

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra mechaniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh ocelové lávky pro pěší

Plzeň, 2015

Bc. Hana Lesová

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:

Podpis autora:

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Martinovi Zajíčkovi, Ph.D., za odborné vedení, nesmírnou trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnoval. Dále děkuji také Ing. Petru Keslovi za poskytnutí odborných rad z oblasti stavitelství. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat své rodině a přátelům, kteří mě během studia podporovali.

Anotace

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem ocelové lávky pro chodce. V práci je zmíněn design lávek v České republice a ve světě. Protože řešená problematika navazuje na bakalářskou práci z roku 2012, je zde provedeno porovnání původní a současné konstrukce. V souvislosti s tím jsou uvedeny nové designové návrhy lávky. Nově jsou uvažovány i další zatěžovací stavy od náhodných a proměnných účinků, tj. od účinku větru, sněhu, námrazy a vozidla údržby. Cílem předkládané práce bylo navrhnout hlavní nosné prvky lávky s ohledem na Evropské normy používané při návrhu stavebních konstrukcí. Byly realizovány statické výpočty s využitím metody dílčích součinitelů a dynamické, kde byla dělána modální analýza. Předběžné návrhy rozměrů konstrukčních prvků byly provedeny pomocí zjednodušeného 2D modelu. Následný zpřesňující výpočet byl proveden s pomocí 3D modelu.

Annotation

The master thesis is about footbridge design. The background includes the designs of footbridges in the Czech Republic and abroad. Because the work builds on the bachelor thesis of 2012, it includes a description of the design differences compared with those in the undergraduate work. Related on this fact there are given new design sketch of footbridge. The paper describes all load cases that were considered on the footbridge – the effect of wind, snow, ice and maintenance vehicle. The aim of this thesis was to devise the main bearing parts of a footbridge with regard to the European Standards which are used for the structural design. Calculations and verification were executed using the partial factor method for static analysis and modal analysis for dynamic calculations. Preliminary proposals of structural elements were made in a simplified 2D model. Subsequent spelling calculation was performed on the 3D model.

Obsah

1 Úvod	7
2 Design lávek	9
2.1 Příklady lávek ze zahraničí	9
2.2 Příklady lávek v České republice.....	11
3 Konstrukce lávky a její design	12
3.1 Popis konstrukce	12
3.2 Designové skici	16
4 Zatěžovací stavy a jejich kombinace	18
4.1 Klasifikace zatěžovacích stavů	18
4.2 Hodnoty zatížení	26
4.3 Kombinace zatěžovacích stavů	26
5 Výpočtové modely	28
5.1 Obecná pravidla pro návrh konstrukce	28
5.1.1 Mezní stav únosnosti	28
5.1.2 Mezní stav použitelnosti	29
5.1.3 Modální analýza.....	30
5.2 Model 2D	30
5.3 Model 3D	33
6 Analýza výsledků	38
6.1 Model 2D	38
6.1.1 Statické výpočty.....	38
6.1.2 Modální analýza.....	41
6.2 Model 3D	42
6.2.1 Statické výpočty.....	42
6.2.2 Modální analýza.....	46
7 Závěr	50
Seznam použité literatury	52
Příloha A	53

1 Úvod

Předkládaná diplomová práce úzce navazuje na práci bakalářskou, která byla obhájena autorkou v červnu 2012. Tehdy bylo cílem práce navrhnout hlavní nosné prvky lávky pro chodce, a to konkrétně hlavní nosníky, příčníky a vedlejší podélníky. Statické výpočty byly prováděny v souladu s Evropskými normami. Po analýze výsledků, které byly dosaženy, si autorka byla vědoma, že výpočet rozměrů lávky byl v určitých směrech zjednodušen, a to zejména proto, že by kompletní analýza přesahovala rámec bakalářské práce. Ohledně zatížení byl například uvažován pouze vliv vlastní tíhy a pohybu osob. Nebyl uvažován vliv sněhu, větru, námrazy a dalších mimořádných zatížení. Dynamické výpočty rovněž nebyly do bakalářské práce zahrnuty. A proto se autorka v této diplomové práci vrací k návrhu ocelové lávky pro chodce, přičemž vychází ze získaných znalostí z práce předchozí.

Cílem této práce je tedy opět navrhnout rozměry hlavních nosníků, příčníků a vedlejších podélníků s ohledem na Evropské normy dle mezního stavu použitelnosti a únosnosti a to za pomoci metody dílčích součinitelů. Uvažovány jsou nejběžnější zatěžovací stavy, kterým je věnována samostatná kapitola.

Diplomová práce je rozdělena do několika hlavních částí. V první části se autorka zabývá designem lávek. Na základě provedené rešerše byly vybrány zajímavé zahraniční a domácí příklady, které jsou doprovázeny krátkým komentářem včetně vyobrazení.

Dále je uveden popis konstrukce celé lávky. Oproti bakalářské práci bylo nutné provést konstrukční změny, a to zejména v oblasti mostovky a středové branky. V kapitole je možné porovnat konstrukci z bakalářské práce s konstrukcí současného návrhu. Uvedeny jsou rozdíly mezi původními a nově navrženými konstrukčními prvky. V kapitole jsou zmíněny základní rozměry a použité materiály. Součástí kapitoly jsou i designové návrhy vlastní lávky, které byly rovněž změněny v souladu s upravenou konstrukcí.

Čtvrtá kapitola je zaměřena na stanovení zatěžovacích stavů. Celkový počet těchto stavů byl nakonec zvolen v počtu 21. Uvažována je jednotlivě vlastní tíha, sníh, vítr, námraza, užité zatížení od osob, od zábradlí a v neposlední řadě také zatížení od vozidla údržby, které se na lávce může vyskytnout. Charakteristické hodnoty výše uvedených zatížení byly stanoveny dle Evropských norem a následně byly upraveny pomocí dílčích součinitelů zatížení. Charakteristické hodnoty potom byly použity jako vstupní hodnoty jak pro 2D, tak pro 3D model.

Úvodem páté kapitoly jsou nastíněna obecná pravidla pro návrh konstrukce. Stručně je naznačen princip metody dílčích součinitelů a jsou zde zmíněny oba mezní stavy, které jsou při ověřování konstrukce používány (mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti). Dále jsou v souladu s normou zmíněny informace, které jsou

důležité pro modální analýzu konstrukce. V dalších částech kapitoly je popis 2D a 3D výpočtového modelu. Uvedeny jsou postupy, jakými byly modely sestaveny.

Šestá kapitola popisuje samotné výpočty a následné výsledky statické a dynamické analýzy pro 2D a 3D model lávky. Jsou zde uvedeny v pořadí, v jakém byly postupně získávány na základě změn rozměrů lávky.

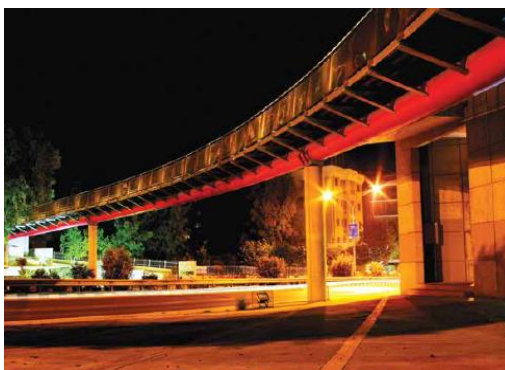
2 Design lávek

Návrh lávek je pro řadu architektů a designerů možností, jak mnohdy velkolepě ukázat své nápady a myšlenky, nad kterými občas „zůstává i rozum stát“. Následující kapitoly se zabývají designem lávek v zahraničí i v České republice. Dle názoru autorky byly vybrány ty nejpozoruhodnější případy.

2.1 Příklady lávek ze zahraničí

Jedna ze zajímavých lávek se nachází na ostrově Kypr a říká se jí „Cyta Footbridge“. Konstrukce lávky má zakřivený tvar a je podepřena několika betonovými sloupy. Její konstrukce je zobrazena na obr. 2.1.

Mezi další designerský příklad patří lávka s názvem „The Bridge of Peace“, neboli Lávka míru. Postavena byla v roce 2010 v Tbilisi, centru hlavního města Gruzie. Na lávku je pozoruhodný pohled nejenom ve dne, ale i v noci (obr. 2.2), kdy je osvětlena tisíci svítelnami. Lávka má velice specifický tvar, který údajně připomíná mořské stvoření. Tento efekt byl dosažen speciální střešní konstrukcí, která byla pokryta 1208 výkonnými LED panely, které v noci osvětlují oba břehy a tvoří symbolické mírové pouto.



Obr. 2.1: Cyta Footbridge na ostrově Kypr, převzato z [6]



Obr. 2.2: The Bridge of Peace v Tbilisi, převzato z [6]

I při návštěvě Singapuru lze vidět opravdu skvostný příklad architektury, a to lávku pro pěší připomínající hada vlnícího se přes zalesněné údolí (obr. 2.3). Lávka je vyrobena ze sedmi masivních ocelových oblouků. Jedná se o nejvyšší pěší most v Singapuru a vede nad rušnou třídou Henderson Road, odtud taky jeho anglický název Henderson Waves, neboli Hendersonovy vlny.

Krásy Japonska od roku 1673 tvoří i lávka „Kyntai-kyo“. Poslední, již 15. rekonstrukce v řadě, proběhla v roce 2004. Tato lávka je zejména unikátní svojí konstrukcí, kterou tvoří pět dřevěných oblouků. Její nevšední vzhled je zobrazen na obr. 2.4.

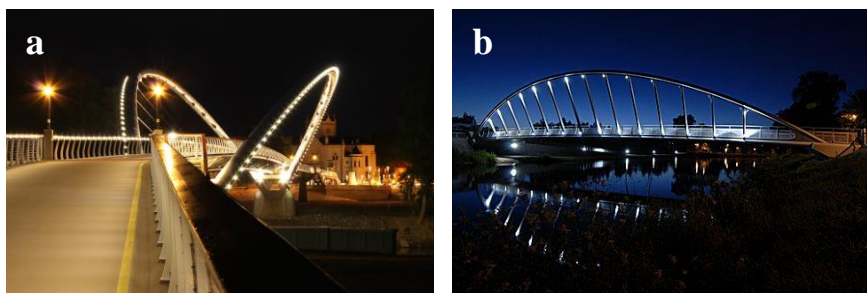
V roce 2011 byla v Maďarsku ve městě Szolnok otevřena nová lávka pro pěší a cyklisty zobrazena na obr. 2.5 (a) s názvem Mayfly. Svým designem připomíná lávku v Českých Budějovicích přes řeku Vltavu, která je zobrazena na obr. 2.5 (b). V obou případech se jedná o obloukovou konstrukci, kde jsou roviny oblouků netradičně pootočené mimo vertikální roviny.



Obr. 2.3: Lávka Henderson Waves v Singapuru, převzato z [6]



Obr. 2.4: Lávka Kyntai-kyo v Japonsku, převzato z [6]



Obr. 2.5: Lávka MayFly ve městě Szolnok (a), lávka přes Vltavu v Českých Budějovicích (b), převzato z [6]

2.2 Příklady lávek v České republice

I Česká republika je bohatá na designové skvosty v oblasti lávek. Příkladem je lávka přes řeku Jizeru v Benešově u Semil (obr. 2.6). Lávka je navržena jako visutá příhradová konstrukce. Zajímavostí je, že lávka byla vyrobena za 1 týden a smontována za 10 dní.



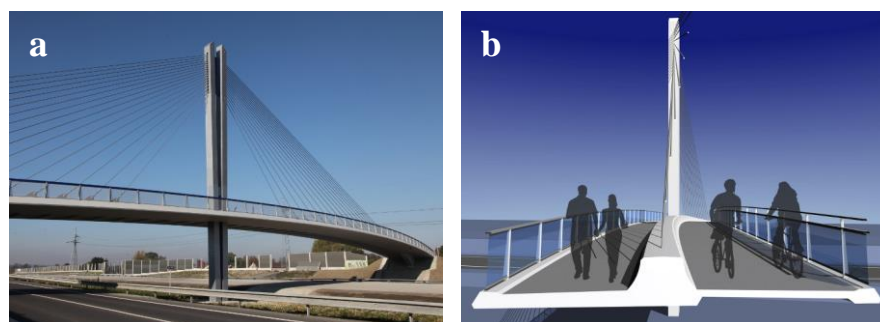
Obr. 2.6: Dřevěná lávka přes řeku Jizeru v Benešově u Semil, převzato z [14]



Obr. 2.7: Lávka přes dálnici D8, převzato z [16]

Jedna z opravdu nevhodných lávek se nachází v severních Čechách a umožňuje pěším přechod mezi Chlumcem a Všebořicemi přes dálnici D8 (obr. 2.7). Originální tvar Vierendeelova nosníku zvýrazňuje jasná oranžová barva, která povrchově chrání nosné trubkovité části.

V roce 2011 byla zrealizována lávka přes dálnici D47 u Bohumína. Zavěšenou lávku tvoří páteří nosník o dvou polích s oboustrannými konzolami, který je v ose zavěšen na ocelovém sloupu (obr. 2.8 (a)). Zajímavostí na této konstrukci je, že na jedné konzole je situována pěší doprava a na druhé konzole cyklistická, viz obr. 2.8 (b).



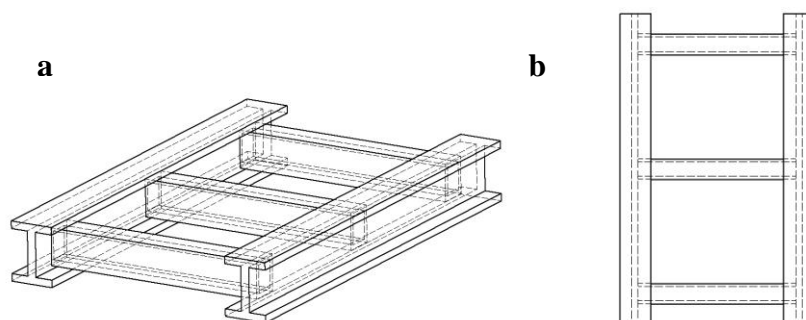
Obr. 2.8: Lávka přes dálnici D47 u Bohumína (a), rozdělení pěší a cyklodopravy na lávce (b), převzato z [15]

3 Konstrukce lávky a její design

Při návrhu lávky bylo zapotřebí brát v úvahu i její umístění. Lávka bude postavena na severním Plzeňsku mezi obcemi Třemošná a Záluží. V roce 2011 zde byl vybudován silniční obchvat, který obyvatelům zkomplikoval pěší spojení mezi obcemi. Je tedy nutné vybudovat lávku, která původní cestu plně nahradí. Z důvodu nově vybudovaného obchvatu, který je v těchto místech v hlubokém zářezu, bude lávka ve výšce 7 m nad vozovkou. Lávka je uvažována pouze pro chodce, nikoliv pro cyklisty. Její šířka je s ohledem na tuto skutečnost 3 m. Vzdálenost přemostění je v dané lokalitě 60 m. Při výběru typu lávky byly v bakalářské práci zváženy všechny možné varianty a typy, které jsou v dnešní době dostupné a používané. Jako nejpříjemnější varianta, s ohledem na lokalitu, délku překlenutí a využití samotné lávky, byla vybrána lávka zavěšená. Tento návrh byl vybrán jako finální nejenom proto, že tento typ konstrukce, z hlediska výrobního, patří mezi méně náročné, ale také proto, že po finanční stránce bude rozpočet lávky méně nákladný. Konstrukce lávky je tvořena mostovkou, vozovkou, nosným sloupem a obloukovou brankou. Ze středové branky jsou zavěšené pruty do mostovky. Pro betonový nosný pilíř byl uvažován beton třídy B20 s hodnotou Youngova modulu 310 GPa, mezí pevnosti v tahu 0,9 MPa a hustotou 2 300 kg/m³. Pro zbytek nosné konstrukce je použita ocel třídy S235. Tato ocel je vhodná pro stavbu mostních konstrukcí a je u ní zaručena dobrá svařitelnost. Hodnota Youngova modulu pro tento materiál byla uvažována 210 GPa. Hodnota meze kluzu byla 235 MPa. Pro stanovení hmotností jednotlivých nosných částí bylo zapotřebí uvažovat hustotu oceli $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$. Vrchní část vozovky je tvořena vrstvou hydroizolace a asfaltu s hustotou 1 300 kg/m³. Spodní část je potom tvořena vlnitým plechem a vrstvou betonu.

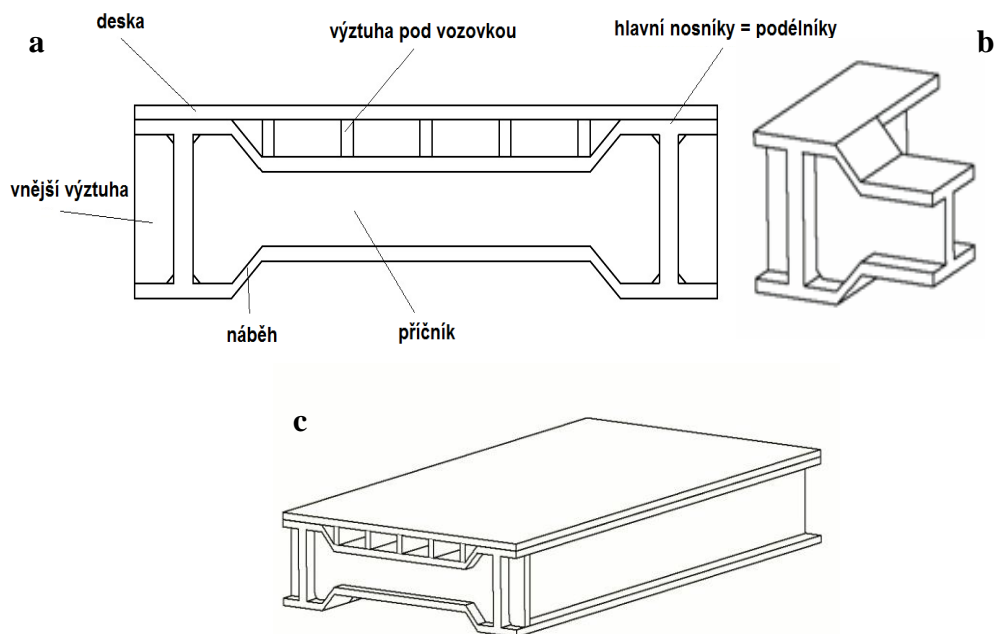
3.1 Popis konstrukce

V bakalářské práci byly detailně zvažovány varianty vybraných konstrukčních uzlů [10]. Protože se konstrukce roštového typu (obr. 3.1) osvědčila, byla vybrána jako finální varianta pro návrh i do diplomové práce.

