

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra mechaniky

**Bakalářská práce**

**Návrh lávky pro chodce**



# Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: .....

Podpis autora: .....

# Poděkování

Tímto bych velice ráda poděkovala především vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Zajíčkovi, Ph.D., za odborné konzultace, rady a zkušenosti, za vynaložený čas a trpělivost, a v neposlední řadě za pomoc při seznámení s programem Matlab.

Velký dík patří také panu Ing. Zdeňku Porkátovi za poskytnutí odborných rad z oblasti mostních konstrukcí a panu Václavu Nohelovi za pomoc při grafickém zpracování. Ráda bych také poděkovala své rodině, která mne po celou dobu studia podporovala.

# Anotace

Předkládaná bakalářská práce se zabývá návrhem lávky pro pěší. V práci je zmíněna historie mostních konstrukcí a jejich základní rozdělení dodnes používané. Součástí práce jsou také designové návrhy lávky s rozbohem jejich konstrukčních výhod a nevýhod. Cílem pak bylo navrhnout hlavní nosné prvky lávky s ohledem na Evropské normy používané při návrhu stavebních konstrukcí. Při výpočtech byla využívána metoda dílčích součinitelů. Předběžné návrhy konstrukčních prvků byly provedeny pomocí systému Matlab. Následný zpřesňující výpočet byl proveden metodou konečných prvků v systému MSC.Marc.

# Annotation

The bachelor thesis is about footbridge design. The background includes the history of bridge construction and the basic bridge categories which are still used today. The thesis also includes design drawings with an analysis of their advantages and disadvantages. The aim of this thesis is 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. Preliminary analysis of the structural elements was carried out in Matlab. Refined calculation was done using the finite element method in the MSC.Marc system.

# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	9
<b>2 Lávky</b> .....	10
2.1 Historie.....	10
2.2 Rozdělení konstrukcí .....	11
2.2.1 Trámové konstrukce .....	11
2.2.2 Visuté konstrukce .....	12
2.2.3 Obloukové konstrukce .....	13
2.2.4 Zavěšené konstrukce.....	14
<b>3 Designové návrhy a skici</b> .....	15
<b>4 Popis konstrukce</b> .....	19
<b>5 Návrh lávky</b> .....	22
5.1 Obecná pravidla pro návrh konstrukce .....	22
5.1.1 Základní předpoklady .....	22
5.1.2 Metoda dílčích součinitelů.....	22
5.1.3 Mezní stav únosnosti .....	23
5.1.4 Mezní stav použitelnosti .....	24
5.2 Návrh základních nosných částí .....	25
5.2.1 Návrh hlavních nosníků (podélníků) .....	25
5.2.2 Návrh příčníků .....	27
5.2.3 Návrh vedlejších podélníků .....	29
5.2.4 Návrh nosného pilíře.....	29
5.3 Výpočty základních nosných částí.....	30
5.3.1 Výpočty hlavních nosníků .....	30
5.3.2 Výpočty příčníků .....	33
5.3.3 Výpočty vedlejších podélníků .....	35
5.3.4 Výpočty nosného pilíře.....	35
<b>6 Model lávky pomocí MKP</b> .....	36
6.1 Model čtvrtiny lávky.....	36
6.2 Model poloviny lávky .....	40
<b>7 Závěr</b> .....	42
<b>Seznam použité literatury</b> .....	43
<b>Příloha A</b> .....	44

# Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
$a_d, a_{nom}$	[mm]	návrhová hodnota geometrického údaje, nominální hodnota geometrického údaje
$\Delta a$	[mm]	změna nominální hodnoty geometrického údaje pro specifické účely navrhování, např. pro stanovení účinku imperfekcí
$f_y$	[Pa]	mez kluzu
$g$	[ms <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení
$q$	[Nm <sup>-2</sup> ]	spojité zatížení
$q_k$	[Nm <sup>-2</sup> ]	charakteristická hodnota zatížení
$u_f$	[mm]	podélné prodloužení prutu
$v(x), v_f$	[mm]	průhyb nosníku v obecném místě, v konkrétním místě
$C_d$	[-]	nominální hodnota nebo funkce určitých návrhových vlastností materiálů
$E$	[Pa]	modul pružnosti v tahu, v tlaku
$E_d$	[-]	návrhová hodnota účinků zatížení
$F$	[N]	síla
$F_k$	[N]	charakteristická hodnota zatížení
$F_{rep}$	[N]	reprezentativní hodnota zatížení
$G_k$	[N]	charakteristická hodnota stálých zatížení
$J$	[mm <sup>4</sup> ]	kvadratický moment
$M$	[Nm]	moment
$M_f$	[Nm]	fiktivní moment
$M_{y,Ed}, M_{z,Ed}$	[Nm]	návrhový ohybový moment k ose y-y, k ose z-z
$M_{y,Rd}, M_{z,Rd}$	[-]	návrhová únosnost v ohybu k ose y-y, k ose z-z
$N_{Ed}$	[N]	návrhová osová síla
$N_{Rd}$	[-]	návrhová únosnost při působení osově síly
$N(x)$	N	osová síla
$R_d$	[-]	návrhová hodnota únosnosti
$Q_k$	[N]	charakteristická hodnota proměnných zatížení
$T_f$	[N]	fiktivní síla
$W_o$	[m <sup>3</sup> ]	modul průřezu v ohybu
$X_d$	[Pa]	návrhová hodnota materiálové vlastnosti
$X_k$	[Pa]	charakteristická hodnota materiálové vlastnosti
$Z$	[-]	rezerva spolehlivosti
$\alpha_P$	[rad]	úhel mezi nosníkem a prutem
$\gamma_f$	[-]	dílčí součinitel zatížení, v němž jsou uváženy možné nepříznivé odchylky hodnot zatížení od reprezentativních hodnot
$\gamma_G$	[-]	dílčí součinitel spolehlivosti stálých zatížení, v němž jsou uvažovány modelové nejistoty a proměnnost rozměrů

$\gamma_m$	[-]	dílčí součinitel vlastnosti materiálu
$\gamma_M$	[-]	dílčí součinitel vlastnosti materiálu, v němž jsou uvažovány modelové nejistoty a proměnnost rozměrů
$\gamma_P$	[-]	dílčí součinitel zatížení od předpětí
$\gamma_{Rd}$	[-]	dílčí součinitel vyjadřující nejistoty modelu odolnosti
$\gamma_{Sd}$	[-]	dílčí součinitel vyjadřující nejistoty modelu zatížení a/nebo účinku zatížení
$\gamma_Q$	[-]	dílčí součinitel spolehlivosti proměnných zatížení
$\lambda, \lambda_m$	[-]	štíhlostní poměr, mezní štíhlostní poměr
$\varphi(x)$	[rad]	úhel natočení
$\sigma_{x,Ed}, \sigma_{y,Ed}$	[Pa]	návrhová hodnota místního podélného normálového napětí, příčného normálového napětí
$\tau_{Ed}$	[Pa]	návrhová hodnota místního smykového napětí
$\psi_0, \psi_1, \psi_2$	[-]	součinitel pro kombinační, častou a kvazistálou hodnotu proměnného zatížení



# 1 Úvod

Lávky a mosty neodmyslitelně patří do světa dopravní infrastruktury už řadu let. Jen málokdo se dnes nad nimi pozastaví a obdivuje zručnost a kvalitu, se kterou byly některé postaveny před stovkami let. Řada z nich potěší svým architektonickým umem jejich autorů, jiné zase vzbudí úžas. Postupem času se architektura mostních konstrukcí vyvinula z klasického pojetí do výstřední moderny, která mnohdy svým vzhledem popírá téměř i zákony fyziky.

Cílem této práce bylo navrhnout hlavní nosné prvky lávky pro pěší, tj. hlavní nosníky, příčníky a vedlejší podélníky. To vše bylo provedeno s ohledem na Evropské normy používané při návrhu stavebních konstrukcí.

Tato bakalářská práce je rozdělena do několika kapitol. Pozornost je nejprve věnována historii mostních konstrukcí, která sahá až do období před několika sty léty. Dále je zde uvedeno základní rozdělení mostních konstrukcí. Ke každému typu jsou uvedeny výhody a nevýhody jejich stavby. V této kapitole nalezneme i zástupce jednotlivých konstrukčních typů, jak z oblastí mostů, tak i lávek. Některé z nich se nacházejí i na území České republiky.

Následující kapitola se zabývá designovými návrhy lávky. Bylo zvažováno několik různých variant a každá z nich je doprovázena v práci skicou. Opět jsou popsány jejich výhody a nevýhody. Závěrem kapitoly je čtenáři objasněno, jak bude navrhovaná látka vypadat a jsou zmíněny důvody, pro které byla daná varianta vybrána jako finální.

Čtvrtá kapitola se zabývá popisem samotné konstrukce lávky. Zmíněny jsou dané základní rozměry a použité materiály. Dále jsou detailně popsány a rozkresleny jednotlivé části lávky. Rovněž bylo uvažováno několik možných variant. Detailně je popsáno a zobrazeno možné uchycení závěsných prutů.

První část páté kapitoly je věnována obecným pravidlům pro návrh konstrukce. Nejdříve jsou uvedeny základní předpoklady, které jsou v práci respektovány. Poté je nastíněna problematika metody dílčích součinitelů a jsou zde zmíněny oba mezní stavy, které jsou při ověřování konstrukce používány (mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti). Druhá část se zabývá samotným návrhem nosných částí. Stručně je zde nastíněna metoda momentových ploch, dle které jsou deformace konstrukce vyšetřovány. Dále je věnována pozornost přímo popisu tří nosných částí lávky, tj. hlavním nosníkům, příčníkům a vedlejším podélníkům. Na závěr této kapitoly jsou stručně komentovány výpočty realizované v programu Matlab. Součástí jsou i předběžné výpočty prvotních rozměrů.

Šestá kapitola popisuje výpočty lávky pomocí systému MSC.Marc, kde byly rozměry zjištěné v předchozí kapitole použity jako vstup pro zpřesnění analýzy. V rámci této části byla také provedena pevnostní analýza středové branky lávky.

# 2 Lávky

## 2.1 Historie

Lávky ve 21. století pro nás znamenají něco tak samozřejmého, že si proto ani nestačíme povšimnout, kolik jich kolem nás je. A ani v minulosti tomu nebylo jinak. Protože naši předci neznali technologie, která známe dnes my, jednoduše ponechávali spadlé kmeny stromů přes řeky, potoky, menší údolí či jiné terénní překážky. A tak vznikla první mostní konstrukce. Postupem času, kdy člověk poznával a zlepšoval technologii obrábění dřeva, se mostní konstrukce začaly podobat těm, které známe dnes. Kamenné pilíře, které byly později používány, umožnily stavět delší konstrukce, které se právě díky nim staly pevnější a stabilnější. Díky základním stavebním prvkům, které pocházejí např. z období románské kultury, gotiky či renesance je škála mostních konstrukcí pestrá a originální. Od 16. století se mosty začínaly stavět bez tradičního zastřešení a osazovaly se chodníky. Industrializace sebou přinesla v oblasti stavby mostů několik změn, hlavně co se týče použitého materiálu. Dřevěné konstrukce a viadukty z kamene a cihel byly nahrazovány mosty litinovými. Prvním mostem tohoto typu je Iron Bridge v Anglii (obr. 2.1). Tento most, který spíše připomíná železnou pavučinu, byl otevřen v roce 1781. Konstrukce samotná se skládá z pěti hlavních žeber na zděných pilířích. Za povšimnutí určitě stojí i ozdobné kruhy, které mají nejen ozdobný efekt, ale také vyztužují konstrukci. Celý most je bezpochyby ukázkou velmi přesné slévárenské práce, kdy jednotlivé prvky velmi dobře zapadají jeden do druhého. Po zdokonalení výroby oceli, byly litinové mosty vystřídány ocelovými. V průběhu 19. a 20. století dosáhla pevnost oceli díky technologii výroby takové úrovně, že mostní konstrukce byly rozšířeny o další druhy, např. řetězové a lanové.



*Obr. 2.1: Iron Bridge v Anglii, převzato z [5]*

## 2.2 Rozdělení konstrukcí

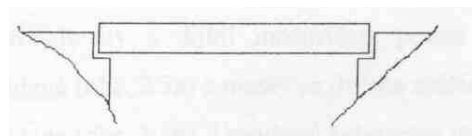
Konstrukce mostů se dle [3] dají rozdělit dle několika hledisek a kategorií. Mohou být děleny:

- podle druhu dopravy
  - pozemní komunikace (silniční, dálniční), drážní (železniční, tramvajové), lávky pro chodce
- podle použitého materiálu
  - dřevěné, kamenné, ocelové, ocelobetonové, betonové, železobetonové, s použitím předpjatého betonu, plastové (kompozitní materiál)
- podle typu použité konstrukce
  - trámové, obloukové, zavěšené, visuté

Dále je zaměřena pozornost na poslední kategorii podle typu konstrukce a jsou specifikovány vlastnosti jednotlivých typů.

### 2.2.1 Trámové konstrukce

Trámové konstrukce, obr. 2.2, tvoří převážnou většinu všech mostních konstrukcí. Je to z důvodu, že tento typ lze použít pro všechny druhy dopravy a pro běžně se vyskytující rozpětí. Hlavní nosnou konstrukci obvykle tvoří ocelové trámy, které přenášejí zatížení z mostovky do spodní stavby prostřednictvím ložisek. Stavba těchto konstrukcí je jednoduchá a ekonomicky obvykle méně náročná v porovnání s ostatními.



Obr. 2.2: Ukázka trámové konstrukce

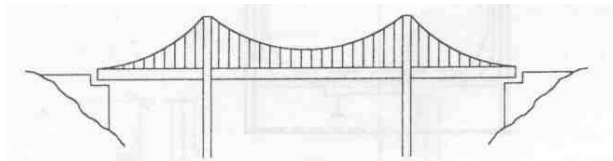
Jako zástupce tohoto typu konstrukce uveďme lávku, která se nachází přímo v Havlíčkově Brodě (obr. 2.3). Tato lávka je tvořena rámovou konstrukcí proměnné výšky. Konstrukce je vzhledem k použitému jednomu nosnému trámu řešena jednoduše a svým designem s oblými tvary do prostředí vhodně zapadá.



Obr. 2.3: Lávka pro pěší v Havlíčkově Brodě, převzato z [14]

## 2.2.2 Visuté konstrukce

Hlavním nosným prvkem této konstrukce je volně visící mohutné lano s pevně zajištěnými nehybnými konci, obr. 2.4. Konstrukce jsou používány převážně jako symetrické.



*Obr. 2.4: Ukázka visuté konstrukce*

Nosná lana jsou dominantně namáhána tahem, a proto ve srovnání s jinými typy mostů umožňují visuté konstrukce překlenutí mnohem větších rozpětí. Nejdelší visutý most Akaši-Kaikjó (obr. 2.5) s rozpětím 1 991 m se nachází na ostrově Honšú. Mezi další známé visuté mosty patří např. Brooklynský most v New Yorku nebo Golden Gate v San Franciscu.



*Obr. 2.5: Most Akaši – Kaikjó v Japonsku, převzato z [8]*

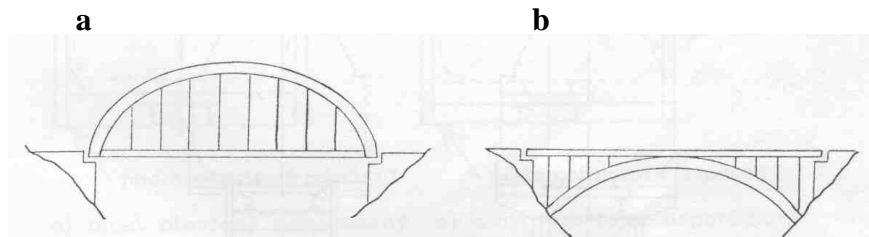
Visutá konstrukce lávky pro pěší, která stojí za zmínění, je bezpochyby Millenium Bridge, neboli most Milénia v Londýně přes řeku Temži (obr. 2.6). Autory návrhu byly společnosti Arup, Foster and Partners a sir Anthony Caro. Most byl z důvodu výrazných omezení a také pro zlepšení výhledu z mostu navržen jako visutý. Vlastní konstrukce lávky je sama o sobě velmi nízká. Lana jsou předepnutá zátěží 2000 t vůči dvěma pilířům, na nichž jsou ukotvena. Most byl dimenzován na zátěž, která odpovídá hmotnosti pěti tisíc osob.



*Obr. 2.6: Millenium Bridge v Londýně, převzato z [9]*

### 2.2.3 Obloukové konstrukce

Nosné oblouky, obr. 2.7, bývají často stavěny přes hluboká a nepřístupná údolí. Jsou velmi často používané. Základní výhoda obloukové konstrukce vyplývá zejména z jejího tvaru, který se volí blízký tvaru výslednicové čáry od vnějšího zatížení. Z tohoto důvodu je nejvhodnější parabola. Tyto konstrukce, na rozdíl od ostatních, mají oba konce upevněné v horizontálním směru. U tohoto typu konstrukce je nutné podotknout, že je zde velice důležitý vliv osových sil do podloží celé konstrukce. Pokud podloží není dostatečně pevné, je zapotřebí tuto konstrukci doplnit příčkou.



Obr. 2.7: Ukázka obloukové konstrukce s horní polohou mostovky (a), dolní polohou mostovky (b)

Nevýhodou bývá obecně náročnější a nákladnější výroba a celková montáž konstrukce. Zatím největší most tohoto typu je zobrazen na obr. 2.8. Jedná se o most Lupu v Šanghaji.



