

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD

KATEDRA MECHANIKY

OBOR STAVITELSTVÍ



Diplomová práce

Analýza a návrh kompozitní lávky

Akademický rok: 2019/2020

Datum odevzdání: 07.2020

Vypracoval: Bc. Rinchindorzhiiev Erdem

Vedoucí diplomové práce: Kesl Petr, Ing. Ph.D.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Erdem RINCHINDORZHIEV**
Osobní číslo: **A18N0074P**
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Stavitelství**
Téma práce: **Analýza a návrh kompozitní lávky**
Zadávající katedra: **Katedra mechaniky**

Zásady pro vypracování

1. Úvodní část s popisem řešeného tématu práce se základním rozbohem.
2. Výběr a tvarové specifikace kompozitní lávky, konstrukcí s rozbohem zatížení dané konstrukce.
3. Sestavení statických schémat vybraných konstrukcí pro dané porovnávané konstrukce, konstrukční celky.
4. Statická analýza konstrukčních systémů s vyhodnocením a dimenzováním ve 3D programech pro kompozitní konstrukce.

Rozsah diplomové práce: **úvodní část 60 – 75 stran A4**
Rozsah grafických prací: **práce skládající se z výkresů a textových částí**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

1. ČSN EN 1990 – Zásady navrhování stavebních konstrukcí
2. ČSN EN 1991 – Zatížení stavebních konstrukcí
3. ČSN EN 1992, ČSN EN 1993 – Navrhování ocelových konstrukcí
4. Kol. autorů: Konstrukce pozemních staveb. 2015.
5. SBRA-Anthill – Guštar, Marek, komentář k softwaru.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kesl, Ph.D.**
Katedra mechaniky

Datum zadání diplomové práce: **1. července 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. ledna 2020**

Radová

Doc. Dr. Ing. Vlasta Radová
děkanka



Jan Vimmr

Doc. Ing. Jan Vimmr, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Petra Kesla, Ph.D. a v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů pro vypracování závěrečných prací. Dále prohlašuji, že všechny použité informační zdroje a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

V Plzni dne 30.06.2020

.....

Bc. Rinchindorzhiiev Erdem

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Keslovi Ph.D. za odborné vedení, věcné a užitečné rady, podklady a čas, jenž věnoval mé práci.

Dále chci poděkovat mé přátelům, přítelkyni a rodině za psychickou a morální podporu při psaní a tvorbě této práce.

Abstrakt

Tématem této diplomové práce je srovnávací analýza kompozitních a ocelových konstrukcí pomocí příkladu lávky. Tato práce obsahuje informace o typech kompozitů, obecné informace o ocelových konstrukcích. Také výpočet lávky s využitím různých materiálů. Analýza výsledků a identifikace výhod a nevýhod různých konstrukcí.

Klíčová slova

Lávka, kompozit, ocel, uhlík, čedič, cena, analýza.

Abstract

The theme of this dissertation is comparative analysis of composite and steel structures using the example of a footbridge. This work contains information on the types of composite structures, general information on steel structures. Also, the calculation of footbridges using different materials. Analysis of the results and identification of the pros and cons of different designs.

Key Words

Footbridge, composite, steel, carbon, basalt, price, analysis.

Seznam obrázků

Obr. 1- Materiály – typický pracovní diagram	18
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 2- Schématické znázornění kompozitní mezifáze.....	19
[Zdroj: https://cutt.ly/RylsQK3]	
Obr. 3 - Roving vytvořený ze skleněných vláken.....	22
[Zdroj: http://origin-production.wikiwand.com/cs/Textilie]	
Obr. 4 - Řez skleněného vlákna.....	23
[Zdroj: https://cutt.ly/RylsQK3]	
Obr. 5 - Řez aramidového vlákna.....	24
[Zdroj: https://cutt.ly/RylsQK3]	
Obr. 6 - Řez uhlíkovým vláknem.....	25
[Zdroj: https://cutt.ly/RylsQK3]	
Obr. 7 - Řez čedičového vlákna.....	26
[Zdroj: http://www.cstroy.ru/1/buchkin.pdf]	
Obr. 8 - Zatížení od pochozí vrstvy.....	34
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 9 - Užité zatížení.....	35
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 10 – Užité bodově zatížení.....	35
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 11 – Graf pro určení součinitele expozice c_e	36
[Zdroj: ČSN EN 1991-1-4]	
Obr. 12 – Graf pro určení součinitele $c_{f,x}$	37
[Zdroj: ČSN EN 1991-1-4]	
Obr. 13 –Zatížení větrem.....	38
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 14 – Schéma uvažovaného zatížení (dle ČSN 1991 - 2).....	38
[Zdroj: ČSN EN 1991-2]	

Obr. 15 – Model v půdorysu.....	41
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 16 – Model v podélném řezu.....	42
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 17 – Model v příčném řezu.....	42
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 18 – Model v axonometrii.....	42
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 19 – 1. vlastní tvar.....	43
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 20 – 2. vlastní tvar.....	43
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 21 – 3. vlastní tvar.....	44
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 22 – 4. vlastní tvar.....	44
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 23 – Výsledné normálové síly v prutech $N[kN]$	45
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 24 – Výsledné normálové síly v prutech $N[kN]$	46
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 25 – Výsledné posouvající síly v prutech $Vz[kN]$	46
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 26 – Výsledné posouvající síly v prutech $Vz[kN]$	46
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 27 – Výsledné momenty v prutech $My[kNm]$	47
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 28 – Výsledné momenty v prutech $My[kNm]$	47
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 29 – Výsledné momenty v prutech $Mz[kNm]$	47
[Zdroj: autor diplomové práce]	

Obr. 30 – Výsek technického listu výrobce PREFA Kompozity.....	48
[Zdroj: https://www.prefa-kompozity.cz/produkty/zakladni-vyrobky/kompozitni-rosty/]	
Obr. 31 – Průhyb mostu – kombinace MSP1.....	50
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 32– Průhyb mostu – chodci.....	51
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 33 - Vlastnosti průřezu hlavního nosníku.....	52
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 34 – Vlastnosti průřezu příčnicku.....	53
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 35 - Model v půdorysu.....	54
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 36 – Model v podélném řezu.....	54
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 37 – Model v příčném řezu.....	54
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 38 – Model v axonometrii.....	55
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 39 - 1. vlastní tvar.....	55
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 40 – 2. vlastní tvar.....	56
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 41 – 3. vlastní tvar.....	56
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 42 – 4. vlastní tvar.....	57
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 43 – Výsledné normálové síly v prutech N[kN].....	58
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 44 – Výsledné normálové síly v prutech N[kN].....	58
[Zdroj: autor diplomové práce]	

Obr. 45 – Výsledné posouvající síly v prutech V_z [kN].....	59
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 46 – Výsledné posouvající síly v prutech V_z [kN].....	59
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 47 – Výsledné momenty v prutech M_y [kNm].....	59
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 48 – Výsledné momenty v prutech M_y [kNm].....	60
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 49 – Výsledné momenty v prutech M_z [kNm].....	60
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 50 – Průhyb mostu – kombinace MSP1.....	61
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 51 – Průhyb mostu – chodci.....	61
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 52 - Vlastnosti průřezu hlavního nosníku.....	63
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 53 – Vlastnosti průřezu příčnicku.....	64
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 54 - Model v půdorysu.....	65
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 55 – Model v podélném řezu.....	65
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 56 – Model v příčném řezu.....	66
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 57 – Model v axonometrii.....	66
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 58 - 1. vlastní tvar.....	67
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 59 – 2. vlastní tvar.....	67
[Zdroj: autor diplomové práce]	

Obr. 60 – 3. vlastní tvar.....	68
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 61 – 4. vlastní tvar.....	68
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 62 – Výsledné normálové síly v prutech $N[kN]$	70
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 63 – Výsledné normálové síly v prutech $N[kN]$	70
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 64 – Výsledné posouvající síly v prutech $Vz[kN]$	71
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 65 – Výsledné posouvající síly v prutech $Vz[kN]$	71
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 66 – Výsledné momenty v prutech $My[kNm]$	71
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 67 – Výsledné momenty v prutech $My[kNm]$	72
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 68 – Výsledné momenty v prutech $Mz[kNm]$	72
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 69 – Průhyb mostu – kombinace MSP1.....	73
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Obr. 70 – Průhyb mostu – chodci.....	73
[Zdroj: autor diplomové práce]	

Seznam tabulek

Tab. č. 1 Srovnání vlastností kompozitů v závislosti na volbě typu vyztužujícího vlákna.....	27
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Tab. č.2 Srovnání cen vyztužujících vláken podle suroviny.....	27
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Tab. č. 3 – Vlastní frekvence pro dominantní vlastní tvary.....	45
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Tab. č. 4 – Průřezové charakteristiky HE M 700.....	48
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Tab. č. 5 – Průřezové charakteristiky TO 700/300/20.....	49
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Tab. č. 6 – Využití materiálů při maximálním zatížení.....	51
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Tab. č. 7 – Vlastní frekvence pro dominantní vlastní tvary.....	57
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Tab. č. 8 – Využití materiálů při maximálním zatížení	62
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Tab. č. 9 – Vlastní frekvence pro dominantní vlastní tvary.....	69
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Tab. č. 10 – Využití materiálů při maximálním zatížení.....	74
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Tab. č. 11 – Základní parametry uhlíkových vláken a oceli.....	75
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Tab. č. 12 – Přibližné náklady na návrh a montáž lávky.....	76
[Zdroj: autor diplomové práce]	
Tab. č. 13 – Porovnání nákladů na materiály.....	77
[Zdroj: autor diplomové práce]	

Seznam použitých zkratek a pojmů

atd.	a tak dále
č.	číslo
ČSN	Česká technická norma
Hz	hertz
kg	kilogramy
kg/m ²	kilogramy na metr čtvereční
kN	kilonewton na metr
kN/m ²	kilonewton na metr na metr čtvereční
m	metry
mm	milimetry
Mpa	megapaskal
MSÚ	mezní stav únosnosti
MSP	mezní stav použitelnosti
Napr.	například
Obr.	obrázek
Resp.	respektive
Rozm.	rozměr
t.	tuna
Tab.	tabulka
EN	Evropské normy

Obsah

Úvod.....	17
1. Přehled kompozitních materiálů.....	18
1.1 Úloha matrice a její druhy.....	20
1.1.1 Reaktoplasty.....	20
1.1.2 Termoplasty.....	21
1.2 Vyztužující vlákna.....	21
1.2.1 Skleněná vlákna.....	22
1.2.2 Aramidová vlákna.....	23
1.2.3 Uhlíková vlákna.....	24
1.2.4 Čedičová vlákna.....	25
1.3 Srovnání.....	26
2. Ocel ve stebnictví.....	28
2.1 Typické vlastnosti oceli.....	28
2.2 Ocel z pohledu ekologie.....	30
2.3 Technické vlastnosti.....	30
2.3.1 Požární odolnost.....	31
2.3.2 Povrchová ochrana.....	32
3. Statický výpočet.....	33
3.1 Popis konstrukce.....	33
3.2 Uvažovaná zatížení.....	33
3.2.1 Vlastní tíha.....	33
3.2.2 Ostatní stálé.....	33
3.2.3 Proměnné zatížení.....	34
3.2.4 Užité bodové zatížení.....	35
3.2.5 Klimatické zatížení.....	36
3.2.6 Mimořádní zatížení - sanitní vuz.....	38
3.3 Kombinace zatížení.....	39
3.3.1 Mezní stavy únosností.....	39
3.3.2 Mezní stavy použitelnosti.....	40

4. Varianta 1 – Ocelová lávka.....	41
4.1 Materiálové charakteristiky.....	41
4.2 Výpočtový model.....	41
4.3 Vlastní frekvence a tvary kmitání.....	43
4.4 Vnitřní síly.....	45
4.5 Návrh pochozích roštů.....	48
4.6 Posouzení příčnicku.....	48
4.7 Posouzení hlavního nosníhu.....	49
4.8 Posouzení MSP. Průhyb mostu.....	50
4.9 Maximalní využití materiálů.....	51
5. Varianta 2 – Kompozitní lávka, výška profilu 700 mm.....	52
5.1 Materiálové charakteristiky.....	52
5.2 Použité profily.....	52
5.3 Výpočtový model.....	54
5.4 Vlastní frekvence a tvary kmitání.....	55
5.5 Vnitřní síly.....	58
5.6 Posouzení MSP. Průhyb mostu.....	61
5.7 Maximalní využití materiálů.....	62
6. Varianta 3 – Kompozitní lávka, výška profilu 400 mm.....	62
6.1 Materiálové charakteristiky.....	62
6.2 Použité profily.....	63
6.3 Výpočtový model.....	65
6.4 Vlastní frekvence a tvary kmitání.....	67
6.5 Vnitřní síly.....	70
6.6 Posouzení MSP. Průhyb mostu.....	73
6.7 Maximalní využití materiálů.....	74
7. Analýza a porovnání kompozitních a ocelových konstrukcí	74
7.1 Mechanické a fyzikální srovnání.....	74
7.2 Ekonomické srovnání.....	76
Zavěr.....	78

Uvod

V této práci budou kompozity vyztužujících chemických vláken považovány za alternativu klasických konstrukčních materiálů.

S objemem tradičních stavebních materiálů nelze brzy srovnávat žádný kompozit. Ale v mnoha situacích by bylo výhodnější a moudřejší používat neobvyklé řešení pro většinu lidí.

Kompozity ve výrobním procesu různých zboží a služeb se zlepšením technologického procesu jsou stále populárnější. Je také třeba pamatovat na chemické vlastnosti kompozitů. Jednou z výhod těchto materiálů je jejich odolnost vůči agresivnímu prostředí. Koroze ocelových konstrukcí a výztužné oceli je nejdůležitější příčinou poškození betonových a ocelových konstrukcí. Protože většina kompozitních materiálů má zvýšenou odolnost vůči mnoha agresivním látkám, jsou tyto materiály nejlepší alternativou pro stavby s životností více než 50 let.

Stojí za zmínku, že díky široké studii uhlíkových vláken, jakož i celkové struktury a vlastnostem kompozitních materiálů, to vytváří podmínky pro zdokonalení technologie pro výrobu uhlíkových vláken, jakož i pro zlepšení jejich vlastností, což obecně má pozitivní dopad nejen na zlepšení kvality, ale také na snížení náklady na výrobu uhlíkových vláken a dalších kompozitních materiálů. Pozitivně ovlivňuje také zavádění takových materiálů do jiných oblastí použití, rozšiřuje oblasti poptávky po těchto materiálech společností a průmyslem.

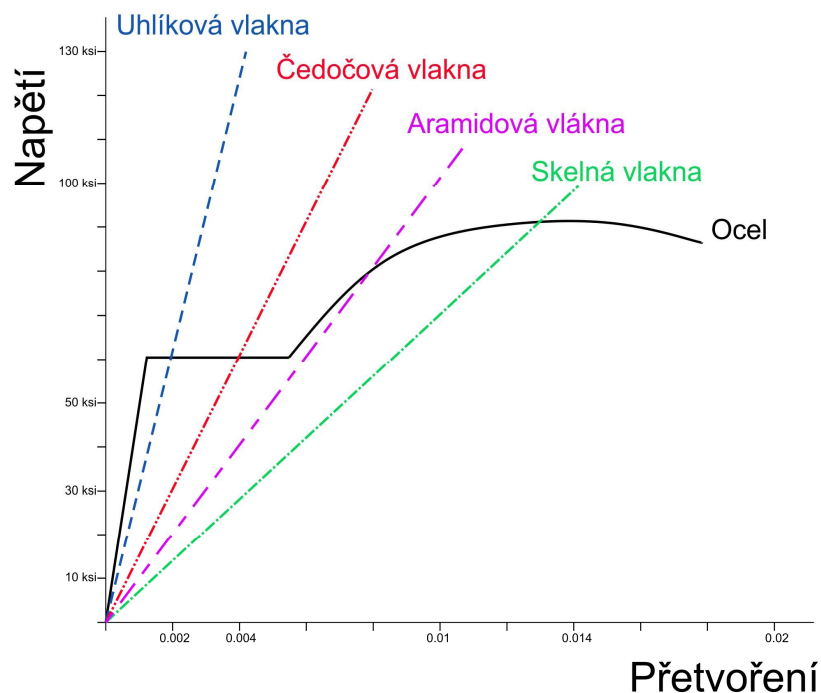
Ocelové, betonové a dřevěné konstrukce jsou již klasikou. Jsou testovány podle času a zkušeností a každý rok výzkum pomáhá tyto materiály vylepšovat. Mají však své nevýhody a během této studie se bude zkoumat, zda existuje prostor pro alternativy v hromadné výstavbě.

V této práci budou zkoumány kompozity založené na chemických vláknech a jejich vlastnosti. Podrobnější studium uhlíkových vláken a jejich srovnání s ocelí.

1. Přehled kompozitních materiálů

Kompozitem je materiál, ve kterém jsou specifickým způsobem spojovány dvě nebo více komponent, z nich každá se vyznačuje zřetelně odlišnými chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Části kompozitů se rozdělují do dvou skupin: matrice (spojitá fáze) a výtuz (nespojité fáze). [1]

Kompozity mají ve srovnání s oddělenými komponenty podstatně jiné unikátní vlastnosti. Vlastnosti matrice osamělé (tuhost, pevnost, atd.) často nejsou dostačující pro určené konstrukční použití. Vlákna mají sice požadovanou tuhost a pevnost, jsou přesto velmi křehká a náchylná k poškození v některých agresivních prostředích. Je k tomu velmi obtížné zachovat je v požadovaném prostorovém uspořádání. Pokud však prostorově správně umístíme vyztužující vlákna do matrice, získáme nový objekt s vlastnostmi, které nejsou pro jednotlivé komponenty k dispozici samostatně. Výsledné polymerní kompozity jsou lehké, pevné, tuhé, houževnaté, vysoce odolné proti creepu a umožňují výrobu velmi komplikovaných tvarů. [1], [2]



Obr. 1 - Materiály – typický pracovní diagram
[Zdroj: autor diplomové práce]

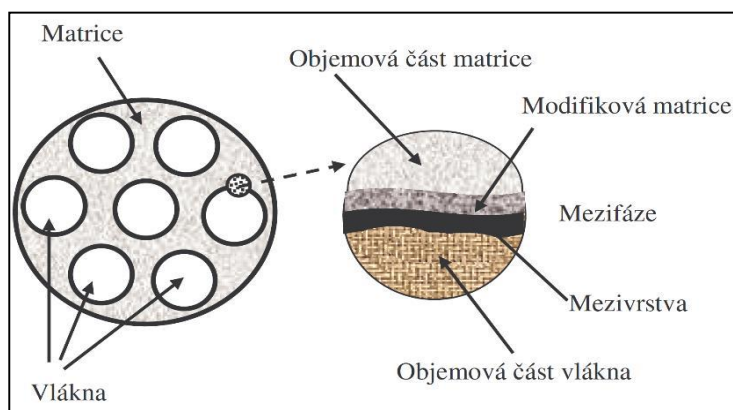
Nejvýznamnější výhodou kompozitů s organickými matricemi je synergická kombinace lehkého formování netvrdé matrice s pevností a tuhostí výztužných vláken. Polymerní kompozity se vyznačují nízkou měrnou hmotností, vysokou pevností při statickém a dynamickém zatížení a vynikající odolností vůči agresivním prostředím. [2]

Výhody kompozitních materiálů:

- vysoká pevnost a tuhost
- nízká hmotnost
- odolnost proti korozi
- dobré vlastnosti při statickém a dynamickém zatížení
- dobré tlumicí vlastnosti
- možnost výroby složitých konstrukčních detailů

Nevýhody kompozitních materiálů:

- specifické, často složité metody výroby a zpracování
- mechanické vlastnosti se zhoršují ve směru kolmém na orientaci umístění vlákna
- vysoké náklady při dimenzování složitých struktur
- lokální poškození, např. po nárazu, je obtížné identifikovat a opravit ve srovnání s běžnými materiály



Obr. 2 - Schématické znázornění kompozitní mezifáze
[Zdroj: <https://cutt.ly/RylsQK3>]

1.1 Úloha matrice a její druhy

Matrice z kompozitního materiálu by měla poskytovat následující funkce:

- přenos vnějšího namáhání na výztuž
- převedení namáhání mezi jednotlivými komponenty výztuže
- zajištění geometrické polohy výztužné fáze a rozměrové stability výrobku
- ochrana výztuže před vlivy prostředí

Důležitým aspektem kvality kompozitního materiálu je zajištění dostatečné adheze na fázovém rozhraní matrice – vlákno. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí k úplnému navlhčení vlákna bez vytváření vzduchových bublin.

Polymerní materiály pro výrobu matrice kompozitu se dělí do dvou hlavních skupin: termoplasty a reaktoplasty. [2]

1.1.1 Reaktoplasty

Jsou to např. epoxidy, nenasycené polyestery, melaminy nebo fenol-formaldehydové pryskyřice. Obvykle jsou dodávány ve formě viskózních kapalin s konzistencí řídkého medu tvořené poměrně malými molekulami, které po dodání katalyzátoru a iniciátoru vytvrzují chemickou reakcí. Vytvrzování probíhá buď při pokojové teplotě nebo při zvýšené teplotě. Jelikož během vytvrzování dochází ke vzniku chemických vazeb mezi jednotlivými malými molekulami, vzniká místo dlouhých lineárních molekul, které jsou charakteristické pro termoplasty, třídimenzionální polymerní síť s různými hustotami. V ideálním případě se celý konečný produkt skládá z jedné makromolekuly. Tato skutečnost způsobuje, že vytvrzený reaktoplast zůstává v pevné fázi i po zahřátí, což zvyšuje jeho creepovou odolnost a odolnost vůči vysokým teplotám. Ale nevýhodou je vysoká křehkost a ohraničené možnosti recyklace. [1], [2]

1.1.2 Termoplasty

Termoplastické polymery během zpracování neprocházejí žádnou chemickou transformací. Termoplast se přeměňuje pouze z pevného stavu do kapalného stavu a poté znovu ztuhne, transformace do kapalného stavu se libovolně opakuje a materiál si stále zachovává své původní vlastnosti. Tato skutečnost umožňuje například snadnou opravu produktů, recyklaci atd. [4]

Charakteristickým strukturním rysem termoplastů jsou velmi dlouhé molekuly (makromolekuly) vytvořené opakováním identických strukturních jednotek (od několika tisíc do několika milionů). Jednotlivé makromolekuly nejsou navzájem propojeny chemickými vazbami. Jejich vzájemné interakce, které zaručují kohezní pevnost polymerního tělesa, jsou hlavně slabé van der Waalsovské interakce, vodíkové můstky atd. [1]

Vzhledem k vysoké viskozitě těchto materiálů v kapalném stavu je proces zpracování obtížné. K impregnaci výztužných vláken termoplastem je nutný vysoký tlak, ale to může vést k poškození. Z tohoto důvodu je jedním z cílů výroby nových termoplastických materiálů snížení viskozity kapalné fáze použitých polymerů. [4]

1.2 Vyztužující vlákna

Funkce výztužných vláken v kompozitu je primárně zajistit mechanické vlastnosti materiálu, jako je pevnost a tuhost. Na základě těchto dvou vlastností se stanoví podmínky vyztužujícího účinku, které musí být splněny: [2]

- vyztužujícím vláknům je nutno být pevnější než matrice
- vyztužujícím materiálům je nutno mít vyšší tuhost než matrice
- matrice by se neměla zlomit před vlákny

Neméně důležitý je problém elektrických vlastností, která může v případě uhlíkových vláken hrát důležitou roli v omezení při jejich využití. Běžně užívaným typem výztuže je skleněné, uhlíkové, čedičové a aramidové vlákno. Jednotlivá vlákna jsou však z hlediska parametrů nevýznamná a používají se pouze ve výjimečných případech, proto je nutné vytvořit svazek vláken

bez kroucení (nebo s minimálním kroucením), tzv. roving (obr. 3). Roving může být orientován jednosměrně nebo příčně. Jeho hlavní použití je v jednodušších konstrukcích, které jsou namáhány ve směru vláken.

