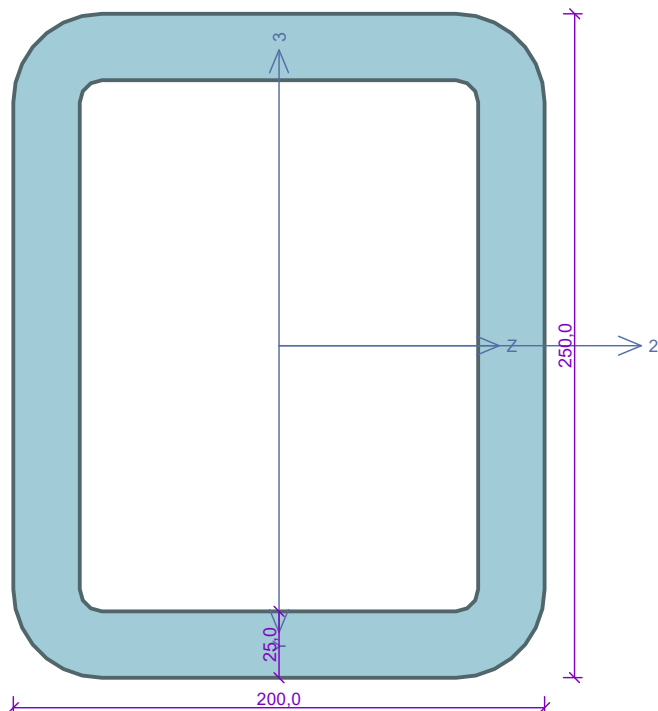
Stíhlost dílce: 54,7

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "7:DD - 1 - 5" - průřez 1

Norma **EN 1993-1-1/Česko**.

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$
 Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$
 Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TO 250 x 200 x 25Průřezová plocha: $A = 1,911E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 125,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 1,022E08 \text{ mm}^4$ $I_z = 1,472E08 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 1,182E06 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -1,182E06 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,938E08 \text{ mm}^4$

Výšečový moment setrvačnosti:

 $I_{\omega} = 1,009E10 \text{ mm}^6$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 1,291E06 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 1,519E06 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**Mez kluzu f_y : 235,0 MPaMez pevnosti f_u : 360,0 MPaModul pružnosti E : 210000 MPaModul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa**Vnitřní síly v souřadném systému průřezu**

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

 $N = 305,630 \text{ kN}$ $V_z = 0,000 \text{ kN}$ $V_y = -149,337 \text{ kN}$ $T_t = 0,000 \text{ kNm}$ $T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$ $M_y = 0,000 \text{ kNm}$ $M_z = -229,925 \text{ kNm}$ $B = 0,000 \text{ kNm}^2$ **Parametry vzpěru**

Délka dílce: 20,000 m

 $L_z = 20,000 \text{ m}$ $L_y = 20,000 \text{ m}$ **Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1****Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $149,337 \text{ kN} < 1526,370 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = 305,630 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = -229,925 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace prostého tahu a ohybu:**Únosnosti: $N_R = 4489,910 \text{ kN}$; $M_{z,R} = -356,941 \text{ kNm}$ $|0,068 + 0,000 + 0,644| = |0,712| < 1$ **Vyhovuje**

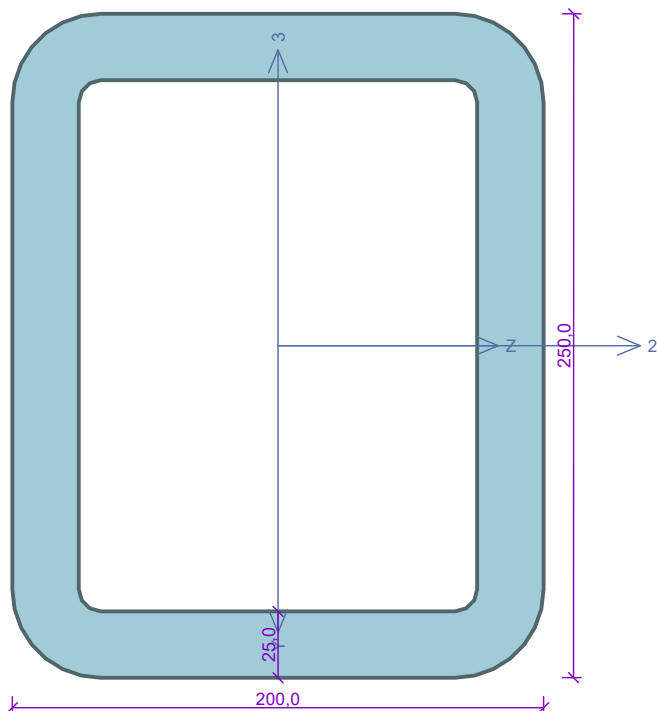
Stíhlost dílce: 273,4

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "8:DD - 6 - 10" - průřez 1



Norma EN 1993-1-1/Česko.

Únosnost průřezu	: $\gamma_{M0} = 1,000$
Únosnost průřezu při posuzování stability	: $\gamma_{M1} = 1,000$
Únosnost oslabeného průřezu	: $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TO 250 x 200 x 25Průřezová plocha: $A = 1,911E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 125,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 1,022E08 \text{ mm}^4$ $I_z = 1,472E08 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 1,182E06 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -1,182E06 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,938E08 \text{ mm}^4$

Výšečový moment setrvačnosti:

 $I_{\omega} = 1,009E10 \text{ mm}^6$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 1,291E06 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 1,519E06 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**Mez kluzu f_y : 235,0 MPaMez pevnosti f_u : 360,0 MPaModul pružnosti E : 210000 MPaModul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa**Vnitřní síly v souřadném systému průřezu**

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

$N = -216,260 \text{ kN}$	$M_y = 0,000 \text{ kNm}$
$V_z = 0,000 \text{ kN}$	$M_z = -199,836 \text{ kNm}$
$V_y = 86,195 \text{ kN}$	$B = 0,000 \text{ kNm}^2$
$T_t = 0,000 \text{ kNm}$	
$T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$	

Parametry vzpěru

Délka dílce: 20,000 m

Se vzpěrem se nepočítá

Výsledek posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1**Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $86,195 \text{ kN} < 1526,370 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = -216,260 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = -199,836 \text{ kNm}$ **Posudek nejneprůznivější kombinace prostého tlaku a ohybu:**Únosnosti: $N_R = -4489,910 \text{ kN}$; $M_{z,R} = -356,941 \text{ kNm}$ $|0,048 + 0,000 + 0,560| = |0,608| < 1$ **Vyhovuje**

Stíhlost dílce: 273,4

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití



1 Projekt

Akce : Diplomová práce
Část : Vierendeelův nosník s diagonálami
Vypracoval : Miroslav Tábor
Datum : 21.7.2018

2 Výsledky

2.1 Deformace pro kombinace I.řádu, MSP

Kombinace nejsou zadané

2.2 Vnitřní síly v s. s. dílce pro zatěžovací stavy

2.2.1 Vnitřní síly po dílcích

Zatěžovací stav		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	144,89	16,90	12,91
		4,000	144,89	16,90	-54,69
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	171,91	-43,93	-108,30
		4,000	171,91	-43,93	67,44
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	217,77	-110,62	-32,29
		2,000	217,77	-110,62	188,95
		2,000	217,77	110,62	188,95
		4,000	217,77	110,62	-32,29
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	171,91	43,93	67,44
		4,000	171,91	43,93	-108,30
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	144,89	-16,90	-54,69
		4,000	144,89	-16,90	12,91
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	9,45	19,64	18,20
		4,000	9,45	19,64	-60,34
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-171,91	-66,69	-136,85
		4,000	-171,91	-66,69	129,90
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-217,77	0,00	46,18
		2,000	-217,77	0,00	46,18
		4,000	-217,77	0,00	46,18
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-171,91	66,69	129,90
		4,000	-171,91	66,69	-136,85



Pouze pro nekomerční využití



Zatěžovací stav		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	9,45	-19,64	-60,34
		4,000	9,45	-19,64	18,20
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	19,64	9,45	19,60
		4,000	19,64	9,45	-18,20
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	60,83	-27,02	-53,61
		4,000	60,83	-27,02	54,48
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	66,69	-45,86	-99,73
		4,000	66,69	-45,86	83,72
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	66,69	45,86	99,73
		4,000	66,69	45,86	-83,72
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	60,83	27,02	53,61
		4,000	60,83	27,02	-54,48
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	19,64	-9,45	-19,60
		4,000	19,64	-9,45	18,20
Dílec č.17 - 1 ---- 8, délka 5,657 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-213,19	5,08	6,70
		5,657	-213,19	5,08	-22,03
Dílec č.18 - 6 ---- 11, délka 5,657 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-213,19	-5,08	6,70
		5,657	-213,19	-5,08	-22,03