Obr. 2.8: Most Lupu v Šanghaji, převzato z [15]

Zástupcem této kategorie je v České republice např. cyklistická lávka přes řeku Vltavu v Českých Budějovicích. Na obr. 2.9(a) můžeme vidět počítačový návrh lávky

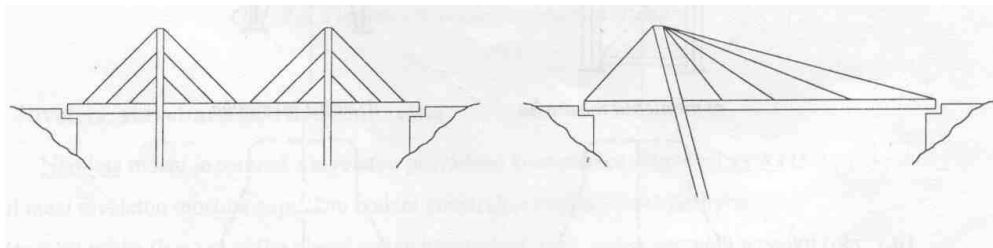


Obr. 2.9: Počítačový návrh lávky v Českých Budějovicích, skutečné provedení lávky v Českých Budějovicích, převzato z [14]

a na obr. 2.9(b) pak reálné provedení. Lávka byla vybudována v letech 2003 – 2005 a obyvatelům tak umožnila převedení cyklostezky a pěší dopravy na dříve nedostupný břeh. Lávka je vetknuta do integrovaných opěr náběhy z železobetonu, které přechází v ocelobetonovou mostovku se dvěma krajními ocelovými trubkami. Hlavní mostovka je vynášena tuhými závěsy z šikmého parabolického (skruženou trubkou tvořeného) oblouku. Sklon oblouku je cca 23°.

#### 2.2.4 Zavěšené konstrukce

Tato konstrukce patří mezi lehké a jejím hlavním principem je, že závěsná lana jsou vedena přímo z nosných sloupů. Počet závěsů může být různý a bývají uspořádány rovnoběžně nebo vějířovitě, obr. 2.10. Vhodné a hospodárné rozpětí zavěšených mostů se pohybuje kolem 300 až 400 m. Zavěšené konstrukce lávek pro chodce mohou být navrženy i pro rozpětí 100 m a méně.



*Obr. 2.10: Ukázka zavěšené konstrukce*

Nevýhodou zavěšených a také visutých konstrukcí může být zejména aerodynamická nestabilita, která se zvyšuje s nevhodným výběrem tvaru průřezu mostovky. Může vést k rozkmitání konstrukce a následnému zborcení mostu. Jako ukázkou zavěšené konstrukce lze uvést lávku Delta Pond, v Oregonu v USA (obr. 2.11). Lávku tvoří desková konstrukce. Hlavní pole jsou zavěšena na pylonu tvaru písmene V. Lávka není rovná, ale je mírně zvlněna, což z designového hlediska budí zajímavý a nevšední dojem.



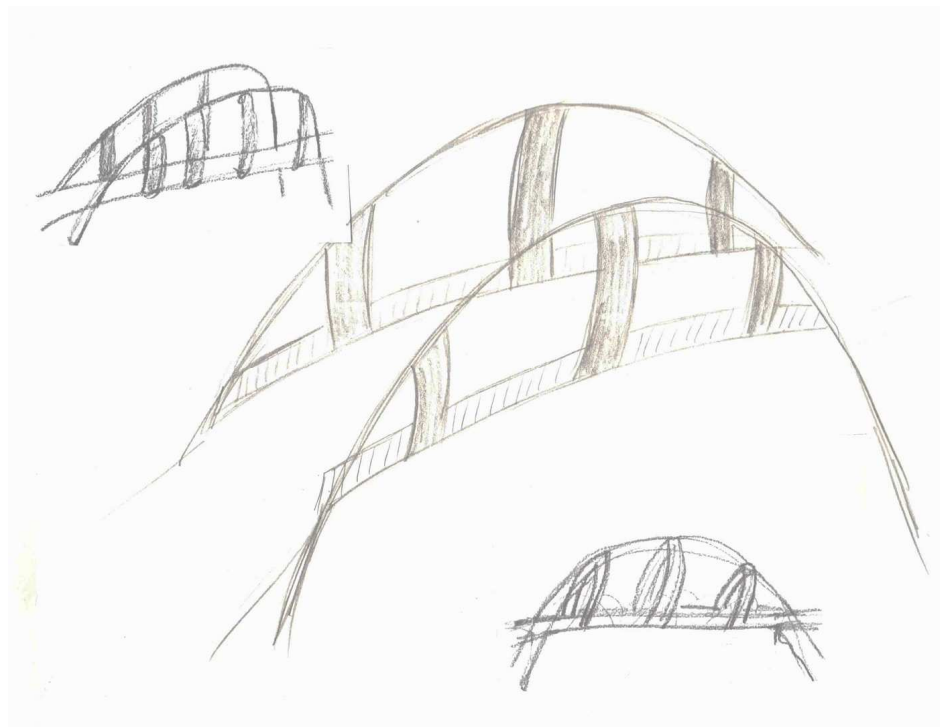
*Obr. 2.11: Lávka Delta Pond v Oregonu, převzato z [14]*

### 3 Designové návrhy a skici

Při návrhu lávky bylo zapotřebí vzít v úvahu i její umístění. Byla vybrána lokalita na severním Plzeňsku, mezi obcemi Třemošná a Záluží. Vzhledem k aktuální situaci, kdy byl v dané lokalitě vybudován obchvat města Třemošná a byla tak zkomplikována cesta pro pěší, je mezi obcemi nutné vybudovat lávku, která dřívější cestu nahradí. Lávka bude součástí značené turistické trasy, která byla mezi obcemi hojně využívána.

V důsledku hlubokého zářezu, kterým vede obchvat, bude lávka ve výšce asi 7 m nad vozovkou a bude 60 m dlouhá. Vzhledem k vybrané lokalitě nebyla uvažována jako jedna z možností lávka visutá, která se hodí pro mnohem delší překlenutí vzdálenosti. Tento typ by byl pro námi navrhovanou lávku zbytečně složitý a finančně nákladný. Při designových návrzích byly proto uvažovány typy lávek obloukových, zavěšených a trémových.

Nejdříve byla uvažována lávka obloukového typu. Při pohledu na tento klasický typ lávky (obr. 3.1) stojí za zmínku hlavně její jednoduchost. Obloukové konstrukce patří po finanční stránce k těm méně náročnějším. Z urbanistického hlediska je umístění lávky do dané lokality velice vhodné. Jako hlavní nosná část je použit dvojitý nosný oblouk s postranními pásy, které vyztužují celou konstrukci.



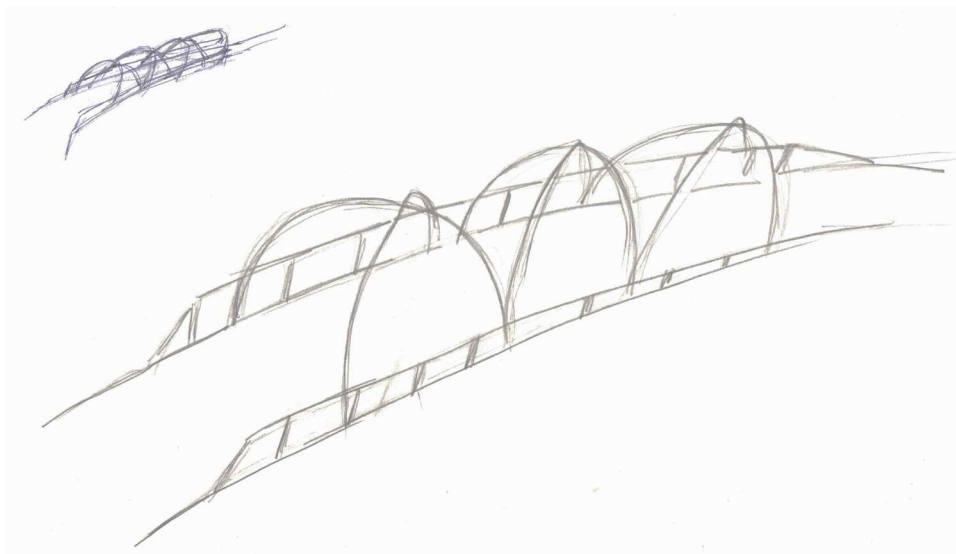
*Obr. 3.1: Oblouková lávka s postranními pásy*

Další návrh obloukové lávky (obr. 3.2) byl pojat v podobném stylu. Lávka je opět jednoduchá, ale v okrajové části města by i tak mohla mít velice působivý efekt. Nosnou částí je v tomto případě jeden hlavní oblouk. Na koncích jsou vsazeny betonové sloupky, zábradlí je rovněž sestaveno kombinací sloupků a pro osvětlení byly použity malé lampičky. Použití lávky takovéto konstrukce je však vhodnější pro menší rozpětí.



*Obr. 3.2: Oblouková lávka se sloupky*

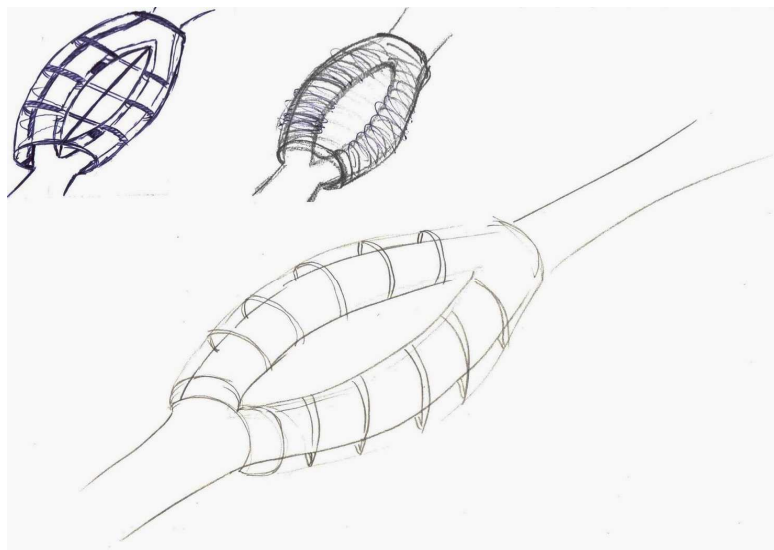
U následujícího návrhu (obr. 3.3) je zřetelná inspirace gotickým slohem (lomený oblouk). Nosný trám je zdoben trojicí oblouků, které jsou nasazeny na zábradlí a svým vzhledem připomínají malé přístřešky. Lávka sice nepůsobí nikterak honosně a svojí konstrukcí umožňuje pěším dobrý výhled do okolí.



*Obr. 3.3: Lávka s lomeným obloukem*

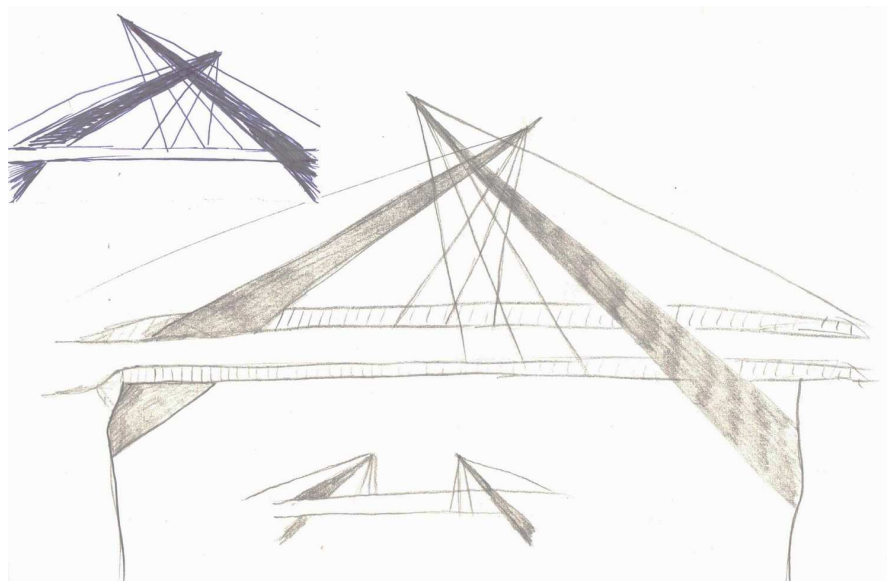


Zastřešená trámová lávka (obr. 3.4), která je uprostřed rozdělena do dvou směrů, možná působí jako návrh z daleké budoucnosti. Klasický nosný trám je osazen přístřeším kruhového průřezu, který je ozdoben ocelovými kruhy. Tato lávka se spíše než na okraj malého českého městečka hodí např. do moderní čtvrti La Défense v Paříži, kde za den projde přes 3 000 lidí a dvouproudový směr zde bude vzhledem k intenzitě pěšího provozu vhodnější. Přesto byla díky svému zajímavému a nadčasovému designu brána v potaz jako jedna z možností.



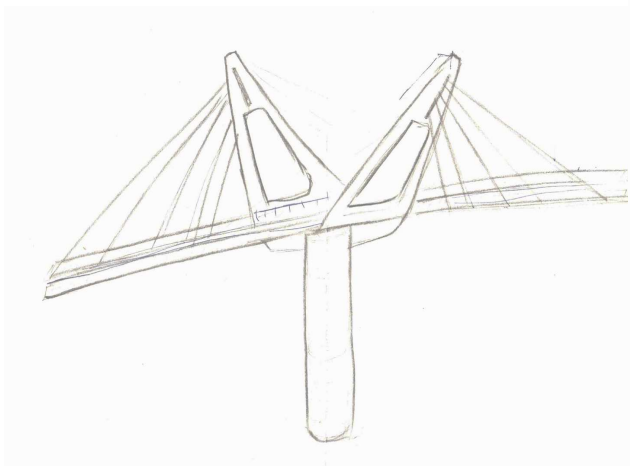
*Obr. 3.4: Zastřešená lávka*

Pro první typ zavěšené lávky (obr. 3.5) byla navržena poněkud výstřední konstrukce. Lávka je tvořena dvěma pilíři, které jsou zúženy v ostré zakončení. Každý pilíř vychází z protějšího břehu a oba jsou pevně spojeny s boky nosného trámu. Z konců pilířů vedou závěsná lana, která jsou ukotvena na stranách nosného trámu. Pro zpevnění jsou pilíře uchyceny ještě lany vedoucími ze břehu řeky. Aby vynikl design této lávky, bylo by její umístění vhodnější tam, kde by mohla být navržena do delší vzdálenosti, než je v této práci požadováno. Kromě toho lze z hlediska konstrukčního návrhu očekávat problémy s torzní tuhostí a stabilitou.

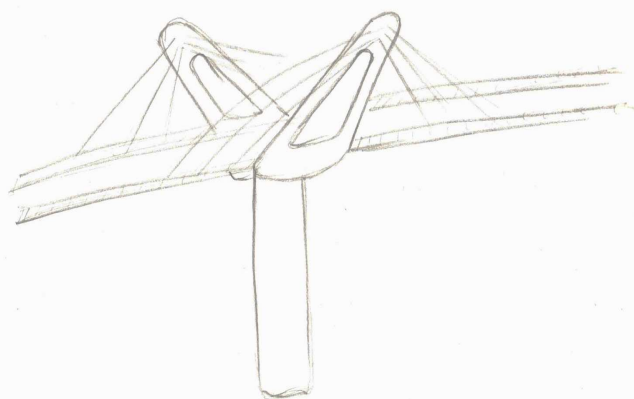


*Obr. 3.5: Zavěšená lávka s pilíři*

Poslední navržená lávka (obr. 3.6) je tvořena nosným sloupem kruhového průřezu, ze kterého vychází dvě trojúhelníková ramena. Přímo z ramen jsou symetricky zavěšená lana nebo pruty. Aby konstrukce nepůsobila robustně, jsou trojúhelníková ramena odlehčena středovými otvory.

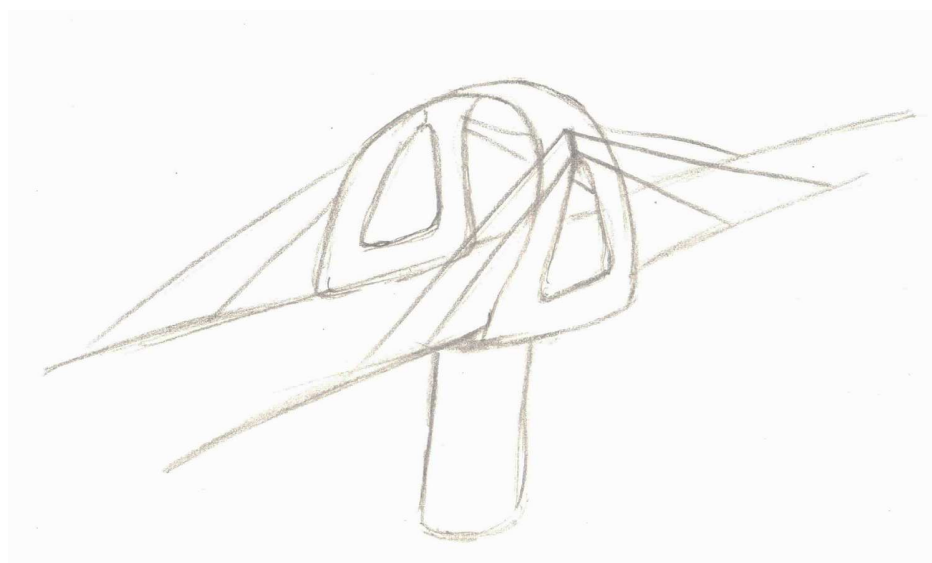


*Obr. 3.6: Zavěšená lávka s trojúhelníkovými rameny*



*Obr. 3.7: Zavěšená lávka se zaoblenými konci ramen*

Tento návrh byl vybrán jako jeden z nejpřijatelnějších. A to nejenom díky tomu, že složitost konstrukce patří mezi ty méně náročné, ale také proto, že i po ekonomické stránce lávka spadá mezi méně finančně nákladné. Na rozdíl od visutých mostů jsou závěsná lana ukotvena přímo do trámu mostovky. Po uvážení napětí, které vzniká v rozevření ramen bylo dále pro tuto lávku navrženo několik alternativních variant (obr. 3.7). Finální konstrukce je potom zobrazena na obr. 3.8, kde jsou ramena spojena v obloukovou branku, ze které jsou pruty zavěšeny do mostovky. Díky obloukové brance má lávka větší tuhost.



