

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

ANALÝZA PŮDORYSNĚ ZAKŘIVENÝCH ZAVĚŠENÝCH A VISUTÝCH LÁVEK

ANALYSIS OF A PLAN CURVED CABLE STAYED AND SUSPENSION FOOTBRIDGES

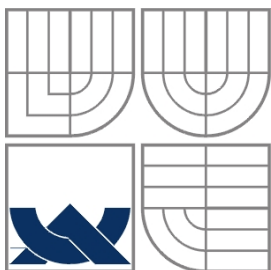
TEXTOVÁ ČÁST
TEXT PART

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

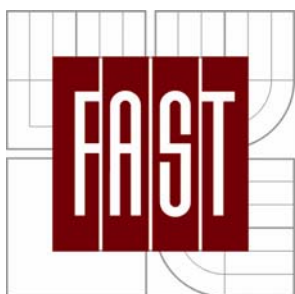
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. JAN KOLÁČEK

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH
KONSTRUKCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

ANALÝZA PŮDORYSNĚ ZAKŘIVENÝCH ZAVĚŠENÝCH A VISUTÝCH LÁVEK

ANALYSIS OF A PLAN CURVED CABLE STAYED AND SUSPENSION FOOTBRIDGES

TEXTOVÁ ČÁST
TEXT PART

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. JAN KOLÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

PROF. ING. JIŘÍ STRÁSKÝ, DSC.

BRNO 2012

Abstract

Dizertační práce je zaměřena na statickou a dynamickou analýzu půdorysně zakřivených zavěšených a visutých lávek pro pěší, které jsou zavěšeny pouze na vnitřní straně mostovky.

První část práce se zabývá analýzou rovnováhy mostovky v příčném směru při jednostranném zavěšení příčného řezu. Cílem je navrhnout průřez a jeho uspořádání tak, aby mostovka nebyla od zatížení vlastní tíhou a stálým zatížením namáhána kroutícím momentem. Pro ověření podmínek rovnováhy v příčném směru s vlivem a bez vlivu předpětí byla vypracována jednoduchá studie.

Další část práce se věnuje vytvoření studie půdorysně zakřivené zavěšené lávky pro pěší. Ve studii bylo detailně popsáno nalezení výchozího stavu konstrukce a provedla se základní statická a dynamická analýza za použití dostupného software. Úkolem statické analýzy bylo popsat odezvu konstrukce na nejčastěji působící zatížení, nikoliv však návrh a dimenzování v souladu s platnými normami. Dynamická analýza umožnila ověřit náchylnost konstrukce k vibracím a jiným škodlivým účinkům vynuceného kmitání, které nabývají na významu u lávek pro pěší díky jejich štíhlosti.

Dalším cílem práce bylo vypracování studie zakřivené visuté konstrukce zavěšené pouze na vnitřním okraji. Ucelený postup analýzy těchto konstrukcí nebyl obsažen v žádné dostupné literatuře. Zejména nalezení výchozího stavu visutého lana není nikde a nikým zdokumentováno. Studie byla analyzována se stejnou geometrií jako u předchozí zavěšené varianty, aby bylo možné tyto druhy konstrukcí porovnat. Nakonec se provedla statická a dynamická analýza.

V poslední části práce se ověřilo na plně funkčním fyzikální modelu v měřítku 1:10 konstrukční řešení, navržený postup hledání výchozího stavu konstrukce, odezva konstrukce na statické zatížení a zjistila se mezní únosnost konstrukce. Důležitým krokem bylo vyhodnocení a srovnání výsledků z provedeného fyzikálního modelu proti výpočtovému matematickému modelu z pohledu výchozího stavu, statické zatěžovací zkoušky a mezní zatěžovací zkoušky.

Klíčová slova:

Půdorysně zakřivené konstrukce, lávky pro pěší, visuté a zavěšené mosty, statická a dynamická analýza, modelová podobnost, fyzikální model, zatěžovací zkoušky.

Bibliografická citace:

KOLÁČEK, J., *Analýza půdorysně zakřivených zavěšených a visutých lávek*. Brno, 2012. 131 s., 165 s. příloh. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Stavební fakulta. Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce: Prof. Ing. Jiří Stráský, DSc.

Abstract

The aim of the doctoral thesis focuses on the static and dynamic analysis of a plan curved cable stayed and suspension pedestrian bridges suspended on a single-side of their deck.

The first part of this thesis deals with an analysis of the equilibrium in the transversal direction of a deck cross section suspended on a single-side. The section and its arrangement should be designed so that the torsion caused by the deck self-weight and dead load would be minimal. This theory was verified on a simple study of a single-sided suspended section with and without prestressing.

Second part of the thesis deals with the design of a study of a plan curved cable stayed pedestrian bridge. The study describes in detail a finding of an initial state of the structure and the static and dynamic analysis performed by software ANSYS. The static analysis describes the response of the structure on the most frequent variable loads only, but not design of dimensioning according to the valid codes. The dynamic analysis verifies a predisposition of the structure to the vibrations and others harmful oscillation effects.

The next objective of the thesis was to design a study of a plan curved suspension pedestrian bridge suspended on a single-side. A process of an analysis of these structures has not found in any available references. Especially, the finding of an initial state of a suspension cable has not been documented anywhere and by anybody. The study was analyzed with the same geometry as the cable stayed variation in order to compare both structures. The static and dynamic analysis was performed, too.

The last part of the thesis describes the verification of structural solution on a fully functional model in a 1:10 scale, proposed process of the initial state finding, response of the structures on the loading and ultimate load test. The important step is the comparison of the results of the completed physical model and the calculation model in a view of the initial state and the loading and the ultimate load tests.

Keywords:

Plan curved structure, pedestrian bridges, suspension and cable stayed bridges, static and dynamic analysis, model analogy, model test, load tests.

Bibliographic references:

KOLÁČEK, J., *Analysis of a plan curved cable stayed and suspension footbridges*. Brno, 2012. 131 p., 165 p. annex. Doctoral thesis. Brno university of technology. Faculty of Civil Engineering. Institute of Concrete and Masonry structures. Supervisor: Prof. Ing. Jiří Stráský, DSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem dizertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych rád poděkoval svému školiteli panu prof. Ing. Jiřímu Stráskému, DSc. za neocenitelné rady a odborné vedení jak během výzkumu, tak při zpracování závěrečné práce.

Další poděkování patří doktorandům a pracovníkům Ústavu betonových a zděných konstrukcí za pomoc při stavbě modelu, pracovníkům Ústavu stavebního zkušebnictví za pomoc při realizaci jednotlivých měření a Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí za zapůjčení sdružených laboratoří pro vytvoření experimentu.

Model půdorysně zakřivené zavěšené a visuté lávky pro pěší vznikl za finanční podpory projektu „Impuls“ FI - IM5/128 „Progresivní konstrukce z vysokohodnotného betonu“ Ministerstva průmyslu a obchodu a za podpory projektu 1M6840770001 MŠMT, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

Za cenné připomínky při závěrečné korekci disertační práce je třeba poděkovat kolegům Ing. Radimovi Nečasovi, Ph.D. a Doc. Ing. Zdeňkovi Bažantovi, CSc.

Poslední poděkování patří mé rodině za jejich pochopení, povzbuzení a především za projevenou důvěru.

Obsah

1.	Úvod do problematiky zavěšených a visutých lávek pro pěší.....	9
1.1	Všeobecně	9
1.2	Uspořádání visutých konstrukcí a jejich využití	9
1.3	Uspořádání zavěšených konstrukcí a jejich využití.....	11
1.4	Půdorysně zakřivené visuté a zavěšené konstrukce	12
1.4.1	Zavěšení na obou stranách.....	12
1.4.2	Zavěšení na vnější straně	13
1.4.3	Zavěšení na vnitřní straně.....	14
1.5	Příklady půdorysně zakřivených zavěšených a visutých konstrukcí.....	14
1.5.1	Zavěšené lávky	14
1.5.2	Visuté lávky	17
2.	Cíle dizertační práce	20
3.	Výpočtové metody a vyhodnocení	22
3.1	Statická analýza	22
3.1.1	Základní přístup ke statické analýze.....	22
3.1.2	Geometrické nelinearity	24
3.1.3	Základní metody pro zlepšení konvergence	25
3.1.4	Použité konečné prvky ve výpočtových modelech.....	25
3.2	Dynamická analýza	33
3.2.1	Modální analýza	33
3.2.2	Harmonická analýza	36
4.	Analýza rovnováhy a volba uspořádání příčného řezu při jednostranném zavěšení.....	38
4.1	Těžiště a střed smyku průřezu	38
4.2	Rovnováha na průřezu bez předpětí.....	38
4.3	Rovnováha na průřezu bez předpětí – libovolná poloha bodu zavěšení	41
4.4	Studie pro ověření polohy bodu centra závesů C_Z	43
4.4.1	Popis studie.....	43
4.4.2	Výsledky studie	45
4.4.3	Závěry studie	46
4.5	Rovnováha na průřezu s předpětím	47

5.	Studie půdorysně zakřivené zavěšené konstrukce.....	50
5.1	Popis konstrukce.....	50
5.1.1	Půdorys a pohled	50
5.1.2	Příčný řez.....	51
5.2	Statická analýza	51
5.2.1	Výpočtový model	51
5.2.2	Rovnováha průřezu mostovky v příčném směru	52
5.2.3	Hledání výchozího tvaru.....	56
5.2.4	Zatěžovací stavy a kombinace	60
5.2.5	Výsledky statické analýzy	61
5.3	Dynamická analýza	62
5.3.1	Vlastní tvary konstrukce.....	62
5.3.2	Harmonická analýza	63
6.	Studie půdorysně zakřivené visuté konstrukce.....	65
6.1	Popis konstrukce.....	65
6.1.1	Půdorys a pohled	65
6.1.2	Příčný řez.....	66
6.2	Statická analýza	66
6.2.1	Výpočtový model	66
6.2.2	Hledání výchozího tvaru.....	67
6.2.3	Ověření polohy visutého lana na dřevěném modelu	70
6.2.4	Rovnováha v příčném směru	73
6.2.5	Minimalizace tečné složky	75
6.2.6	Vyrovnání svislého průhybu u výchozího tvaru.....	77
6.2.7	Zatěžovací stavy a kombinace	79
6.2.8	Výsledky statické analýzy	79
6.3	Dynamická analýza	80
6.3.1	Vlastní tvary konstrukce.....	80
6.3.2	Harmonická analýza	82
6.4	Zhodnocení a dílčí závěry	83
7.	Model půdorysně zakřivených lávek v měřítku 1:10	84
7.1	Modelová podobnost	84
7.2	Konstrukční řešení	85
7.2.1	Založení modelu	87

7.2.2	Příčný řez.....	87
7.2.3	Balastní zatížení.....	88
7.3	Postup výstavby modelu.....	89
7.4	Osazení modelu měřicí technikou	91
7.4.1	Tenzometry	92
7.4.2	Síloměry a magnetoelastické snímače	94
7.4.3	Průhyboměry	95
7.5	Zatěžovací zkoušky modelu	97
7.5.1	Statická zatěžovací zkouška	97
7.5.2	Mezní zatěžovací zkouška	98
7.6	Materiálové charakteristiky betonových směsí	99
7.7	Výpočtové modely.....	101
7.8	Srovnání výsledků mezi výpočtovým a fyzikálním modelem	102
7.8.1	Výchozí stav	102
7.8.2	Statická zatěžovací zkouška	108
7.8.3	Mezní zatěžovací zkouška	112
7.9	Měření dynamické odezvy	115
8.	Závěry dizertační práce.....	118
9.	Seznam použitých zdrojů	123
10.	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	126
11.	Seznam příloh.....	131

1. Úvod do problematiky zavěšených a visutých lávek pro pěší

1.1 Všeobecně

Lávky pro pěší tvoří specifickou kapitolu mostního stavitelství. Jsou to speciální konstrukce, které vyžadují zvláštní pozornost. Konstrukce lávek by měly mít lidský rozměr, měly by být lehké, transparentní a pohodlné pro uživatele – chodce.

Na rozdíl od mostů silničních a železničních mají lávky z architektonického, konstrukčního i estetického hlediska menší omezení. To dovoluje vytvářet elegantní tvary, které lépe zapadají do krajiny a odpovídají požadavkům lepšího propojení stávajících cest pro pěší. Zvláště lávky visuté a zavěšené jsou určeny nejen pro velká rozpětí, ale umožňují inženýrům navrhnout konstrukce půdorysně zakřivené, které neztratí nic ze své lehkosti a transparentnosti.

Před návrhem každé lávky pro pěší se musí přesně definovat její funkce, jaké bude zatížení, délka, šířka a sklon atd. Návrh ovlivňují také různé faktory, jako územní plánování a integrace se stávající infrastrukturou. Prostředí, ve kterém bude lávka postavena, vytváří rozhodující odlišnosti. Velkou roli hrají také požadavky na údržbu, které budou jiné pro lávku postavenou v extravilánu a jiné pro lávku postavenou v intravilánu obcí a měst.

Často opomíjeným bodem je očekávaná dynamická odezva. Chodci se cítí méně pohodlně, pohybuje-li se těžká konstrukce, než když lehká konstrukce vykazuje stejné pohyby. To ukazuje, že uživatel je mnohem méně znepokojený nebo vyrušený, když cítí pohyby, které očekává.

1.2 Uspořádání visutých konstrukcí a jejich využití

Visuté konstrukce jsou převážně tvořeny tenkou mostovkou, která je zavěšena nebo přímo podporována pomocí visutého lana. Mostovku v podélném směru lze optimálně přizpůsobit podle terénu pod mostem. Konstrukce se sestává z jednoho nebo více polí, přičemž délka polí není prakticky nijak limitována. Ze všech konstrukčních typů mostů umožňují visuté mosty překonat největší rozpětí.

Nosným prvkem je visuté lano, které je zakotveno přímo do mostovky (Obr. 1.2) nebo do základového bloku (Obr. 1.1). V případě zakotvení přímo do mostovky tvoří tzv. samokotvený systém. Visuté kabely jsou situovány nad mostovkou, pod mostovkou nebo mohou být kombinací obojího.

Geometrie visutých kabelů odpovídá výslednicovému tvaru, který vyplývá z tíhy konstrukce na nich spočívající. Kabely svými účinky vyrovnávají tíhu konstrukce a garantují, že konstrukční prvky lávky jsou namáhané převážně normálovými silami.

Visutý kabel zakotvený do základového bloku má výhodu v tom, že lze mostovku sestavit nezávisle na terénu. Hlavní nevýhodou tohoto uspořádání je nutnost zachycení

velkých tahových reakcí pomocí mohutných kotevních bloků v základové půdě. Příkladem mostu s kabelem zakotveným do základového bloku je lávka přes Švýcarskou zátoku na Vranovské přehradě (Obr. 1.3).



Obr. 1.1 *Působení kabelu zakotveného přímo do základové půdy*



Obr. 1.2 *Působení kabelu u samokotvené konstrukce*

Mostovka tvořená prefabrikovanými segmenty je zavěšena na visutém laně pomocí závěsů. V průběhu montáže segmentů jsou segmenty spojeny kloubově, což umožňuje zaujmout visutému lanu výslednicový tvar. Následně se zmonolitní spáry mezi segmenty a předpínací kabely mostovky se napnou. Předpětím mostovky je vytvořena tlaková rezerva pro proměnné zatížení.



Obr. 1.3 *Visutá lávka přes Švýcarskou zátoku na Vranovské přehradě*

Samokotvený systém nevyžaduje nákladné základové bloky. Kabel je kotven přímo do mostovky, čímž způsobuje tlakové namáhání jejího průřezu a vytváří tak požadovanou tlakovou rezervu. Jednou z nevýhod je proti předchozí variantě osově tužší průřez mostovky,

který musí přenést vyšší tlakové namáhání. Problémem použití samokotveného systému je výstavba nosné konstrukce. Nejjednodušším způsobem, který není příliš obvyklý, je sestavení mostovky na pevné skruži. Nevýhodou jsou finanční náklady na postavení pevné skruže a její závislost na uspořádání terénu pod mostem. Častější způsob spočívá v provizorním vytvoření základových bloků, následném napnutí visutého lana a zavěšení mostovky. Po překotvení visutých lan do mostovky lze základové bloky odstranit.

Klasická visutá konstrukce s kabely situovanými nad mostovkou o dvou nebo třech polích je zavěšena na jednom, případně dvou pylonech. Krajiní mostní pole jsou na visutém laně zavěšena v celé délce nebo na jeho části. Délka krajního pole je obvykle menší než polovina délky hlavního pole.

Visuté konstrukce svoji štíhlostí vytváří velmi dobrý estetický a architektonický dojem a jsou využívány pro silniční mosty velkých rozpětí a lávky pro pěší (např. známý Golden Gate Bridge v San Francisku).

1.3 Uspořádání zavěšených konstrukcí a jejich využití

Zavěšené konstrukce tvoří tenká mostovka podporovaná závěsy kotvenými přímo do pylonů. Mostovku lze v podélném směru optimálně vést dle místních podmínek.

U zavěšených konstrukcí se vlivem uspořádání závěsů pozvolně zvyšuje tlakové namáhání mostovky směrem k pylonům.



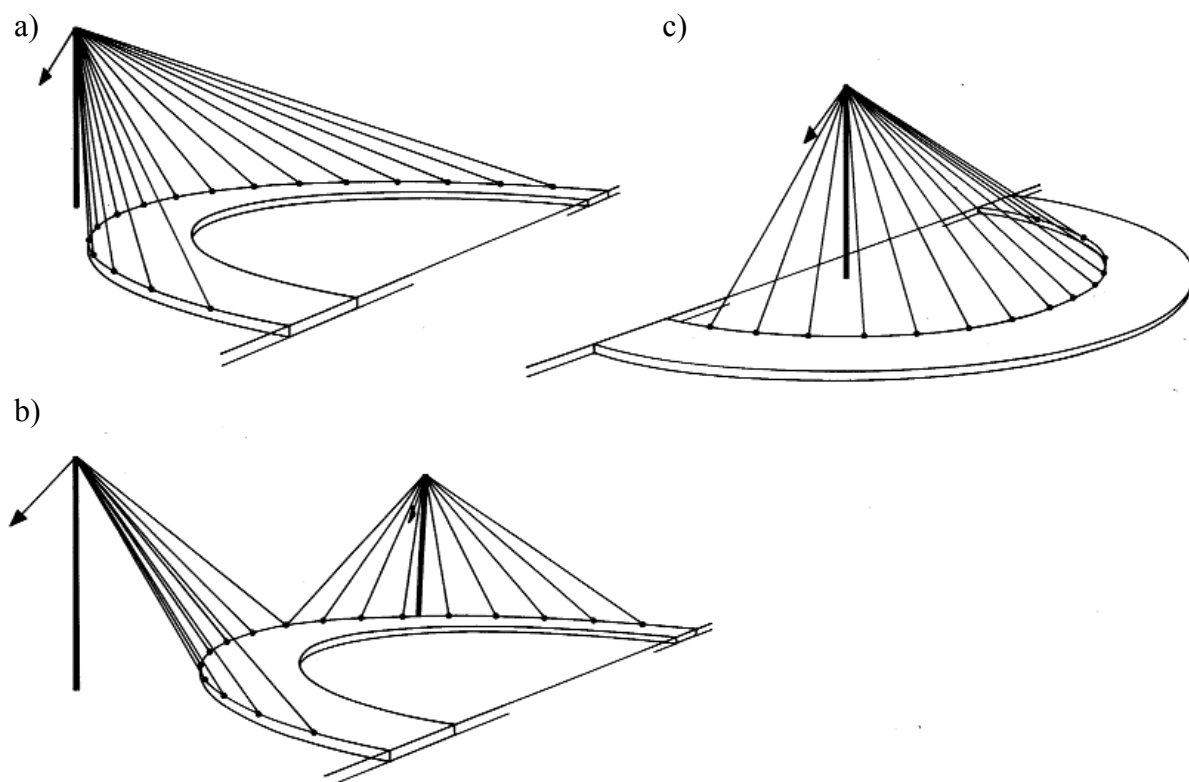
Obr. 1.4 Zavěšená lávka přes komunikaci Delta Pond, Eugene, Oregon, USA [36]

Zavěšený most v klasickém uspořádání (Obr. 1.4) je tvořen dvěma nebo třemi poli, která jsou podporována pomocí jednoho či dvou pylonů. Geometrie pylonů, svislá, případně nakloněná, dokresluje estetický vzhled celé konstrukce. V jiné variantě lze mostovku zavěsit jen v hlavním středním poli, krajní pole překlenují rozpětí svou ohybovou tuhostí a rovnováha v hlavě pylonu je zajištěna kabely zakotvenými do základových bloků.

Mezi nejčastější uspořádání závěsů patří radiální, semi-radiální a harfovité. Důležitým detailem je řešení hlavy pylonu, kde jsou kotveny všechny závěsy.

1.4 Půdorysně zakřivené visuté a zavěšené konstrukce

V současnosti se stále více vyskytují konstrukce visuté nebo zavěšené, které jsou zakřivené nejen v podélném směru, ale i v půdoryse. Mostovka může být zavěšena buď na obou stranách, nebo pouze na vnitřní, viz Obr. 1.5 c), či na vnější straně průřezu, viz Obr. 1.5 a) a b). Dále lze mostovku doplnit předpínacími kabely, jejichž poloha umožňuje lépe vyrovnat účinky vlastní tíhy. Uspořádání je závislé na místních podmínkách, poloměru zakřivení a požadovaném rozpětí.

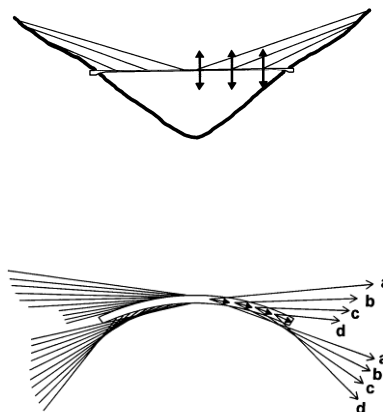
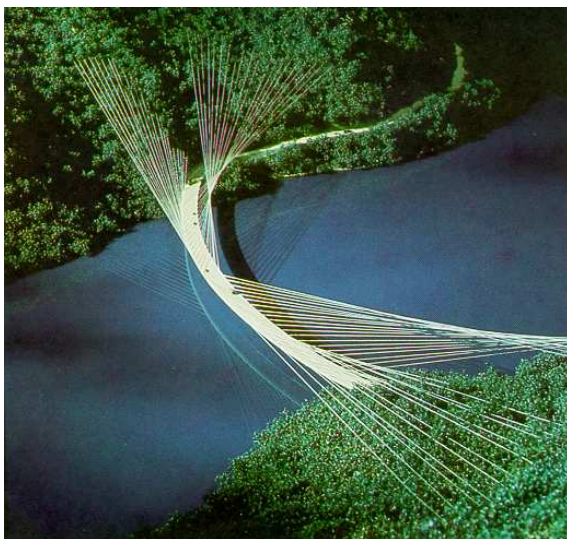


Obr. 1.5 Zavěšení zakřivené mostovky: a), b) na vnější straně, c) na vnitřní straně

1.4.1 Zavěšení na obou stranách

Zavěšení na obou stranách mostovky demonstruje návrh Ruck and Chucky Bridge profesora T. Y. Lina (Obr. 1.6). I když tento most nebyl postaven, je na něm zřetelné, jak mohou být vnitřní síly v konstrukci, vyvolané stálým zatížením, vyrovnány vhodným uspořádáním závěsů.

Vertikální složky sil v kabelech vyrovnávají vlastní tíhu mostovky a tím i ohybové a smykové namáhání, zatímco horizontální složky redukují příčné ohybové momenty v rozhodujících průřezích. Tahové síly v závěsech navíc vnášejí do mostovky tlakové namáhání. I přesto, že je konstrukce na první pohled poměrně složitá, jedná se o konstrukci zavěšenou, kde lze snadno rozkladem sil ve vodorovném a svislém směru zjistit síly v závěsech a analýza konstrukce je tím snazší.



Obr. 1.6 *Ruck and Chucky bridge, CA, USA*

1.4.2 Zavěšení na vnější straně

Na první pohled bezpečnější zavěšení na vnější straně je však ze statického hlediska horší variantou. Příkladem může být např. Glorias Catalanans Bridge ve Španělsku na Obr. 1.7.



Obr. 1.7 *Glorias Catalanans Bridge, Barcelona, Španělsko*

Svislé složky závěsů rovněž vyrovnávají svislý účinek vlastní tíhy konstrukce. Rozdílné je však působení ve vodorovném směru. Závěsy, kotvené na vnější straně mostovky, způsobují velké příčné ohybové momenty a navíc vnáší do mostovky tah. Optimální

uspořádání závěsů je tudíž obtížné najít a je vhodné snad jen pro dvě zakřivené rampy sbíhající se do jediné konstrukce zavěšené na jediném pylonu (Obr. 1.7).

1.4.3 Zavěšení na vnitřní straně

Staticky výhodnější variantou je zavěšení na vnitřní straně mostovky. V obou případech jsou vlastní tíha a ostatní stálé zatížení vyrovnány svislými silami v závěsech. Vodorovné složky sil v závěsech však způsobují výhodnější tlakové namáhání mostovky. Proti zavěšení na vnější straně je rovněž relativně jednodušší nalezení optimálního uspořádání závěsů. Konstrukce s kotvením závěsů na vnitřní straně byla poprvé použita v roce 1987 profesorem Schlaichem na mostě přes řeku Rýn ve městě Kelheim v Německu (Obr. 1.8).

Další vývoj konstrukčního typu zavěšení mostovky na vnitřní straně je předmětem předkládané dizertační práce.



Obr. 1.8 Most přes řeku Rýn ve městě Kelheim, Německo

1.5 Příklady půdorysně zakřivených zavěšených a visutých konstrukcí

1.5.1 Zavěšené lávky

Lávka přes dálnici D47 u Bohumína, Česká republika

Příkladem půdorysně zakřivené zavěšené konstrukce se závěsy na rozhraní mezi vnitřním a vnějším zavěšením je lávka u Bohumína (Obr. 1.9). Popisované zavěšení v ose mostovky sice není předmětem dizertační práce, avšak půdorysné zakřivení mostovky

způsobuje obdobné namáhání jako u popisovaných variant. Lávka u Bohumína má tudíž pro pochopení problematiky ve výčtu zavěšených lávek své opodstatnění.

Lávku o dvou polích délek 54,60 a 58,20 m tvoří páteřní nosník s oboustrannými konzolami, který je zavěšen na středním pylonu tvaru písmene V. Protože šířky cyklistické a pěší stezky jsou různé, je vyložení konzol rozdílné. Aby nosník nebyl od zatížení stálého kroucen, jsou delší konzoly vylehčeny kazetou. Mostovka, zavěšená přibližně ve své ose, je předepnuta kabely vedenými jak v páteřním nosníku, tak i v konzolách. Závěsy jsou z plně uzavřených lan systému Pfeifer. Lávka byla postavena v roce 2011.

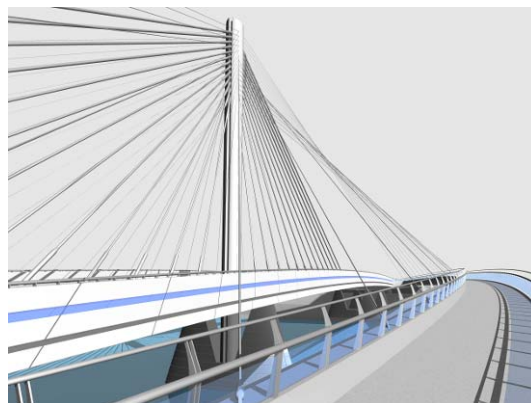
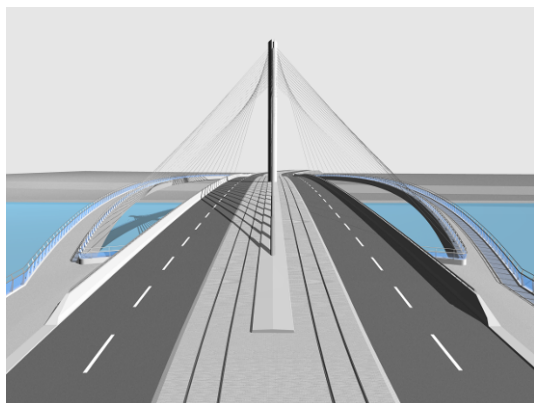


Obr. 1.9 Zavěšená lávka přes dálnici D47 u Bohumína, ČR

Trojský most přes Vltavu v Praze

Nový Trojský most v Praze (Obr. 1.10) přemostňuje řeku Vltavu mezi ulicí Partyzánskou v Holešovicích a ulicemi Trojská a Povltavská v Tróji. Most, který má sloužit místní dopravě, nahradí provizorní tramvajový most z roku 1977. Na severním předmostí propojí Městský okruh a Tróju pomocí mimoúrovňové křižovatky.

Jedním z návrhů vypsané architektonické soutěže z roku 2005 byla zavěšená konstrukce převádějící silniční a tramvajovou dopravu doplněná po obou stranách půdorysně zakřivenými lávkami zavěšenými na stejném pylonu. Mostovka lávek pro pěší celkové délky cca 250 m je tvořena ocelovým komorovým nosníkem s betonovou deskou. Obě lávky jsou podporovány závěsy vedenými z vnitřního okraje komorového průřezu.



Obr. 1.10 Vizualizace Trojského mostu se zavěšenými lávkami

Další fotografie zavěšených lávek

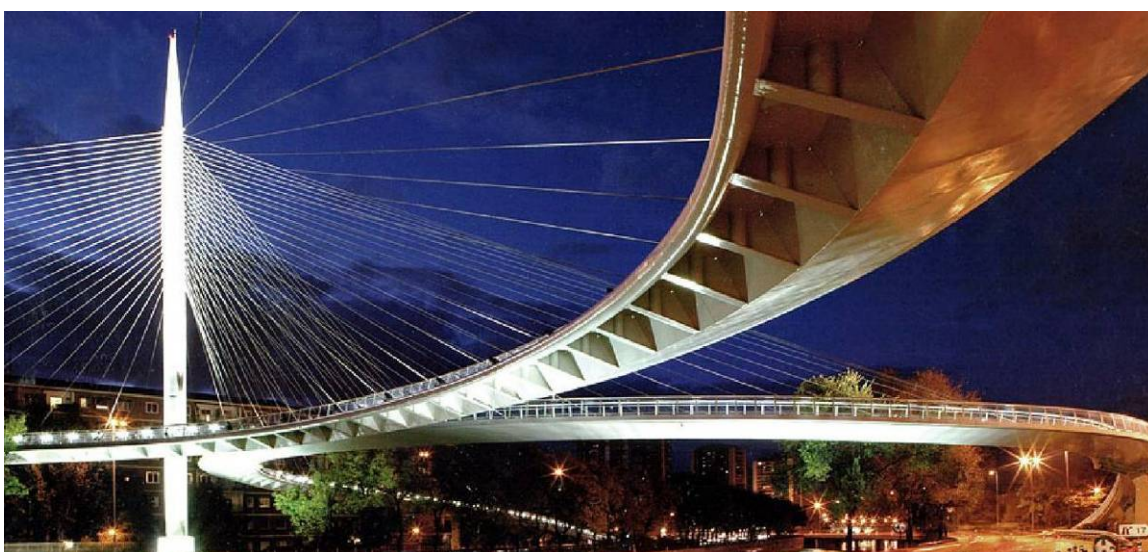
Příkladem konstrukcí zavěšených na vnitřním okraji jsou lávky pro pěší ve Španělsku Obr. 1.11, Obr. 1.12 a Obr. 1.13.