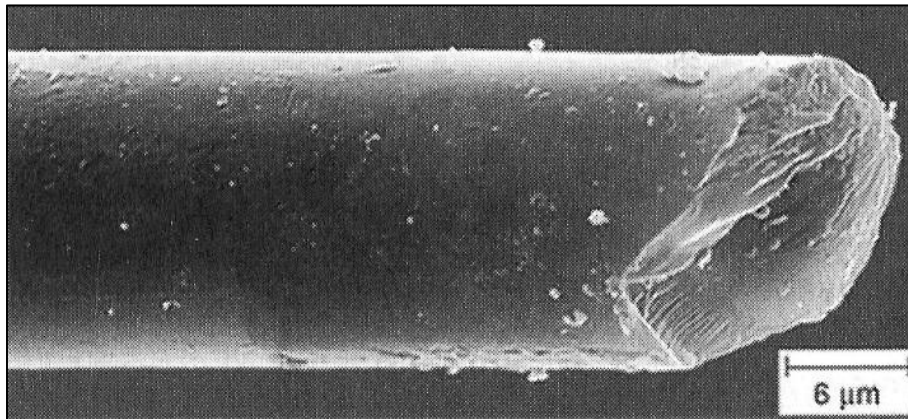


Obr. 3 - Roving vytvořený ze skleněných vláken [5]
[Zdroj: <http://origin-production.wikiwand.com/cs/Textilie>]

1.2.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna (obr. 4) je sloučenina, která vytváří směs oxidu siřičitého (SiO_2) a příměsí jiných oxidů (Fe, Al, B, Ca, Na). Vyrábí se roztaveným sklem, zejména E-skla (borosilikátového). Jednotlivá vlákna mají přibližně průměr $15 \mu\text{m}$. Mezi jejich hlavní vlastnosti patří odolnost proti ohni (odolává teplotám až 450°C po dlouhou dobu) a mnoho chemikálií. Mají relativně vysokou pevnost v tahu a nízký modul pružnosti, naopak jejich pevnost snižuje vlhkost a odolnost proti otěru je také nízká. [2]

Pevnost v tahu skleněných vláken klesá při vysokých teplotách, ale pro teplotní rozsah, kterému může být polymerní matrice vystavena, lze pevnost vlákna považovat za konstantní. Pevnost v tahu je dále snížena v důsledku chemické koroze a v průběhu času při trvalém zatížení.

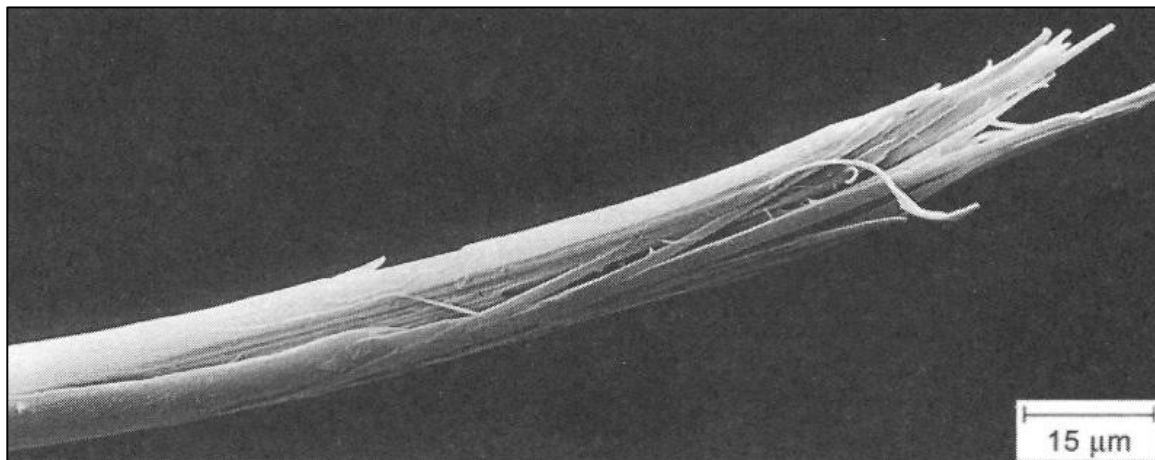


Obr. 4 - Řez skleněného vlákna [2]
[Zdroj: <https://cutt.ly/RylsQK3>]

1.2.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (obr. 5) jsou vytvořena na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podél osy vlákna. Výroba se provádí zvláknováním z vysoce viskózního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové. Jednotlivá elementární vlákna jsou svázaná a pro zlepšení zpracovatelnosti se mnohokrát propírají, neutralizují a opatřují aviváží. Aramidová vlákna mohou být zpracována se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. V hotovém laminátu lze použít až 70% jejich skutečné pevnosti. Mezi hlavní výhody patří vysoká pevnost v tahu s nízkou měrnou hmotností. Aramidová, resp. para-aramidová vlákna (vyšší pevnost v tahu a vyšší modul pružnosti) jsou známá pod obchodním názvem kevlar. [2]

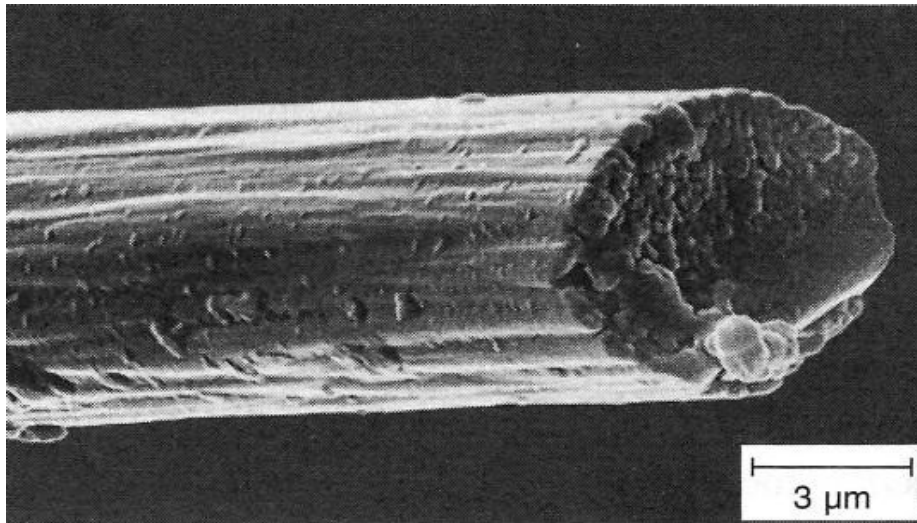
Polymerní vlákna nejsou křehká, plastická deformační síla nastává, když je tlaková síla kolmá na vlákno. Ve srovnání se skleněnými vlákny jsou aramidy výrazně lehčí. Mají také dvojnásobně větší modul a vynikající schopnost absorbovat energii. Kevlar je nehořlavý, samozhášivý a netaví se. Velmi dobře tlumí vibrace a má dobrou rázovou houževnatost.



Obr. 5 - Řez aramidového vlákna [2]
[Zdroj: <https://cutt.ly/RylsQK3>]

1.2.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (obr. 6) jsou technická vlákna o průměru 5 až 10 μm , skládající se převážně z atomů uhlíku (přibližně 90%, zbytek jsou dusík, kyslík a vodík), které jsou sloučeny do mikroskopických krystalů, které tvoří samotné vlákno. K výrobě uhlíkových vláken se používají dva výrobní procesy, z nichž jeden používá polyakrylonitrilová vlákna (PAN) a druhý je založen přímo na surovinách bohatých na uhlík. Díky výrobě lze získat širokou škálu vláken od vysoké pevnosti s průměrným modulem pružnosti, s vysokým modulem pružnosti až po extrémně vysoký modul pružnosti. Uhlíková vlákna jsou považována za nejlepší výztužný materiál pro kompozity, zejména pro materiál nazývaný uhlíkový laminát, který vyžaduje nízkou hmotnost, ale vysokou odolnost proti dynamickému zatížení. Mezi jejich další vlastnosti patří také vysoká odolnost proti korozi, dobrá elektrická a tepelná vodivost, naopak, při delším skladování je jejich flexibilita ztracena a při destrukci vykazují tříštivost. [2]



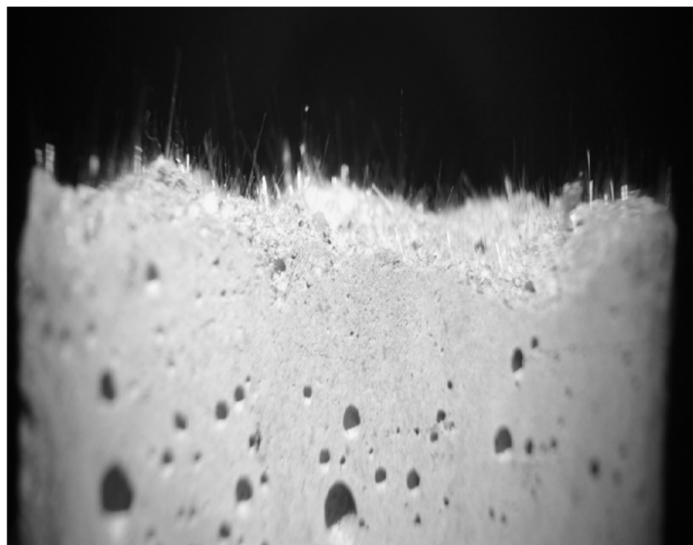
Obr. 6 - Řez uhlíkovým vláknem [2]
[Zdroj: <https://cutt.ly/RylsQK3>]

1.2.4 Čedičová vlákna

Čediče, též bazalty, jsou tmavé, intruzivní, výlevné vyvřelé horniny, porfyrické nebo sklovité struktury. Čedičová separace je obvykle sloupcová. Čedičová vlákna sestávají ze svazku nekonečně dlouhých fibril vytvářených tavením anorganického čedičového minerálu vhodné kompozice. Jsou velmi odolné, flexibilní a vhodné pro výrobu technických produktů ve všech průmyslových odvětvích. [10]

Technologie výroby čedičových vláken je podobná výrobě skleněných vláken. Čedič se zvlákňuje ve zvlákňovací peci při teplotách asi 1300°C. Pro výrobu kontinuálních vláken by teplota tavení neměla překročit 1250°C. [10]

V řadě vlastností, jako je pevnost, modul pružnosti, chemická a teplotní odolnost, jsou čedičová vlákna výrazně lepší než vlákna skleněná. Vyšší koeficient tepelné roztažnosti umožňuje výrobu konstrukčních prvků, které lépe odolávají intenzivním a náhlým změnám teploty než v případě skleněných vláken. [11]



Obr. 7 - Řez čedičového vlákna [10]
[Zdroj: <http://www.cstroy.ru/1/buchkin.pdf>]

1.3 Srovnání

V tab. 1.3 je uvedeno porovnání typických vlastností tří druhů vyztužených kompozitů z hlediska potřeb technické praxe. Je potřeba zmínit, že vlastnosti těchto nejdůležitějších vyztužujících vláken se liší nejen navzájem, ale také značně závisí na vlastnostech použité matrice, ve které jsou vlákna zahrnuta.

Vlastnosti	Kompozity			
	skleněná	aramidová	uhlíková	čedičová
Hustota	+	++	+	+
Mez pevnosti v tahu	+	+	+	+
Modul pružnosti	-	+	++	-
Mez pevnosti v tlaku	+	-	+	+
Rázová houževnatost	+	+	-	-

Tlumení	-	+	-	+
Chování při statickém a dynamickém namáhání	+	+	++	+
Dielektrické vlastnosti	++	++	-	+
Adheze, přilnavost	++	-	+	+
Nasákavost	+	-	+	-
Cena	++	+	-	++

Tab. 1 – Srovnání vlastností kompozitů v závislosti na volbě typu vyztužujícího vlákna (+ příznivé, ++ velmi příznivé, - nepříznivé) [2]
[Zdroj: autor diplomové práce]

Materiál vlákna	Cena (€/1 kg)
Sklo	1.5 – 2.5
Aramid	10 – 35
Uhlík	10 – 50
Čedič	2.5 – 3.5

Tab. 2 – Srovnání cen vyztužujících vláken podle suroviny [2]
[Zdroj: autor diplomové práce]

2. Ocel ve stavebnictví

V současné době by ocel jako stavební materiál měla, zejména na evropském trhu, odolat konkurenci a významné popularitě železobetonu, a proto je vhodné uvést výhody použití ocelových konstrukcí ve stavebnictví. Český stavební průmysl se vyznačuje tím, že jasně upřednostňuje betonové a železobetonové konstrukce před ocelovými konstrukcemi z oceli. A to i přes jejich zjevné technické, ekonomické, estetické a také ekologické přednosti.

2.1 Typické vlastnosti oceli

Jednou z dobrých vlastností, které ocelová konstrukce poskytuje projektantovi, dodavateli a neméně důležitému architektovi nebo investorovi, ve srovnání s jinými materiály, je rychlost výstavby. To spolu s náklady na dopravu a montáží může výrazně přispět nejen ke zkrácení doby mezi zahájením výstavby a uvedení do provozu, ale také k úspoře celé stavby. Pro ocel je také typické spojení ekonomiky s ekologií, tedy možnosti rekonstrukce, zesilování, snadné demontáže možnosti recyklace kovového materiálu. [6]

Vzhledem k nízké hmotnosti tohoto materiálu, který příznivě ovlivňuje velikost stálého zatížení základu a půdy, může ocel také snížit nároky na zakládání. Pro architekty a související profese je jistě důležitá schopnost ocelové konstrukce překonat značné rozpětí stropů a střech s relativně malými rozměry nosníků. K tomuto efektu také přispívá vhodný tvar příhradové konstrukce nebo možnost realizovat prostupy plnostěnnou konstrukcí prakticky téměř kdekoli.

Na základě statických a pevnostních vlastností je odůvodněné uvést schopnost správně navržené ocelové konstrukce absorbovat vlivy nerovnoměrného sedání, poddolování nebo otřesů.

Zvláštní kapitolou při navrhování ocelových konstrukcí jsou stále odolnější spráženě ocelobetonové konstrukce. Spojením obou materiálů může vhodný návrh nejen optimalizovat hmotnost použité oceli, ale také minimalizovat potřebu protikorozi a protipožární povrchové ochrany, což snižuje náklady pro investora.

Kromě toho betonování nebo betonování ocelového profilu rozšiřuje statikovi možnost využít pro výpočet plasticity, a tak navrhnout konstrukce, která je ekonomicky zajímavá a uspokojivá z architektonického hlediska. Bohužel časté obavy investorů nebo projektantů ohledně složitosti a ekonomické složitosti omezují větší rozšíření tohoto typu konstrukcí. Pouze včasné

jednání investora - dodavatele - projektanta na začátku zpracování dokumentace stavby, podložené ekonomickou rozvahou, pak může účinně vést k návrhu moderní kompozitní konstrukce. V tomto případě primární odpovědnost za rozebrání stereotypů nese především projektant.

Nosné konstrukce se během stavby velmi často mění na základě změněných nebo zvýšených požadavků stavební profese nebo klienta. Vzhledem k extrémně krátké době zpracování projektové dokumentace pro celou výstavbu, potřebě snížit náklady na projekt a dodávku, jakož i kvůli nekonečným změnám v technologii a dalším požadavkům stavebních profesí je tento jev dlouhodobý. Ocelová konstrukce je však pro splnění těchto požadavků lépe připravena než jiné materiály.

Z vizuálního hlediska bychom neměli opomenout příznivý vzhled ocelové konstrukce v kombinaci s jinými oblíbenými a moderními stavebními materiály, jako je sklo, hliník a dřevo. Kombinace zmíněných výhod spolu s příklady již úspěšně realizovaných konstrukcí s významnou částí ocelové konstrukce může pomoci projektantovi či architektovi propagovat ocel pro jiné projekty.

Výhody ocelových konstrukcí:

- Vysoká pevnost vzhledem k hmotnosti
- Průmyslová výroba
- Rychlá montáž (montáž dílů, montáž bloků)
- Přizpůsobivost, rekonstrukce
- Možnost recyklace až 90%.

Nevýhody kompozitních materiálů:

- Náročnější údržba (koroze)
- Nižší požární odolnost (relativně rychlé snížení meze kluzu)
- Nižší fyzický život.

2.2 Ocel z pohledu ekologie

Ocel je přírodní materiál (železná ruda je zdrojem surovin). Železo, chemický základ oceli, je čtvrtým nejběžnějším prvkem zemské kůry a bez ohledu na konečný produkt nepoškozuje životní prostředí. Ve srovnání s jinými stavebními materiály je energetická náročnost relativně nízká. Například pro hliník je to 160 kJ/kg, pro ocel je 20 kJ/kg, tedy osmkrát méně. Neobvykle silnou zbraní z oceli ve světě moderních, stále přísnějších požadavků na životní prostředí je nepřekonatelná likvidace, která probíhá v nekonečném cyklu. Významná část zbytečných, vyřazených nebo zastaralých výrobků z oceli se vrací do oceláren ve formě hodnotných druhotných surovin, které USA velmi pečlivě odstranily ze seznamu pevného odpadu v roce 1997. V roce 1999 bylo použito 336 megatonů šrotu (ze 788 megatonů roztavené oceli), což je 42,6 % a významné úspory v přírodních zdrojích. [7]

2.3 Technické vlastnosti

Technické výhody oceli, které umožňují výrobcům přejít z tradičních dodávek individuálního zboží (válcované profily, pásy, trubky) na dodávky integrovaných konstrukčních prvků nebo systémů s vyšší přidanou hodnotou (například stropní desky, rámy stěn, robustní pouzdro), by se dalo psát velmi obsírně.

Technické vlastnosti oceli ve výstavbě lze shrnout takto:

- tvarová kontrola jakosti ocelových polotovarů
- schopnost spojování s jinými materiály
- nízká hmotnost celé stavby
- krátká doba výstavby bez ohledu na změny počasí
- odolnost vůči přírodním živlům a zemětřesení
- dlouhá životnost ocelové konstrukce.

2.3.1 Požární odolnost

Ocel je v podstatě nehořlavý materiál, ale příznačnou vlastností ocelových konstrukcí je jejich nízká požární odolnost. Při působení vysokých teplot, které vznikají při požáru dochází k deformacím v oceli, které přispívají ke ztrátě pevnosti a stability. Taková rozsáhlá deformace může také vést ke zhroucení celé budovy. Z známých příkladů je vidět, požárem deformovaná ocelová konstrukce může selhat během 15 minut. Existuje mnoho způsobů, jak chránit ocelové konstrukce, například natíráním, stříkáním nebo deskovým obkladem. [8]

- Při teplotách do 350 ° C dochází k rekrytalizaci mikrostruktury, ale mechanické vlastnosti konstrukční oceli se nemění, což ohrožuje bezpečnost budovy.
- Za kritickou teplotu oceli se považuje teplota asi. Po překročení této kritické meze se může ocelová konstrukce deformovat a následně se z důvodu ztráty únosnosti zřítit.
- Při teplotách od 700 do 800 ° C se ocelová konstrukce smršťuje v důsledku změn její mikrostruktury. S rostoucí teplotou se pevnost a tažnost oceli zpravidla snižují, ale plastické vlastnosti se zvyšují.

Vhodné požárně ochranné materiály, které chrání ocelovou konstrukci před účinky vysokých teplot, slouží nejen ke zvýšení požární odolnosti, ale také pro vnější ochranu povrchu konstrukce.

Možné způsoby zvýšení požární odolnosti ocelových konstrukcí:

- betonování, zdivo je tradiční způsob ochrany, dnes se tak často nepoužívá, je to velmi masivní a zdoluhavý proces
- omítka - vhodný izolační materiál pro mírné zvýšení požární odolnosti
- nástřiky - mají relativně nízkou hmotnost ve srovnání s obložením. Při správném použití se požární odolnost pohybuje v rozmezí 15 až 180 minut.
- intumescentní nátěry - patří k nejpoužívanějším. Při teplotě asi 150 až 200 ° C vstupují do chemické reakce a v důsledku přítomnosti nadouvaděl vytvářejí v povlaku tepelně izolační vrstvu. Tento protipožární povlak se nanáší ve třech vrstvách.

- opláštění z deskových materiálů, podhledy - široký výběr materiálů z desek je vhodný pro opláštění ocelových konstrukcí (např. sádrokarton, třískocementy, vermikulit, vápenný silikát). Osvědčená požární odolnost desek je až 180 minut, ale vždy záleží na typu a počtu instalovaných desek.
- dalšími technologiemi jsou například vyplňování ocelových dutých profilů betonem, chlazení ocelových dutých profilů, stínění vnější ocelové konstrukce pomocí stínících příček.

2.3.2 Povrchová ochrana

Jednou z nevýhod konstrukčních ocelí běžných jakostí je nižší odolnost vůči všem typům koroze. I to však lze úspěšně vyřešit v pokročilém ocelářském průmyslu, a to povrchovým zušlechťením na spojitých linkách, které navazují na válcovací tratě. Tyto postupy, kontrolované na posledních řádcích pomocí počítačů, monitorují nejen dosažení požadované odolnosti proti korozi, ale také estetický efekt (výběrem optimální barvy nebo struktury povrchu). Dnes odolnost profilů proti korozi dosáhla takové úrovně, která přesahuje období 100 let, to znamená často životnost samotné budovy.

Kombinace zmíněných výhod spolu s příklady již úspěšně realizovaných konstrukcí s významnou částí ocelové konstrukce může pomoci projektantovi nebo architektuře propagovat ocel pro jiné projekty. [9]

Předmětem práce je řešení návrhu lávky přes řeku Mži v Plzni. Jedná o alternativní návrh stávající lávky.

3 Statický výpočet

3.1 Popis konstrukce

Předmětem práce je řešení návrhu lávky přes řeku Mži v Plzni. Jedná o alternativní návrh stávající lávky ve dvou variantech a další analýza výsledků. Všechna data v obou případech zůstávají stejná, kromě materiálů a velikostech profilů.

Základní rozměry a tvar mostu jsou patrné z příložených schémat. Vstupní údaje a údaje o modelu jsou s ohledem na množství údajů uvedeny pouze základní, kompletní vstupy jsou dohledatelné ve výpočetním programu.

Jako model nosné konstrukce je zvolen uzavřený profil uložený na opěrách. Rozpětí hlavních nosníků je 37.5 m. Mostovka je z kompozitních roštů PREFAPOR 50 x 20 / 35.

Uložení hlavních nosníků na opěry je řešeno pomocí ocelových ložisek s čepy.