*Obr. 3.8: Zavěšená lávka se spojenými rameny v obloukovou branku*

## 4 Popis konstrukce

V následující kapitole jsou popsány jednotlivé části konstrukce lávky. Základní rozměry lávky byly stanoveny na základě doporučení po odborné konzultaci. Vzhledem k předpokladu, že lávka bude sloužit pouze pro chodce, nikoli pro cyklisty, je uvažována šířka 3 m. Vzdálenost přemostění je v daném místě 60 m, a proto je v polovině délky lávky umístěn betonový nosný pilíř. Materiál, který je použit na zbylé nosné části, je uhlíková ocel třídy 11. Tento materiál byl vybrán výhradně díky své dobré svařitelnosti a také proto, že jako jeden z mála druhů může být profilován. Vrchní část vozovky je z asfaltu.

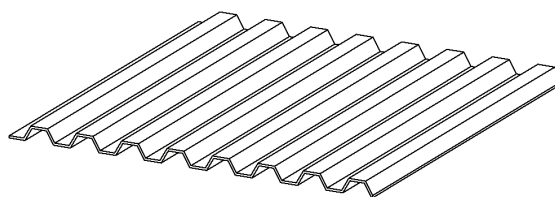
Dále byly zvažovány varianty profilování. Mezi nejvhodnější typy profilování byly brány v potaz konstrukce komůrkového typu, konstrukce z trapézových plechů a konstrukce roštového typu.

U komůrkových konstrukcí, viz obr. 4.1, je zřejmé, že tento typ je technologicky komplikovanější, po finanční stránce patří mezi více nákladné. I samotné sestavení desek vedle sebe je mnohem komplikovanější, než u ostatních typů.

Trapézové plechy na obr. 4.2 se většinou pokládají na hlavní nosníky a následně jsou zalaty betonem. Sklon jednotlivých vrubů je přibližně 60°.

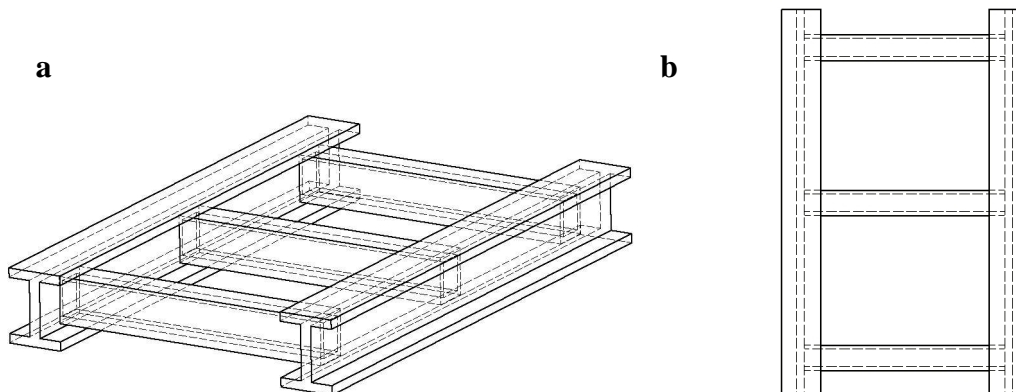


Obr. 4.1: Ukázka komůrkové konstrukce



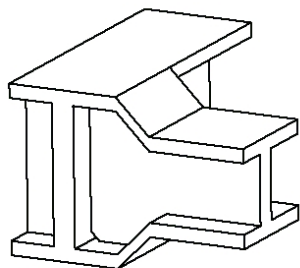
Obr. 4.2: Ukázka trapézového plechu

Pokud je konstrukce roštového typu, obr. 4.3(a-b), je obvykle spojována z profilových trámů, které mohou být navzájem svařovány. Nosná část konstrukce může mít, podobně jako u komůrkových typů, vyšší tuhost, ale na rozdíl od nich může mít nižší pořizovací náklady. Díky zvýšené tuhosti nosné části konstrukce rovněž dochází k posunutí velikostí vlastních frekvencí konstrukce k vyšším hodnotám.

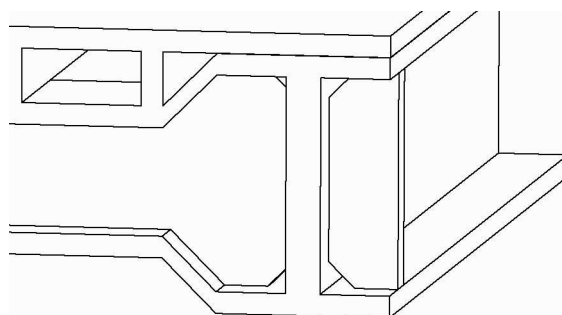


Obr.4.3: Ukázka roštové konstrukce - 3D pohled (a), půdorys (b)

Dle zmíněných kvalit byla vybrána konstrukce roštového typu. Konstrukci tvoří dva hlavní nosníky, neboli podélníky. Profil těchto nosníků je ve tvaru HEB [4]. Mezi těmito nosíky vedou příčníky s náběhy, viz obr. 4.4. Tyto příčníky mají tvar IPE [4]. Aby nedocházelo k deformaci horní pásnice, v místě, kde je umístěn příčník, je z vnější strany přidána výztuha (obr. 4.5). Tato vnější výztuha je dále opatřena trojúhelníkovými výřezy v rozích, aby v těchto místech nedocházelo ke vzniku koncentrace napětí.

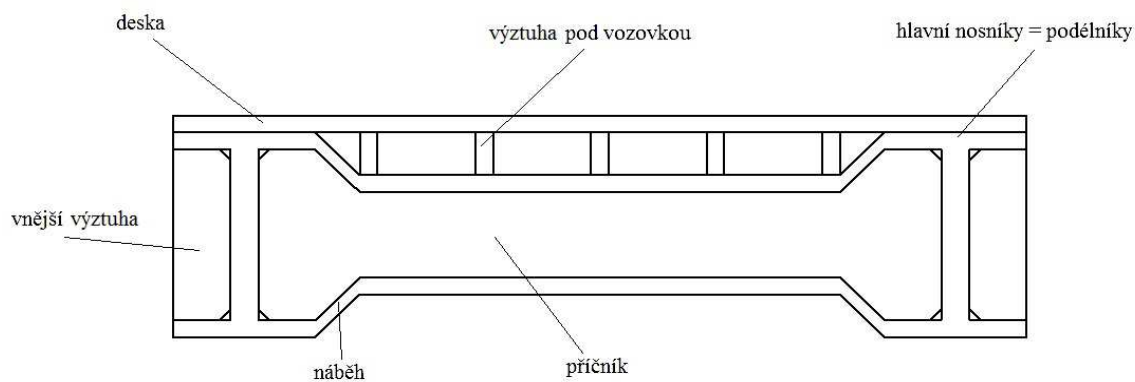


Obr. 4.4: Příčník s náběhy

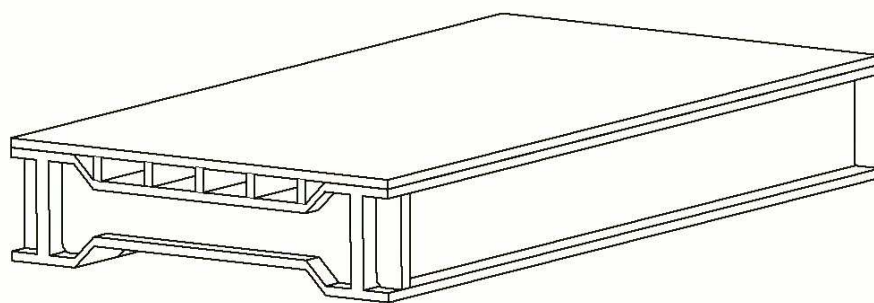


Obr. 4.5: Vnější výztuha pásnic

Aby mezi deskou vozovky a příčníky nedocházelo k velkým průhybům, jsou nad příčníky umístěny výztuhy obdélníkového tvaru. Tyto výztuhy rovněž zpevňují celou konstrukci. Jsou rozmístěny od středu rovnoměrně po obou stranách. Celkový pohled na konstrukci je zobrazen na obr. 4.6 a obr. 4.7.

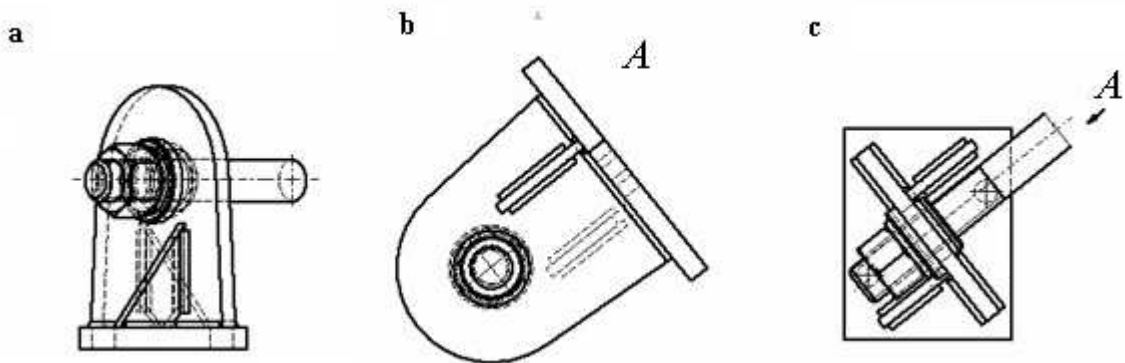


Obr. 4.6: Schéma konstrukce lávky

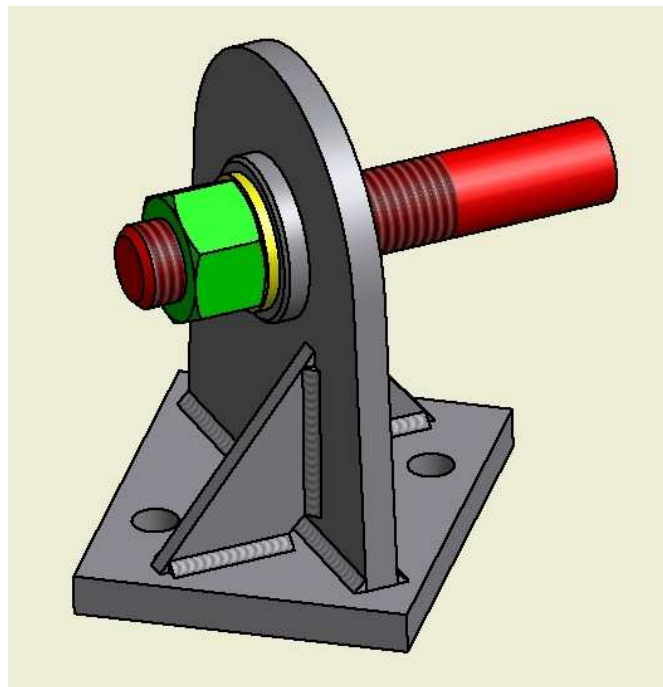


Obr. 4.7: 3D pohled na konstrukci

Jak bude uvedeno v následující kapitole, výpočty jsou prováděny pouze globálně, a proto nejsou řešeny jednotlivé detaily, např. svary, vruby, šrouby apod. Proto je zde pouze slovně komentováno uchycení prutů, které by pak bylo realizováno ve skutečnosti. Konstrukce uchycení prutů k mostovce, které je zobrazeno na obr. 4.8 (a-c), sestává z úchytu, samotného prutu, podložky a dopínací matice. Úchyt je svařenec složený z upínací desky, kde jsou vyvrtány otvory pro kotvící šrouby, z příčné desky a pouzdra. Pro zvýšení pevnosti proti případnému bočnímu namáhání je úchyt opatřen dvěma žebry. Do otvoru pouzdra úchytu je nasazen prut a pomocí koncového závitu je přitahován maticí. Tento systém upnutí umožňuje přesné nastavení délky prutu. Na obr. 4.9 je pak pro lepší představu zobrazeno celé uchycení v barevném 3D provedení.



*Obr. 4.8: Uchycení prutu v nárysu (a), v pootočeném pohledu (b), v půdorysu (c)*



*Obr. 4.9: Uchycení prutu – 3D pohled*

# 5 Návrh lávky

## 5.1 Obecná pravidla pro návrh konstrukce

### 5.1.1 Základní předpoklady

V této práci byl proveden návrh lávky pro pěší. Návrh byl zpracován podle Eurokódů [1, 2]. Výpočty uváděné v těchto normách jsou uvažovány elastické a elastoplastické, včetně výpočtů stability konstrukce.

Globální analýza konstrukce je v této práci provedena dle teorie 1. řádu, tzn.:

- platí Hookeův zákon, úloha je tak lineární elastická,
- jsou uvažovány malé deformace a malé posuvy,
- materiál konstrukce je homogenní a izotropní,
- podmínky rovnováhy jsou definovány na nezdeformovaném tělese.

Dále pro jednoduchost nejsou uvažovány imperfekce konstrukce jako jsou geometrické odchylky od svislosti, přímosti a rovinnosti. Výpočty jsou prováděny na globální úrovni, a proto není provedena detailní analýza konstrukce, např. nejsou sledovány vlivy koncentrátorů napětí, které by byly v místech reálných svarů, vrubů nebo v místech usazení šroubů. S ohledem na rozsah této práce nejsou uvažovány vlivy namáhání, jako je vliv teploty na deformaci konstrukce, vliv zatížení sněhem a větrem. Proto byla uvažována větší rezerva spolehlivosti s ohledem na rozměry konstrukce. Dle normy ČSN EN 1991 [7] je možné, dle požadavků zadavatele, při návrhu lávky uvažovat i možnost výskytu vozidla, např. vozidla údržby nebo záchranné služby. Je předpokládáno, že vjezd těchto vozidel nebude na lávku umožněn, a proto výskyt vozidel na lávce není uvažován. Celkový návrh konstrukce je prováděn dle metody dílčích součinitelů. Metodika je podrobně popsána v ČSN EN 1990, viz [1].

### 5.1.2 Metoda dílčích součinitelů

Pro návrh konstrukce byla použita tzv. metoda dílčích součinitelů. Použitím této metody lze pro různé návrhové situace spolehlivě ověřit, že žádný z mezních stavů není překročen. Principem metody je popsat konstrukci 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 zároveň splněny. Protože u skutečné konstrukce ve většině případů nepůsobí pouze jeden druh zatížení, návrhová hodnota účinků  $E_d$  musí být stanovena prostřednictvím kombinace, které se mohou vyskytnout současně. V praxi se tak setkáme s kombinacemi zatížení, např. kombinace zatížení pro trvalé a dočasné návrhové situace, kombinace zatížení pro mimořádné návrhové situace nebo kombinace zatížení pro seizmické návrhové situace. Typy kombinací jsou podrobně popsány v [1]. Stálé zatížení je chápáno jako zatížení od vlastní tíhy konstrukce a také od pevného zařízení na konstrukci. Mezi zatížení proměnné patří tzv. užité zatížení, zatížení sněhem a větrem. Do užitečných zatížení řadíme zatížení od osob, od vnitřního vybavení budov a od vozidel do hmotnosti 16 tun.

V našem případě předpokládáme pouze zatížení stálé a hlavní proměnné - užitné. Toto proměnné zatížení je charakterizováno pomocí užitných ploch, které jsou rozdělovány 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 lokální ověření je uvažováno soustředěné zatížení  $Q_k = 4,5 \text{ kN}$ .

Aby bylo možné sestavit ověřovací podmínky pro oba mezní stavy, je zapotřebí definovat následující hodnoty. Dle příslušné kombinace a kategorie zátěžné plochy je dána charakteristická hodnota pro zatížení  $F_k$ . Po vynásobení dílčím součinitelem kombinace  $\psi$  je stanovena reprezentativní hodnota zatížení:

$$F_{rep} = \psi \cdot F_k. \quad (5.1)$$

Z této hodnoty je vypočítána potřebná návrhová hodnota:

$$F_d = \gamma_f \cdot F_{rep}, \quad (5.2)$$

kde  $\gamma_f$  je dílčí součinitel zatížení, díky kterému je zohledněna možná míra nejistoty vůči reprezentativní hodnotě.

Dalším parametrem je charakteristická hodnota vlastnosti materiálu  $X_k$  (např. mez kluzu). Dělením příslušným dílčím součinitelem spolehlivosti materiálu  $\gamma_m$  je určena návrhová hodnota materiálové vlastnosti:

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_m}. \quad (5.3)$$

Jsou-li uvažovány geometrické odchylky rozměrů konstrukce, dalším parametrem jsou návrhové hodnoty rozměrů, které jsou definovány vztahem:

$$a_d = a_{nom} \pm \Delta a, \quad (5.4)$$

kde  $\Delta a$  vyjadřuje změnu nominální hodnoty rozměrů. V této práci však geometrické odchylky nejsou uvažovány. Hodnoty návrhové jsou potom brány totožné s hodnotami nominálními, tj.

$$a_d = a_{nom}. \quad (5.5)$$

### 5.1.3 Mezní stav únosnosti

Pro tento mezní stav nesmí být únosnost materiálu překročena v žádném daném místě konstrukce. Stav se týká bezpečnosti lidí, konstrukce a jejího obsahu. Mezní stav únosnosti může být vyjádřen pomocí formálního vztahu:

$$E_d \leq R_d. \quad (5.6)$$

Návrhovou hodnotu účinků zatížení  $E_d$  lze vyjádřit jako:

$$E_d = \gamma_{sd} E \{ \gamma_{f,i} F_{rep,i}; a_d \} \quad \text{pro } i \geq 1, \quad (5.7)$$

kde  $\gamma_{sd}$  je dílčí součinitel vyjadřující nejistoty modelu zatížení. Návrhovou odolnost  $R_d$  lze pak zapsat vztahem:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{R_d}} R \{ X_{d,i}; a_d \} = \frac{1}{\gamma_{R_d}} R \left\{ \frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}}; a_d \right\} \quad \text{pro } i \geq 1, \quad (5.8)$$

kde  $\gamma_{R_d}$  je dílčí součinitel vyjadřující nejistoty modelu odolnosti.