Obr. 1.11 Lávka La Rosa, Španělsko



Obr. 1.12 Lávka Murcia, Španělsko



Obr. 1.13 Lávka přes řeku Manzanares v Madridu, Španělsko

1.5.2 Visuté lávky

Lávka přes Harbor Drive v San Diegu, Kalifornie, USA

Lávka spojuje nový baseballový stadion situovaný směrem ke středu města s garážemi, hotelem Hilton a Kongresovým centrem, které jsou umístěny poblíž zátoky oceánu (Obr. 1.14). Mostovku tvoří půdorysně zakřivený betonový nosník o třech polích s rozpětími 13,54+107,60+21,97 m, který je vetknut do krajních opěr. Poloměr zakřivení v ose chodníku je 176,80 m. Nosník je nad vnitřními podpěrami výškově zalomen.



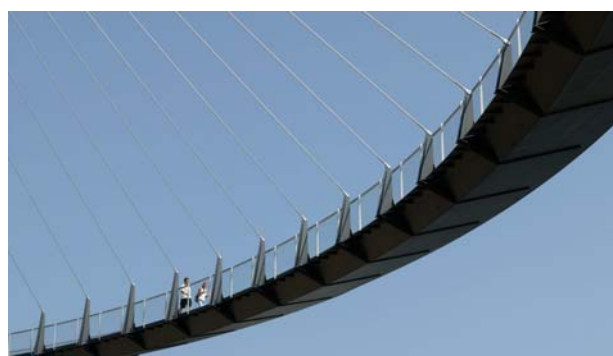
Obr. 1.14 Visutá lávka přes Harbor Drive v San Diegu, Kalifornie, USA

V krajních polích má nosník plný průřez a vytváří schodiště. V hlavním, zavěšeném poli, má nesymetrický komorový průřez. Nosník výšky 1,016 m a šířky 5,988 m je tvořen komorou s jednostranně vyloženou konzolou. Těžiště nosníku je tak situováno co nejbližší k jeho vnitřnímu okraji. Mostovka je předepnuta vnitřními kabely vedenými v horní desce a vnějším radiálním kabelem v madle zábradlí. Pylon, vysoký 39,80 m, je skloněn pod úhlem 59,60° a je kotven dvěma vnějšími kabely. Konstrukční řešení visutých a kotvicích kabelů vychází z řešení poprvé použitého u lávky přes Vranovskou přehradu (Obr. 1.3). Visuté kabely jsou kotveny v hlavě pylonu a v krajních opěrách; nad vnitřními opěrami jsou kabely uloženy v ocelových sedlech. Závěsy jsou kotveny na vnitřním okraji v horní části sloupků zábradlí, které také podporují vnější radiální kabel. Sloupky zábradlí mají významnou statickou funkci, protože přenáší síly ze závěsů a z radiálního kabelu do mostovky svojí tahovou a ohybovou únosností. Lávka byla postavena v roce 2011 [29].

Lávka ve městě Sassnitz, Německo

Lávka situovaná ve městě Sassnitz slouží ke spojení centra města a přístavu. Lávka celkové délky 243 m (Obr. 1.15) se skládá z visuté části délky 119 m a rampy délky 124 m. Převýšení lávky je 22 m. Mostovka lávky, půdorysně zakřivena ve tvaru písmene S, je zavěšena závěsy na vnitřním okraji pomocí speciální ocelové konzoly. Konzola účinně spojuje osu závěsů s těžištěm mostovky. Visutý kabel a závěsy jsou proti mořskému klimatu

ochráněny galvanizováním. Výsledkem je lehká a esteticky výjimečná konstrukce, která poskytuje krásný pohled na moře a přístav. Lávka byla postavena v roce 2007.



Obr. 1.15 *Visutá lávka ve městě Sassnitz, Německo*

Lávka přes Gahlensche Strasse, Bochum, Německo

Visutá lávka délky 130 m a šířky 3 m (Obr. 1.16) ve tvaru písmene S kombinuje umělecký záměr s výhodami půdorysného zakřivení. Mostovka je tvořena ocelovou konstrukcí z trubky a příčníků, které jsou v horní části propojeny železobetonovou deskou.



Obr. 1.16 *Lávka přes Gahlensche Strasse, Bochum, Německo*

Zavěšení mostovky je provedeno vždy na vnitřní straně. Pylony výšky 30 m jsou nakloněny směrem ke středu oblouku příslušné poloviny mostovky. Naklonění pylonů

umožňuje vyrovnat vodorovnou reakci, a proto není zapotřebí žádného jiného kotvícího lana. Lávka byla dokončena v roce 2003.

Lávka v Deutsches Museum v Mnichově, Německo

V největším vědeckém muzeu v Německu (Deutsches museum) byla v expozici „Mosty a vodní stavitelství“ postavena neobvyklá lanová konstrukce (Obr. 1.17). Navržená visutá konstrukce, srozumitelná a zajímavá jak pro laiky, tak i pro profesionály, demonstruje úroveň znalostí v mostním stavitelství. Mostovka lávky o rozpětí cca 27,00 m a šířky 1,80 m je tvořena ocelovou trubkou s příčnicí, na kterých jsou osazeny skleněné pochůzí desky tloušťky 45 mm. Výška pylonu je pouhých 7,30 m. Lávka byla postavena v roce 1998.



Obr. 1.17 Visutá lávka v Deutsches Muzeu v Mnichově, Německo

2. Cíle dizertační práce

Cílem dizertační práce je proniknout hlouběji do problematiky návrhu půdorysně zakřivených zavěšených a visutých lávek, které jsou zavěšeny pouze na vnitřní straně mostovky. Konstrukce popsané v předchozí kapitole ukazují, že problematika půdorysně zakřivených visutých nebo zavěšených konstrukcí se zavěšením na vnitřní straně je velmi rozsáhlá. Lávky mohou mít různá rozpětí, libovolné křivky mostovky, různorodé příčné řezy, odlišné uspořádání závěsů a visutého lana, a v neposlední řadě rozdílný způsob výstavby. Každá lávka má svá specifika, která je potřeba podrobně analyzovat. Rozsah dizertační práce neumožňuje věnovat se všem tématům, které se týkají dané problematiky. Těžiště práce bude proto zaměřeno především na studium rovnováhy v příčném řezu při jednostranném zavěšení, postupu nalezení výchozího tvaru, konstrukčního řešení a základní statické a dynamické analýzy těchto druhů konstrukcí.

V předkládané práci byly vytknuty čtyři hlavní cíle:

1. Analýza rovnováhy a volba uspořádání příčného řezu vhodného pro zavěšení mostovky na vnitřní straně.
2. Vypracování studie, postupu nalezení výchozího tvaru závěsů a následná statická a dynamická analýza vybrané půdorysně zakřivené zavěšené lávky.
3. Vypracování studie, postupu nalezení výchozího tvaru visutého lana a závěsů a následná statická a dynamická analýza půdorysně zakřivené visuté lávky.
4. Experimentální ověření navržených konstrukcí.

Rozvedení jednotlivých cílů je v následujícím textu.

1. Analýza rovnováhy a volba uspořádání příčného řezu vhodného pro zavěšení mostovky na vnitřní straně

První cíl práce se zaměřil na analýzu rovnováhy mostovky v příčném směru. Při jednostranném zavěšení příčného řezu je mostovka namáhána kroutícím momentem. Aby byl průřez v rovnováze, musí být kroutící účinek od všech sil působících v příčném směru roven nule. Rovnováhu ovlivňují síly od závěsů, vlastní tíhy průřezu, a pokud je mostovka předepnuta, tak i síly předpínací.

Cílem tedy je, aby průřez a jeho uspořádání bylo navrženo tak, aby mostovka od zatížení vlastní tíhou a stálým zatížením nebyla namáhána kroutícím momentem, nebo aby namáhání od kroutících účinků bylo minimální. Pro ověření podmínek rovnováhy v příčném směru s vlivem a bez vlivu předpětí byla vypracována jednoduchá studie.

2. Vypracování studie, postupu nalezení výchozího tvaru závěsů a následná statická a dynamická analýza vybrané půdorysně zakřivené zavěšené lávky

Zavěšených půdorysně zakřivených konstrukcí zavěšených na vnitřním okraji se realizovala celá řada. Cílem práce bylo proniknout do analýzy půdorysně zakřivených

konstrukcí a vytvořit na základě příčného řezu a jeho rovnováhy z předchozího bodu studii zavěšené konstrukce.

Ve studii bylo detailně popsáno nalezení výchozího stavu konstrukce a provedla se základní statická a dynamická analýza za použití dostupného softwaru. Statická analýza popsala odezvu konstrukce na nejčastěji působící zatížení, nikoliv však návrh a dimenzování v souladu s platnými normami. Dynamická analýza ověřila, zda návrh konstrukce není náchylný k vibracím a úspěšně odolá rezonanci nebo jinému škodlivému účinku vynuceného kmitání, který je u lávek, zejména štíhlých, velmi důležitý.

3. Vypracování studie, postupu nalezení výchozího tvaru visutého lana a závěsů a následná statická a dynamická analýza půdorysně zakřivené visuté lávky

Třetím cílem dizertační práce bylo vypracování studie zakřivené visuté konstrukce, zavěšené pouze na vnitřním okraji. Ucelený postup analýzy těchto konstrukcí nebyl obsažen v žádné dostupné literatuře. Zejména nalezení výchozího stavu visutého lana není nikde a nikým dokumentováno. Studie byla vypracována se stejnou geometrií jako u předchozí zavěšené varianty, aby bylo možné tyto druhy konstrukcí porovnat. Opět se provedla statická a dynamická analýza.

Pro hlubší porozumění postupu nalezení výchozího stavu visutého kabelu na půdorysně zakřivené konstrukci byl postaven model menšího měřítka, který ověřil chování systému visutého lana a závěsů na jiném než matematickém modelu.

4. Experimentální ověření navržených konstrukcí

Experiment ověřil konstrukční řešení, navržený postup hledání výchozího stavu konstrukce, odezvu konstrukce na statické zatížení a nakonec jím byla zjištěna mezní únosnost konstrukce. Vzhledem k předchozím dvěma studiím zavěšené a visuté varianty bylo vhodné sestavit dva fyzické modely, které byly finančně a konstrukčně náročné hlavně z hlediska kotvení velké vodorovné reakce v pylonu. Ve zkušební hale je velmi obtížné kotvit vodorovné síly, proto bylo rozhodnuto o spojení obou modelů v hlavě pylonu, což eliminuje velké vodorovné reakce.

Model byl navrhnout principem modelové podobnosti, která požaduje rovnost napětí na zmenšeném modelu a reálné konstrukci. Návrh počítal se zjednodušením konstrukce, které nemělo podstatný vliv na shodu mezi chováním modelu lávky a skutečné konstrukce. Postup výstavby ověřil konstrukční řešení a provedené zatěžovací zkoušky zjistily odezvu konstrukce na nejčastější způsoby zatížení.

Důležitým krokem bylo také vyhodnocení a srovnání výsledků z provedeného fyzikálního modelu proti výpočtovému matematickému modelu z pohledu výchozího stavu, statické zatěžovací zkoušky a mezní zatěžovací zkoušky.

3. Výpočtové metody a vyhodnocení

V dizertační práci budou řešeny různé studované konstrukce, které mají společné základní vlastnosti. V první řadě stav konstrukce (mechanické soustavy), při kterém je dosaženo rovnováhy, je stav zdeformovaný, který není předem znám. Dále vztahy mezi zatížením a deformací nejsou lineární. A v neposlední řadě jsou vazby mezi tělesy v některých úlohách reprezentovány obecnými vztahy, např. kontakty. Z výše uvedeného vyplývá, že se jedná o úlohy nelineární, konkrétně o nelinearitu geometrickou a strukturální problémy. Materiálová nelinearita nebyla uvažována, tj. vztah mezi napětím a deformací byl lineární.

Na rozdíl od lineárních úloh matematika neposkytuje věty o existenci řešení, konvergenci a stabilitě, a tak neumožňuje na začátku jednoznačně posoudit řešitelnost úlohy. U nelineárních úloh jsou pro jejich řešení k dispozici jen omezené prostředky, nejčastěji různé numerické postupy. K řešení nelineárních úloh je třeba mnohem větší zkušenosti a intuice než k řešení lineárních úloh. Nelineární analýzy kladou větší nároky na odbornou kvalifikaci řešitele. Často závisí na zvolené výpočetní strategii, jestli bude nelineární problém úspěšně vyřešen. To, co se osvědčilo u jedné úlohy, může v jiném případě selhat. Proto bylo považováno za důležité popsat detailněji postupy, které souvisely s řešením nelineárních úloh, a to nejdříve obecně a potom je aplikovat na konkrétní program, ve kterém byly úlohy řešeny.

Kapitola je rozdělena podle druhu analýzy na statickou a dynamickou. Dynamická analýza se dále dělí na modální analýzu a harmonickou analýzu.

3.1 Statická analýza

3.1.1 Základní přístup ke statické analýze

Pro řešení statické a dynamické analýzy stavebních konstrukcí existuje několik programů využívajících výpočetní techniku. Pro potřeby dizertační práce bylo využito prostředí ANSYS ve verzi 12.1, ve kterém byly řešeny všechny úlohy.

ANSYS využívá nejznámější metodu řešení, tzv. metodu konečných prvků. Základní myšlenkou metody konečných prvků je rozložení tělesa na menší části – elementy, konečné prvky – na kterých je analýza chování poměrně jednoduchá. V deformační variantě, která je nejrozšířenější, se vychází z nahrazení posuvů náhradními funkcemi, tzv. báзовými funkcemi. Pomocí nich se formuluje chování jednotlivých elementů a řešené těleso se opět složí a získá se tím výsledná soustava rovnic, popisující chování celého systému. Potom se aplikují okrajové podmínky a přistupuje se k vlastnímu řešení. Výsledkem diskretizačního

procesu metody konečných prvků je pak systém lineárních rovnic (příkaz ANTYPE, STATIC¹), zapsaných například v maticové formě:

$$[K]\{u\} = \{F^a\}, \quad (3.1)$$

kde je $[K]$ matice tuhosti,
 $\{u\}$ vektor neznámých posunutí,
 $\{F^a\}$ vektor aplikovaného zatížení.

Pokud je matice tuhosti $[K]$ závislá na vektoru neznámých posunutí $\{u\}$, potom se stávají rovnice v (3.1) systémem nelineárních rovnic. Nelineární úlohy nemohou být řešeny pomocí přímých metod, a proto se používají metody iterační. Základním postupem je nalezení odhadu řešení pro neznámé hodnoty, a v dalším kroku provedení korekce (zpřesnění) předchozího řešení. Tento postup se opakuje do doby, než chyba řešení v jednotlivé iteraci není menší než předepsaná hodnota chyby. Při řešení se kromě iteračního schématu využívá i inkrementálního postupu, tzn., že zatížení se neaplikuje celé najednou, ale po přírůstcích, přičemž v každém přírůstku se provádí iterace pro zpřesnění výsledku. V prostředí ANSYS je zatížení přidáváno postupně (příkaz KBC, 1).

Newton-Raphsonova metoda

Základní metodou řešení nelineárních rovnic, kterou využívá ANSYS i většina jiných komerčních systémů, je metoda Newton-Raphsonova (dále N-R metoda). K získání výsledku iteračního kroku metoda využívá tečnou matici tuhosti z předchozího kroku iterace, jak naznačují rovnice (3.2) a (3.3):

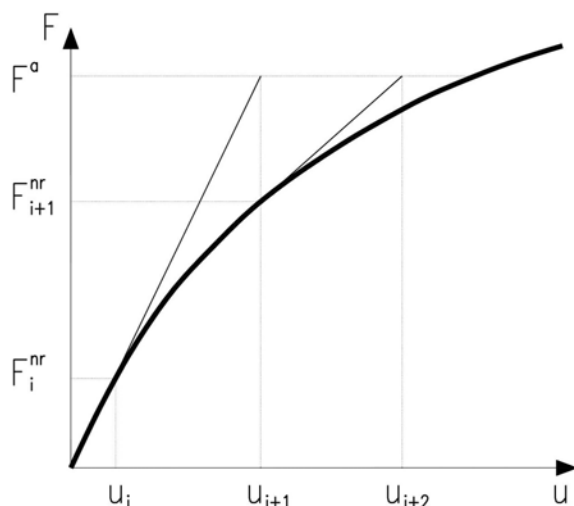
$$[K_i^T]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\} \quad (3.2)$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\}. \quad (3.3)$$

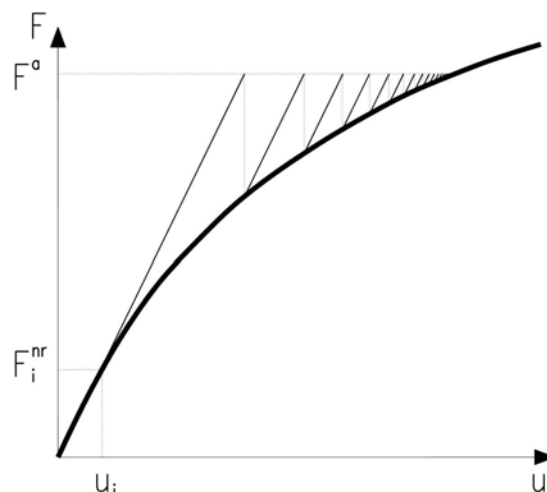
Algoritmus řešení je takový, že z $\{u_i\}$, což je obvykle výsledek zkonvergovaného výpočtu z předchozího kroku (v případě, že se jedná o krok první, ANSYS určí $\{u_0\} = 0$), se vypočítá tečná matice tuhosti $[K_i^T]$ a vektor přeneseného zatížení $\{F_i^{nr}\}$, které se dosadí do rovnice (3.2), z čehož se následně určí $\{\Delta u_i\}$.

Pokud dosadíme $\{u_i\}$ a vypočtené $\{\Delta u_i\}$ do rovnice (3.3) získáme výsledek dalšího kroku iterace $\{u_{i+1}\}$. Tento postup se opakuje (Obr. 3.1 nebo Obr. 3.2), dokud není dosaženo konvergence.

¹ V závorce budou pro řešení vysvětlovaného problému velkými písmeny za slovem příkaz uvedeny příkazy programového prostředí ANSYS



Obr. 3.1 Plná N-R metoda



Obr. 3.2 Modifikovaná N-R metoda – tečná matice spočtena pouze na začátku

Z popsaného algoritmu plyne, že k dosažení konvergence je třeba více jak jedna iterace. ANSYS nabízí ještě různé modifikace této metody (Obr. 3.2), které spočívají v tom, že se matice tuhosti nepočítá v každém kroku. V úlohách dizertační práce byla použita plná N-R metoda – tečná matice tuhosti byla počítána v každém kroku (příkaz NROPT, FULL). Další podrobnosti jsou v [1] a [2].

Konvergence výpočtu

Iterativní proces řešení N-R metody tedy pokračuje, dokud není dosaženo konvergence, nebo není překročen maximální počet iterací. ANSYS umožňuje zadat maximální počet iterací (příkaz NEQUIT, počet iterací). V některých řešených úlohách bylo potřeba zvětšit maximální počet iterací z implicitních 25 až na 35. Konvergenční kritérium bylo zvoleno jako kritérium posunutí a rozdíl mezi iteracemi byl nastaven na hodnotu 1 mm (příkaz CNVTOL, u, 1, 0.001). Pro visuté a zavěšené konstrukce je to hodnota dostačující.

3.1.2 Geometrické nelinearity

Velké posuny

První typ geometrické nelinearity jsou velké posuny. Je způsoben tím, že těleso v důsledku zatížení vykazuje velké posunutí, popř. rotace, avšak přetvoření (deformace) zůstávají malá. V tomto případě je každý objemový element tělesa jako celek podstatně posunut a natočen, ale jeho přetvoření jsou infinitesimální (malá). Při stanovení podmínek rovnováhy není možno použít původních rozměrů tělesa. Řešení je třeba rozdělit na několik podkroků (*Substeps*) a zatěžovat postupně po přírůstcích a v každém podkroku aktualizovat geometrii.

ANSYS obsahuje tuto volbu pod názvem *Large deflection*, která je při statických analýzách studovaných příkladů vždy zapnuta (příkaz NLGEOM, ON).

Velká přetvoření

Dalším typem podobné geometrické nelinearity jsou velká přetvoření. V tomto případě je každý objemový element tělesa jako celek podstatně deformován, avšak jeho posunutí a natočení jsou malá. V úlohách předkládané práce se velká přetvoření neuplatní, a proto nejsou dále rozebírána.

Geometrické zpevnění

Geometrické zpevnění je zpevnění konstrukce (elementu) způsobené jejím (jeho) vlastním stavem napjatosti. Efekt zpevnění nazývaný *Stress stiffening* je potřeba uvažovat všude tam, kde konstrukce jsou tenké s velmi malou ohybovou tuhostí ve srovnání s tuhostí osovou. Jedná se například o závěsy, visuté lano, membránové konstrukce atd. Efekt je ještě umocněn použitím velkých posunů nebo deformací. Úlohy dizertační práce obsahují téměř vždy nějaké lanové prvky, takže tento efekt je použit (příkaz SSTIF, ON).

3.1.3 Základní metody pro zlepšení konvergence

Line search

Line search je nástroj pro zlepšení konvergence, který násobí vypočtený přírůstek zatížení $\{\Delta u_i\}$ v rovnici (3.2) pomocí tzv. *scale factor*, který má hodnotu mezi 0 a 1. *Scale factor* si program určuje sám. Podrobnější popis je v [2]. V některých případech, kdy výpočet nekonvergoval, vedla tato volba nakonec (příkaz LNSRCH, ON) ke konvergenci výpočtu.

Nelineární stabilizace

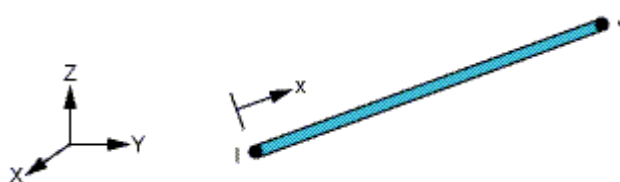
Dalším nástrojem pro zlepšení konvergence je tzv. stabilizace výpočtu. Konstrukce se může dostat do stavu nestability, když například zatížení dosáhne kritické hodnoty, což je více obvyklé pro konstrukce štíhlé, než masivní. Potíže s konvergencí, způsobené nestabilitou konstrukce, jsou obvykle výsledkem velkého posunutí při malém přírůstku zatížení. ANSYS tento problém řeší přidáním tlumiče (pomocí *damping factor*) nebo síly (přístup *energy dissipation ratio*) do každého uzlu konstrukce (příkaz STABILIZE, CONSTANT / REDUCE, ENERGY / DAMPING). Tato opatření mají za úkol redukovat posunutí uzlů, resp. konstrukce a vést ke stabilitě konvergence. Pokud je konstrukce stabilní, tlumič nebo síla mají velmi malý efekt na výsledek, protože posunutí jsou vzhledem ke konstrukci velmi malá (více v [2]).

3.1.4 Použité konečné prvky ve výpočtových modelech

Pro sestavování výpočtových modelů v rámci dizertační práce byly použity prutové, plošné a prostorové prvky z programového prostředí ANSYS. V následujícím textu jsou uvedeny stručné charakteristiky jednotlivých prvků a jejich použití ve výpočtových modelech. Detailní popis všech prvků je uveden v [3].

LINK8, LINK10

Prvky LINK8 (Obr. 3.3) a LINK10 jsou prostorové prutové jednoosé elementy tvořené dvěma uzly I a J. V každém uzlu jsou tři stupně volnosti (posunutí v osách x , y a z). Prvky mají pouze osovou tuhost (tahové nebo tlakové namáhání). Ohybová tuhost není uvažována.

**Obr. 3.3** Prvek LINK8

Prvek LINK10 proti LINK8 může přenášet pouze tlakové nebo tahové namáhání (použití například pro jednoduché kontaktní úlohy). V konstrukci se prvek chová jako kloubově připojený na obou stranách.

Vstupními daty pro oba prvky (Tab. 3.1) jsou souřadnice uzlů I a J, modul pružnosti ve směru prutu, hustota, plocha průřezu a dále je zde možnost zadat počáteční poměrné přetvoření. Zadání poměrného přetvoření slouží pro počáteční napjatost prutu (závěsu) nebo pro předpětí prutu (předpínací kabely).

Prvek lze použít právě pro geometricky nelineární úlohy s vlivem geometrického zpevnění (*stress stiffening*) a s vlivem velkých posunutí (*large deflection*). Dále má prvek schopnost tzv. zmrazení a znovu oživení, což je využíváno například pro postupnou výstavbu, kde v jednotlivých fázích vybrané prvky vznikají nebo zanikají.

Tab. 3.1 Parametry prvku LINK8

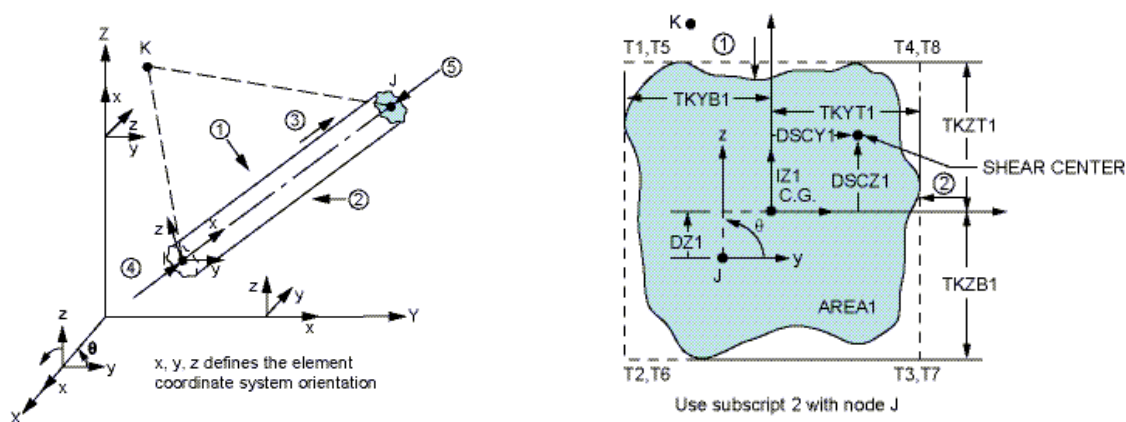
Počet uzlů:	2 (I a J)
Stupně volnosti v uzlu:	UX, UY, UZ
Průřezové charakteristiky:	AREA, INSTRN
Materiálové charakteristiky:	EX, ALPX, DENS

Užitečným výstupem je pak osová síla, osově napětí a posuny obou bodů ve všech třech osách. Prvek LINK8 byl použit pro modelování všech předpínacích kabelů, závěsů a kotevních šroubů a LINK10 byl použit pro visuté lano, protože u visutého lana by nemělo dojít k jeho tlakovému namáhání.

BEAM44

Prvek BEAM44 je základním prvkem pro modelování prutových konstrukcí. Vychází z jednoduššího prvku BEAM4, ale má širší možnost zadávání. Prvek je zadán pomocí dvou koncových uzlů a třetího uzlu (Obr. 3.4), který určuje orientaci os y a z . Každý koncový uzel

má 6 stupňů volnosti – posunutí v osách x , y a z a rotace okolo os x , y a z . Prvek umožňuje zadat lineárně proměnný průřez a excentricitu v každém uzlu.



Obr. 3.4 Prvek BEAM44

Vstupními údaji (Tab. 3.2) jsou plocha, momenty setrvačnosti, excentricita těžiště, vzdálenosti krajních vláken atd., které mohou být zadány různými hodnotami pro oba konce. Prvek může být opět využit pro geometricky nelineární výpočty se zahrnutím geometrického zpevnění a velkých posunů. Výstupem jsou napětí, přetvoření, vnitřní síly a posuny koncových uzlů.

Prvku bylo použito při modelování zábradlí ve studii průřezů, dále pro modelování tuhých prutů.

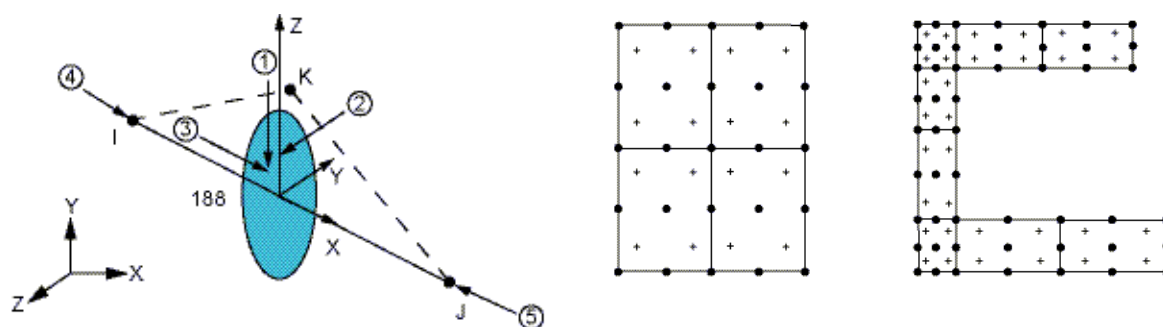
Tab. 3.2 Parametry prvku BEAM44

Počet uzlů:	3 (I , J a K - pouze pro orientaci)
Stupně volnosti v uzlu:	UX , UY , UZ , $ROTX$, $ROTY$, $ROTZ$
Průřezové charakteristiky:	$AREA1$, $IZ1$, $IY1$, $TKZB1$, $TKYB1$, $IX1$, $AREA2$, $IZ2$, $IY2$, $TKZB2$, $TKYB2$, $IX2$, $DX1$, $DY1$, $DZ1$, $DX2$, $DY2$, $DZ2$, $SHEARZ$, $SHEARY$, $TKZT1$, $TKYT1$, $TKZT2$, $TKYT2$, $ARESZ1$, $ARESY1$, $ARESZ2$, $ARESY2$, $TSF1$, $TSF2$, $DSCZ1$, $DSCY1$, $DSCZ2$, $DSCY2$, $EFZS$, $EFYS$,
Materiálové charakteristiky:	EX , $ALPX$, $DENS$, GXY

BEAM188

Prvek BEAM188 je vhodný pro modelování tenkých prutů s vlivem smyku a kroucení. Element je založen na Timošenkově prutové teorii [37] a zahrnuje v sobě i smykové deformace. Opět je zadán pomocí dvou koncových uzlů, ve kterých je 6 nebo 7 stupňů volnosti – posunutí v osách x , y a z , rotace okolo os x , y , a z , případně deplanace (Tab. 3.3). Třetí uzel je nabízen pro určení orientace os y a z . Průřezové charakteristiky se přímo

nedefinují, ale program je vypočte sám z příčného řezu. Prvek umožňuje zadání lineárního náběhu a dále umožňuje kombinovat různé materiály v příčném řezu.



Obr. 3.5 Prvek BEAM188

Prvek lze opět využít pro geometricky nelineární výpočty s již zmiňovanými vlivy. Výstupem jsou kromě osových, torzních a ohybových také smyková napětí. Navíc proti prvku BEAM44 můžeme řešit kroucení a vliv smyku. Prvek BEAM188 by měl být použit pro úlohy, kde dochází ke kroucení prutu. Prvek BEAM44 se z hlediska krouťícího namáhání chová jinak, než ve skutečnosti (pravděpodobně tužší odezva). Napětí normálové a smykové lze zjistit v integračních bodech po průřezu viz Obr. 3.5.