Založení lávky je řešeno pomocí třech mostních opěr. Dvě podpory na koncích rozvětvené šikmé části lávky a třetí podpora na konci vodorovného nosníku. Ty jsou uloženy na železobetonových vrtaných pilotách vetknutých do základů. Pro předběžný návrh volím průměr pilot 300 mm. Rozměry pilot by se měli navrhnout a posoudit v podrobném výpočtu základových konstrukcí, to není předmětem této práce.

3.2 Uvažovaná zatížení

3.2.1 Vlastní tíha

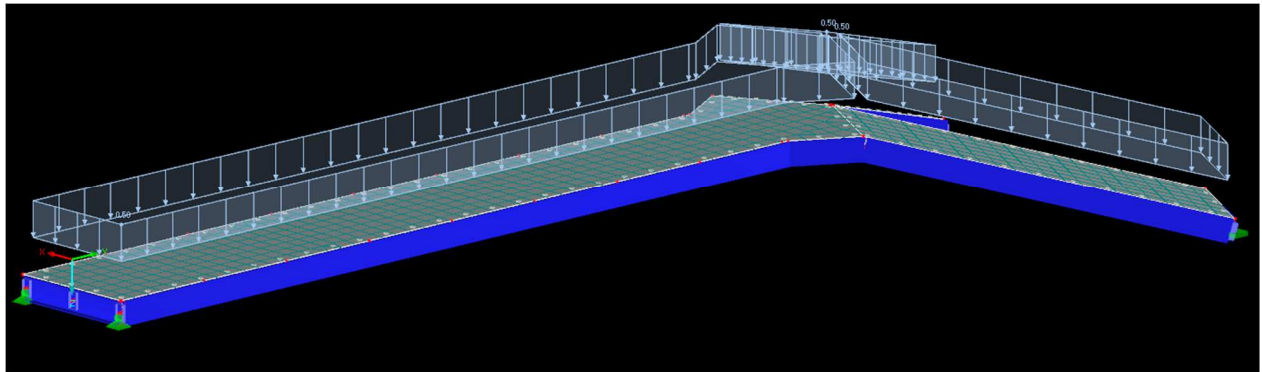
Jde o tíhu konstrukce uvažované ve výpočetním modelu

3.2.2 Ostatní stálé

Pochozí vrstva – kompozitní rošty PREFAPOR 3 , rozm. 50 x 20 / 35 mm.

Hmotnost roštů je 13.5 kg/m²

Uvažované zatížení je s rezervou 0.5 kN/m²



Obr. 8 - Zatížení od pochozí vrstvy
[Zdroj: autor diplomové práce]

3.2.3 Proměnné zatížení

Užitné rovnoměrné

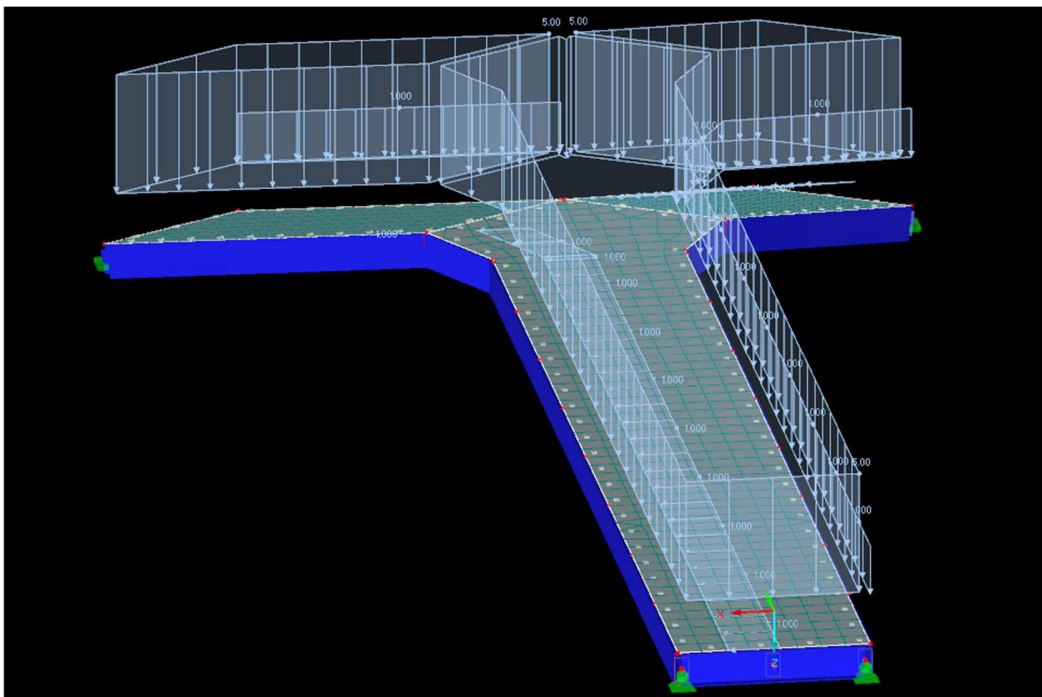
Uvažujeme rovnoměrné zatížení chodci o hodnotě

$$q_{fk} = 5,0 \text{ kN/m}^2.$$

(dle ČSN 1991 - 2.)

Zábradlí je zatíženo vodorovným nebo svislým liniovým zatížením v horní hraně zábradlí. Jeho hodnota je

$$q_{za} = 1,0 \text{ kN/m}$$



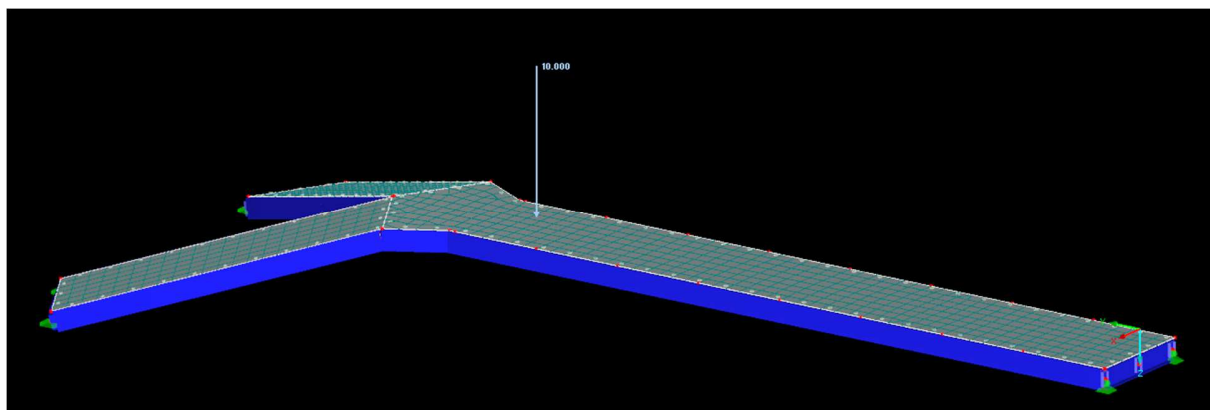
Obr. 9 - Užité zatížení
[Zdroj: autor diplomové práce]

3.2.4 Užité bodové zatížení

Hodnota bodového zatížení

$$Q_{wk} = 10,0 \text{ kN}$$

(dle ČSN 1991 - 2.)



Obr. 10 - Užité bodové zatížení
[Zdroj: autor diplomové práce]

3.2.5 Klimatická zatížení

Vítr – Příčný

Zatížení větrem je uvažováno pouze od větru působícího rovnoběžně se šířkou mostu, resp. kolmo na rozpětí mostu.

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x} \text{ [kN]}$$

Abychom lépe vystihli zatížení větrem na lávku, nahradíme sílu liniovým zatížením.

$$f_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot h_{ref} \text{ [kN]}$$

ρ - měrná hmotnost vzduchu = 1,25 kg/m³

v_b - základní rychlost větru

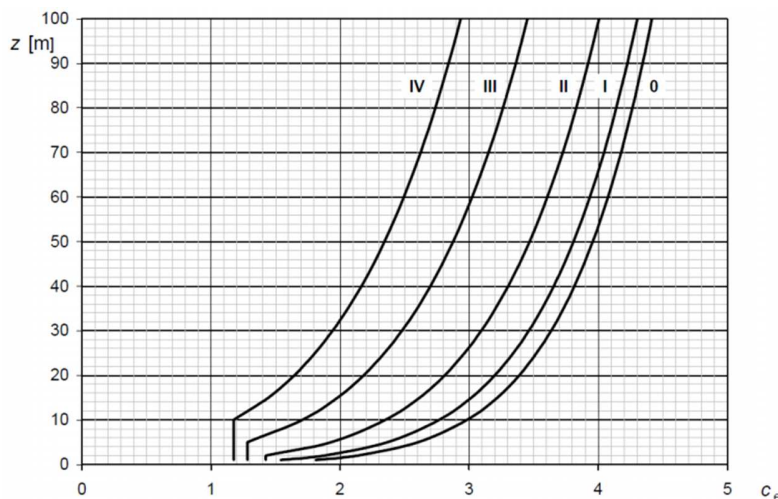
$$v_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0}$$

$$C_{dir} = 1,0$$

$$C_{season} = 1,0 \quad v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$$

$$v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$$

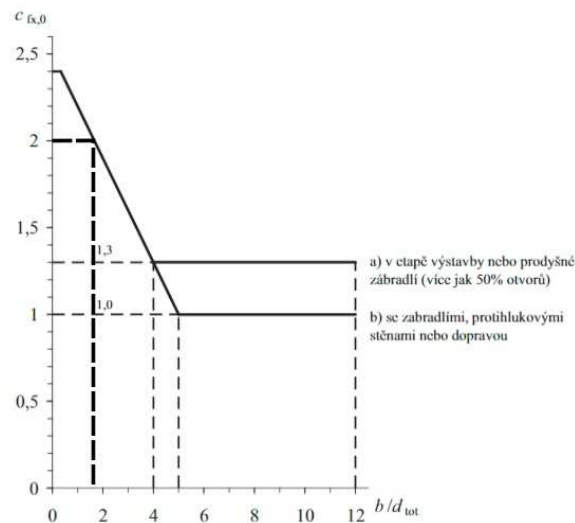
C - součinitel zatížení větrem, $C = c_e(z) \cdot c_{f,x}$



$$z = 2,0 \text{ m}$$

$$c_e(2,0) = 1,4 \text{ m}$$

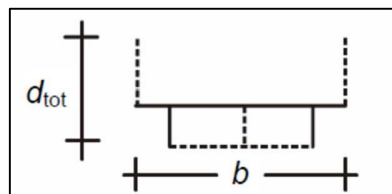
Obr. 11 - Graf pro určení součinitele expozice c_e
[Zdroj: ČSN EN 1991-1-4]



Obr. 12 - Graf pro určení součinitele $c_{f,x}$
[Zdroj: ČSN EN 1991-1-4]

$$c_{f,x} = 2,0$$

Závisí na tvaru konstrukce:



$$b = 4,0 \text{ m}, d_{\text{tot}} = 2,35 \text{ m}$$

(uvažujeme, že lávka je zatížena dopravou, resp. davem osob o výšce odpovídající výšce průměrného člověka, tedy 1,8 m a výška pochozí nosné konstrukce 1,0 m)

$$b/d_{\text{tot}} = 4,0/2,35 = 1,70$$

$$V_b = C_{\text{dir}} \cdot C_{\text{season}} \cdot V_{b,0} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 25 = 25 \text{ m/s}$$

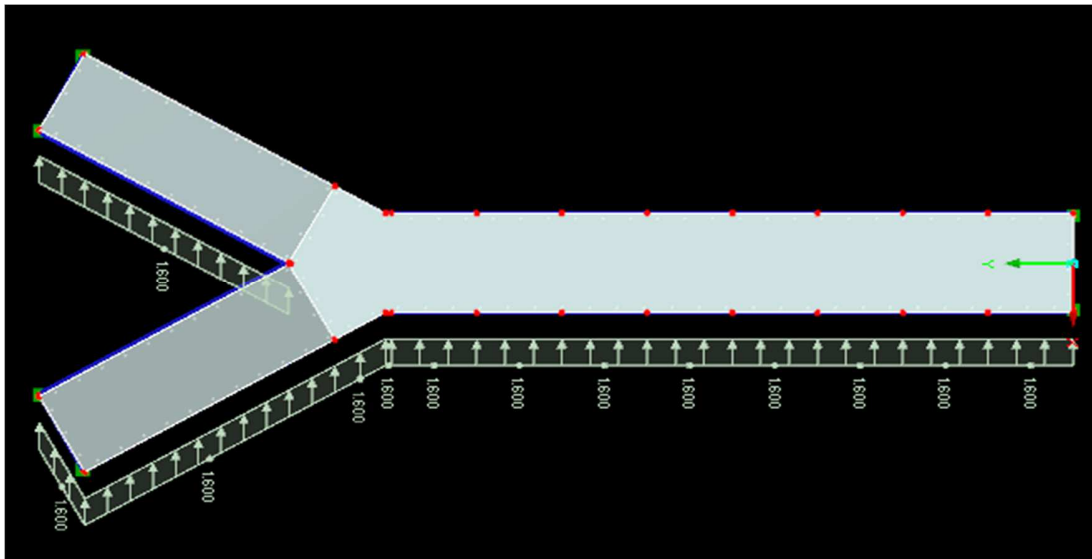
$$C = c_e(z) \cdot c_{f,x} = 1,4 \cdot 2,0 = 2,8$$

$$h_{\text{ref}} = d + 0,6 = 0,6 + 0,7 = 1,3 \text{ m}$$

$$f_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2 \cdot C \cdot h_{\text{ref}} = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 \cdot 2,80 \cdot 1,3 = 1.552 \text{ N/m} =$$

$$1.6 \text{ kN/m}$$

Zatížení f_w [kN/m] uvažujeme v celé délce lávky. Sání větru zanedbáváme.



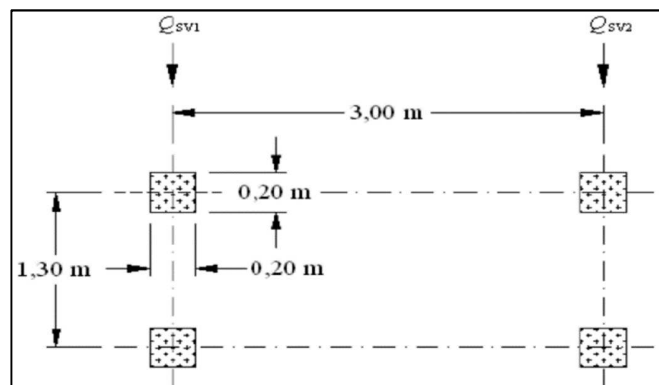
Obr. 13 - Zatížení větrem

[Zdroj: autor diplomové práce]

3.2.6 Mimořádní zatížení - sanitní vuz

Hodnotu dynamického součinitele uvažujeme $f=1,0$.

Schéma uvažovaného zatížení (dle ČSN 1991 - 2):



Obr. 14 - Schéma uvažovaného zatížení (dle ČSN 1991 - 2)

[Zdroj: ČSN EN 1991-2]

kde $Q_{sv1} = 24,0$ kN a $Q_{sv2} = 12,0$ kN.

Zároveň zatěžovací model uvažuje vodorovné zatížení od brzdícího vozidla působící ve stejné ploše o hodnotě

$$Q_{flk1} = 0,6. Q_{sv1} = 14,4 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_{flk2} = 0,6. Q_{sv2} = 7,2 \text{ kN/m}^2$$

a směru pohybu vozidla.

Poloha 1. - Největší ohybový moment

Výslednice R:

$$R = Q_{sv1} + Q_{sv2}$$

$$R = 24 + 12 = 36 \text{ kN}$$

Kritická síla:

$$Q_{sv1} > R/2$$

$$24 \text{ kN} > 36/2 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow Q_{sv1} \text{ je kritické}$$

Poloha 2. - - Největší posouvací síla

Vozidlo je v poloze, kdy se přední náprava nachází těsně před podporou nosníku.

V příčném směru je zatížení (resp. sanitní vozidlo) umístěno tak, aby působí síly od kol na jedné straně působilo přímo nad podélným nosníkem.

3.3 Kombinace zatížení

Kombinace jsou řešeny programem DLUBAL RFEM. Dle kombinačních pravidel jsou spočteny všechny možnosti.

3.3.1 Mezní stavy únosnosti

Je ověřován mezní stav únosnosti STR. Kombinace zatížení je vyjádřena jako méně příznivá z rovnic 6.10a a 6.10b.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \Psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.10a)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.10b)$$

3.3.2 Mezní stavy použitelnosti

Charakteristická kombinace zatížení

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Častá kombinace zatížení

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Kvazistálá kombinace zatížení

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Zatížení:

$G_{k,j}$ = charakteristická hodnota j-tého stálého zatížení

P = příslušná reprezentativní hodnota zatížení od předpětí

$Q_{k,1}$ = charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení

$Q_{k,i}$ = charakteristická hodnota vedlejšího i-tého proměnného zatížení

Součinitelé spolehlivosti pro mosty a lávky:

$\gamma_G = 1,35$ pro stálé zatížení nepříznivé

$\gamma_Q = 1,35$ pro proměnné zatížení (zatížení dopravou a chodci)

Redukční součinitel:

$\xi = 0,85$ pro stálé zatížení v kombinaci (6.10b)

4 Varianta 1 - Ocelová lávka

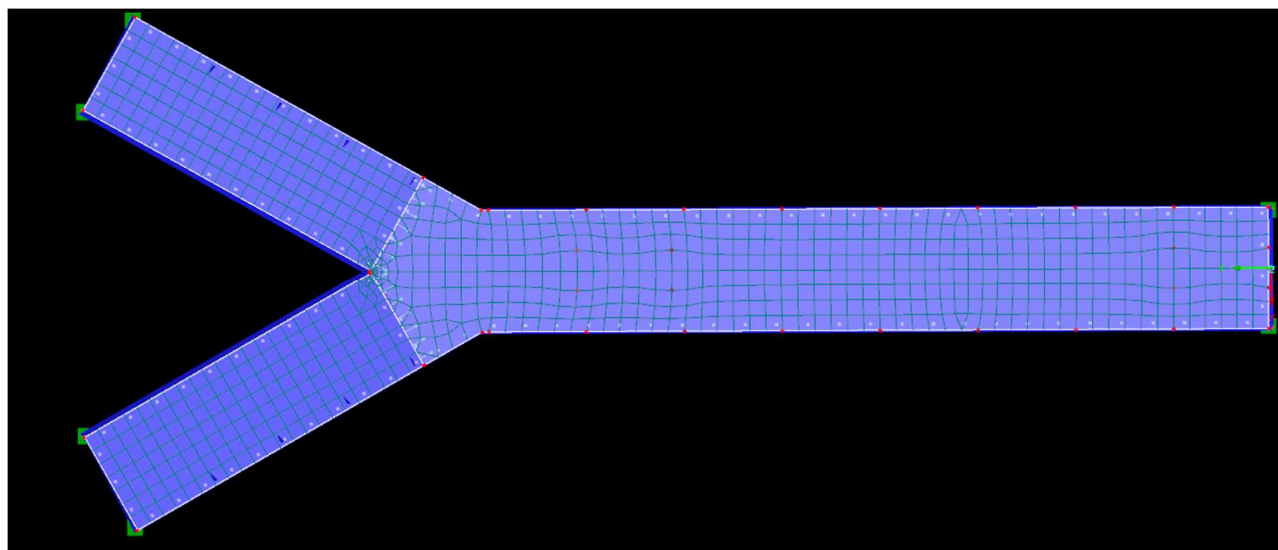
4.1 Materiálové charakteristiky

Konstrukční ocel dle ČSN EN 1993-1-1:2006 dle EN 10025-2; Třída oceli podle ČSN EN 10027.

Třída	S355
Modul pružnosti	$E = 210000 \text{ MPa}$
Smykový modul	$G = 80769 \text{ Mpa}$
Poissonův součinitel	$\nu = 0.30$
Objemová tíha	$\gamma = 78.50 \text{ KN/m}^3$
Součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$
Dílčí součinitel spolehlivosti	$\gamma_m = 1$

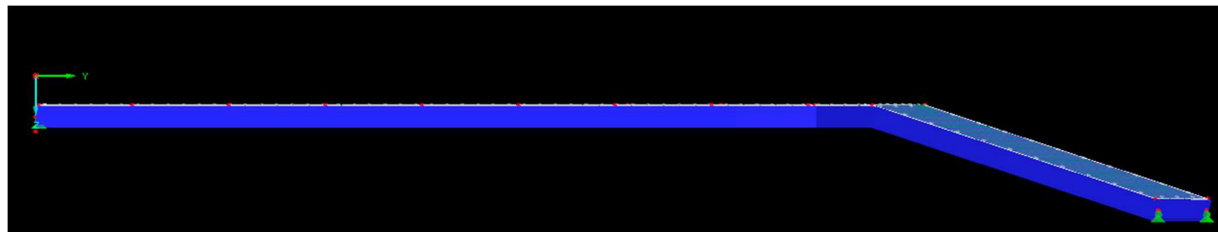
4.2 Výpočtový model

Model v půdorysu



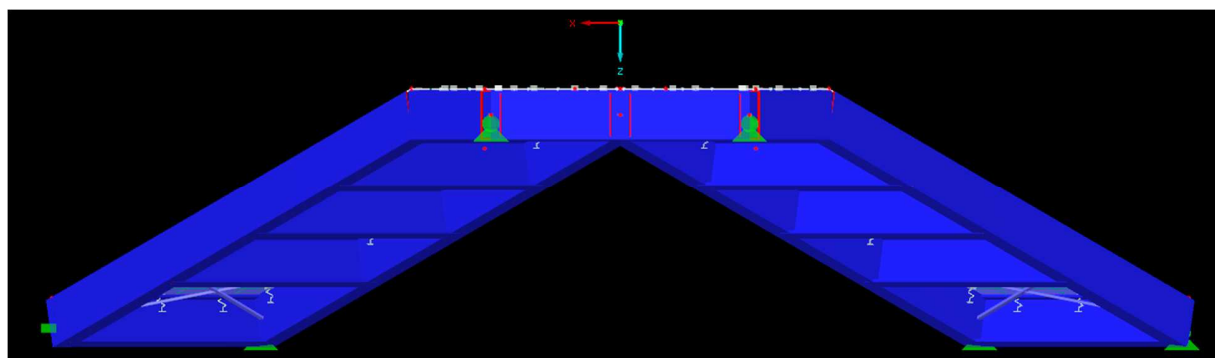
Obr. - 15 Model v půdorysu
[Zdroj: autor diplomové práce]

Model v podélném řezu



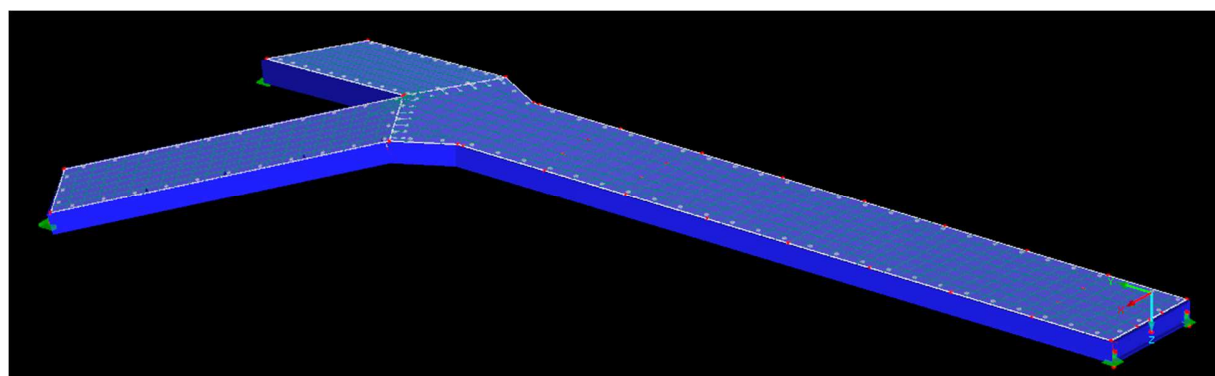
Obr. 16 - Model v podélném řezu
[Zdroj: autor diplomové práce]