S ohledem na typ zatěžování jsou rozlišovány celkem čtyři mezní stavy a dle každého z nich je určen dílčí součinitel  $\gamma$ . Dle normy ČSN EN 1990 je součinitel spolehlivosti stálých zatížení  $\gamma_G$  určen hodnotou  $\gamma_G = 1,35$ . Pro potřeby následujících

výpočtů je používáno zatížení, které lze formálně zapsat:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" \gamma_P P "+" \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}, \quad (5.9)$$

kde symbol “+” naznačuje formální sčítání, neboli současné působení zatížení a  $\gamma_Q$  je dílčí součinitel spolehlivosti proměnných zatížení. Dle normy ČSN EN 1993 jsou doporučovány následující dílčí součinitele spolehlivosti materiálu  $\gamma_M$ :

$$\gamma_{M0} = 1,00, \gamma_{M1} = 1,00, \gamma_{M2} = 1,25. \quad (5.10)$$

Pro kontrolu rozměrů v případě kombinací  $N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$  a  $M_{z,Ed}$  lze v souladu s normou ČSN EN 1993 použít následující vztah:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1, \quad (5.11)$$

kde  $N_{Rd}$ ,  $M_{y,Rd}$  a  $M_{z,Rd}$  jsou návrhové hodnoty únosnosti, které jsou určeny v závislosti na klasifikaci průřezu.  $N_{Ed}$  je návrhová osová síla a  $M_{y,Ed}$ ,  $M_{z,Ed}$  jsou pak návrhové ohybové momenty k osám  $y$  a  $z$ . V případě, že používáme pro ověření v rozhodujícím bodu průřezu přímo složky tenzoru napětí, lze dle [2] aplikovat vztah ve tvaru:

$$\left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) \left( \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) + 3 \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1, \quad (5.12)$$

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,  $\tau_{Ed}$  je návrhová hodnota smykového napětí v uvažovaném bodu,  $f_y$  je mez kluzu a  $\gamma_{M0}$  je dílčí součinitel spolehlivosti materiálu.

#### 5.1.4 Mezní stav použitelnosti

Tento mezní stav lze chápat s ohledem na funkčnost objektu nebo nosných prvků za běžného provozu, rovněž tak s ohledem na pohodlí osob a vzhled konstrukce či stavby. Mezní stav použitelnosti lze formálně vyjádřit jako:

$$E_d \leq C_d, \quad (5.13)$$

kde  $C_d$  je návrhová hodnota příslušného kritéria použitelnosti a  $E_d$  je návrhová hodnota účinků zatížení, která je určena na základě příslušné kombinace. Charakteristická kombinace, která se ve většině případů používá pro nevratné mezní stavy, může být uvedena ve tvaru:

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; Q_{k,1}; \psi_{0,i} Q_{k,i}\} \quad j \geq 1, \quad i \geq 1. \quad (5.14)$$

Pro zatížení v závorce  $\{ \}$  pak můžeme psát:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} "+" P "+" Q_{k,1} "+" \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}, \quad (5.15)$$

kde symbol “+” opět naznačuje formální sčítání, viz vztah (5.9). Dílčí součinitele, viz vztahy (5.10), mají být dle normy ČSN EN 1990 pro stavy použitelnosti rovny 1, pokud není zadavatelem stanoveno jinak. Obvykle lze za hodnotu  $C_d$  uvažovat jistou deformaci konstrukce. Norma [2] uvádí pro kategorii svislých průhybů následující



podmínku:

$$\delta_{\max} = \frac{L}{250}, \quad (5.16)$$

kde  $L$  je délka nosníku.

## 5.2 Návrh základních nosných částí

Hlavním cílem této části práce bylo navrhnout rozměry základních nosných částí lávky, konkrétně hlavních nosníků, příčníků a vedlejších podélníků. Tyto nosné části byly pro prvotní výpočty uvažovány jako rovinné nosníky. Analýza každého z nich byla provedena odděleně, s ohledem na konkrétní typ uložení a velikost zatížení.

Jak bylo popsáno v kapitole 5.1, zatížení je nutné uvažovat jako kombinaci několika stavů. Jako stálé zatížení bylo na nosníky použito zatížení od vlastní tíhy  $q_G$ . Toto zatížení bylo vždy stanoveno z konkrétní části lávky, která byla právě zkoumána. Následně pak bylo zatížení vztaženo pouze na délkový rozměr. Proměnné zatížení od osob  $q_Q$  bylo pro každý nosník určeno dle [7] a opět bylo přepočítáno na zatížení působící na linii. Násobením příslušnými dílčími součiniteli je vztah pro celkové zatížení daného nosníku pak vyjádřen:

$$q = q_G \cdot \gamma_G + q_Q \cdot \gamma_Q. \quad (5.17)$$

Z důvodu, že osoby na lávce nemusí být rozmístěny vždy rovnoměrně, doporučuje norma [7] uvažovat i tzv. lokální zatížení, které lze chápat jako osamělou sílu  $F_z$ , jež může měnit své působíště. Pokud je síla  $F_z$  uvažována, je zatížení  $q_Q$  nulové.

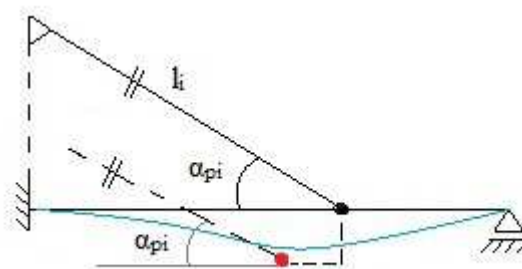
Pro prvotní výpočty byly využívány čtyři základní typy nosníků, které jsou podrobně analyzovány v příloze A. Deformace těchto nosníků jsou vypočítány pomocí metody momentových ploch [6], přičemž jednotlivé úhly natočení a průhyby lze určit pomocí těchto základních vztahů:

$$\varphi(x) = \frac{1}{EJ} \cdot T_f(x), \quad v(x) = \frac{1}{EJ} \cdot M_f(x), \quad (5.18)$$

kde  $T_f(x)$  je fiktivní síla a  $M_f(x)$  fiktivní moment v obecném místě fiktivního nosníku.

### 5.2.1 Návrh hlavních nosníků (podélníků)

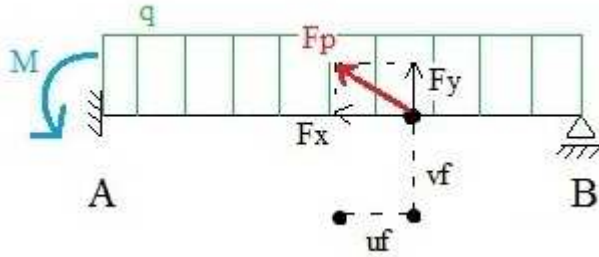
Při návrhu hlavních nosníků bylo předpokládáno, že branka s nosným pilířem uprostřed lávky je dostatečně tuhá. Nejsou tedy uvažovány jejich deformace. Proto bylo možné, pro předběžné určení rozměrů, model zjednodušit. V místě pilíře je chápáno ukotvení a je řešena pouze čtvrtina lávky. Zjednodušený model s uvažováním  $i$ -tého



Obr. 5.1: Uchycení prutu k nosníku s předpokládaným průhybem

prutu je zobrazen na obr. 5.1. Modře je naznačen předpokládaný průhyb nosníku. Černý bod představuje původní polohu uchycení prutu k nosníku, červený bod pak polohu po deformaci. Úhel  $\alpha_{pi}$  je pro  $i$ -tý prut dopočítán na základě souřadnice uchycení  $i$ -tého prutu na nosníku a výšce připojení tohoto prutu k brance. Na obr. 5.2 je potom zobrazen předpokládaný posun  $u_f$  a průhyb  $v_f$  bodu na nosníku se všemi vyznačenými účinky zatížení. Síla v prutu  $F_{pi}$  je rozložena do  $x$ -ové a  $y$ -ové složky dle následujících vztahů:

$$F_{xi} = F_{pi} \cdot \cos \alpha_{pi}, \quad F_{yi} = F_{pi} \cdot \sin \alpha_{pi}. \quad (5.19)$$



Obr. 5.2: Zobrazení posunu a průhybu bodu na nosníku

Předpokládaný průhyb  $v_{fi}$  je uvažován kladný svise ve směru dolů, kladný posun  $u_{fi}$  pak ve směru vlevo. Vzhledem k tomu, že nosník je v bodě A vetknutý, je úloha  $(N+1)$  krát staticky neurčitá, přičemž  $N$  je počet prutů. Deformační podmínku pro vetknutí v bodě A lze zapsat:

$$\varphi_A = 0, \quad (5.20)$$

kde  $\varphi_A$  představuje úhel natočení. Zbývající deformační podmínky jsou dány v místech připojení prutů k nosníku. Za předpokladu, že deformace nosníku jsou malé, změny úhlů  $\alpha_{pi}$  jsou zanedbatelné. Proto jsou úhly  $\alpha_{pi}$  uvažovány i po deformaci stejné. Deformační podmínky lze v souladu s obr. 5.3 zapsat následujícím způsobem:

$$\Delta l_{pi} = v_{fi} \cdot \sin \alpha_{pi} - u_{fi} \cdot \cos \alpha_{pi}, \quad \text{pro } i = 1, \dots, N, \quad (5.21)$$

kde  $\Delta l_{pi}$  je prodloužení prutu. Lze jej stanovit pomocí vztahu:

$$\Delta l_{pi} = \frac{F_{pi} \cdot l_i}{E_i \cdot A_i} = F_{pi} \cdot \Delta \bar{l}_{pi}, \quad (5.22)$$

kde  $E_i$  je Youngův modul,  $A_i$  je plocha průřezu prutu a  $l_i$  je původní délka  $i$ -tého prutu. Parametr  $\Delta \bar{l}_{pi}$  odpovídá prodloužení prutu od jednotkové síly.

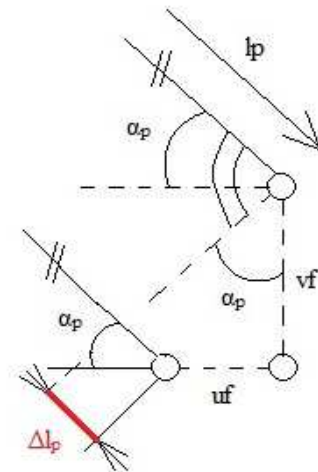
S využitím principu superpozice a výpočtů deformací základních typů nosníků uvedených v příloze A lze podmínku (5.20) rozepsat:

$$\varphi_A = \varphi_{Aq} + \varphi_{AM} + \varphi_{AF_z} + \sum_{i=1}^N \varphi_{AF_{pi}} = 0. \quad (5.23)$$

Principem úměrnosti lze tuto rovnici dále upravit na tvar:

$$\bar{\varphi}_{AM} \cdot M + \sum_{i=1}^N \bar{\varphi}_{AF_{pi}} \cdot F_{pi} = -(\varphi_{Aq} + \varphi_{AF_z}), \quad (5.24)$$

kde hodnoty  $\bar{\varphi}_{AM}$  je úhel natočení od momentu  $M$  jednotkové velikosti,  $\bar{\varphi}_{AF_{pi}}$  je příspěvek do velikosti celkového úhlu natočení od účinku jednotkové síly  $F_{pi}$  a  $\varphi_{Aq}$ ,



Obr. 5.3: Prodloužení prutu  $\Delta l_p$

resp.  $\varphi_{AF_z}$  jsou úhly natočení od účinků spojitého zatížení  $q$ , resp. osamělé síly  $F_z$ . Obdobně jako u rovnice (5.24), tak i zbylé deformační podmínky lze zapsat následujícím způsobem:

$$\begin{aligned} \bar{v}_{Mi} \cdot M \cdot \sin \alpha_{pi} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N (\bar{v}_{Fij} \cdot \sin \alpha_{pi} - \bar{u}_{Fij} \cdot \cos \alpha_{pi}) \cdot F_{pj} + \\ + (\bar{v}_{Fii} \cdot \sin \alpha_{pi} - \bar{u}_{Fii} \cdot \cos \alpha_{pi} - \Delta \bar{l}_{pi}) \cdot F_{pi} = -(v_{qi} + v_{F_z,i}) \cdot \sin \alpha_{pi} \quad i = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (5.25)$$

Ve vztazích (5.25) představuje  $\bar{v}_{Mi}$  průhyb od momentu  $M$  jednotkové velikosti a  $\bar{v}_{Fij}$ , resp.  $\bar{u}_{Fij}$  odpovídá průhybu, resp. vodorovnému posunu od  $j$ -té síly  $F_{pj}$  jednotkové velikosti. Členy  $v_{qi}$ , resp.  $v_{F_z,i}$  jsou potom průhyby od zatížení  $q$ , resp. síly  $F_z$ . Všechny tyto veličiny jsou vázány k místu uchycení  $i$ -tého prutu. Ze vztahů (5.24) a (5.25) je zřejmé, že neznámými hodnotami zde jsou velikost momentu  $M$  ve vetknutí a velikosti sil v prutech  $F_{pi}$ . Soustavu rovnic lze pak zjednodušeně zapsat v maticovém tvaru:

$$[\delta] \cdot \{X\} = \{F\}, \quad (5.26)$$

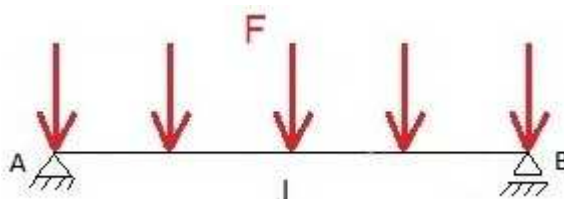
kde  $\{X\} = [M, F_{p1}, F_{p2}, \dots, F_{pi}, \dots, F_{pN}]^T$  je vektor neznámých hodnot,  $\{F\}$  je vektor pravých stran známých deformací a  $[\delta]$  je matice deformačních součinitelů od jednotkových zatížení.

Výsledné hodnoty ohybového momentu, osové síly a průhybu v podélném směru nosníku byly pomocí vztahů uvedených v příloze A stanoveny na základě principu superpozice.

### 5.2.2 Návrh příčníků

Při návrhu příček nebyly uvažovány náběhy, protože jejich délka je ve srovnání s délkou příčky malá. Náběhy mají malý vliv na stanovení základních rozměrů příčky. Příčník je svary pevně spojen s hlavními nosníky, a proto je možné jej považovat za dokonale vetknutý nosník. Ve skutečnosti však v krajních polohách k natočení dochází, a to vlivem kroucení podélníků. Proto byly nejprve vyšetřovány dva krajní stavy, kdy nosník byl uvažován jako dokonale vetknutý a poté jako nosník prostý. Následně byl zkoumán vliv velikosti momentu ve vetknutí na velikost deformace a na velikost maximálního ohybového momentu. Moment ve vetknutí byl sledován v rozpětí 0 – 100%.

Jako první výpočtový model byl uvažován nosník prostý na dvou podporách, viz obr. 5.4. V kapitole 4 bylo uvedeno, že na příčníku jsou umístěny výztuhy (vedlejší podélníky). Z důvodu umístění právě těchto výztuh je nosník zatížený svislými silami  $F$ . Počet sil je roven počtu výztuh pod vozovkou. Deformace a zatížení na nosníku byly vyšetřovány pomocí principu superpozice s využitím vztahů uvedených v příloze A pro nosník zatížený svislou silou  $F$ .



Obr. 5.4: Prostý nosník zatížený svislými silami



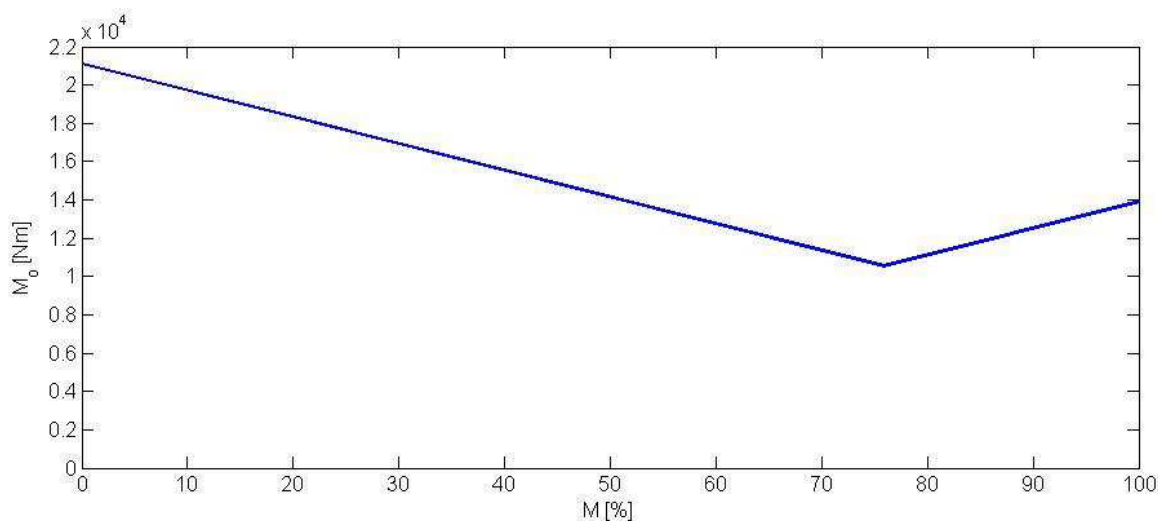
Obr. 5.5: Prostý nosník zatížený momentem  $M$  v podporách

Druhý výpočtový model byl uvažován jako nosník oboustranně dokonale vetknutý zatížený svislými silami. Úloha je 2x staticky neurčitá, bez uvažování neznámých osových sil. Díky symetrii je možné úlohu zjednodušit na úlohu 1x staticky neurčitou. K vyšetření deformací byly použity dva typy nosníků. První z nich je opět zobrazen na obr. 5.4. Druhý byl uvažován jako nosník prostý, který je v obou svých podporách zatížen neznámým momentem  $M$ , viz obr. 5.5. S využitím vztahů uvedených v příloze A je možné pomocí principu superpozice určit velikost momentu v podporách:

$$M = \frac{2 \cdot E \cdot J \cdot \varphi_{A(\text{výztuha})}}{l} = F \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i b_i}{3l^3} \cdot (3a_i b_i + b_i^2 + 2a_i^2), \quad (5.27)$$

kde  $l$  je délka příčnicku,  $n$  představuje počet výztuh pod vozovkou,  $\varphi_{A(\text{výztuha})}$  je celkový úhel natočení od všech sil u prvního typu nosníku,  $a_i$  a  $b_i$  jsou části nosníku, které jej rozdělují na úseky dle místa působení síly. Ze vztahu (5.27) je dále zřejmé, že velikost momentu nezávisí na hodnotách  $E$  a  $J$ .