2.2.2 Vnitřní síly po zatěžovacích stavech

Dílec		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Popis dílce		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Zatěžovací stav č.1 - G1 silové-stálé					
1	1 ---- 2, délka 4,000 m	0,000	144,89	16,90	12,91
		4,000	144,89	16,90	-54,69
2	2 ---- 3, délka 4,000 m	0,000	171,91	-43,93	-108,30
		4,000	171,91	-43,93	67,44
3	3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000	217,77	-110,62	-32,29
		2,000	217,77	-110,62	188,95
		2,000	217,77	110,62	188,95
		4,000	217,77	110,62	-32,29
4	4 ---- 5, délka 4,000 m	0,000	171,91	43,93	67,44
		4,000	171,91	43,93	-108,30
5	5 ---- 6, délka 4,000 m	0,000	144,89	-16,90	-54,69
		4,000	144,89	-16,90	12,91
6	7 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	9,45	19,64	18,20
		4,000	9,45	19,64	-60,34



Pouze pro nekomerční využití



č.	Dílec Popis dílce	Pozice [m]	Vnitřní síly		
			N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
7	8 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	-171,91	-66,69	-136,85
		4,000	-171,91	-66,69	129,90
8	9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	-217,77	0,00	46,18
		2,000	-217,77	0,00	46,18
		4,000	-217,77	0,00	46,18
9	10 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	-171,91	66,69	129,90
		4,000	-171,91	66,69	-136,85
10	11 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	9,45	-19,64	-60,34
		4,000	9,45	-19,64	18,20
11	1 ---- 7, délka 4,000 m	0,000	19,64	9,45	19,60
		4,000	19,64	9,45	-18,20
12	2 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	60,83	-27,02	-53,61
		4,000	60,83	-27,02	54,48
13	3 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	66,69	-45,86	-99,73
		4,000	66,69	-45,86	83,72
14	4 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	66,69	45,86	99,73
		4,000	66,69	45,86	-83,72
15	5 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	60,83	27,02	53,61
		4,000	60,83	27,02	-54,48
16	6 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	19,64	-9,45	-19,60
		4,000	19,64	-9,45	18,20
17	1 ---- 8, délka 5,657 m	0,000	-213,19	5,08	6,70
		5,657	-213,19	5,08	-22,03
18	6 ---- 11, délka 5,657 m	0,000	-213,19	-5,08	6,70
		5,657	-213,19	-5,08	-22,03

2.2.3 Extrémy vnitřních sil

Kladné extrémy:

Síla	Zatěžovací stav	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000 m	217,77 kN
V ₃	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	2,000 m	110,62 kN
M ₂	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	2,000 m	188,95 kNm

Záporné extrémy:

Síla	Zatěžovací stav	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000 m	-217,77 kN
V ₃	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000 m	-110,62 kN
M ₂	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m	0,000 m	-136,85 kNm

č.	Zatěžovací stav Název	Pozice [m]	Vnitřní síly		
			N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	144,89	16,90	12,91
1	G1 silové-stálé	4,000	144,89	16,90	-54,69
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	171,91	-43,93	-108,30
1	G1 silové-stálé	4,000	171,91	-43,93	67,44



Pouze pro nekomerční využití



Zatěžovací stav		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	217,77	-110,62	-32,29
1	G1 silové-stálé	2,000	217,77	110,62	188,95
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	171,91	43,93	67,44
1	G1 silové-stálé	4,000	171,91	43,93	-108,30
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	144,89	-16,90	-54,69
1	G1 silové-stálé	4,000	144,89	-16,90	12,91
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	9,45	19,64	18,20
1	G1 silové-stálé	4,000	9,45	19,64	-60,34
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-171,91	-66,69	-136,85
1	G1 silové-stálé	4,000	-171,91	-66,69	129,90
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-217,77	0,00	46,18
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-171,91	66,69	129,90
1	G1 silové-stálé	4,000	-171,91	66,69	-136,85
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	9,45	-19,64	-60,34
1	G1 silové-stálé	4,000	9,45	-19,64	18,20
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	19,64	9,45	19,60
1	G1 silové-stálé	4,000	19,64	9,45	-18,20
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	60,83	-27,02	-53,61
1	G1 silové-stálé	4,000	60,83	-27,02	54,48
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	66,69	-45,86	-99,73
1	G1 silové-stálé	4,000	66,69	-45,86	83,72
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	66,69	45,86	99,73
1	G1 silové-stálé	4,000	66,69	45,86	-83,72
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	60,83	27,02	53,61
1	G1 silové-stálé	4,000	60,83	27,02	-54,48
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	19,64	-9,45	-19,60
1	G1 silové-stálé	4,000	19,64	-9,45	18,20
Dílec č.17 - 1 ---- 8, délka 5,657 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-213,19	5,08	6,70
1	G1 silové-stálé	5,657	-213,19	5,08	-22,03

! Pouze pro nekomerční využití !

Zatěžovací stav		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.18 - 6 ---- 11, délka 5,657 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-213,19	-5,08	6,70
1	G1 silové-stálé	0,000	-213,19	5,08	6,70
1	G1 silové-stálé	5,657	-213,19	-5,08	-22,03

2.3 Vnitřní síly v s. s. dílce pro kombinace I.řádu, MSÚ

2.3.1 Vnitřní síly po dílcích

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Kombinace I.řád, MSÚ		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	195,60	22,81	17,42
		4,000	195,60	22,81	-73,83
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	232,07	-59,31	-146,20
		4,000	232,07	-59,31	91,04
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	293,99	-149,34	-43,59
		2,000	293,99	-149,34	255,08
		2,000	293,99	149,34	255,08
		4,000	293,99	149,34	-43,59
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	232,07	59,31	91,04
		4,000	232,07	59,31	-146,20
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	195,60	-22,81	-73,83
		4,000	195,60	-22,81	17,42
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	12,76	26,51	24,57
		4,000	12,76	26,51	-81,46
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-232,07	-90,03	-184,75
		4,000	-232,07	-90,03	175,36
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-293,99	0,00	62,34
		4,000	-293,99	0,00	62,34
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-232,07	90,03	175,36
		4,000	-232,07	90,03	-184,75
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	12,76	-26,51	-81,46
		4,000	12,76	-26,51	24,57
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	26,51	12,76	26,47
		4,000	26,51	12,76	-24,57



Pouze pro nekomerční využití



Kombinace I.řád, MSÚ		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,12	-36,48	-72,37
		4,000	82,12	-36,48	73,55
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	90,03	-61,91	-134,63
		4,000	90,03	-61,91	113,02
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	90,03	61,91	134,63
		4,000	90,03	61,91	-113,02
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,12	36,48	72,37
		4,000	82,12	36,48	-73,55
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	26,51	-12,76	-26,47
		4,000	26,51	-12,76	24,57
Dílec č.17 - 1 ---- 8, délka 5,657 m					
1	G1	0,000	-287,80	6,86	9,04
		5,657	-287,80	6,86	-29,74
Dílec č.18 - 6 ---- 11, délka 5,657 m					
1	G1	0,000	-287,80	-6,86	9,04
		5,657	-287,80	-6,86	-29,74

2.3.2 Vnitřní síly po kombinacích

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Dílec		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Popis dílce		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Kombinace č.1 - G1					
1	1 ---- 2, délka 4,000 m	0,000	195,60	22,81	17,42
		4,000	195,60	22,81	-73,83
2	2 ---- 3, délka 4,000 m	0,000	232,07	-59,31	-146,20
		4,000	232,07	-59,31	91,04
3	3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000	293,99	-149,34	-43,59
		2,000	293,99	-149,34	255,08
		2,000	293,99	149,34	255,08
		4,000	293,99	149,34	-43,59
4	4 ---- 5, délka 4,000 m	0,000	232,07	59,31	91,04
		4,000	232,07	59,31	-146,20
5	5 ---- 6, délka 4,000 m	0,000	195,60	-22,81	-73,83
		4,000	195,60	-22,81	17,42
6	7 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	12,76	26,51	24,57
		4,000	12,76	26,51	-81,46
7	8 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	-232,07	-90,03	-184,75
		4,000	-232,07	-90,03	175,36
8	9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	-293,99	0,00	62,34
		4,000	-293,99	0,00	62,34



Pouze pro nekomerční využití



č.	Dílec Popis dílce	Pozice [m]	Vnitřní síly		
			N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
9	10 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	-232,07	90,03	175,36
		4,000	-232,07	90,03	-184,75
10	11 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	12,76	-26,51	-81,46
		4,000	12,76	-26,51	24,57
11	1 ---- 7, délka 4,000 m	0,000	26,51	12,76	26,47
		4,000	26,51	12,76	-24,57
12	2 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	82,12	-36,48	-72,37
		4,000	82,12	-36,48	73,55
13	3 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	90,03	-61,91	-134,63
		4,000	90,03	-61,91	113,02
14	4 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	90,03	61,91	134,63
		4,000	90,03	61,91	-113,02
15	5 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	82,12	36,48	72,37
		4,000	82,12	36,48	-73,55
16	6 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	26,51	-12,76	-26,47
		4,000	26,51	-12,76	24,57
17	1 ---- 8, délka 5,657 m	0,000	-287,80	6,86	9,04
		5,657	-287,80	6,86	-29,74
18	6 ---- 11, délka 5,657 m	0,000	-287,80	-6,86	9,04
		5,657	-287,80	-6,86	-29,74