Model v příčném řezu



Obr. 17 - Model v příčném řezu
[Zdroj: autor diplomové práce]

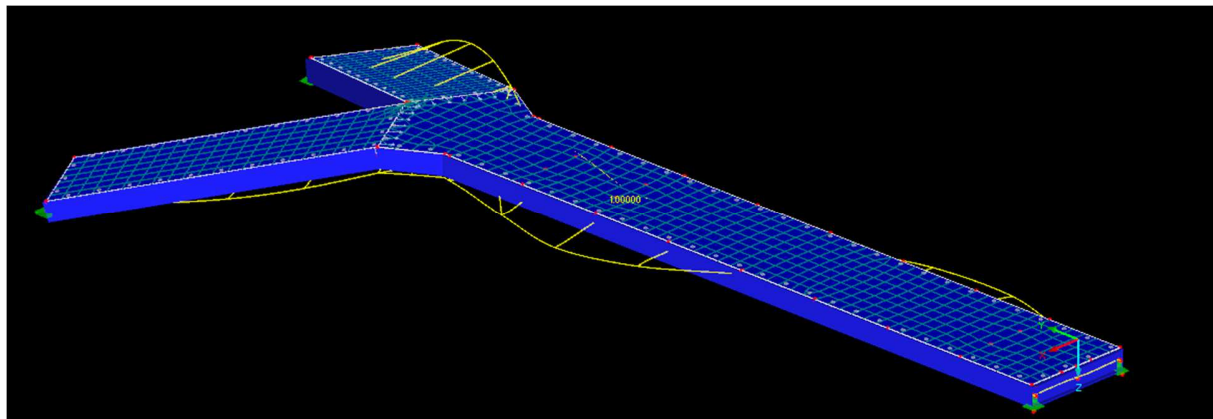
Model v axonometrii



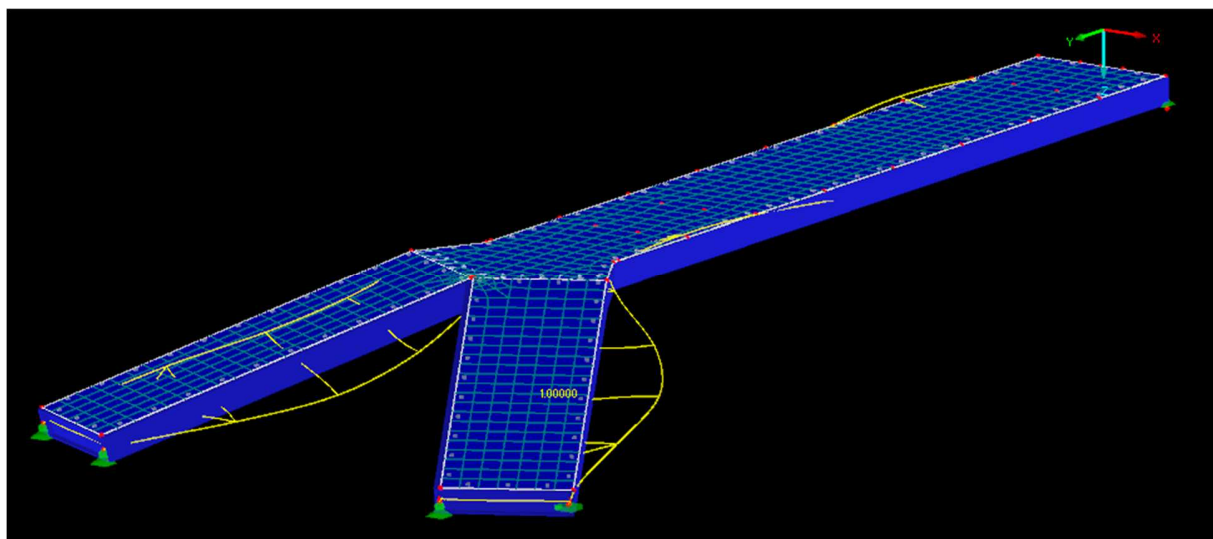
Obr. 18 - Model v axonometrii
[Zdroj: autor diplomové práce]

4.3 Vlastní frekvence a tvary kmitání

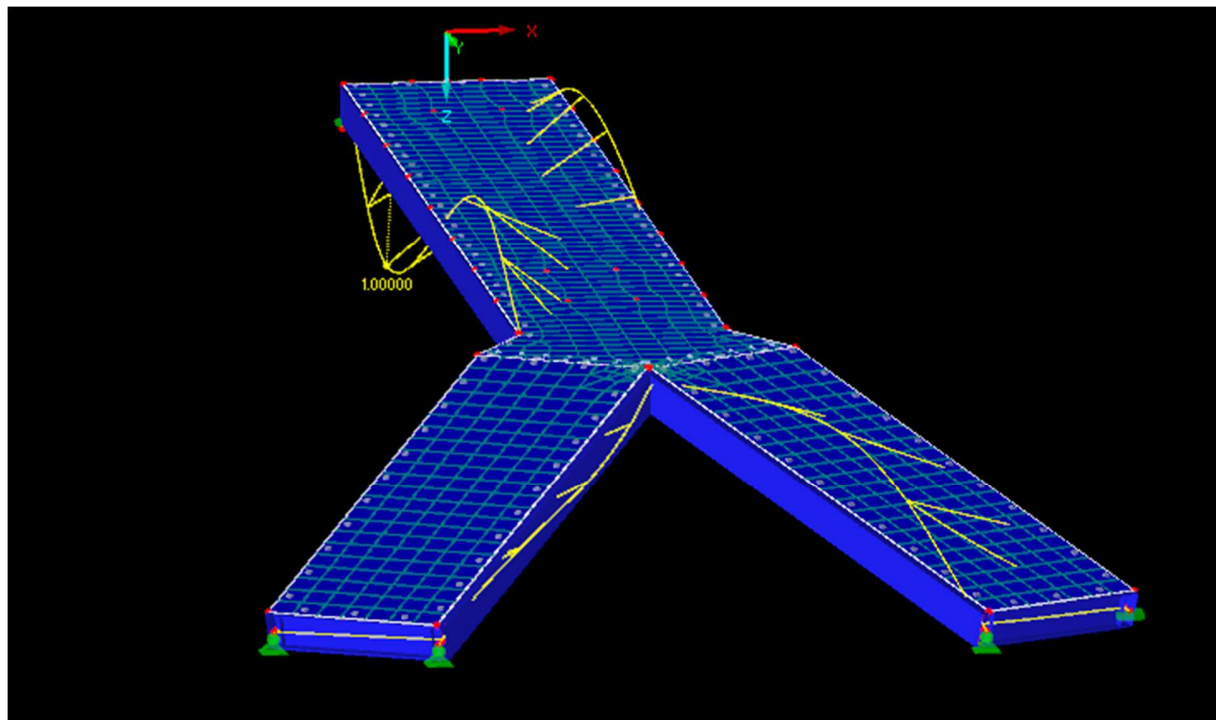
Pomocí programu Dlubal RFEM bylo zjištěno prvních 5 vlastních tvarů kmitání.



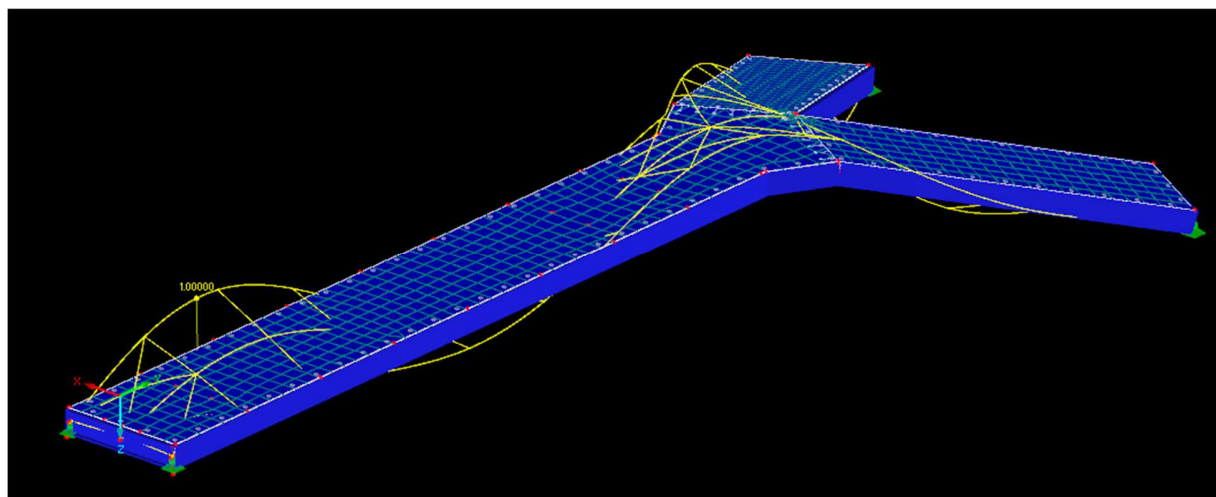
Obr. 19 1. vlastní tvar
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 20 2. vlastní tvar
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 21 3. vlastní tvar
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 22 4. vlastní tvar
[Zdroj: autor diplomové práce]

Důvodem spočtení vlastních frekvencí konstrukce je zjištění, zda bude nebo nebude nutné počítat a posuzovat konstrukci na dynamiku. Hodnoty každého tvaru jsou v tab. X

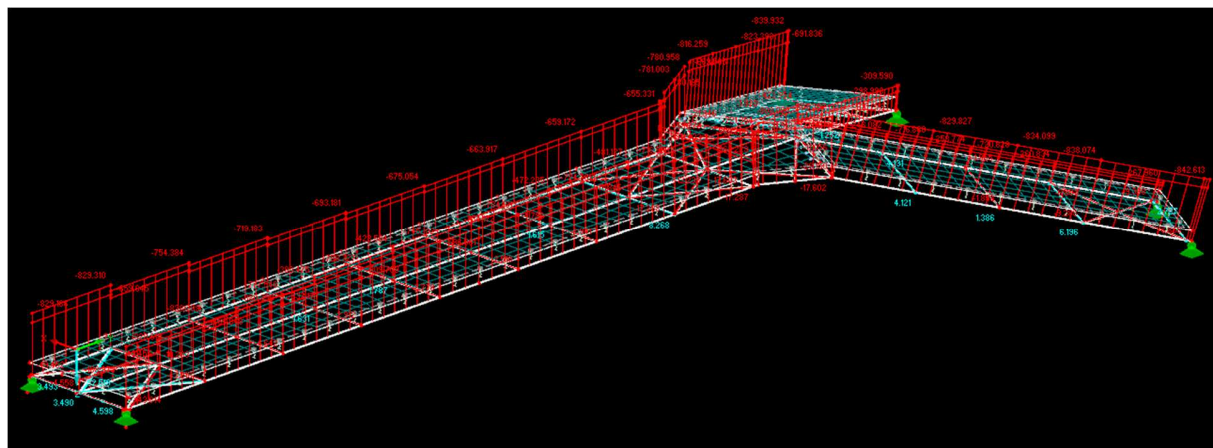
Tvar č.	Vlastní číslo λ [1/s ²]	Úhlová frekvence ω [rad/s]	Vlastní frekvence f [Hz]	Vlastní perioda T [s]
1	4499.93	67.07	10.67	0.094
2	5565.32	74.60	11.87	0.084
3	5661.71	75.24	11.97	0.084
4	5906.56	76.85	12.23	0.082

Tab. 3 Vlastní frekvence pro dominantní vlastní tvary

[Zdroj: autor diplomové práce]

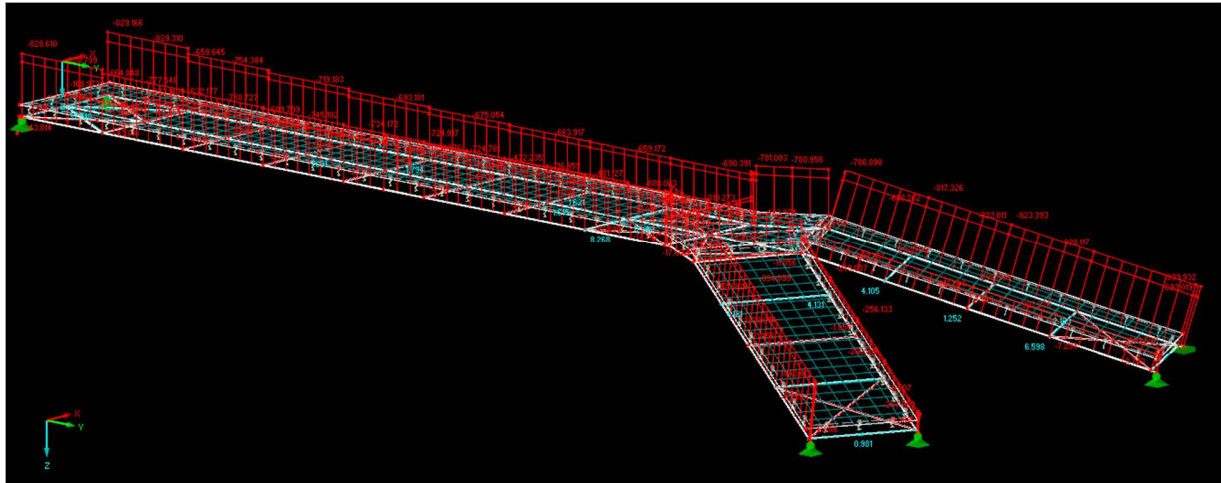
Pokud není některá vlastní frekvence svislého kmitání nosné konstrukce lávky v oblasti frekvencí 1,0 až 5,0 Hz a/nebo vlastní frekvence vodorovného kmitání hlavní nosné konstrukce lávky v oblasti frekvencí 0,5 až 2,5 Hz, je podle ČSN EN 1991-2 Zatížení mostů dopravou není nutné provést podrobnou analýzu dynamického chování lávky.

4.4 Vnitřní síly

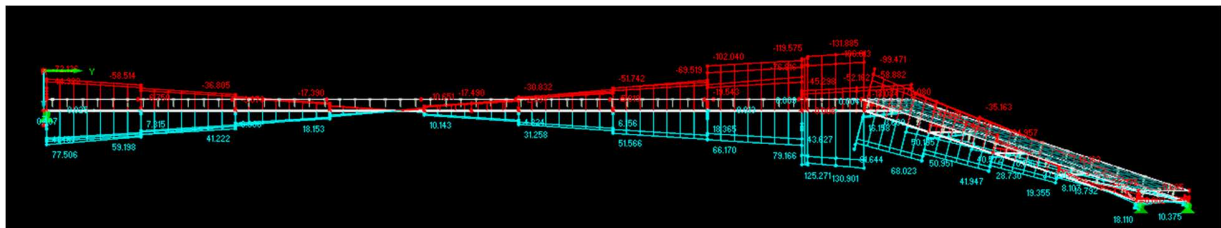


Obr. 23 - Výsledné normálové síly v prutech N[kN]

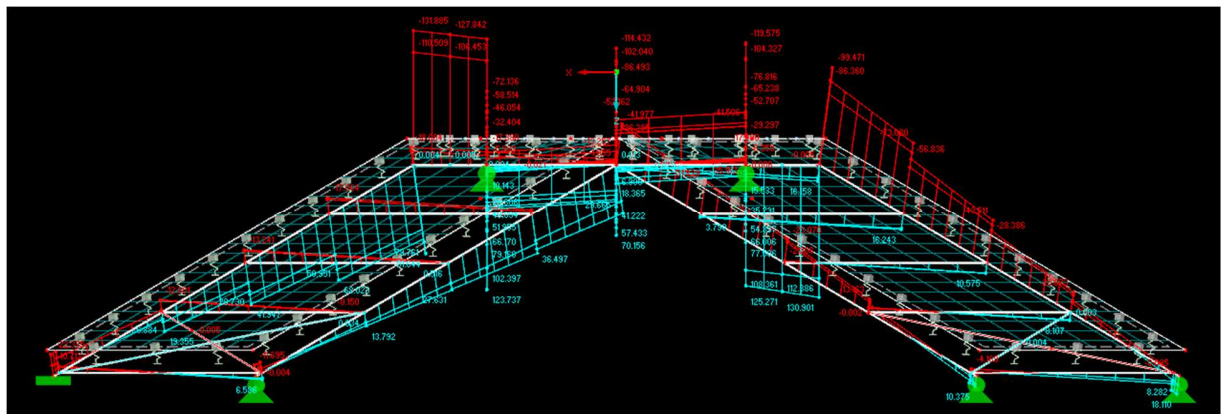
[Zdroj: autor diplomové práce]



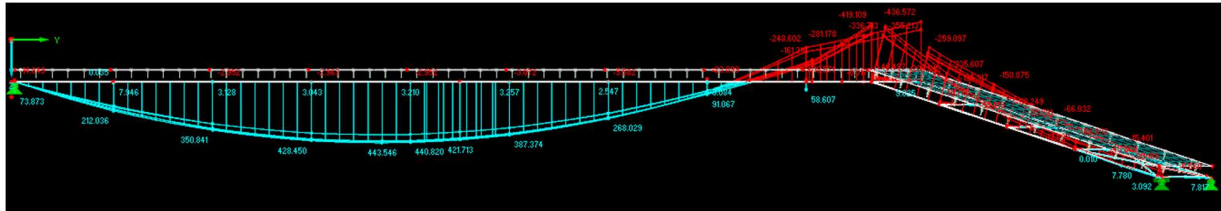
Obr. 24 Výsledné normálové síly v prutech N[kN]
[Zdroj: autor diplomové práce]



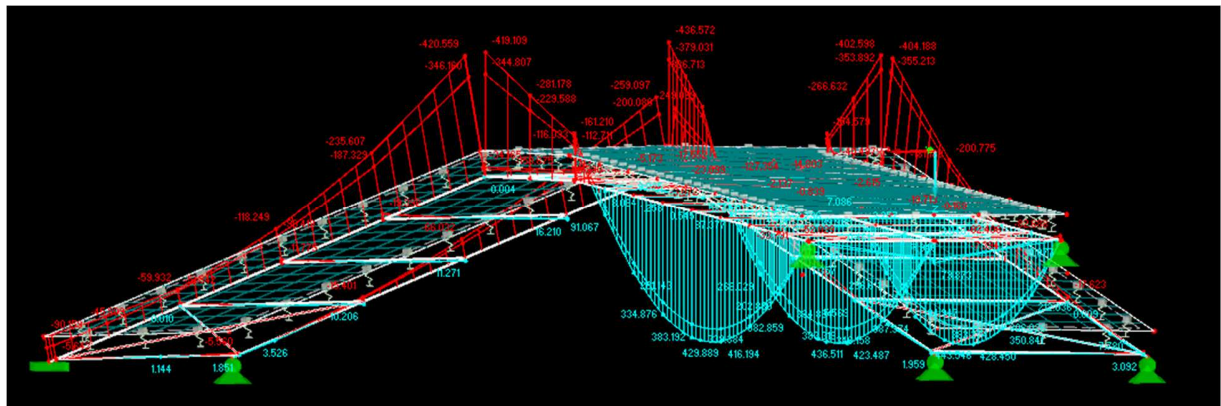
Obr. 25 - Výsledné posouvající síly v prutech Vz[kN]
[Zdroj: autor diplomové práce]



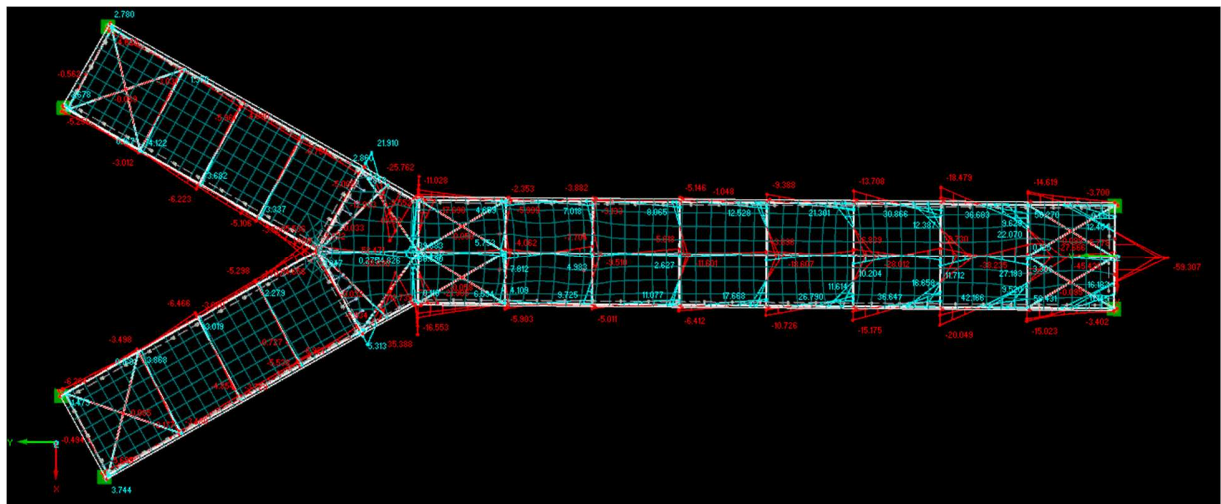
Obr. 26 - Výsledné posouvající síly v prutech Vz[kN]
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 27 - Výsledné momenty v prutech M_y [kNm]
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 28 - Výsledné momenty v prutech M_y [kNm]
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 29 - Výsledné momenty v prutech M_z [kNm]
[Zdroj: autor diplomové práce]

4.5 Návrh pochozích roštů

Typ a rozměry roštu jsou navrženy dle technických listů výrobce.