S využitím velikosti  $M$ , viz (5.27), bylo možné sledovat vliv tohoto momentu na velikost maximálního ohybového momentu  $M_o$  na nosníku. Velikost síly  $F$  byla stanovena pomocí (5.17) a její hodnota pro  $n = 7$  byla 8280 N. Výsledný tvar průběhu ohybového momentu při působení sil  $F$  je zobrazen na obr. 5.6. Graf je možné zakreslit bez ohledu na znaménko momentu  $M$ , protože velikost ohybového napětí v tahu i tlaku je v daném řezu u nosníku stejná. Z obr. 5.6 je patrné, že z větší části převažuje moment uprostřed příčnicku. V grafu je však viditelný zlom, který naznačuje změnu, kdy má větší vliv moment ve vetknutí.



Obr. 5.6: Velikost maximálního ohybového momentu v závislosti na  $M$

Maximální průhyb, který je v polovině délky příčnicku, je možné vyjádřit vztahem:

$$v(l/2) = \frac{Fl^3}{24EJ} \cdot \left[ \frac{1}{2} + \sum_{i=1}^m 3 \frac{a_i}{l} - 4 \left( \frac{a_i}{l} \right)^3 \right] - \frac{M \cdot l^2}{8EJ}, \quad (5.28)$$

kde  $m$  lze vyjádřit vztahem:  $m = (n-1)/2$ . Symbol  $a_i$  určuje vzdálenost páru symetricky umístěných sil od podpor nosníku.

### 5.2.3 Návrh vedlejších podélníků

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4, umístění výztuh (vedlejších podélníků) zabrání větším deformacím mezi vozovkou a příčnicku. Dle obr. 4.6 je zřejmé, že volené výztuhy mají obdélníkový tvar a jsou pod vozovkou rozmístěny rovnoměrně tak, aby vždy uprostřed příčnicku byla jedna výztuha. Celkový počet je tedy vždy lichý.

S ohledem na podélné svaření výztuh po celé délce hlavních nosníků bylo předpokládáno, že konce vedlejších podélníků lze uvažovat jako vetknuté. Proto i zde lze rozdělit případ na dva jednotlivé nosníky, které jsou řešeny principem superpozice. První typ nosníku je prostý nosník zatížený spojitým zatížením, viz obr. A.1. Druhý typ nosníku je stejný jako v podkapitole 5.2.2, tedy zatížený na obou podporách momenty, viz obr. 5.5. Protože i zde lze převést úlohu na 1x staticky neurčitou, platí zde podmínka nulovosti výsledného úhlu natočení v podpoře A. Velikost momentu  $M$  lze potom obdobně jako u vztahu (5.27) vypočítat jako:

$$M = \frac{2 \cdot E \cdot J \cdot \varphi(l)}{l}, \quad (5.29)$$

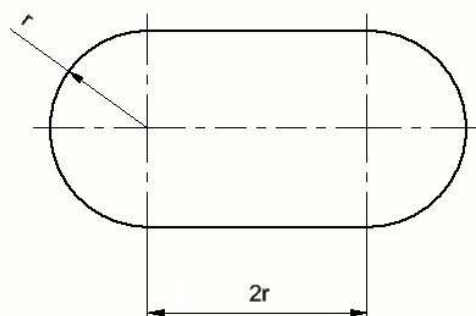
kde  $l$  je délka vedlejšího podélníku a  $\varphi(l)$  je úhel natočení od spojitěho zatížení  $q$ , viz vztah (A.2). Maximální průhyb je pak vypočítán pomocí vztahu:

$$v(l/2) = \frac{5ql^4}{384EJ} - \frac{M \cdot l^2}{8EJ}, \quad (5.30)$$

V tomto případě bylo zapotřebí také ověřit, zda výztuhy nebudou podléhat ztrátě stability. Uvažován byl vzpěr prutu. Dle tabulkových hodnot [11] pro ocel typu 11.375 by se měla hodnota mezního štíhlostního poměru  $\lambda_M$  pohybovat v rozmezí od 99 do 105. Na základě této hodnoty a hodnoty štíhlostního poměru  $\lambda$  pro vybraný průřez bylo rozhodováno, zda je vzpěr v oblasti Eulerovy teorie [10], či zda je zapotřebí použít Tetmayerovu teorii [10]. S ohledem na toto rozhodnutí byly následně vypočítány kritická síla a koeficient bezpečnosti, který by měl být větší než 2,5.

### 5.2.4 Návrh nosného pilíře

Jak již bylo výše uvedeno, hlavním cílem této části práce bylo navrhnout rozměry základních nosných částí lávky, konkrétně hlavních nosníků, příčnicků a vedlejších podélníků. Pro zpřesňující analýzu, která pak byla realizována pomocí výpočtového systému MSC.Marc, bylo zapotřebí určit orientačně rozměry nosného pilíře. Při stanovení rozměrů pilíře má rozhodující vliv ohybové napětí od účinku možného nárazu jedoucího vozidla. Proto byly základní rozměry pilíře určeny s ohledem na nárazovou zkoušku uvedenou v [7]. Dle této normy 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. Výška působících sil by měla být mezi 0,5 – 1,5 m od spodního okraje pilíře. Navržený profil nosného pilíře je potom zobrazen na obr. 5.7.



Obr. 5.7: Profil nosného pilíře

Matematický model pilíře byl zjednodušen a byl uvažován jako nosník vetknutý, namáhaný vodorovnou silou  $F_{dx}$  (resp.  $F_{dy}$ ) na ohyb. Zátěžné stavy byly dle daných sil celkem dva a byly řešeny odděleně. Síly vždy působily ve výšce  $a = 1$  m. Pro určení maximálního ohybového napětí bylo zapotřebí zjistit kvadratické momenty průřezu pilíře k osám  $x$  a  $y$ , viz obr. 5.7:

$$J_x = \frac{1}{12}(2r)^4 + \frac{\pi(2r)^4}{64}, \quad J_y = \frac{1}{12}(2r)^4 + 2 \cdot \left[ \frac{9\pi^2 - 64}{72\pi} r^4 + \frac{\pi r^2}{2} \cdot \left( \frac{4r}{3\pi} + r \right)^2 \right]. \quad (5.31)$$

Následně pak byly stanoveny moduly průřezu v ohybu a maximální ohybové momenty:

$$W_{ox} = \frac{J_x}{r}, \quad W_{oy} = \frac{J_y}{2r}, \quad M_{ox} = F_{dy} \cdot a, \quad M_{oy} = F_{dx} \cdot a. \quad (5.32)$$

Velikosti maximálních ohybových napětí jsou dány následujícím poměry:

$$\sigma_{ox} = \frac{M_{ox}}{W_{ox}}, \quad \sigma_{oy} = \frac{M_{oy}}{W_{oy}}. \quad (5.33)$$

## 5.3 Výpočty základních nosných částí

V následující části jsou popsány dosažené výsledky na základě prvotních výpočtů rozměrů nosných částí. Výpočty byly provedeny v prostředí Matlab [12]. U následujících konstrukčních prvků bylo uvažováno, že jsou vyrobeny z oceli 11.370. Hodnota Youngova modulu pro tento materiál byla uvažována 210 GPa. Hodnota meze kluzu pak byla 196 MPa. Materiál pro nosný pilíř byl uvažován beton třídy B20 s hodnotou Youngova modulu  $E = 31$  GPa a mezí pevnosti v tahu 0,9 MPa. Pro stanovení hmotností jednotlivých nosných částí bylo zapotřebí uvažovat hustotu oceli  $\rho = 7800$  kg/m<sup>3</sup>. Vozovka byla uvažována v tloušťce 0.01 m a byla složena ze dvou vrstev. Horní vrstvu (85% celkové tloušťky) tvořil asfalt s hustotou  $\rho = 1300$  kg/m<sup>3</sup>, spodní vrstvu tvořila ocel.

### 5.3.1 Výpočty hlavních nosníků

V programu Matlab byly pro návrh hlavních nosníků vždy zkoumány dva případy. Buď bylo uvažováno nenulové zatížení  $q_Q$  a síla  $F_z$  byla tak nulová, nebo tomu bylo naopak. Pro určení velikosti zatížení  $q_G$  byla použita hmotnost ¼ lávky bez uvažování pilíře a středové branky. Jeho hodnota byla 2650 N/m. Zatížení  $q_Q$  bylo stanoveno pomocí daného zatížení  $q_k$  násobeného polovinou šířky lávky. Jeho hodnota pak byla 7500 N/m. Výsledné zatížení  $q$  pak bylo stanoveno pomocí (5.17) pro případ  $F_z = 0$ .

Na základě odborné konzultace s Ing. Porkátem byly rozměry hlavních nosníků stanoveny následujícím způsobem: výška  $h = 800$  mm, šířka  $b = 300$  mm. Tyto hodnoty byly pro prvotní výpočty vzaty jako výchozí. Rezerva stavu únosnosti byla ověřována dle (5.11). Svislý průhyb pro stav použitelnosti byl pak kontrolován dle (5.16).

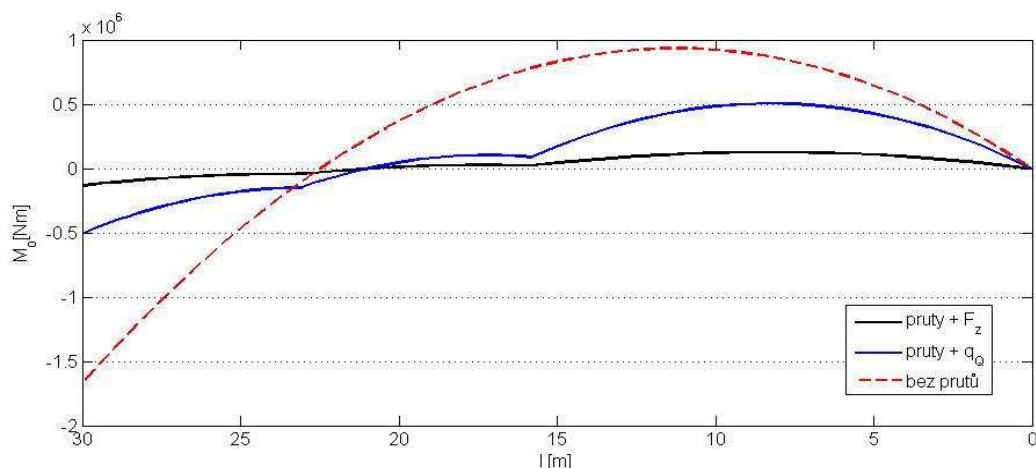
Nejprve byl uvažován stav zatížení s nenulovou silou  $F_z$ . Do celkového zatížení  $q$  je v tomto případě uvažován pouze účinek od vlastní tíhy. Souřadnice polohy síly  $F_z$  byla v průběhu analýzy měněna po celé délce poloviny nosníku. V každém kroku pak byla zkoumána největší hodnota ohybového momentu, průhybu a osově síly. Pro jednu konkrétní polohu síly byla každá maximální hodnota porovnávána s příslušnou celkovou hodnotou. Vznikly tak obálkové plochy všech možných největších hodnot ohybového momentu, průhybu a osově síly. Na základě dosažených výsledků bylo prokázáno, že zatížení s uvažováním osamělé síly  $F_z$  nemá rozhodující vliv pro stanovení mezního stavu únosnosti a použitelnosti. Proto tento zátěžný stav nebyl dále uvažován.

Dále byl vypočítán zátěžný stav, kde síla  $F_z$  byla nulová. Celkové zatížení  $q$  bylo tvořeno účinkem od vlastní tíhy  $q_G$  a účinkem od osob  $q_Q$ . Tato úloha byla řešena v několika variantách. Výsledné rozměry hlavního nosníku a závěsných prutů nebyly stanoveny pomocí optimalizace. Umístění prutů bylo voleno na základě znalosti průběhu celkového průhybu bez uvažování závěsných prutů. Aby pruty splňovaly svoji funkci, je třeba, aby jejich sklony vůči vozovce byly alespoň  $45^\circ$ . Po prvních návrzích bylo zjištěno, že síly v prutech vycházely příliš velké a pruty nesplňovaly podmínku (5.11). Bylo tedy zapotřebí zvětšit jejich výšku uchycení na středové brance, aby sklon mezi nimi a vozovkou byl větší. Bylo tedy uvažováno jejich připojení ve výšce cca 6 m. V následující tabulce (tab. 5.1) jsou uvedeny varianty, které byly uvažovány. Vzdálenost umístění prutu je vždy brána od kraje lávky směrem k místu vetknutí.

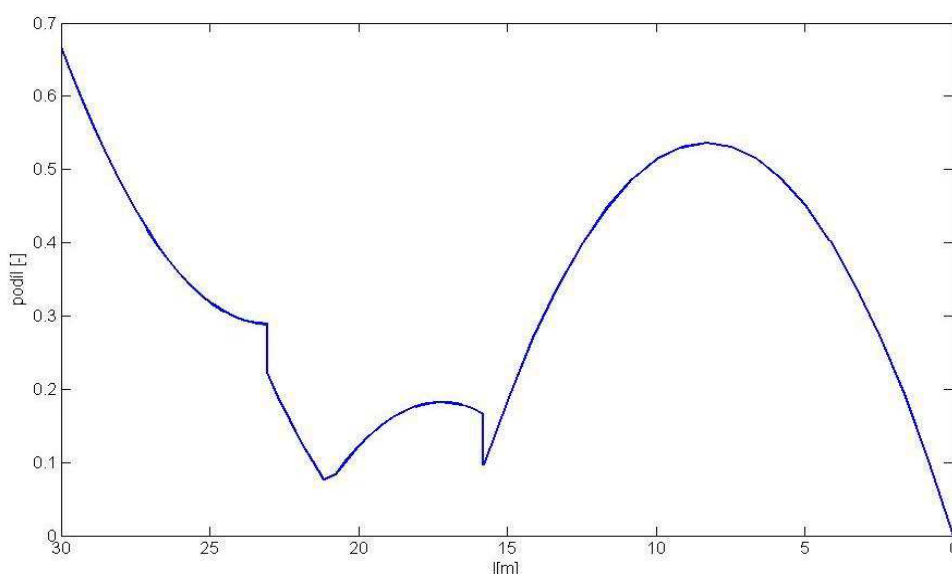
Tab. 5.1: Varianty řešení

Varianta	Počet prutů	Prut	Průměr prutu [mm]	Vzdálenost [m]	Síla [kN]
<b>1</b>	3	1	40	1/2.1	72.53
		2	50	1/1.9	347.77
		3	40	3/3.9	241.71
<b>2</b>	2	1	60	1/1.9	435.09
		2	40	3/3.9	237.29
<b>3</b>	2	1	60	1/1.9	373.03
		2	50	3/3.9	342.14

Při uvažování varianty 1 jsou na nosníku umístěny 3 pruty. Je zřejmé, že první prut je s ohledem na velikost síly, kterou přenáší, nadbytečný. Proto pro variantu 2 byl tento prut odstraněn a byly uvažovány pouze zbylé dva. Hodnoty maximálního průhybu pro variantu 1, resp. 2 pak byly 0.0876 m, resp. 0.0874 m. Aby byla splněna podmínka (5.11), bylo ale zapotřebí navýšit průměr prvního prutu na 60 mm. Síla v prvním prutu je pak skoro dvojnásobná než v prutu druhém. Optimální stav však je, jsou-li velikosti sil shodné. Proto byl průměr druhého prutu pro variantu 3 upraven na hodnotu 50 mm. Konečné navržené rozměry pro hlavní nosníky, které vyhovují všem podmínkám dovoleného namáhání, potom jsou: výška  $h = 550$  mm, šířka  $b = 300$  mm.