2.3.3 Extrémy vnitřních sil

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Kladné extrémy:

Síla	Kombinace I.řád, MSÚ	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Kombinace č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000 m	293,99 kN
V ₃	Kombinace č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	2,000 m	149,34 kN
M ₂	Kombinace č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	2,000 m	255,08 kNm

Záporné extrémy:

Síla	Kombinace I.řád, MSÚ	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Kombinace č.1	Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000 m	-293,99 kN
V ₃	Kombinace č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000 m	-149,34 kN
M ₂	Kombinace č.1	Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m	0,000 m	-184,75 kNm

Kombinace I.řád, MSÚ		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	195,60	22,81	17,42
1	G1	4,000	195,60	22,81	-73,83
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	232,07	-59,31	-146,20
1	G1	4,000	232,07	-59,31	91,04
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	293,99	-149,34	-43,59
1	G1	2,000	293,99	149,34	255,08



Pouze pro nekomerční využití



Kombinace I.řád, MSÚ		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V ₃ [kN]	M ₂ [kNm]
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	232,07	59,31	91,04
1	G1	4,000	232,07	59,31	-146,20
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	195,60	-22,81	-73,83
1	G1	4,000	195,60	-22,81	17,42
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	12,76	26,51	24,57
1	G1	4,000	12,76	26,51	-81,46
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-232,07	-90,03	-184,75
1	G1	4,000	-232,07	-90,03	175,36
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-293,99	0,00	62,34
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-232,07	90,03	175,36
1	G1	4,000	-232,07	90,03	-184,75
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	12,76	-26,51	-81,46
1	G1	4,000	12,76	-26,51	24,57
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	26,51	12,76	26,47
1	G1	4,000	26,51	12,76	-24,57
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,12	-36,48	-72,37
1	G1	4,000	82,12	-36,48	73,55
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	90,03	-61,91	-134,63
1	G1	4,000	90,03	-61,91	113,02
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	90,03	61,91	134,63
1	G1	4,000	90,03	61,91	-113,02
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,12	36,48	72,37
1	G1	4,000	82,12	36,48	-73,55
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	26,51	-12,76	-26,47
1	G1	4,000	26,51	-12,76	24,57
Dílec č.17 - 1 ---- 8, délka 5,657 m					
1	G1	0,000	-287,80	6,86	9,04
1	G1	5,657	-287,80	6,86	-29,74
Dílec č.18 - 6 ---- 11, délka 5,657 m					
1	G1	0,000	-287,80	-6,86	9,04
1	G1	0,000	-287,80	6,86	9,04
1	G1	5,657	-287,80	-6,86	-29,74

! Pouze pro nekomerční využití !

2.4 Vnitřní síly v s. s. dílce pro kombinace I.řádu, MSP

Kombinace nejsou zadane

2.5 Vnitřní síly v s. s. průřezu pro zatěžovací stavy

2.5.1 Vnitřní síly po dílcích

Zatěžovací stav		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	144,89	0,00	0,00
		4,000	144,89	0,00	0,00
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	171,91	0,00	0,00
		4,000	171,91	0,00	0,00
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	217,77	0,00	0,00
		4,000	217,77	0,00	0,00
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	171,91	0,00	0,00
		4,000	171,91	0,00	0,00
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	144,89	0,00	0,00
		4,000	144,89	0,00	0,00
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	9,45	0,00	0,00
		4,000	9,45	0,00	0,00
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-171,91	0,00	0,00
		4,000	-171,91	0,00	0,00
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-217,77	0,00	0,00
		4,000	-217,77	0,00	0,00
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-171,91	0,00	0,00
		4,000	-171,91	0,00	0,00
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	9,45	0,00	0,00
		4,000	9,45	0,00	0,00
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	19,64	0,00	0,00
		4,000	19,64	0,00	0,00
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	60,83	0,00	0,00
		4,000	60,83	0,00	0,00
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	66,69	0,00	0,00
		4,000	66,69	0,00	0,00



Pouze pro nekomerční využití



Zatěžovací stav		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	66,69	0,00	0,00
		4,000	66,69	0,00	0,00
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	60,83	0,00	0,00
		4,000	60,83	0,00	0,00
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	19,64	0,00	0,00
		4,000	19,64	0,00	0,00
Dílec č.17 - 1 ---- 8, délka 5,657 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-213,19	0,00	0,00
		5,657	-213,19	0,00	0,00
Dílec č.18 - 6 ---- 11, délka 5,657 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-213,19	0,00	0,00
		5,657	-213,19	0,00	0,00

2.5.2 Vnitřní síly po zatěžovacích stavech

Dílec		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Popis dílce		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Zatěžovací stav č.1 - G1 silové-stálé					
1	1 ---- 2, délka 4,000 m	0,000	144,89	0,00	0,00
		4,000	144,89	0,00	0,00
2	2 ---- 3, délka 4,000 m	0,000	171,91	0,00	0,00
		4,000	171,91	0,00	0,00
3	3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000	217,77	0,00	0,00
		4,000	217,77	0,00	0,00
4	4 ---- 5, délka 4,000 m	0,000	171,91	0,00	0,00
		4,000	171,91	0,00	0,00
5	5 ---- 6, délka 4,000 m	0,000	144,89	0,00	0,00
		4,000	144,89	0,00	0,00
6	7 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	9,45	0,00	0,00
		4,000	9,45	0,00	0,00
7	8 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	-171,91	0,00	0,00
		4,000	-171,91	0,00	0,00
8	9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	-217,77	0,00	0,00
		4,000	-217,77	0,00	0,00
9	10 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	-171,91	0,00	0,00
		4,000	-171,91	0,00	0,00
10	11 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	9,45	0,00	0,00
		4,000	9,45	0,00	0,00
11	1 ---- 7, délka 4,000 m	0,000	19,64	0,00	0,00
		4,000	19,64	0,00	0,00
12	2 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	60,83	0,00	0,00
		4,000	60,83	0,00	0,00
13	3 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	66,69	0,00	0,00
		4,000	66,69	0,00	0,00

! Pouze pro nekomerční využití !

č.	Dílec Popis dílce	Pozice [m]	Vnitřní síly		
			N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
14	4 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	66,69	0,00	0,00
		4,000	66,69	0,00	0,00
15	5 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	60,83	0,00	0,00
		4,000	60,83	0,00	0,00
16	6 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	19,64	0,00	0,00
		4,000	19,64	0,00	0,00
17	1 ---- 8, délka 5,657 m	0,000	-213,19	0,00	0,00
		5,657	-213,19	0,00	0,00
18	6 ---- 11, délka 5,657 m	0,000	-213,19	0,00	0,00
		5,657	-213,19	0,00	0,00

2.5.3 Extrémy vnitřních sil

Kladné extrémy:

Síla	Zatěžovací stav	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000 m	217,77 kN
V _z				
M _y				

Záporné extrémy:

Síla	Zatěžovací stav	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Zatěžovací stav č.1	Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000 m	-217,77 kN
V _z				
M _y				

č.	Zatěžovací stav Název	Pozice [m]	Vnitřní síly		
			N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	144,89	0,00	0,00
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	171,91	0,00	0,00
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	217,77	0,00	0,00
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	171,91	0,00	0,00
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	144,89	0,00	0,00
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	9,45	0,00	0,00
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-171,91	0,00	0,00
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-217,77	0,00	0,00
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-171,91	0,00	0,00
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	9,45	0,00	0,00



Pouze pro nekomerční využití



Zatěžovací stav		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	19,64	0,00	0,00
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	60,83	0,00	0,00
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	66,69	0,00	0,00
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	66,69	0,00	0,00
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	60,83	0,00	0,00
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	19,64	0,00	0,00
Dílec č.17 - 1 ---- 8, délka 5,657 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-213,19	0,00	0,00
Dílec č.18 - 6 ---- 11, délka 5,657 m					
1	G1 silové-stálé	0,000	-213,19	0,00	0,00

2.6 Vnitřní síly v s. s. průřezu pro kombinace I.řádu, MSÚ

2.6.1 Vnitřní síly po dílcích

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Kombinace I.řád, MSÚ		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	195,60	0,00	0,00
		4,000	195,60	0,00	0,00
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	232,07	0,00	0,00
		4,000	232,07	0,00	0,00
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	293,99	0,00	0,00
		4,000	293,99	0,00	0,00
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	232,07	0,00	0,00
		4,000	232,07	0,00	0,00
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	195,60	0,00	0,00
		4,000	195,60	0,00	0,00
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	12,76	0,00	0,00
		4,000	12,76	0,00	0,00
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-232,07	0,00	0,00
		4,000	-232,07	0,00	0,00