ZATÍŽENÍ OSAMĚLOU SILOU			
typ	vzdálenost podpěr (mm)		
	500	600	700
PREFAPOR 15x23/25	920	500	320
PREFAPOR 15x10/25	1 310	810	530
PREFAPOR 40x10/25	910	590	410
PREFAPOR 15x23/32	1 150	670	450
PREFAPOR 15x23/38	1 940	1 180	790
PREFAPOR 15x10/38	2 910	1 830	1 250
PREFAPOR 50x20/25	2 360	1 620	1 060

Obr. 30 - Výsek technického listu výrobce PREFA Kompozity

[Zdroj: <https://www.prefa-kompozity.cz/produkty/zakladni-vyrobyky/kompozitni-rosty/>]

Rozhoduje zatížení osamělým břemenem

$F_p = 1200 \text{ kg}$ (odpovídá bodovému zatížení od sanitního vozu)

Návrh: skládané rošty PREFAPOR 50x20/25

$$F_p < F_{p,max}$$

$$1. < 1620 \text{ N}$$

Vyhovuje

4.6 Posouzení příčnicku

Charakteristika průřezu: HE M 700

h	700 mm	$A_{v,z}$	13020 mm^2	
b	300 mm	$W_{pl,y}$	9938100 mm^3	
t_w	21 mm	$W_{pl,z}$	1868360 mm^3	
t_f	40 mm	I_y	$3.034 \times 10^9 \text{ mm}^4$	
A	37020 mm^2	I_z	$1.805 \times 10^8 \text{ mm}^4$	

Tab. 4 – Průřezové charakteristiky HE M 700

[Zdroj: autor diplomové práce]

Vnitřní síly: $M_{y,Ed} = 383.319 \text{ kNm}$

Zatřídění průřezu

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0.79$$

Ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72 \times \varepsilon$$

$$\frac{868}{21} \leq 72 \times 0.79$$

$$41.3 \leq 56.88$$

Třída I

Posouzení MSÚ

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{9.9381 \times 10^6 \times 355}{1} = 3528.02 \text{ kNm}$$

Ohybový moment

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} = \frac{383.32}{3528.02} = 0.11 \leq 1$$

Vyhovuje

4.7 Posouzení hlavního nosníku

Charakteristika průřezu: TO 700/300/20

h	700 mm	A	38400 mm ²	
b	300 mm	$A_{v,z}$	26400 mm ²	
t_{al}	20 mm	$W_{pl,y}$	$8.436 \times 10^6 \text{ mm}^3$	
t_{ar}	20 mm	$W_{pl,z}$	4055470 mm^3	
t_{bh}	20 mm	I_y	$2.346 \times 10^9 \text{ mm}^4$	
t_{bd}	20 mm	I_z	$6.083 \times 10^8 \text{ mm}^4$	

Tab. 5 – Průřezové charakteristiky TO 700/300/20

[Zdroj: autor diplomové práce]

Vnitřní síly: $M_{y,Ed} = 443.546 \text{ kNm}$

$$V_{Ed} = 130.90 \text{ kN}$$

Posouzení MSÚ

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{8.436 \times 10^6 \times 355}{1} = 2994.78 \text{ kNm}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{v,z} \times (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{m0}} = \frac{26400 \times (355 / \sqrt{3})}{1} = 5410.92 \text{ kN}$$

Ohybový moment

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} = \frac{443.55}{2994.78} = 0.15 \leq 1$$

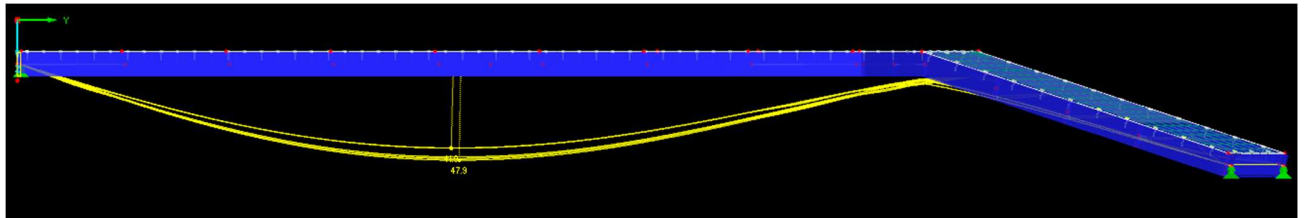
Vyhovuje

Smyk

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{130.90}{5410.92} = 0.024 \leq 1$$

Vyhovuje

4.8 Posouzení MSP. Průhyb mostu

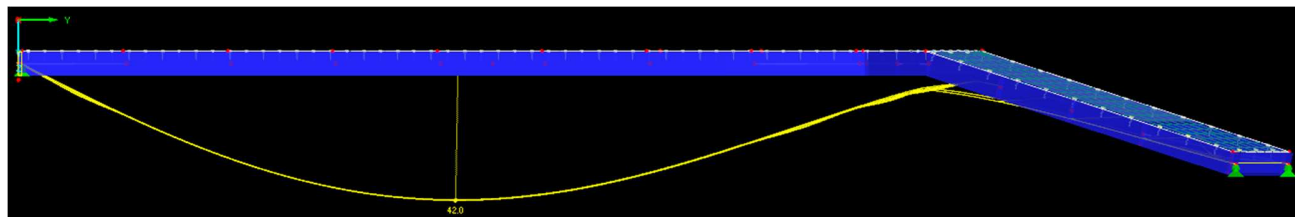


Obr. 31 - Průhyb mostu – kombinace MSP1
[Zdroj: autor diplomové práce]

$L = 37646 \text{ mm}$

$$\delta = 47.9 \text{ mm} \leq \frac{L}{400} = \frac{37646}{400} = 94.1 \text{ mm}$$

Vyhovuje



Obr. 32 - Průhyb mostu – chodci
[Zdroj: autor diplomové práce]

$$L = 37646 \text{ mm}$$

$$\delta = 42.0 \text{ mm} \leq \frac{L}{250} = \frac{37646}{250} = 150.6 \text{ mm}$$

Vyhovuje

4.9 Maximální využití materiálů

ing	No.	Point No.	X	Y	Z	Symbol	Existing	Limit	Ratio [-]	
-	Maximum Stresses									
	2	147	0,650	19,000	0,938	t _{max}	1,518	135,677	0,01	
	2	147	0,650	19,000	0,938	s _{1,+}	218,098	235,000	<u>0,93</u>	
	2	152	-0,650	19,000	0,938	s _{2,+}	99,063	235,000	0,42	
	2	152	-0,650	19,000	0,938	s _{1,-}	-99,063	235,000	0,42	
	2	147	0,650	19,000	0,938	s _{2,-}	218,098	235,000	<u>0,93</u>	
	2	145	0,000	28,550	0,938	s _{1,m}	0,219	235,000	0,00	
	2	1000	-0,098	28,498	0,938	s _{2,m}	-0,606	235,000	0,00	
	2	147	0,650	19,000	0,938	s _{eqv,max}	189,395	235,000	0,81	
	2	1000	-0,098	28,498	0,938	s _{eqv,m}	0,644	235,000	0,00	

Tab. 6 – Využití materiálů při maximálním zatížení

[Zdroj: autor diplomové práce]

Jak vidíme v tabulce X, maximální využití materiálů v této variantě lávky je 93%.

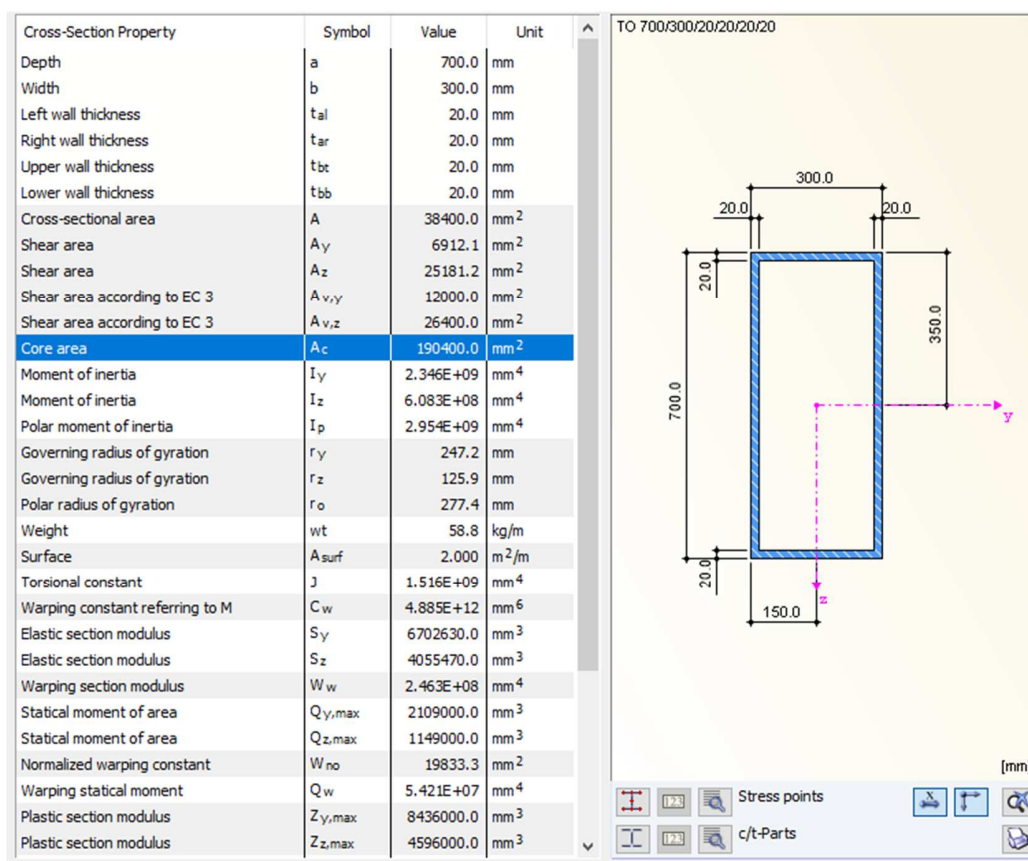
5 Varianta 2 – Kompozitní lávka, výška profilů 700 mm

5.1 Materiálové charakteristiky

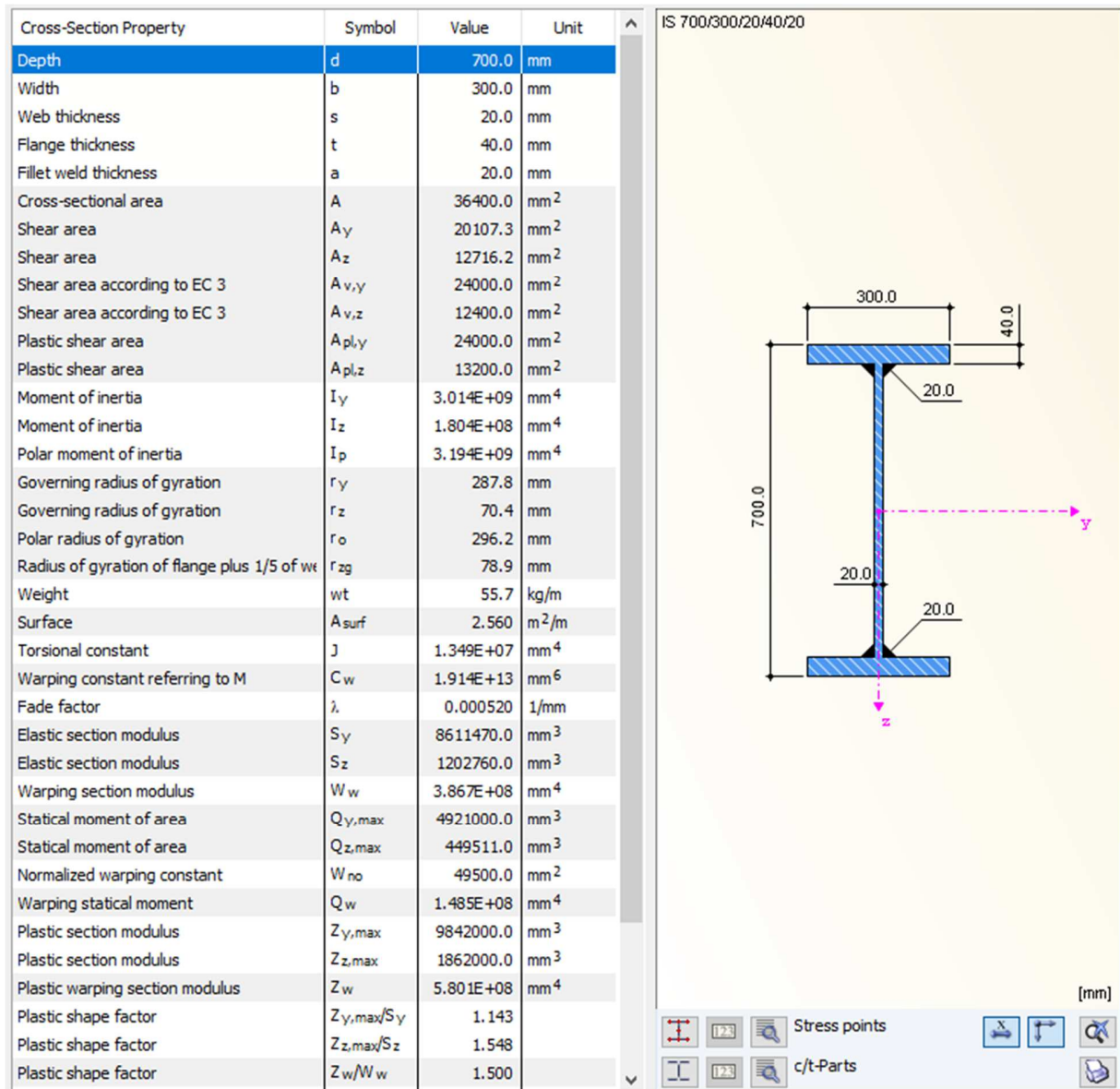
Lávka bude vytvořena z profilů z uhlíkových vláken. Všechny profily budou stejných rozměrů, jako v ocelové lávce.

Modul pružnosti	$E = 255000 \text{ MPa}$
Smykový modul	$G = 98070 \text{ Mpa}$
Poissonův součinitel	$\nu = 0.30$
Objemová tíha	$\gamma = 15.30 \text{ KN/m}^3$
Součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 2.15 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$
Dílní součinitel spolehlivosti	$\gamma_m = 1$

5.2 Použité profily



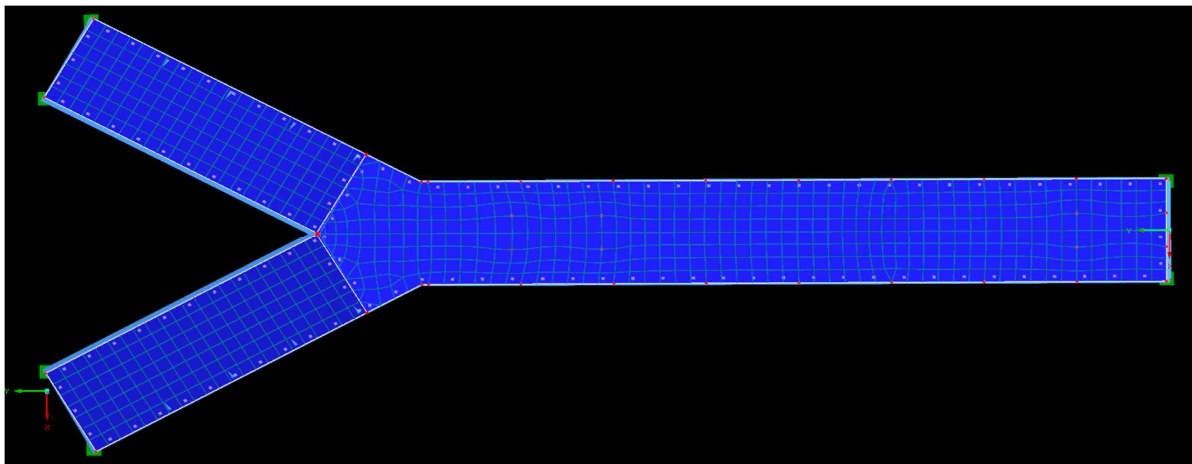
Obr. 33 - Vlastnosti průřezu hlavního nosníku
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 34 - Vlastnosti průřezu příčnicku
[Zdroj: autor diplomové práce]

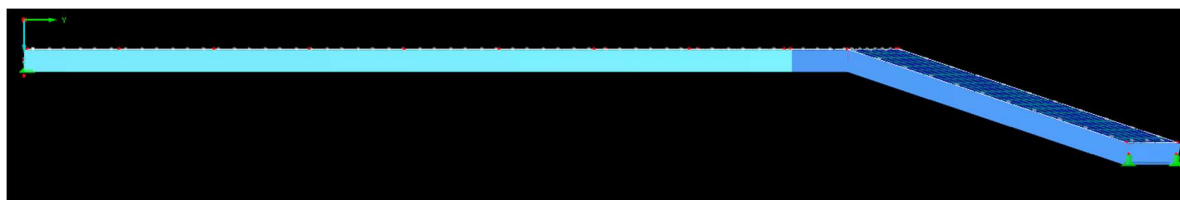
5.3 Výpočtový model

Model v půdorysu



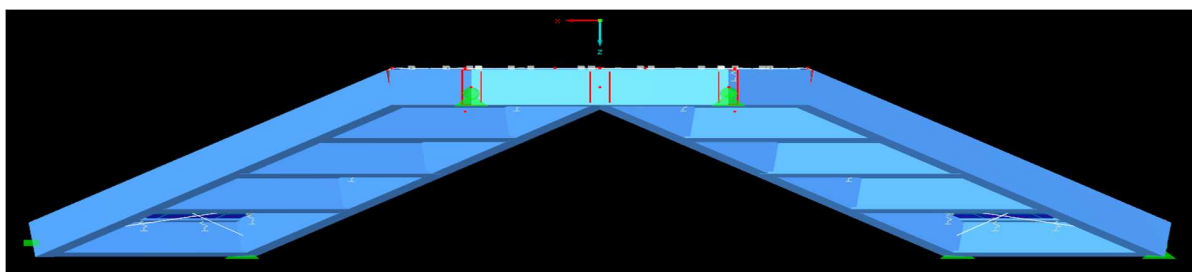
Obr. 35 - Model v půdorysu
[Zdroj: autor diplomové práce]

Model v podélném řezu



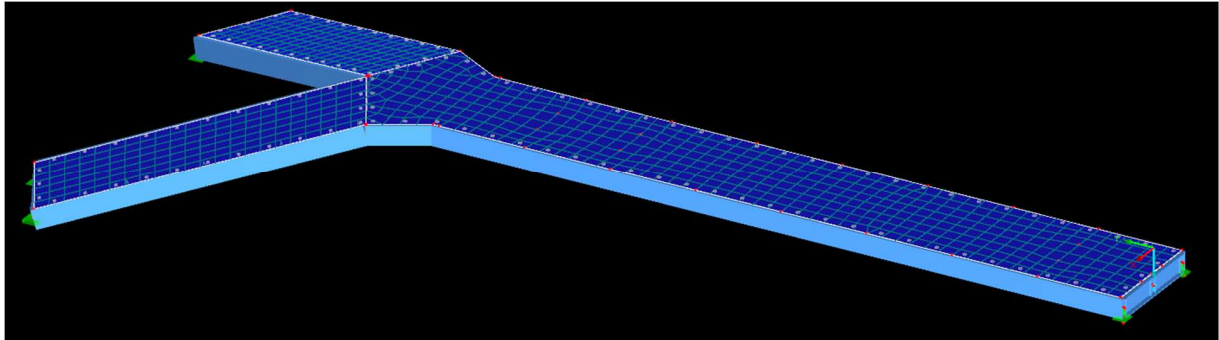
Obr. 36 - Model v podélném řezu
[Zdroj: autor diplomové práce]

Model v příčném řezu



Obr. 37 - Model v příčném řezu
[Zdroj: autor diplomové práce]

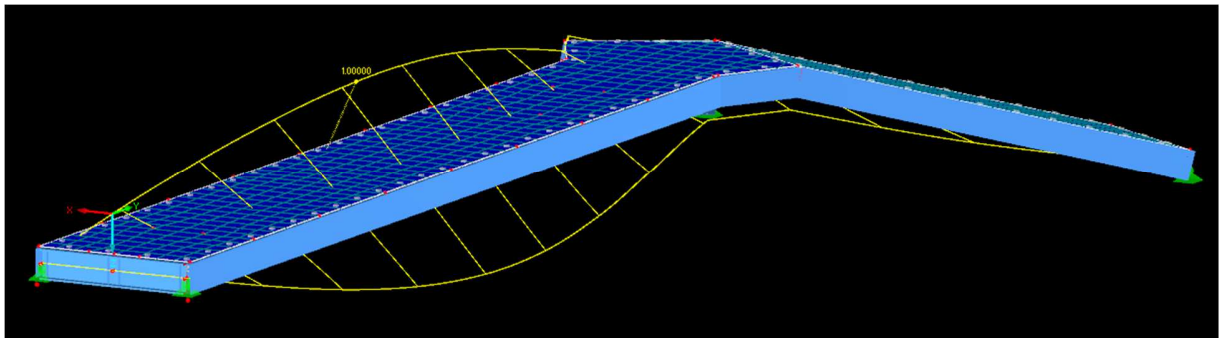
Model v axonometrii



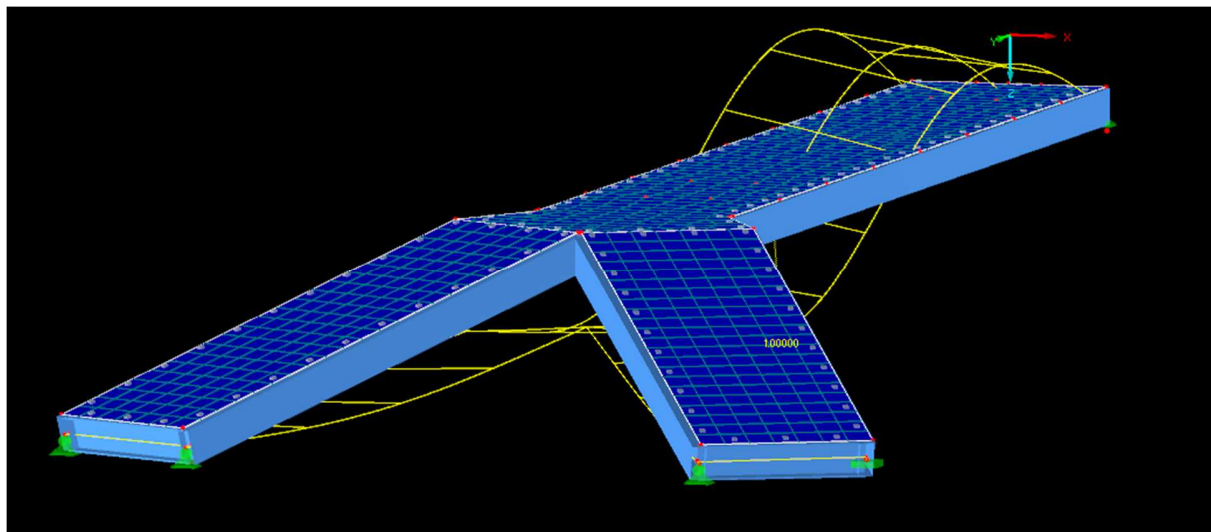
Obr. 38 - Model v axonometrii
[Zdroj: autor diplomové práce]

5.4 Vlastní frekvence a tvary kmitání

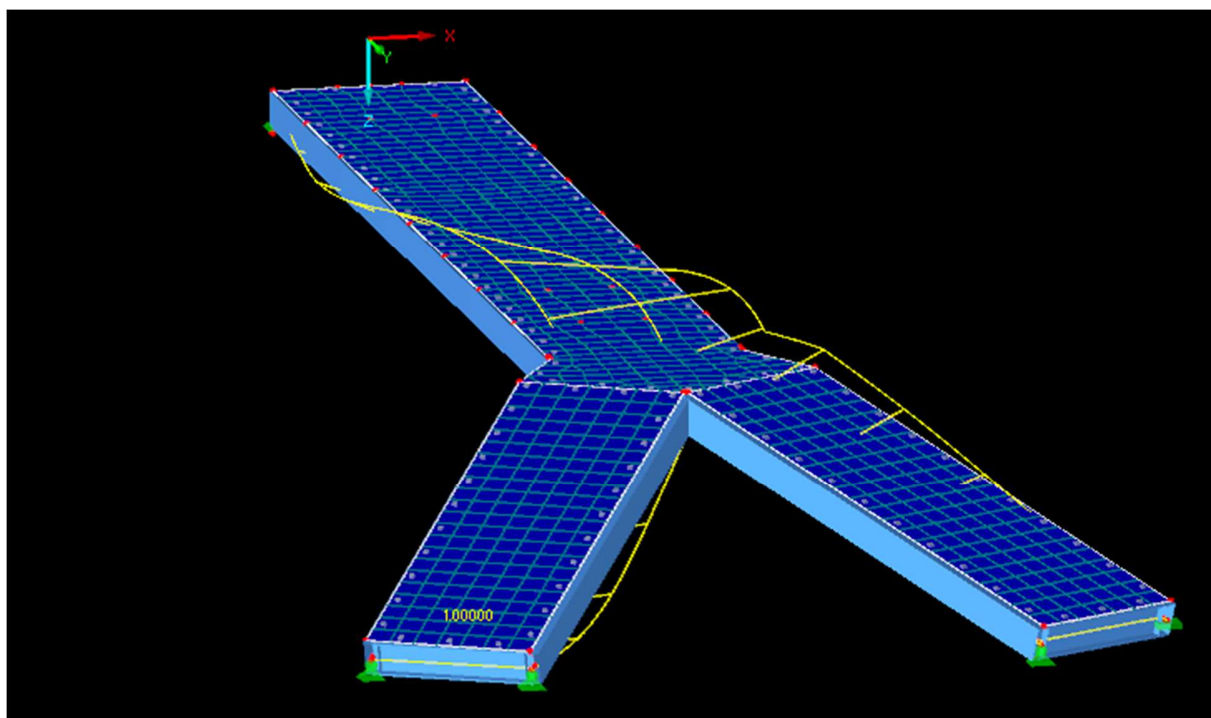
Pomocí programu Dlubal RFEM bylo zjištěno prvních 5 vlastních tvarů kmitání.