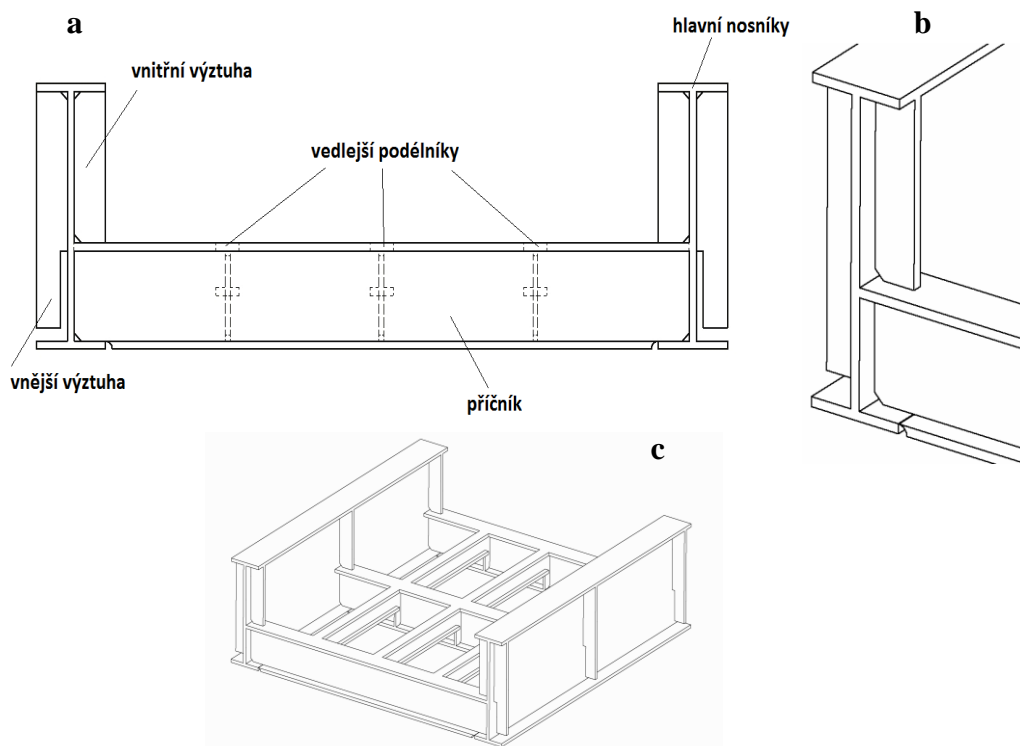


Obr. 3.1: Ukázka roštové konstrukce - 3D pohled (a), půdorys (b)

Výpočty v bakalářské práci však ukázaly, že konstrukce mostovky (obr. 3.2) je příliš tuhá a vlivem zatížení dochází k velkému namáhání míst se svary. S ohledem na tuto skutečnost bylo rozhodnuto provést několik konstrukčních úprav a použít pro stavbu mostovky vhodnější variantu (obr. 3.3). Konstrukci lávky nyní tvoří dva hlavní nosníky neboli podélníky. Profil těchto nosníků je volen HEB [5]. Podélníky jsou spojeny příčnicí profilu IPE [5]. Tyto příčnice již nemají náběhy, jako na obr. 3.2 (b). V místě, kde je příčník napojen na mostovku, je z vnější strany přidána výztuha, viz obr. 3.3 (b), aby nedocházelo k boulení mostovky. Výztuha je v místě příčníku přidána také z vnitřní strany. Příčnice jsou k podélníkům navařené. Aby v místech výztuh nedocházelo ke vzniku velké koncentrace napětí, jsou výztuhy opatřeny trojúhelníkovými výřezy. Příčnice jsou napojeny od spodního okraje pásnice hlavního podélníku, jak je patrné z obr. 3.3 (a). Pro vyztužení konstrukce byly přidány ještě tzv. vedlejší podélníky, které jsou umístěny mezi příčnicí. Je předpokládáno, že spojení je provedeno vždy pomocí dvou šroubových spojů, které jsou nad sebou ve vertikálním směru. Proto je toto spojení chápáno ve výpočtovém modelu jako kloubové. Tento typ spojení je oproti svařování, které bylo uvažováno v bakalářské práci, mnohem poddajnější. Vedlejší podélníky profilu IPE [5] jsou napojeny od horního okraje pásnice příčníku, viz obr. 3.3 (a). Prostorové modely jsou vidět na obr. 3.2 (c) a 3.3 (c).

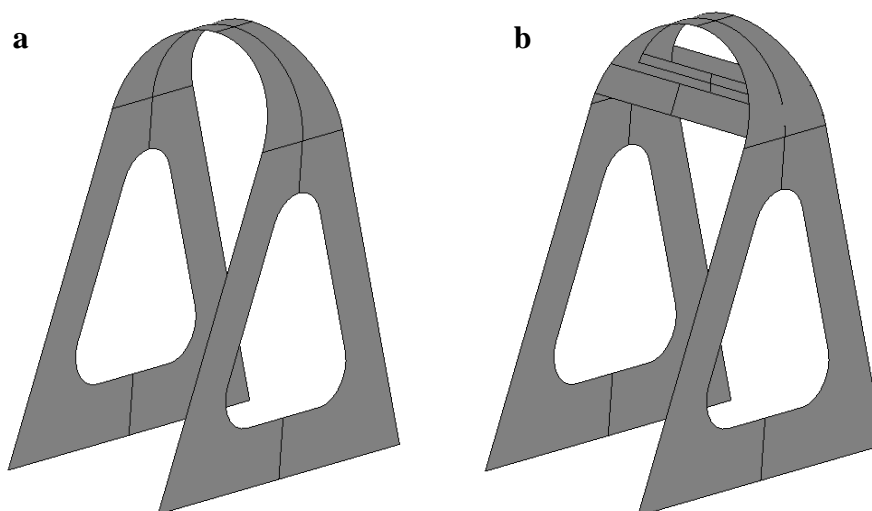


Obr. 3.2: Schéma konstrukce lávky z bakalářské práce (a), příčník s náběhy (b), 3D pohled na konstrukci (c)

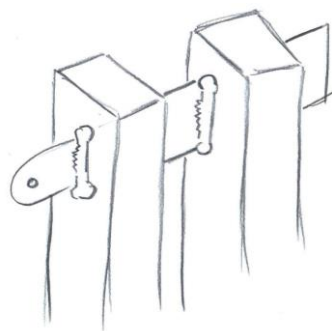


Obr. 3.3: Schéma konstrukce lávky použité pro diplomovou práci (a), příčník s výztuhou (b), 3D pohled na konstrukci (c)

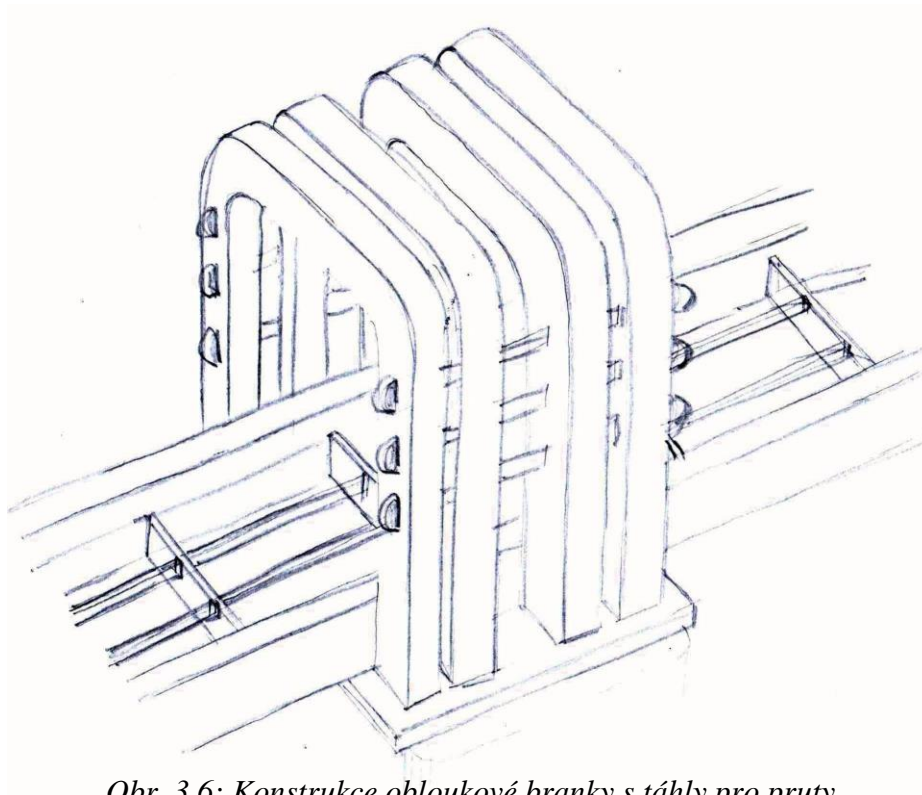
Konstrukční změny bylo nutné provést i u středové branky. Ta byla v bakalářské práci uvažována jako ocelová pásovina trojúhelníkového tvaru s tloušťkou 0,014 m (obr. 3.4 (a)). Po prvních analýzách byly na středové brance zjištěny vysoké hodnoty napětí a velké deformace v oblasti horní části branky. Z toho důvodu byly na brance přidány příčky, které konstrukci vyztužily, jak je zobrazeno na obr. 3.4 (b). Na základě doporučení byla konstrukce branky zcela změněna. Branka je nyní tvořena čtyřmi obloukovými dutými křivými pruty, které jsou mezi sebou vyztuženy táhly (obr. 3.5). Z těchto táhel jsou zavěšeny pruty, vždy po dvou z jednoho oka táhla. Skici s výše uvedenými konstrukčními úpravami jsou vidět na obr. 3.6 a 3.7.



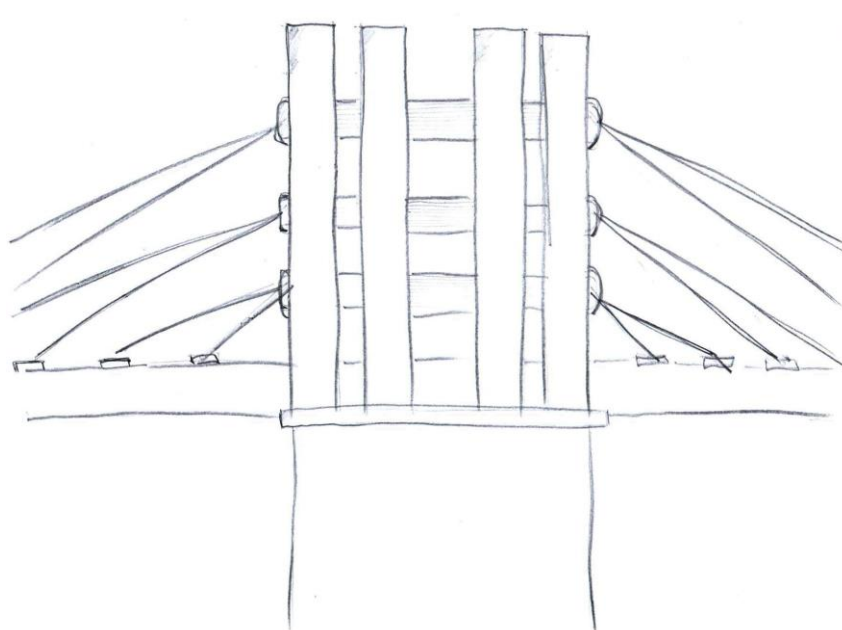
Obr. 3.4: Konstrukce branky pro bakalářskou práci (a), konstrukce branky po vyztužení (b)



Obr. 3.5: Táhla pro vyztužení branky a uchycení prutů (výřez z konstrukce)



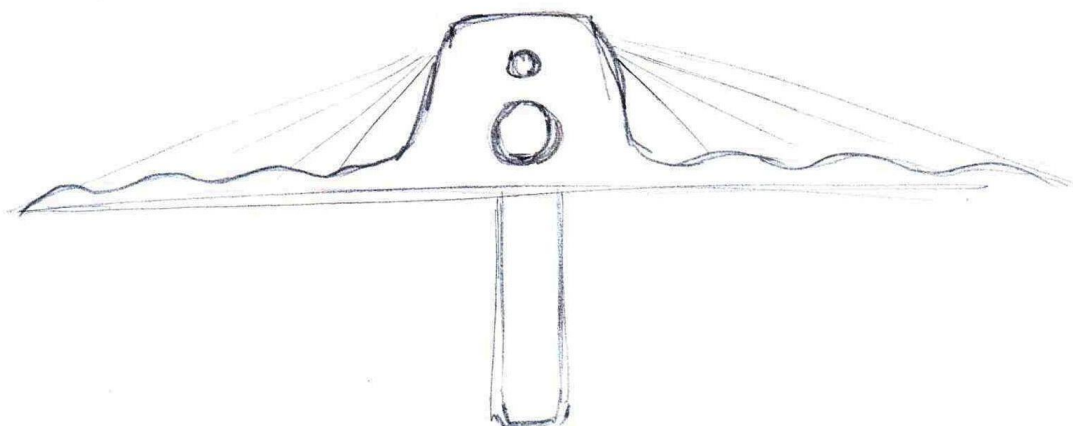
Obr. 3.6: Konstrukce obloukové branky s táhly pro pruty



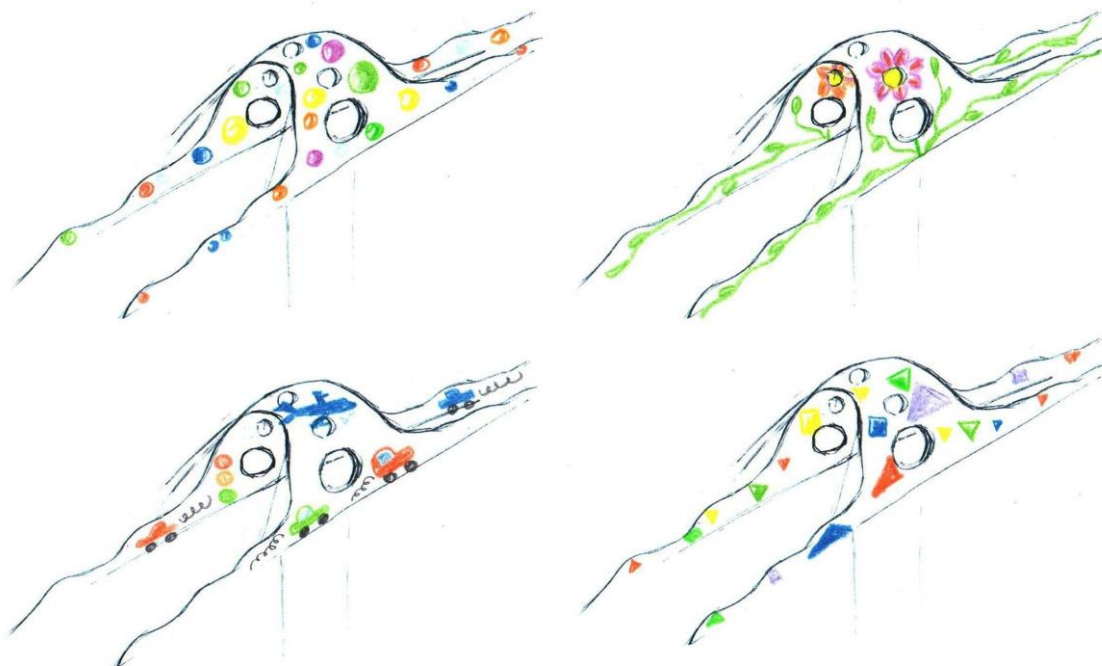
Obr. 3.7: Boční pohled na upravenou konstrukci středové části lávky

3.2 Designové skici

Pro zachování původního designového vzhledu (obr. 3.4) je ocelová konstrukce středové branky zakrytována. Je předpokládáno, že kryt bude vyroben z lehkého plastu, který je vhodný z důvodu snadné manipulace při práci a také s ohledem na finanční náklady. Po obvodu krytu branky jsou provedena odlehčení, aby branka nepůsobila robustně. V místech připojení prutů k mostovce je kryt vždy lehce zvlněn, jak je zobrazeno na obr. 3.8. Při tvorbě designového návrhu byla respektována skutečnost, že lávka je umístěna poblíž rodinných domů. Uživatelé lávky budou ve značné míře rodiny s dětmi. Proto bylo navrženo i několik variant s dětskou tematikou (obr. 3.9).

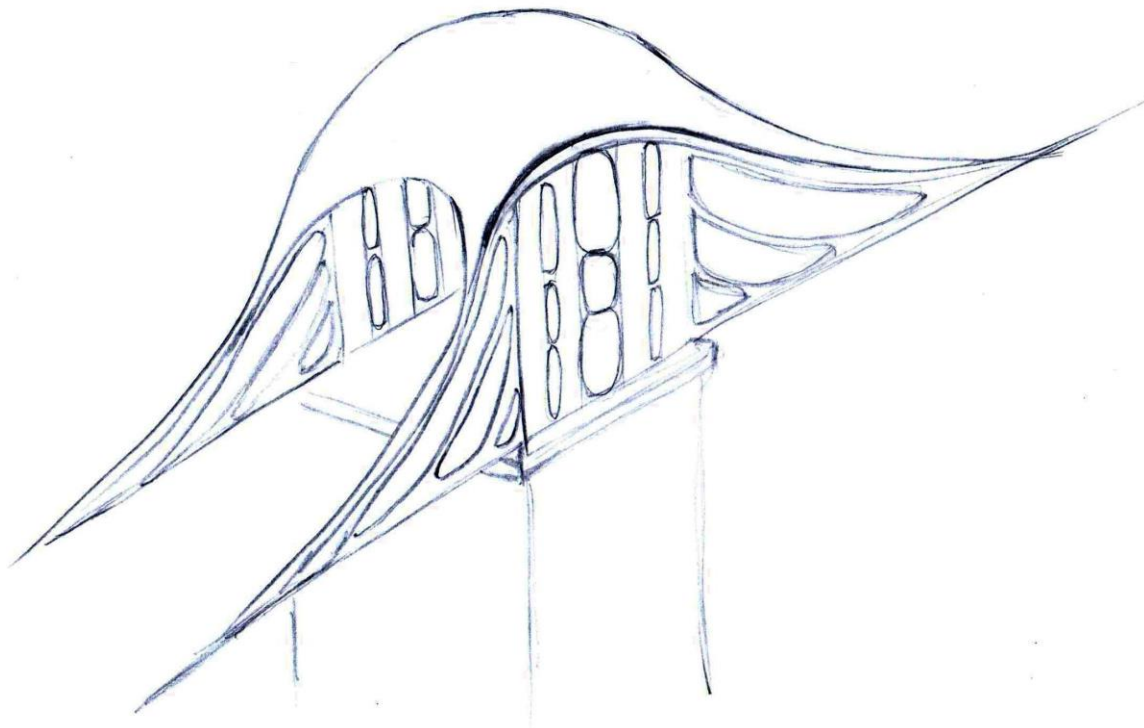


Obr. 3.8: Boční pohled na designový návrh lávky



Obr. 3.9: Designové návrhy lávky s dětskými motivy

Původní záměr byl, aby lávka nenarušila svoji konstrukcí krajinu a byla tak v souladu s okolní přírodou. Z obrázků si lze všimnout, že středová branka je proto podstatně nižší než uvažovaný nosný sloup. Po zakrytí konstrukce trochu připomíná designový návrh národní knihovny od Jana Kaplického. Je možno v ní vidět, stejně tak jako u knihovny, chobotnici s chapadly. Na základě této podobnosti byly zpracovány další návrhy (obr. 3.10), kde byla zakomponována i zmíněná chobotnice (obr. 3.11).