Pouze pro nekomerční využití



Kombinace I.řád, MSÚ		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-293,99	0,00	0,00
		4,000	-293,99	0,00	0,00
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-232,07	0,00	0,00
		4,000	-232,07	0,00	0,00
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	12,76	0,00	0,00
		4,000	12,76	0,00	0,00
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	26,51	0,00	0,00
		4,000	26,51	0,00	0,00
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,12	0,00	0,00
		4,000	82,12	0,00	0,00
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	90,03	0,00	0,00
		4,000	90,03	0,00	0,00
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	90,03	0,00	0,00
		4,000	90,03	0,00	0,00
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,12	0,00	0,00
		4,000	82,12	0,00	0,00
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	26,51	0,00	0,00
		4,000	26,51	0,00	0,00
Dílec č.17 - 1 ---- 8, délka 5,657 m					
1	G1	0,000	-287,80	0,00	0,00
		5,657	-287,80	0,00	0,00
Dílec č.18 - 6 ---- 11, délka 5,657 m					
1	G1	0,000	-287,80	0,00	0,00
		5,657	-287,80	0,00	0,00

2.6.2 Vnitřní síly po kombinacích

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Dílec		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Popis dílce		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Kombinace č.1 - G1					
1	1 ---- 2, délka 4,000 m	0,000	195,60	0,00	0,00
		4,000	195,60	0,00	0,00
2	2 ---- 3, délka 4,000 m	0,000	232,07	0,00	0,00
		4,000	232,07	0,00	0,00
3	3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000	293,99	0,00	0,00
		4,000	293,99	0,00	0,00



Pouze pro nekomerční využití



č.	Dílec Popis dílce	Pozice [m]	Vnitřní síly		
			N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
4	4 ---- 5, délka 4,000 m	0,000	232,07	0,00	0,00
		4,000	232,07	0,00	0,00
5	5 ---- 6, délka 4,000 m	0,000	195,60	0,00	0,00
		4,000	195,60	0,00	0,00
6	7 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	12,76	0,00	0,00
		4,000	12,76	0,00	0,00
7	8 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	-232,07	0,00	0,00
		4,000	-232,07	0,00	0,00
8	9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	-293,99	0,00	0,00
		4,000	-293,99	0,00	0,00
9	10 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	-232,07	0,00	0,00
		4,000	-232,07	0,00	0,00
10	11 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	12,76	0,00	0,00
		4,000	12,76	0,00	0,00
11	1 ---- 7, délka 4,000 m	0,000	26,51	0,00	0,00
		4,000	26,51	0,00	0,00
12	2 ---- 8, délka 4,000 m	0,000	82,12	0,00	0,00
		4,000	82,12	0,00	0,00
13	3 ---- 9, délka 4,000 m	0,000	90,03	0,00	0,00
		4,000	90,03	0,00	0,00
14	4 ---- 10, délka 4,000 m	0,000	90,03	0,00	0,00
		4,000	90,03	0,00	0,00
15	5 ---- 11, délka 4,000 m	0,000	82,12	0,00	0,00
		4,000	82,12	0,00	0,00
16	6 ---- 12, délka 4,000 m	0,000	26,51	0,00	0,00
		4,000	26,51	0,00	0,00
17	1 ---- 8, délka 5,657 m	0,000	-287,80	0,00	0,00
		5,657	-287,80	0,00	0,00
18	6 ---- 11, délka 5,657 m	0,000	-287,80	0,00	0,00
		5,657	-287,80	0,00	0,00

2.6.3 Extrémy vnitřních sil

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Kladné extrémy:

Síla	Kombinace I.řád, MSÚ	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Kombinace č.1	Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m	0,000 m	293,99 kN
V _z				
M _y				

Záporné extrémy:

Síla	Kombinace I.řád, MSÚ	Dílec	Pozice	Hodnota
N	Kombinace č.1	Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m	0,000 m	-293,99 kN
V _z				
M _y				



Pouze pro nekomerční využití



Kombinace I.řád, MSÚ		Pozice [m]	Vnitřní síly		
č.	Název		N [kN]	V _z [kN]	M _y [kNm]
Dílec č.1 - 1 ---- 2, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	195,60	0,00	0,00
Dílec č.2 - 2 ---- 3, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	232,07	0,00	0,00
Dílec č.3 - 3 ---- 4, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	293,99	0,00	0,00
Dílec č.4 - 4 ---- 5, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	232,07	0,00	0,00
Dílec č.5 - 5 ---- 6, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	195,60	0,00	0,00
Dílec č.6 - 7 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	12,76	0,00	0,00
Dílec č.7 - 8 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-232,07	0,00	0,00
Dílec č.8 - 9 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-293,99	0,00	0,00
Dílec č.9 - 10 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	-232,07	0,00	0,00
Dílec č.10 - 11 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	12,76	0,00	0,00
Dílec č.11 - 1 ---- 7, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	26,51	0,00	0,00
Dílec č.12 - 2 ---- 8, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,12	0,00	0,00
Dílec č.13 - 3 ---- 9, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	90,03	0,00	0,00
Dílec č.14 - 4 ---- 10, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	90,03	0,00	0,00
Dílec č.15 - 5 ---- 11, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	82,12	0,00	0,00
Dílec č.16 - 6 ---- 12, délka 4,000 m					
1	G1	0,000	26,51	0,00	0,00
Dílec č.17 - 1 ---- 8, délka 5,657 m					
1	G1	0,000	-287,80	0,00	0,00
Dílec č.18 - 6 ---- 11, délka 5,657 m					
1	G1	0,000	-287,80	0,00	0,00

2.7 Reakce pro zatěžovací stavy

2.7.1 Reakce po styčnicích

Zatěžovací stav		Reakce		
č.	Název	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Styčnick č.1 - abs. Y: 0,000 m Z: 0,000 m				
1	G1 silové-stálé	0,00	110,62	-



Pouze pro nekomerční využití



Zatěžovací stav		Reakce		
č.	Název	R_y [kN]	R_z [kN]	RO_x [kNm]
Styčnick č.6 - abs. Y: 20,000 m Z: 0,000 m				
1	G1 silové-stálé	-	110,62	-

2.7.2 Reakce po zatěžovacích stavech

Styčnick			Reakce		
č.	Popis styčnicku	Natočení [°]	R_y [kN]	R_z [kN]	RO_x [kNm]
Zatěžovací stav č.1 - G1 silové-stálé					
1	abs. Y: 0,000 m Z: 0,000 m		0,00	110,62	-
6	abs. Y: 20,000 m Z: 0,000 m		-	110,62	-

2.7.3 Extrémy reakcí

Kladné extrémy:

Max. reakce	Zatěžovací stav	Styčnick	R_y [kN]	R_z [kN]	RO_x [kNm]
Max. R_y	Zatěžovací stav 1	1	0,00	110,62	-
Max. R_z	Zatěžovací stav 1	1	0,00	110,62	-

Záporné extrémy:

Max. reakce	Zatěžovací stav	Styčnick	R_y [kN]	R_z [kN]	RO_x [kNm]
Min. R_y	Zatěžovací stav 1	1	0,00	110,62	-
Min. R_z	Zatěžovací stav 1	6	-	110,62	-

Extrémy po styčnicích:

Max. reakce	Zatěžovací stav	R_y [kN]	R_z [kN]	RO_x [kNm]
Styčnick č.1 - abs. Y: 0,000 m Z: 0,000 m				
Max. R_y, R_z	Zatěžovací stav 1	0,00	110,62	-
Min. R_y, R_z	Zatěžovací stav 1	0,00	110,62	-
Styčnick č.6 - abs. Y: 20,000 m Z: 0,000 m				
Max. R_z	Zatěžovací stav 1	-	110,62	-
Min. R_z	Zatěžovací stav 1	-	110,62	-

2.7.4 Součty reakcí ve směrech globálních os

Zatěžovací stav	Ve směru osy Y [kN]	Ve směru osy Z [kN]
Zatěžovací stav 1	0,00	221,24

2.8 Reakce pro kombinace I.řádu, MSÚ

2.8.1 Reakce po styčnicích

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)



Pouze pro nekomerční využití



Kombinace I.řád, MSÚ		Reakce		
č.	Název	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Styčnick č.1 - abs. Y: 0,000 m Z: 0,000 m				
1	G1	0,00	149,34	-
Styčnick č.6 - abs. Y: 20,000 m Z: 0,000 m				
1	G1	-	149,34	-