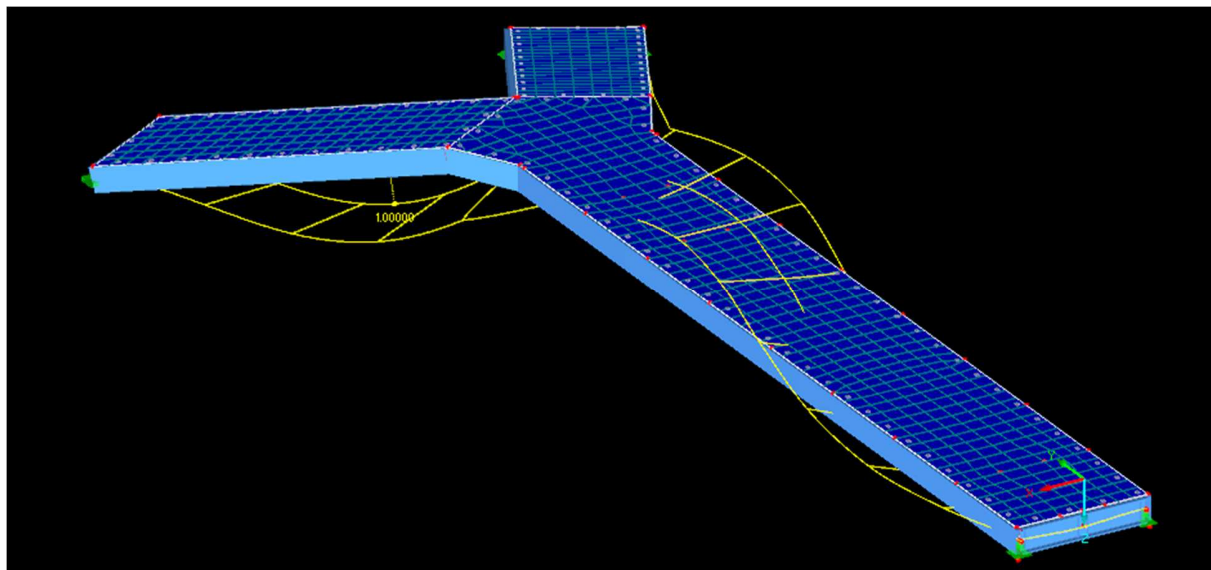
Obr. 39 - 1. vlastní tvar
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 40 - 2. vlastní tvar
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 41 - 3. vlastní tvar
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 42 - 4. vlastní tvar
[Zdroj: autor diplomové práce]

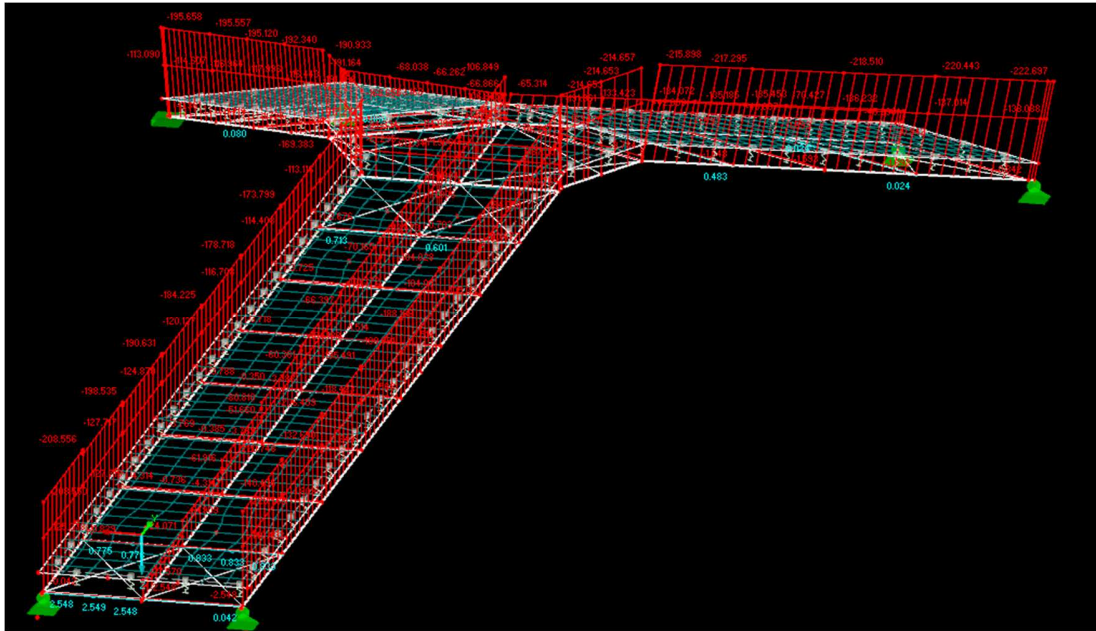
Důvodem spočtení vlastních frekvencí konstrukce je zjištění, zda bude nebo nebude nutné počítat a posuzovat konstrukci na dynamiku. Hodnoty každého tvaru jsou v tab. X

Tvar č.	Vlastní číslo λ [1/s ²]	Úhlová frekvence ω [rad/s]	Vlastní frekvence f [Hz]	Vlastní perioda T [s]
1	6122.45	78.25	12.45	0.080
2	8542.42	92.43	14.71	0.068
3	12495.75	111.78	17.79	0.056
4	15768.38	125.57	19.99	0.050

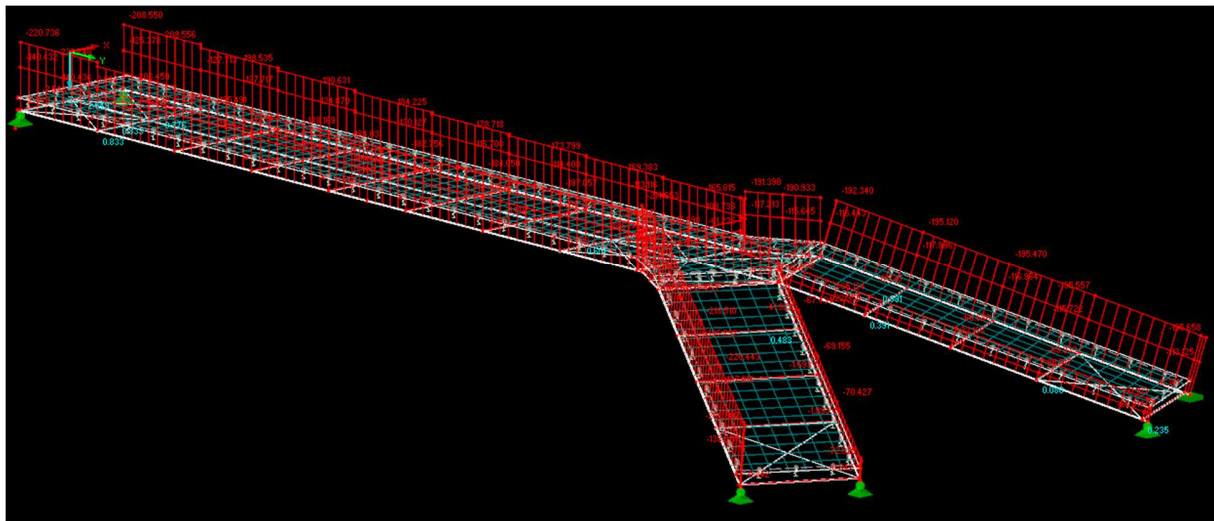
Tab. 7 Vlastní frekvence pro dominantní vlastní tvary
[Zdroj: autor diplomové práce]

Pokud není některá vlastní frekvence svislého kmitání nosné konstrukce lávky v oblasti frekvencí 1,0 až 5,0 Hz a/nebo vlastní frekvence vodorovného kmitání hlavní nosné konstrukce lávky v oblasti frekvencí 0,5 až 2,5 Hz, je podle ČSN EN 1991-2 Zatížení mostů dopravou není nutné provést podrobnou analýzu dynamického chování lávky.

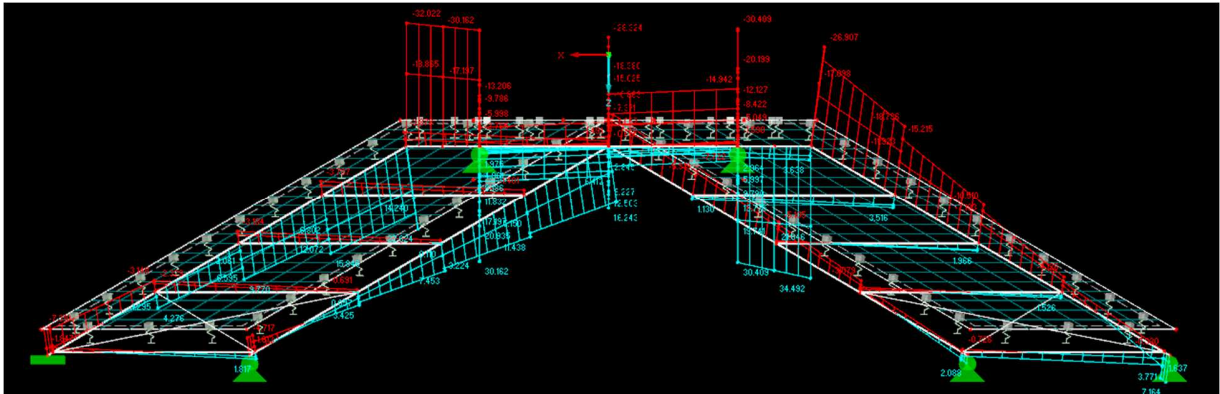
5.5 Vnitřní síly



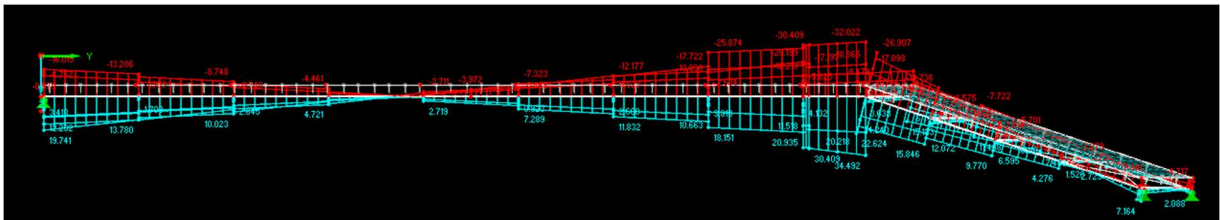
Obr. 43 - Výsledné normálové síly v prutech N[kN]
[Zdroj: autor diplomové práce]



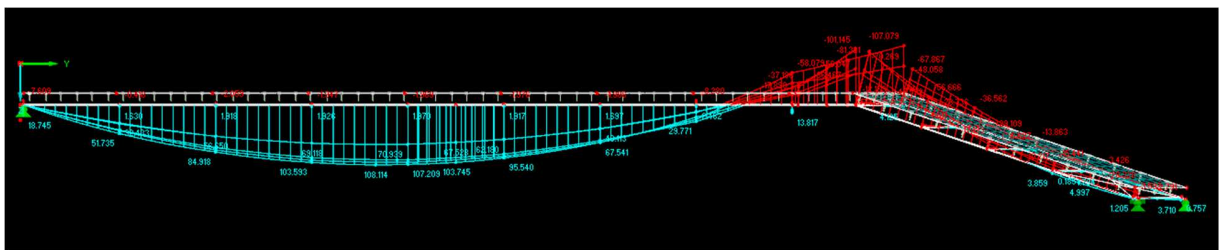
Obr. 44 - Výsledné normálové síly v prutech N[kN]
[Zdroj: autor diplomové práce]



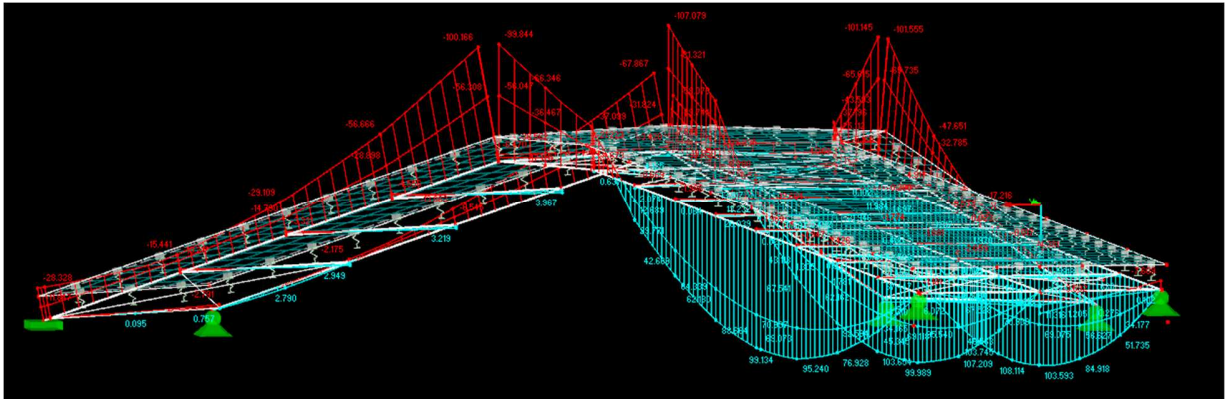
Obr. 45 - Výsledné posouvající síly v prutech V_z [kN]
[Zdroj: autor diplomové práce]



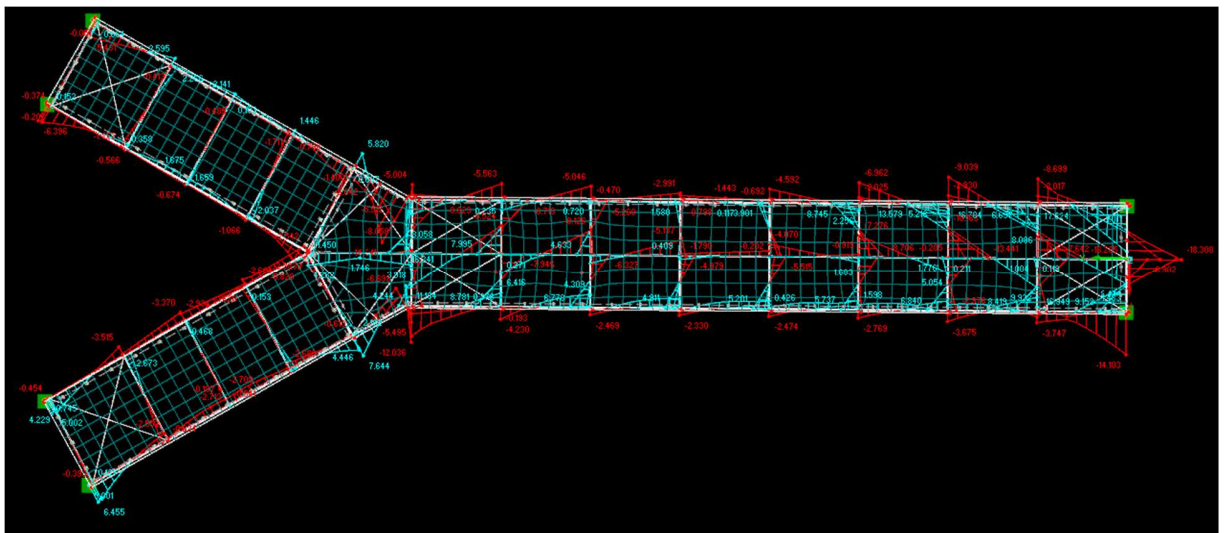
Obr. 46 - Výsledné posouvající síly v prutech V_z [kN]
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 47 - Výsledné momenty v prutech M_y [kNm]
[Zdroj: autor diplomové práce]

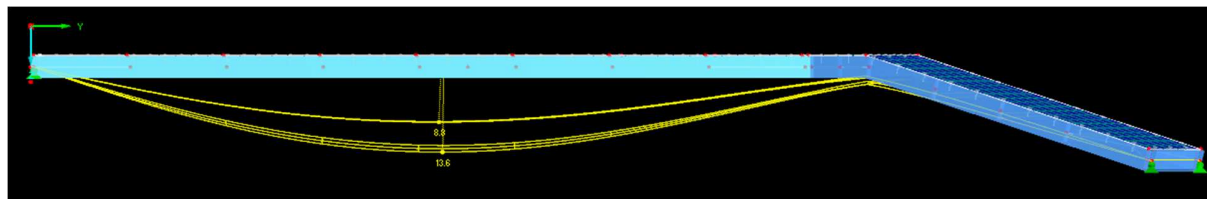


Obr. 48 - Výsledné momenty v prutech M_y [kNm]
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 49 - Výsledné momenty v prutech M_z [kNm]
[Zdroj: autor diplomové práce]

5.6 Posouzení MSP. Průhyb mostu

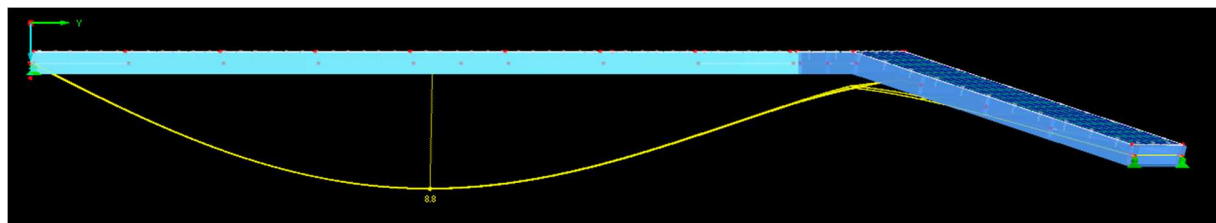


Obr. 50 - Průhyb mostu – kombinace MSP1
[Zdroj: autor diplomové práce]

$$L = 37646 \text{ mm}$$

$$\delta = 13.6 \text{ mm} \leq \frac{L}{400} = \frac{37646}{400} = 94.1 \text{ mm}$$

Vyhovuje



Obr. 51 - Průhyb mostu – chodci
[Zdroj: autor diplomové práce]

$$L = 37646 \text{ mm}$$

$$\delta = 8.8 \text{ mm} \leq \frac{L}{250} = \frac{37646}{250} = 150.6 \text{ mm}$$

Vyhovuje

5.7 Maximální využití materiálů

Load- ing	Surface No.	FE Mesh Point No.	Point Coordinates [m]			Stress [MPa]			Stress Ratio [-]	
			X	Y	Z	Symbol	Existing	Limit		
-	Maximum Stresses									
	2	147	0,650	19,000	0,938	t_{max}	1,725	204,959	0,01	
	2	147	0,650	19,000	0,938	$s_{1,+}$	130,724	355,000	<u>0,37</u>	
	2	152	-0,650	19,000	0,938	$s_{2,+}$	68,366	355,000	0,19	
	2	152	-0,650	19,000	0,938	$s_{1,-}$	-68,366	355,000	0,19	
	2	147	0,650	19,000	0,938	$s_{2,-}$	-130,724	355,000	<u>0,37</u>	
	2	145	0,000	28,450	0,938	$s_{1,m}$	-0,102	355,000	0,00	
	2	141	-0,045	28,528	0,938	$s_{2,m}$	-0,483	355,000	0,00	
	2	147	0,650	19,000	0,938	$Seqv,max$	114,921	355,000	0,32	
	2	141	-0,045	28,528	0,938	$Seqv,m$	0,648	355,000	0,00	

Tab. 8 – Využití materiálů při maximálním zatížení

[Zdroj: autor diplomové práce]

Jak vidíme v tabulce X, maximální využití materiálů v této variantě lávky je 37%. Což je mnohem nižší než u ocelové lávky. A proto, pro lepší analýzu, vytvoříme třetí variantu lávky, ze stejného kompozitu, ale v menších velikostech profilů.

6 Varianta 3 – Kompozitní lávka, výška profilu 400 mm

6.1 Materiálové charakteristiky

Lávka bude vytvořena z profilů z uhlíkových vláken. Výšky profilů příčnicku a hlavního nosníku zmenšíme do 450 mm.