Obr. 3.10: Designový návrh lávky



Obr. 3.11: Designový návrh lávky s chobotnicí

4 Zatěžovací stavy a jejich kombinace

V bakalářské práci byl uvažován vliv pouze od stálého zatížení, které je reprezentováno vlastní tíhou a od tzv. užitého zatížení, které je způsobeno pohybem osob na lávce. Vlivy od dalších druhů zatížení nebyly s ohledem na požadovaný rozsah bakalářské práce uvažovány. V této práci byl počet uvažovaných zatížení rozšířen a celkový počet zatěžovacích stavů je 21. Ve skutečnosti nedochází k výskytu jen jednoho zatěžovacího stavu, ale vždy jsou uvažovány v příslušných kombinacích současně.

4.1 Klasifikace zatěžovacích stavů

V následující části jsou detailně definovány zatěžovací stavy, které jsou při návrhu lávky uvažovány. Jsou zde určeny charakteristické hodnoty dle normy [7] a případné koeficienty pro použití metody dílčích součinitelů.

- Zatěžovací stav 1 – vliv vlastní tíhy

Pro zatěžovací stav ZS1 je uvažována vlastní hmotnost všech částí lávky včetně betonové části na mostovce. Vlastní hmotnost mostovky, sloupu a branky byla formálně zadána jako měrné zatížení:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (4.1)$$

kde g je gravitační zrychlení $9,81 \text{ m/s}^2$ a ρ je příslušná hustota daného materiálu v kg/m^3 . Je zde uvažována i 18 cm silná vrstva betonu. Toto zatížení bylo zadáno jako spojité zatížení v oblasti vozovky. Tyto hodnoty jsou pro výpočet násobeny dílčím součinitelem zatížení 1,35.

- Zatěžovací stav 2 – vliv vlastní tíhy od mostovky

Pro zatěžovací stav ZS2 je uvažována vlastní hmotnost krytu nad mostovkou, čímž se rozumí vrstva asfaltu a použitá hydroizolace. Tato vrstva byla uvažována o celkové výšce 8 cm. Zatížení bylo v oblasti vozovky uvažováno jako spojité. Měrná velikost tohoto zatížení v kN/m^2 byla počítána jako:

$$\gamma = 0,08 \cdot g \cdot \rho \quad (4.2)$$

kde ρ je průměrovaná hodnota hustoty asfaltu a hydroizolace. Pro výpočet je tato hodnota násobena dílčím součinitelem zatížení 1,35.

- Zatěžovací stav 3 – vliv vlastní tíhy od zábradlí

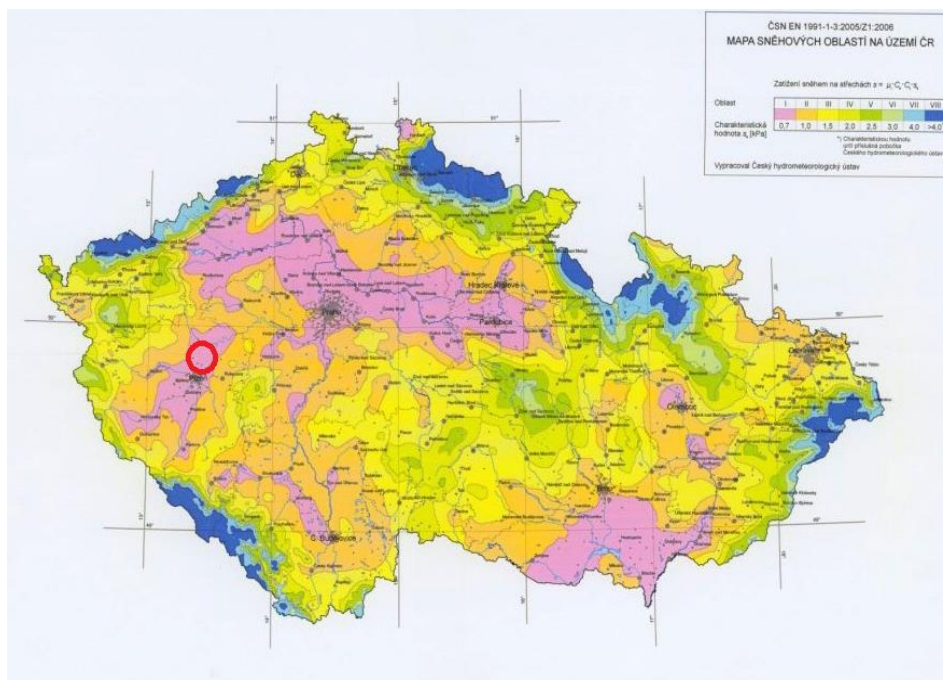
Pro zatěžovací stav ZS3 je uvažována vlastní hmotnost zábradlí. V tomto případě se jedná o měrné zatížení o velikosti $0,75 \text{ kN/m}^2$, viz [7]. Toto zatížení bylo zadáno jako spojité zatížení a jeho hodnota je násobena dílčím součinitelem zatížení 1,35.

- Zatěžovací stav 4, 5, 6 – vliv sněhu

Zatěžovací stavy 4, 5 a 6 zahrnují účinky od zatížení sněhem. Dle [4] je uvažováno zatížení sněhem do nadmořské výšky 1500 m. Tento typ zatížení je uvažován jako proměnný krátkodobý, působící na průmět do vodorovné roviny. Rovnoměrné zatížení je určeno dle vztahu:

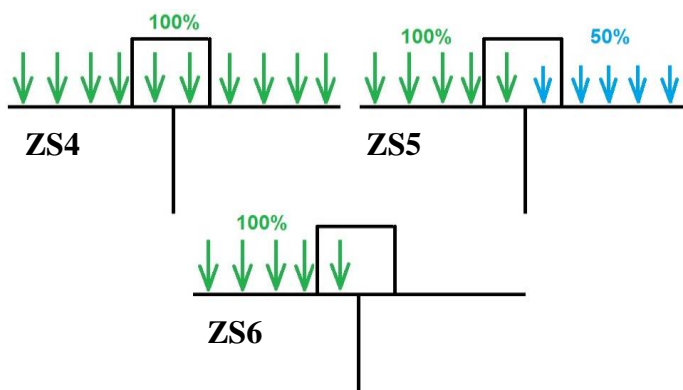
$$S = C_e \cdot C_t \cdot s_k \cdot \mu_i, \quad (4.3)$$

kde C_e je součinitel expozice sfoukání sněhu (obvykle roven 1), C_t je součinitel tepla odtávání sněhu (obvykle roven 1), s_k je charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi, (udávaná v kN/m^2) a μ_i je tvarový součinitel, který závisí na sklonu plochy působení. Hodnota s_k je určena dle mapy sněhových oblastí (obr. 4.1), která zobrazuje roční maxima pro dobu návratu jednou za 50 let. Červeně je vyznačena oblast umístění lávky. Pro navrhovanou lávku se jedná o oblast č. I, kde hodnota s_k je rovna $0,75 \text{ kN/m}^2$. Tvarový součinitel μ_i je pro sklon 0° roven hodnotě 0,8.



Obr. 4.1: Mapa sněhových oblastí v ČR, převzato z [8]

Zatěžovací stav ZS4 odpovídá případu, kde je vozovka lávky pokryta sněhem po celé délce o 100% hodnotě. Zatěžovací stav ZS5 odpovídá situaci, kdy na jedné polovině lávky působí zatížení od sněhu v hodnotě 50% a na druhé polovině v hodnotě 100%. Zatěžovací stav ZS6 pak odpovídá skutečnosti, kdy 100% zatížení působí pouze na jedné polovině lávky. Uvažované stavy jsou jednoduše naznačeny na obr. 4.2. Pro výpočet jsou hodnoty v případě 100% zatížení násobeny dílčím součinitelem zatížení 0,8, v případě 50% hodnoty pak součinitelem 0,4.



Obr. 4.2: Zatížení sněhem

- Zatěžovací stav 7, 8, 9 – vliv větru

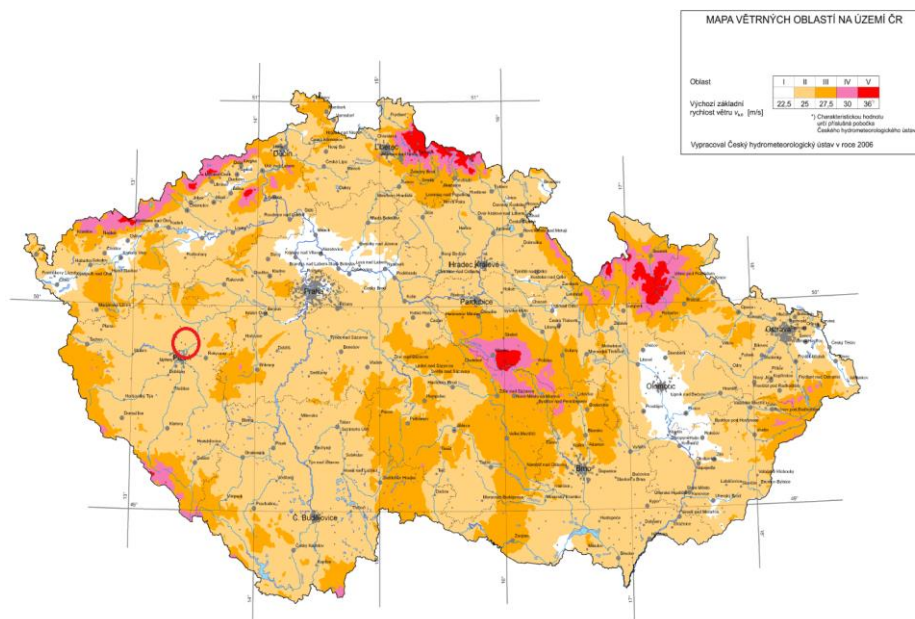
Zatěžovací stavy 7, 8 a 9 zahrnují účinky od působení větru. Příručka [7] zahrnuje výpočet zatížení větrem budov do výšky a mostů do rozpětí 200 m. Tento typ zatížení je opět uvažován jako proměnné krátkodobé zatížení. Působení tlaku je uvažováno kolmo na plochu. Tlak větru ve výšce z (výška nad terénem) je uvažován dle následujícího vztahu:

$$w_e = q_b \cdot c_e(z_e) \cdot c_{pe}, \quad (4.4)$$

kde q_b je základní střední tlak větru (uvažován v N/m^2), $c_e(z_e)$ je součinitel expozice určující vliv terénu a výšky nad terénem a c_{pe} je součinitel aerodynamického tlaku. Hodnota pro základní střední tlak větru je určena dle vztahu:

$$q_b = 0,5 \cdot \rho \cdot v_b^2, \quad (4.5)$$

kde $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ je měrná hmotnost vzduchu a v_b je charakteristická desetiminutová střední rychlost ve výšce 10 m nad terénem. Tato hodnota je určena mapou větrových oblastí, kde je červeně vyznačeno území umístění lávky (obr. 4.3). Pro oblast umístění lávky je tato hodnota 25 m/s.



Obr. 4.3: Mapa větrných oblastí, převzato z [9]

Pro výpočet hodnoty součinitele expozice je nutné nejprve určit součinitel drsnosti $c_r(z)$, který je možno chápat jako:

$$c_r(z) = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right), \quad (4.6)$$

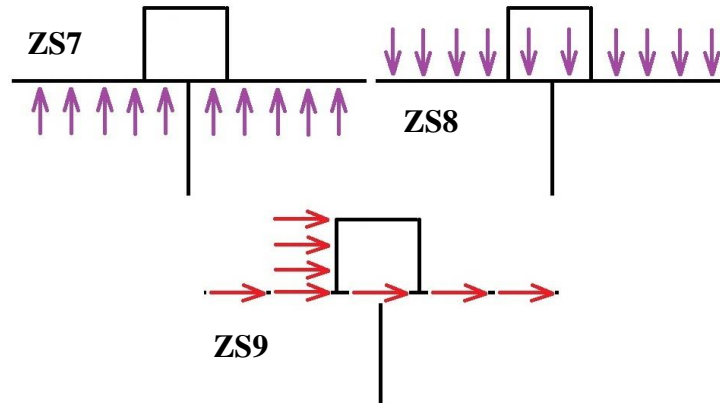
kde z_0 je drsnost terénu v metrech. Typy terénu jsou rozděleny do čtyř skupin I-IV. Navrhovaná lávka bude umístěna v terénu typu III, který zahrnuje předměstské stavby, průmyslové oblasti a malé zemědělské stavby. Pro tento typ terénu je $z_0 = 0,3$. Hodnota $z_{0,II} = 0,05$. Součinitel expozice udává závislost působení větru na výšce a typu terénu. Matematicky lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$c_e(z_e) = \left(1 + 7 \cdot \frac{k_1}{c_0 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} \right) \cdot (c_0 \cdot c_r(z))^2, \quad (4.7)$$

kde k_1 je součinitel turbulence (obvykle roven 1) a c_0 je součinitel orografie udávající vliv kopců (obvykle roven 1). Z výše uvedených veličin byla určena charakterická hodnota tlaku větru w_e . Pro výpočet je tato hodnota násobena dílčím součinitelem zatížení 1,5.

Zatěžovací stav ZS7 představuje situaci, kde vítr působí na mostovku ve směru kolmo zespoda. Oproti tomu zatěžovací stav ZS8 odpovídá případu, kdy vítr působí na mostovku ve směru kolmo seshora. Zatěžovací stav ZS9 nahrazuje stav, kdy vítr působí

ve směru mostovky ve vodorovném směru a kolmo na sloup a středovou branku. Uvažované stavy jsou opět jednoduše naznačeny na obr. 4.4.

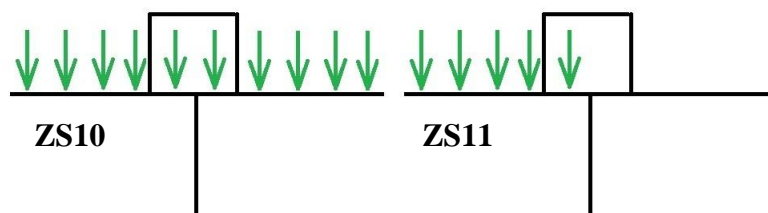


Obr. 4.4: Zatížení větrem

- Zatěžovací stav 10, 11 – vliv osob

Zatěžovací stav 10 a 11 představuje situaci, kdy na lávce působí účinek od tzv. užitého zatížení. Tento typ zatížení byl uvažován při analýze v bakalářské práci. Toto proměnné zatížení je charakterizováno pomocí užitných ploch, které jsou rozděleny do jedenácti kategorií dle toho, jak jsou používány. V případě navrhované lávky se jedná o kategorii C5 – Plochy s vysokou koncentrací osob. Charakteristická hodnota pro rovnoměrné zatížení ploch C5 je podle normy [7] rovna $q_k = 5,0 \text{ kN/m}^2$. Pro výpočet je tato hodnota násobena dílčím součinitelem zatížení 1,5.

Zatěžovací stav ZS10 uvažuje působení vlivu od osob na lávce po celé délce 60 m. Zatěžovací stav ZS11 představuje vliv pohybu od osob na lávce pouze na její jedné polovině, naznačeno na obr. 4.5.

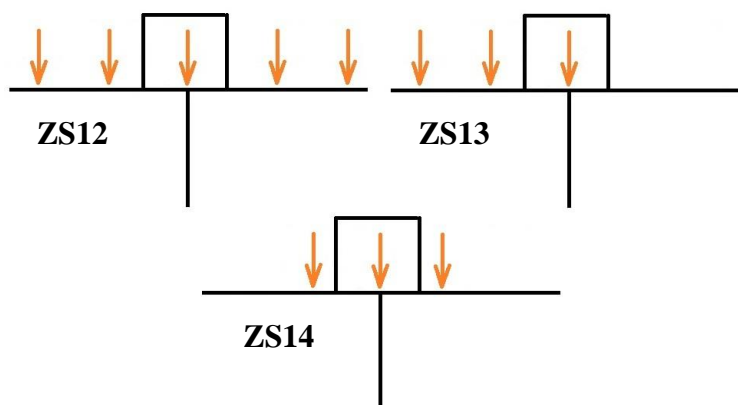


Obr. 4.5: Užitné zatížení

- Zatěžovací stav 12, 13, 14 – vliv osob s lokálními účinky

Podobně jako u stavu 10 a 11, i zde je uvažováno užité zatížení od pohybu osob na lávce. Je zde ovšem provedeno ověření lokálně a to v podobě působících sil, které jsou od sebe vzdáleny 3 m. Hodnota pro lokální ověření soustředěného zatížení je dle [7] rovna $Q_k = 4,5$ kN. Pro výpočet je tato hodnota násobena dílčím součinitelem zatížení 1,5.