2.8.2 Reakce po kombinacích

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Styčnick			Reakce		
č.	Popis styčnicku	Natočení [°]	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Kombinace č.1 - G1					
1	abs. Y: 0,000 m Z: 0,000 m		0,00	149,34	-
6	abs. Y: 20,000 m Z: 0,000 m		-	149,34	-

2.8.3 Extrémy reakcí

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Kladné extrémy:

Max. reakce	Kombinace	Styčnick	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Max.R _y	Kombinace 1	1	0,00	149,34	-
Max.R _z	Kombinace 1	1	0,00	149,34	-

Záporné extrémy:

Max. reakce	Kombinace	Styčnick	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Min.R _y	Kombinace 1	1	0,00	149,34	-
Min.R _z	Kombinace 1	6	-	149,34	-

Extrémy po styčnickích:

Max. reakce	Kombinace	R _y [kN]	R _z [kN]	RO _x [kNm]
Styčnick č.1 - abs. Y: 0,000 m Z: 0,000 m				
Max.R _y ,R _z	Kombinace 1	0,00	149,34	-
Min.R _y ,R _z	Kombinace 1	0,00	149,34	-
Styčnick č.6 - abs. Y: 20,000 m Z: 0,000 m				
Max.R _z	Kombinace 1	-	149,34	-
Min.R _z	Kombinace 1	-	149,34	-

2.8.4 Součty reakcí ve směrech globálních os

Kombinace 1. řád, pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ)

Kombinace	Ve směru osy Y [kN]	Ve směru osy Z [kN]
Kombinace č.1	0,00	298,67



Pouze pro nekomerční využití



Projekt

Akce : Diplomová práce
Část : Vierendeelův nosník s diagonálami
Vypracoval : Miroslav Tábora
Datum : 21.07.2018

Norma

Norma **EN 1993-1-1, EN 1993-1-4/Česko.**

Součinitele pro ocelové konstrukce

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$

Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$

Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

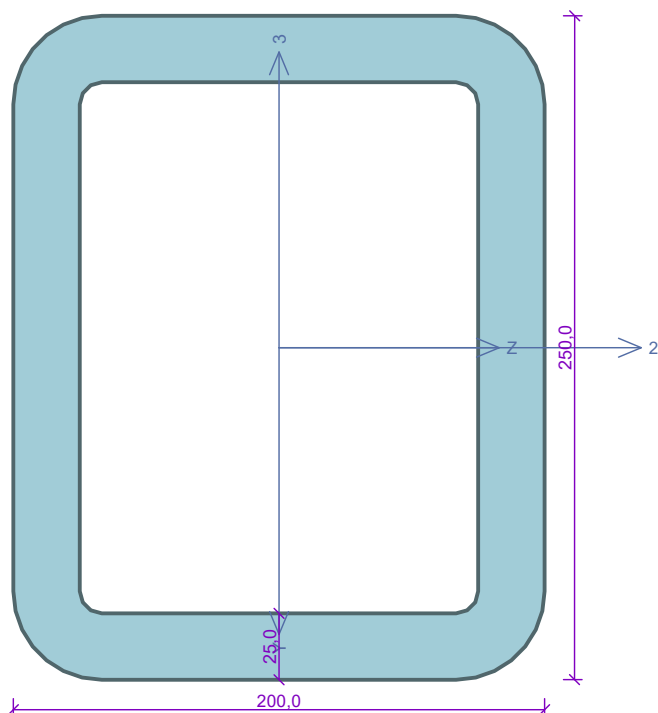
Součinitele pro korozivzdornou ocel

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,100$

Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,100$

Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Kritický řez dílce "1:DD - 11" - průřez 1



Norma EN 1993-1-1/Česko.

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$
 Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$
 Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TO 250 x 200 x 25Průřezová plocha: $A = 1,911E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 125,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 1,022E08 \text{ mm}^4$ $I_z = 1,472E08 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 1,182E06 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -1,182E06 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,938E08 \text{ mm}^4$

Výšečový moment setrvačnosti:

 $I_{\omega} = 1,009E10 \text{ mm}^6$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 1,291E06 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 1,519E06 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**Mez kluzu f_y : 235,0 MPaMez pevnosti f_u : 360,0 MPaModul pružnosti E : 210000 MPaModul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa**Vnitřní síly v souřadném systému průřezu**

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

 $N = 26,510 \text{ kN}$ $V_z = 0,000 \text{ kN}$ $V_y = 12,760 \text{ kN}$ $T_t = 0,000 \text{ kNm}$ $T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$ $M_y = 0,000 \text{ kNm}$ $M_z = -26,465 \text{ kNm}$ $B = 0,000 \text{ kNm}^2$ **Parametry vzpěru**

Délka dílce: 4,000 m

 $L_z = 4,000 \text{ m}$ $k_z = 1,000$ $L_{cr,z}$ - bráněno $L_y = 4,000 \text{ m}$ $L_{cr,y}$ - bráněno**Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1****Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $12,760 \text{ kN} < 1526,370 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = 26,510 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = -26,465 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace prostého tahu a ohybu:**Únosnosti: $N_R = 4489,910 \text{ kN}$; $M_{z,R} = -356,941 \text{ kNm}$ $|0,006 + 0,000 + 0,074| = |0,080| < 1$ **Vyhovuje**

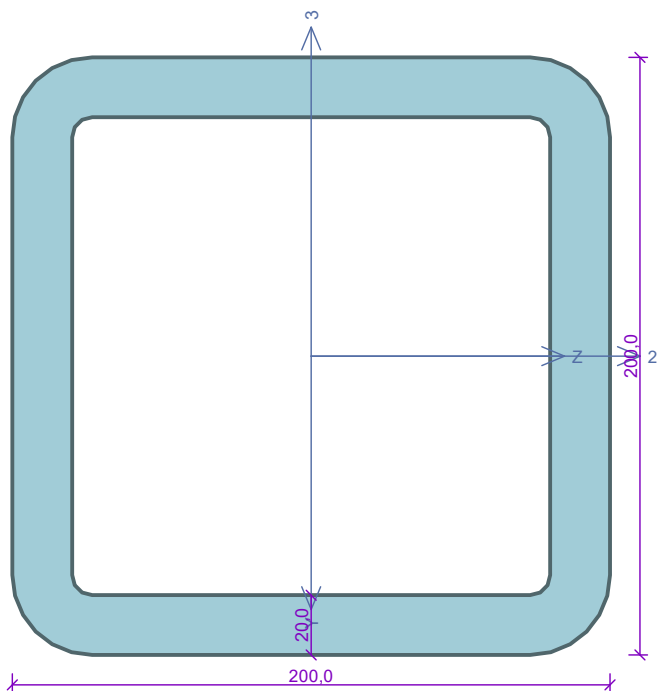
Stíhlost dílce: 54,7

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "2:DD - 12" - průřez 1



Norma EN 1993-1-1/Česko.

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$
 Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$
 Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TC 200 x 200 x 20Průřezová plocha: $A = 1,385E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 100,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 7,329E07 \text{ mm}^4$ $I_z = 7,329E07 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -7,353E05 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,166E08 \text{ mm}^4$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 9,215E05 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 9,215E05 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**Mez kluzu f_y : 235,0 MPaMez pevnosti f_u : 360,0 MPaModul pružnosti E : 210000 MPaModul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa**Vnitřní síly v souřadném systému průřezu**

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

 $N = 82,125 \text{ kN}$ $V_z = 0,000 \text{ kN}$ $M_y = 0,000 \text{ kNm}$ $V_y = -36,478 \text{ kN}$ $M_z = -73,546 \text{ kNm}$ $T_t = 0,000 \text{ kNm}$ $T_\omega = 0,000 \text{ kNm}$ $B = 0,000 \text{ kNm}^2$ **Parametry vzpěru**

Délka dílce: 4,000 m

Se vzpěrem se nepočítá

Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1**Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $36,478 \text{ kN} < 976,877 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = 82,125 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = -73,546 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace prostého tahu a ohybu:**Únosnosti: $N_R = 3255,220 \text{ kN}$; $M_{z,R} = -216,548 \text{ kNm}$ $|0,025 + 0,000 + 0,340| = |0,365| < 1$ **Vyhovuje**

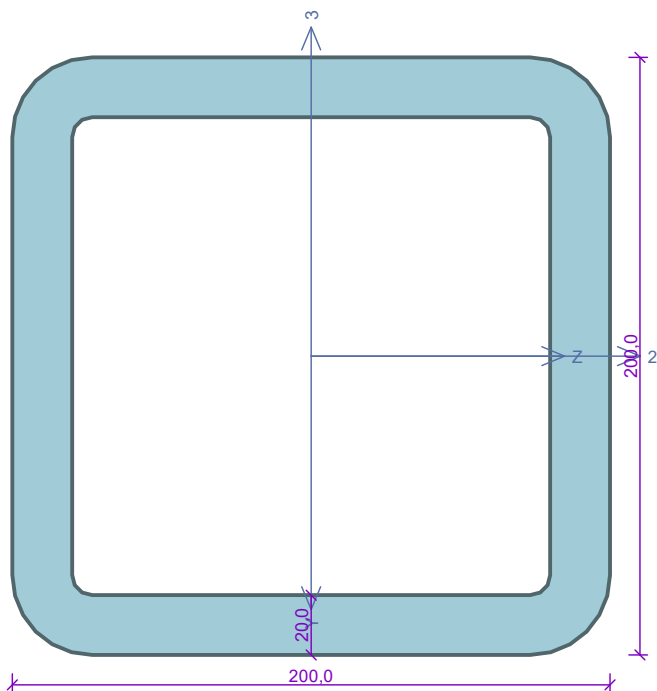
Střihlost dílce: 55,0

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "3:DD - 13" - průřez 1



Norma EN 1993-1-1/Česko.