Modul pružnosti	$E = 255000 \text{ MPa}$
Smykový modul	$G = 98070 \text{ Mpa}$
Poissonův součinitel	$\nu = 0.30$
Objemová tíha	$\gamma = 15.30 \text{ KN/m}^3$
Součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 2.15 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$
Dílčí součinitel spolehlivosti	$\gamma_m = 1$

6.2 Použité profily

Cross-Section Property	Symbol	Value	Unit
Depth	a	400.0	mm
Width	b	300.0	mm
Left wall thickness	t _{al}	20.0	mm
Right wall thickness	t _{ar}	20.0	mm
Upper wall thickness	t _{bt}	20.0	mm
Lower wall thickness	t _{bb}	20.0	mm
Cross-sectional area	A	26400.0	mm ²
Shear area	A _y	8673.6	mm ²
Shear area	A _z	13438.7	mm ²
Shear area according to EC 3	A _{v,y}	12000.0	mm ²
Shear area according to EC 3	A _{v,z}	14400.0	mm ²
Core area	A _c	106400.0	mm ²
Moment of inertia	I _y	5.891E+08	mm ⁴
Moment of inertia	I _z	3.727E+08	mm ⁴
Polar moment of inertia	I _p	9.618E+08	mm ⁴
Governing radius of gyration	r _y	149.4	mm
Governing radius of gyration	r _z	118.8	mm
Polar radius of gyration	r _o	190.9	mm
Weight	wt	40.4	kg/m
Surface	A _{surf}	1.400	m ² /m
Torsional constant	J	6.896E+08	mm ⁴
Warping constant referring to M	C _w	1.368E+11	mm ⁶
Elastic section modulus	S _y	2945600.0	mm ³
Elastic section modulus	S _z	2484800.0	mm ³
Warping section modulus	W _w	3.395E+07	mm ⁴
Statical moment of area	Q _{y,max}	894000.0	mm ³
Statical moment of area	Q _{z,max}	729000.0	mm ³
Normalized warping constant	W _{no}	4030.3	mm ²
Warping statical moment	Q _w	6985860.0	mm ⁴
Plastic section modulus	Z _{y,max}	3576000.0	mm ³
Plastic section modulus	Z _{z,max}	2916000.0	mm ³
Plastic shape factor	Z _{y,max} /S _y	1.214	
Plastic shape factor	Z _{z,max} /S _z	1.174	

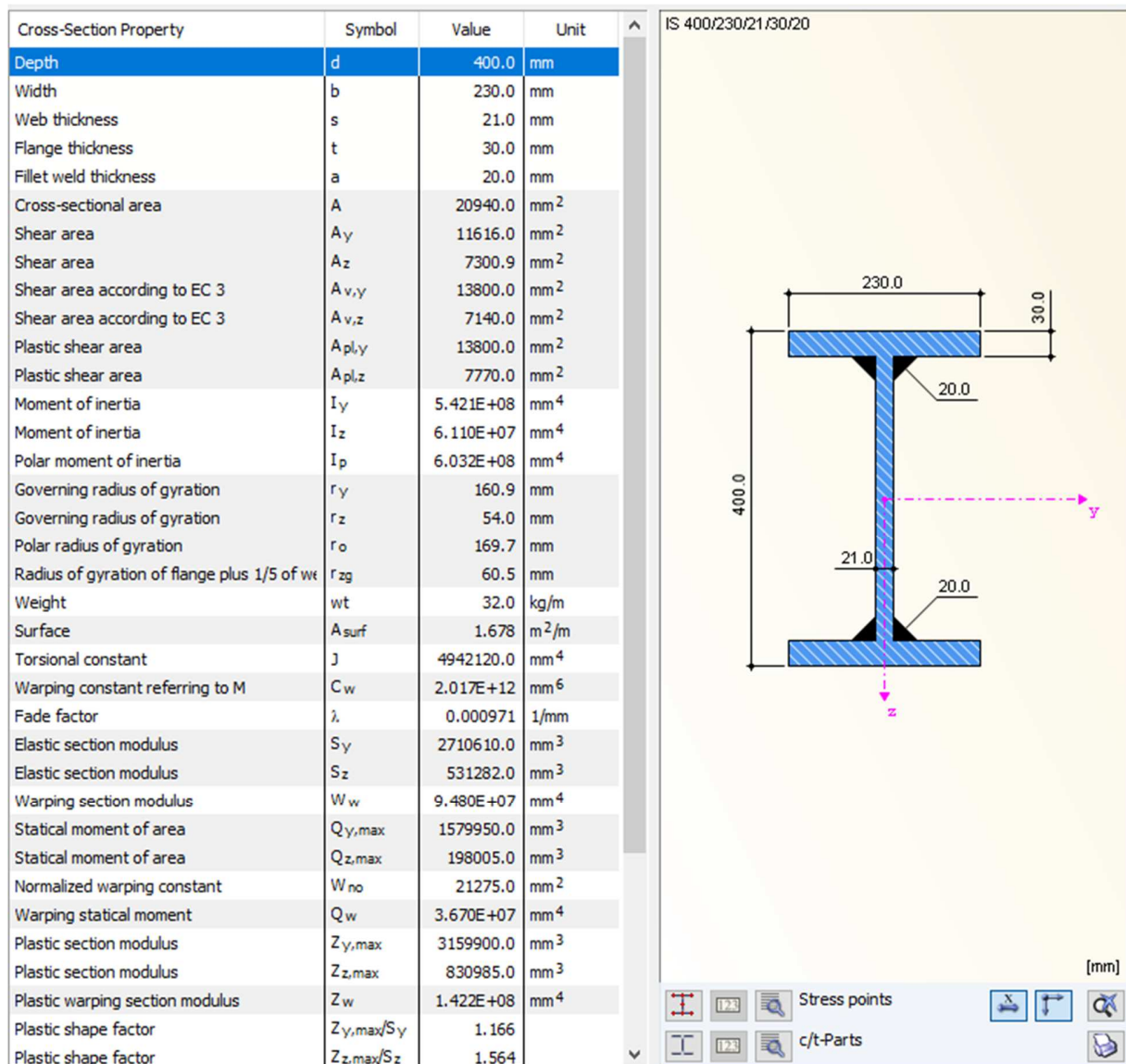
TO 400/300/20/20/20/20

[mm]

Stress points

c/t-Parts

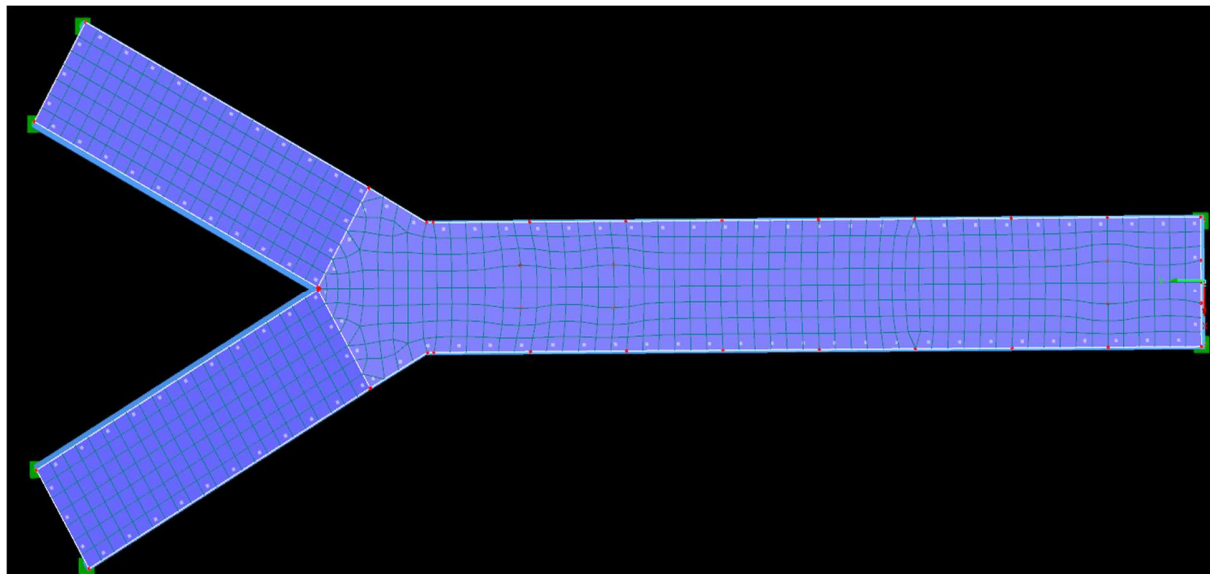
Obr. 52 - Vlastnosti průřezu hlavního nosníku
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 53 - Vlastnosti průřezu příčnicku
[Zdroj: autor diplomové práce]

6.3 Výpočtový model

Model v půdorysu



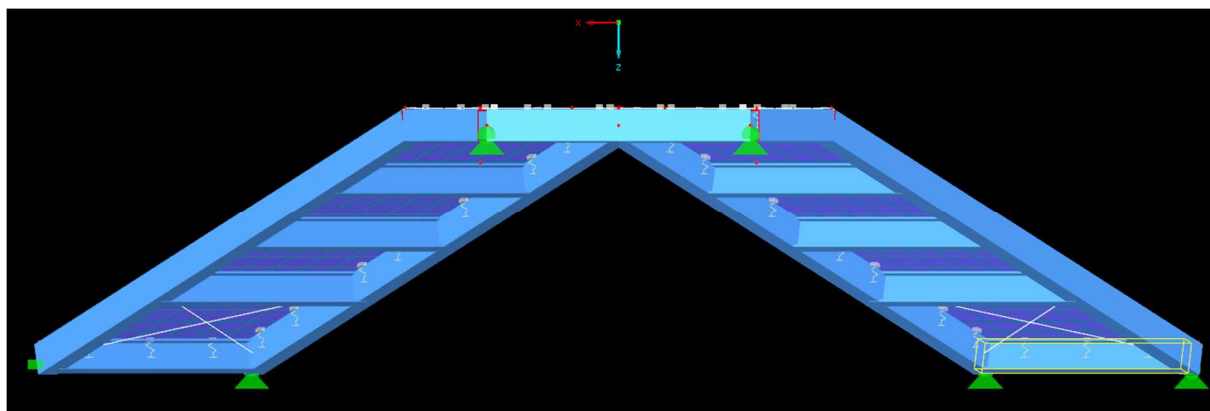
Obr. 54 - Model v půdorysu
[Zdroj: autor diplomové práce]

Model v podélném řezu



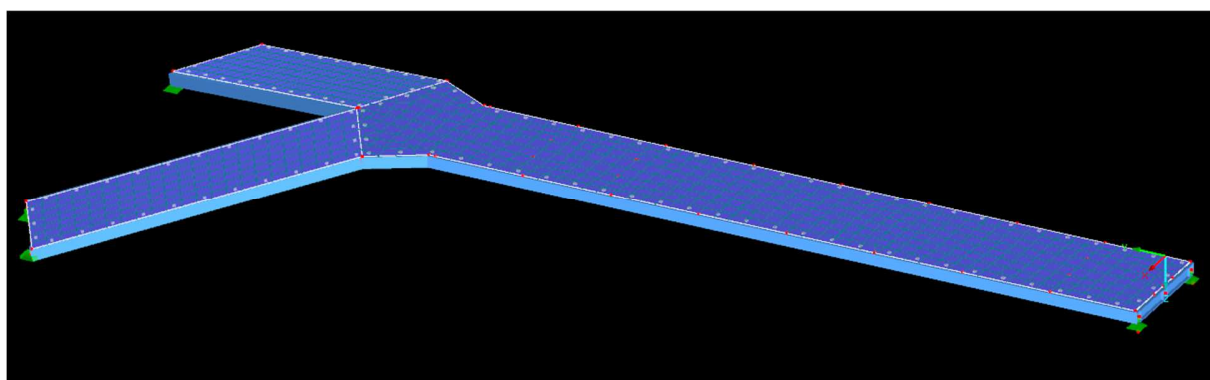
Obr. 55 - Model v podélném řezu
[Zdroj: autor diplomové práce]

Model v příčném řezu



Obr. 56 - Model v příčném řezu
[Zdroj: autor diplomové práce]

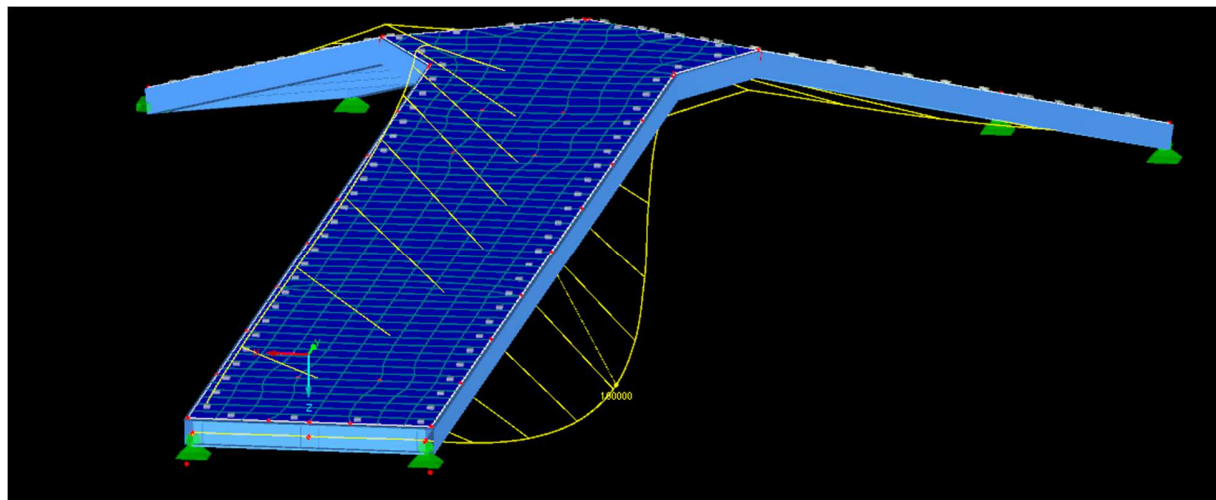
Model v axonometrii



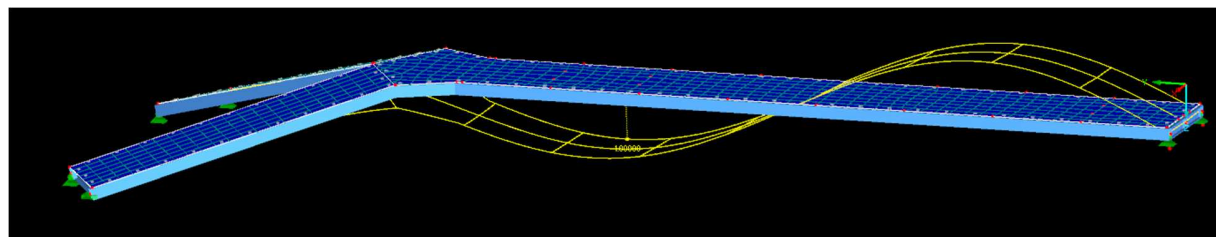
Obr. 57 - Model v axonometrii
[Zdroj: autor diplomové práce]

6.4 Vlastní frekvence a tvary kmitání

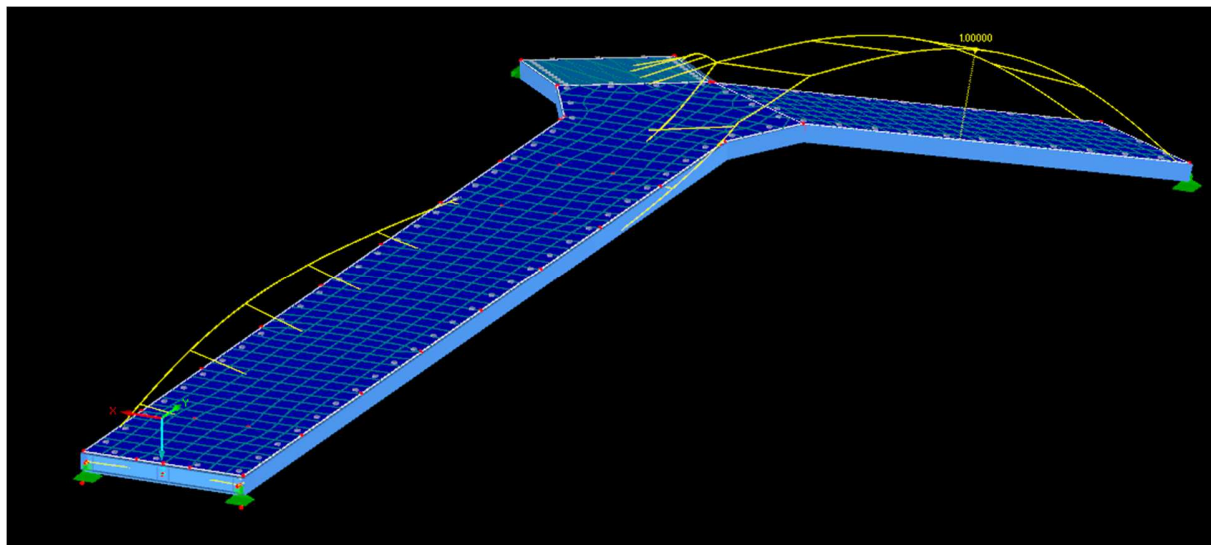
Pomocí programu Dlubal RFEM bylo zjištěno prvních 5 vlastních tvarů kmitání.



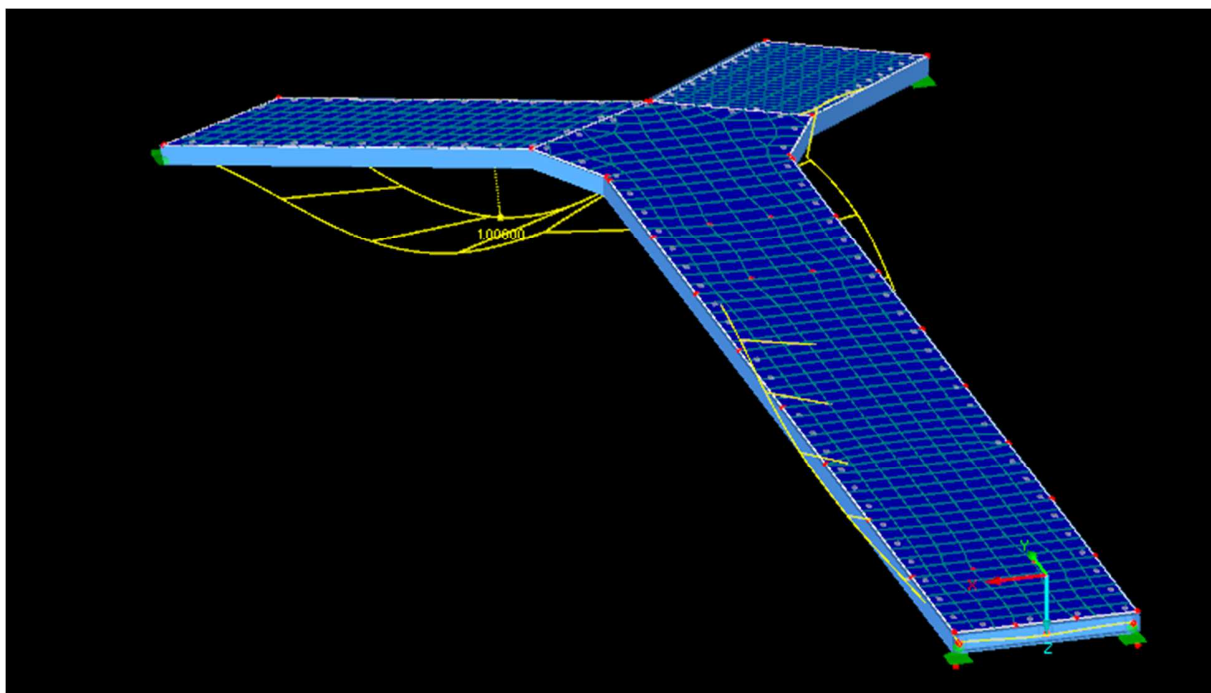
Obr. 58 - 1. vlastní tvar
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 59 - 2. vlastní tvar
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 60 - 3. vlastní tvar
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 61 - 4. vlastní tvar
[Zdroj: autor diplomové práce]

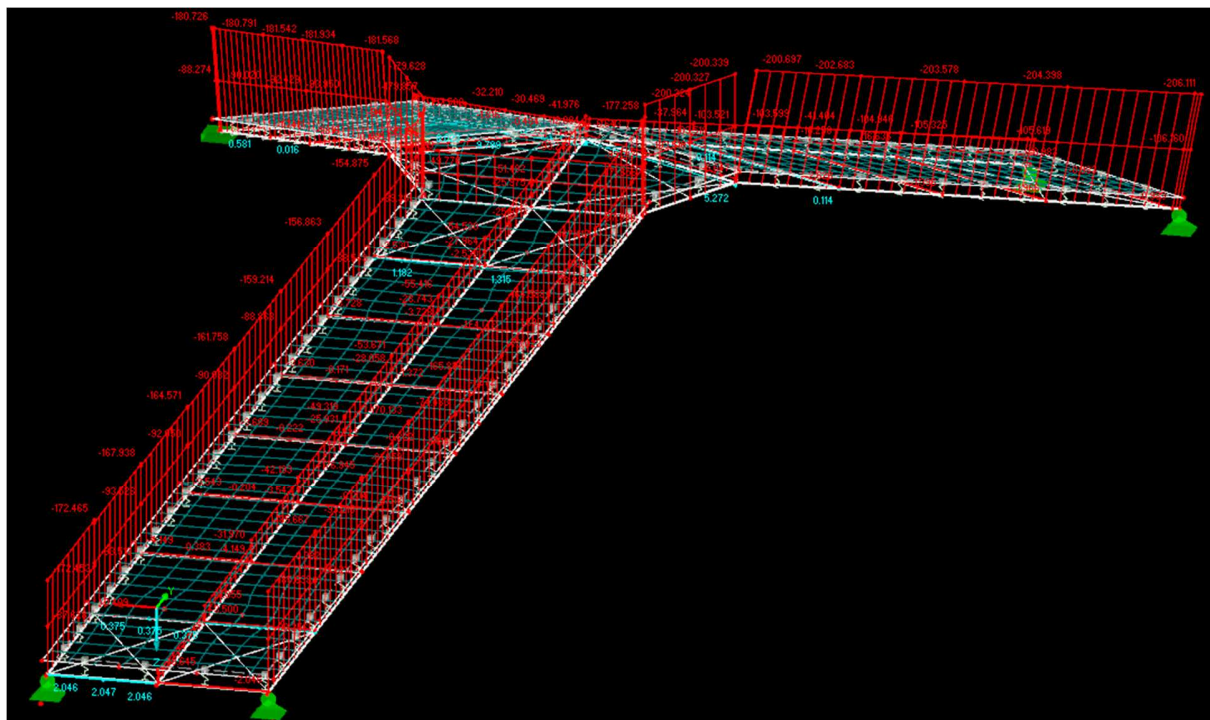
Důvodem spočtení vlastních frekvencí konstrukce je zjištění, zda bude nebo nebude nutné počítat a posuzovat konstrukci na dynamiku. Hodnoty každého tvaru jsou v tab. X

Tvar č.	Vlastní číslo λ [1/s ²]	Úhlová frekvence ω [rad/s]	Vlastní frekvence f [Hz]	Vlastní perioda T [s]
1	4097.86	64.01	10.19	0.098
2	4434.61	66.59	10.60	0.094
3	7001.08	83.67	13.31	0.075
4	9173.43	95.77	15.24	0.066

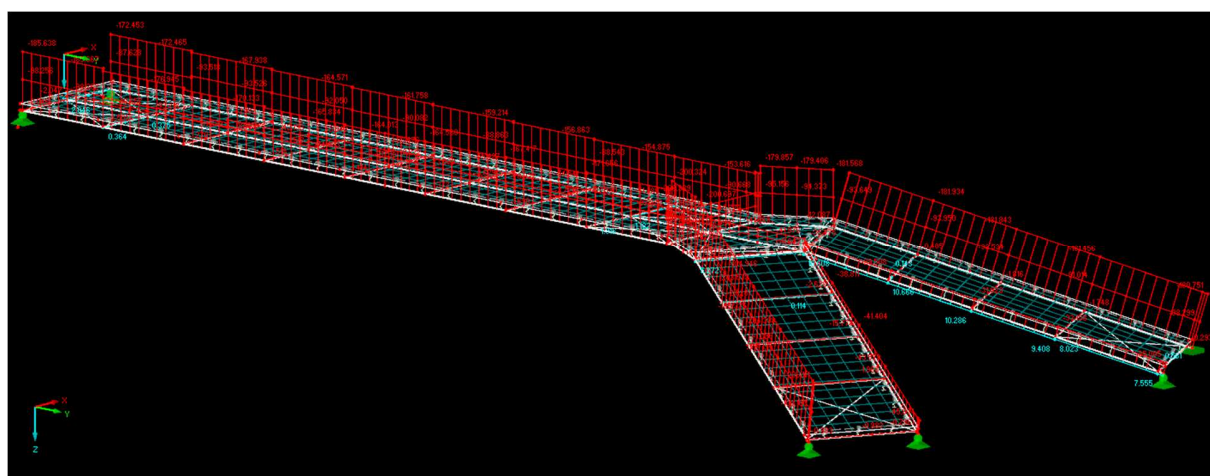
Tab. 9 Vlastní frekvence pro dominantní vlastní tvary
[Zdroj: autor diplomové práce]

Pokud není některá vlastní frekvence svislého kmitání nosné konstrukce lávky v oblasti frekvencí 1,0 až 5,0 Hz a/nebo vlastní frekvence vodorovného kmitání hlavní nosné konstrukce lávky v oblasti frekvencí 0,5 až 2,5 Hz, je podle ČSN EN 1991-2 Zatížení mostů dopravou není nutné provést podrobnou analýzu dynamického chování lávky.