Tab. 3.3 Parametry prvku BEAM188

Počet uzlů:	3 (I, J a K - pouze pro orientaci)
Stupně volnosti v uzlu:	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ, WARP
Průřezové charakteristiky:	pomocí příkazu SECCONTROLS
Materiálové charakteristiky:	EX, ALPX, DENS, GXY

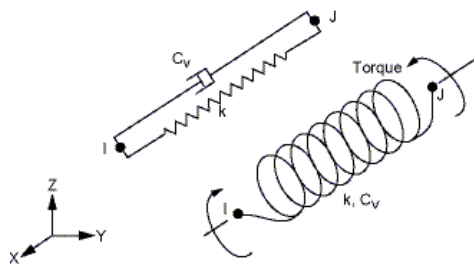
Pomocí integračních bodů je usnadněno i vykreslování napětí a deformací, které se zobrazují, jako by byl prvek modelován pomocí prostorových prvků (příkaz /ESHAPE,1).

Prvek byl použit pro modelování pylonu a táhla pylonu a v případě prostorových modelů jako prut mostovky.

COMBIN14

Prvek 1D, 2D nebo 3D má osovou tuhost (pružinu) nebo torzní tuhost (torzní pružinu) a je určen dvěma uzly (Obr. 3.6). V každém uzlu jsou tři stupně volnosti podle toho, jestli se jedná o pružinu, potom to jsou posunutí v osách x, y a z, nebo o torzní pružinu, potom to jsou rotace kolem os x, y a z. U prvku není uvažováno s vnějším zatížením, ani s žádnou ohybovou tuhostí nebo torzní tuhostí.

Prvek je vhodný pro řešení lineárních i nelineárních úloh. V případě nelineární úlohy je požadován nenulový součinitel útlumu.



Obr. 3.6 Prvek COMBIN14

K osově nebo torzní pružině lze přidat ještě tlumič pro příslušné namáhání. Jako vstupní údaje (Tab. 3.4) slouží buď osová tuhost v jednotkách [N/m] nebo torzní tuhost [Nm/rad] a dále v případě potřeby součinitel útlumu pro tlumič.

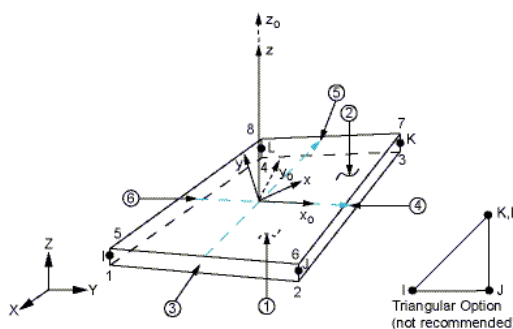
Tab. 3.4 Parametry prvku COMBIN14

Počet uzlů:	2 (I, J)
Stupně volnosti v uzlu:	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
Průřezové charakteristiky:	K (tuhost), CV1 (součinitel útlumu), CV2 (součinitel útlumu)
Materiálové charakteristiky:	DAMP

Prvku bylo užito při modelování tuhosti uložení pylonu (torzní pružina) a také pro stabilizaci uzlů visutého lana (osová pružina).

SHELL181

Prvek SHELL181 je vhodný pro řešení tenkých a středně tenkých desek. Je definován pomocí čtyř uzlů. V každém uzlu je 6 stupňů volnosti: posunutí v osách x, y a z a rotace okolo os x, y a z. Prvek umožňuje zadání různé tloušťky v každém ze 4 uzlů.



Obr. 3.7 Prvek SHELL181

Prvek (Obr. 3.7) je vhodný pro nelineární výpočty s vlivem velkých posunů a geometrickým zpevněním. Vstupní údaje jsou shrnuty v Tab. 3.5. Výstupem jsou vnitřní

síly, napětí na horním a dolním povrchu, příp. ve střednici desky a deformace v globálních nebo lokálních osách.

Element byl použit pro modelování ocelových příčníků mostovky, kotevních plechů a ocelových výztuh pylonu a části pylonu.

Tab. 3.5 Parametry prvku SHELL181

Počet uzlů:	4 (I, J, K, L)
Stupně volnosti v uzlu:	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
Průřezové charakteristiky:	TK(I), TK(J), TK(K), TK(L), THETA, ADMSUA
Materiálové charakteristiky:	EX, EY, EZ, ALPX, ALPY, ALPZ, DENS, GXY, GYZ, GXZ

SURF154

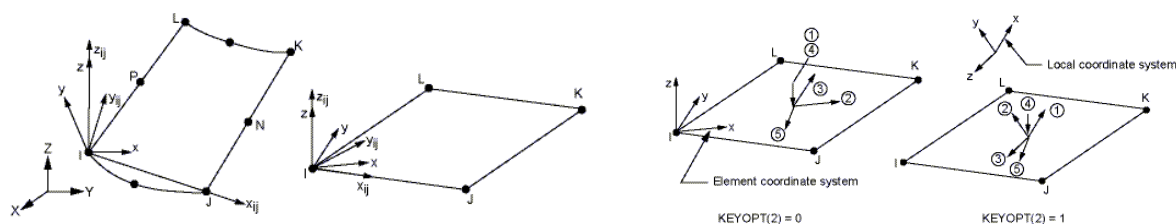
Skořepinové a prostorové prvky (např. SHELL181, SOLID45) mají velmi omezenou schopnost pro zadávání spojitého zatížení. Proto se zatěžovaný povrch pokryje plošnými prvky SURF154 (Obr. 3.8 a Tab. 3.6), které nemají žádnou hmotnost ani tuhost, ale umožní zadat plošné zatížení v různých směrech. Uzly prvku (a stupně volnosti uzlů SURF154) jsou totožné s uzly sítě, která je pokrývána. Principiálně jde o přepočet spojitého zatížení na bodové zatížení do uzlů potahované sítě.

Prvek SURF154 nabízí ještě další použití, např. jako základové podloží, apod., které nebylo využíváno, proto není dále popisováno.

Tab. 3.6 Parametry prvku SURF154

Počet uzlů:	4 (I, J, K, L) nebo 8 (I, J, K, L, M, N, O, P)
Stupně volnosti v uzlu:	UX, UY, UZ
Průřezové charakteristiky:	EFS, SURT, ADMSUA, TKI, TKJ, TKK, TKL
Materiálové charakteristiky:	DENS, VISC, DAMP

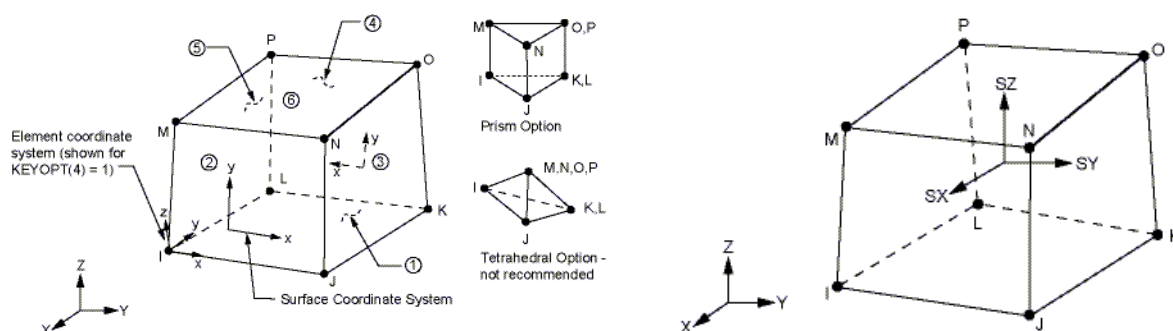
Prvkem byla potáhnutá síť betonové desky mostovky, aby mohla být deska dále zatěžována.



Obr. 3.8 Prvek SURF154

SOLID45

Jde o základní prvek pro objemové modelování prostorových těles. Element je definován pomocí osmi uzlů (Obr. 3.9 a Tab. 3.7). V každém uzlu jsou 3 stupně volnosti: posunutí v osách x , y a z . Ve tvaru osmistěnu se prvek používá pro tvorbu tzv. mapovaných sítí, kdy si uživatel musí zpravidla sám rozhodnout, jak rozdělit řešenou oblast, které topologicky vyhovují krychličky tzv. *bricky*. To může být velmi obtížné, ale odměnou za zvýšenou námahu je podstatně menší počet vygenerovaných prvků a uzlů a nižší výpočtové časy, než při použití automatického generování čtyřstěnu.

**Obr. 3.9** Prvek SOLID45

Prvek je vhodný i pro geometricky nelineární analýzu s vlivy geometrického zpevnění a velkých posunů. Výstupem jsou napětí a deformace v libovolném souřadném systému. V současné době je prvek nahrazován prvkem SOLID95, který je 20 – ti uzlový osmistěn.

Prvkem byla modelována ocelová trubka a betonová deska mostovky, dále pak kotevní a základové bloky.

Tab. 3.7 Parametry prvku BEAM44

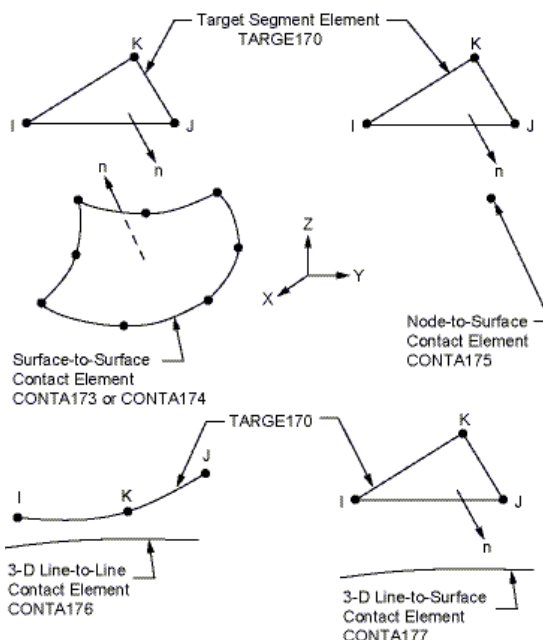
Počet uzlů:	8 (I, J, K, L, M, N, O, P)
Stupně volnosti v uzlu:	UX, UY, UZ
Průřezové charakteristiky:	žádné
Materiálové charakteristiky:	EX, EY, EZ, PRXY, PRYZ, PRXZ, DAMP ALPX, ALPY, ALPZ, DENS, GXY, GYZ, GXZ

TARGE170, CONTA174

Jedná se o elementy, pomocí kterých se modelují kontaktní rozhraní plocha – plocha (face-to-face). Kontaktní rozhraní je většinou vytvořeno mezi dvojicí geometrických entit (těles), kde jedna strana se nazývá CONTACT a druhá TARGET (Obr. 3.10). Kontaktní algoritmus hlídá, zda nedochází k průniku uzlů na straně CONTACT na povrch strany TARGET. Pokud je jedna strana kontaktního rozhraní pouze CONTACT a druhá pouze TARGET, nazýváme spoj asymetrický. V případě, že jsou obě strany kontaktního rozhraní

zároveň CONTACT a TARGET (jsou tedy definovány dva kontaktní páry), jedná se o symetrický kontaktní spoj. Sítě na kontaktních plochách na sebe nemusí navazovat a nemusí mít stejnou hustotu. Důležité ale je, aby normály prvků směřovaly proti sobě.

Existují ještě další druhy kontaktního rozhraní, které v této práci nebyly využity.



Obr. 3.10 Prvky *TARGE170* a *CONTA174*

Existují různé typy kontaktů a to:

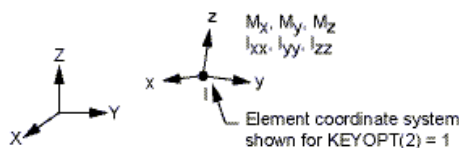
- BONDED – simuluje lepení nebo svaření dvou nebo více těles,
- NO SEPARATION – neumožňuje přiblížení či oddálení těles od sebe, ale dovoluje jejich relativní pohyb (klouzání) s libovolným koeficientem tření,
- ROUGH – umožňuje přiblížení či oddálení těles od sebe, ale nedovoluje jejich relativní pohyb (klouzání) – předpokládá se nekonečně velký koeficient tření,
- FRICTIONLESS – umožňuje přiblížení či oddálení těles od sebe i jejich relativní pohyb (klouzání) s nulovým koeficientem tření,
- FRICTIONAL – umožňuje reálné kontaktní chování, tzn. přiblížení či oddálení těles od sebe i jejich relativní pohyb (klouzání) s libovolným koeficientem tření.

Kontaktní vazby BONDED a NO SEPARATION jsou lineární a vyžadují pouze jeden iterační krok. Ostatní typy kontaktů jsou nelineární a vyžadují více iteračních kroků.

MASS21

Bodový element MASS21 (Obr. 3.11) je definován šesti stupni volnosti v každém uzlu: posunutí v osách x , y a z a rotace okolo os x , y a z . Umožňuje zadat hmotu v osách x , y nebo z , nebo moment setrvačnosti okolo os x , y nebo z .

Prvek byl použit pro modelování tíhy závaží, které bylo umístěno u modelu konstrukce pod mostovkou.



Obr. 3.11 Prvek MASS21

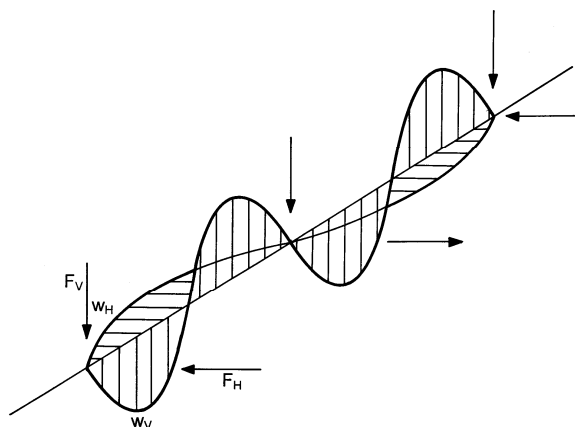
MPC184

MPC184 je prutový element, který se používá k modelování tuhých vazeb mezi dvěma deformovatelnými tělesy. Tento element je vhodný jak pro lineární, tak pro nelineární aplikace. Prvek má nastavení jako LINK (3 stupně volnosti v koncových uzlech – posuny ve třech osách) nebo BEAM (6 stupňů volnosti v koncových uzlech – posuny ve třech osách a pootočení kolem os x, y a z).

3.2 Dynamická analýza

3.2.1 Modální analýza

Modální analýza vede k určení vlastních frekvencí a vlastních tvarů konstrukce. Na významu nabývá u lávek pro pěší díky jejich štíhlosti a náchylnosti na vibrace. Důležité je stanovit druh kmitání jednotlivých tvarů.



Obr. 3.12 Rezonance při $f_V = f_s$ a $f_H = f_s / 2$

Rozlišujeme 3 základní typy vlastních tvarů: svislý ohybový (frekvenci označíme f_V), vodorovný ohybový (frekvenci označíme f_H) a nebo torzní výkmit (frekvenci označíme f_T).

U řady konstrukcí jsou vlastní tvary kombinované a špatně se určují. V této práci budou provedeny pouze dva předběžné posudky podle [32].

Prvním z nich je zabránění rezonance vodorovného a svislého kmitání. Rezonance je snaha konstrukce kmitat při určitých (rezonančních) frekvencích větší amplitudou než u frekvencí ostatních. Při rezonančních frekvencích mohou i malé pravidelné síly způsobovat velké amplitudy kmitů, což může být pro lávku velmi nebezpečné. O rezonanci u lávek mluvíme, jestliže svislé kmitání je blízké frekvenci kroků $f_V = f_s \approx 2 \text{ Hz}$ a vodorovné kmitání činí polovinu z frekvence kroků $f_H = f_s / 2 \approx 1 \text{ Hz}$. Případy, kdy vodorovná frekvence předchází svislé a leží okolo 1 Hz a svislá frekvence je okolo 2 Hz, by se na lávkách neměly vyskytovat.

Druhý posudek bude posouzení na tzv. *Phenomen of Flutter*, nebo česky kmitání (třepotání) vlivem bočního větru. Zde je důležitá vzájemná poloha svislé a především torzní frekvence. K tomuto jevu nedojde, pokud bude splněna tato podmínka:

$$\frac{f_T}{f_V} \geq 2,5. \quad (3.4)$$

Typickým případem, kde nebyla tato podmínka dodržena je známý kolaps mostu Tacoma Narrows ve státě Washington, USA.

Modální analýza v programu ANSYS je lineární (příkaz ANTYPE, MODAL) a její předpoklady jsou:

- lineárně statický materiál,
- platí teorie malých deformací a posunů (nonlinearity nejsou uvažovány),
- není počítáno s tlumením,
- systém není buzen vnějším zatížením.

ANSYS rozlišuje modální analýzu klasickou, modální analýzu s vlivem předpětí a modální analýzu s vlivem předpětí a velkých deformací.

Klasická modální analýza

Při modální analýze jsou vypočteny vlastní frekvence ω_i a vlastní tvary ϕ_i z rovnice:

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{\phi_i\} = 0, \quad (3.5)$$

kde je $[K]$ matice tuhosti a
 $[M]$ matice hmot.

Protože není zadáno žádné buzení, hodnoty deformace vlastních tvarů jsou relativní.

Modální analýza s předepnutím

V některých případech je třeba zahrnout do výpočtu modální analýzu s vlivem předepnutí (*prestress effect*). Tato analýza se rozvětví na dva kroky. Nejprve je nutné provést lineární statickou analýzu (příkazy ANTYPE, STATIC a NLGEOM, OFF) s vlivem *prestress effect* (příkaz PSTRES, ON):

$$[K]\{u_0\} = \{F\}. \quad (3.6)$$

Tento efekt vypočítá matici tuhostí *stress stiffness matrix* $[S]$, která v sobě zahrnuje vliv předepnutí modelu:

$$[\sigma_0] \rightarrow [S]. \quad (3.7)$$

V posledním kroku výpočtu se spočítá modální analýza na modelu, který v sobě již zahrnuje vliv předepnutí $[S]$:

$$([K + S] - \omega_i^2 [M])\{\phi_i\} = 0. \quad (3.8)$$

Modální analýza s vlivem předepnutí a velkých posunů

U některých konstrukcí je potřeba vypočítat vlastní tvary a frekvence na deformované konstrukci. Postup je podobný jako u předchozí analýzy. V prvním kroku se provede místo lineární statické analýzy analýza nelineární (příkaz ANTYPE, STATIC) s vlivem velkých deformací (příkaz NLGEOM, ON) a vlivem *prestress effect* (příkaz PSTRES, ON). Opět se vypočítá matice tuhostí, zahrnující vliv předepnutí $[S]$ a připočte se k matici tuhostí $[K]$. Posledním krokem je výpočet modální analýzy, který se rozdělí na dva dílčí výpočty (*partial solution*). V prvním se provede výpočet vlastních tvarů a vektorů (příkaz PSOLVE, EIGLANB) na základě změněné geometrie (k souřadnicím uzlů jsou připočteny posuny a rotace z nelineárního výpočtu; příkaz UPCOORD, 1.0, ON) a ve druhém se provede rozšířený výpočet *expansion pass* (příkaz EXPASS, ON) a rozšířený výpočet vlastních vektorů (příkaz PSOLVE, EIGEXP).

Pro řešení rovnic (3.5) a (3.7) je používána řada numerických metod, tzv. *Mode-Extraction Metod*. ANSYS má implementováno 7 těchto metod (Block Lanczos, PCG Lanczos, Supernode SNODE, Reduced Householder, Unsymmetric, Damped a QR Damped).

V analýzách předkládané práce je využívána metoda Block Lanczos, což je metoda řešení vlastních čísel (frekvencí) použitím algoritmu Lanczos (příkaz

MODEPT, LANB, NMODE, FREQB, FREQE). Metoda je velmi vhodná pro hledání vlastních frekvencí rozsáhlých konzistentních modelů, tvořených převážně skořepinami (SHELL) a prostorovými prvky (SOLID). Metoda je velmi úspěšná, jestliže je zadána oblast spektra vlastních frekvencí (začátek je označen v příkazu MODEPT jako FREQB a konec jako FREQE), kde se hledá určitý počet vlastní tvarů (v příkazu MODEPT označeno jako NMODE). Konvergence i rychlost řešení je pak přibližně stejná pro hledání na začátku, uprostřed nebo na konci spektra vlastních frekvencí. Pro posuzování vlastních tvarů lávek pro pěší jsou důležité nejnižší frekvence, čili hlavně začátek spektra. Když jsou známy vlastní frekvence, musí se provést ještě rozložení do vlastních tvarů (příkaz MXPAND, NMODE).

3.2.2 Harmonická analýza

Analýza harmonické odezvy dává schopnost předpovídat dynamické chování konstrukce a umožňuje ověřit, zda návrh úspěšně odolá rezonanci nebo jinému škodlivému účinku vynuceného kmitání. Harmonická analýza je vlastně postup určení odezvy konstrukce na ustálený stav od harmonického zatížení, který má proměnný sinusový průběh v čase.

Ustálená odezva na harmonické buzení se sleduje na konstrukci ve vybraných bodech (uzlech). Poté se postupně každý sledovaný uzel na konstrukci budí harmonickou silou a zároveň se vyhodnocuje ustálená odezva všech sledovaných uzlů. Harmonická síla, která zastupuje dynamické zatížení chodci, je uvažovaná jako:

$$F = 180 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot T), \quad (3.9)$$

kde je	F	harmonická síla [N],
	180	předpokládaná dynamická složka v [N] – (cca 18 kg),
	f_0	první ohybová frekvence [Hz],
	T	doba [s].

Výsledkem vyhodnocení bude graf ustálené odezvy, což bude závislost posunutí sledovaného uzlu na frekvenci, kde lze odečíst maximální výchylku u_{peak} . Z maximální výchylky pak stanovíme rychlost (3.10) a zrychlení (3.11) pro každý sledovaný uzel, které porovnáme s dovolenými hodnotami z [34] a [35]:

$$v_{max} = u_{peak} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f) \leq 0,024 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.10)$$

$$a_{max} = -u_{peak} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \leq a_{lim} = 0,5 \cdot \sqrt{f_o}, \quad (3.11)$$

kde je	v_{max}	maximální rychlost sledovaného uzlu [m/s],
	$0,024 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	doporučená hodnota maximální rychlosti dle [34],
	u_{peak}	maximální výchylka [m],

f	frekvence, při které dojde k maximální výchylce [Hz],
a_{max}	maximální zrychlení sledovaného bodu [m/s^2],
f_0	první ohybová frekvence [Hz].

Harmonická analýza v programu ANSYS (příkaz ANTYPE, HARMIC) má tyto podmínky:

- zatížení musí mít v čase sinusový charakter,
- zatížení musí mít stejnou frekvenci,
- nelinearity nejsou povoleny.

Ustálená odezva konstrukce na harmonické buzení se v programu ANSYS provádí pomocí tří metod:

- plná (FULL METHOD),
- redukovaná (REDUCED METHOD),
- superpozice vlastních tvarů (MODE SUPERPOSITION METHOD).

Každá metoda má svoje výhody a nevýhody. Pro lávky pro pěší je vhodná metoda poslední – superpozice vlastních tvarů (příkaz HROPT, MSUP), která sečítá násobky vlastních tvarů (vlastních vektorů) z modální analýzy, aby vypočítala odezvu konstrukce. Mezi hlavní výhody metody patří rychlost, možnost *prestress effect* a možnost zadání součinitele útlumu (příkaz DMPRAT). Postup výpočtu je takový, že se nejdříve vypočítá modální analýza a poté se provede analýza s harmonickým buzením (v případě dynamické složky ve směru osy z příkaz F, číslo uzlu, FZ, hodnota). Pro betonové konstrukce je součinitel útlumu mezi 0,5% až 1%. Pro sledované lávky pro pěší se osvědčil součinitel útlumu 0,8%. Pro vykreslení grafu je nutné zadat interval (rozsah) frekvencí (příkaz HARFRQ, FREQB, FREQE) od nejnižší hodnoty (FREQB) do nejvyšší hodnoty (FREQE) a dělení (NSBSTP) tohoto intervalu (příkaz NSUBST, NSBSTP).

4. Analýza rovnováhy a volba uspořádání příčného řezu při jednostranném zavěšení

V následující kapitole bude řešena volba průřezu pro zavěšení mostovky na vnitřní straně s ohledem na rovnováhu v průřezu. Pokud se zavěsí mostovka pouze na jedné straně, potom bude průřez mostovky namáhán kroučícím momentem. Cílem kapitoly je, aby průřez a jeho uspořádání bylo navrženo tak, aby nevzniklo v mostovce od zatížení vlastní tíhou a stálým zatížením kroučící namáhání, nebo aby bylo minimální. Pokud se přitíží mostovka proměnným zatížením, například zatížením chodce, dojde s velkou pravděpodobností ke vzniku kroučícího namáhání, které by ale nemělo být významným namáháním konstrukce.

Kapitola se zabývá rovnováhou na průřezu bez předpětí a s předpětím. U průřezu bez předpětí je uveden jednoduchý příklad konstrukce, na kterém jsou dokázány platnosti vybraných vztahů a tvrzení.

4.1 Těžiště a střed smyku průřezu

Každý průřez je rovinný obrazec, který u prutových konstrukcí vznikne myšleným řezem, vedeným kolmo k podélné ose prutu. Důležitými parametry, které popisují jeho uspořádání, jsou průřezové charakteristiky. Mezi průřezové charakteristiky, které budou potřebné pro další analýzu, patří těžiště průřezu C_g a střed smyku C_s .

Těžiště průřezu C_g je jediný bod v rovině průřezu, pro který platí, že statický moment plochy průřezu k libovolné ose, která prochází tímto bodem, je roven 0 [18]. Bod C_g je také působíště tíhové síly (vlastní tíhy).

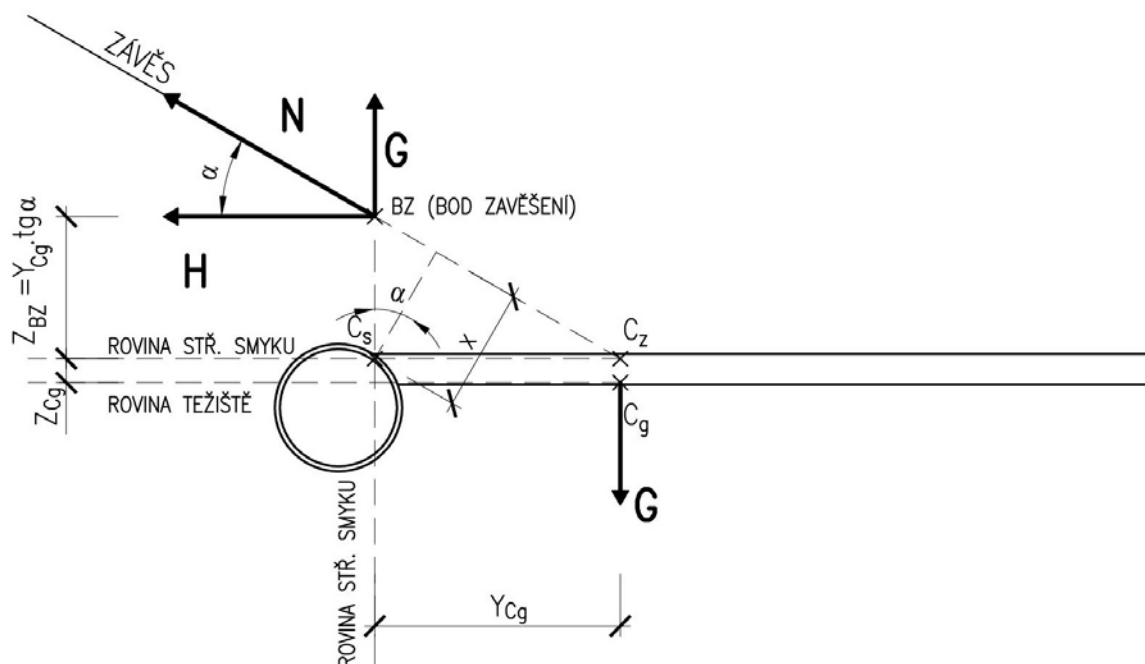
Střed smyku C_s je jediný bod v rovině průřezu, kterým prochází výslednice vnitřních sil, tj. bod ke kterému se počítá kroučící moment. Obecně není v těžišti průřezu, ale je na ose symetrie průřezu [37]. Pokud zatížení bude procházet tímto bodem, nebo pokud momenty od všech zatížení ke středu smyku budou rovny nule, nebude průřez od tohoto zatížení kroucen.

Z definice středu smyku C_s vyplývá, že pro další analýzu jednostranně zavěšeného příčného řezu mostovky je důležité určit rovnováhu sil, působících v průřezu právě ke středu smyku, a tím v průřezu nevznikne nežádoucí kroučící namáhání.

4.2 Rovnováha na průřezu bez předpětí

Pro lepší vysvětlení problematiky rovnováhy sil na průřezu bez předpětí byl zvolen sprážený průřez mostovky, tvořený kombinací ocelové trubky a betonové desky (Obr. 4.1). Sprážený průřez je výhodnější z hlediska přehledného zobrazení působících sil, protože

umožňuje posunutí středu smyku výrazně doleva, zatímco těžiště zůstane blízko poloviny šířky průřezu. Analytický výpočet průřezových charakteristik spřaženého průřezu, včetně polohy středu smyku C_s a těžiště C_g , je poměrně složitý, proto bylo k jejich výpočtu využito metody konečných prvků programu ANSYS.



Obr. 4.1 Rovnováha sil v průřezu s bodem BZ nad středem smyku

Jak bylo naznačeno v odstavci 4.1, pokud má zůstat průřez po zavěšení ve vodorovné poloze (správné geometrii), je nutno dodržet, aby součet všech momentů od všech působících sil ke středu smyku (bod C_s) byl roven nule. Mezi síly působící v průřezu patří jeho vlastní tíha G a síla v závěsu N , kterou lze rozložit do vodorovné složky H a svislé složky G . Vlastní tíha má působíště v těžišti průřezu C_g a síla v závěsu působí v bodě BZ, což je místo, kde končí závěs. Bod BZ byl umístěn nad střed smyku jako průsečík svislé roviny vedené středem smyku s rovinou závěsu tak, aby krouticí moment od závěsu byl způsoben pouze vodorovnou složkou síly v závěsu H . Podmínky rovnováhy lze dle Obr. 4.1 zapsat za předpokladu počátku souřadného systému v bodě C_s (vodorovná osa označená Y a svislá osa Z) do následujících rovnic:

$$\begin{aligned} \sum M_{C_s} &= 0 \\ \sum M_{C_s} &= M_G + M_N = 0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} M_G &= G \cdot Y_{C_g} \equiv M_N = N \cdot x = H \cdot Z_{BZ} \\ G \cdot Y_{C_g} &= N \cdot x = H \cdot Z_{BZ}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

kde je M_G	moment od vlastní tíhy (působíště C_g),
M_N	moment od závěsu rozložený do vodorovného směru (síla H) a svislého směru (síla G) (působíště BZ),
Y_{C_g}	vodorovná vzdálenost mezi středem smyku a těžištěm,
Z_{BZ}	svislá vzdálenost mezi bodem zavěšení a středem smyku,
x	kolmá vzdálenost od C_g k N .