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$
 Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$
 Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TC 200 x 200 x 20Průřezová plocha: $A = 1,385E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 100,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 7,329E07 \text{ mm}^4$ $I_z = 7,329E07 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -7,353E05 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,166E08 \text{ mm}^4$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 9,215E05 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 9,215E05 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**Mez kluzu f_y : 235,0 MPaMez pevnosti f_u : 360,0 MPaModul pružnosti E : 210000 MPaModul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa**Vnitřní síly v souřadném systému průřezu**

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

 $N = 90,027 \text{ kN}$ $V_z = 0,000 \text{ kN}$ $M_y = 0,000 \text{ kNm}$ $V_y = -61,914 \text{ kN}$ $M_z = 134,633 \text{ kNm}$ $T_t = 0,000 \text{ kNm}$ $T_\omega = 0,000 \text{ kNm}$ $B = 0,000 \text{ kNm}^2$ **Parametry vzpěru**

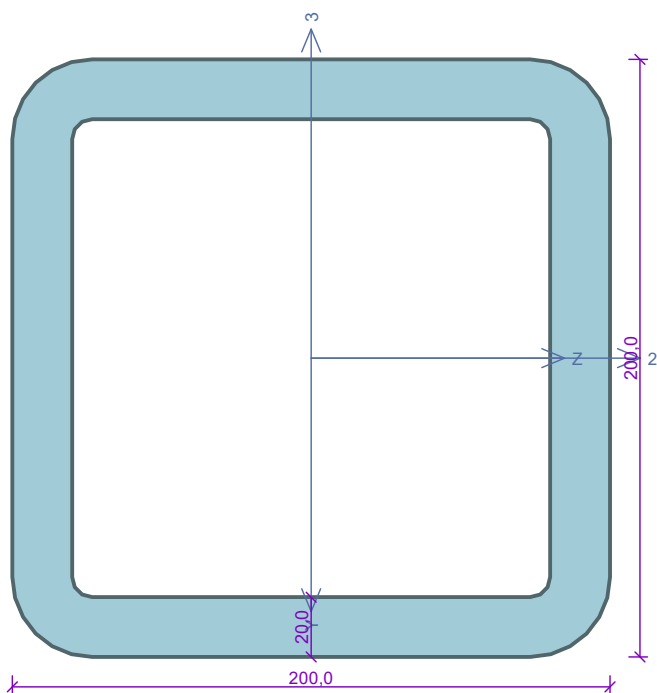
Délka dílce: 4,000 m

 $L_z = 4,000 \text{ m}$ $L_y = 4,000 \text{ m}$ **Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1****Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $61,914 \text{ kN} < 976,877 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = 90,027 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = 134,633 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace prostého tahu a ohybu:**Únosnosti: $N_R = 3255,220 \text{ kN}$; $M_{z,R} = 216,548 \text{ kNm}$ $|0,028 + 0,000 + 0,622| = |0,649| < 1$ **Vyhovuje**

Stíhlost dílce: 55,0

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE****Pouze pro nekomerční využití**

Kritický řez dílce "4:DD - 14" - průřez 1



Norma EN 1993-1-1/Česko.

Únosnost průřezu	: $\gamma_{M0} = 1,000$
Únosnost průřezu při posuzování stability	: $\gamma_{M1} = 1,000$
Únosnost oslabeného průřezu	: $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TC 200 x 200 x 20Průřezová plocha: $A = 1,385E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 100,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 7,329E07 \text{ mm}^4$ $I_z = 7,329E07 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -7,353E05 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,166E08 \text{ mm}^4$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 9,215E05 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 9,215E05 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**

Mez kluzu	f_y :	235,0 MPa
Mez pevnosti	f_u :	360,0 MPa
Modul pružnosti	E :	210000 MPa
Modul pružnosti ve smyku	G :	81000 MPa

Vnitřní síly v souřadném systému průřezu

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

$N = 90,027 \text{ kN}$	
$V_z = 0,000 \text{ kN}$	$M_y = 0,000 \text{ kNm}$
$V_y = 61,914 \text{ kN}$	$M_z = -134,633 \text{ kNm}$
$T_t = 0,000 \text{ kNm}$	
$T_\omega = 0,000 \text{ kNm}$	$B = 0,000 \text{ kNm}^2$

Parametry vzpěru

Délka dílce: 4,000 m

 $L_z = 4,000 \text{ m}$ $L_y = 4,000 \text{ m}$ **Výsledek posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1****Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $61,914 \text{ kN} < 976,877 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = 90,027 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = -134,633 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace prostého tahu a ohybu:**Únosnosti: $N_R = 3255,220 \text{ kN}$; $M_{z,R} = -216,548 \text{ kNm}$ $|0,028 + 0,000 + 0,622| = |0,649| < 1$ **Vyhovuje**

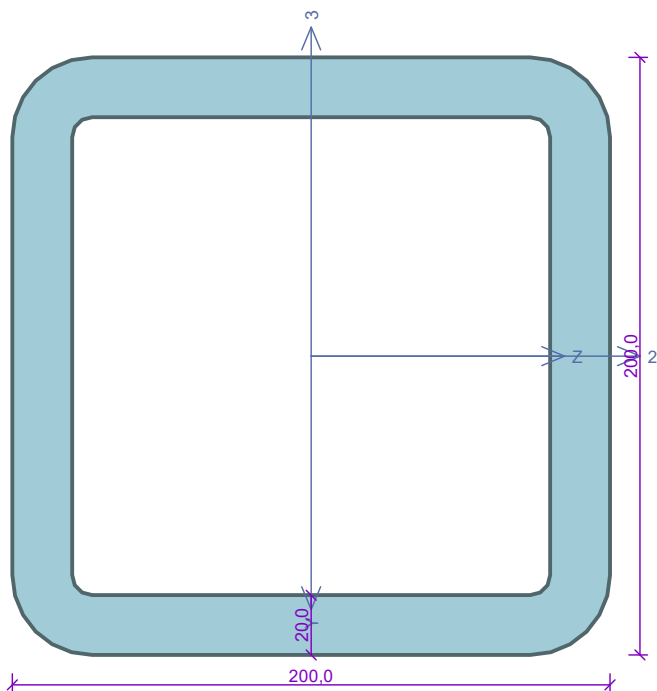
Střihlost dílce: 55,0

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "5:DD - 15" - průřez 1



Norma EN 1993-1-1/Česko.

Únosnost průřezu	: $\gamma_{M0} = 1,000$
Únosnost průřezu při posuzování stability	: $\gamma_{M1} = 1,000$
Únosnost oslabeného průřezu	: $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TC 200 x 200 x 20Průřezová plocha: $A = 1,385E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 100,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 7,329E07 \text{ mm}^4$ $I_z = 7,329E07 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -7,353E05 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,166E08 \text{ mm}^4$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 9,215E05 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 9,215E05 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**

Mez kluzu	f_y :	235,0 MPa
Mez pevnosti	f_u :	360,0 MPa
Modul pružnosti	E :	210000 MPa
Modul pružnosti ve smyku	G :	81000 MPa

Vnitřní síly v souřadném systému průřezu

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

$N = 82,125 \text{ kN}$	
$V_z = 0,000 \text{ kN}$	$M_y = 0,000 \text{ kNm}$
$V_y = 36,478 \text{ kN}$	$M_z = 73,546 \text{ kNm}$
$T_t = 0,000 \text{ kNm}$	
$T_\omega = 0,000 \text{ kNm}$	$B = 0,000 \text{ kNm}^2$

Parametry vzpěru

Délka dílce: 4,000 m

Se vzpěrem se nepočítá

Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1**Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $36,478 \text{ kN} < 976,877 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = 82,125 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = 73,546 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace prostého tahu a ohybu:**Únosnosti: $N_R = 3255,220 \text{ kN}$; $M_{z,R} = 216,548 \text{ kNm}$ $|0,025 + 0,000 + 0,340| = |0,365| < 1$ **Vyhovuje**