Obr. 5.8.: Výsledný ohybový moment



Obr. 5.9: Graf závislosti podmínky (5.11) na délce nosníku  $l$

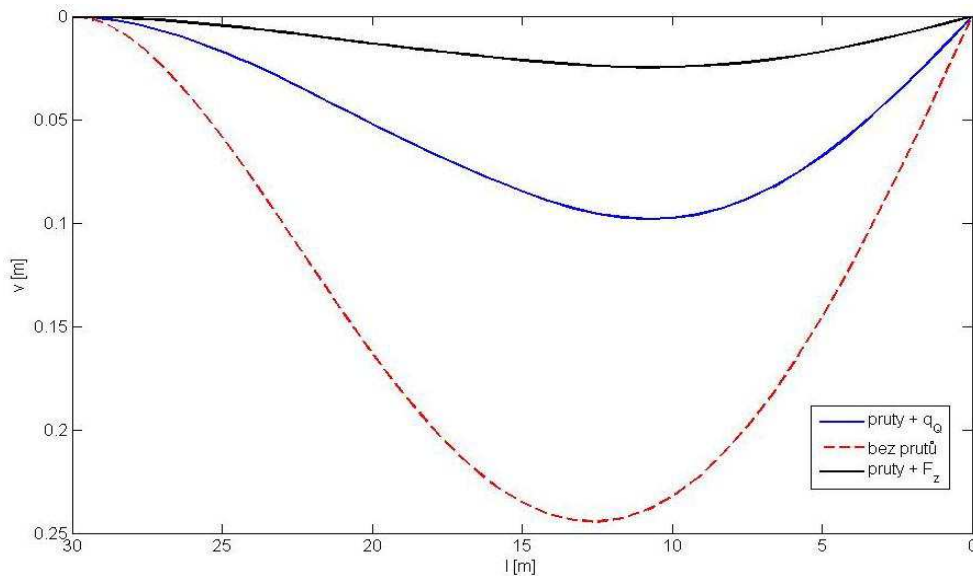
Na obr. 5.8 jsou zobrazeny průběhy ohybových momentů. Černě je zobrazen průběh ohybového momentu na nosníku, kde jsou uvažovány 2 pruty a síla  $F_z$  je nenulová. Rozměry a poloha prutu odpovídají údajům uvedených pro variantu 3. Modrá křivka zobrazuje průběh ohybového momentu na nosníku dle varianty 3. Zde jsou dobře patrné zlomy, které vznikají právě uchycením prutů v daných místech. Červená čárkovaná křivka ukazuje průběh ohybového momentu na nosníku, na který působí nenulové zatížení  $q_Q$  a pruty nejsou vůbec uvažovány.

Mezní stav únosnosti byl kontrolován dle (5.11). Jelikož je nosník namáhán pouze v rovině  $x$ - $y$ , člen obsahující  $M_{z,Ed}$  je v tomto případě nulový. Pro určení  $N_{Rd}$  a  $M_{Rd}$  byla vypočítána hodnota napětí s využitím meze kluzu dělené součinitelem  $\gamma_M$ . Toto napětí bylo pro určení síly  $N_{Rd}$  násobeno velikostí průřezu hlavního nosníku, zatímco pro určení momentu  $M_{Rd}$  bylo násobeno velikostí modulu průřezu v ohybu  $W_o$ . Na obr. 5.9 je zobrazen průběh podmínky (5.11). Je zřejmé, že po celé délce nosníku  $l$  je hodnota podílů menší než 1 a podmínka je tak splněna.

Graf na obr. 5.10 zobrazuje průhyb nosníku. Barevné rozlišení je stejné jako u obr. 5.8. Z grafu je zřejmé, že pruty mají výrazný vliv na velikost celkového průhybu.



Mezní stav použitelnosti pro svislý průhyb je v daném případě dle (5.16) 0,12 m. Podmínka je tedy splněna.



Obr. 5.10: Výsledný průhyb

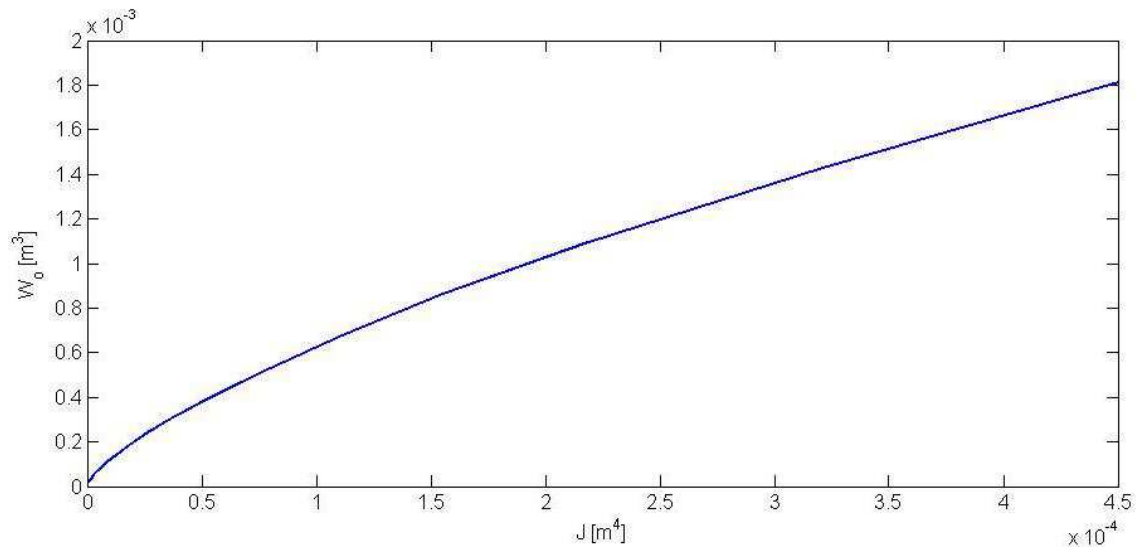
### 5.3.2 Výpočty příčníků

Obdobně jako u hlavních nosníků, tak i zde bylo zapotřebí nejprve stanovit hodnoty zatížení, které na nosník působí. Zatímco v případě hlavního nosníku se jednalo o spojité zatížení, zde je uvažováno zatížení přepočítané na velikosti sil, které na nosník působí díky umístění výztuh, viz obr. 5.4. Pro určení velikosti síly od vlastní tíhy  $F_G$  byla použita hmotnost jedné příčky. Dále byla uvažována plocha nad příčkou o hraně šířky lávky a o hraně délky rozteče mezi příčkami. Všechny části konstrukce, tj. část vozovky a vedlejší podélníky, které náleží průmětu této plochy do svislého směru, byly do celkové hmotnosti také započítány. Vlastní tíha nosného pilíře a středové branky opět nebyla uvažována. Síla  $F_G$  potom byla rovnoměrně rozdělena dle počtu výztuh. Její velikost byla 1967 N. Síla od účinku osob  $F_Q$  byla stanovena pomocí daného zatížení  $q_k$  násobeného výše popsanou plochou průmětu. Síla byla opět rovnoměrně rozdělena dle počtu výztuh a její velikost byla rovna 3750 N.

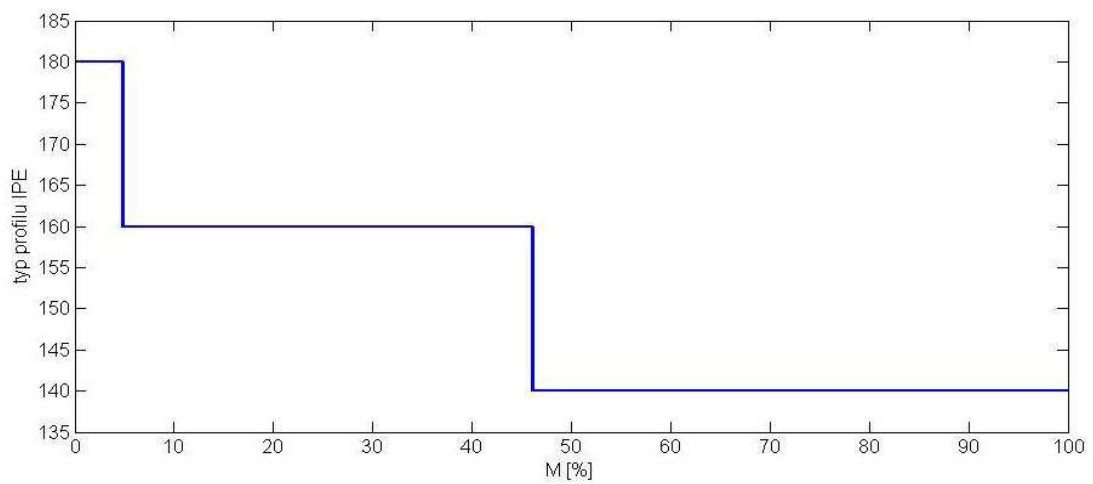
Jak již bylo uvedeno v kapitole 4, příčníky jsou průřezu IPE. Prvotní rozměry příčníku byly opět odhadnuty na základě odborné konzultace. Dle tabulkových hodnot, viz [11], byly vypočítány kvadratické průřezy  $J$  a moduly průřezů v ohybu  $W_o$ . Jejich závislost je zobrazena na obr. 5.11. Je evidentní, že závislost není lineární. Pro menší rozměry je nelinearita výraznější, než u rozměrů větších. Z toho důvodu bylo určení rozměrů příčníku provedeno pomocí tzv. fyzikální iterace.

Dle procentuálního zastoupení momentu  $M$  bylo zapotřebí zjistit, který průřez IPE [4] je pro příčník vhodný. Na obr. 5.12 je zobrazena závislost průřezu IPE na procentuálním zastoupení momentu  $M$  v podporách. Z grafu je zřejmé, že pokud budeme uvažovat prostý nosník ( $M = 0$ ), při kterém je ohybový moment největší, viz obr. 5.6, je zapotřebí použít IPE 180. Na následujícím obr. 5.13 je zobrazen průhyb uprostřed příčníku, protože právě zde jsou vzhledem k symetrii zatížení maximální hodnoty. Jednotlivé přímé části křivky odpovídají hodnotám IPE z obr. 5.12. Aby byla

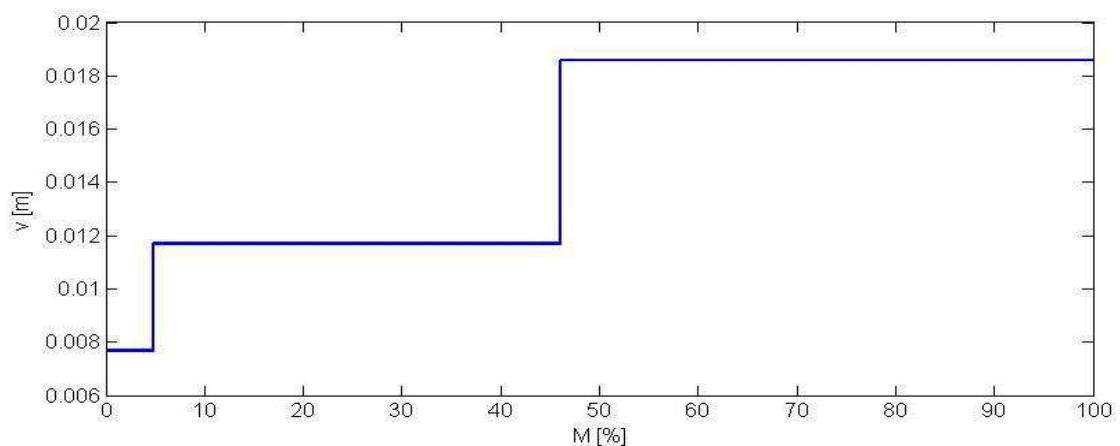
splněna podmínka použitelnosti, i zde je zapotřebí použít IPE 180, protože v tomto případě je dle (5.16) velikost přípustného průhybu rovna 0,012 m.



Obr. 5.11: Závislost modulu průřezu v ohybu  $W_o$  na kvadratickém momentu  $J$



Obr. 5.12: Závislost průřezu IPE na procentuálním zastoupení momentu  $M$



Obr. 5.13: Závislost průhybu  $v$  na procentuálním zastoupení momentu  $M$

### 5.3.3 Výpočty vedlejších podélníků

Výpočet zatížení působícího na vedlejší podélník byl proveden následujícím způsobem. Pro určení velikosti zatížení od vlastní tíhy  $q_G$  byla použita hmotnost jednoho vedlejšího podélníku. Dále byla uvažována plocha nad vedlejším podélníkem o hraně délky podélníku a o hraně délky roztečí mezi nimi. Část vozovky, která náleží průmětu této plochy do svislého směru, byla do celkové hmotnosti také započítána. Vlastní tíha nosného pilíře a středové branky nebyla opět uvažována. Velikost zatížení  $q_G$  pak byla 1173 N/m. Zatížení od účinku osob  $q_Q$  bylo stanoveno pomocí daného zatížení  $q_k$  násobeného výše popsanou plochou průmětu a jeho velikost byla rovna 2500 N/m. Výsledné zatížení  $q$  pak bylo 5333 N.

Protože z předešlých výpočtů jsou známy prvotní rozměry hlavního nosníku a příčnicku, výška vedlejšího podélníku byla dopočítána jako:

$$H_3 = \frac{H_1 - H_2}{2}, \quad (5.34)$$

kde  $H_1$  je výška hlavního nosníku a  $H_2$  je výška příčnicku.

Aby mohla být u vedlejších podélníků ověřena podmínka mezního stavu únosnosti (5.6), bylo zapotřebí stanovit maximální velikost ohybového momentu ve vetknutí. Na základě této znalosti bylo možné pomocí následujících vztahů vypočítat potřebnou šířku vedlejšího podélníku  $B_3$ :

$$B_3 = \frac{6 \cdot W_o}{H_3^2}, \quad (5.35)$$

kde hodnota modulu průřezu v ohybu  $W_o$  je rovna velikosti maximálního ohybového momentu, který je dělen maximálním dovoleným napětím. Toto napětí je stanovené podílem meze kluzu s příslušným dílčím součinitelem. S ohledem na výslednou šířku  $B_3 = 3,6$  mm byla dle tabulek [4] vybrána nejbližší vyšší hodnota 4 mm.

Ověření ztráty stability bylo provedeno dle [10]. Velikost štíhlostního poměru  $\lambda$  byla rovna 160. Na základě porovnání s mezním štíhlostním poměrem  $\lambda_M$  byla použita Tetmayerova teorie vzpěrné pevnosti. Výsledná bezpečnost, která byla vypočítána, byla 118. S ohledem na stanovenou bezpečnost zde nehrozí ztráta vzpěru.

### 5.3.4 Výpočty nosného pilíře

Vzhledem k působení sil  $F_{dx}$  a  $F_{dy}$ , které jsou uvažovány v případě možného nárazu, byl průřez nosného pilíře zvolen dle obr. 5.7. S pomocí vztahů uvedených v kapitole 5.2.4 bylo možné stanovit hledaný poloměr  $r$ . Výpočet byl prováděn odděleně v obou rovinách působících sil. Výsledné hodnoty poloměrů byly podobné:  $r_1 = 0,6401$  m ,  $r_2 = 0,6545$  m. Vzhledem k průřezu pilíře byla zvolena hodnota výsledného poloměru  $r = 0,75$  m .

## 6 Model lávky pomocí MKP

Prvotní rozměry zjištěné v předchozí kapitole byly použity jako vstup pro zpřesňující výpočty prováděné ve výpočtovém systému MSC.Marc [13], který je založen na principu metody konečných prvků.

Řešeny byly dva modely lávky. První z nich byl s ohledem na symetrické zatížení zjednodušen na  $\frac{1}{4}$  lávky a zatížení bylo uvažováno po celé délce lávky. Druhý model byl řešen jako  $\frac{1}{2}$  lávky v podélné ose a zatížení bylo uvažováno pouze na jedné straně od nosného pilíře ke kraji lávky. S ohledem na předešlé výpočty, kde byl zjištěn zanedbatelný vliv osamělé síly  $F_z$ , není zátěžný stav s touto silou v systému MSC.Marc uvažován. Protože lávka byla modelována i s nosným pilířem a středovou brankou, na rozdíl od předešlých analýz, nebylo zde možné předpokládat jejich dokonalou tuhost.

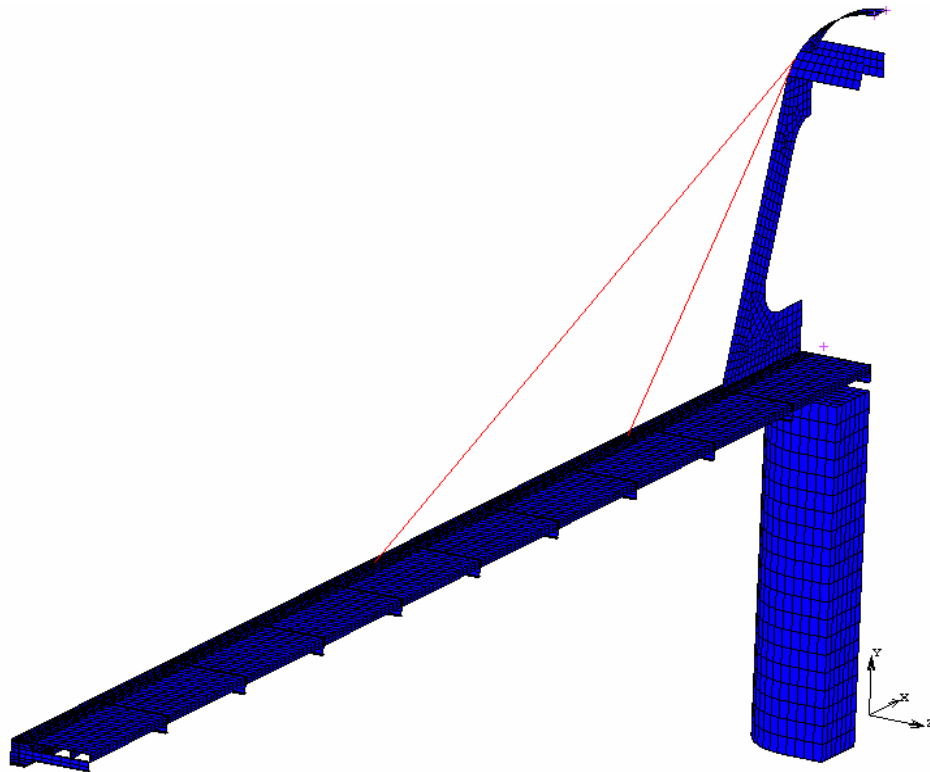
Jednotlivé nosné části byly vytvořeny pomocí procedur, které umožňovaly parametricky měnit veškeré zadané velikosti rozměrů, materiálové vlastnosti apod. Nosný pilíř byl s mostovkou spojen pomocí tuhého spojení, které je v [13] definováno pomocí tzv. „glue contact“. Procedury byly vytvořeny ve verzi MSC.Marc 2010. Jednotlivé modely vytvořené pomocí procedur byly složeny ve výsledný model lávky pomocí příkazu „merge“. Protože výpočtový software MSC.Marc 2010 nepodporoval použití prutových, skořepinových a objemových prvků při současném uvažování „glue contact“, byly pruty nahrazeny pružinami pomocí funkce „links“. Skořepinové prvky typu „shell“ jsou uvažovány jako tenkostěnné prvky s lineární aproximací posuvů. V systému MSC.Marc jsou označeny č. 139. Objemové prvky typu „brick“, které byly použity pro nosný pilíř, jsou uvažovány opět jako lineární. V systému MSC.Marc jsou označeny č. 7.