Sklon závěsu α na Obr. 4.1 je úhel, který svírá závěs s vodorovnou rovinou. Síly N a H lze vyjádřit pomocí goniometrických funkcí úhlu α a vlastní tíhy průřezu G :

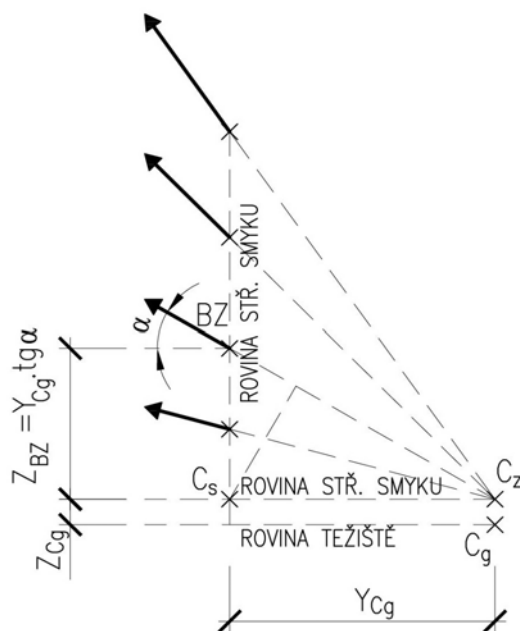
$$N = \frac{G}{\sin \alpha}; \quad H = \frac{G}{\tan \alpha}. \quad (4.3)$$

Neznámé vzdálenosti x a Z_{BZ} , které určují polohu bodu zavěšení BZ nad středem smyku, se určí dosazením rovnice (4.3) do rovnice (4.2):

$$\begin{aligned} G \cdot Y_{C_g} &= \frac{G}{\sin \alpha} \cdot x = \frac{G}{\tan \alpha} \cdot Z_{BZ} \\ x &= Y_{C_g} \cdot \sin \alpha; \quad Z_{BZ} = Y_{C_g} \cdot \tan \alpha. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Poloha bodu BZ podle (4.4) je ve vzdálenosti $Z_{BZ} = Y_{C_g} \cdot \tan \alpha$ nad středem smyku. Ze (4.4) dále vyplývá, že poloha bodu BZ nezávisí na velikosti vlastní tíhy průřezu G , ale pouze na geometrii průřezu (respektive průřezových charakteristikách), konkrétně na velikosti Y_{C_g} , což je vodorovná vzdálenost mezi středem smyku a těžištěm průřezu, a na sklonu závěsu.

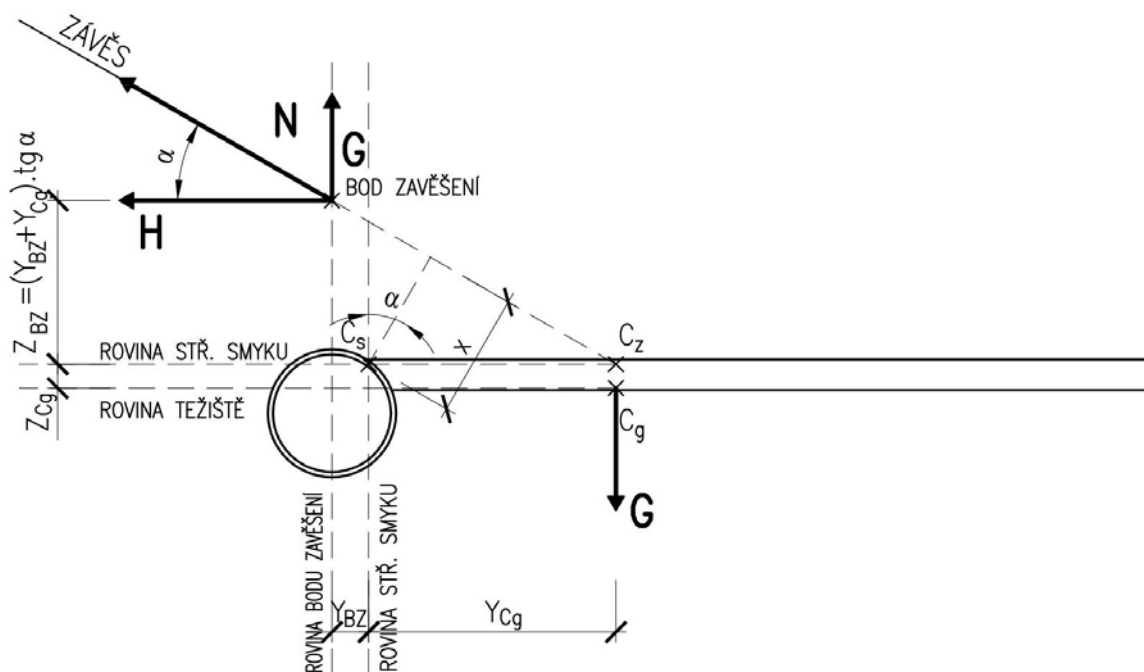
Pokud se budou volit závěsy pod libovolným sklonem α na stejném průřezu, pak se jejich osy, procházející bodem BZ , jehož poloha se pro sklon závěsu α vypočítá z rovnice (4.4) (Y_{C_g} je konstantní), protnou v jediném bodě. Tento bod byl nazván centrem závěsů C_Z a je znázorněn na Obr. 4.2, kde byl pro lepší čitelnost vynechán obrys průřezu. Zjednodušeně lze říci, že centrum závěsů C_Z vznikne jako průsečík svislé roviny, vedené těžištěm s vodorovnou rovinou procházející středem smyku, tj. C_Z leží nad těžištěm ve vzdálenosti Z_{C_g} (svislá vzdálenost mezi C_g a C_s). Díky snadno zjistitelné poloze bodu C_Z lze graficky velmi rychle nalézt polohu bodu zavěšení BZ , jako průsečíku závěsu vedeného z bodu C_Z se svislou rovinou, vedenou ze středu smyku.



Obr. 4.2 Poloha bodu BZ v závislosti na sklonu závěsu α

4.3 Rovnováha na průřezu bez předpětí – libovolná poloha bodu zavěšení

Nelze u každého průřezu umístit polohu bodu BZ přímo nad střed smyku, resp. do svislé roviny středu smyku. Na Obr. 4.3 je vidět, co se stane s průřezem z Obr. 4.1, když se bod zavěšení BZ posune od středu smyku o vodorovnou vzdálenost Y_{BZ} .



Obr. 4.3 Rovnováha sil v průřezu pro libovolnou polohu bodu BZ

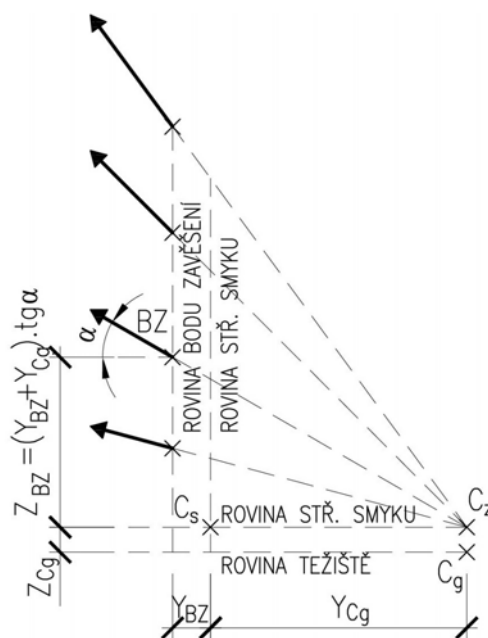
V rovnici (4.2) přibude nový člen, který zahrne přírůstek kroutícího momentu od svislé složky závěsu na rameni Y_{BZ} :

$$\begin{aligned} M_G &= G \cdot Y_{Cg} \equiv M_N = N \cdot x = H \cdot Z_{BZ} - G \cdot Y_{BZ} \\ G \cdot Y_{Cg} &= N \cdot x = H \cdot Z_{BZ} - G \cdot Y_{BZ} . \end{aligned} \quad (4.5)$$

Neznámé vzdálenosti x a Z_{BZ} , které určují polohu bodu zavěšení BZ nad středem smyku, se určí dosazením rovnice (4.3) do (4.5):

$$\begin{aligned} G \cdot Y_{Cg} &= \frac{G}{\sin \alpha} \cdot x = \frac{G}{\tan \alpha} \cdot Z_{BZ} - G \cdot Y_{BZ} \\ x &= Y_{Cg} \cdot \sin \alpha \\ Z_{BZ} &= (Y_{Cg} + Y_{BZ}) \cdot \tan \alpha . \end{aligned} \quad (4.6)$$

Z rovnice (4.6) je vidět, že opět poloha bodu BZ nezávisí na velikosti vlastní tíhy průřezu G , ale pouze na geometrii průřezu (respektive průřezových charakteristikách). Dle rovnice (4.6) existuje centrum závěsů C_z , které opět vznikne jako průsečík svislé roviny vedené těžištěm s vodorovnou rovinou procházející středem smyku (Obr. 4.4).



Obr. 4.4 Libovolná poloha bodu BZ v závislosti na sklonu závěsu α

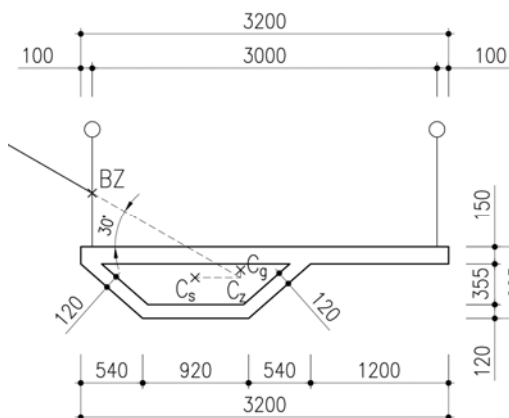
Pokud osa závěsu se sklonem α prochází bodem C_z , lze bod zavěšení BZ posouvat po ose závěsu libovolně, přitom vždy bude dodržena rovnice (4.6). Nezávisí tedy na velikosti

Y_{BZ} , ale pouze na svislé vzdálenosti mezi středem smyku a těžištěm, označené jako Z_{Cg} . Na Obr. 4.4 je také patrná svislá rovina procházející středem smyku, která se v předchozí kapitole 4.2 kryla se svislou rovinou procházející bodem BZ .

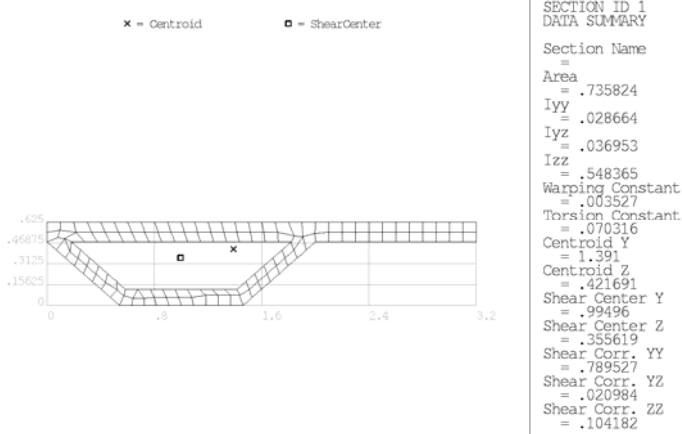
4.4 Studie pro ověření polohy bodu centra závěsů C_z

4.4.1 Popis studie

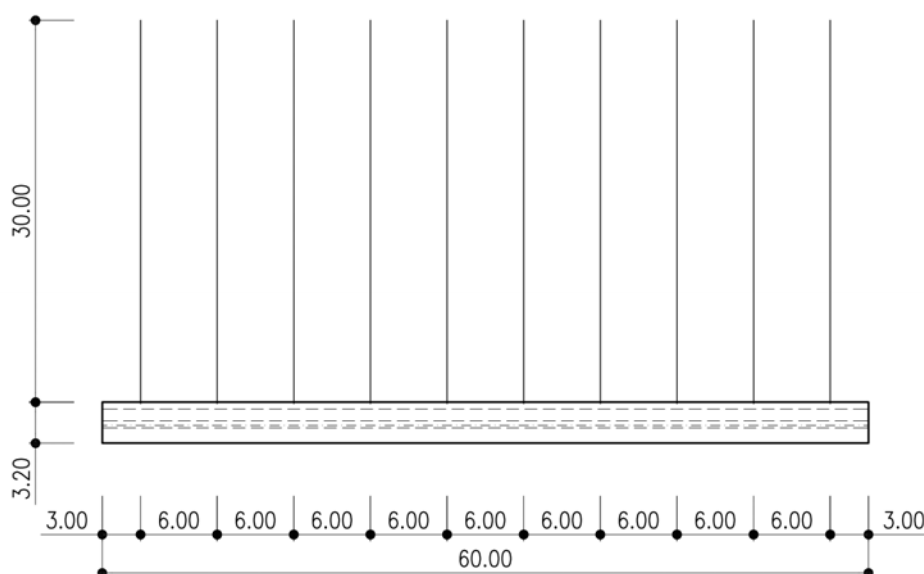
Pro ověření tvrzení z předchozích odstavců byla vytvořena jednoduchá konstrukce jednostranně zavěšené lávky se zvoleným příčným řezem. Cílem studie bude dosáhnout vodorovné polohy příčného řezu od vlastní tíhy uplatněním všech výše uvedených vztahů.



Obr. 4.5 Příčný řez studie



Obr. 4.6 Průřezové charakteristiky příčného řezu studie – ANSYS

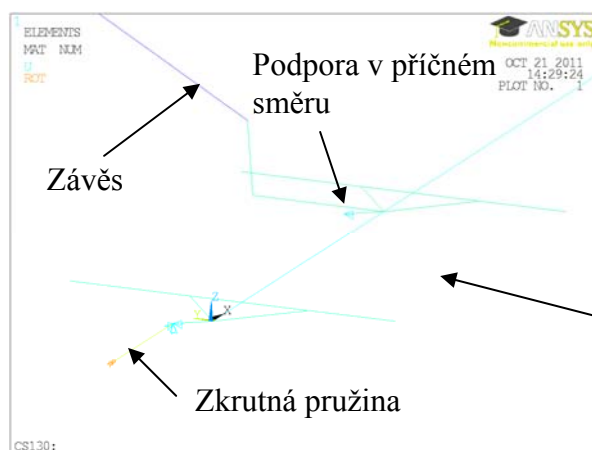


Obr. 4.7 Půdorys studie příčného řezu

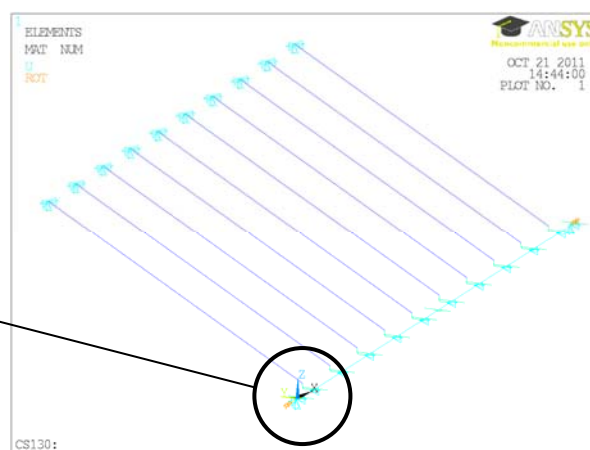
Nejprve byl zvolen jednoduchý betonový komorový příčný řez (Obr. 4.5), na kterém byly vypočteny průřezové charakteristiky včetně polohy těžiště průřezu a středu smyku (Obr. 4.6). Centrum závěsů C_Z vzniklo jako průsečík svislé roviny, vedené těžištěm, s vodorovnou rovinou vedenou středem smyku. Bod zavěšení BZ se zvolil v průsečíku závěsu, vedeného pod úhlem $\alpha = 30^\circ$ z bodu C_Z a levého sloupku zábradlí, který je vzdálen 100 mm od vnější hrany průřezu.

Konstrukce studie je tvořena přímým nosníkem délky 30,0 m s výše popsaným komorovým průřezem, který je zavěšen na levém okraji příčného řezu (v bodě BZ). Osová vzdálenost závěsů je $a = 6,00$ m, krajní závěsy jsou vzdáleny pouze 3,00 m od konců mostovky; konec závěsů je půdorysně vzdálen 30,0 m od hrany průřezu.

Výpočetní model je vytvořen v programu ANSYS. Mostovka je modelována v těžišti jejího příčného řezu prutovým prvkem BEAM188. Zábradlí a spojnice těžiště a bodu zavěšení jsou vytvořeny pomocí tuhých prutů prvky MPC184. Závěsy jsou modelovány prvky LINK8.



Obr. 4.8 Detail podepření mostovky



Obr. 4.9 Výpočtový model studie

Mostovka byla podepřena v úrovni středu smyku jako prostý nosník. Snahou bylo nebránit mostovce v kroucení, ovšem výpočet pak nekonvergoval. Proto se vložila na oba konce mostovky zkrutná pružina pomocí prvku COMBIN14 a její tuhost se nastavila co nejmenší tak, aby výpočet ještě konvergoval (Obr. 4.8).

Tab. 4.1 Charakteristiky studie příčného řezu

Popis	značka	jednotka	Mostovka	Závěs	Tuhé pruty
Modul pružnosti	E	[GPa]	30	210	-
Objemová hmotnost	ρ	[kgm ⁻³]	2500	7850	0
Poissonova konstanta	μ	[-]	0.2	0.3	-
Plocha	A	[m ²]	0.735824	0.001018	-
Použitý prvek			BEAM188	LINK8	MPC184

K zamezení posunu mostovky v příčném směru, díky vodorovné složce závěsu, byla v místě závěsu vložena do středu smyku příčného řezu podpora. Závěsy byly na svém konci podepřeny neposuvně.

Pro určení geometrie výchozího stavu je nutné určit síly, případně přetvoření, v závěsech. Sílu v závěsu N_i lze vypočítat z rovnice (4.3) za pomoci svislé složky G_i . Svislé složky G_i , respektive tíhy segmentů mostovky připadající na závěsy, jsou rovny reakcím na spojitém nosníku s průřezovými charakteristikami mostovky a délkou polí odpovídající osové vzdálenosti závěsů. Pomocí síly v závěsu N_i a Hookova zákona je možné dopočítat neznámé přetvoření v závěsu:

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E} = \frac{N_i}{E \cdot A} = \frac{G_i}{E \cdot A \cdot \sin \alpha}. \quad (4.7)$$

Výsledky výpočtu přetvoření jsou shrnuty v Tab. 4.2. Velikost G_i je určena součtem reakce ze spojitého nosníku $G_{i,mostovka}$ a vlastní tíhy závěsu $G_{i,zaves}$. Pro přehlednost jsou vypočteny i předpokládané síly v závěsu N_i , doplněné o síly dosažené po výpočtu.

Výpočet je proveden jako nelineární s vlivy velkých posunů a geometrického zpevnění.

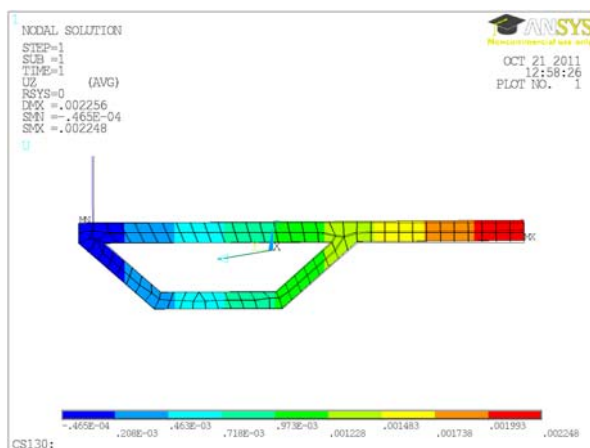
Tab. 4.2 Přetvoření a síly v závěsech

číslo závěsu	$G_{i,závěs}$ [kN]	$G_{i,mostovka}$ [kN]	G_i [kN]	ε_i [m/m]	N_i - předp. [kN]	N_i - dosažené [kN]
	0.00	14.22	14.22			
1	2.72	90.99	93.72	0.000877	187.43	186.18
2	2.72	111.98	114.70	0.001073	229.41	227.25
3	2.72	107.51	110.23	0.001031	220.47	217.80
4	2.72	108.44	111.16	0.001040	222.33	219.44
5	2.72	108.25	110.97	0.001038	221.95	218.99
6	2.72	108.25	110.97	0.001038	221.95	218.99
7	2.72	108.44	111.16	0.001040	222.33	219.44
8	2.72	107.51	110.23	0.001031	220.47	217.80
9	2.72	111.98	114.70	0.001073	229.41	227.25
10	2.72	90.99	93.72	0.000877	187.43	186.18
	0.00	14.22	14.22			
Σ	27.24	1082.79	1110.03			

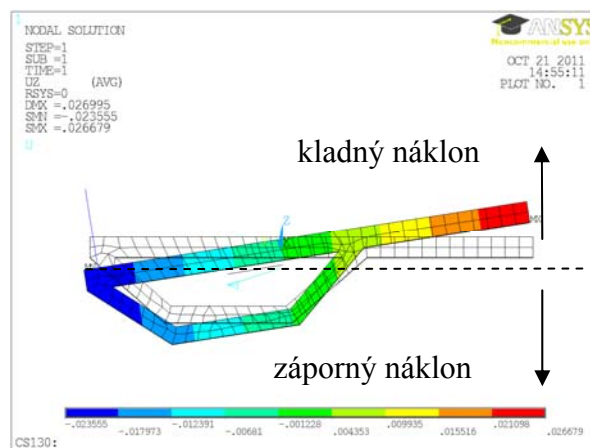
4.4.2 Výsledky studie

Po provedení výpočtu pouze s vlastní tíhou zůstane mostovka ve všech řezech u závěsů ve vodorovné poloze. Důkazem platnosti předchozích vztahů je téměř nulový svislý posun mostovky u pátého závěsu (Obr. 4.10). Pokud se záměrně posune bod zavěšení

například o 100 mm nahoru, tzn., že osa závěsu nebude procházet centrem závěsů C_Z , a sklon závěsu bude stejný, tak se podle rovnice (4.5) zvětší moment od závěsu a průřez se pootočí. Pro vyjádření míry pootočení bude zaveden termín náklon mostovky jako výškový rozdíl krajních bodů horního povrchu mostovky. Znaménková konvence bude kladná, pokud krajní bod volného konce bude výše než krajní bod u závěsu a opačně. Náklon mostovky, způsobený posunem bodu zavěšení o 100 mm nahoru, je tedy kladný, protože moment od závěsu je větší než moment od vlastní tíhy. To dokazuje náklon o hodnotě +5,03 mm na Obr. 4.11.



Obr. 4.10 Svislý posun průřezu mostovky u pátého závěsu



Obr. 4.11 Svislý posun průřezu mostovky u pátého závěsu

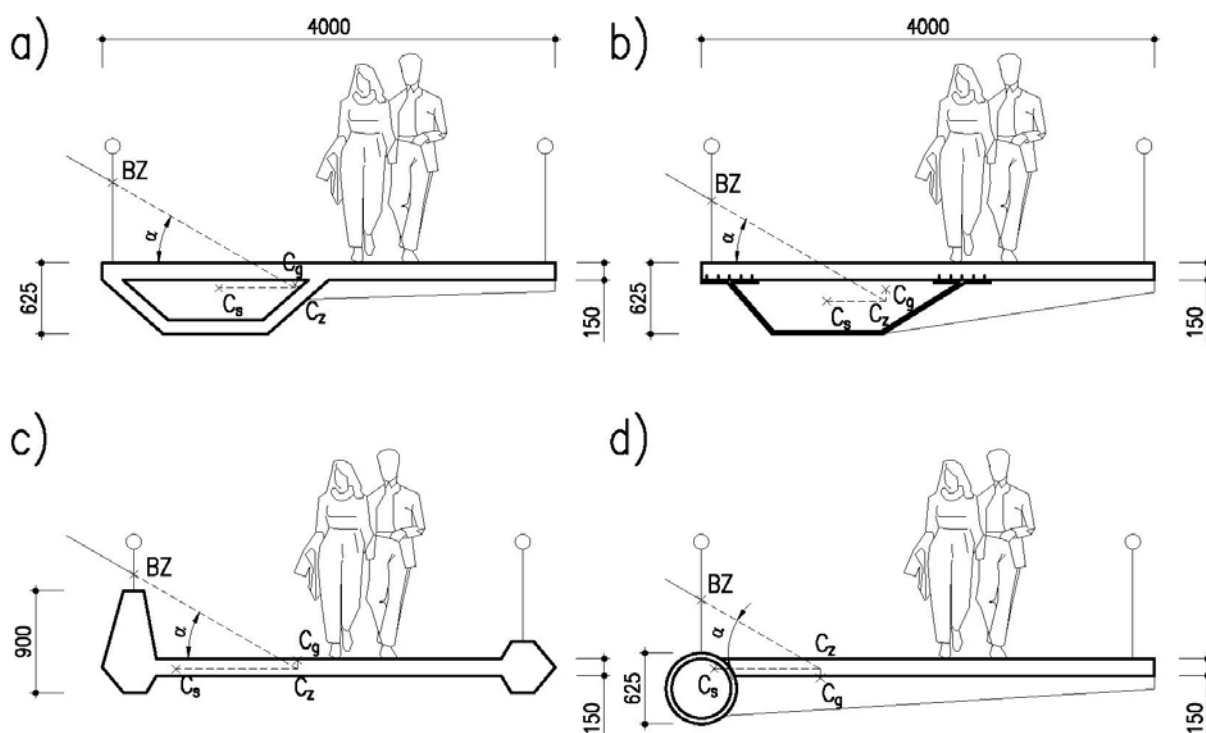
4.4.3 Závěry studie

Výsledky studie potvrdily platnost předchozích rovnic. Pokud je tedy průřez bez předpětí, tak existuje bod C_Z – centrum závěsů, který je definován jako průsečík vodorovné roviny středu smyku a svislé roviny těžiště. Pokud bodem C_Z prochází rovina závěsů a v rovině závěsů leží i bod zavěšení BZ , průřez nebude zatížen kroutícím momentem a mostovka zůstane ve vodorovné poloze.

Na Obr. 4.12 jsou znázorněny různé druhy průřezů s vyznačenou polohou těžiště, středu smyku a centra závěsů. Pro srovnání je volena šířka mostovky 4000 mm, výška mostovky 625 mm, tloušťka betonových částí 150 mm a sklon závěsu 30°. U všech průřezů rovina závěsu prochází centrem závěsů, a tudíž nejsou průřezy namáhány kroucením. Průřezy jsou buď betonové – a) a c), nebo kombinace betonu a oceli – průřez b) a d).

Všechny rovnice ovšem platí pouze tehdy, je-li dodržen původně uvažovaný sklon závěsů. V provedené studii bylo opomenuto několik dalších jevů, které rovnováhu, respektive sklon závěsů, mohou změnit. První z nich je vodorovný posun mostovky způsobený vodorovnou složkou závěsu (u studie byl eliminován podporou v příčném směru u každého závěsu), který závisí na příčné ohybové tuhosti mostovky. Druhý jev je pokles mostovky ve svislém směru. Posledním vlivem jsou podmínky v uložení konstrukce.

Ze studie je zřejmé, že podmínky rovnováhy v příčném řezu se jednoduše poruší, jestliže se posune bodem zavěšení směrem nahoru nebo dolů. Posunutí bodu zavěšení lze využít tak, že jevy, které porušují podmínky rovnováhy, by se snadno eliminovaly drobnou korekcí bodu zavěšení směrem nahoru nebo dolů. Pomocí posunu bodu zavěšení lze tedy každý příčný řez vyrovnat do vodorovné polohy.



Obr. 4.12 Různé varianty průřezů pro jednostranné zavěšení

4.5 Rovnováha na průřezu s předpětím

Předpjatý průřez mostovky, ve kterém jsou vedeny přepínací kabely, má několik výhod. První výhodou, v případě mostovky tvaru betonové desky nebo betonové komory, je vytvoření tlakové rezervy, čímž se minimalizuje tahové namáhání krajních vláken mostovky od ohybu. Další výhoda tkví v tom, že pokud bude mostovka půdorysně zakřivena, tak mohou radiální účinky předpínacích kabelů pozitivně ovlivnit rovnováhu v příčném řezu.

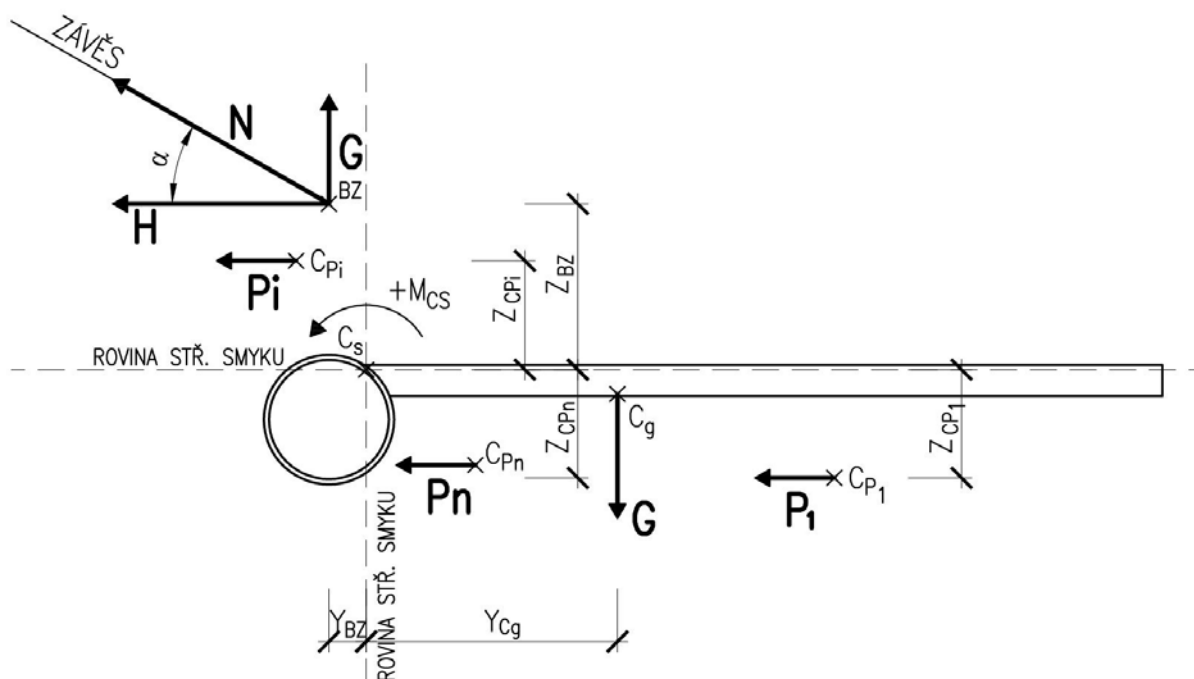
Rovnováha na průřezu s předpětím vychází z rovnice (4.1), která se rozšíří o radiální účinek předpínacích kabelů:

$$\sum M_{Cs} = M_G + M_N + M_P = 0 \quad (4.8)$$

$$M_P = \sum_{i=1}^n P_i \cdot Z_{Cp_i} \quad (4.9)$$

kde je M_p součet všech momentů od předpětí,
 P_i radiální složka i -tého kabelu a
 $Z_{C_{P_i}}$ svislá vzdálenost bodu C_{P_i} (působíště i -tého kabelu) od C_s .

Poloha bodu BZ plyne z rovnice 4.8, kde už nezávisí jen na geometrii průřezu, ale i na velikosti jednotlivých složek a vzdálenosti jejich působíště od středu smyku C_s . Bod C_z umožnil u průřezu bez předpětí graficky velmi rychle nalézt polohu bodu zavěšení BZ tak, aby splnil podmínky rovnováhy v příčném směru, už dále neexistuje.