Zatěžovací stav ZS12 odpovídá situaci, kdy osamělé síly jsou rovnoměrně rozmístěny po celé délce lávky. Stav ZS13 pak uvažuje působící síly pouze na jedné polovině. V případě zatěžovacího stavu ZS14 jsou síly umístěny rovnoměrně a souměrně kolem středové branky v délce rovné polovině lávky. Uvažované stavy jsou naznačeny na obr. 4.6.



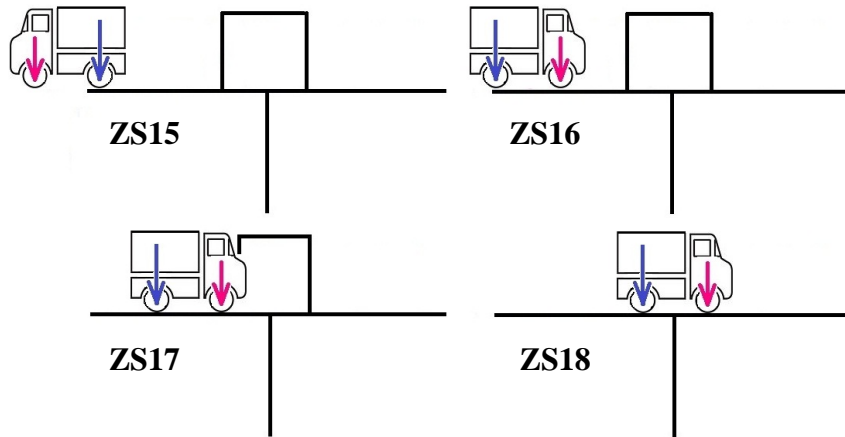
Obr. 4.6: Užité zatížení – lokální účinky

- Zatěžovací stav 15, 16, 17, 18 – vliv vozidla údržby

Následující zatěžovací stavy nahrazují účinky od vozidla údržby, které se na lávce může vyskytovat. Jako obslužné vozidlo se rozumí vozidlo o hmotnosti do 12 t. Zatížení je v případě 2D modelu nahrazeno dvěma osamělými silami, které jsou od sebe ve vzdálenosti 3 m. Větší síla $Q_{sv1} = 80$ kN představuje působení zadní nápravy vozidla. Menší síla $Q_{sv2} = 40$ kN nahrazuje působení od přední nápravy. V případě 3D modelu se jedná o 4 místa dotyku. Zatížení je v tomto případě nahrazeno dvěma silami o velikosti 40 kN a dvěma silami o velikosti 20 kN. Stavy 15-18 se odlišují pouze v rozmístění výše uvedených sil. Hodnoty sil jsou násobeny dílčím součinitelem zatížení 1,5.

Zatěžovací stav ZS15 uvažuje působení větší síly v místě levé podpěry a menší síly mimo lávku. Tento stav má simulovat situaci, kdy vozidlo opouští prostor lávky a kola zadní nápravy jsou stále nad úrovní podpěry. Zatěžovací stav ZS16 již zahrnuje obě působící síly na lávce. Větší síla je umístěna nad levou podpěrou a menší ze sil je o 3 m před ní. Tento stav představuje situaci, kdy vozidlo vjíždí na lávku a je již celé nad

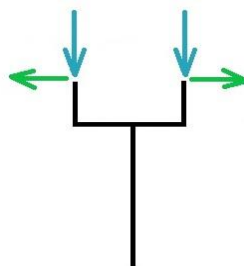
jejím prostorem. Zatěžovací stav ZS17 představuje obdobnou situaci, ale vozidlo je nyní již ve čtvrtině lávky. Zatěžovací stav ZS18 pak odpovídá situaci, kdy vozidlo je přesně v polovině délky lávky. Uvedené stavy jsou zobrazeny na obr. 4.7.



Obr. 4.7: Zatížení od vozidla údržby

- Zatěžovací stav 19 – vliv zábradlí

Zatěžovací stav ZS19 zahrnuje působení sil od zábradlí. Tato situace nastane v případě, kdy se osoby, pohybující se na lávce, o zábradlí opřou. V tomto případě je uvažováno působení dvou sil. Svislá síla ve směru osy zábradlí o velikosti 0,75 kN/m a síla působící kolmo na osu zábradlí o velikosti 0,5 kN/m (obr. 4.8).



Obr. 4.8: Zatížení od zábradlí

- Zatěžovací stav 20 – vliv námrazy

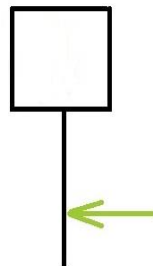
Zatěžovací stav ZS20 popisuje zatížení od námrazy na konstrukci. Charakteristickou hodnotu zatížení od námrazy lze vyjádřit jako:

$$V_{gl2n} = \chi_{gl} \cdot t_{gl} \cdot \gamma_{gl} \cdot \mu_{gl}, \quad (4.8)$$

kde χ_{gl} je součinitel výšky (zvolen 1 dle výšky 7 m nad terénem), t_{gl} je základní tloušťka námrazy (dle oblasti lehká námraza 5 mm), μ_{gl} je tvarový součinitel vyjadřující vliv tvaru prvku na tloušťku námrazy (zvolen 0,5) a γ_{gl} je objemová tíha námrazy (obvykle 9 kN/m³).

- Zatěžovací stav 21 – vliv nárazu do nosného pilíře

Zatěžovací stav ZS21 představuje situaci nárazu vozidla do nosného pilíře. Dle normy [7] je zapotřebí uvažovat sílu F_{dx} o velikosti 1 000 kN, která působí ve směru jízdy vozidel, a sílu F_{dy} o velikosti 500 kN působící ve směru kolmém. Působení sil nemusí být dle normy uvažováno současně a mělo by být uvažováno ve výšce mezi 0,5 – 1,5 m nad terénem. V našem případě je uvažována pouze síla ve směru jízdy vozidel (obr. 4.9).



Obr. 4.9: Zatížení od nárazu

4.2 Hodnoty zatížení

Z veličin uvedených v kapitole 4.1 byly pro 2D a 3D model určeny charakteristické hodnoty zatížení. Tyto hodnoty jsou uvedené v tab. 4.1. Charakteristická hodnota daného zatížení byla dále násobena příslušným dílčím součinitelem zatížení a rozpočítaná na oblast působení.

Tab. 4.1: Charakteristické hodnoty zatížení

Druh zatížení	Charakteristická hodnota
sníh	0.488 kN/m ²
vítr	0.579 kN/m ²
námraza	0.023 kN/m ²
zábradlí	0.75 kN/m ²
osoby	5 kN/m ²
osoby – lokální účinky	4.5 kN

4.3 Kombinace zatěžovacích stavů

V následující tab. 4.2 jsou červeným bodem vyznačené kombinace z výše uvedených zatěžovacích stavů. Při stanovení těchto kombinací byly vzaty v potaz reálné možnosti současného spolupůsobení zatížení. Zatěžovací stavy vlastních hmotností č. 1, 2 a 3 byly uvažovány ve všech kombinacích. V případě 2D modelu nebyl uvažován zatěžovací stav č. 15. Uvažování osamělé síly od vozidla v místě nad podpěrou mostovky by bylo bezpředmětné. V případě 3D modelu byly uvažovány všechny zatěžovací stavy.

5 Výpočtové modely

Výpočtové modely byly vytvořeny jak pro zjednodušenou 2D, tak pro komplexnější 3D úlohu. K analýze nebyly použity softwary, které jsou běžně využívány ve stavitelství, ale komerční softwary MSC.Marc 2010 a Matlab R2010a. Program MSC.Marc, využívající metody konečných prvků, byl použit pro spouštění souborů s příponou "*.proc" (dále PROC souborů). Tyto soubory umožňují v programu MSC.Marc automatické vytvoření kompletního modelu včetně zadání okrajových podmínek, provedení výpočtu a získání požadovaných výsledků. Pro generování PROC souborů byl s výhodou využit program Matlab, kde byly veličiny zadány parametricky pro snazší změnu parametrů výpočtového modelu. Matlab byl dále využit pro zpracování a vyhodnocení výsledků získaných z programu MSC.Marc.

5.1 Obecná pravidla pro návrh konstrukce

Stejně tak, jako u bakalářské práce, i zde byla pro návrh konstrukce použita tzv. metoda dílčích součinitelů. Jejím použitím lze pro různé návrhové situace spolehlivě ověřit, že žádný z uvažovaných mezních stavů není překročen. Principem této metody je popsání konstrukce pomocí tzv. návrhových hodnot za pomoci dílčích součinitelů. Pro ověření spolehlivosti konstrukce se dle normy ČSN EN 1990 používají dva mezní stavy, mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti. Oba tyto stavy jsou ověřovány pomocí této metody a oba musí být splněny zároveň. Jak již bylo dříve uvedeno, u skutečné konstrukce nepůsobí pouze jeden druh zatížení. Návrhová hodnota účinků E_d tak musí být stanovena prostřednictvím kombinací zatěžovacích stavů, které se mohou na konstrukci současně vyskytovat.

5.1.1 Mezní stav únosnosti

Pro tento mezní stav nesmí být únosnost materiálu překročena v žádném místě konstrukce. Stav se týká zejména bezpečnosti lidí a konstrukce. Mezní stav únosnosti lze vyjádřit pomocí formálního vztahu:

$$E_d \leq R_d, \quad (5.1)$$

kde E_d je návrhová hodnota účinků zatížení a R_d je návrhová hodnota únosnosti. Vztah (5.1) lze v souladu s normou ČSN EN 1993 upravit do tvaru:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1, \quad (5.2)$$

kde N_{Rd} , $M_{y,Rd}$ a $M_{z,Rd}$ jsou návrhové hodnoty únosnosti, které jsou určeny v závislosti na klasifikaci průřezu. Dále je N_{Ed} návrhová osová síla a $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ jsou pak návrhové

ohybové momenty k osám y a z . V případě 2D modelu je rovnice (5.2) dále redukována, neboť $M_{z,Ed} = 0$.

V případě, že používáme pro ověření v rozhodujícím bodu konstrukce přímo složky tenzoru napětí (přístup použit u 3D modelu), lze dle [3] aplikovat vztah ve tvaru:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right)^2 \leq 1, \quad (5.3)$$

kde $\sigma_{x,Ed}$ je návrhová hodnota podélného normálového napětí v uvažovaném bodu, $\sigma_{z,Ed}$ je návrhová hodnota příčného normálového napětí v uvažovaném bodu, τ_{Ed} je návrhová hodnota smykového napětí v uvažovaném bodu, f_y je mez kluzu a γ_{M0} je dílčí součinitel spolehlivosti materiálu ($\gamma_{M0} = 1$).

Při zpracování výsledků byly pro jednotlivé části lávky vyčíslovány levé strany nerovnic (5.2), resp. (5.3). Jejich označení v dalším textu je MSU (mezní stav únosnosti):

$$MSU = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}, \quad (5.4)$$

$$MSU = \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right)^2. \quad (5.5)$$

5.1.2 Mezní stav použitelnosti

Tento mezní stav je vázán na funkčnost objektu za běžného provozu, na pohodlí osob a na vzhled konstrukce či stavby. Mezní stav použitelnosti je možno formálně vyjádřit jako:

$$E_d \leq C_d, \quad (5.6)$$

kde C_d je návrhová hodnota příslušného kritéria použitelnosti a E_d je návrhová hodnota účinků zatížení, která je určena na základě příslušné kombinace. Norma [3] uvádí pro kategorii svislých průhybů následující podmínku:

$$\delta_{\max} = \frac{L}{250} \leq 1, \quad (5.7)$$

kde L je délka nosníku např. mostovky, příčnicku, podélníku atd.

Podobně jako v případě mezního stavu únosnosti byl definován parametr MSP (mezní stav použitelnosti), který lze vyjádřit jako

$$MSP = \frac{v}{\delta_{\max}}, \quad (5.8)$$

kde v je vypočítaná hodnota svislého průhybu [m].

5.1.3 Modální analýza

Uvedené mezní stavy se týkají statických výpočtů. U mostních konstrukcí je nutné provést také modální analýzu. Dynamické síly mohou při budících frekvencích blízkých vlastním frekvencím lávky vyvolat rezonanční stav. V normě [2] je pro lávky uvedeno, že pohybující se chodec je schopen vyvolat síly, které se nacházejí ve frekvenčním pásmu 1 - 3 Hz pro svislý a 0,5 – 1,5 Hz pro vodorovný směr zatížení. Z tohoto důvodu je žádoucí, aby nejnižší vlastní frekvence konstrukce byly vyšší, než hodnoty uvedené.

Samostatnou kapitolou je pak úloha spojená s uvažováním dynamických účinků větru. S ohledem na komplikovanost této problematiky a rozsah diplomové práce není tento vliv dále respektován.

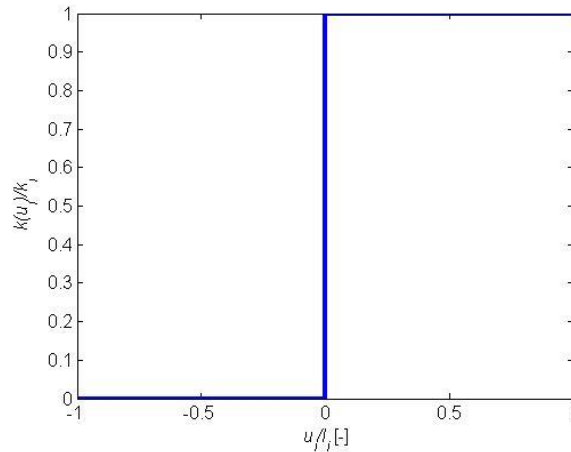
5.2 Model 2D

Pro tvorbu 2D modelu bylo nutné nejprve rozhodnout, jaký typ prvku bude pro uvažovanou simulaci nejvhodnější. Jako možné varianty byly brány v úvahu konečné prvky označené ve výpočtovém systému MSC.Marc čísly 52 a 98. V obou případech se jedná o 2D nosníkové prvky. Jejich testování a následné porovnání je uvedeno v příloze A. Na základě analýzy byl vybrán prvek č. 52.

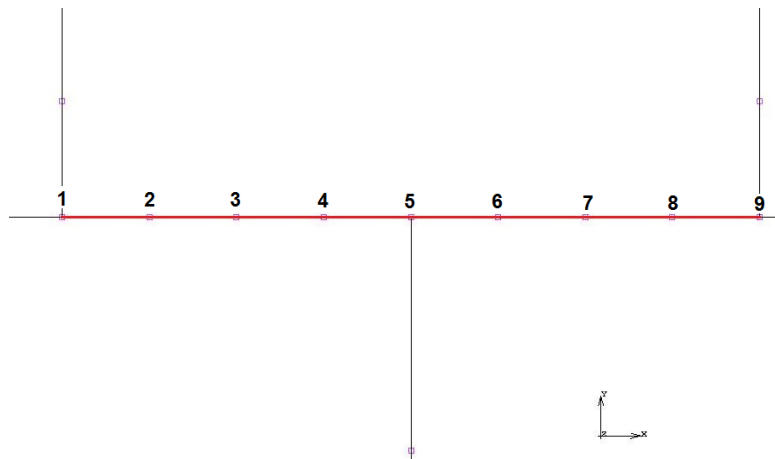
V případě 2D modelu bylo pomocí softwarů vytvořeno 21 PROC souborů, které umožňovaly generovat jednotlivé zatěžovací stavy. Numerický model byl vytvořen jako „drátový“ a obsahoval celkem 356 nosníkových prvků (lineární aproximace osového posuvu a kubická aproximace průhybů). Použité elementy mají 6 stupňů volnosti. Ve 2D modelu byla uvažována mostovka bez příček a vedlejších podélníků. Model lávky dále obsahuje 12 prutů, které spojují středovou branku a mostovku, která je s jejich pomocí odlehčována. Uvažované pruty byly v softwaru zadány pomocí tzv. „linků“, které jsou v softwaru MSC.Marc k dispozici pod záložkou „LINKS“. Bylo nutné správně zadat jejich požadované vlastnosti, a to takové, že pruty přenášejí zatížení pouze v tahu. V případě tlakového zatížení je prutům díky systému MSC.Marc umožněno vybočení. Pruty mají díky tomu vlastnosti podobné lanu. Toto chování bylo „linkům“ předepsáno v podobě tabulky (obr. 5.1). Linky byly nastaveny jako typ „true direction“, kde každému prutu byla zadána příčná tuhost:

$$k_i = \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} \quad (5.9)$$

kde E_i je modul pružnosti, A_i je plocha prutu a l_i jeho délka.



Obr. 5.1: Tabulka pro zadání vlastností pro pruty



Obr. 5.2: Použití „linků“ pro doplnění tuhosti uzlů

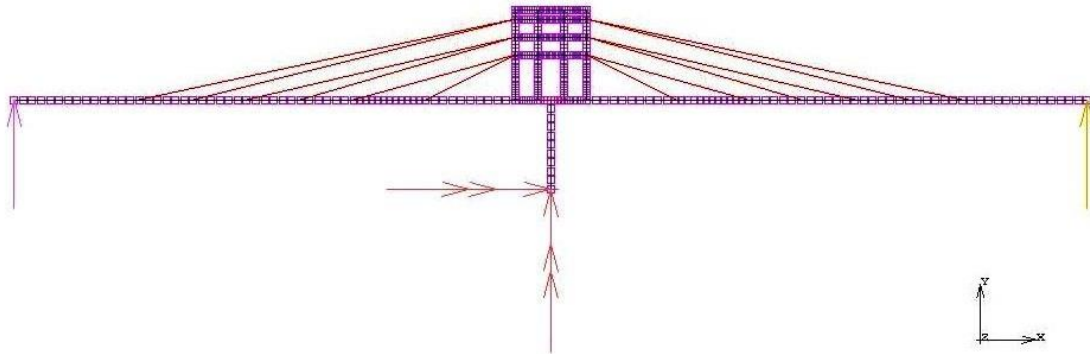
Prvky typu „link“ byly také použity v oblasti nosného sloupu. Pilíř, který má ve skutečnosti šířku 1,5 m je zde modelován rovněž pomocí nosníkových prvků. Aby v části, kde branka a mostovka půdorysně leží na pilíři, byly stejné deformace, jsou použity „linky“ typu „nodal ties“. Jejich použitím je 9 uzlům (viz obr. 5.2) ve zmíněné oblasti předepsáno vždy stejně 6 stupňů volnosti a natočení je tak ve všech uzlech shodné.