Materiál pro nosný pilíř byl použit beton třídy B20 s velikostí Youngova modulu  $E = 31$  GPa, s velikostí Poissonova čísla  $\nu = 0,2$  a hustotou  $\rho = 2300$  kg/m<sup>3</sup>. Kovová část lávky byla uvažována z oceli 11.370, pro kterou platí:  $R_e = 196$  MPa,  $E = 210$  GPa,  $\nu = 0,3$  a  $\rho = 7800$  kg/m<sup>3</sup>. Dalším materiálem použitým na konstrukci vozovky byl asfalt s velikostí Youngova modulu  $E = 5,5$  GPa,  $\nu = 0,33$  a  $\rho = 1300$  kg/m<sup>3</sup>. Vozovka byla v systému MSC.Marc modelována jako kompozitní materiál složený ze dvou vrstev, kde 85% horní vrstvy tvořil asfalt a zbývajících 15% tvořila vrstva ocelová. Po provedení prvních analýz bylo zjištěno, že pro středovou branku je nutné použít ocel s vyšší pevností. Vybrána byla ocel 11.500, která má velikost meze kluzu  $R_e = 250$  MPa.

### 6.1 Model čtvrtiny lávky

Čtvrtina lávky diskretizovaná pomocí konečných prvků je zobrazena na obr. 6.1. Model lávky byl složen z celkem 12 387 prvků, přičemž skořepinových prvků bylo použito 10 787. Závěsné pruty realizované pomocí spojovacích prvků typu „links“ byly definovány příslušnými hodnotami tuhostí jednotlivých prutů. Tuhosti mohou být zapsány ve tvaru  $E_i \cdot A_i / l_i$ , kde  $i$  reprezentuje jednotlivé pruty. Okrajové podmínky byly stanoveny následovně. Uchycením levého konce lávky bylo zamezeno posuvům ve směru osy  $y$  a  $z$ . Tato podmínka byla aplikována na krajní spodní uzly hlavního nosníku.

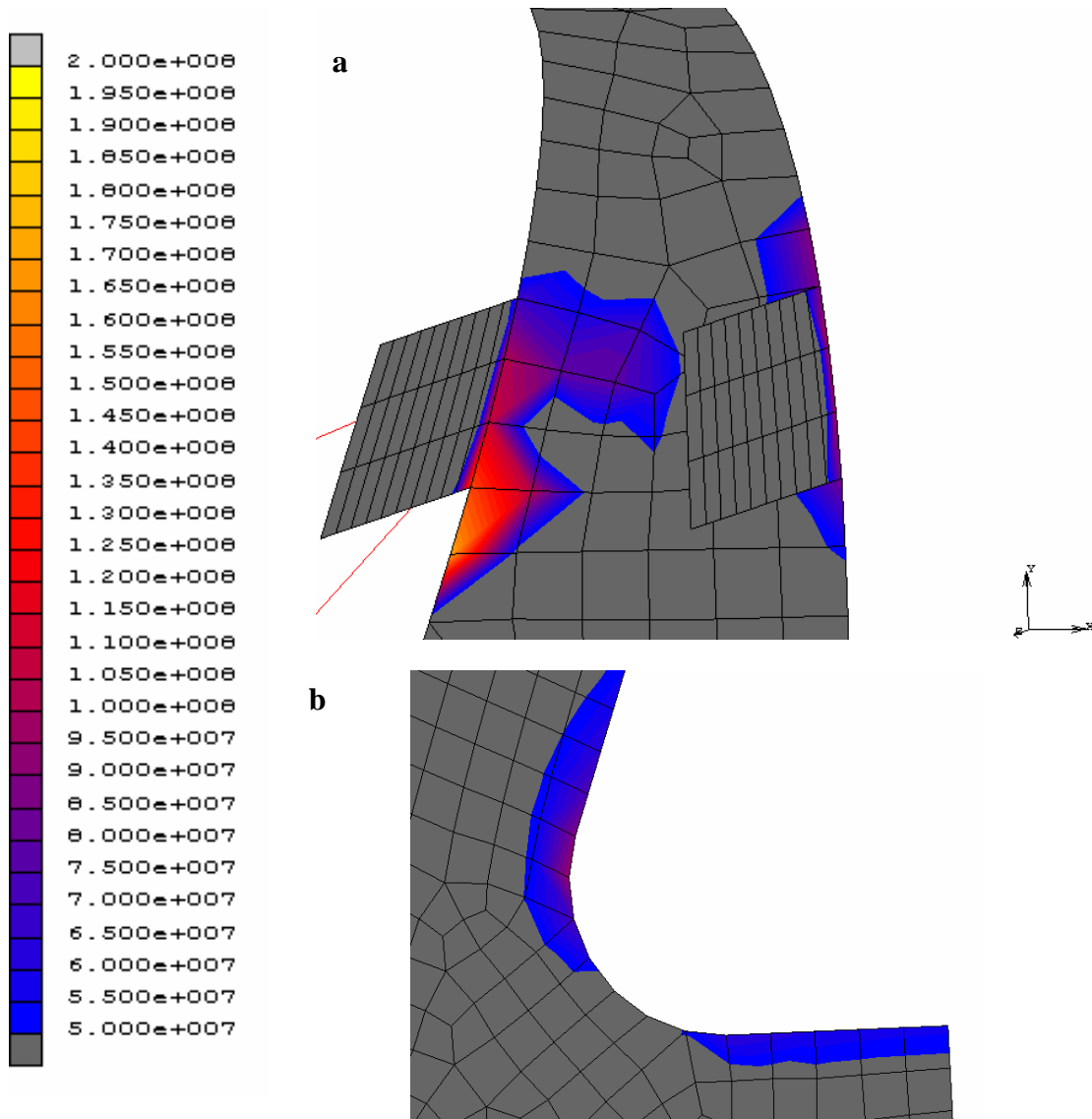
Podmínka uchycení sloupu byla použita na celou spodní plochu a to tak, že v ní bylo zamezeno posuvům ve všech směrech. Protože se jedná o model čtvrtiny lávky, jsou zde dvě roviny symetrie, pro které je zapotřebí stanovit následující podmínky. První z nich bylo zamezeno posuvu ve směru osy  $z$  a rotaci kolem osy  $x$ . Tato symetrie je uvažována podél osy  $x$  v rovině rovnoběžné s rovinou  $x$ - $y$ . V druhé podmínce symetrie byl definován nulový posuv ve směru osy  $x$  a definována nulová rotace kolem osy  $z$ . Tato podmínka je uvažována ve směru osy  $z$  v rovině rovnoběžné s rovinou  $y$ - $z$ . Zatížení od vlastní tíhy  $q_G$  bylo realizováno pomocí tzv. „gravity load“, které působí proti kladnému směru osy  $y$ . Aby zatížení od vlastní tíhy respektovalo vztah (5.17), hustoty jednotlivých materiálů byly násobeny dílčím součinitelem  $\gamma_G = 1,35$ . Zatížení od osob  $q_k$  bylo také násobeno příslušným dílčím součinitelem  $\gamma_Q = 1,5$  a působilo po celé délce lávky na horním povrchu lávky. Jeho velikost pak byla  $7500 \text{ N/m}^2$ .



*Obr. 6.1: Model čtvrtiny lávky*

Vyhodnocení výsledků maximálního napětí bylo prováděno pomocí hypotézy HMM. Vztah (5.12) po úpravě udává právě redukované napětí pro tuto hypotézu. Po prvních analýzách provedených v systému MSC.Marc 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 vyztužují. Původní tloušťka branky, která byla 0,01 m, byla zvětšena na hodnotu 0,014 m. Protože vysoké hodnoty napětí byly také v místech oblouků středového výřezu, rádiusy byly zvětšeny. Aby horní rádius nebyl na úrovni uchycení prutů k brance, celý výřez byl ještě posazen níže směrem k vozovce. Dále bylo zjištěno, že zatížení vzhledem k robustnosti konstrukce nevyvolává tak vysoké hodnoty redukovaného napětí jako v případě středové branky. V místě maximálního průhybu nepřesahují hodnoty HMM napětí na mostovce 130 MPa. Velikost maximálního průhybu byla ve srovnání s přípustným průhybem přibližně 3x

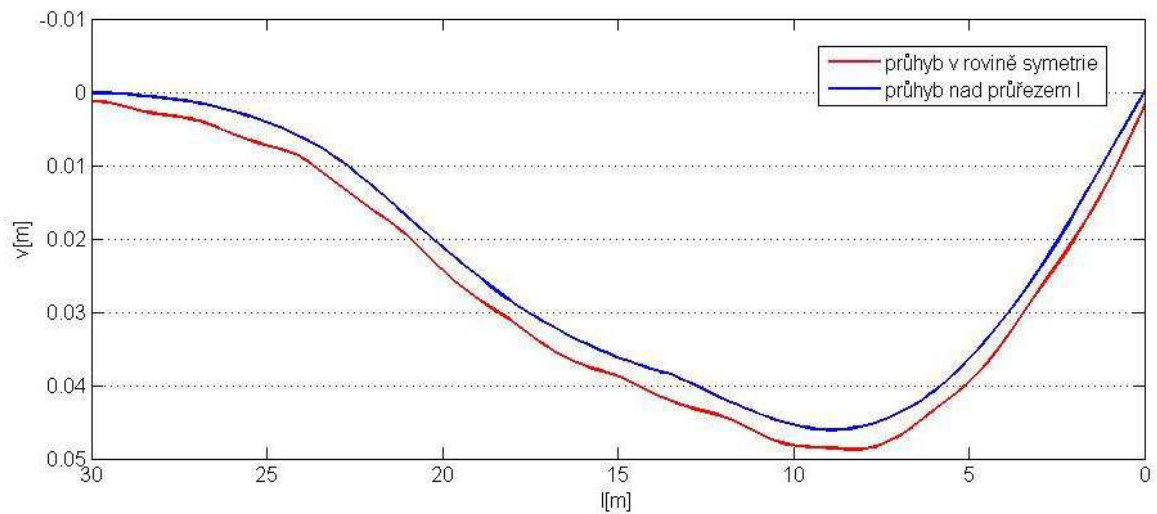
menší, a proto byla výška hlavního nosníku zmenšena na  $H_1 = 500$  mm. Díky výše uvedeným úpravám byly sníženy hodnoty napětí na středové brance přibližně o řád. Jak je vidět na obr. 6.2, vysoké hodnoty napětí byly lokalizovány kolem míst uchycení prutů k brance, viz obr. 6.2(a). Dále byly tyto hodnoty viditelné v místech uchycení kraje vozovky a v místě kontaktu sloupu s mostovkou. Uložení lávky stejně jako připojení závěsných prutů nebylo řešeno detailně, a proto tato místa s vysokými hodnotami napětí nebyla pro finální analýzu dále zkoumána. Hodnota maximálního napětí na středové brance bez ohledu na výše zmíněná místa byla 170 MPa. Mez kluzu pro ocel 11.370 je 196 MPa. Pro předpokládané zatížení je daný materiál pro konstrukci středové branky vhodný, vzhledem k tomu, že  $\gamma_{M0} = 1,00$ , viz (5.10) a (5.12).



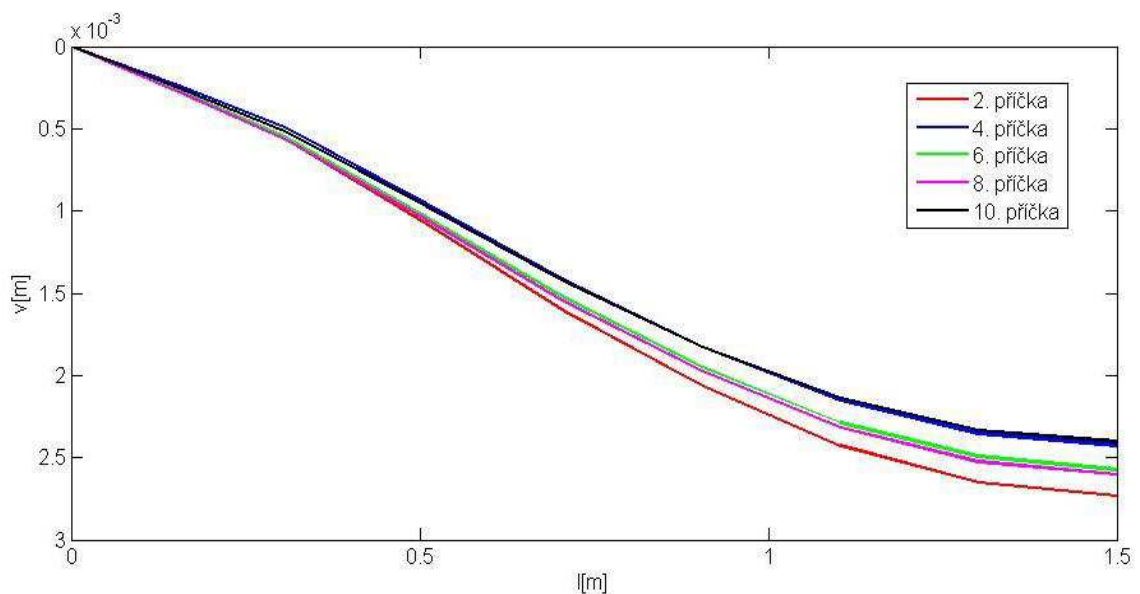
Obr. 6.2 : Detail středové branky – (a) horní část, (b) dolní část

Sledovány byly také hodnoty maximálního průhybu na nosných částech lávky, tj. na hlavních nosnících, příčnicích a vedlejších podélnících. Na obr. 6.3 je zobrazen průhyb od okraje lávky směrem k nosnému pilíři. V grafu je viditelný rozdíl v krajních hodnotách křivek, protože v rovině symetrie, na rozdíl od kraje lávky, není umístěn hlavní podélník, a proto zde dochází k větší deformaci. Maximální hodnota průhybu je 0,045 m a podmínka (5.16) je tak splněna. Na obr. 6.4 jsou zobrazeny průhyby příčniců.

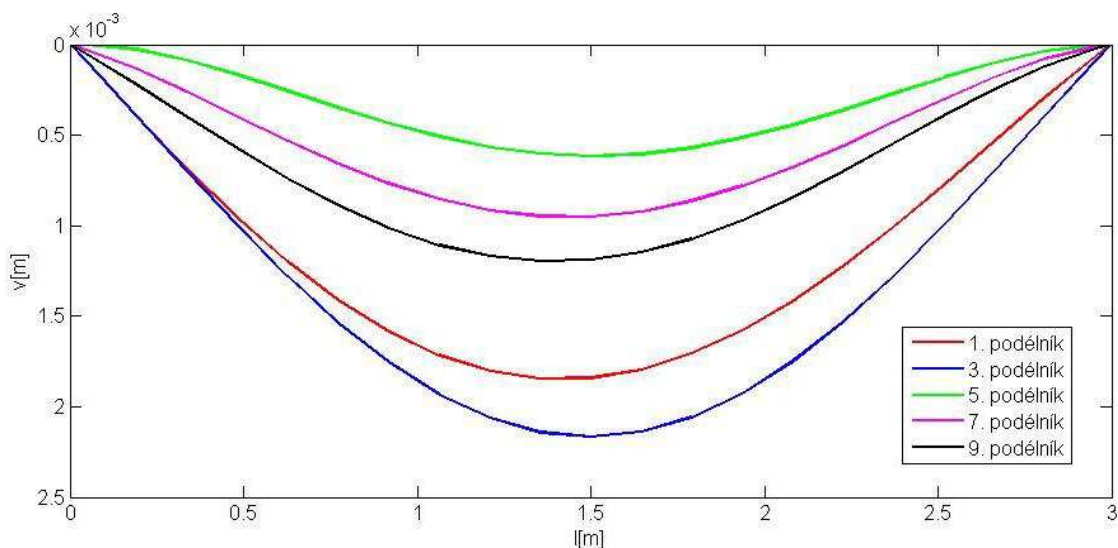
Vykresleny jsou vždy sudé příčky, číslované od kraje vozovky směrem k pilíři. I zde je maximální hodnota průhybu menší než hodnota dovolená. Průhyby vedlejších podélníků jsou zobrazeny na obr. 6.5. Vykresleny jsou liché podélníky v rovině symetrie ve směru od kraje lávky k pilíři. Podmínka svislého průhybu je i zde splněna. Je zřejmé, že hodnoty maximálních průhybů pro nosné části lávky jsou několikanásobně menší než u prvotních výpočtů. Vzhledem k uvažování středové branky a nosného pilíře je konstrukce výrazně vyztužena. Při prvotních výpočtech nebylo také uvažováno svaření jednotlivých příček a podélníků. Dále nebyla uvažována vozovka, která rovněž přispívá k větší tuhosti celé konstrukce.



Obr. 6.3: Celkový průhyb od volného konce k pilíři



Obr. 6.4: Průhyby příčníků



Obr. 6.5: Průhyby vedlejších podélníků

Model čtvrtiny lávky byl analyzován i pro síť s dvojnásobným počtem konečných prvků. V následující tabulce (tab. 6.1) jsou uvedeny hodnoty napětí pro různá místa konstrukce s uvažováním původní (varianta A) a dvojnásobné (varianta B) sítě konečných prvků. V místě uchycení krajních bodů lávky byly hodnoty napětí u varianty A v průměru o 20% větší. V oblasti maximálního průhybu byl rozdíl asi 10%, v místě vetknutí až 25%. Obdobně jako u varianty A, tak i u varianty B vycházely hodnoty napětí na středové brance velké V místě pod přidanou příčkou byla hodnota HMH napětí až 310 MPa. Pro snížení napětí bylo provedeno zvětšení šířky příčky. Hodnota HMH napětí se zmenšila až na hodnotu 170 MPa.