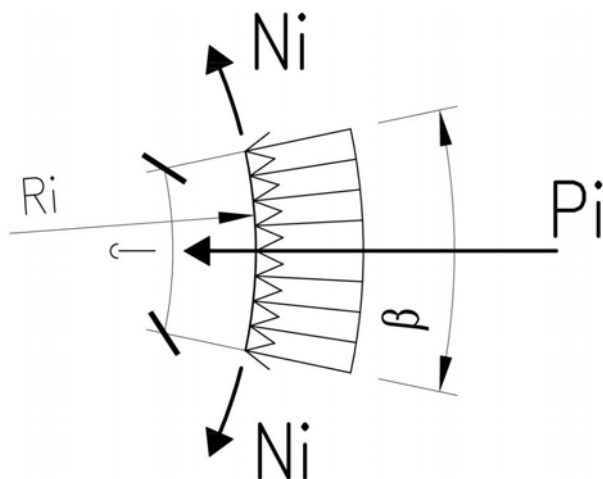
Obr. 4.13 Rovnováha sil v průřezu u varianty s předpětím

Moment od předpětí v rovnici 4.8 může způsobit kladný náklon (na Obr. 4.13 působíště C_{P_i}), nebo záporný náklon (na Obr. 4.13 působíště C_{P_i} a C_{P_n}). Pomocí momentu od předpětí pak lze umístit bod zavěšení BZ prakticky kamkoli. Důležité ovšem je, aby půdorysný průmět závěsu a radiální výslednice kabelů P_i byly kolmé na křivku mostovky. To například nastane, pokud zakřivení mostovky bude tvořit kružnice (Obr. 4.14). Potom pro velikost složky P_i platí rovnice:

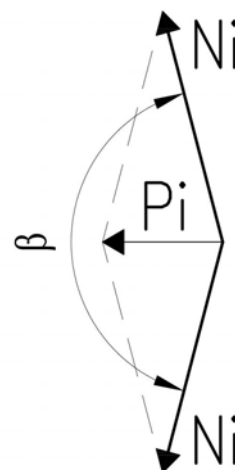
$$P_i = \frac{N_i}{R_i} \cdot \hat{l} = \frac{N_i}{R_i} \cdot \frac{\pi \cdot R_i}{180} \cdot \beta = \frac{N_i \cdot \pi \cdot \beta}{180}, \quad (4.10)$$

kde je $\hat{l}$ délka segmentu oblouku,

- N_i předpínací (normálová) síla v i -tém kabelu,
 R_i poloměr oblouku,
 β úhel segmentu konstrukce určené na jeden závěs [$^\circ$].



Obr. 4.14 Radiální působení kabelu



Obr. 4.15 Polygonální působení kabelu

Vedení kabelu je provedeno většinou pomocí polygonu. V bodech polygonu jsou deviátory a potom pro velikost síly P_i platí rovnice (viz Obr. 4.15):

$$P_i = N_i \cdot \sqrt{2 \cdot (1 + \cos \beta)}. \quad (4.11)$$

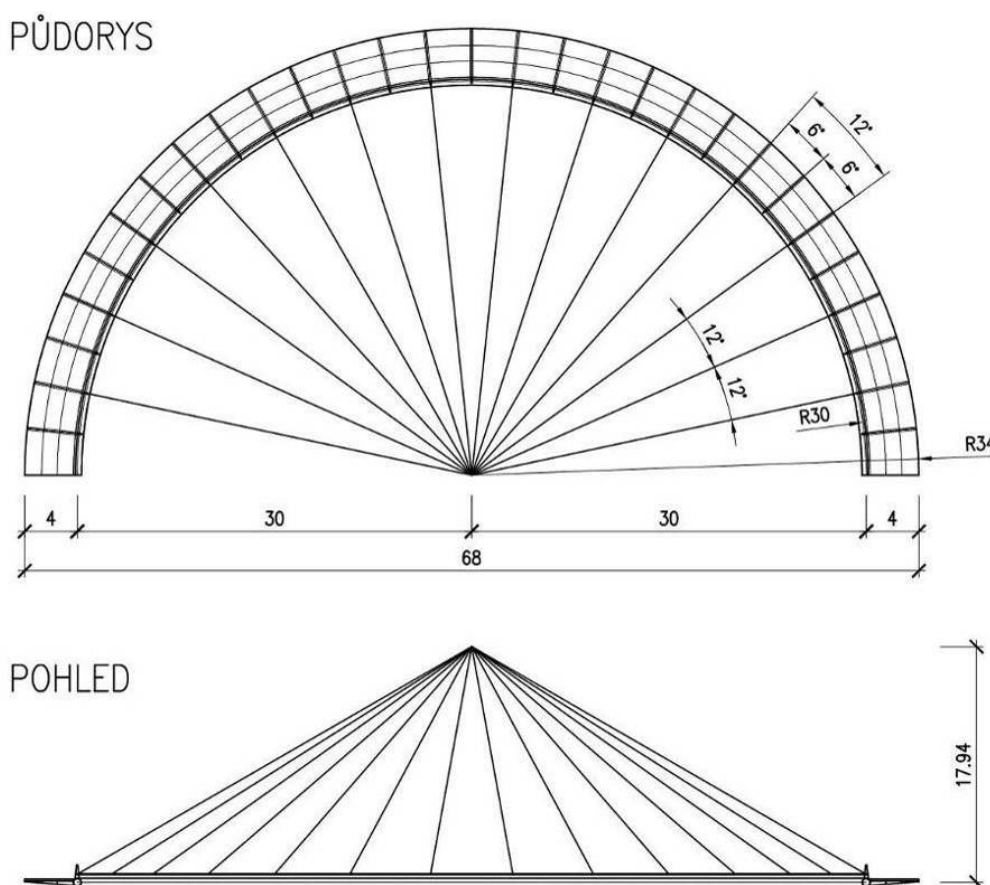
5. Studie půdorysně zakřivené zavěšené konstrukce

Cílem kapitoly je navrhnout reálnou půdorysně zakřivenou zavěšenou konstrukci s využitím všech dříve uvedených poznatků a metod. V první řadě se jedná o návrh průřezu mostovky, doplněného předpínacími kabely s ohledem na jeho rovnováhu. Dále bude podrobně řešen výchozí stav zavěšené konstrukce a na závěr se provede jednoduchá statická a dynamická analýza.

5.1 Popis konstrukce

5.1.1 Půdorys a pohled

Jedná se o konstrukci lávky, která je tvořena zakřiveným betonovým pásem, vyztuženým ocelovou trubkou, osazenou na jeho vnitřní hraně. Lávka o rozpětí 60 m je situována v půdorysném oblouku s osou o poloměru 32 m. Lávka vyplňuje úhel přesně 180°.

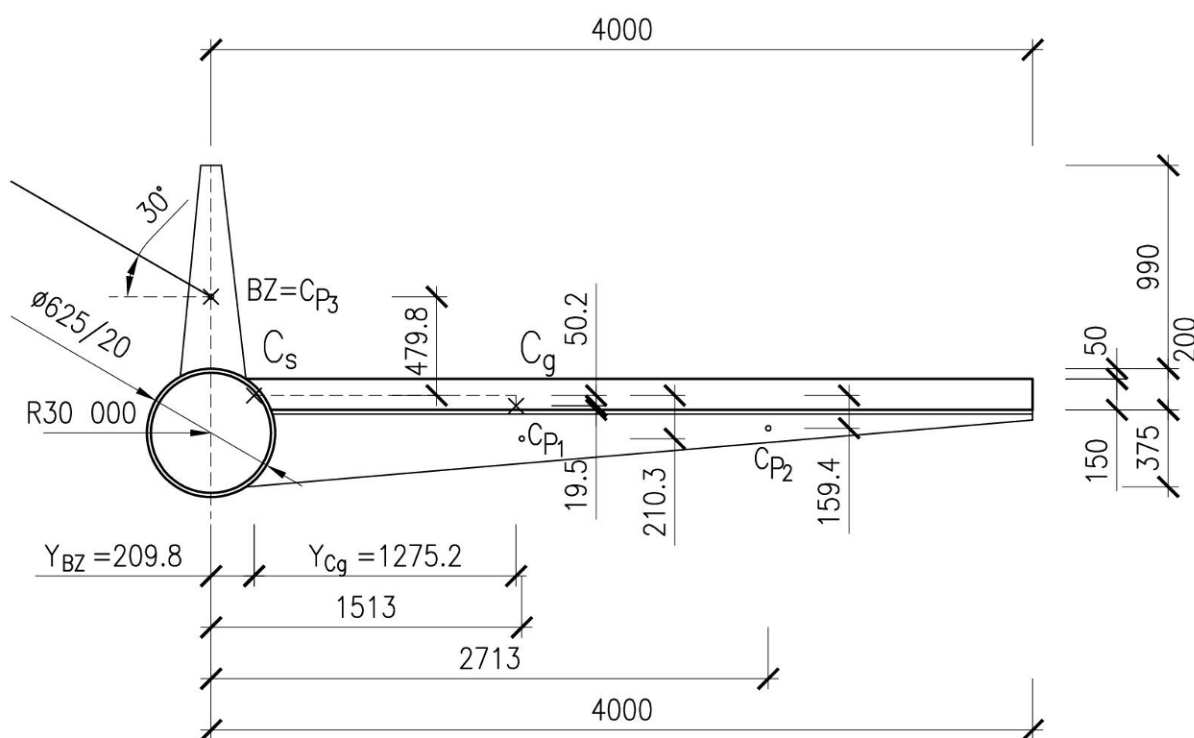


Obr. 5.1 Schematický půdorys a pohled studie zavěšené konstrukce

Betonový pás a ocelová trubka jsou vetknuty do opěr. Předpětí je vedeno jednak v zábradlí a jednak pod mostovkou ve výztužných příčnicích. Lávka je pomocí 14-ti závěsů zavěšena na pylon, který je umístěn ve středu půdorysného oblouku.

5.1.2 Příčný řez

V příčném řezu byla zvolena kombinace ocelové trubky a betonové desky. Ocelová trubka průměru 625 mm s tloušťkou stěny 20 mm pomáhá převzít kroucení a namáhání v podélném směru a tenká betonová deska tloušťky 150 mm nese příčný směr. V řešení je uvažováno se spřažením betonové desky s ocelovou trubkou. Zábradlí, které je po 3,13 m (odpovídá úhlu 6°) přivařeno na trubku, je tvořeno plechem tloušťky 60 mm. V zábradlí je vynechán otvor na jeden předpínací kabel. Na trubku je dále přivařen ocelový příčník tvaru T, který pomáhá vynášet betonovou desku. Vzdálenost příčníků opět tvoří úhel 6° . Stojina i příruba příčníku jsou tvořeny ocelovým plechem tloušťky 20 mm. Ve stojině jsou vynechány otvory pro vedení předpínacích kabelů. Poloha předpínacího kabelu v zábradlí je pro jednoduchost společná s polohou bodu zavěšení.



Obr. 5.2 Příčný řez zavěšenou konstrukcí

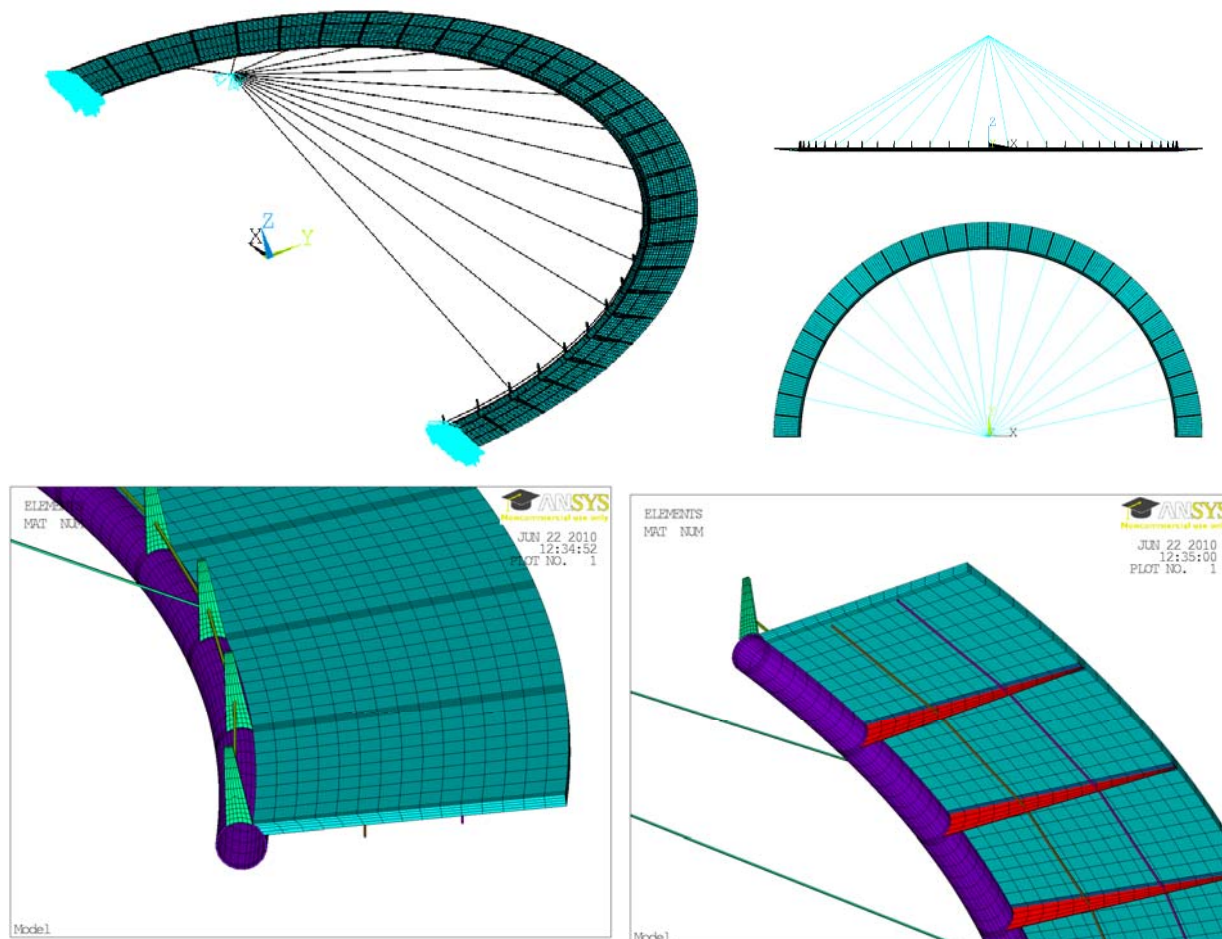
5.2 Statická analýza

5.2.1 Výpočtový model

Výpočtový model popisované zavěšené konstrukce byl vytvořen v programu ANSYS. Pro modelování betonové mostovky a ocelové trubky byl použit prostorový prvek SOLID45. Plech zábradlí a příčník byly modelovány skořepinovým prvkem SHELL181. Dále

pro předpínací lana a závěsy byl použit prutový prvek LINK8 a pro nanesení spojitého zatížení na mostovku byl využit prvek SURF154.

Podepření modelu je znázorněno na Obr. 5.3. Pylon byl z analýzy vynechán a je zastoupen pouze neposuvnou podporou ve směrech os x, y a z. Mostovka je na svých okrajích vetknuta.



Obr. 5.3 Prostorový model v programu ANSYS

Celý výpočet je proveden nelineárně s vlivem geometrického zpevnění a zahrnutím vlivu velkých posunů.

5.2.2 Rovnováha průřezu mostovky v příčném směru

Uspořádání příčného řezu musí být navrženo tak, aby byla splněna rovnice (4.8). Geometrie příčného řezu je známa (Obr. 5.2), dále je nutno určit polohu a počet předpínacích kabelů a polohu bodu zavěšení.

Řešení rovnováhy v příčném směru zahájíme návrhem polohy předpínacích kabelů. V podélném směru dráhy kabelů sledují niveletu mostovky, která není výškově zakřivena. V příčném směru byly uvažovány 3 volné kabely, přičemž dva kabely jsou umístěny

pod mostovkou a jeden kabel nad mostovkou v zábradlí. S ohledem na výslednou rovnováhu v příčném směru kabely pod mostovkou způsobují záporný náklon (umístění pod středem smyku), kabel nad mostovkou, vedený v zábradlí (nad středem smyku), kladný náklon. Kombinace poloh přepínacích kabelů navíc umožňuje jednoduchou rektifikaci náklonu celé mostovky. Pokud bude například náklon mostovky po smontování záporný, jednoduchým zvýšením předpínací síly v kabelu zábradlí lze dosáhnout nulového náklonu mostovky a obráceně.

Poloha kabelů pod mostovkou je dále optimalizována tak, aby se jejich výslednice nacházela v blízkosti těžiště betonové desky, což vede k požadovanému rovnoměrnému rozložení tlakového napětí v betonové desce (Obr. 5.2). Síly v dolních předpínacích kabelech a s tím související předpínací síla v horním kabelu jsou voleny s cílem vytvořit tlakovou rezervu 4,00 MPa v betonové desce spřaženého ocelo-betonového průřezu. Celková normálová síla (celková předpínací síla) za předpokladu splnění tlakové rezervy v betonové části průřezu byla stanovena výpočtem na hodnotu 3200 kN. Velikost průřezu dolního kabelu a tím i předpínací síly 855 kN byly určeny s ohledem na možný rozměr příčnicku v geometrii příčného řezu. Velikost předpínací síly v zábradelním kabelu 1496 kN je určena z rozdílu celkové síly a sil v dolních kabelech viz Tab. 5.1.

Tab. 5.1 Navržené předpětí pro zavěšenou variantu

Číslo kabelu	Počet lan [ks]	A_{Pi} [m ²]	N_i [kN]	P_i [kN]	Y_{CPi} [m]	Z_{CPi} [m]	M_{Pi} [kNm]	ϵ_{Pi} [-]
1	4	0.000600	855.00	179.071	1.3032	0.2103	-37.65	0.0073077
2	4	0.000600	855.00	179.071	2.5032	0.1594	-28.54	0.0073077
3	7	0.001050	1496.25	313.374	0.2098	0.4798	150.34	0.0073077
			$\Sigma N_i =$	3206.25 kN			$\Sigma M_{Pi} =$	84.15 kNm
$\sigma_p =$		1425 MPa	$A_{lana} =$		150 mm ²	$E_p =$		195000 MPa

Posledními neznámými parametry pro zachování rovnováhy v příčném směru jsou svislá poloha bodu zavěšení Z_{BZ} a svislá poloha třetího kabelu Z_{CP_3} , přičemž v příčném směru je kabel s výhodou umístěn v ose zábradlí. Svislá poloha obou bodů musí splňovat rovnici (4.8) v místě každého závěsu. Na každý závěs připadá jiná tíha mostovky G_i (řešení spojitého nosníku na pružných podporách). Požadované řešení rovnováhy v příčném směru lze provést v několika rozdílných variantách. S ohledem na svislé účinky kabelu je vhodné neměnit jeho svislou geometrii v podélném směru. V každé variantě bude tudíž volena stejná svislá vzdálenost Z_{CP_3} v místě všech závěsů.

V první variantě, označené V01, bude měněna poloha bodu zavěšení Z_{BZ} s každým závěsem tak, aby byla splněna rovnice (4.8). Ovšem změna bodu zavěšení v každém závěsu, za předpokladu zachování kotvení závěsu v hlavě pylonu ve stejném bodě, způsobí změnu

sklonu jednotlivých závěsů, což vede k iteraci řešení. Svislá poloha třetího kabelu Z_{CP_3} o hodnotě 0,47464 m, byla zvolena tak, aby uprostřed rozpětí byly rovny svislá poloha třetího kabelu a bodu zavěšení. Splnění rovnováhy (nulové hodnoty součtu kroutících momentů ke středu smyku) pro variantu V01 je patrné z Tab. 5.2, kde stojí za povšimnutí, že přestože se hodnota Z_{BZ} mění skoro o 0,200 m, tak sklon závěsu se při poloměru mostovky 30,000 m skoro nemění.

Tab. 5.2 Určení $Z_{BZ,i}$ pro variantu V01

Číslo závěsu	α [°]	G_i [kN]	H_i [kN]	M_G [kNm]	Z_{BZ} [m]	M_N [kNm]	Z_{CP_3} [m]	M_{P1+2} [kNm]	M_{P_3} [kNm]	M_P [kNm]	ΣM_{Cs} [kNm]
1	30.311	78.98	135.10	-100.72	0.2572	18.17	0.4746	-66.19	148.74	82.55	0.000
2	29.938	140.85	244.57	-179.62	0.5178	97.07	0.4746	-66.19	148.74	82.55	0.000
3	29.984	128.29	222.35	-163.60	0.4856	81.05	0.4746	-66.19	148.74	82.55	0.000
4	29.988	127.49	220.93	-162.58	0.4833	80.03	0.4746	-66.19	148.74	82.55	0.000
5	29.994	125.81	217.96	-160.44	0.4785	77.89	0.4746	-66.19	148.74	82.55	0.000
6	29.998	124.95	216.44	-159.34	0.4760	76.79	0.4746	-66.19	148.74	82.55	0.000
7	30.000	124.51	215.66	-158.78	0.4746	76.23	0.4746	-66.19	148.74	82.55	0.000

S ohledem na jednoduchost výroby je ve variantě V02 volena svislá poloha bodu zavěšení pro všechny závěsy stejná a rovna výšce třetího kabelu ($Z_{BZ} = Z_{CP_3}$). Podmínky rovnováhy tak nemohou být splněny v celé délce mostovky, ale pro jejich splnění je nutno volit jediný řez po délce lávky. Z rovnice (4.8) lze poté vyjádřit jedinou neznámou Z_{BZ} :

$$Z_{BZ} = \frac{G \cdot Y_{Cg} + G \cdot Y_{BZ} + P_1 \cdot Z_{CP_1} + P_2 \cdot Z_{CP_2}}{H + P_3}. \quad (5.1)$$

Vypočtená poloha Z_{BZ} , stejná ve všech závěsech, vycházející z řezu uprostřed rozpětí (minimálně se lišící reakce spojitého nosníku G_i) je pro variantu V02 rovna 0,4746 m. Řez uprostřed rozpětí je však jediným místem, kde celkový moment ke středu smyku je roven nule. Spojitost mostovky v podélném směru do jisté míry ovlivňuje náklon v místech ostatních závěsů, míra vlivu je však patrná až z nelineárního řešení celé konstrukce.

Další varianty vychází z předpokladů varianty V02 ($Z_{BZ} = Z_{CP_3}$). Ve variantě V03 je vzdálenost Z_{BZ} volena tak, aby průměrná hodnota součtu všech momentů ke středu smyku v místě všech závěsů byla nulová (Z_{BZ} rovno 0,4709 m). Řešení ukazuje výrazně jiné hodnoty náklonů v místě prvních závěsů, proto svislá vzdálenost Z_{BZ} rovna 0,4798 m u varianty V04 byla určena z průměrné hodnoty součtu všech momentů ke středu smyku pro vnitřní závěsy mimo krajní závěs u podpory. Varianta V05 uvažuje vynechání prvních

dvou závěsů v řešení průměrné hodnoty momentů ke středu smyku. Vypočtená hodnota Z_{BZ} je rovna 0,4768 m.

Všechny varianty byly dále podrobně analyzovány a vyhodnoceny pomocí nelineární analýzy v programovém systému ANSYS (Tab. 5.3). Při analýze se dbalo na to, aby se síly v závěsech a ve všech předpínacích kabelech shodovaly s předpokládanými hodnotami (Tab. 5.1). Varianta V01 má sice výsledné krouticí momenty ve všech závěsech ke středu smyku nulové, ale přesto vykazuje drobný náklon mostovky, který je stejně jako u ostatních variant ovlivněn posuny mostovky ve vodorovném směru o cca 10 mm (v úrovni ocelové trubky) a ve svislém směru o cca 16 mm. Posuny proběhnou vždy a mohou se eliminovat případným nadvýšením mostovky.

Tab. 5.3 Srovnání variant polohy bodu zavěšení

Var. Z _{BZ}	V01 dle Tab. 5.2			V02 0.4746			V03 0.4709			V04 0.4798			V05 0.4768		
	ΣM _{Cs}	Uz*	Náklon**	ΣM _{Cs}	Uz*	Náklon**	ΣM _{Cs}	Uz*	Náklon**	ΣM _{Cs}	Uz*	Náklon**	ΣM _{Cs}	Uz*	Náklon**
Č. zav.	[kNm]	[mm]	[mm]	[kNm]	[mm]	[mm]	[kNm]	[mm]	[mm]	[kNm]	[mm]	[mm]	[kNm]	[mm]	[mm]
1	0.000	-1.8	-3.6	30.188	-1.9	-3.6	28.504	-1.9	-3.8	32.492	-2.0	-3.2	31.141	-2.0	-3.4
2	0.000	-2.1	-1.5	-10.833	-2.1	-1.6	-12.918	-2.0	-2.1	-7.980	-2.2	-0.9	-9.652	-2.1	-1.3
3	0.000	-3.3	0.9	-2.506	-3.1	0.4	-4.510	-3.0	-0.3	0.235	-3.4	1.3	-1.371	-3.2	0.8
4	0.000	-6.3	1.3	-1.976	-6.1	0.6	-3.974	-5.9	-0.2	0.759	-6.4	1.7	-0.844	-6.2	1.1
5	0.000	-10.2	0.8	-0.862	-9.9	0.1	-2.849	-9.7	-0.8	1.858	-10.3	1.2	0.264	-10.1	0.5
6	0.000	-13.6	0.0	-0.292	-13.4	-0.7	-2.274	-13.1	-1.6	2.420	-13.8	0.5	0.831	-13.5	-0.2
7	0.000	-15.6	-0.5	0.000	-15.3	-1.2	-1.979	-15.0	-2.1	2.708	-15.8	0.1	1.121	-15.5	-0.7
Ø	0.000		-0.4	1.960		-0.9	0.000		-1.6	4.642		0.1	3.070		-0.5
Ø***	0.000		0.2	-2.745		-0.4	-4.751		-1.2	0.000		0.7	-1.609		0.0
Ø****	0.000		0.5	-1.127		-0.2	-3.117		-1.0	1.596		1.0	0.000		0.3

* svislý posun horního povrchu trubky

*** průměr bez závěsu 1

** náklon betonové desky

**** průměr bez závěsů 1 a 2

Všechny varianty se svými výsledky náklonů i svislého posunu ocelové trubky liší naprosto minimálně. Konstrukce není citlivá na drobné odchylky polohy bodu zavěšení, proto průměrování polohy bodu zavěšení ze všech závěsů je smysluplné ve zjednodušení, návrhu i provádění. U variant V02 až V05 jsou rozdíly polohy bodu zavěšení maximálně v rozsahu 10 mm. Pro další návrhy tedy postačí provést návrh podle rovnice (4.8) pouze v místech okolo poloviny rozpětí, jako ve variantě V02, a popřípadě provést drobnou korekci.

Tab. 5.4 Rovnováha na vybrané variantě V04

Číslo závěsu	G_i [kN]	H_i [kN]	M_G [kNm]	Z_{BZ} [m]	M_N [kNm]	Z_{CP3} [m]	M_{P1+2} [kNm]	M_{P3} [kNm]	M_P [kNm]	ΣM_{Cs} [kNm]
1	78.98	136.79	-100.72	0.4798	49.06	0.4798	-66.19	150.34	84.15	32.492
2	140.85	243.96	-179.62	0.4798	87.49	0.4798	-66.19	150.34	84.15	-7.980
3	128.29	222.21	-163.60	0.4798	79.69	0.4798	-66.19	150.34	84.15	0.235
4	127.49	220.82	-162.58	0.4798	79.19	0.4798	-66.19	150.34	84.15	0.759
5	125.81	217.91	-160.44	0.4798	78.14	0.4798	-66.19	150.34	84.15	1.858
6	124.95	216.42	-159.34	0.4798	77.61	0.4798	-66.19	150.34	84.15	2.420
7	124.51	215.66	-158.78	0.4798	77.34	0.4798	-66.19	150.34	84.15	2.708

$\alpha = 30.0000^\circ$

$Y_{BZ} = 0.2098 \text{ m}$

$Y_{Cg} = 1.2752 \text{ m}$

V další analýze budeme uvažovat s variantou V04, která byla z hlediska náklonů nejpříjemnější. K ověření porušení rovnováhy v příčném řezu byla při modelování záměrně vnesena chyba do výpočtu tak, že byl bod zavěšení posunut směrem nahoru o 80 mm, což způsobilo náklon cca -30 mm související se značným poklesem mostovky. Závěrem lze podotknout, že výrazné odchýlení od rovnice (4.8) vede k porušení rovnováhy a velkému náklonu.

5.2.3 Hledání výchozího tvaru

Za výchozí stav je považován takový stav deformace a jemu odpovídající stav napjatosti konstrukce, který dává rovnováhu celému systému v požadované geometrii od vlastní tíhy a předpětí [26]. V případě studované zavěšené konstrukce se hledá přetvoření v závěsech (tj. délky závěsů), které odpovídá vodorovnému tvaru mostovky.

U zakřivených konstrukcí dojde vlivem stlačení střednice vždy k vodorovnému posunu mostovky, u studované konstrukce cca 10 mm směrem k pylonu. Vše závisí na úhlu závěsu a velikosti předpínacích sil. Jejich vliv není možné eliminovat a nadvýšení ve vodorovném směru se obvykle neprovádí.

Tab. 5.5 ukazuje rozdíl předpokládaných normálových sil v závěsech vypočtených rozkladem sil dle rovnic (4.3) a (4.7) a dosažených normálových sil ze statické analýzy z matematického modelu ovlivněných stlačením a poklesem střednice mostovky.