K takto definovanému modelu byly zadány geometrické a silové okrajové podmínky. Podmínky byly zadány následujícím způsobem (obr. 5.3):

- **geometrické**

Levá i pravá podpora byla v softwaru zadána jako okrajová podmínka typu „fixed displacement“, kde byl definován nulový posuv ve směru osy y . Uchycení sloupu bylo opět zadáno jako „fixed displacement“. Tentokrát byly zamezeny nejenom posuvy, a to ve směru os x a y , ale i rotace kolem těchto os. Pro jednoduchost byla modelována podélná polovina lávky. S ohledem na toto rozhodnutí bylo nutné zadat prvkům také okrajovou podmínku představující symetrii. Všem prvkům byla zadána

podmínka „fixed displacement“, při které byl definován nulový posuv ve směru z a nulové rotace kolem osy x a y . Z důvodu přehlednosti není tato okrajová podmínka na obr. 5.3 zobrazena.

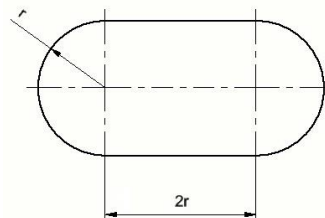


Obr. 5.3: „Drátový“ 2D model – okrajové podmínky

- **silové**

Silové okrajové podmínky představují jednotlivé zatěžovací stavy, které byly uvedeny v kapitole 4.1. Účinek od vlastní tíhy byl v softwaru realizován pomocí tzv. „gravity load“. Dále byly použity okrajové podmínky typu „global load“ pro spojitá zatížení a „point load“ pro osamělé síly. Všechny okrajové podmínky je možné nalézt v nabídce „BOUNDARY CONDITIONS“.

Vstupní rozměry pro hlavní nosníky, branku a sloup byly zadány dle zkušeností z bakalářské práce. Duté křivé nosníky použité na brance byly navrženy v prvním kroku s rozměry: šířka 0,5 m x výška 0,4 m s tloušťkou 0,02 m. Výztuhy mezi nimi pak byly obdélníkového průřezu s rozměry: výška 0,04 m x šířka 0,02 m. Profil nosného pilíře je zobrazen na obr. 5.4, kde $r = 0,75$ m. Rozměry hlavních nosníků a průměry prutů byly během analýzy měněny. První rozměrový návrh byl totožný s výsledky z bakalářské práce: výška hlavního nosníku $H = 500$ mm a průměr prutů $d = 60$ mm. První analýzy ukázaly, že výška hlavního nosníku je nedostačující a naopak velikost prutů je zbytečně naddimenzovaná. Rozměry byly změněny a podrobně jsou uvedeny v kapitole 6.1.

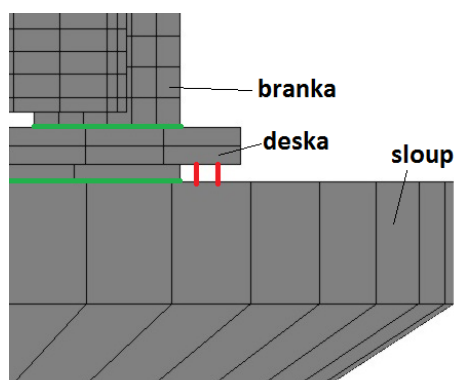


Obr. 5.4: Profil nosného pilíře

5.3 Model 3D

S ohledem na složitost 3D modelu byly vytvořeny jednotlivé části lávky samostatně. Ty byly v softwaru MSC.Marc následně spojeny do celkové konstrukce. Programovány byly opět parametricky tak, aby bylo možné jednoduše a rychle změnit zadané veličiny a parametry.

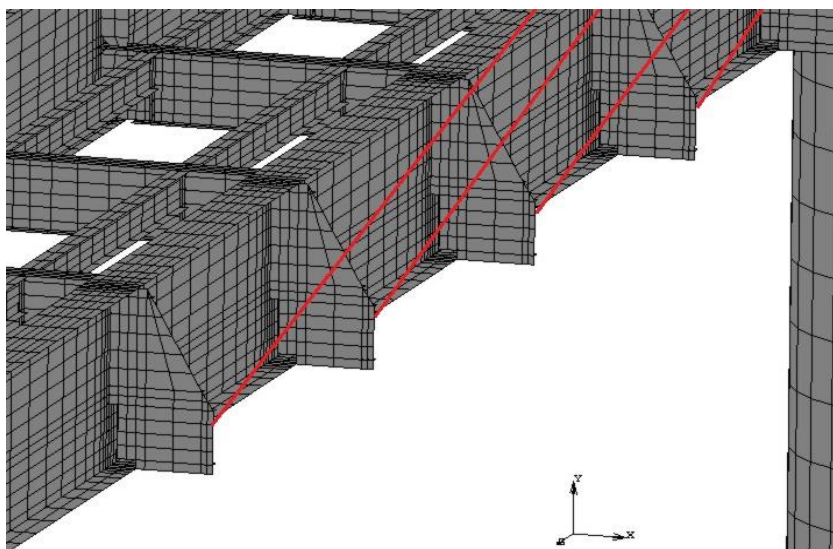
Celkový model obsahoval celkem 59 720 prvků. V případě branky a mostovky se jednalo o skořepinové prvky typu „shell“, které jsou uvažovány jako tenkostěnné prvky s lineární aproximací posuvů. V systému MSC.Marc jsou označeny č. 75. Objemové prvky typu „brick“, které byly použity pro nosný pilíř, mají také lineární aproximaci posuvů. V softwaru jsou označeny č. 7. Na základě doporučení byla mezi branku a sloup přidána ocelová deska obdélníkového tvaru, která je rovněž vytvořena ze 3D prvků. Jednotlivé modely vytvořené pomocí procedur (PROC souborů) byly složeny ve výsledný 3D model lávky pomocí příkazu „merge“. Deska byla s nosným pilířem a brankou spojena pomocí tuhého spojení, které je v [13] definováno pomocí tzv. „glue contact“. Spojení je vyznačeno na obr. 5.5 zelenou linií. S ohledem na ocelovou desku byl sloup ve své horní části rozšířen. Spojení sloupu a desky je ve skutečnosti provedeno pomocí šroubů (naznačeno červenou linkou na obr. 5.5).



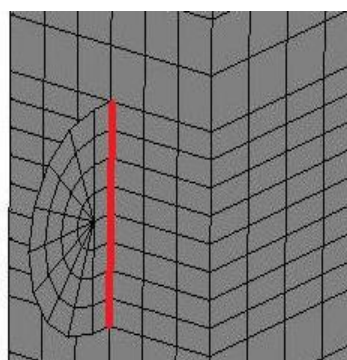
Obr. 5.5: Tuhé spojení desky se sloupem a brankou (zeleně), uchycení ocelové desky ke sloupu (červeně)

Model lávky dále obsahuje 24 prutů, které spojují středovou branku a mostovku. Uvažované pruty byly v softwaru zadány shodně jako v případě 2D modelu (viz obr. 5.1). Tuhost jednotlivých prutů byla určena dle vztahu (5.9). Pro uchycení prutů na mostovce byly vytvořeny výztuhy (obr. 5.6).

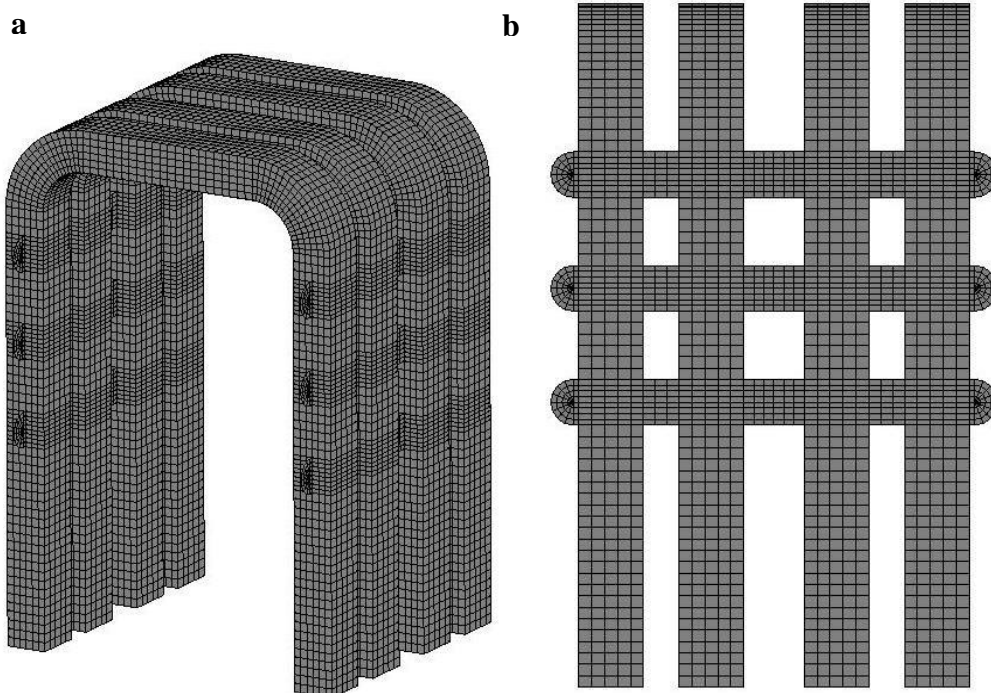
Na brance jsou pruty uchyceny pomocí táhel. Ty procházejí skrz jednotlivé sloupy branky výřezy, přičemž je předpokládáno jejich přivaření vždy z jedné strany, viz obr. 5.7 s naznačením svaru. S ohledem na tuto skutečnost jsou uzly sítě konečných prvků spojeny mezi táhly a sloupy pouze z jedné strany (na obrázku na viditelné straně se zvýrazněním červenou linií). Celkový pohled na konstrukci branky s táhly je na obr. 5.8.



Obr. 5.6: Výztuhy pro uchycení prutů na mostovce

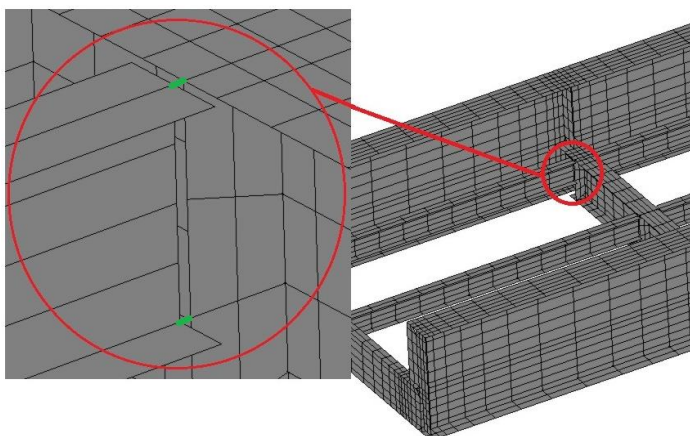


Obr. 5.7: Detail navaření táhla jen k jedné straně branky



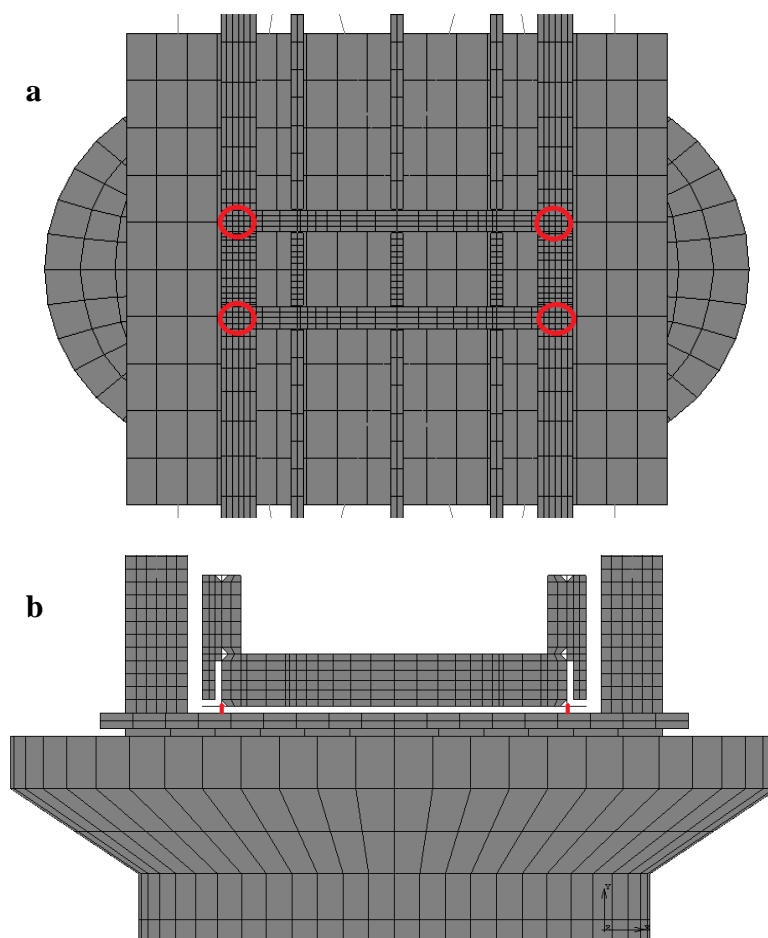
Obr. 5.8: 3D pohled na konstrukci branky (a), boční pohled na konstrukci branky (b)

Protože je nyní mostovka uvažována s příčkami a vedlejšími podélníky, byly „linky“ použity pro nahrazení kloubového spoje mezi nimi (vyznačeno zeleně na obr. 5.9). Jednalo se o linky typu „tie“ č. 103, kde byly zamezeny posuvy ve všech směrech a č. 5, kde byla zamezena rotace ve směru osy y .



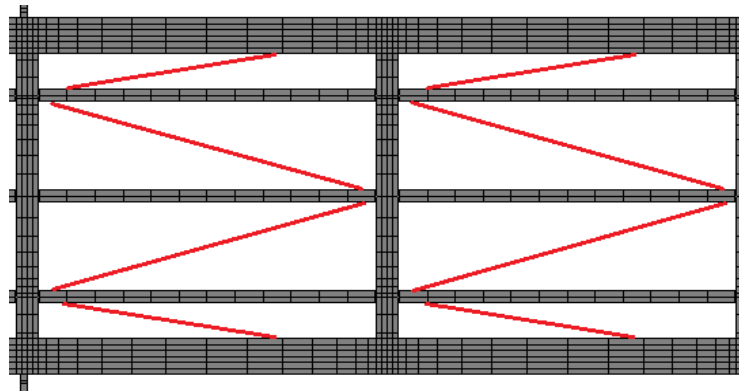
Obr. 5.9: Kloubové uložení vedlejších podélníků

Mostovka je uložena na 4 ložiskách, které jsou umístěny na ocelové desce v místě ve vzdálenosti 0,8 m od sebe (obr. 5.10 (a)). Nahrazení ložisek bylo provedeno opět pomocí „linků“ č. 103, kde byla mostovka s deskou spojena ve 4 bodech. Napojení linků je vyznačeno červenou barvou. Boční pohled je pak na obr. 5.10 (b).



Obr. 5.10: Uchycení mostovky k desce – horní pohled (a), boční pohled (b)

V oblasti mostovky je dále uvažováno tzv. zavětrování. Jedná se o pomocné spojení a vyztužení jednotlivých nosičů konstrukce mezi sebou ve vodorovném a příčném směru tak, aby konstrukce odolala např. účinkům větru. Zavětrování je provedeno pomocí kruhových dutých prutů, které jsou vedeny z rohů mezi příčkami (červeně na obr. 5.11). Obvykle je použito mezi první až třetí příčkou. K tomuto spojení byly opět využity prvky typu „links“ s tuhostí dle vztahu (5.9).



Obr. 5.11: Zavětrování konstrukce

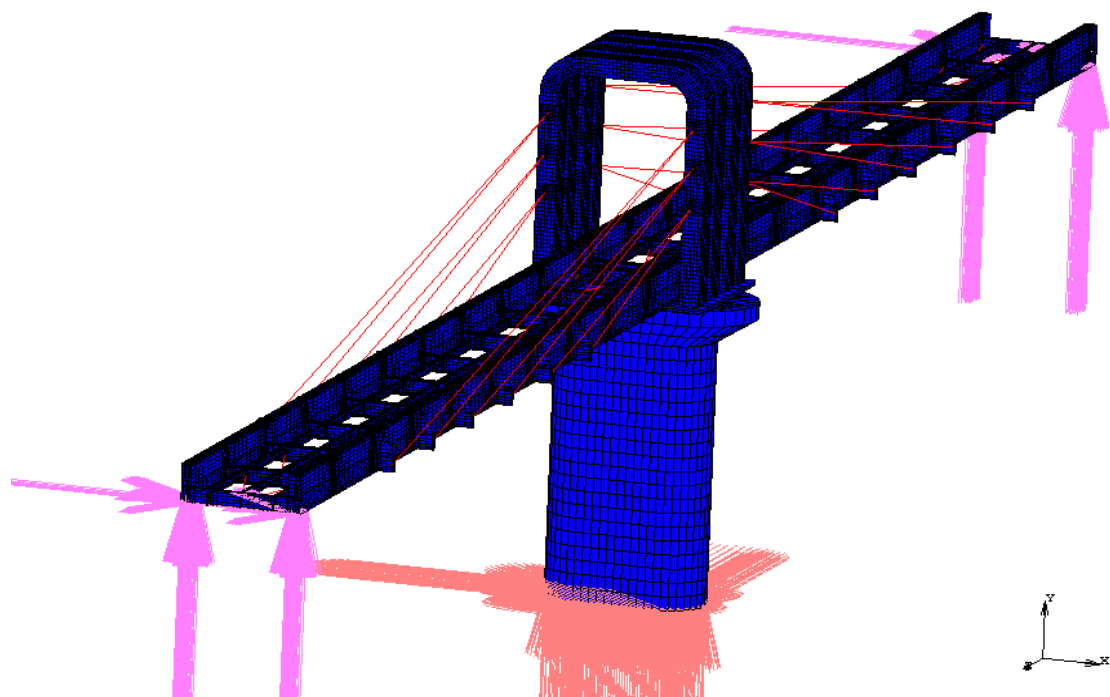
K takto definovanému modelu byly zadány geometrické a silové okrajové podmínky. Podmínky byly zadány následujícím způsobem (obr. 5.12):

- **geometrické**

Levá i pravá podpora byla zadána jako okrajová podmínka typu „fixed displacement“, kde byl definován nulový posuv ve směru osy x , y a rotace kolem těchto os. Mostovka je ve skutečnosti uložena na ložiskách, které zabraňují pohybu ve vertikálním i příčném směru. Tato podmínka byla zadána v oblasti krajních uzlů spodních pásnic hlavních podélníků. Uchycení sloupu bylo zadáno v softwaru jako „fixed displacement“, kde byly definovány nulové posuvy ve směru x , y a z . Tato podmínka byla zadána v oblasti spodní plochy sloupu.