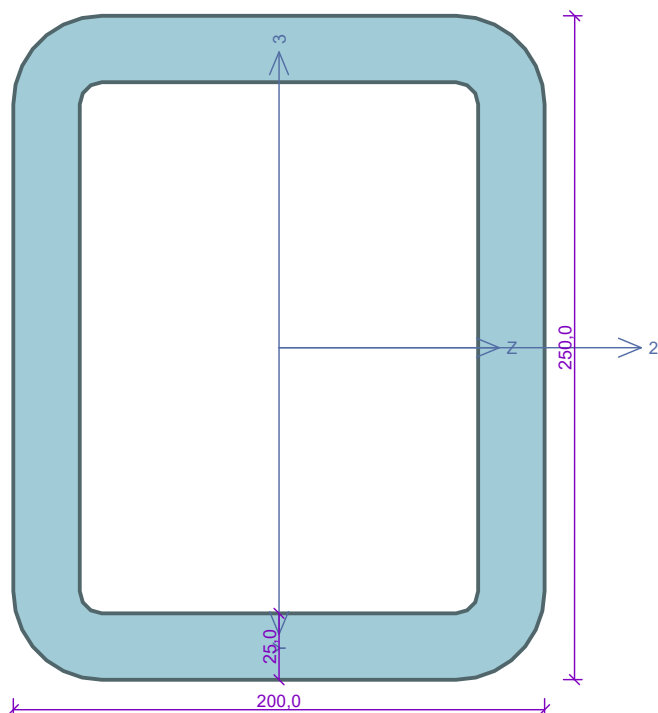
Štíhlost dílce: 55,0

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "6:DD - 16" - průřez 1



Norma EN 1993-1-1/Česko.

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$
 Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$
 Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TO 250 x 200 x 25Průřezová plocha: $A = 1,911E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 125,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 1,022E08 \text{ mm}^4$ $I_z = 1,472E08 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 1,182E06 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -1,182E06 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,938E08 \text{ mm}^4$

Výšečový moment setrvačnosti:

 $I_{\omega} = 1,009E10 \text{ mm}^6$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 1,291E06 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 1,519E06 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**Mez kluzu f_y : 235,0 MPaMez pevnosti f_u : 360,0 MPaModul pružnosti E : 210000 MPaModul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa**Vnitřní síly v souřadném systému průřezu**

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

 $N = 26,510 \text{ kN}$ $V_z = 0,000 \text{ kN}$ $M_y = 0,000 \text{ kNm}$ $V_y = -12,760 \text{ kN}$ $M_z = 26,465 \text{ kNm}$ $T_t = 0,000 \text{ kNm}$ $T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$ $B = 0,000 \text{ kNm}^2$ **Parametry vzpěru**

Délka dílce: 4,000 m

Se vzpěrem se nepočítá

Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1**Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $12,760 \text{ kN} < 1526,370 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = 26,510 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = 26,465 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace prostého tahu a ohybu:**Únosnosti: $N_R = 4489,910 \text{ kN}$; $M_{z,R} = 356,941 \text{ kNm}$ $|0,006 + 0,000 + 0,074| = |0,080| < 1$ **Vyhovuje**

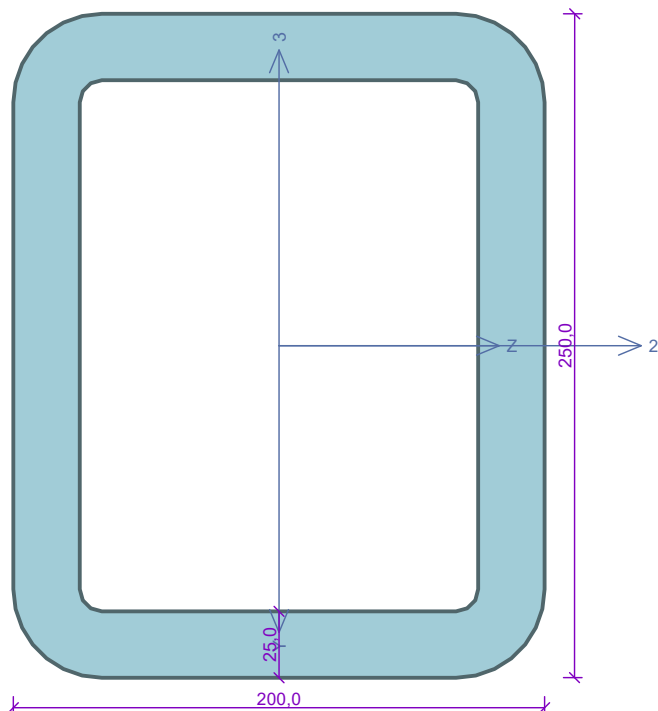
Stíhlost dílce: 54,7

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "7:DD - 1 - 5" - průřez 1



Norma EN 1993-1-1/Česko.

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$
 Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$
 Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TO 250 x 200 x 25Průřezová plocha: $A = 1,911E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 125,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 1,022E08 \text{ mm}^4$ $I_z = 1,472E08 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 1,182E06 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -1,182E06 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,938E08 \text{ mm}^4$

Výšečový moment setrvačnosti:

 $I_{\omega} = 1,009E10 \text{ mm}^6$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 1,291E06 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 1,519E06 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**Mez kluzu f_y : 235,0 MPaMez pevnosti f_u : 360,0 MPaModul pružnosti E : 210000 MPaModul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa**Vnitřní síly v souřadném systému průřezu**

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

 $N = 293,987 \text{ kN}$ $V_z = 0,000 \text{ kN}$ $V_y = -149,337 \text{ kN}$ $T_t = 0,000 \text{ kNm}$ $T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$ $M_y = 0,000 \text{ kNm}$ $M_z = -255,082 \text{ kNm}$ $B = 0,000 \text{ kNm}^2$ **Parametry vzpěru**

Délka dílce: 20,000 m

Se vzpěrem se nepočítá

Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1**Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $149,337 \text{ kN} < 1526,370 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = 293,987 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = -255,082 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace prostého tahu a ohybu:**Únosnosti: $N_R = 4489,910 \text{ kN}$; $M_{z,R} = -356,941 \text{ kNm}$ $|0,065 + 0,000 + 0,715| = |0,780| < 1$ **Vyhovuje**

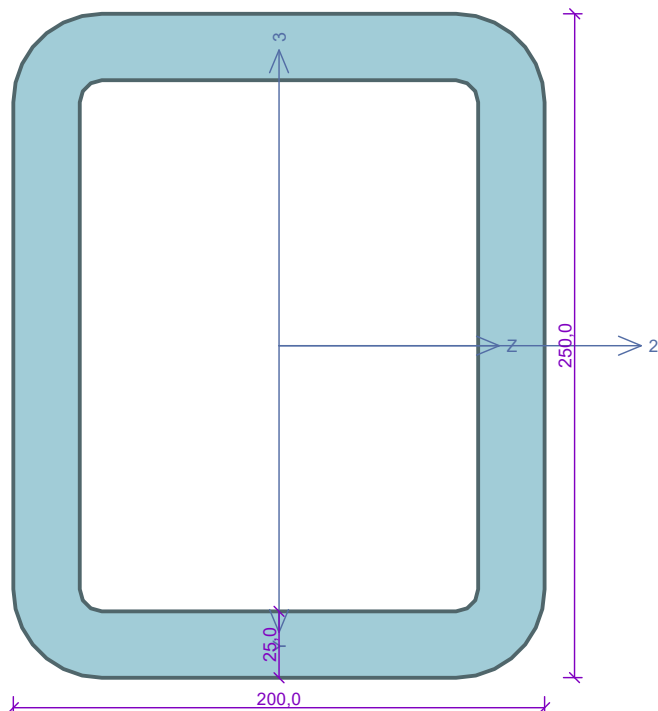
Stíhlost dílce: 273,4

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "8:DD - 6 - 10" - průřez 1



Norma EN 1993-1-1/Česko.