Tab. 5.5 Vypočtené síly v závěsech

číslo závěsu	$G_{i,závěs}$ [kN]	$G_{i,mostovka}$ [kN]	G_i [kN]	ε_i [m/m]	N_i . předp. [kN]	N_i . dosažené [kN]
	0.00	46.80	46.80			
1	0.80	78.18	78.98	0.001350	157.95	152.36
2	0.80	140.05	140.85	0.002408	281.70	268.97
3	0.80	127.49	128.29	0.002193	256.58	239.89
4	0.80	126.69	127.49	0.002179	254.98	237.52
5	0.80	125.01	125.81	0.002151	251.62	236.03
6	0.80	124.15	124.95	0.002136	249.90	236.65
7	0.80	123.71	124.51	0.002128	249.02	237.26
Σ	11.20	1784.16	1795.36	$\emptyset$	243.11	

$$A_{zavěsu} = 0.0006 \text{ m}^2$$

$$E = 195 \text{ GPa}$$

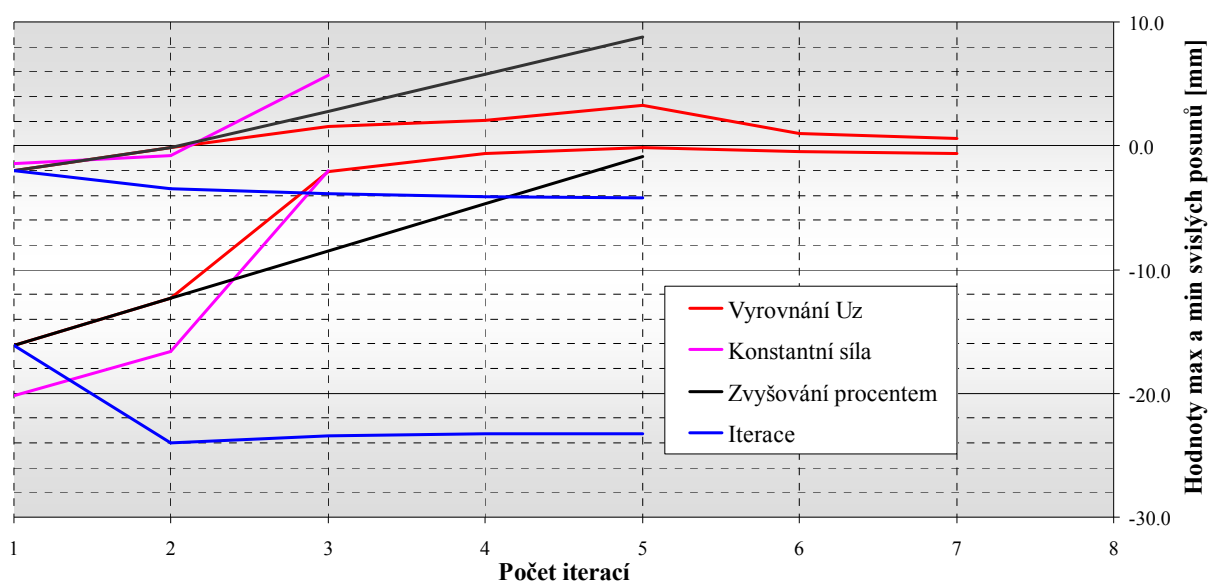
Pro vyrovnání svislých posunů horního povrchu mostovky je účelné nalézt vhodnou metodu stanovení sil (přetvoření) v závěsech. Pro vyhodnocení metod budou sledovány maxima a minima svislých posunů ocelové trubky (horní povrch) a zároveň náklonů mostovky u každého závěsu. Stanovení sil v závěsech bude ukončeno, jestliže svislý posun horního povrchu ocelové trubky bude v toleranci $\pm 1,0$ mm.

Metoda iterace

První metoda je nejjednodušší možností nalezení přetvoření v závěsu, případně ve visutém laně. Metoda se obvykle používá u visutých konstrukcí, kde je zároveň spojena s opravou geometrie mostovky v každém kroku. První iterační krok se vytvoří buď konstantní hodnotou přetvoření pro všechny závěsy, nebo se vezme přetvoření z Tab. 5.5. Podstatou je, že v každém dalším iteračním kroku se přetvoření spočítá podle rovnice (4.7) se silou v závěsu, přečtenou z předchozího kroku. Metoda byla aplikována v pěti krocích, ale výsledky posunů ocelové trubky se asymptoticky přibližovaly k maximu $-4,0$ mm a minimu $-23,0$ mm. Proti prvnímu kroku je to ovšem výrazné zhoršení.

Metoda zvyšování procentem

První krok druhé metody vychází z přetvoření z Tab. 5.5. V každém dalším kroku zvětšujeme nebo zmenšujeme přetvoření tak, že se násobí přetvoření ve všech závěsech stejnou hodnotou, ale vždy vůči prvnímu kroku. V druhém kroku se pak násobí všechna přetvoření z prvního kroku hodnotou 1,025 (zkrácení o 2,5%), ve třetím 1,050, dále 1,075 a 1,100. Metoda dala nejlepší výsledek svislého posunu ocelové trubky ve čtvrté iteraci (zkrácení závěsů o 7,5% proti předpokladům) a to maximum $+5,8$ mm a minimum $-4,7$ mm, což je uspokojivý výsledek.



Obr. 5.4 Maxima a minima svislých posunů pro jednotlivé metody

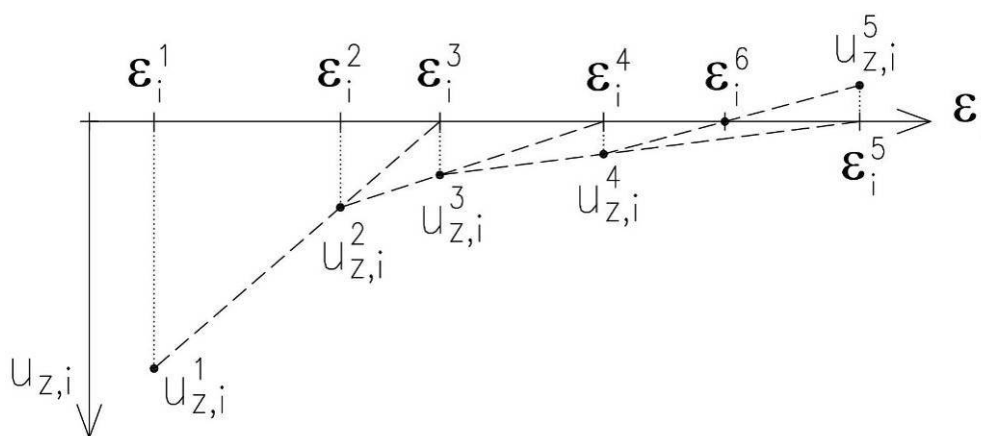
Metoda konstantní síly

Metoda vychází opět z rovnice (4.7), ale pro všechny závěsy je volena jedna hodnota síly N_i v každém kroku. První krok se zahájil z průměrné hodnoty předpokládaných sil v závěsech z Tab. 5.5 $N_i = 243,11$ kN. Protože bylo potřeba zvýšit sílu z prvního kroku, byla ve druhém kroku uvažována vyšší síla v závěsu číslo 7. Hodnoty posunů byly stále malé,

proto ve třetím kroku byla provedena extrapolace z předchozích dvou kroků tak, aby svislý posun v závěsu číslo 7 (závěs uprostřed rozpětí) byl nulový ($N_i = 273,00 \text{ kN}$). Metodou konstantní síly bylo dosaženo hodnot minima $-2,0 \text{ mm}$ a maxima $+5,7 \text{ mm}$ svislého posunu mostovky.

Metoda vyrovnání svislých posunů

Poslední zkoušená metoda vychází z prvních dvou kroků metody zvyšování procentem. Teoreticky lze použít dva kroky kterékoli předchozí metody. Ve třetím kroku je pak přetvoření v každém závěsu upraveno tak, aby lineární extrapolace nebo interpolace svislého posunu horního povrchu trubky v místě závěsu byla rovna nule. Grafické znázornění hledání přetvoření i -tého závěsu je na Obr. 5.5, ve kterém je teoreticky svislý posun trubky v šestém kroku iterace roven nule, což je hledané řešení.



Obr. 5.5 Princip metody vyrovnání svislého průhybu trubky pro jeden i -tý závěs

Rovnice pro výpočet přetvoření i -tého závěsu v n -tém kroku iterace ε_i^n vychází z rovnice přímky, kde platí $u_{z,i}^n = 0$:

$$\varepsilon_i^n = \frac{k_i^{n-1,n-2} \cdot \varepsilon_i^{n-1} - u_{z,i}^{n-1}}{k_i^{n-1,n-2}} = \frac{\frac{u_{z,i}^{n-1} - u_{z,i}^{n-2}}{\varepsilon_i^{n-1} - \varepsilon_i^{n-2}} \cdot \varepsilon_i^{n-1} - u_{z,i}^{n-1}}{\frac{u_{z,i}^{n-1} - u_{z,i}^{n-2}}{\varepsilon_i^{n-1} - \varepsilon_i^{n-2}}}. \quad (5.2)$$

Vstupy do rovnice (5.2) tvoří svislé posuny $u_{z,i}^{n-1}$ a $u_{z,i}^{n-2}$ a přetvoření předchozích dvou iteračních kroků ε_i^{n-1} a ε_i^{n-2} . V rovnici (5.2) je $k_i^{n-1,n-2}$ směrnice přímky mezi iteračními kroky $(n-1)$ a $(n-2)$.

Po sedmi iteracích byl výsledek svislého posunu ocelové trubky $\pm 0,6 \text{ mm}$. Výsledky poslední iterace jsou včetně sil v závěsech a náklonu shrnuty v Tab. 5.6.

Hodnota dosažených sil v Tab. 5.6 je v prvním závěsu o 21% vyšší a v ostatních závěsech průměrně o 6% nižší než u hodnot předpokládaných sil v Tab. 5.5. Dosažené poměrné přetvoření u všech závěsů je naopak vyšší.

Za povšimnutí stojí velký vliv odchylky poměrného přetvoření prvního závěsu v Tab. 5.6 na svislý posun mostovky uz, i když díky blízkosti podpory (vetknutí) a nejmenší velikosti příslušející vlastní tíhy G_i by mělo poměrné přetvoření v prvním závěsu hodnotu svislého posunu nejméně ovlivňovat.

Tab. 5.6 Poslední iterace metody vyrovnání svislých posunů

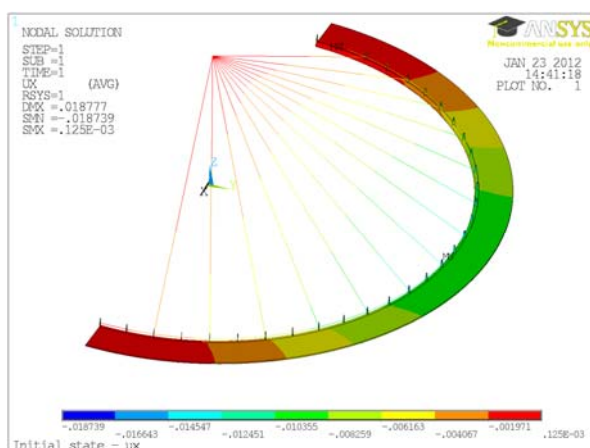
číslo závěsu	ε_i [m/m]	Odchylka ε_i^* [%]	N_i - dosažené [kN]	Odchylka N_i^* [%]	trubka ux [mm]	uz [mm]	Mostovka náklon [mm]
1	0.001708	26.5	190.57	20.6	-0.8	-0.4	-3.2
2	0.002449	1.7	268.88	-4.6	-2.4	0.6	-0.8
3	0.002204	0.5	235.00	-8.4	-4.2	0.5	1.3
4	0.002212	1.5	231.48	-9.2	-6.1	-0.3	2.0
5	0.002298	6.9	236.73	-5.9	-7.9	-0.6	2.4
6	0.002349	10.0	238.32	-4.6	-9.3	-0.5	2.7
7	0.002384	12.0	239.72	-3.7	-10.1	-0.2	2.9
střed					-10.1	-0.4	3.7

* odchylka od předpokládaných hodnot v Tab. 5.5

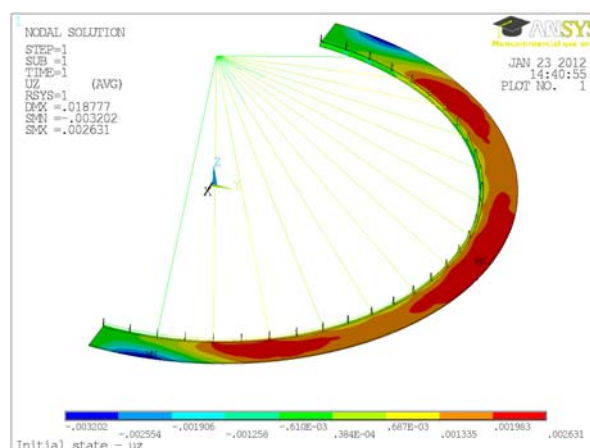
max **0.6** **3.7**
min **-0.6** **-3.2**

Při délce závěsu 34,641 m je nutné závěs zkrátit o 59 mm, aby se vyvolala potřebná síla, což je cca o 12 mm více, než je předpoklad v Tab. 5.5.

Náklon mostovky dosáhl hodnot ± 4 mm, to je 1 mm/m, což je akceptovatelná hodnota.



Obr. 5.6 Posunutí ux – výchozí stav



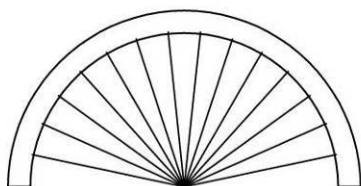
Obr. 5.7 Posunutí uz – výchozí stav

Ze všech použitých metod pro vyrovnání svislých posunů horního povrchu mostovky tedy dosahovala poslední metoda nejlepších výsledků, a proto byla použita pro další analýzu. Výsledné hodnoty svislých a vodorovných posunů jsou zobrazeny na Obr. 5.6 a Obr. 5.7.

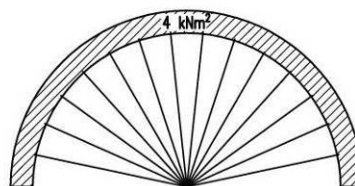
5.2.4 Zatěžovací stavy a kombinace

Na mostních konstrukcích se rozlišují dle proměnnosti v čase zatížení stálá, proměnná, případně mimořádná. Do stálých zatížení řadíme vlastní tíhu, předpětí, pevné vybavení, vrstvy vozovky, atd. Z proměnných zatížení mohou působit na lávky zejména zatížení chodci, obslužným vozidlem, sněhem, větrem a teplotou. Mimořádná zatížení nebyla uvažována vůbec.

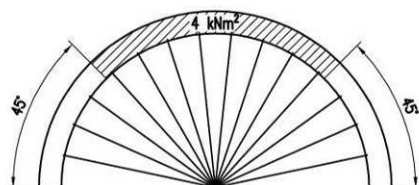
K01 – VLASTNÍ TÍHA A PŘEDPĚTÍ



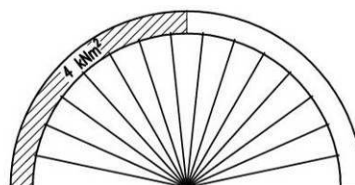
K02 – VLASTNÍ TÍHA, PŘEDPĚTÍ A ZATÍŽENÍ CHODCI



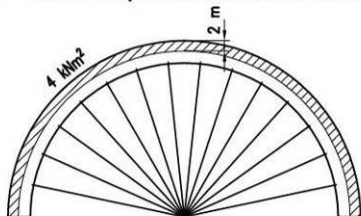
K03 – VLASTNÍ TÍHA, PŘEDPĚTÍ A ZATÍŽENÍ CHODCI



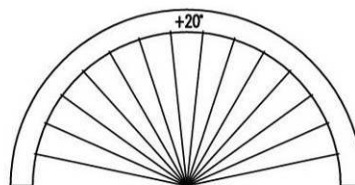
K04 – VLASTNÍ TÍHA, PŘEDPĚTÍ A ZATÍŽENÍ CHODCI



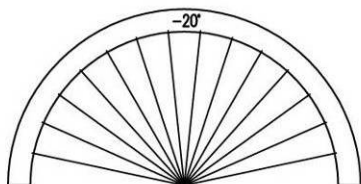
K05 – VLASTNÍ TÍHA, PŘEDPĚTÍ A ZATÍŽENÍ CHODCI



K06 – VLASTNÍ TÍHA, PŘEDPĚTÍ A ROVNOMĚRNÁ ZMĚNA TEPLoty



K07 – VLASTNÍ TÍHA, PŘEDPĚTÍ A ROVNOMĚRNÁ ZMĚNA TEPLoty



Obr. 5.8 Uvažované kombinace na konstrukci

Dle v současné době platné normy [12] se kombinace zatížení tvoří součtem stálých složek, předpětí a proměnných zatížení, které se násobí součinitelem kombinace. Ve starší normě [8] byla situace velmi podobná. Cílem studie není sestavování kombinací dle norem EC, ale získání a popsání odezvy od rozhodujících stavů proměnných zatížení. S ohledem

na budoucí porovnání experimentálního modelu ve zkušebně s výsledky studie nebyla některá proměnná zatížení uvažována. Jde zejména o zatížení větrem, zatížení obslužným vozidlem a sněhem, která nelze ve zkušebně vyvodit. Zůstalo tak jen proměnné zatížení chodci, které bylo vypočteno podle článku 5.3.2.1 v [12] pro zatěžovací délku 30 m hodnotou $4,0 \text{ kN/m}^2$. Také model zatížení 4 (zatížení davem lidí) nebyl uvažován. Zatížení chodci bylo umístěno do nejnepríznivější polohy a to jak z hlediska podélného ohybového namáhání, tak i kroucení, čímž vznikly 4 zatěžovací stavy (Obr. 5.8). Zatížení teplotou bylo také zahrnuto do analýzy, protože lanové konstrukce jsou citlivé na teplotní změny. S ohledem na konstantní teplotu při budoucích zkouškách modelu ve zkušebně nebyly uvažovány v kombinaci s proměnným zatížením chodci, ale jako samostatné zatěžovací stavy: oteplení a ochlazení celé konstrukce o $+20$ a -20°C .

Popisovaná studie se chová nelineárně a neplatí zde princip superpozice, tudíž pro získání účinků od rozhodujících stavů proměnných zatížení je nutno provést nejdříve jeho kombinaci se stálým zatížením, které se následně po nelineárním výpočtu odečte. Proto se vytvořilo sedm kombinací (Obr. 5.8), kde v kombinacích K01 až K05 se sčítá vlastní tíha, předpětí a proměnné zatížení chodci v různých polohách, a v kombinacích K06 a K07 je zatížení chodci nahrazeno oteplením a ochlazením celé konstrukce.

5.2.5 Výsledky statické analýzy

Podrobné statické řešení shrnuje příloha A. Dosažené svislé a vodorovné posuny ocelové trubky a svislé posuny a náklon betonové desky mostovky ukazuje Tab. 5.7. Sledovaná místa byla vždy u závěsů a ve středu rozpětí. Mezi hodnotami se vybírala nejvyšší dosažená hodnota (max) a nejnižší dosažená hodnota (min). Nejvyšší hodnoty svislého posunu byly zjištěny u kombinace K04; u trubky $-136,5 \text{ mm}$ a u desky $-222,0 \text{ mm}$. Taktéž hodnoty náklonu dosahovaly pro tuto kombinaci hodnoty $-83,7 \text{ m}$ (konzolový okraj poklesl).

Tab. 5.7 Svislé posuny mostovky pro uvažované kombinace zatížení

Kombinace				K01	K02	K03	K04	K05	K06	K07
Trubka	ux	min	[mm]	-10.1	-10.9	-11.7	-15.5	-9.0	-0.3	-21.3
		max	[mm]	-0.8	1.2	0.0	3.8	0.5	1.1	-1.3
	uz	min	[mm]	-0.6	-119.8	-131.4	-136.5	-61.9	-4.4	-4.6
		max	[mm]	0.6	-24.4	-1.5	18.6	-12.9	3.9	5.5
Deska	uz	min	[mm]	-2.7	-199.9	-210.5	-222.0	-130.4	-5.5	-4.3
		max	[mm]	4.2	-24.3	-0.5	30.0	-12.7	12.7	9.0
	náklon	min	[mm]	-3.2	-78.7	-77.5	-83.7	-68.2	-3.9	-2.6
		max	[mm]	3.7	-27.9	-4.2	9.8	-25.2	7.7	2.3

Betonová deska mostovky je v podélném směru uvažovaná jako předpjatá. V desce se ukázalo největší tahové namáhání v podélném směru (napětí S_y) v místě vetknutí

a v místech zavěšení mostovky. Tahové namáhání nabývá hodnot blízkých 5 MPa. Pro K01 (pouze vlastní tíha a předpětí) by byla celá mostovka tlačená, což by splnilo požadavek tlakové rezervy pomocí předpínacích lan vedených pod mostovkovou deskou. V příčném směru je deska uvažována jako železobetonová. Vzniká zde tahové namáhání cca 4 MPa dimenzovatelné betonářskou výztuží.

V ocelové trubce jsou napětí v rozmezí -140 až 140 MPa ve všech směrech. Trubka z oceli pevnostní třídy S235 tedy vyhovuje.

Plech zábradlí je bezesporu nejnamáhanější částí konstrukce. Ohybové namáhání je způsobeno jednak předpínacím kabelem vedeným v zábradlí, jednak také vodorovnou složkou závěsu. Napětí se ještě znásobí vlivem proměnných zatížení. Snížení namáhání v zábradlí lze provést například zvětšením rozměrů plechů, nahrazením plechů na ohyb tužším profilem, posunutím bodu zavěšení níže, zvýšením hodnoty předpětí v kabelu v zábradlí nebo přesunutím bodu zavěšení na vršek ocelové trubky.

Závěsy jsou namáhány napětím o maximální hodnotě 781 MPa, což je akceptovatelné i z hlediska únavy.

Předpínací kabely z hlediska napjatosti vyhovují. Uvažované konstantní napětí po celé délce bude nutno s ohledem na možné ztráty v deviátorech tvořených příčníky v dalších výpočtech opravit. Aby zůstalo napětí zhruba konstantní, musel by se udělat tzv. řízený pokluz kabelu, který způsobí, že síla v předpínacím kabelu bude v určitých mezích konstantní.

Stojiny příčníku tvaru T mají od všech sledovaných kombinací srovnávací napětí díky sprázení desky s ocelovou trubkou minimální.

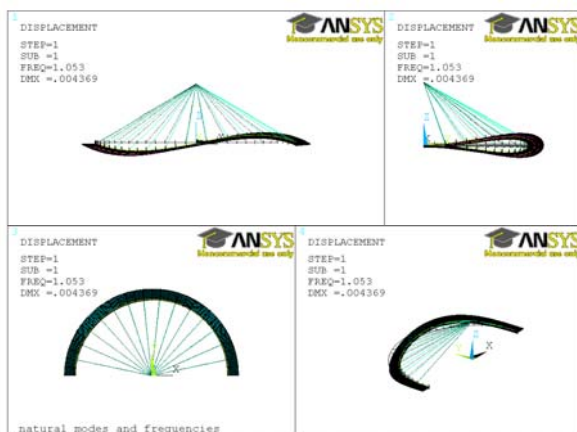
5.3 Dynamická analýza

5.3.1 Vlastní tvary konstrukce

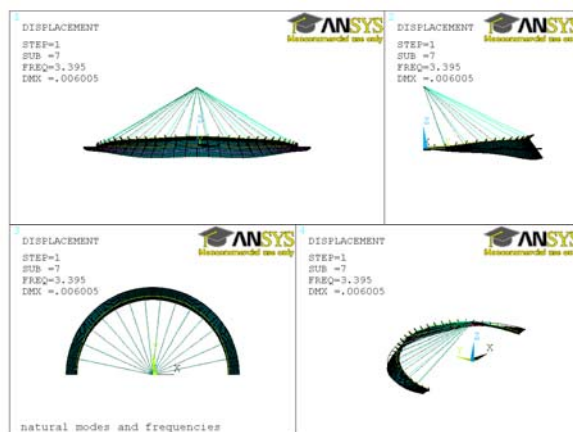
Výpočet vlastních tvarů konstrukce byl proveden postupem popsáním v kapitole 3.2.1. Pro zajímavost byla dynamická odezva stanovena dvojím způsobem: nejdříve jako modální analýza s předepnutím a později jako modální analýza s vlivem předepnutí a velkých posunů.

Výsledky frekvencí se liší až na třetím desetinném místě. Je to způsobeno tím, že se vychází z výchozího stavu, který dosahuje minimálních svislých a vodorovných posunů. Pokud je konstrukce zavěšené lávky ve výchozím tvaru, postačí provést první, jednodušší, výpočet modální analýzy.

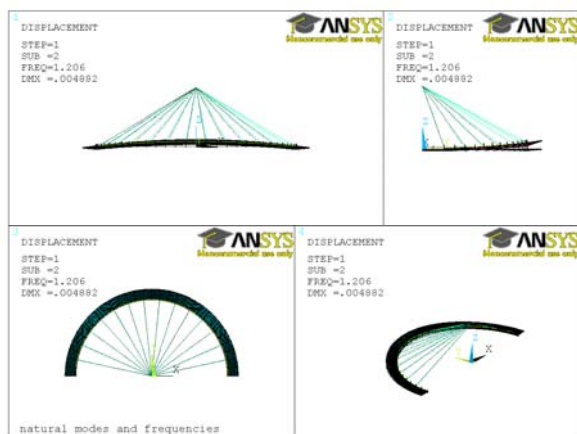
První ohybová frekvence (Obr. 5.9) dosahuje hodnoty $f_{V(1)} = 1,05 \text{ Hz}$ a jde o tvar ohybový vertikální. První ohybový vodorovný tvar je až osmý o frekvenci $f_{H(8)} = 3,81 \text{ Hz}$ (Obr. 5.12). Nelze vůbec mluvit o rezonanci svislého a vodorovného kmitání ve smyslu kapitoly 3.2.1, protože vodorovný ohybový tvar následuje daleko za prvním svislým tvarem.



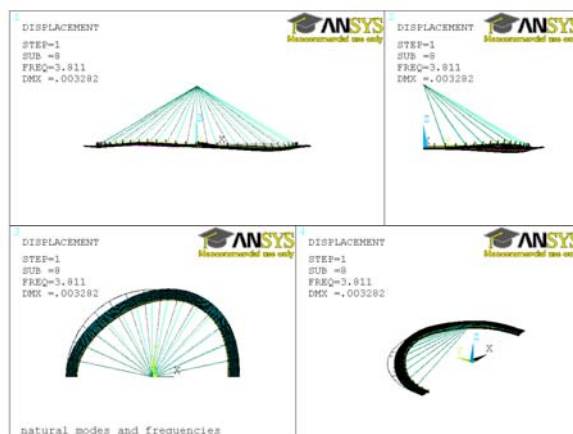
Obr. 5.9 První svislý ohybový tvar



Obr. 5.10 První torzní tvar



Obr. 5.11 Druhý svislý ohybový tvar



Obr. 5.12 První vodorovný ohybový tvar

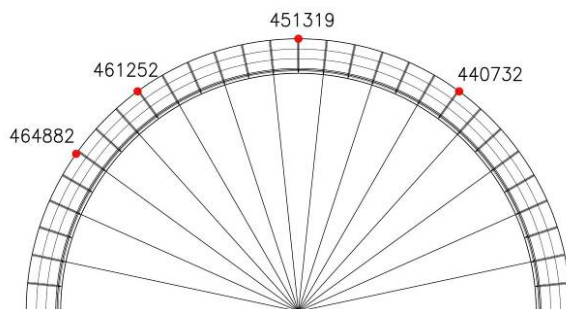
První torzní tvar (Obr. 5.10) je sedmý s frekvencí $f_{T(7)} = 3,40 \text{ Hz}$ a jemu odpovídá svislý ohybový tvar druhý s frekvencí $f_{V(2)} = 1,09 \text{ Hz}$ (Obr. 5.11). Jejich poměr má hodnotu 3,12, což je větší než dovolená hodnota 2,50, takže nedojde ke kmitání vlivem bočního větru (*Phenomen of Flutter* viz kapitola 3.2.1).

5.3.2 Harmonická analýza

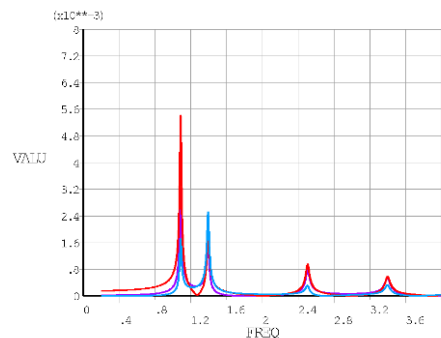
Vzhledem k nízko položeným vlastním frekvencím by mohla být konstrukce citlivá na lidskou chůzi, proto je doporučeno spočítat a vyhodnotit i harmonickou analýzu.

Sledované uzly jsou na Obr. 5.13. Jak je uvedeno v kapitole 3.2.2 srovnáváme maximální dosaženou rychlost s hodnotou doporučenou, stejně tak i dosažené zrychlení s hodnotou maximální.

Ve studii je maximální rychlost $0,037 \text{ ms}^{-1}$, což je výše než doporučená hodnota $0,024 \text{ ms}^{-1}$. U limitního zrychlení byla hodnota dodržena. Nejvyšší hodnota zrychlení byla $0,252 \text{ ms}^{-2}$, což splňuje doporučení $0,513 \text{ ms}^{-2}$.



Obr. 5.13 Poloha sledovaných a budících uzlů



Obr. 5.14 Ustálená odezva uzlu 451319

Pulsující síla v uzlu 464882			
$f = 1.392$ Hz	(budící frekvence ve špičce odezvy)		
$u_{\text{peak}} = 0.00251$ m	(max. vert. posunutí ve špičce odezvy)		
$F = 180 \sin 8.746194 t$ [N]	(pulsující síla)		
$u = 0.00251 \sin 8.746194 t$ [m]	(vert. posunutí)		
$\phi = -86.5224^\circ$	(fázový úhel)		
$v_{\text{max}} = 0.022$ m/s	(maximální rychlost)		
$a_{\text{max}} = -0.192$ m/s ²	(maximální akcelerace)		
Procentuální vyjádření podmínky			
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 37.50\%$	$a_{\text{max}} = 0.192$ m/s ²	OK	$a_{\text{lim}} = 0.513$ m/s ²

Pulsující síla v uzlu 451319			
$f = 1.086$ Hz	(budící frekvence ve špičce odezvy)		
$u_{\text{peak}} = 0.00542$ m	(max. vert. posunutí ve špičce odezvy)		
$F = 180 \sin 6.823539 t$ [N]	(pulsující síla)		
$u = 0.00542 \sin 6.823539 t$ [m]	(vert. posunutí)		
$\phi = 94.4110^\circ$	(fázový úhel)		
$v_{\text{max}} = 0.037$ m/s	(maximální rychlost)		
$a_{\text{max}} = -0.252$ m/s ²	(maximální akcelerace)		
Procentuální vyjádření podmínky			
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 49.21\%$	$a_{\text{max}} = 0.252$ m/s ²	OK	$a_{\text{lim}} = 0.513$ m/s ²

Pulsující síla v uzlu 440732			
$f = 1.087$ Hz	(budící frekvence ve špičce odezvy)		
$u_{\text{peak}} = 0.00320$ m	(max. vert. posunutí ve špičce odezvy)		
$F = 180 \sin 6.829822 t$ [N]	(pulsující síla)		
$u = 0.00320 \sin 6.829822 t$ [m]	(vert. posunutí)		
$\phi = 85.2989^\circ$	(fázový úhel)		
$v_{\text{max}} = 0.022$ m/s	(maximální rychlost)		
$a_{\text{max}} = -0.149$ m/s ²	(maximální akcelerace)		
Procentuální vyjádření podmínky			
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 29.14\%$	$a_{\text{max}} = 0.149$ m/s ²	OK	$a_{\text{lim}} = 0.513$ m/s ²

Pulsující síla v uzlu 461252			
$f = 1.087$ Hz	(budící frekvence ve špičce odezvy)		
$u_{\text{peak}} = 0.00321$ m	(max. vert. posunutí ve špičce odezvy)		
$F = 180 \sin 6.829822 t$ [N]	(pulsující síla)		
$u = 0.00321 \sin 6.829822 t$ [m]	(vert. posunutí)		
$\phi = 85.3049^\circ$	(fázový úhel)		
$v_{\text{max}} = 0.022$ m/s	(maximální rychlost)		
$a_{\text{max}} = -0.150$ m/s ²	(maximální akcelerace)		
Procentuální vyjádření podmínky			
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 29.15\%$	$a_{\text{max}} = 0.150$ m/s ²	OK	$a_{\text{lim}} = 0.513$ m/s ²

Obr. 5.15 Harmonická odezva uzlu 451319

6. Studie půdorysně zakřivené visuté konstrukce

Visuté půdorysně zakřivené lávky jsou v současné době hojně využívány. Snahou tedy bude návrh visuté konstrukce, který potom bude srovnán s konstrukčně jednodušší zavěšenou variantou. Základní rozměry, jako rozpětí, poloměr mostovky a výška pylonu zůstanou stejné.