- **silové**

Silové okrajové podmínky představují opět jednotlivé zatěžovací stavy, které byly uvedeny v kapitole 4.1. Účinek od vlastní tíhy byl v softwaru realizován stejně jako v případě 2D modelu. Dále byly použity okrajové podmínky typu „face load“ pro spojitá zatížení a „point load“ pro osamělé síly.



Obr. 5.12: 3D model – okrajové podmínky

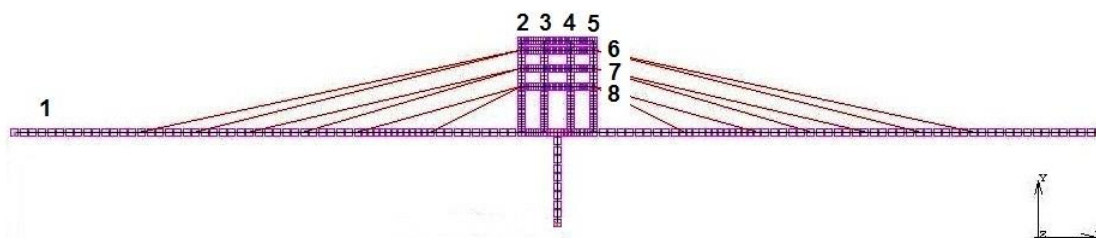
6 Analýza výsledků

V následující kapitole jsou popsány výsledky statické analýzy návrhu hlavních nosných prvků lávky. Návrh byl proveden pomocí mezního stavu použitelnosti a mezního stavu únosnosti. Dále jsou uvedeny výsledky modální analýzy pro rovinný i prostorový model lávky.

6.1 Model 2D

6.1.1 Statické výpočty

Cílem statického výpočtu v případě 2D modelu bylo zjistit orientační rozměry hlavních nosníků, branky a sloupu. Celkem bylo vytvořeno 21 PROC souborů, které představovaly jednotlivé zatěžovací stavy. U jednotlivých modelů byl zjišťován celkový posuv, posuv ve směru osy x , posuv ve směru osy y , ohybový moment, osová síla a rotace kolem osy z . Tyto výsledky byly v softwaru MSC.Marc uloženy pomocí funkce „path plot“ do textových souborů na osmi částech lávky - na mostovce, na brance (4 svislé křivé pruty) a na výztuhách (3 vodorovná táhla). Jejich označení je vidět na obr. 6.1 s čísly od 1 do 8. Sledovány byly také síly v zavěšených prutech.

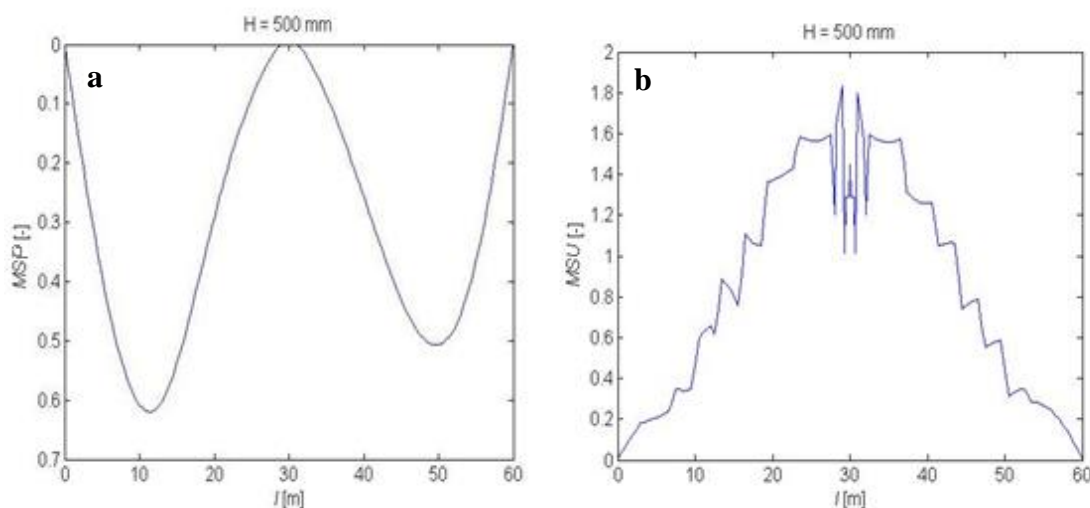


Obr. 6.1: 2D model – označení míst pro výsledky

Výsledky byly dle tab. 4.1 sečteny dle uvažovaných kombinací. Program pro provedení analýz byl vytvořen tak, aby bylo možné vykreslit jednotlivé průběhy posuvů, momentu, síly a rotace pro danou kombinaci na zvoleném místě lávky. Z nich pak byla pomocí tzv. „obálkové plochy“ zjišťována nejnevhodnější možná varianta v každém místě, která může na lávce nastat. Pro výsledky bylo požadováno splnění podmínky (5.2) a (5.7).

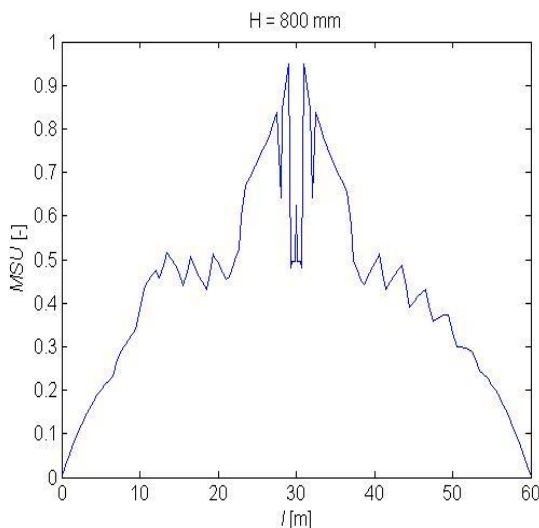
Při analýze byly měněny rozměry hlavních nosníků a průměry použitých prutů. Jako výchozí rozměry byly vzaty: výška hlavního nosníku $H = 500$ mm a průměr všech prutů $d = 60$ mm. Zde došlo ke sjednocení rozměrů a změně oproti bakalářské práci, kde byly pruty uvažovány s různými průměry. První analýza ukázala, že rozměr 500 mm pro hlavní nosník je nedostačující. Obr. 6.2 (a) zobrazuje průběh mezního

stavu použitelnosti (MSP) na mostovce. Je zřejmé, že hodnoty jsou menší než 1 a z hlediska použitelnosti je podmínka (5.7) splněna. Oproti tomu podmínka únosnosti splněna není, jak je možné vidět na obr. 6.2 (b), kde je zobrazen průběh mezního stavu únosnosti (MSU) dle rovnice (5.2). Je zřejmé, že na výrazné části lávky je hodnota větší než 1. Protože norma [3] požaduje splnění obou mezních stavů současně, tato varianta je nevyhovující. Oproti tomu pruty s průměrem 60 mm byly dostatečně tuhé. Hodnota podmínky (5.2) se pohybovala cca v rozmezí 0,15 – 0,39.



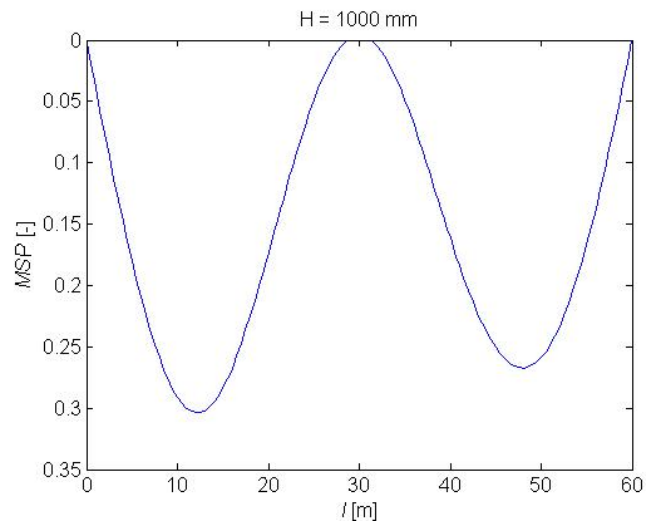
Obr. 6.2: Mostovka – mezní stav použitelnosti (a), mezní stav únosnosti (b)

S ohledem na prvotní analýzu byl rozměr hlavního nosníku navýšen na 800 mm. Pruty byly nyní uvažovány s průměrem 30 mm. Hodnota podmínky (5.2) pro pruty se nyní pohybovala v rozmezí 0,22 – 0,66. Analýza dále ukázala, že i únosnost je v tomto případě dostatečující. Jak je ale zřejmé z obr. 6.3, hodnoty jsou velmi blízko hodnotě 1 a to zejména v oblasti středové branky. S ohledem na skutečnost, že detailnější analýza je provedena v případě prostorového modelu, kde lze očekávat i možné koncentrátoři napětí, byla požadována větší rezerva (alespoň 20%). Z toho důvodu bylo nutné rozměr hlavního nosníku opět navýšit.

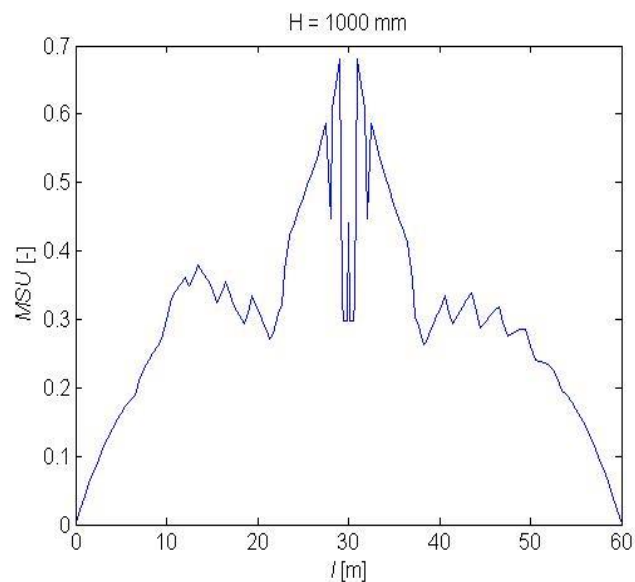


Obr. 6.3: Mezní stav únosnosti - mostovka

Poslední analýza byla provedena s výškou hlavního nosníku 1 000 mm a s rozměrem prutů 30 mm, který se ukázal jako dostatečně vyhovující. Z obr. 6.4 a 6.5 je patrné, že navýšení rozměru dává uspokojivé výsledky, které splňují jak podmínku použitelnosti, tak únosnosti. Hodnota podmínky (5.2) v případě prutů se pohybovala v rozmezí 0,15 – 0,49. Sledovány byly i hodnoty na ostatních místech lávky. Rozměry branky však byly ve všech případech dostačující a splňovaly podmínky obou mezních stavů.



Obr. 6.4: Mezní stav použitelnosti - mostovka



Obr. 6.5: Mezní stav únosnosti - mostovka

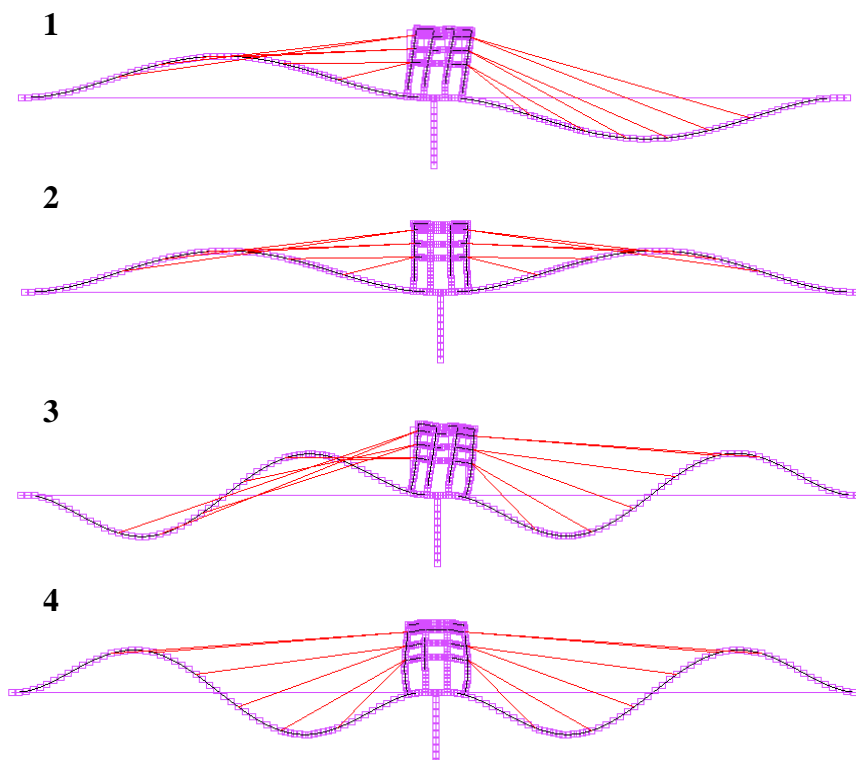
6.1.2 Modální analýza

Modální analýza byla rovněž provedena v programu MSC.Marc. Model lávky pro modální analýzu byl zadán v softwaru bez zatížení, uvažovány byly pouze geometrické okrajové podmínky a hmotnost lávky (definováno pomocí hustoty materiálů). Aby mohla být modální analýza provedena, byly prutům vylehčujícím mostovku odebrány vlastnosti lan, tj. pruty byly uvažovány, že přenášejí zatížení tahové i tlakové. U reálné konstrukce by bylo možno tohoto stavu dosáhnout předepnutím prutů tak, aby v nich působily při zatížení pouze tahové síly.

Jak bylo uvedeno v kapitole 5.1.3, norma [2] uvažuje vlastní frekvence pouze od pohybu osob nikoli od větru a dalších vlivů. Při analýze 2D modelu bylo cílem získat nejnižší vlastní frekvence alespoň 9 Hz. V tab. 6.1 jsou uvedeny hodnoty prvních 4 vlastních frekvencí. Je zřejmé, že uspokojivé výsledky byly dosaženy až při rozměru hlavního nosníku 1 000 mm. Tento výsledek podporuje správnost návrhu rozměru ze statického výpočtu. Vlastní tvary kmitů jsou patrné z obr. 6.6. Zobrazeny jsou pro variantu 1 000 mm. V ostatních případech byly vlastní tvary kmitů podobné. Vzhledem k uvažované symetrii modelu jsou všechny vlastní tvary ohybové.

Tab. 6.1: Vlastní frekvence

Výška hlavního nosníku H [mm]	Vlastní frekvence [Hz]			
	1	2	3	4
500	5,7	7	14	14,5
800	7,7	8,5	20	20,6
1000	9,2	9,8	24	25



Obr. 6.6: Vlastní tvary kmitu $H = 1000$ mm

6.2 Model 3D

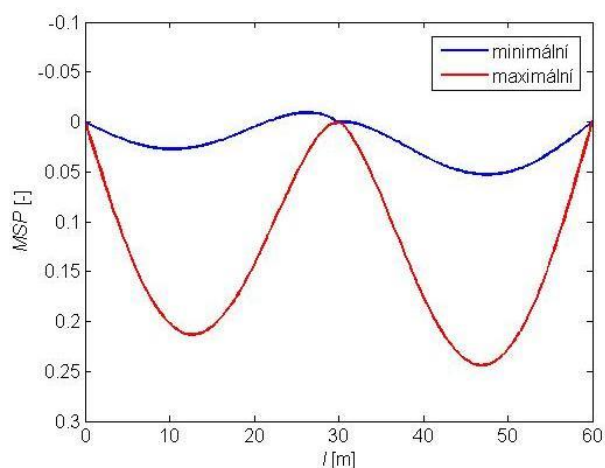
6.2.1 Statické výpočty

Cílem statického výpočtu v případě 3D modelu bylo navrhnout finální rozměry hlavních nosníků, příčníků a vedlejších podélníků. Celkem bylo vytvořeno 46 PROC souborů, které představovaly jednotlivé kombinace. Z jednotlivých modelů byl zjišťován posuv ve směru osy y a hodnota redukovaného napětí dle hypotézy HMH. Tyto výsledky byly ze softwaru MSC.Marc uloženy pomocí funkce „path plot“ do textových souborů. Vzhledem k symetrii zatížení v příčném směru byly výsledky sledovány na jedné hlavní mostovce, na všech příčkách (celkem 22) a všech podélnících (celkem 63).

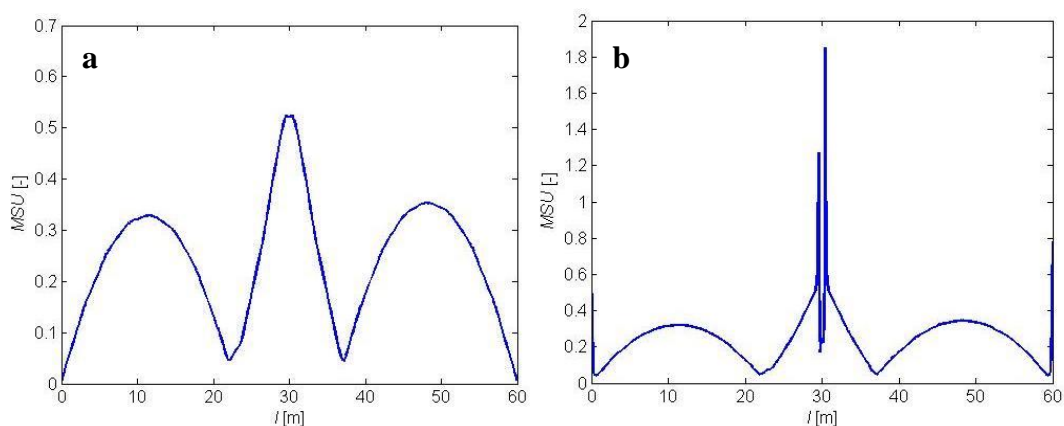
Protože modely byly vytvořené již v uvažovaných kombinacích zatěžovacích stavů, nebylo nutné výsledky sčítat jako v případě 2D modelu. Z výsledků byla zjišťována maximální hodnota napětí v každém místě na mostovce, příčkách a podélnících. V případě průhybu byla zjišťována maximální i minimální hodnota a to pouze na dolní pásnici. Rozdíl hodnot na dolní a horní pásnici byl minimální. Opět byly vytvořeny „obálkové plochy“, které znázorňují nejnevhodnější možné varianty v každém místě, které mohou na lávce nastat. Pro výsledky bylo nutné splnění podmínky (5.3) a (5.7). Výška mostovky byla $H = 1\,000$ mm, výška příčky $H_1 = 400$ mm a výška podélníku $H_2 = 200$ mm. V následující části jsou uvedeny výsledky analýzy jednotlivých částí konstrukce.