Únosnost průřezu : $\gamma_{M0} = 1,000$
 Únosnost průřezu při posuzování stability : $\gamma_{M1} = 1,000$
 Únosnost oslabeného průřezu : $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TO 250 x 200 x 25

Průřezová plocha: $A = 1,911E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 125,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 1,022E08 \text{ mm}^4$ $I_z = 1,472E08 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 1,182E06 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 1,025E06 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -1,182E06 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,938E08 \text{ mm}^4$

Výšečový moment setrvačnosti:

 $I_{\omega} = 1,009E10 \text{ mm}^6$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 1,291E06 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 1,519E06 \text{ mm}^3$

Materiál: EN 10025 : Fe 360

Materiálové charakteristiky:

Mez kluzu f_y : 235,0 MPaMez pevnosti f_u : 360,0 MPaModul pružnosti E : 210000 MPaModul pružnosti ve smyku G : 81000 MPa

Vnitřní síly v souřadném systému průřezu

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

 $N = -232,074 \text{ kN}$ $V_z = 0,000 \text{ kN}$ $V_y = 90,027 \text{ kN}$ $T_t = 0,000 \text{ kNm}$ $T_{\omega} = 0,000 \text{ kNm}$ $M_y = 0,000 \text{ kNm}$ $M_z = 184,746 \text{ kNm}$ $B = 0,000 \text{ kNm}^2$

Parametry vzpěru

Délka dílce: 20,000 m

Se vzpěrem se nepočítá

Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1

Posudek smyku od posouvající síly V_y : $90,027 \text{ kN} < 1526,370 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = -232,074 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = 184,746 \text{ kNm}$

Posudek nejneprůznivější kombinace prostého tlaku a ohybu:

Únosnosti: $N_R = -4489,910 \text{ kN}$; $M_{z,R} = 356,941 \text{ kNm}$ $|0,052 + 0,000 + 0,518| = |0,569| < 1$ **Vyhovuje**

Stíhlost dílce: 273,4

Průřez vyhovuje

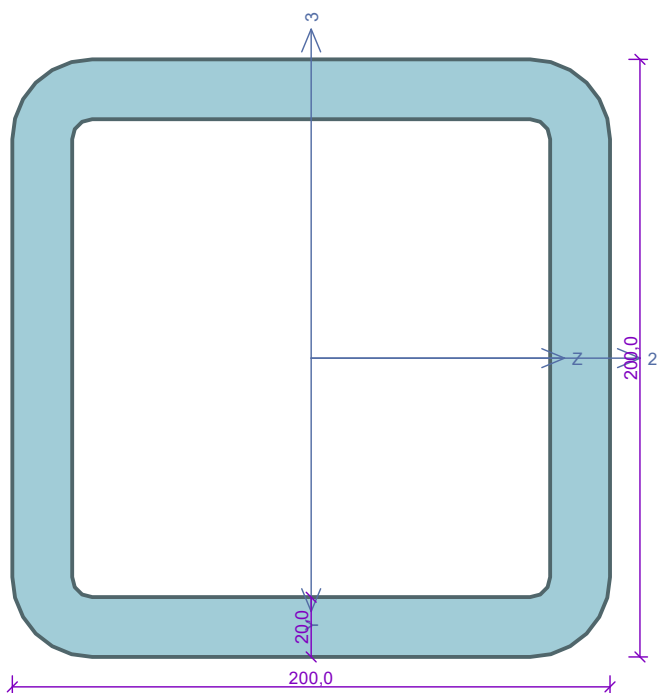
VYHOVUJE



Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "9:DD - 17" - průřez 1



Norma EN 1993-1-1/Česko.

Únosnost průřezu	: $\gamma_{M0} = 1,000$
Únosnost průřezu při posuzování stability	: $\gamma_{M1} = 1,000$
Únosnost oslabeného průřezu	: $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TC 200 x 200 x 20

Průřezová plocha: $A = 1,385E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 100,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 7,329E07 \text{ mm}^4$ $I_z = 7,329E07 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -7,353E05 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,166E08 \text{ mm}^4$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 9,215E05 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 9,215E05 \text{ mm}^3$

Materiál: EN 10025 : Fe 360

Materiálové charakteristiky:

Mez kluzu	f_y :	235,0 MPa
Mez pevnosti	f_u :	360,0 MPa
Modul pružnosti	E :	210000 MPa
Modul pružnosti ve smyku	G :	81000 MPa

Vnitřní síly v souřadném systému průřezu

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

N	=	-287,804 kN	
V_z	=	0,000 kN	$M_y = 0,000 \text{ kNm}$
V_y	=	6,855 kN	$M_z = 29,735 \text{ kNm}$
T_t	=	0,000 kNm	
T_ω	=	0,000 kNm	B = 0,000 kNm ²

Parametry vzpěru

Délka dílce: 5,657 m

Se vzpěrem se nepočítá

Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1

Posudek smyku od posouvající síly V_y :6,855 kN < 976,877 kN **Vyhovuje**Vnitřní síly: N = -287,804 kN; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = 29,735 \text{ kNm}$

Posudek nejneprůzračnější kombinace prostého tlaku a ohybu:

Únosnosti: $N_R = -3255,220 \text{ kN}$; $M_{z,R} = 216,548 \text{ kNm}$ $|0,088 + 0,000 + 0,137| = |0,226| < 1$ **Vyhovuje**

Stíhlost dílce: 77,8

Průřez vyhovuje

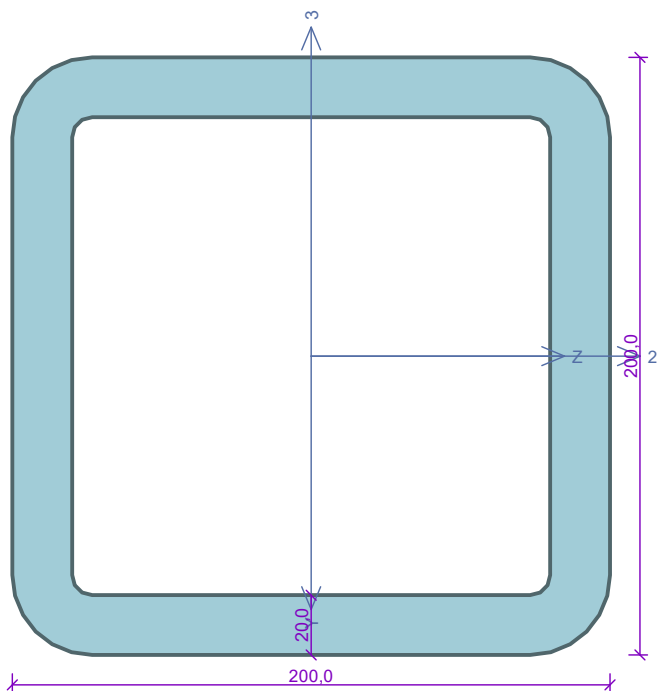
VYHOVUJE



Pouze pro nekomerční využití



Kritický řez dílce "10:DD - 18" - průřez 1



Norma EN 1993-1-1/Česko.

Únosnost průřezu	: $\gamma_{M0} = 1,000$
Únosnost průřezu při posuzování stability	: $\gamma_{M1} = 1,000$
Únosnost oslaběného průřezu	: $\gamma_{M2} = 1,250$

Průřez TC 200 x 200 x 20Průřezová plocha: $A = 1,385E04 \text{ mm}^2$

Poloha těžiště:

 $y_T = 100,0 \text{ mm}$ $z_T = 100,0 \text{ mm}$

Momenty setrvačnosti:

 $I_y = 7,329E07 \text{ mm}^4$ $I_z = 7,329E07 \text{ mm}^4$

Průřezové moduly:

 $W_{y,1} = -7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{z,1} = 7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{y,2} = 7,353E05 \text{ mm}^3$ $W_{z,2} = -7,353E05 \text{ mm}^3$

Moment tuhosti v prostém kroucení:

 $I_k = 1,166E08 \text{ mm}^4$

Plastické průřezové moduly:

 $W_{pl,y} = 9,215E05 \text{ mm}^3$ $W_{pl,z} = 9,215E05 \text{ mm}^3$ **Materiál: EN 10025 : Fe 360****Materiálové charakteristiky:**

Mez kluzu	f_y :	235,0 MPa
Mez pevnosti	f_u :	360,0 MPa
Modul pružnosti	E :	210000 MPa
Modul pružnosti ve smyku	G :	81000 MPa

Vnitřní síly v souřadném systému průřezu

Zatěžovací případ s největším využitím

Kombinace č.1 - G1

$N = -287,804 \text{ kN}$	
$V_z = 0,000 \text{ kN}$	$M_y = 0,000 \text{ kNm}$
$V_y = 6,855 \text{ kN}$	$M_z = 29,735 \text{ kNm}$
$T_t = 0,000 \text{ kNm}$	
$T_\omega = 0,000 \text{ kNm}$	$B = 0,000 \text{ kNm}^2$

Parametry vzpěru

Délka dílce: 5,657 m

Se vzpěrem se nepočítá

Výsledky posouzení - Rozhodující zatěžovací případ: Kombinace č.1 - G1; Třída průřezu: 1**Posudek smyku od posouvající síly V_y :** $6,855 \text{ kN} < 976,877 \text{ kN}$ **Vyhovuje**Vnitřní síly: $N = -287,804 \text{ kN}$; $M_y = 0,000 \text{ kNm}$; $M_z = 29,735 \text{ kNm}$ **Posudek nejnepříznivější kombinace prostého tlaku a ohybu:**Únosnosti: $N_R = -3255,220 \text{ kN}$; $M_{z,R} = 216,548 \text{ kNm}$ $|0,088 + 0,000 + 0,137| = |0,226| < 1$ **Vyhovuje**

Stíhlost dílce: 77,8

Průřez vyhovuje**VYHOVUJE**

Pouze pro nekomerční využití