Nejdůležitější částí celého návrhu je podrobné řešení nalezení výchozího tvaru konstrukce a použití podmínek rovnováhy v průřezu pro zjištění polohy bodu zavěšení a polohy a počtu předpínacích kabelů. Nakonec se provede, podobně jako u půdorysně zakřivené zavěšené konstrukce, statická a dynamická analýza.

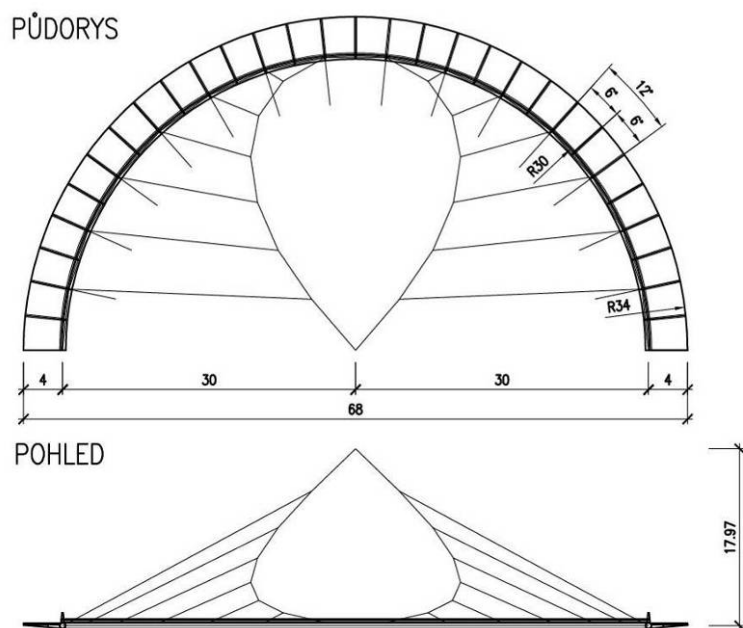
Při řešení se bude vycházet z poznatků, které byly zjištěny v předchozí kapitole:

- Podmínku rovnováhy dle rovnice (4.8) v příčném směru postačí provést v místech závěsů okolo poloviny rozpětí.
- Z hlediska provádění je výhodné použití stejné výškové úrovně bodu zavěšení pro všechny závěsy.
- Pro snížení ohybového namáhání zábradlí přesunutí bodu zavěšení na vrchol ocelové trubky.

6.1 Popis konstrukce

6.1.1 Půdorys a pohled

Jedná se o konstrukci lávky, která je tvořena zakřiveným betonovým pásem vyztuženým ocelovou trubicí osazenou na jeho vnitřní hraně.

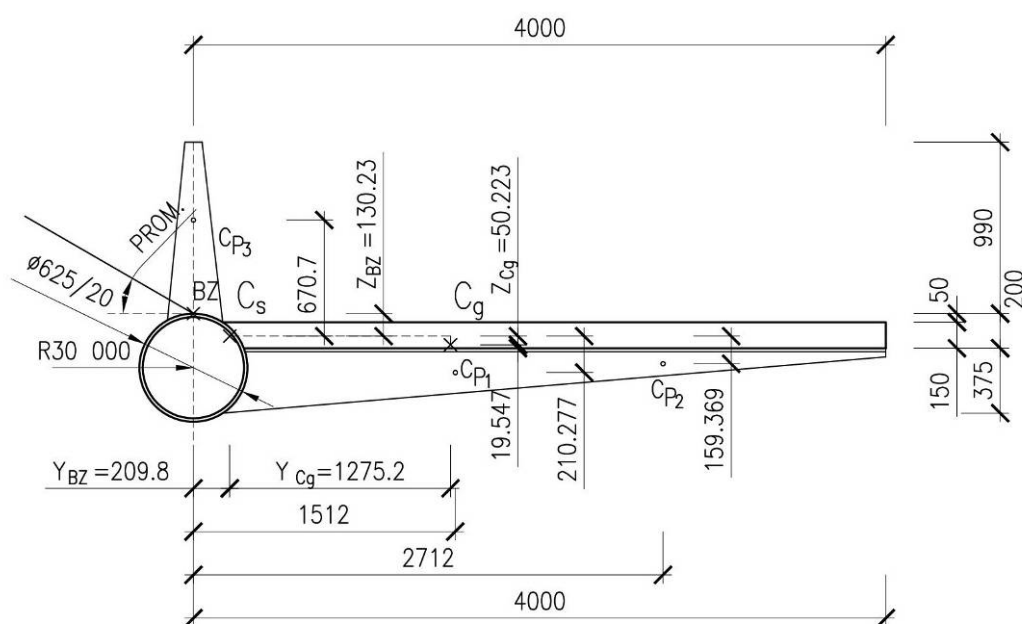


Obr. 6.1 Schematický půdorys a pohled studie visuté konstrukce

Základní geometrie je převzata ze studie zavěšené varianty. Lávka o rozpětí 60 m je situována v půdorysném oblouku s osou o poloměru 32 m vyplňující úhel přesně 180°. Betonový pás a ocelová trubka jsou vetknuty do opěr. Předpětí je vedeno jednak v zábradlí a jednak pod mostovkou ve výztužných příčnicích. Lávka je na 14-ti závěsech zavěšena na visutém laně kotveném v pylonu, který je umístěn ve středu půdorysného oblouku. Výška pylonu je odvozena od zavěšené varianty tak, že svislá vzdálenost od bodu zavěšení k vrcholu pylonu je stejná jako u zavěšené varianty.

6.1.2 Příčný řez

V příčném směru je zvolena opět kombinace ocelové trubky a betonové desky jako v předcházející zavěšené variantě. Je počítáno s tím, že betonová deska bude spřažena s ocelovou trubicí. Všechny prvky příčného řezu mají stejnou dimenzi a materiály, pouze bod zavěšení byl z důvodu snížení ohybového namáhání zábradlí posunut do vrcholu ocelové trubky, jak je naznačeno na Obr. 6.2. V zábradlí je ponechán předpínací kabel v takové výšce, aby byla splněna rovnice (4.8).



Obr. 6.2 *Příčný řez visutou konstrukcí*

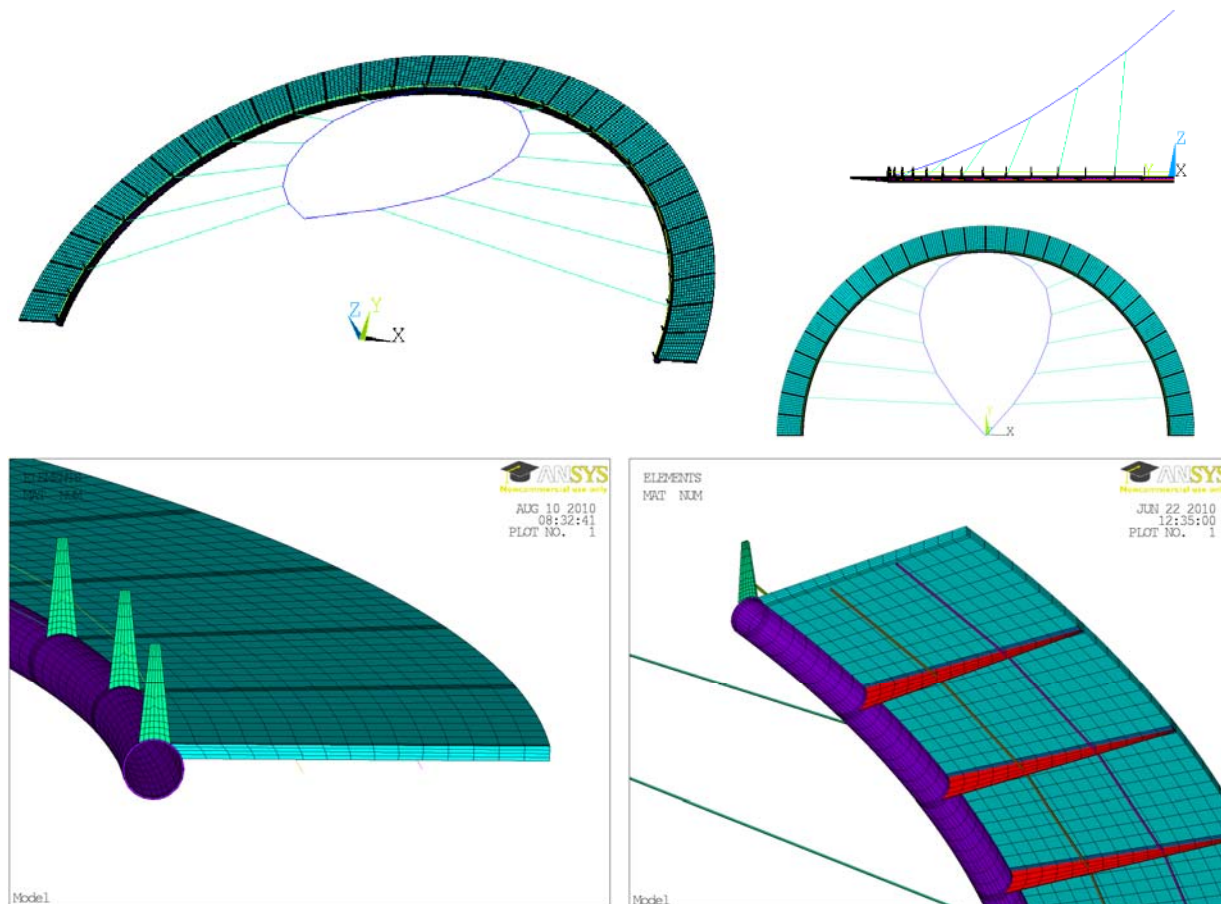
6.2 Statická analýza

6.2.1 Výpočtový model

Výpočtový model visuté konstrukce je vytvořen v programu ANSYS. Pro modelování byly využity stejné prvky jako u zavěšené varianty.

Pylon byl z analýzy vynechán a je zastoupen pouze neposuvnou podporou ve všech třech směrech. Mostovka je na svých okrajích vetknuta.

Celý výpočet je proveden jako nelineární s vlivem geometrického zpevnění (stress stiffening) a zahrnutím velkých posunů (large deflection).



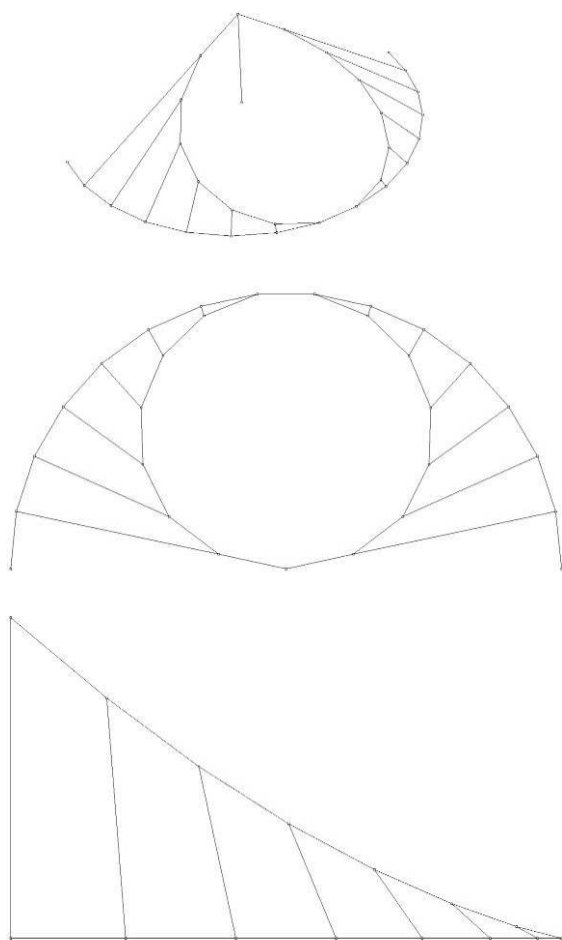
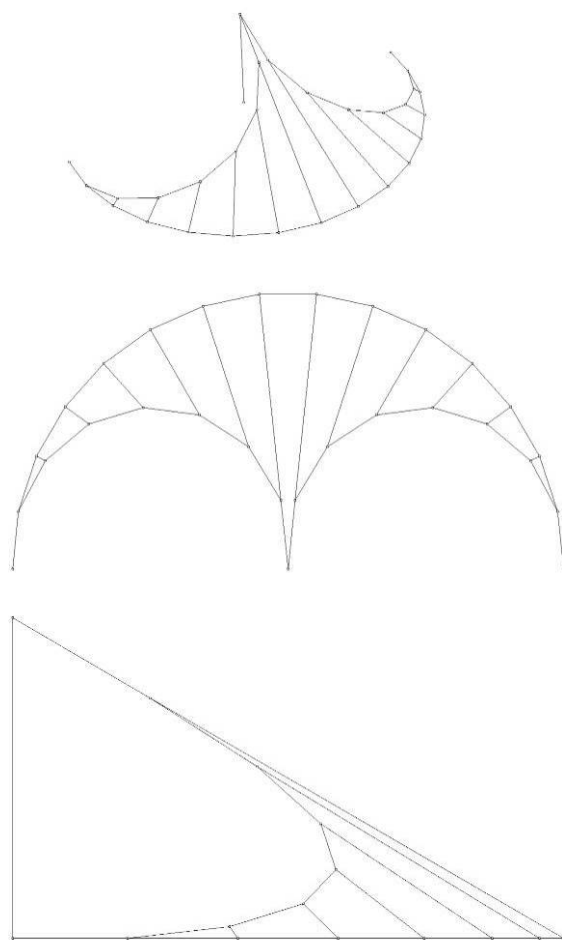
Obr. 6.3 Prostorový model v programu ANSYS

6.2.2 Hledání výchozího tvaru

Z hlediska vedení visutého lana, se dá rozhodovat mezi dvěma konstrukcemi: vnější a vnitřní, jak je ukázáno na Obr. 6.4 a Obr. 6.5. U studie visuté konstrukce bylo rozhodnuto o vnitřní variantě, která je zkoušena vůbec poprvé.

U zavěšené konstrukce se v prvním kroku hledala poloha bodu zavěšení a poloha a počet předpínacích kabelů. Díky zvolenému úhlu závěsu a zvolené poloze a počtu předpínacích kabelů se dopočítala pomocí rovnice (4.8) poloha bodu zavěšení. Geometrie závěsů a mostovky tím byla jasně definována.

U visuté konstrukce je situace o poznání složitější. Na počátku je známa pouze geometrie mostovky a půdorysná místa, odkud z mostovky povedou závěsy. Vnitřní varianta geometrie závěsů a visutého lana (Obr. 6.4) určuje pouze přibližnou polohu styku závěsu s visutým lanem.

**Obr. 6.4** *Varianta s vnitřním visutým lanem***Obr. 6.5** *Varianta s vnějším visutým lanem*

Výpočet výchozího tvaru půdorysně zakřivených visutých konstrukcí lze rozdělit na více kroků:

Prvním krokem při výpočtu bude najít předběžnou výchozí polohu visutého lana. Za výchozí je považován takový stav deformace a jemu odpovídající stav napjatosti konstrukce, který dává rovnováhu celému systému v požadované geometrii od vlastní tíhy a předpětí.

V dizertační práci [26] je popsána metoda nalezení výchozího tvaru pro přímou mostovku a zakřivený visutý kabel. Vzhledem k půdorysnému zakřivení mostovky studie nelze popsáný postup použít. Důležitou myšlenkou však je, že se výpočet vodorovného a svislého směru může rozdělit a řešit tak naprosto odděleně. Předběžný výchozí tvar je hledán iteračním postupem a lze jej rozdělit na **výpočet směru svislého a vodorovného**.

Druhý krok zahrnuje hledání polohy bodu zavěšení a hledání polohy a počtu předpínacích kabelů pomocí **rovnováhy v příčném směru**. Sklony závěsů se nevolí jako u předchozí zavěšené varianty, ale jsou vypočítány z předběžného výchozího tvaru.

Třetí poslední krok sladí oba kroky tak, aby svislý posun konstrukce byl minimální.

Výpočet svislého směru

Cílem je určit z -tovou, čili svislou, souřadnici bodů visutého lana. Postup výpočtu je zahájen rozvinutím mostovky v úrovni bodů zavěšení. V každém bodě zavěšení je známá síla G_i , což je vlastní tíha části mostovky, která připadá na i -tý závěs. Řešení visutého kabelu v podélném řezu lze poté převést na řešení rovinného, dokonale ohebného, lana o jednom poli. Výška pylonu nad bodem zavěšení byla převzata z předchozí zavěšené varianty. Metoda byla již několikrát popsána v [17], [26] nebo [32] a bylo na ni autorem dizertační práce vytvořeno uživatelské makro v MS Excel. Makro bere v úvahu i vlastní tíhu lana a vypočítá přímo neznámé z -tové souřadnice lana, počáteční přetvoření a předpokládanou sílu v laně (viz Tab. 6.1).

Tab. 6.1 Analýza svislého směru visutého lana

číslo uzlu	souřadnice X	zatížení			moment prost. nos.	souřadnice Z	tečna $\text{tg}\alpha$	Lano síla	přetvoření
[-]	[m]	mostovka $G_{i,\text{mostovka}}$	lano $G_{i,\text{lano}}$	celkem G_i	M_i	[m]	[-]	$N_{i,\text{lano}}$	$\varepsilon_{i,\text{lano}}$
		[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]			[kN]	[m/m]
1	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000			
2	6.2832	78.18	0.89	79.06	5350.08	-4.2038	-0.66906	1531.25	0.004363
3	12.5664	140.05	0.89	140.94	10203.38	-8.0173	-0.60694	1488.73	0.004241
4	18.8496	127.49	0.89	128.38	14171.14	-11.1350	-0.49619	1420.72	0.004048
5	25.1327	126.69	0.89	127.58	17332.28	-13.6189	-0.39532	1368.50	0.003899
6	31.4159	125.01	0.89	125.90	19691.83	-15.4729	-0.29508	1326.91	0.003780
7	37.6991	124.15	0.89	125.04	21260.33	-16.7054	-0.19615	1296.92	0.003695
8	43.9823	123.71	0.89	124.60	22043.21	-17.3205	-0.09790	1278.75	0.003643
9	50.2655	123.71	0.89	124.60	22043.20	-17.3205	0.00000	1272.67	0.003626
10	56.5487	124.15	0.89	125.04	21260.33	-16.7054	0.09790	1278.75	0.003643
11	62.8319	125.01	0.89	125.90	19691.83	-15.4729	0.19615	1296.92	0.003695
12	69.1150	126.69	0.89	127.58	17332.28	-13.6189	0.29508	1326.91	0.003780
13	75.3982	127.49	0.89	128.38	14171.14	-11.1350	0.39532	1368.50	0.003899
14	81.6814	140.05	0.89	140.94	10203.37	-8.0173	0.49619	1420.72	0.004048
15	87.9646	78.18	0.89	79.06	5350.07	-4.2038	0.60694	1488.73	0.004241
16	94.2478	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.66906	1531.25	0.004363

Výpočet vodorovného směru

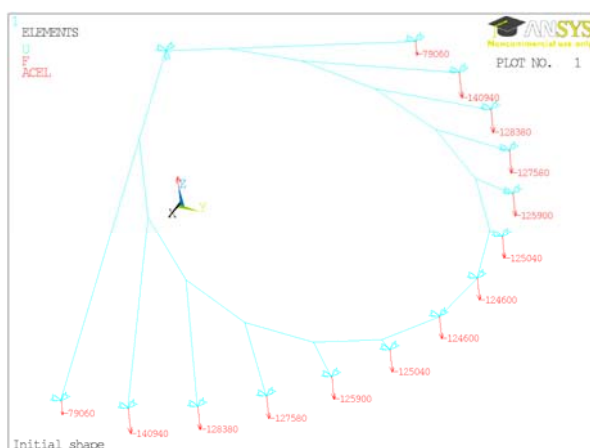
Výpočet vodorovného směru je daleko složitější. Nepodařilo se najít přesné analytické řešení úlohy, proto bylo využito programu ANSYS a řešení se provedlo iteračně.

Vlastní výpočtový model je díky prostorovým prvkům poměrně obsáhlý a díky dlouhému výpočtovému času nevhodný pro iterační řešení. Proto byl model zjednodušen tak, aby se skládal pouze z visutého lana a závěsů (Obr. 6.6). Konce závěsů na straně mostovky jsou podepřeny pouze ve vodorovném směru a je na ně vloženo zatížení, které připadá na každý závěs a odpovídá tíze G_i (Tab. 6.1).

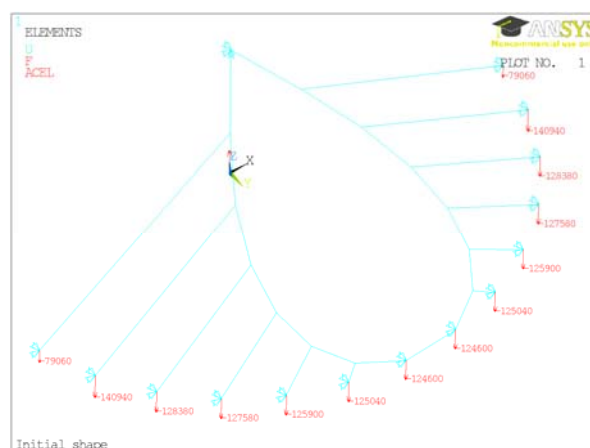
Vstupní geometrii visutého lana tvořil polygon ležící na povrchu kužele s vrcholem v hlavě pylonu a s podstavou danou body zavěšení, přičemž svislé pořadnice byly převzaty z řešení svislého směru pro každý závěs.

Přetvoření lana bylo převzato z Tab. 6.1 a přetvoření závěsů se vypočetlo pomocí rovnice (4.7). Sklon závěsů je pro vstupní geometrii $\alpha = 30^\circ$ stejně jako u zavěšené varianty.

Původní předpoklad, že vstupní geometrie odpovídá výchozímu tvaru, se ukázal jako mylný. Při spuštění výpočtu byla zjištěna deformace v řádu metrů. Pro další analýzu byla vstupní geometrie uvažována jako první krok iterace. Při každém dalším kroku iterace byla zároveň opravována geometrie visutého lana o jeho posunutí – pouze ve směrech x a y, a dále přetvoření lana a závěsů na základě jejich normálové síly. Počet iteračních kroků byl v desítkách, než se visuté lano ustálilo v poloze na Obr. 6.7. Za předběžný výchozí tvar pak byl prohlášen výsledek iterace, který dosáhl nejmenšího svislého posunutí uzlů visutého lana (maximální svislý posun do 1,0 mm).



Obr. 6.6 Jednoduchý model pro iteraci vodorovného tvaru visutého lana



Obr. 6.7 Dokončený vyiterovaný tvar visutého lana

6.2.3 Ověření polohy visutého lana na dřevěném modelu

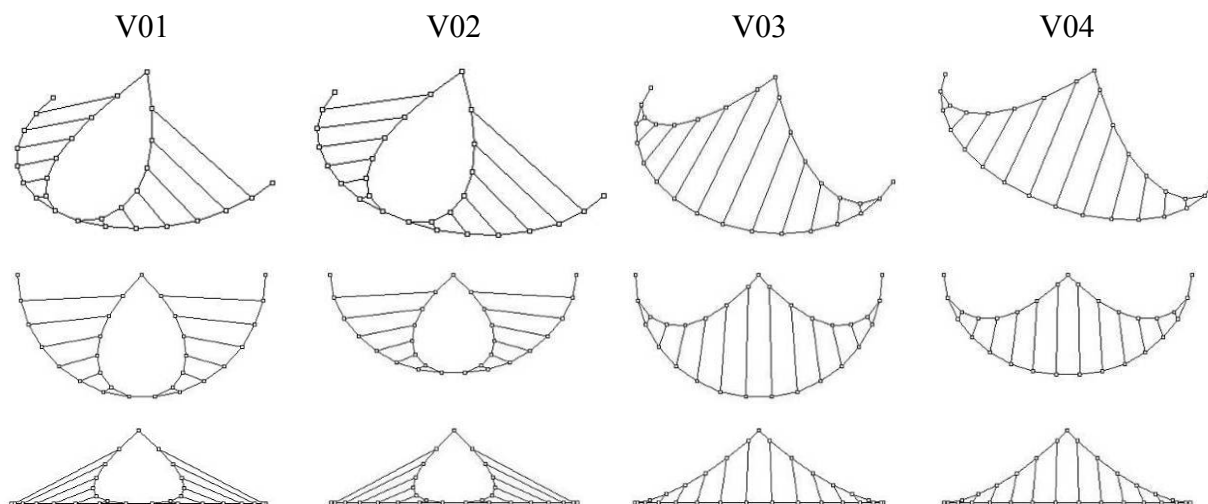
Pro bližší pochopení a ověření postupu nalezení výchozího tvaru konstrukce byly vyrobeny dva dřevěné modely v měřítku 1:100. Každý model byl sestaven z pylonu tvaru A výšky 173 mm, z mostovky s otvory představujícími body zavěšení, ze závěsů a visutého lana, které byly tvořeny tenkým textilním lankem, a z plechovek naplněných pískem, které tvořily náhradu vlastní tíhy mostovky G. Pro jednoduchost byla uvažována stejná vlastní tíha G pro všechny závěsy.

Byly zhotoveny dvě varianty každého modelu lišící se křivkou mostovky (půlkružnice nebo půlelipse) a tvarem visutého lana (varianta vnitřní nebo vnější viz Obr. 6.4 nebo Obr. 6.5):

- V01 – půlkružnice vnitřní (poloměr kružnice je $r = 300$ mm),
- V02 – půlelipse vnitřní (parametry elipsy jsou $a = 300$ mm, $b = 240$ mm),
- V03 – půlkružnice vnější,
- V04 – půlelipse vnější.

Důvod použití jiné křivky mostovky bude zdůvodněn v kapitole 6.2.5.

Každá varianta prošla iteračním postupem popsaným v předchozí kapitole pomocí programu ANSYS. Pro varianty visutého lana ve variantě vnější je postup výpočtu naprosto stejný.



Obr. 6.8 Vybrané varianty pro výrobu dřevěného modelu

Z výsledků iteračního postupu byly sestaveny prostorové modely v programu RHINOCEROS (Obr. 6.8), ze kterých se zjistila délka jednotlivých částí polygonu visutého lana a délka závěsů (Tab. 6.2). Na visutém laně se vytvořily značky vymezující jednotlivé části polygonu, na které se navázaly závěsy tak, aby neumožnily posunutí při zatížení (tzv. Prusíkův uzel).

Tab. 6.2 Délky polygonu visutého lana a závěsů

Varianta úseky visutého lana	V01 [mm]	V02 [mm]	V03 [mm]	V04 [mm]
L01*	81.1	74.6	62.7	56.4
L02	71.3	64.3	50.7	48.6
L03	61.7	54.2	46.3	45.8
L04	53.1	45.3	50.3	49.9
L05	46.8	39.1	59.0	57.3
L06	45.0	38.1	69.7	66.2
L07	49.9	44.1	81.2	75.7
L08	62.7	56.5	46.4	42.7
Celková délka	880.4	775.9	932.4	885.3

Varianta závěsy	V01 [mm]	V02 [mm]	V03 [mm]	V04 [mm]
Z01**	279.7	278.9	23.1	20.1
Z02	216.0	213.1	61.3	52.3
Z03	156.6	151.8	111.1	93.8
Z04	103.1	97.7	170.1	143.0
Z05	57.6	52.9	236.0	199.1
Z06	22.2	19.6	307.3	261.2
Z07	0.0	0.0	346.4	296.0
Celková délka	1670.7	1627.7	2510.7	2131.0

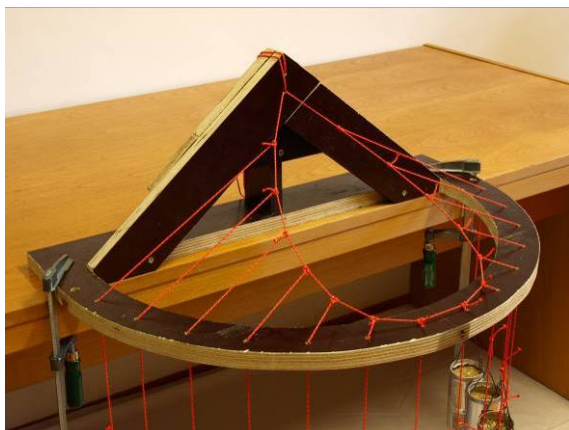
* L01 je první úsek od vrcholu pylonu (úseky jsou symetrické)

Pozn. úseky visutého lana jsou symetrické vůči středu mostovky

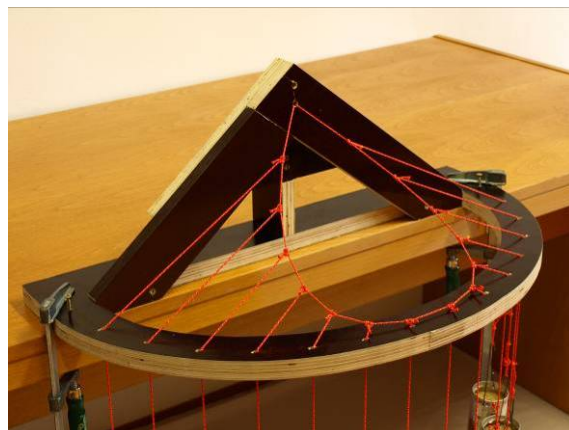
** Z01 je závěs u začátku mostovky

Pozn. závěsy jsou symetrické vůči středu mostovky

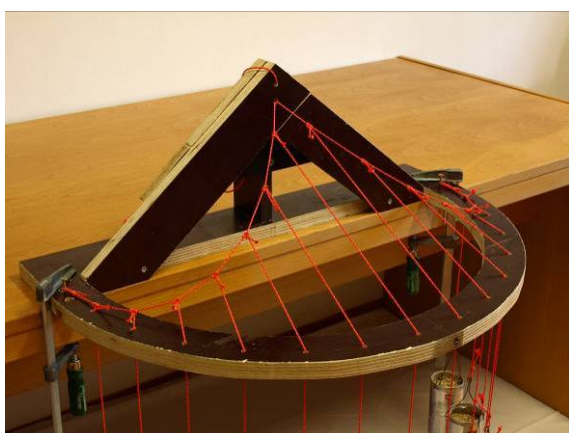
Fotografie na Obr. 6.9 až Obr. 6.14 ukazují, že polygon visutého lana a závěsy se pokaždé ustálily v délkách, které jsou uvedeny v Tab. 6.2. Pokud se nějaký uzel styku závěsu a visutého lana posune, ať směrem nahoru nebo dolů, je geometrie visutého lana tvarově narušena.



Obr. 6.9 *Varianta kružnice vnitřní*



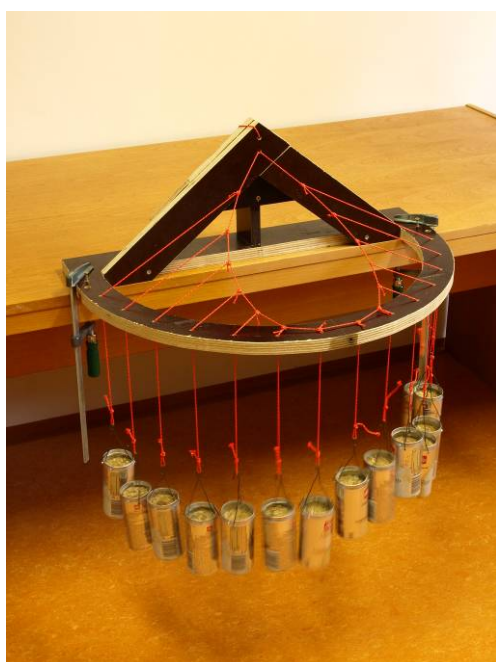
Obr. 6.10 *Varianta elipsa vnitřní*



Obr. 6.11 *Varianta kružnice vnější*



Obr. 6.12 *Varianta elipsa vnější*



Obr. 6.13 *Ukázka modelu se závaží*



Obr. 6.14 *Pohled na model z boku*

Dřevěné modely prokázaly správnost postupu návrhu nalezení výchozího tvaru visutého lana se závěsy.