Mostovka

Na obr. 6.7 je zobrazen průběh mezního stavu použitelnosti na dolní pásnici mostovky. Červeně je vyznačena skutečná maximální hodnota a modře pak skutečná minimální hodnota. Tyto křivky vytyčují výše zmiňovanou obálkovou oblast. Jak je z obrázku zřejmé, podmínka (5.7) je splněna. Na obr. 6.8 je možné porovnat mezní stav únosnosti na horní pásnici (a) a dolní pásnici (b). V případě horní pásnice je podmínka (5.3) jednoznačně splněna. V případě dolní mostovky jsou na obrázku viditelné vysoké hodnoty v krajních bodech. To je způsobeno volbou okrajové podmínky, kdy jsou body na krajích dolní pásnice vetknuty. Vrcholy v oblasti středu jsou naopak způsobeny uchycením mostovky k desce pomocí „linků“. Ve skutečnosti je toto spojení provedeno pomocí ložisek, které v tomto případě nebylo detailně analyzováno. Lze tedy předpokládat, že ve skutečnosti by mezní stav únosnosti nenabýval tak vysokých hodnot.



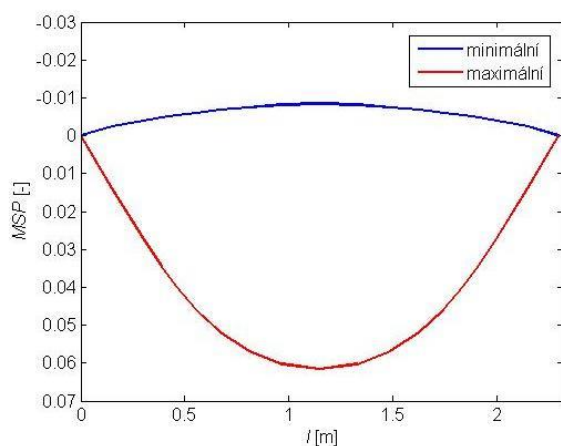
Obr. 6.7: Mezní stav použitelnosti na mostovce



Obr. 6.8: Mezní stav únosnosti na mostovce – horní pásnice (a), dolní pásnice (b)

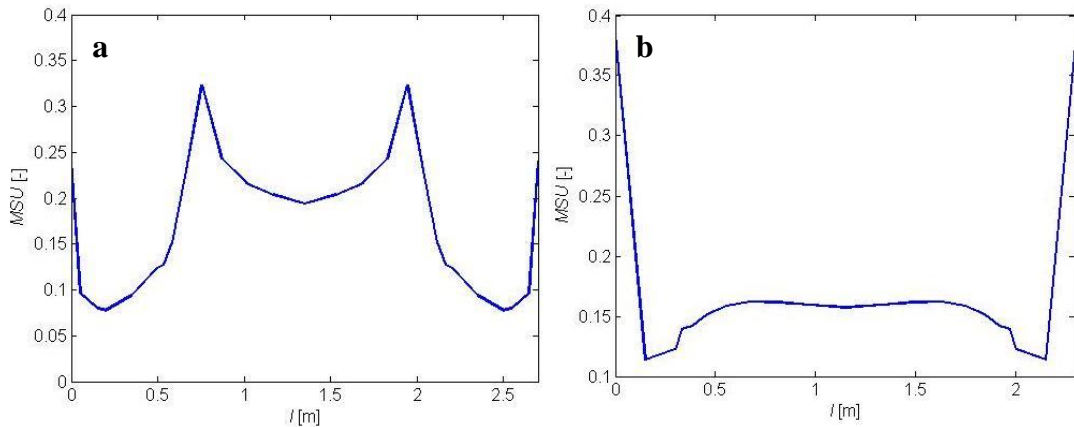
Příčky

Průběh mezního stavu použitelnosti na dolní pásnici příčky je zobrazen na obr. 6.9. Barevné označení je shodné s předešlým případem. I zde je podmínka použitelnosti (5.7) splněna. Z obrázku je patrná symetrie průběhu z důvodu symetrického zatížení v příčném směru lávky. Dále je zřejmé, že hodnoty mezního stavu použitelnosti jsou velmi nízké a velikost příčky je tak naddimenzovaná. Autorka si tohoto faktu byla vědoma, přesto bylo nutné rozměr $H1 = 400$ mm ponechat z důvodu modální analýzy, které byly rovněž provedeny.



Obr. 6.9: Mezní stav použitelnosti na příčkách

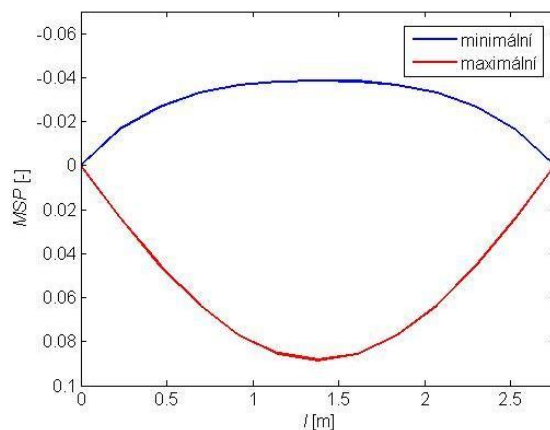
Porovnání mezního stavu únosnosti na horní (a) a dolní pásnici (b) je na obr. 6.10. Opět je v obou případech podmínka únosnosti (5.3) splněna. Z obrázku je zřejmé, že délka dolní pásnice je kratší než délka horní pásnice. To je způsobeno mezerou mezi dolní pásnicí příčky a dolní pásnicí mostovky.



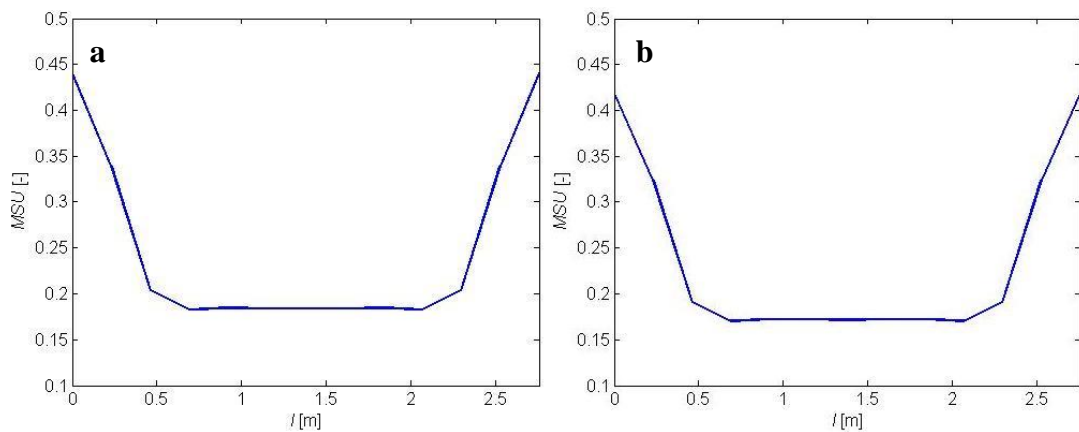
Obr. 6.10: Mezní stav únosnosti na příčkách – horní pásnice (a), dolní pásnice (b)

Podélníky

Obr. 6.11 zobrazuje průběh použitelnosti na dolní pásnici podélníku. Barevné označení je shodné s případem pro mostovku. Je patrné, že podmínka použitelnosti (5.7) je i pro tuto část konstrukce splněna. V případě mezního stavu únosnosti, viz obr. 6.12, si lze všimnout, že i podmínka únosnosti je splněna. V tomto případě si můžeme podélník představit jako nosník na dvou podporách. Z toho důvodu je napětí na horním a dolním vlákne velmi podobné.

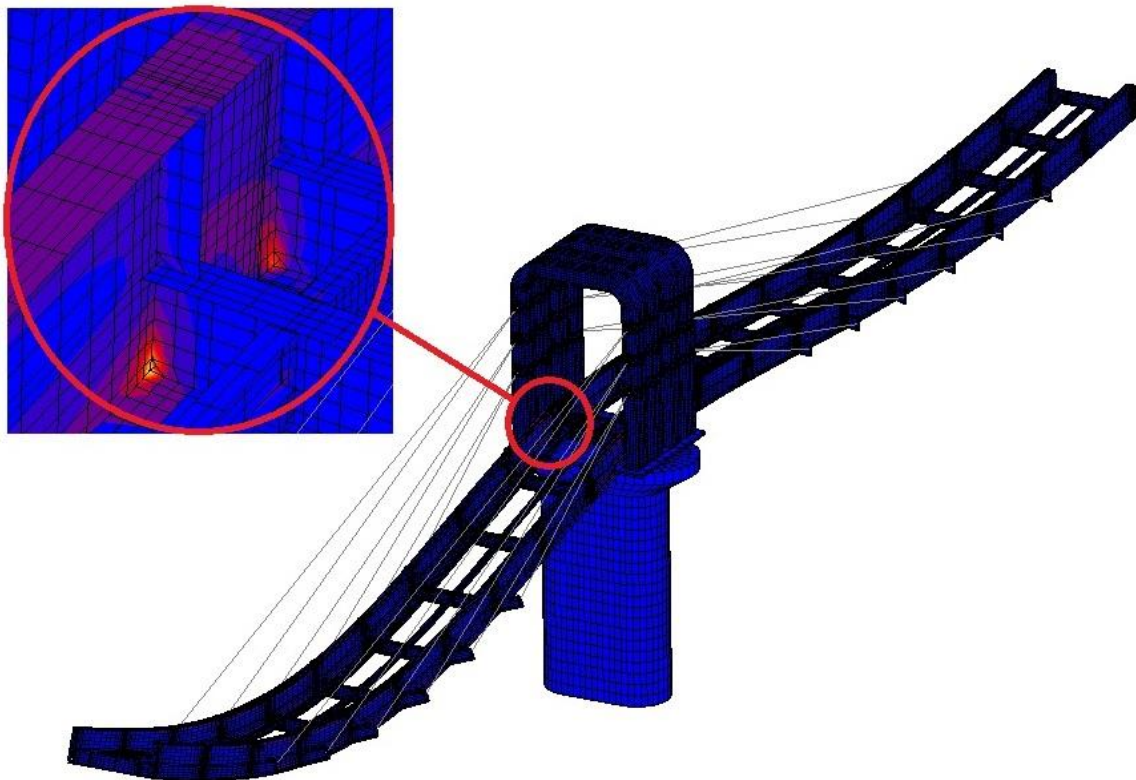


Obr. 6.11: Mezní stav použitelnosti na podélnících

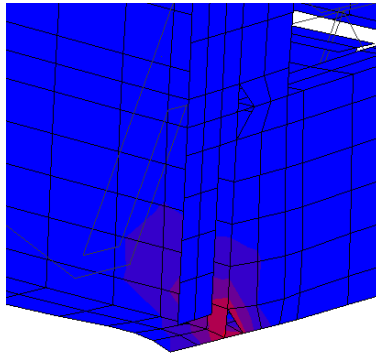


Obr. 6.12: Mezní stav únosnosti na podélnících – horní pásnice (a),
dolní pásnice (b)

Z hlediska mezního stavu únosnosti se ukázalo místo uložení ložisek jako nejkritičtější. Zde byly z důvodu zjednodušeného modelu uložení mostovek na ložiskách největší hodnoty napětí. Kritické místo uložení je zobrazeno na obr. 6.13. Vykresleno je při kombinaci 19, kdy byly na mostovce naměřeny největší hodnoty průhybu a napětí.



Obr. 6.13: Napětí v místě uložení mostovky na ložiskách – kombinace 19
(měřítko deformace 52x)



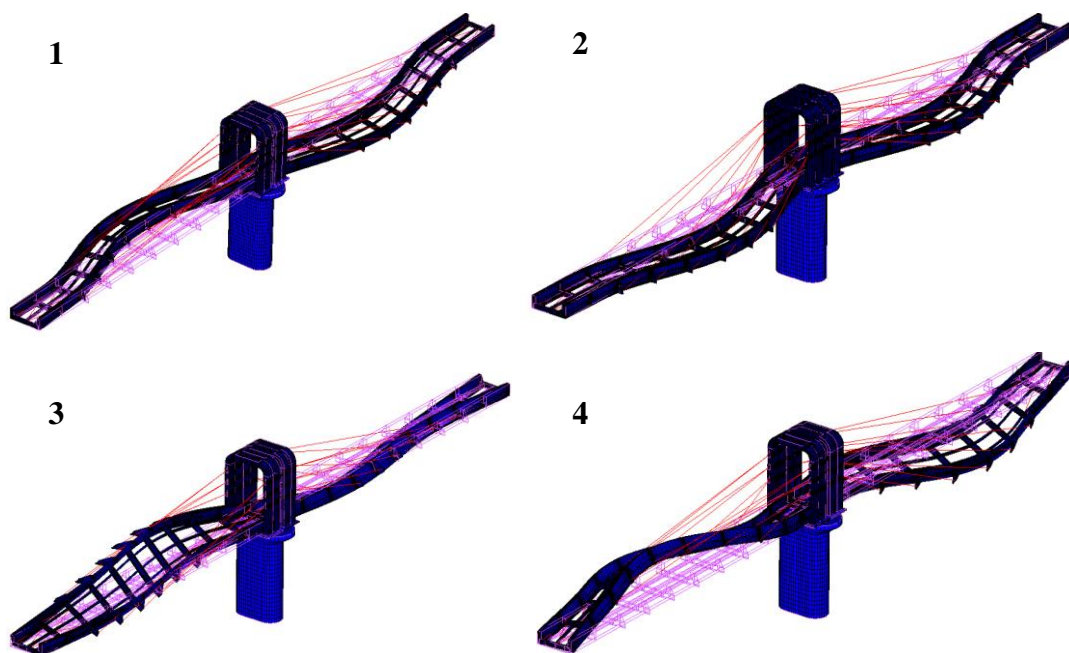
Obr. 6.14: Napětí v místě uložení mostovky v místě podpěry - kombinace 19

Napětí v oblasti krajních podpor je zobrazeno na obr. 6.14. Byly sledovány hodnoty napětí na brance, nosném pilíři a desce. Největší naměřené hodnoty na brance dosahovaly velikosti redukovaného napětí 200 MPa, což vyhovuje podmínce (5.3). Rovněž na desce a sloupu byly zjištěny hodnoty do 200 MPa. V místech uchycení mostovky pomocí ložisek byly na sloupu i desce hodnoty vyšší, než je mez kluzu. Tyto hodnoty jsou ale způsobeny, podobně jako při vyšetřování mostovky, volbou okrajové podmínky. V případě reálné konstrukce by hodnoty nedosahovaly těchto velikostí.

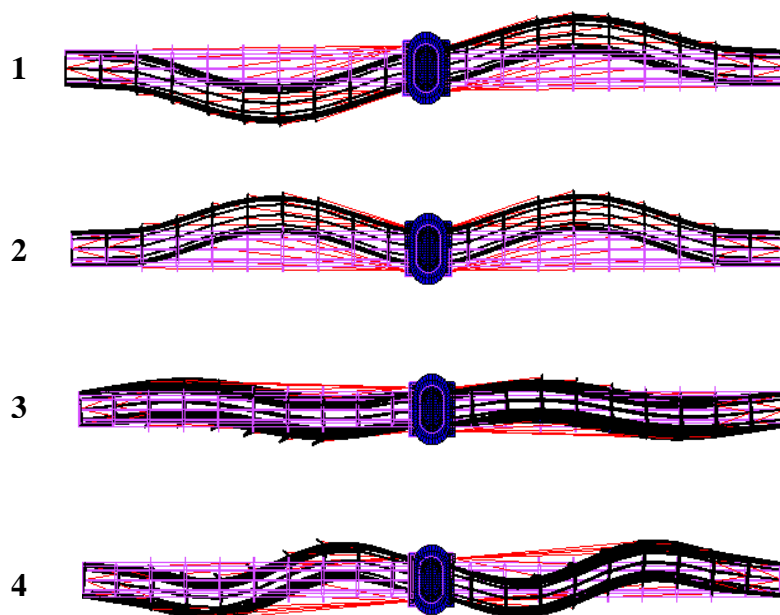
6.2.2 Modální analýza

Stejně jako u 2D modelu byla modální analýza provedena v programu MSC.Marc. Model lávky byl rovněž uvažován pouze s geometrickými okrajovými podmínkami a hmotností lávky. U prutů bylo rovněž uvažováno, že přenášejí jak tahové, tak i tlakové zatížení. Výška mostovky H byla uvažována 1 000 mm. Zjišťovány byly vždy první čtyři vlastní frekvence a jim příslušející tvary kmitu.

Nejprve byl použit model lávky totožný s modelem pro statické výpočty, kde zavětrování bylo provedeno na krajích mezi první až třetí příčkou. Modální analýza ukázala, že v tomto případě jsou frekvence blízko vlastním frekvencím, které uvádí norma [2]. Jejich velikost byla v rozmezí 1,6 – 4,1 Hz. První a druhý vlastní tvar kmitu je ohybový, třetí a čtvrtý je torzní, viz. prostorový pohled na obr. 6.15. Pohled shora je na obr. 6.16.