Tab. 6.1: Hodnoty napětí ve vybraných místech konstrukce

Sledovaná místa	Varianta	Místo krajního uchycení	Místo max. průhybu	Místo roviny symetrie y-z
		Napětí [MPa]		
vozovka	A	140	77	25
	B	150	82	14
příčnick	A	54	95	30
	B	75	95	12
vedlejší podélník	A	42	77	80
	B	47	96	100

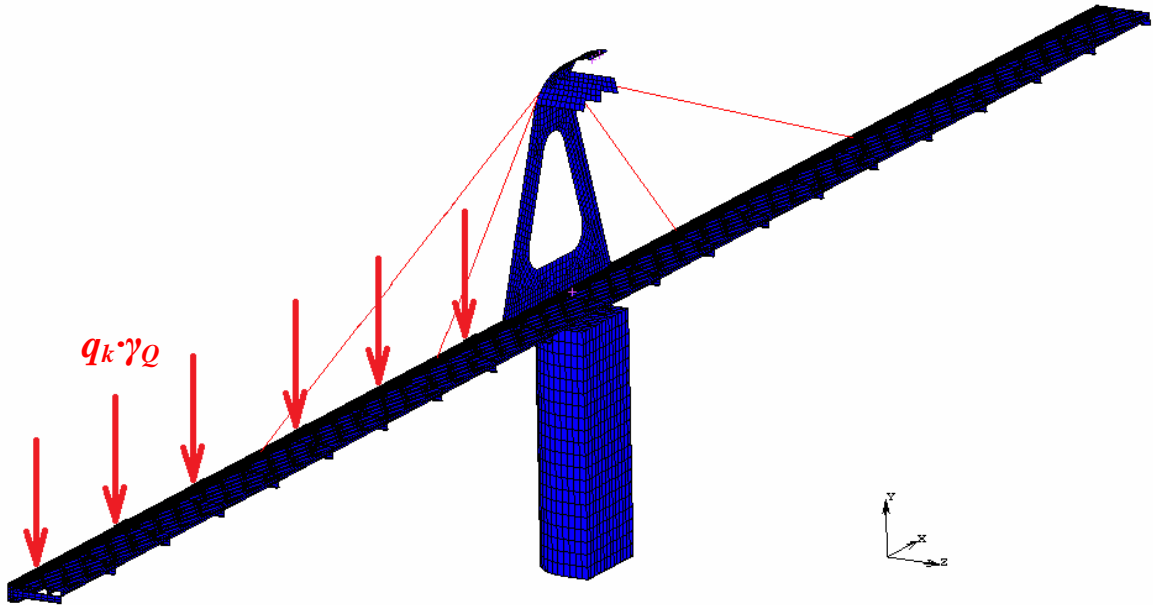
## 6.2 Model poloviny lávky

Polovina lávky je zobrazena na obr. 6.6. Celkový počet prvků byl s ohledem na čtvrtinu modelu dvojnásobný. Uchycení levého konce lávky a uchycení sloupu bylo provedeno stejně jako u čtvrtinového modelu, ovšem s tím rozdílem, že v tomto případě byl uchycen i pravý kraj lávky. Protože se jedná o polovinu celkové konstrukce, rovina symetrie je zde pouze jedna, a to ve směru osy  $x$  v rovině rovnoběžné s  $x$ - $y$ . V této



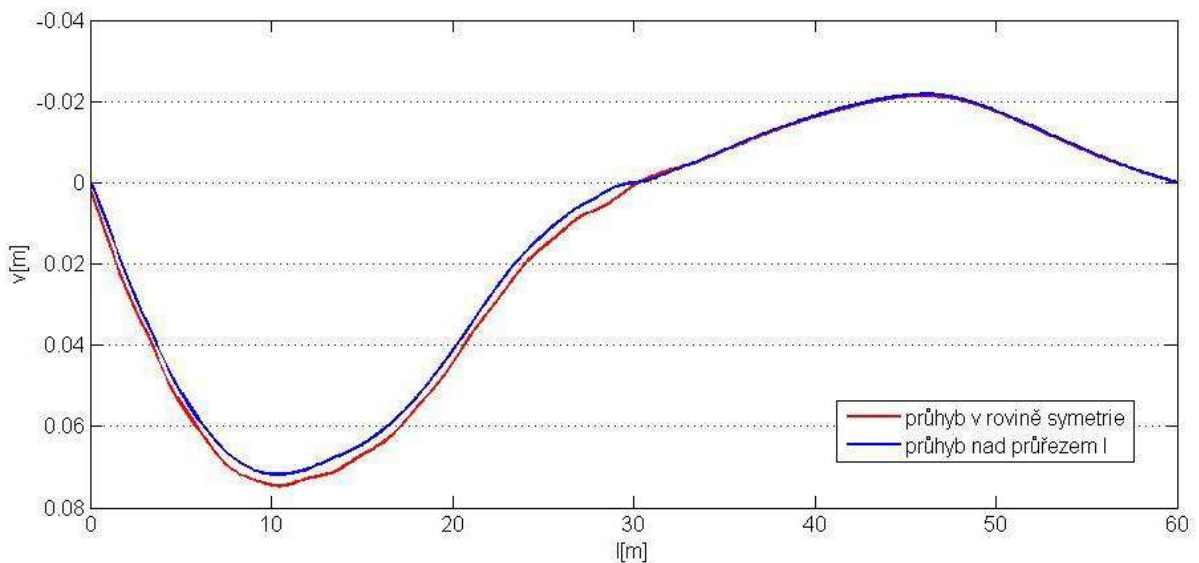
rovině symetrie byl opět předepsán nulový posuv ve směru osy  $z$  a nulová rotace kolem osy  $x$ . Způsob zadávání zatížení a použití spojovacích prvků typu „links“ byl obdobný jako u modelu čtvrtiny lávky.

Protože při uvažování poloviny lávky byly zjištěny hodnoty HMH napětí ve středové brance kolem 220 MPa, bylo nakonec rozhodnuto o použití materiálu s vyšší pevností (ocel 11.500).



Obr. 6.6: Model poloviny lávky s vyznačením proměnného zatížení

Na obr. 6.7 je zobrazen průhyb ve směru podélné osy lávky. Z grafu je opět viditelný rozdíl v krajních hodnotách křivek jako na obr. 6.3. Maximální hodnota průhybu je 0,07 m a podmínka (5.16) je tak splněna. Průběhy průhybů příčných a vedlejších podélníků měly podobný charakter jako při uvažování čtvrtiny modelu. Jejich maximální hodnoty se oproti hodnotám, které jsou patrné z obr. 6.4 a obr. 6.5, téměř nelišily.



Obr. 6.7: Celkový průhyb ve směru podélné osy lávky

## 7 Závěr

Bakalářská práce se zabývala návrhem lávky pro chodce. Po úvodní rešerši byly objasněny základní typy mostních konstrukcí s analyzováním jejich výhod a nevýhod. Vzhledem k těmto faktům byly provedeny designové návrhy jednotlivých typů konstrukcí. Rovněž byly zhodnoceny výhody a nevýhody návrhů, na základě kterých byla vybrána finální varianta lávky. Ta pak byla následně po uvážení stavu napjatosti, který by pravděpodobně nastal v místech rozevření ramen, upravena na konečnou alternativu s uzavřenou obloukovou středovou brankou.

V rámci této práce byly navrženy rozměry hlavních nosných částí lávky, tj. hlavních nosníků, příčníků a vedlejších podélníků. Statické výpočty byly prováděny s ohledem na normy ČSN EN 1990, 1991 a 1993. Ověření výpočtů bylo provedeno na základě metody dílčích součinitelů dle mezního stavu únosnosti a mezního stavu použitelnosti. Pro zjednodušení výpočtů byly jednotlivé nosné části konstrukce chápány jako nosníky nebo prutové soustavy. Výpočty byly analyzovány ve dvou fázích. Prvotní výpočty rozměrů byly provedeny v prostředí Matlab. Jednotlivé úlohy pro dané nosné části byly řešeny odděleně, a to vždy parametricky, aby bylo možné příslušná zadání snadněji editovat. Po získání prvotních rozměrů pro nosné části lávky byl pro zpřesnění výsledků vytvořen numerický model na základě metody konečných prvků v systému MSC.Marc. Tento model byl analyzován i s uvažováním nosného pilíře a středové branky. Pro snadnější editování různých variant byly rovněž vytvořeny procedury (PROC soubory), díky kterým bylo možné parametricky upravovat model celé lávky. Po prvních analýzách bylo zjištěno, že stav napjatosti na středové brance přesahuje hodnoty pro mez kluzu daného materiálu. Po zjištění míst s vysokou koncentrací napětí byly tedy provedeny menší úpravy konstrukce, díky kterým došlo ke zmenšení maximálních hodnot redukovaného napětí. Byla provedena rovněž analýza na velikost konečných prvků a model čtvrtiny lávky byl pak vytvořen s jejich dvojnásobným počtem. Z důvodu dostatečné rezervy v hodnotách deformace a HMM napětí bylo zjištěno, že velikost prvků na výsledky analýz nemá podstatný vliv. Vzhledem k uvažování nosného pilíře a středové branky nebyly velikosti deformací tak velké, jako při prvotních výpočtech v prostředí Matlab. Veškeré navržené rozměry vyhovovaly podmínkám, které udávají Evropské normy používané při návrhu stavebních konstrukcí.

Autorka práce si je vědoma jistých zjednodušení ve výpočtech, jelikož byla prováděna pouze globální analýza. Pro výpočty nebyl uvažován např. vliv sněhu a větru na konstrukci nebo také např. detailní uchycení prutů k vozovce a ke středové brance. Dále nebyla provedena tvarová optimalizace konstrukce. Proto by autorka práce na toto téma ráda navázala ve své budoucí diplomové práci, kde by tyto analýzy, popř. dynamické výpočty mohly být realizovány. Dle ověření pomocí mezního stavu únosnosti a mezního stavu použitelnosti byla totiž zjištěna dostatečná rezerva. Lze tedy předpokládat, že při uvažování dalších zátěžných stavů by konstrukce přenesla tato zatížení bez větších komplikací.

# Seznam použité literatury

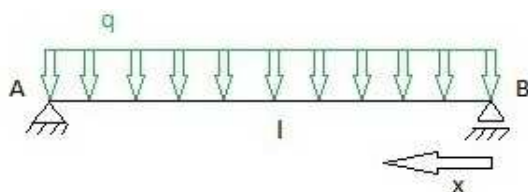
- [1] Česká technická norma, *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*: ČSN EN 1990 73 0002, Praha, 2004.
- [2] Česká technická norma, *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*: ČSN EN 1993-1-1 73 1401, Praha, 2006.
- [3] FAJMAN, P., KRUIS, J.: *Zatížení a spolehlivost*, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Praha, 2008.
- [4] FOINIA Steel, s.r.o., dostupné z WWW: < [www.foiniasteel.cz](http://www.foiniasteel.cz)>.
- [5] Geografický magazín Koktejl, dostupné z WWW: < [www.czech-press.cz](http://www.czech-press.cz) >.
- [6] HÁJEK, E. a kol., *Pružnost a pevnost I*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1981.
- [7] HOLICKÝ, M., MARKOVÁ, J., SÝKORA, M.: *Zatížení stavebních konstrukcí – Příručka k ČSN EN 1991*, 1. vydání, Praha, 2009.
- [8] iDNES.cz, Rubrika: Bydlení, dostupné z WWW: < [www.bydleni.idnes.cz](http://www.bydleni.idnes.cz)>.
- [9] LondonSE1: community website, dostupné z WWW: <[www.london-se1.co.uk](http://www.london-se1.co.uk)>.
- [10] MICHALEC, J. a kol., *Pružnost a pevnost II*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1980.
- [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] Stráský, Hustý a partneři, s.r.o., dostupné z WWW: <[www.shp.eu](http://www.shp.eu)>.
- [15] World Travel Attractions, dostupné z WWW: <[www.worldtravelattractions.com](http://www.worldtravelattractions.com)>.

# Příloha A

V následující části jsou uvedeny čtyři základní typy nosníků, jejich zatížení společně s příslušnými deformacemi bylo použito pro prvotní výpočty lávky. Jedná se o nosník zatížený spojitým zatížením, o nosník zatížený momentem v podpoře, o nosník zatížený svislou silou a o prut zatížený vodorovnou silou. Jsou zde uvedeny vztahy pro výpočet ohybových momentů  $M(x)$  v obecném místě, vztahy pro výpočet úhlu natočení v levé podpoře  $\varphi(l)$  a vztahy pro výpočet průhybů v obecném místě  $v(x)$ . V případě zatížení vodorovnou silou je vyjádřena hodnota osové síly a prodloužení. Souřadnice  $x$  je vždy kótována z pravé strany. Označení  $F$  symbolizuje sílu působící na nosník,  $q$  je spojitě zatížení,  $l$  je délka nosníku a  $M$  je moment působící v podpoře.

## A.1 Prostý nosník zatížený spojitým zatížením

Tento nosník (obr. A.1) je po celé své délce  $l$  zatížen spojitým zatížením  $q$ . Platí zde následující vztahy:



Obr.A.1: Nosník zatížený spojitým zatížením

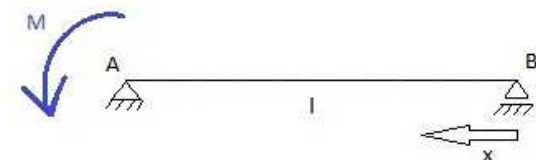
$$M(x) = \frac{ql}{2} \cdot x - \frac{qx^2}{2}, \quad (\text{A.1})$$

$$\varphi(l) = \frac{ql^3}{24EJ_z} = q \cdot \bar{\varphi}_{Aq}, \quad (\text{A.2})$$

$$v(x) = \frac{ql^4}{24EJ_z} \left[ \left( \frac{x}{l} \right) - 2 \left( \frac{x}{l} \right)^3 + \left( \frac{x}{l} \right)^4 \right] = q \cdot \bar{v}_q(x). \quad (\text{A.3})$$

## A.2 Prostý nosník zatížený momentem v podpoře

Nosník (obr. A.2) je v levé podpoře A zatížen momentem  $M$ . V tomto případě můžeme psát:



Obr.A.2: Nosník zatížený momentem v podpoře A

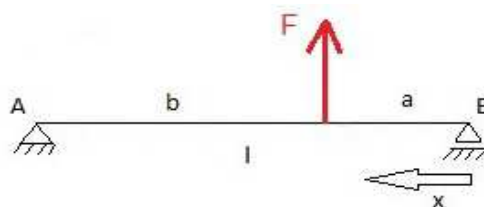
$$M(x) = -\frac{M}{l} \cdot x, \quad (\text{A.4})$$

$$\varphi(l) = -\frac{Ml}{3EJ_z} = -M \cdot \bar{\varphi}_{AM}, \quad (\text{A.5})$$

$$v(x) = -\frac{Mlx}{6EJ_z} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{x}{l} \right)^2 \right] = -M \cdot \bar{v}_M(x). \quad (\text{A.6})$$

### A.3 Prostý nosník zatížený svislou silou

Následující nosník je v obecném místě zatížen svislou silou  $F$ . Z důvodu působení osamělé síly  $F$  je nosník rozdělen na úseky s délkami  $a$  a  $b$ . Platí pro něj následující vztahy:



Obr.A.3: Nosník zatížený svislou silou

$$M(x) = \begin{cases} -\frac{Fb}{l} \cdot x & \text{pro } x \in \langle 0, a \rangle, \\ -\frac{Fb}{l} \cdot x + F \cdot (x - a) & \text{pro } x \in \langle a, l \rangle, \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

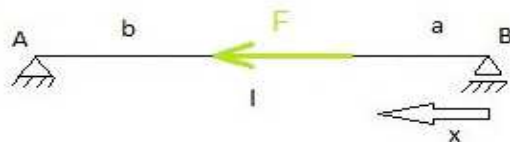
$$\varphi(l) = -F \cdot \frac{1}{EJ_z} \cdot \frac{ab}{6l^2} \cdot (3ab + b^2 + 2a^2) = -F \cdot \bar{\varphi}_{AF}. \quad (\text{A.8})$$

U tohoto nosníku je průhyb vyšetřován z obou stran. Pokud je  $x > a$ , je souřadnice  $y$  zakótována zleva. Potom platí:

$$v(x) = \begin{cases} -F \cdot \frac{bx}{6lEJ_z} \left[ \frac{a}{l} \cdot (3ab + a^2 + 2b^2) - x^2 \right] & \text{pro } x \in \langle 0, a \rangle, \\ -F \cdot \frac{ay(x)}{6lEJ_z} \left[ \frac{b}{l} \cdot (3ab + b^2 + 2a^2) - y(x)^2 \right] & \text{pro } y \in \langle 0, b \rangle, \text{ kde } y = l - x. \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

### A.4 Prut zatížený vodorovnou silou

Z důvodu působení osamělé síly  $F$  je prut rozdělen na úseky s délkami  $a$  a  $b$ . Platí pro něj následující vztahy:



Obr.A.4: Prut zatížený vodorovnou silou

$$N(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x \in \langle 0, a \rangle, \\ -F & \text{pro } x \in \langle a, l \rangle. \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

$$\Delta l_{\text{celk.}} = \begin{cases} \frac{-F \cdot (l - a)}{EA} & \text{pro } x \in \langle 0, a \rangle, \\ \frac{-F \cdot (l - x)}{EA} & \text{pro } x \in \langle a, l \rangle. \end{cases} \quad (\text{A.11})$$