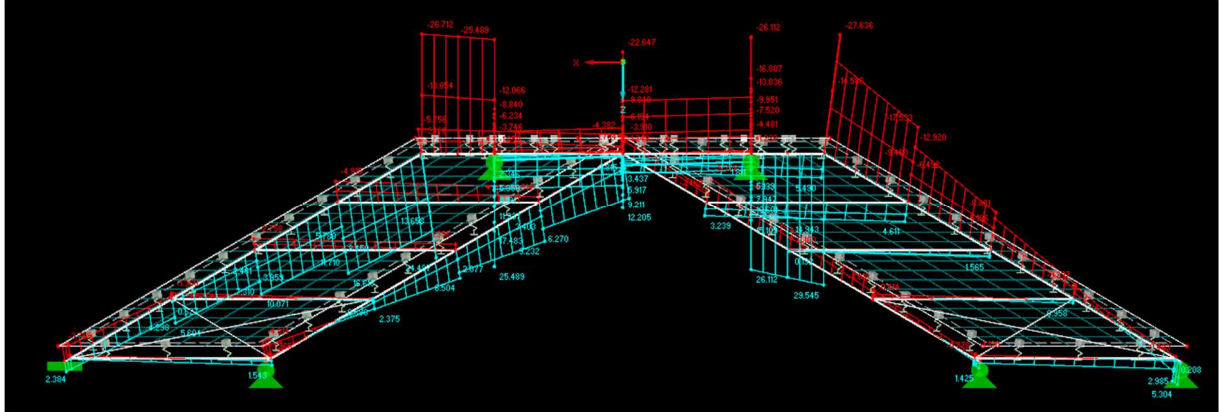
6.5 Vnitřní síly



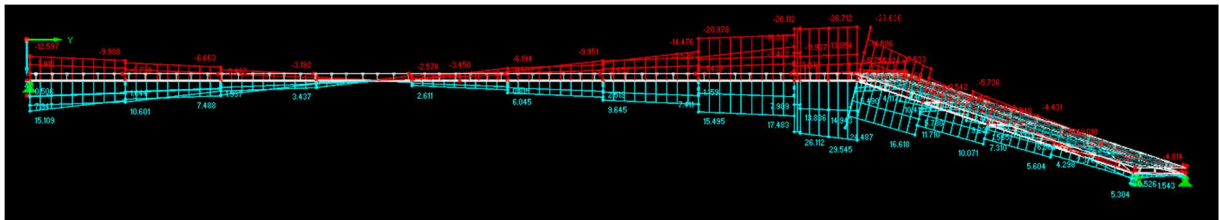
Obr. 62 - Výsledné normálové síly v prutech N[kN]
[Zdroj: autor diplomové práce]



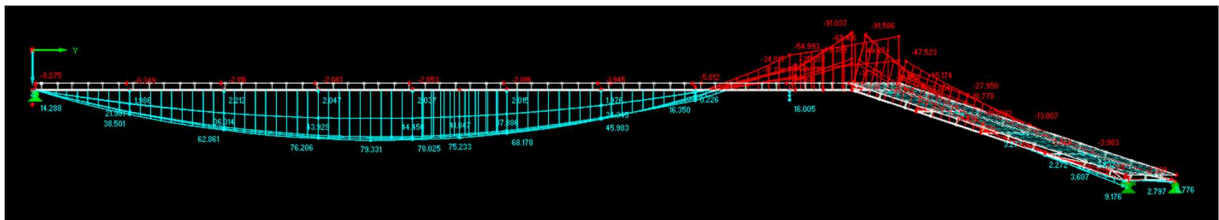
Obr. 63 - Výsledné normálové síly v prutech N[kN]
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 64 - Výsledné posouvající síly v prutech Vz[kN]
[Zdroj: autor diplomové práce]

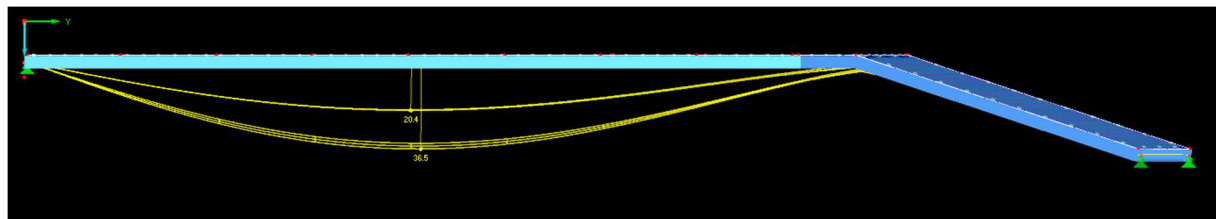


Obr. 65 - Výsledné posouvající síly v prutech Vz[kN]
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obr. 66 - Výsledné momenty v prutech My[kNm]
[Zdroj: autor diplomové práce]

6.6 Posouzení MSP. Průhyb mostu

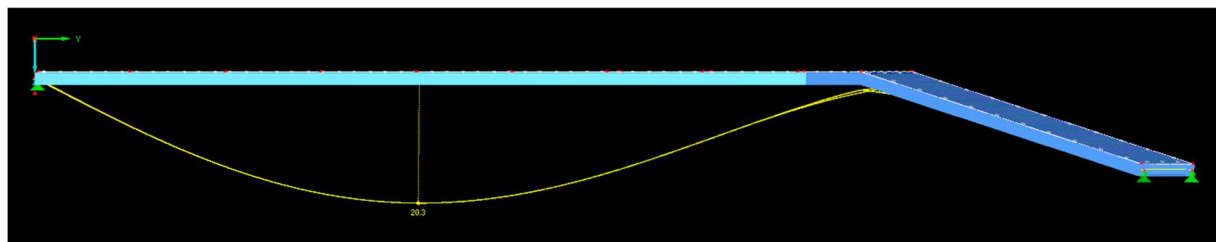


Obr. 69 Průhyb mostu – kombinace MSP1
[Zdroj: autor diplomové práce]

$$L = 37646 \text{ mm}$$

$$\delta = 36.5 \text{ m} \leq \frac{L}{400} = \frac{37646}{400} = 94.1 \text{ mm}$$

Vyhovuje



Obr. - 70 Průhyb mostu – chodci
[Zdroj: autor diplomové práce]

$$L = 37646 \text{ mm}$$

$$\delta = 20.3 \text{ m} \leq \frac{L}{250} = \frac{37646}{250} = 150.6 \text{ mm}$$

Vyhovuje

6.7 Maximální využití materiálů

Load- ing	Surface No.	FE Mesh Point No.	Point Coordinates [m]			Stress [MPa]			Stress Ratio [-]
			X	Y	Z	Symbol	Existing	Limit	
-	Maximum Stresses								
	2	147	0,650	19,000	1,088	t _{max}	1,617	135,677	0,01
	2	147	0,650	19,000	1,088	s _{1,+}	204,685	235,000	<u>0,87</u>
	2	152	-0,650	19,000	1,088	s _{2,+}	97,903	235,000	0,42
	2	152	-0,650	19,000	1,088	s _{1,-}	-97,903	235,000	0,42
	2	147	0,650	19,000	1,088	s _{2,-}	-204,685	235,000	<u>0,87</u>
	2	145	0,000	28,450	1,088	s _{1,m}	-0,082	235,000	0,00
	2	142	0,045	28,528	1,088	s _{2,m}	-0,596	235,000	0,00
	2	147	0,650	19,000	1,088	Seqv,max	177,383	235,000	0,75
	2	142	0,045	28,528	1,088	Seqv,m	0,737	235,000	0,00

Tab. 10 – Využití materiálů při maximálním zatížení
[Zdroj: autor diplomové práce]

Jak vidíme v tabulce X, maximální využití materiálů v této variantě lávky je 87%.

7. Analýza a porovnání kompozitních a ocelových konstrukcí

7.1 Mechanické a fyzikální srovnání

Na základě studovaných a získaných dat můžeme vyvodit následující závěry. Moderní kompozitní materiály nejsou o nic horší než tradiční stavební materiály. A v některých případech ještě lepší. Vzhledem k většímu počtu typů kompozitních materiálů si můžete vybrat ten nejlepší pro každý jednotlivý projekt v každé stavební oblasti.

V této práci byl podrobněji uvažován návrh uhlíkových vláken, takže provedeme srovnávací analýzu tohoto kompozitu a oceli.

Elastický modul uhlíkových kompozitů se pohybuje od 200 do 700 GPa. Například elastický modul vlákna během napínání podél vlákna (typy s vysokou pevností vyrobené na bázi polyakrylonitrilu) je 200 - 250 GPa, typ s vysokým modulem (vyrobené na základě polyakrylonitrilu) - asi 400 GPa. Uhlíková vlákna vyrobená na bázi pryskyřice z tekutých krystalů vykazují některé z nejvyšších modulů pružnosti a jsou 400 - 700 GPa. V oceli se modul pružnosti

liší od 195 GPa (předpjatá ocel) do 210 GPa (konstrukční ocel). Podrobnější analýza mechanických a fyzikálních vlastností zvažujeme v tabulce X:

Charakteristika	Uhlíková vlákna z polyakrylonitrilu			Uhlíková vlákna na bázi pryskyřice z tekutých krystalů	Ocel běžná konstrukční
	s vysokou pevností	vysoké protažení	s vysokým modulem		
Průměr vlákna, nm	$7\cdot 9\cdot 10^3$	$6\cdot 7\cdot 10^3$	$6\cdot 9\cdot 10^3$	$1\cdot 10^5$	-
Modul pružnosti, GPa	239-241	230-256	357-458	384-693	210
Mez pevnosti v tahu, GPa	3,0-3,5	4,0-4,5	2,0-2,5	2,1-2,4	0,52
Objemová tíha, kN/m ³	1,74- 1,78	1,74- 1,78	1,74- 1,78	2	7,85
Součinitel teplotní délkové roztažnosti, 1/K	$2\cdot 6\cdot 10^{-6}$	$2\cdot 6\cdot 10^{-6}$	$2\cdot 6\cdot 10^{-6}$	$2\cdot 6\cdot 10^{-6}$	$1,7\cdot 10^{-5}$

Tab. 11 – Základní parametry uhlíkových vláken a oceli
[Zdroj: autor diplomové práce]

Uhlíkové vlákno má tedy při své nízké hustotě vysokou pevnost. Velmi dobře se používají také jako výztužné materiály v kompozitech. Fyzikální vlastnosti, v závislosti na podmínkách karbonizace a grafitizace uhlíkových vláken, se jejich fyzikální vlastnosti mohou lišit, částečně ovlivňují také kvalitu a typ surovin. Konečná teplota zpracování je rozhodujícím faktorem v jejich konečných vlastnostech.

Uhlíková vlákna mají také vysokou odolnost proti únavě. Mez vytrvalosti na jednotku hmotnosti je poměrně vysoká a přesahuje skleněná vlákna a kovy. Na rozdíl od těchto materiálů - uhlíkové plasty mají mnohem nižší stupeň deformace při stejné úrovni napětí, což snižuje praskání polymerní matrice. Kromě toho vysoká tepelná vodivost uhlíkových vláken přispívá k rozptylu vibrační energie, která snižuje samoohřívání materiálu v důsledku sil vnitřního tření. Také uhlíkové vlákna předčí kovy a některé konstrukční materiály z hlediska odolnosti vůči vibracím a tlumení. Schopnost tlumení je řízena změnou úhlu mezi směry výztuže a působením zatížení.

7.2 Ekonomické srovnání

Když se kompozity začaly objevovat na trhu mostních staveb, jeho významné výhody se staly základem předpokladu, že tento materiál zachytí určitou část trhu. Pro období do roku 2020 je zřejmé, že kompozity stále nejsou preferovaným konstrukčním materiálem pro toto odvětví. Existuje mnoho důvodů, ale hlavním je vysoká počáteční cena kompozitu ve srovnání s tradičními konstrukčními materiály.

Počáteční cena kompozitu je určena následujícími faktory:

- Cena surovin - vysoce kvalitní materiály nemohou být levné;
- Individualita mostů - každý most vyžaduje samostatný projekt. Protože kompozit je relativně nová technologie, existují další náklady na design, které obvykle nejsou u tradičních materiálů, pro které již existují standardní požadavky a postupy návrhu;
- Nízký objem - pro zachycení velké části trhu jsou nutné vysoké objemy.

Mezi další faktory patří skutečná velikost trhu, konkurenční prostředí a rozpočet. Mnoho mostů, u kterých bylo zjištěno, že nejsou pro stavbu mostů odpovídající, je stále více či méně v normálním stavu a lze je používat po celá desetiletí. Potřeba obnovit staré mosty ve venkovských oblastech s nízkou hustotou provozu je také zpožděno o několik let.

Současně se aktivně rozvíjí konkurence. Hodnota betonu se zvýšila díky řadě technologických vylepšení (jako je nízká hustota). Beton je jednoduché, levné a dobře prozkoumané řešení.

Rozpočty jsou často snižovány, což nutí majitele mostů, aby se snažili získat maximální výsledky za minimální peníze. To vede k tomu, že volba leží na nejlevnějších možnostech.

Nákladová položka	Uhlíková vlákna	Ocel
Návrh lávky, tis. USD	122	63
Základy, tis. USD	78	94
Materiál, tis. USD	145	75
Montáž, tis. USD	45	86
Povrchová úprava, tis. USD	6	32
Celkem, tis. USD	396	350

Tab. 12 – Přibližné náklady na návrh a montáž lávky
[Zdroj: autor diplomové práce]

Hlavní výhodou uhlíkových vláken v stavbě mostu je jeho odolnost proti korozi, která zajišťuje dlouhou životnost a minimální údržbu. Většina výhod kompozitu se však týká budoucích období. Jak se stane ve většině případů, nejdůležitější výhody jsou spojeny s vysokou cenou. Ekonomická obtížnost pro většinu majitelů mostů spočívá v tom, že nutno nejprve zaplatit, a teprve potom v budoucnu využít. Vládní organizace obvykle volí nejnižší cenu bez ohledu na budoucí ekonomické přínosy. Vzhledem k vysokému stupni znehodnocení infrastruktury a omezenému financování je obtížné, aby městské organizace platily budoucí výhody. Schopnost státních vlastníků mostů správně posoudit skutečné náklady celého životního cyklu mostů je kritickým okamžikem, který umožní nejnovějším technologiím, jako je uhlíkové vlákno, uvést na trh své výhody a hodnotu.

Dále se podrobněji zabýváme náklady na materiály ve variantách lávek analyzovaných v této práci:

Parametr	Lávka z uhlíkových vláken, výška profilů - 700 mm	Lávka z uhlíkových vláken, výška profilů - 450 mm	Ocelová lávka, výška profilů – 700 mm
Maximální využití materiálů, %	37	87	93
Celková hmotnost materiálů, t	11,12	6,89	54,71
Průměrná cena na materiál, USD	144 560	89 570	75 000

Tab. 13 – Porovnání nákladů na materiály
[Zdroj: autor diplomové práce]

Jak je vidět z tabulky, lávky vyrobené z kompozitů, mají velkou výhodu v hmotnosti konstrukce. Vzhledem k tomu, že uhlíková vlákna jsou pevnější než ocel a jejich hmotnost je téměř pětikrát menší, je možné snížit průřez profilů použitých v projektu. To nám v konečném důsledku zvyšuje náklady na materiály v kompozitní verzi pouze o 19%, s téměř stejnou stabilitou celé struktury a nižší výškou profilu o 75%.

Zavěr

V průběhu výzkumu a výpočtů lze dojít k závěru, že tradiční stavební materiály jsou bezpochyby lídrem ve stavebnictví. Moment se však blíží, když jsou kompozity na bázi chemických vláken pevně podporovány na trhu s materiály a častěji se objevují jako hlavní nosná konstrukce.

Důvodem jsou následující výhody kompozitů:

- Nízká hmotnost. Tyto materiály mají nejčastěji velmi nízkou hmotnost. Například uhlíková vlákna jsou téměř pětkrát lehčí než ocel a sklená vlákna je šestkrát až desetkrát lehčí než železobeton.
- Odolnost proti korozi. U klasických materiálů je koroze velkým problémem a ani protikorozní ošetření nemůže vždy pomoci s dlouhodobým provozem. Protože kompozity nejsou náchylné k korozi, jsou nejlepší alternativou. Tato výhoda je nejdůležitější pro chladné zasněžené oblasti nebo pobřežní oblasti omývané slanou vodou.
- Rychlá instalace. Kompozitní profily jsou vyráběny v továrně a poté dodávány na místo instalace - jednoduchost těchto operací je nespornou výhodou ve srovnání s betonem, který se obvykle betonuje na místě.
- Vysoká pevnost. Kompozity uvažované v této práci nemají nižší pevnost ve srovnání s tradičními materiály, nebo je výrazně překračují.
- Nízké náklady na životní cyklus. Odolnost proti korozi poskytuje nízké náklady na údržbu, což následně snižuje náklady. Kromě toho to vede k delší životnosti, což zase snižuje náklady životního cyklu takového provedení

Bylo také zjištěno, že uhlíkové vlákno je polymerní kompozitní materiál sestávající z uhlíkových vláken umístěných v polymerní matici.

Obecně její fyzikální a mechanické vlastnosti závisí na kvalitě uhlíkových vláken, která se zase dělí na vlákna s nízkým modulem, středním modulem a vysokým modulem. Mezi hlavní fyzikální a mechanické vlastnosti uhlíkových vláken patří vysoká úroveň pevnosti a tuhosti při nízké hustotě materiálu. Současně mají uhlíková vlákna dobrou tepelnou a elektrickou vodivost. Za zmínku stojí také nízký koeficient tepelné roztažnosti a vysoká úroveň únavové pevnosti. Mezi

jeho speciální vlastnosti patří chemická inertnost a radiační odolnost. Toto definuje uhlíkové vlákno jako poměrně moderní materiál, který je požadován v různých oborech.

Docela důležitým faktem je, že během vícenásobných destruktivních testů je charakter deformace uhlíkových vláken charakterizován plynulým nárůstem jak stávajících, tak nově vznikajících a hlubokých defektů. Vady vláken snižují jeho pevnost. Vzhledem k malé velikosti defektů a jejich velkému počtu je celková definice defektů spojena s velkými obtížemi.

V tomto ohledu existuje vývoj v nedestruktivním testování uhlíkových vláken a existuje již mnoho takových metod. Obecně byly experimentální testy plastické deformace uhlíkových vláken úspěšné.

Výpočty nakonec ukázaly, že uhlíková vlákna mohou nahradit ocel v budovách mostů. Také s ohledem na jejich pevnostní charakteristiky vyžadují menší profily, což významně snižuje celkovou hmotnost konstrukce a náklady v některých fázích výstavby a provozu. Existuje možnost použití základů s menšími rozměry, menšími zdvihacími a masivními jeřáby a také ušetřit na povrchové úpravě vlivy prostředí.

Použitá literatura, normy a software

- použitá literatura

- [1]. JANČÁŘ, JOSEF. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. ISBN: 80-214-2443-5.
- [2]. EHRENSTEIN, W. G. Polymerní kompozitní materiály. 1. vydání. Praha: Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3]. PETRIE, EDWARD M. globalspec.com. [online]
<<http://www.globalspec.com/reference/60915/203279/chapter-2-epoxy-resin-chemistry>>.
- [4]. BARBEO, EVER J. Introduction to composite materials design. Boca Raton : CRC Press, 2011.
- [5]. Roving. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, poslední revize 20.12.2011. [cit. 2012-01-23]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Roving>>.
- [6]. Bosch, P.: Ocelové konstrukce v nejlepších stavbách roku. In: Konstrukce 1/2007, s. 21–20.
- [7]. Sommer, B.: Ocel – opomíjený materiál v českém stavebnictví. In: Ocelové konstrukce 4/2001, s. 46–48.
- [8]. Izolace-info. izolace-info.cz. [online]
<https://www.isolace-info.cz/aktuality/9505-pozarni-odolnost-stavebnich-konstrukci>
- [9]. Sommer, B.: Výrobové inovace ocelářského průmyslu pro stavební konstrukce. In: Ocelové konstrukce 6/2001, s. 52–54.
- [10]. Basaltex a.s., <http://www.basaltex.cz> [online], [cit. 2014-12-11], dostupné z http://www.basaltex.cz/cedic/cedic_charakteristika_cz.htm
- [11]. Svitap J.H.J spol.s.r.o., <http://www.svitap.cz> [online], [cit. 2015-01-30], dostupné z <http://www.svitap.cz/kompozitni-tkaniny/>

- použité normy

- [12]. ČSN EN 1090-2+A1 - Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí – Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce

- [13]. ČSN EN 1990 - Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí – oprava 1,2,3,4; změny A1,Z1,Z2,Z3, Z4; NA ed.A; ed. 2
- [14]. ČSN EN 1991-2-1 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí. Část: Zatížení mostů dopravou ed.2
- [15]. ČSN EN 1991-1-3 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí. Část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem – oprava 1; změny A1, Z1,Z2,Z3,Z4, Z5; NA ed.A; ed.2 – změna A1
- [16]. ČSN EN 1991-1-4 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem – oprava 1,2,3; změny Z1,Z2,Z3; NA ed.A - změna A1; ed. 2
- [17]. ČSN EN 1991-1-5 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-5: Obecná zatížení – Zatížení teplotou – oprava 1,2; změny Z1,Z2; NA ed.A
- [18]. ČSN EN 1991-1-7 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-7: Obecná zatížení – Mimořádná zatížení – oprava 1; změny A1, Z1; NA ed.A
- [19]. ČSN EN 1993-2-1 - Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 2: Ocelové mosty
- [20]. ČSN EN 1993-1-1 -Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby – oprava 1,2; změna A1, Z1, Z2, Z3; NA ed.A, ed. 2 – oprava 1, změna A1

- použitý software

- [21]. Autocad 2019, Autodesk, Inc
- [22]. Dlubal RFEM 5.21, Dlubal software, Inc
- [23]. Microsoft office, Microsoft, Inc
- [24]. Corel Draw 2018, Corel, Inc

Přílohy

Příloha č.1 - Výkresová dokumentace varianty č.1 až varianty č.3