Obr. 6.15: Vlastní tvary kmitu na lávce bez vozovky – prostorový pohled



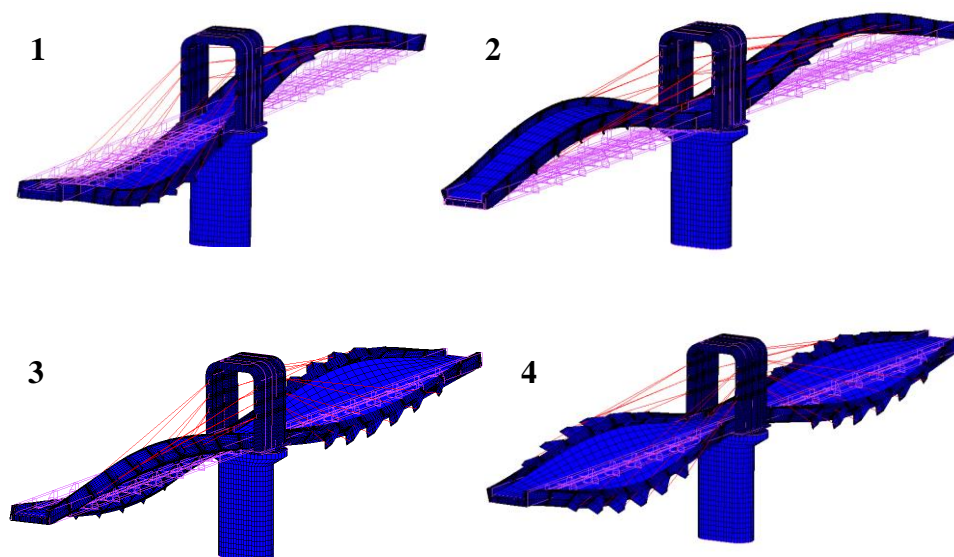
Obr. 6.16: Vlastní tvary kmitu na lávce bez vozovky – pohled shora

Jak je z výše uvedených obrázků zřejmé, mostovka je štíhlá a dosti poddajná. S ohledem na tuto skutečnost bylo nutné konstrukci upravit.

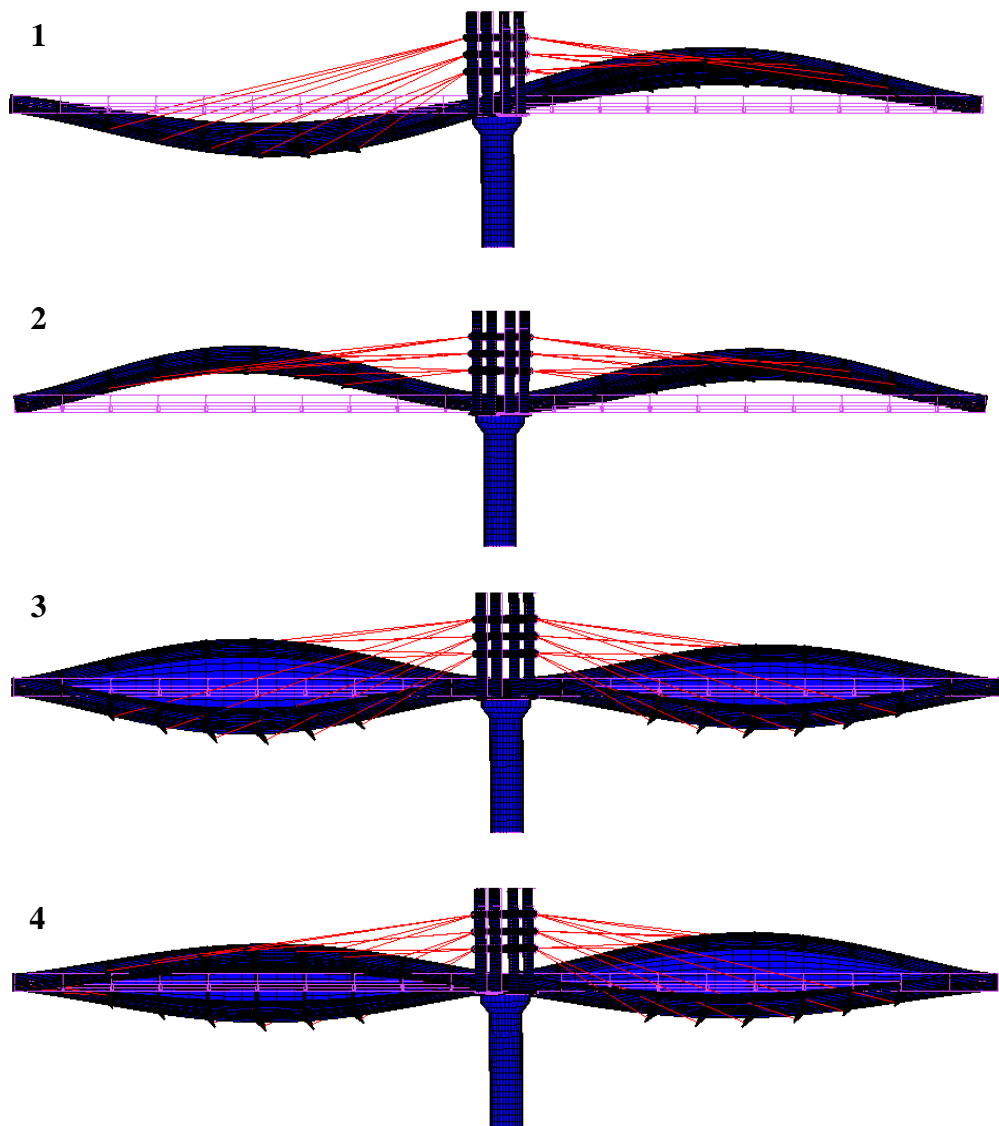
Nejprve bylo rozhodnuto provést zavětrování po celé délce lávky. Modální analýza prokázala, že k jistému vyztužení na lávce díky zavětrování došlo. Vlastní frekvence však stále byly pod hranici 3 Hz, kterou udává norma. Dále bylo rozhodnuto změnit průměr uvažovaných prutů z 30 mm na 60 mm a zvýšit tak jejich tuhost. Ukázalo se, že ani tento parametr nemá výrazný vliv na velikost vlastních frekvencí. Další možností, která by mohla ovlivnit vlastní frekvence, bylo uvažování vozovky, která byla do této doby v modelu zanedbávána. Modelována byla pomocí prostorových prvků jako nosný pilíř. Spojení vozovky s příčkami bylo provedeno pomocí tuhého spojení „glue“ v softwaru MSC.Marc. Ve skutečnosti je vozovka přišroubována k příčkám pomocí šroubů jen v několika místech. Skutečné frekvence tak jsou někdy mezi tímto případem a případem bez vozovky. Ukázalo se, že uvažování vozovky má významnější vliv na velikost vlastních frekvencí, než předchozí úpravy. V tab. 6.2 je možno porovnat jejich hodnoty s případem bez vozovky. Vlastní tvary kmitu jsou vidět na obr. 6.17 a 6.18. Jak je vidět, vyztužení konstrukce mostovky v příčném směru má vliv na velikost vlastních frekvencí. Ty jsou nyní na hranici, kterou dovoluje norma [2]. Oproti předchozím analýzám je zde změna i u vlastních tvaru kmitu. Jak je z obrázků patrné, je druhý tvar ohybový a ostatní tři torzní.

Tab. 6.2: Vlastní frekvence

Typ konstrukce	Vlastní frekvence [Hz]			
	1	2	3	4
bez vozovky	1,6	1,7	3,4	4,1
s vozovkou	3,7	5,1	5,4	6,3



Obr. 6.17: Vlastní tvary kmitu na lávce s vozovkou – prostorový pohled



Obr. 6.18: Vlastní tvary kmitu na lávce s vozovkou – boční pohled

7 Závěr

Diplomová práce se zabývala návrhem ocelové lávky pro pěší. Úvodem byla provedena rešerše designu lávek v České republice a v zahraničí. Dle názoru autorky byly vybrány nejpozoruhodnější konstrukce z celého světa, které jsou doprovázené obrázky a stručným popisem. Diplomová práce navazuje na práci bakalářskou z roku 2012. S ohledem na tuto skutečnost byly v práci zmíněny rozdíly, ke kterým oproti bakalářské práci došlo. Uvedeny jsou konstrukční úpravy, které bylo nutné provést s ohledem na tuhost konstrukce. Z důvodu těchto změn došlo i ke změně designových návrhů, které jsou v práci doprovázeny skicami a stručným popisem.

Oproti bakalářské práci, kde byl uvažován pouze vliv vlastní tíhy a pohybu osob, zde byly uvažovány i další mimořádná zatížení - vliv sněhu, větru, námrazy a vozidla údržby. Celkem bylo uvažováno 21 zatěžovacích stavů ve 46 různých kombinacích.

Na základě uvažovaného zatížení byly navrženy rozměry hlavních nosných částí lávky, tj. hlavních nosníků, příčníků a podélníků. Statické výpočty byly provedeny s ohledem na normy ČSN EN 1990, 1991 a 1993. Ověření navržených rozměrů bylo provedeno na základě metody dílčích součinitelů dle mezního stavu únosnosti a mezního stavu použitelnosti. Byla provedena modální analýza konstrukce a velikosti vlastních frekvencí byly konfrontovány s normou ČSN EN 1991-2.

Dosažené výsledky byly analyzovány ve dvou fázích. Prvotní výpočty rozměrů byly provedeny pomocí zjednodušeného 2D modelu v prostředí softwaru MSC.Marc. Ten byl vytvořen pomocí nosníkových prvků jako „drátový“. Pro snadnější editování různých variant byly vytvořeny procedury (PROC soubory), díky kterým bylo možné parametricky upravovat model celé lávky. Výsledky pak byly pomocí softwaru MSC.Marc uloženy do textových souborů, které byly dále zpracovány v prostředí Matlab. Výchozí velikosti parametrů konstrukce byly převzaty z bakalářské práce. Po prvních analýzách bylo zjištěno, že rozměry jsou z hlediska mezního stavu únosnosti nedostačující. S ohledem na tuto skutečnost byla velikost hlavního nosníku zvětšena. Správnost tohoto kroku se potvrdila jak po provedení statických analýz, tak i po výpočtu vlastních frekvencí. Modální analýzou byly totiž zjištěny nízké vlastní frekvence, při kterých může dojít k rezonančnímu stavu konstrukce. Po zvětšení hlavního nosníku byly hodnoty prvních čtyř vlastních frekvencí vyšší a vyhovovaly tak doporučené hranici.

Následně byl proveden zpřesňující výpočet pomocí 3D modelu. Detailní analýza pomocí tohoto modelu potvrdila správnost navržených rozměrů, které splňovaly podmínky únosnosti a použitelnosti dle Evropských norem. Při analýze vypočtených vlastních frekvencí nebyly bohužel zjištěny hodnoty s rezervou jako v případě 2D modelu. Pro navýšení těchto hodnot bylo provedeno několik úprav konstrukce.

Autorka práce si je vědoma jistých zjednodušení v provedených výpočtech. Detailně nebyla řešena místa svarů, šroubových spojů ani uložení ložisek. Dále nebyla provedena tvarová optimalizace konstrukce ani citlivostní analýza s cílem zvýšení vlastních frekvencí lávky. Rovněž nebyly provedeny výpočty dynamického namáhání lávky od proměnného zatížení větrem. Problematika přesahuje rámec této práce, protože by bylo nutné ji věnovat daleko větší pozornost.

Vzhledem k dosaženým výsledkům se autorka domnívá, že pro zvýšení vlastních frekvencí by bylo vhodné dále provést citlivostní analýzu a zjistit tak, které parametry mají nejvýznamnější vliv na jejich velikost. Dalším možným řešením by bylo například použití tlumicích prvků, vhodně umístěných na konstrukci, díky kterým by mohlo dojít k zlepšení dynamických vlastností. Dle ověření pomocí mezního stavu únosnosti a mezního stavu použitelnosti byla však zjištěna dostatečná rezerva. Vzhledem k této skutečnosti lze předpokládat, že při další analýze lávky s vhodným vyztužením, by konstrukce nejspíše vyhovovala všem nutným podmínkám.

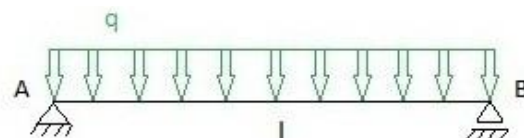
Seznam použité literatury

- [1] Česká technická norma, *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*: ČSN EN 1990 73 0002, Praha, 2004.
- [2] Česká technická norma, *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou*: ČSN EN 1991-2 73 6203, Praha, 2005.
- [3] Česká technická norma, *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*: ČSN EN 1993-1-1 73 1401, Praha, 2006.
- [4] FAJMAN, P., KRUIS, J.: *Zatížení a spolehlivost*, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Praha, 2008.
- [5] FOINIA Steel, s.r.o., dostupné z WWW: < www.foiniasteel.cz>.
- [6] FOOTBRIDGES, dostupné z WWW: <www.ingkomora.me>.
- [7] HOLICKÝ, M., MARKOVÁ, J., SÝKORA, M.: *Zatížení stavebních konstrukcí – Příručka k ČSN EN 1991*, 1. vydání, Praha, 2009.
- [8] Sníh na střeše, dostupné z WWW: < www.snihnastrese.cz>.
- [9] TZB-info, dostupné z WWW: < www.tzb-info.cz>.
- [10] LESOVÁ, H.: *Návrh lávky pro pěší*, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Plzeň, 2012.
- [11] LEINVEBER, J., ŘASA, J., VÁVRA, P.: *Strojnické tabulky*, Scientia, Praha, 1998.
- [12] Matlab R2011a: *Help*, MathWorks.
- [13] MSC.Marc 2008r1: *Help*, MSC.Software.
- [14] Navrhování mostů, dostupné z WWW: < www.concrete.fsv.cvut.cz >.
- [15] STRÁSKÝ, HUSTÝ a partneři, s.r.o., dostupné z WWW: <www.shp.eu>.
- [16] VPÚ DECO PRAHA a.s., dostupné z WWW: <www.vpupraha.cz>.

Příloha A

V příloze je provedena analýza 2D prvků v programu MSC.Marc. Pro tvorbu 2D modelu bylo nutné rozhodnout a vybrat typ prvku, který bude pro uvažovaný model nejvhodnější. Jako možné varianty byly brány v úvahu prvky č. 52 a 98.

V obou případech se jedná o 2D prvky s rozdílnými vlastnostmi a výsledky, které byly při jejich použití zjištěny. Prvek č. 98 je vhodný pro krátké nosníky, kde je důležité uvažovat vliv smykového napětí. Test byl prováděn na prostém nosníku o délce 1 m. Tento nosník je obdélníkového průřezu o šířce 100 mm a výšce 250 mm. Při zatěžovacích stavech lávky je nejčastější účinek konstantního spojitého zatížení. Proto byl analyzován vliv namáhání právě pro tento případ (obr. A.1). Cílem testování bylo zjistit, který typ prvku poskytuje přesnější výsledky a na kolik prvků je zapotřebí nosník rozdělit, aby se výsledky co nejvíce shodovaly s analytickým řešením.

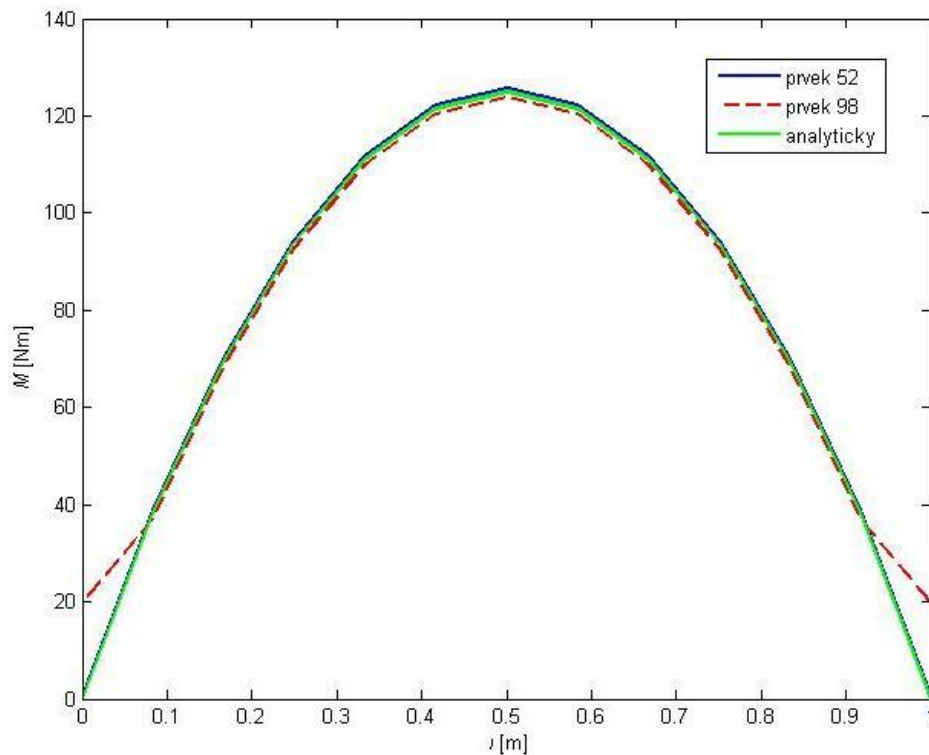


Obr. A.1: Nosník zatížený spojitým zatížením

Výpočet byl nejprve proveden analyticky, kdy maximální ohybový moment je při výše uvedeném zatížení a rozměrech roven 125 Nm. Je zřejmé, že prvek 52 dává téměř přesné výsledky již při použití 10 prvků na 1 m. U prvku 98 není takové shody dosaženo ani při použití 16 prvků.

Tab. A.1: Hodnoty maximálního ohybového momentu

počet prvků	Typ prvku			
	52		98	
	M_{\max} [Nm]	chyba [%]	M_{\max} [Nm]	chyba [%]
2	145,8	16,64	83,3	33,36
4	130,2	4,16	114,6	8,32
8	126,3	1,04	122,4	2,08
10	125,8	0,64	123,1	1,52
12	125,6	0,48	123,8	0,96
16	125,5	0,4	124,2	0,64



Obr. A.4: Průběh ohybového momentu teoretický a dle numerického řešení při použití prvku 52 a 98 (použito 12 prvků na 1 m)

Rozdíl je znatelný i ve vykreslení ohybových momentů, které lze porovnat na obr. A.4. Zeleně je vyznačen průběh ohybového momentu pro analytické řešení. Červenou přerušovanou čarou je zobrazen průběh momentu s prvkem 98 a modře pak pro prvky 52. Je zřejmé, že prvek č. 52 dává přesnější výsledky než prvek č. 98, a proto byl vybrán pro vytvoření 2D modelu v programu MSC.Marc.