6.2.4 Rovnováha v příčném směru

Dosažený předběžný výchozí tvar umožňuje zjistit sklony všech závěsů a dokončit hledání polohy předpínacího kabelu v zábradlí. Závěsy vedené z visutého lana z předběžného tvaru už ovšem nesměřují všechny do pomyslného vrcholu pylonu, což je vidět na Obr. 6.1, kde na půdorysu konstrukce jsou vyznačené radiály, které se nekryjí s půdorysným průmětem závěsů. To má za následek vznik nejen vodorovné složky H_i , ale i tečné složky od závěsu T_i , která způsobí další namáhání mostovky.

V závěsech působí síly N_i , které se rozkládají do 3 složek: dvou vodorovných H_i a T_i a jedné svislé V_i . Všechny složky jsou vidět na Obr. 6.15, kde je tlustě plně křivka mostovky a závěs, čárkovanou čarou tečna k mostovce v bodě mostovky M_i a čerchovanou čarou kolmice k tečně mostovky. Kromě velikosti sil jsou také důležité úhly φ_i , α_i a γ_i :

$$\operatorname{tg}(\varphi_i) = \frac{\Delta x_i \cdot \cos(\delta_i) - \Delta y_i \cdot \sin(\delta_i)}{\Delta x_i \cdot \sin(\delta_i) + \Delta y_i \cdot \cos(\delta_i)} \quad (6.1)$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_i) = \frac{\Delta z_i}{\Delta x_i \cdot \sin(\delta_i) + \Delta y_i \cdot \cos(\delta_i)} \quad (6.2)$$

$$\operatorname{tg}(\gamma_i) = \frac{\Delta z_i}{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}}, \quad (6.3)$$

kde je δ_i úhel tečny ke křivce mostovky (derivace) v i -tém bodě mostovky,

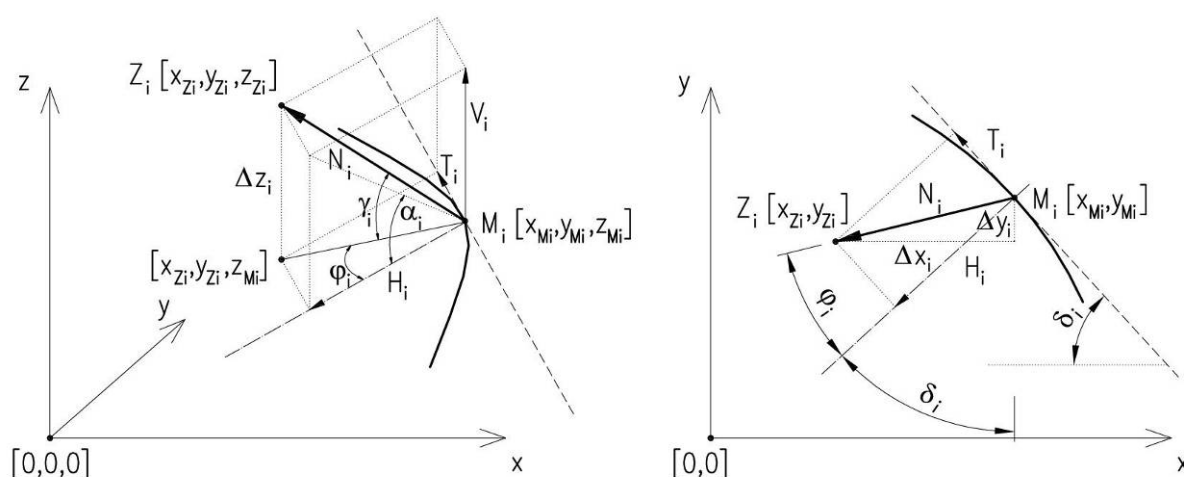
Δx_i rozdíl souřadnic bodu mostovky a vrcholu závěsu $\Delta x_i = x_{Mi} - x_{Zi}$,

Δy_i rozdíl souřadnic bodu mostovky a vrcholu závěsu $\Delta y_i = y_{Mi} - y_{Zi}$,

Δz_i rozdíl souřadnic bodu mostovky a vrcholu závěsu $\Delta z_i = z_{Mi} - z_{Zi}$.

Tab. 6.3 Výpočet důležitých úhlů a všech složek závěsů

číslo závěsu	Δx_i [m]	Δy_i [m]	Δz_i [m]	δ_i [°]	φ_i [°]	α_i [°]	γ_i [°]	H_i [kN]	T_i [kN]	N_i [kN]
1	24.865	1.004	12.990	78.00	9.69	27.90	27.56	149.30	25.48	170.85
2	19.421	2.045	9.279	66.00	17.99	26.55	25.41	282.12	91.61	328.40
3	14.152	2.605	6.186	54.00	25.57	25.48	23.26	269.37	128.89	325.05
4	9.249	2.633	3.712	42.00	32.11	24.50	21.11	279.96	175.68	354.28
5	5.027	2.108	1.856	30.00	37.25	23.16	18.81	294.28	223.77	390.54
6	1.825	1.135	0.619	18.00	40.12	20.64	16.07	331.89	279.67	451.66



Obr. 6.15 Rozklad síly v závěsu – axonometrie (vlevo) a půdorys (vpravo)

Ve sledované konstrukci je křivkou mostovky kružnice a pro každý bod, kde platí rovnost $V_i = G_i$, lze zbývající složky vyjádřit:

$$H_i = \frac{\cos(\varphi_i)}{\operatorname{tg}(\gamma_i)} \cdot G_i = \frac{\Delta x_i \cdot \sin(\delta_i) + \Delta y_i \cdot \cos(\delta_i)}{\Delta z_i} \cdot G_i \quad (6.4)$$

$$T_i = \frac{\sin(\varphi_i)}{\operatorname{tg}(\gamma_i)} \cdot G_i = \frac{\Delta x_i \cdot \cos(\delta_i) - \Delta y_i \cdot \sin(\delta_i)}{\Delta z_i} \cdot G_i \quad (6.5)$$

$$N_i = \frac{l}{\sin(\gamma_i)} \cdot G_i = \frac{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2}}{\Delta z_i} \cdot G_i \quad (6.6)$$

Všechny důležité úhly a složky závěsů jsou uspořádány v Tab. 6.3. Jak bylo naznačeno v úvodní části této kapitoly, návrh dle rovnice (4.8) postačí splnit pouze pro závěs číslo 6, tj. závěs uprostřed rozpětí. Podmínky rovnováhy pro všechny body jsou v Tab. 6.4.

Tab. 6.4 Výpočet polohy předpínacího kabelu v zábradlí

Číslo závěsu	α_i [°]	G_i [kN]	H_i [kN]	M_G [kNm]	Z_{BZ} [m]	M_N [kNm]	Z_{CP3} [m]	M_{P1+2} [kNm]	M_{P3} [kNm]	M_P [kNm]	ΣM_{Cs} [kNm]
1	27.90	79.06	149.30	-100.82	0.1302	2.85	0.6659	-66.19	208.67	142.47	44.50
2	26.55	140.94	282.12	-179.73	0.1302	7.17	0.6659	-66.19	208.67	142.47	-30.09
3	25.48	128.38	269.37	-163.72	0.1302	8.14	0.6659	-66.19	208.67	142.47	-13.10
4	24.50	127.58	279.96	-162.70	0.1302	9.69	0.6659	-66.19	208.67	142.47	-10.54
5	23.16	125.90	294.28	-160.55	0.1302	11.91	0.6659	-66.19	208.67	142.47	-6.18
6	20.64	125.04	331.89	-159.46	0.1302	16.98	0.6659	-66.19	208.67	142.47	0.00
				$Y_{BZ} =$	0.2098 m	$Y_{Cg} =$	1.2752 m				
								$\varnothing =$			
								-2.57			

Bod zavěšení se nachází na vrcholu ocelové trubky a poloha předpínacího kabelu v zábradlí byla vypočtena na hodnotu **0,6659 m**.

Velikost předpínací síly ve všech kabelech byla převzata ze zavěšené varianty a to včetně momentu od předpětí viz Tab. 6.5.

Tab. 6.5 Navržené předpětí pro visutou variantu

Číslo kabelu	Počet lan [ks]	A_{Pi} [m ²]	N_i [kN]	P_i [kN]	Y_{CPi} [m]	Z_{CPi} [m]	M_{Pi} [kNm]	ε_{Pi} [-]
1	4	0.000600	855.00	179.071	1.3032	0.2103	-37.65	0.007307692
2	4	0.000600	855.00	179.071	2.5032	0.1594	-28.54	0.007307692
3	7	0.001050	1496.25	313.374	0.2098	0.6659	208.67	0.007307692
			$\Sigma N_i =$ 3206.25 kN		$\Sigma M_{Pi} =$ 142.47 kNm			
$\sigma_p =$		1425 MPa	$A_{lana} =$		150 mm ²	$E_p =$ 195000 MPa		

6.2.5 Minimalizace tečné složky

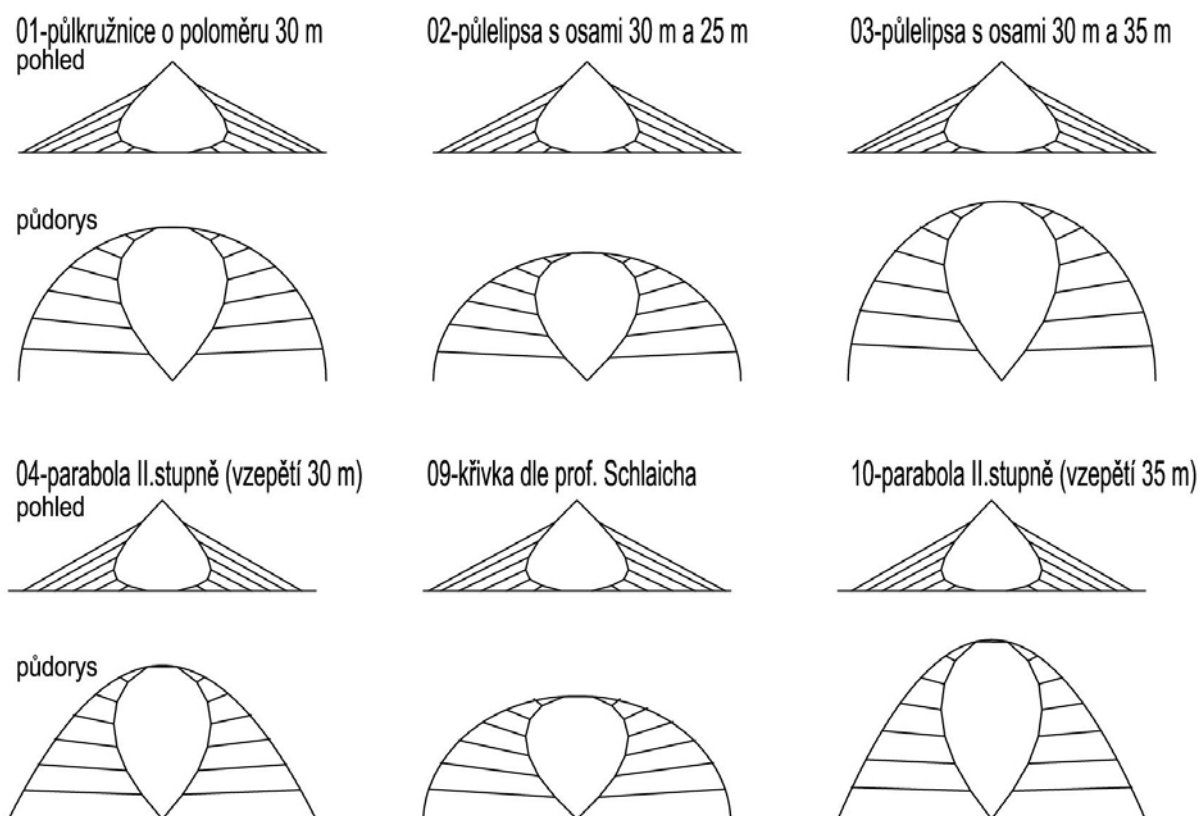
V Tab. 6.3 je vidět velikost tečné složky závěsu T_i , která bude ovlivňovat podélné a příčné namáhání mostovky (momenty M_y a M_z). Podle rovnice (6.5) je velikost tečné složky závislá na vlastní tíze příslušné části mostovky G_i a členu $\sin(\varphi_i)/\tan(\gamma_i)$, tedy přímo úměrná velikosti $\sin(\varphi_i)$ a nepřímo úměrná $\tan(\gamma_i)$. Aby bylo tečné namáhání minimální, musel by být v každém bodě půdorysný průmět závěsu kolmý ke křivce mostovky, jinými slovy úhel φ_i by se musel blížit nule.

V Tab. 6.3 úhel φ_i nabývá hodnot od 9,69 až do 40,12° a úhel γ_i hodnot 27,56 až 16,07°. Úhel φ_i se zvětšuje směrem ke středu rozpětí a úhel γ_i se zmenšuje směrem ke středu, což v obou případech zvětšuje velikost tečné složky T_i směrem ke středu rozpětí.

Ve studované visuté konstrukci byla zvolena jako křivka mostovky kružnice, kde podmínka úhlu φ_i blížíciho se k nule splněna není. Volbou jiné křivky mostovky by bylo možné minimalizovat člen $\sin(\varphi_i)/\tan(\gamma_i)$ a tím i velikost tečné složky. Proto byla provedena analýza tečné složky na vybraných křivkách mostovky za dodržení základní geometrie (myšleno dodržení začátku a konce mostovky a výšky pylonu). Člen G_i byl ponechán pro jednoduchost stejný jako u kružnice, i když tím vzniká drobná chyba. Pro každou křivku byl použit postup hledání výchozího tvaru popsáný v předchozích kapitolách. Mezi zvolené křivky mostovky (některé z nich jsou na Obr. 6.16) patří:

- | | |
|--|---|
| 01. půlkružnice o poloměru 30 m, | 07. parabola V. stupně (vzepětí 30 m), |
| 02. půlelipse s osami 30 m a 25 m, | 08. parabola VI. stupně |
| 03. půlelipse s osami 30 m a 35 m, | (vzepětí 30 m), |
| 04. parabola II. stupně (vzepětí 30 m), | 09. křivka podle prof. Schlaicha |
| 05. parabola III. stupně (vzepětí 30 m), | (podklady viz [32] str. 200), |
| 06. parabola IV. stupně (vzepětí 30 m), | 10. parabola II. stupně (vzepětí 35 m). |

V každé variantě byl v každém ze šesti závěsů vypočten člen $\sin(\varphi_i)/\operatorname{tg}(\gamma_i)$. Člen byl u každého závěsu ještě opraven o součinitel odchylky tíhy G_i od průměru G_i označený jako Δ_i . Součinitel respektuje rozložení tíhy G_i z Tab. 6.4, kde je vidět, že první závěs nese méně (z důvodu vetknutí $\Delta_1 = 0,65$), druhý závěs naopak více ($\Delta_2 = 1,16$) a ostatní se pohybují lehce nad průměrem.



Obr. 6.16 Vybrané varianty půdorysného zakřivení

Ze statického hlediska tečná složka T_i způsobuje u každého závěsu osamělý moment $M_{Y,i}$ a $M_{Z,i}$ na oboustranně vetknutém nosníku s pružnými podporami v místech závěsů. U každého závěsu je hodnota tečné složky T_i jiná, ale vzdálenost působistě tečné složky (bod zavěšení BZ) od těžiště průřezu C_{gi} je pořád stejná. Pro jednodušší vyhodnocení se porovnaly o součinitel Δ_i opravené součty členů $\sin(\varphi_i)/\operatorname{tg}(\gamma_i)$, které jsou přímo úměrné velikosti momentů, případně velikosti tečného namáhání. Čím bude součet členů menší, tím bude vliv tečného namáhání také menší. Z hlediska součtu členů jsou výhodnější paraboly vyšších stupňů s větším vzepětím viz Tab. 6.6. V posledním řádku Tab. 6.6 je spočtena procentuální odchylka od varianty 01. Odchylka, a tím i velikost tečného namáhání, se v jednotlivých variantách významně neliší, vždy je to v řádu procent, proto byla varianta 01, tedy mostovka ve tvaru půlkružnice, ponechána pro další výpočty.

Tab. 6.6 Porovnání součtu členů $\sin(\varphi_i)/\text{tg}(\gamma_i)$ variant pro jednotlivé závěsy

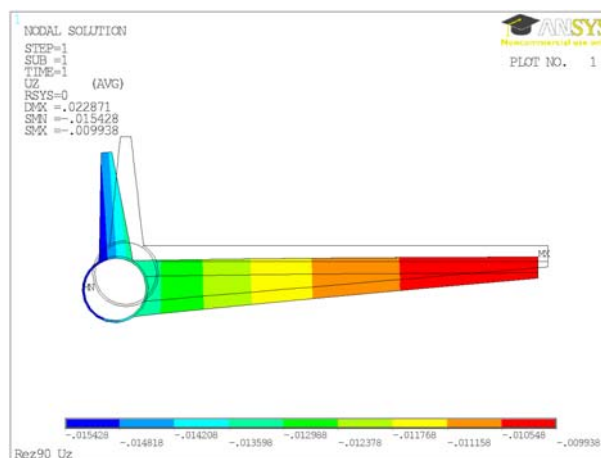
číslo záv.	Δ_i	Varianty									
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
1	0.65	0.322	0.426	0.253	0.836	0.608	0.465	0.369	0.299	0.449	0.738
2	1.16	0.650	0.845	0.524	0.900	0.678	0.520	0.402	0.311	0.846	0.794
3	1.06	1.004	1.233	0.839	0.989	0.796	0.637	0.504	0.390	1.209	0.873
4	1.05	1.377	1.578	1.210	1.115	1.018	0.947	0.895	0.860	1.539	0.987
5	1.04	1.777	1.893	1.664	1.321	1.497	1.785	2.104	2.400	1.848	1.176
6	1.03	2.237	2.180	2.216	1.702	2.328	2.807	3.013	3.072	2.138	1.532
Σ		7.636	8.445	6.955	6.944	7.059	7.333	7.482	7.541	8.306	6.173
Odchylka od var. 01		100%	111%	91%	91%	92%	96%	98%	99%	109%	81%

6.2.6 Vyrovnání svislého průhybu u výchozího tvaru

Geometrie předběžného výchozího tvaru visutého lana a závěsů byla vložena do prostorového modelu v programu ANSYS a byl proveden nelineární výpočet. Výsledkem je celkový svislý posun konstrukce na Obr. 6.17 a svislý posun řezu uprostřed rozpětí na Obr. 6.18. Díky použití předběžného tvaru, který bral v úvahu přesnou hodnotu tíhy části mostovky, která připadá na přilehlý závěs (svislá složka závěsu se rovnala tíze části mostovky), byla odchylka od počáteční geometrie naprosto minimální – pokles o cca 15 mm a náklon cca 4 mm uprostřed rozpětí.



Obr. 6.17 Svislý posun uz od předběžného výchozího tvaru



Obr. 6.18 Řez uprostřed rozpětí – svislý posun uz od předběžného výchozího tvaru

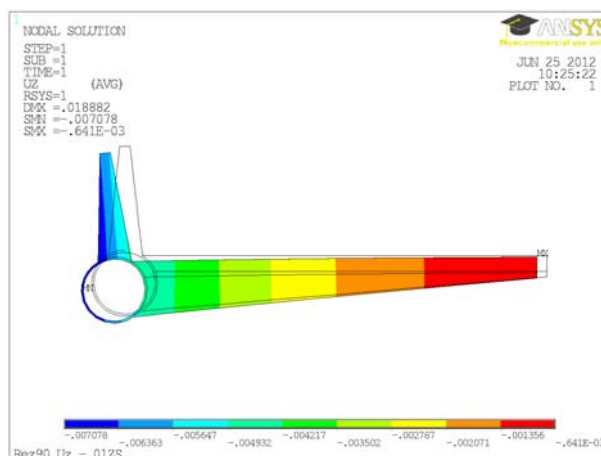
U zavěšené konstrukce bylo analyzováno několik variant vyrovnání svislého průhybu mostovky. Nejlepších výsledků dosahovala metoda poslední (vyrovnání svislých průhybů). Metoda byla použita i u varianty visuté, ale nevedla k žádnému cíli. Je to způsobeno tím, že závěsy nejsou přichyceny k pevnému bodu – v případě zavěšené varianty to byl neposuvný bod v hlavě pylonu.

Ve visuté variantě jsou závěsy ukončeny na visutém laně a proto při změně jejich přetvoření, potažmo jejich sil, dojde k vychýlení styku visutého lana se závěsem a celá geometrie lávky, včetně sil ve všech závěsech se změní. Kroky použité metody nevedou k cíli.

Pro další postup bylo využito jevu, který nastal při sestavování dřevěného modelu, konstruovaného pro ověření polohy visutého lana, popsaného v kapitole 6.2.3, kde po zkrácení visutého lana u hlavy pylonu došlo k posunu všech plechovek simulující závaží směrem nahoru (závaží znázorněno na Obr. 6.13).



Obr. 6.19 Svislý posun uz od výchozího stavu



Obr. 6.20 Řez uprostřed rozpětí – svislý posun uz od výchozího stavu

Pro vyrovnání svislých průhybů mostovky bylo rozhodnuto použít stejný princip. To znamená, že místo změny sil v závěsech se mění síla (přetvoření) ve visutém laně pomocí nejjednodušší metody zvyšování procentem, která byla použita jako jedna z variant pro vyrovnání svislého průhybu u zavěšené varianty.

Tab. 6.7 Zadané přetvoření a výsledné síly a svislé posuny od výchozího stavu

číslo závěsu	ε_i [m/m]	N_i - předpokládané [kN]	N_i - dosažené [kN]	Odchylka N_i [%]	svislé posuny - trubka		mostovka náklon [mm]
					ux [mm]	uz [mm]	
1	0.001460	170.85	233.34	136.6	-1.1	1.6	-4.1
2	0.002807	328.40	299.67	91.3	-3.0	4.6	-2.1
3	0.002778	325.05	300.32	92.4	-5.0	5.8	0.0
4	0.003028	354.28	330.67	93.3	-6.8	4.4	1.3
5	0.003338	390.54	368.25	94.3	-8.3	1.2	2.0
6	0.003860	451.66	420.44	93.1	-9.3	-2.4	2.8
střed					-9.8	-5.9	4.2
					max	5.8	4.2
					min	-5.9	-4.1

Ve visutém laně stačilo zvýšit poměrné přetvoření všech částí o 2,4%, aby bylo dosaženo rovnoměrného průhybu mostovky (horního povrchu ocelové trubky), jak je vidět na Obr. 6.19 a Obr. 6.20.

V Tab. 6.7 je rozdíl mezi předpokládanými a dosaženými silami v závěsech, celkové dosažené vodorovné a svislé posuny trubky, a náklon mostovky u každého závěsu. Stav byl poté prohlášen za výchozí stav visuté varianty lávky.

6.2.7 Zatěžovací stavy a kombinace

Zatěžovací stavy a kombinace jsou převzaty ze zavěšené varianty.

6.2.8 Výsledky statické analýzy

Podrobné statické řešení shrnuje příloha A. Dosažené svislé a vodorovné posuny ocelové trubky a svislé posuny a náklon betonové desky mostovky podobně jako u zavěšené varianty ukazuje Tab. 6.8. Sledovaná místa byla vždy u závěsů a ve středu rozpětí. Mezi těmito hodnotami se vybírala nejvyšší dosažená hodnota (max.) a nejnižší dosažená hodnota (min.). Nejvyšší hodnoty svislého posunu byly zjištěny u kombinace K03; u trubky – 545,7 mm a u desky –736,6 mm. Taktéž hodnoty náklonu dosahovaly pro kombinaci hodnoty –184,1 mm (konzolový okraj poklesl). Pokud jde o nejvyšší kladné hodnoty, tak ty se projevují nejvíce u kombinace K04. Proti zavěšené variantě je svislý průhyb ocelové trubky 4x vyšší. To je způsobeno použitím visutého lana, které celkově zmenšuje ohybovou tuhost mostovky.

Tab. 6.8 Svislé posuny mostovky pro uvažované kombinace zatížení

Kombinace				K01	K02	K03	K04	K05	K06	K07
Trubka	ux	min [mm]		-10.1	-9.5	-11.7	-11.7	-7.6	-0.9	-21.6
		max [mm]		-1.1	-0.4	-3.5	-0.4	-0.4	1.8	-1.4
	uz	min [mm]		-5.9	-427.4	-545.7	-326.5	-265.0	-11.4	-0.5
		max [mm]		5.8	-17.7	44.0	55.9	-10.3	2.9	8.7
Deska	uz	min [mm]		-4.8	-585.4	-736.6	-471.1	-385.6	-10.2	-1.3
		max [mm]		6.7	-17.8	64.7	81.9	-10.4	4.2	9.9
	náklon	min [mm]		-4.1	-152.4	-184.1	-139.5	-116.6	-4.2	-4.1
		max [mm]		4.2	-24.8	19.0	25.3	-24.6	5.8	2.5

Betonová deska mostovky je v podélném směru uvažovaná opět jako předpjatá. V desce se ukázalo největší tahové namáhání v podélném směru (napětí S_y) v místě vetknutí a v místech zavěšení mostovky. Tahové namáhání nabývá hodnot blízkých 5 MPa. Pro K01 (pouze vlastní tíha a předpětí) by byla celá mostovka tlačena stejně jako u zavěšené varianty. I zde se splnil požadavek tlakové rezervy pomocí předpínacích lan vedených pod mostkovkovou deskou. V příčném směru je deska uvažována jako železobetonová. Vzniká zde tahové namáhání cca 4 MPa dimenzovatelné betonářskou výztuží.

V ocelové trubce jsou napětí v rozmezí –140 až 140 MPa ve všech směrech. Trubka tedy bez problémů vyhovuje z oceli třídy S235.

Plech zábradlí je bezesporu i zde nejnamáhanější částí modelu. Nyní však zatěžuje zábradlí pouze předpínací kabel. Proti předchozí zavěšené variantě je předpínací kabel v zábradlí sice umístěn výše, ale díky absenci bodu zavěšení v zábradlí vyvozuje daleko menší ohybové namáhání cca o 30 až 50%. Přesto u kombinací K03 a K04 je dosaženo mírně

vyššího tahového namáhání za ohybu než povoluje norma. I zde je tedy vhodné doporučit snížení polohy předpínacího kabelu v zábradlí například změnou polohy kabelů pod mostovkou nebo zvětšením tloušťky plechu zábradlí.

Závěsy jsou namáhány maximálním tahovým napětím okolo 1310 MPa. To je napětí, které už je neakceptovatelné z hlediska únavy, proto by se musel zvětšit počet lan v závěsech.

Předpínací kabely vyhovují, ovšem i zde se vyskytuje problém se ztrátami v deviátorech. Ty by se řešily obdobně jako u zavěšené varianty.

Stojiny příčníků tvaru T mají opět napětí díky sprážení desky s ocelovou trubkou minimální, i když o něco vyšší než u zavěšené varianty.

Posledním posuzovaným prvkem je visuté lano. Napětí v kombinaci K01 se pohybuje okolo 871 MPa. Při návrhu počtu lan se vycházelo z předběžného výchozího stavu a odhadovalo se napětí od proměnných zatížení. Při kombinacích s proměnným zatížením se napětí zvýší až na hodnotu 1600 MPa. I zde by se tedy musel zvýšit počet lan, což by mělo nepochybně velký vliv na dosažené svislé průhyby. Čím bude lano osově tužší, tím budou svislé průhyby mostovky menší.

Na závěr statické analýzy je nutno podotknout, že u varianty visuté ani zavěšené není důležité, aby všechny prvky vyhovovaly z hlediska mezních stavů, protože těžiště práce je soustředěno na podrobné řešení nalezení výchozího tvaru konstrukce a použití podmínek rovnováhy v průřezu pro zjištění polohy bodu zavěšení a polohy a počtu předpínacích kabelů. Optimalizace konstrukce tudíž není předmětem předkládané dizertační práce.

6.3 Dynamická analýza

6.3.1 Vlastní tvary konstrukce

Výpočet vlastních tvarů konstrukce byl proveden ve smyslu kapitoly 3.2.1 jako modální analýza s předepnutím. Výpočtový model byl převzat z kapitoly 6.2.1 (model pro statickou analýzu). Jeho řešení však nekonvergovalo, protože pro výpočet vlastních tvarů je nutno konstrukci spočítat lineárně dle teorie malých posunů (viz kapitola 3.2.1) s vlivem *prestress effect*.

Při podrobnějším studiu chování výpočtového modelu bylo zjištěno, že konvergence řešení byla pravděpodobně ovlivněna velkým svislým posunem styků závěsů s visutým lanem. V prvním kroku výpočtu totiž není ještě vneseno poměrné přetvoření do závěsů a visutého lana a proto dojde k velkému posunu popsáných styků a výpočet je ukončen.

Problém byl řešen pomocí nelineární stabilizace, nebo nástrojem *line search*, ale neúspěšně. Nakonec byla úloha vyřešena pomocí pružin nazývaných „*weak springs*“. Pružiny se umístily na všechny uzly visutého lana (myšleno styk závěsů s visutým lanem), tak aby omezovaly svislý pohyb uzlů lana. Jejich tuhost se nastavila na hodnotu 10 N/m, která

prakticky neovlivní řešení, ale zamezí příliš velkému svislému posunu v prvním kroku iterace a usnadní konvergenci lineárního výpočtu.

Pro modelování pružiny v programovém systému ANSYS byl použit prvek COMBIN14 (viz kapitola 3.1.4), který je vhodný právě pro lineární analýzu s vlivem *prestress effect*.

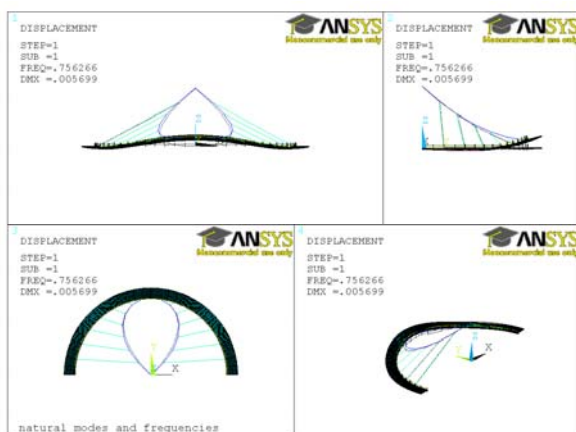
Pro zajímavost byla analýza vlastních tvarů konstrukce provedena s několika hodnotami tuhosti pružin „weak springs“, jak ukazuje tabulka Tab. 6.9. Výsledky ukazují, že s vyšší tuhostí se výsledky vlastních frekvencí liší nepatrně od srovnávací hodnoty tuhosti 10 N/m.

Tab. 6.9 Srovnání vlastních tvarů s různou tuhostí pružin „weak springs“

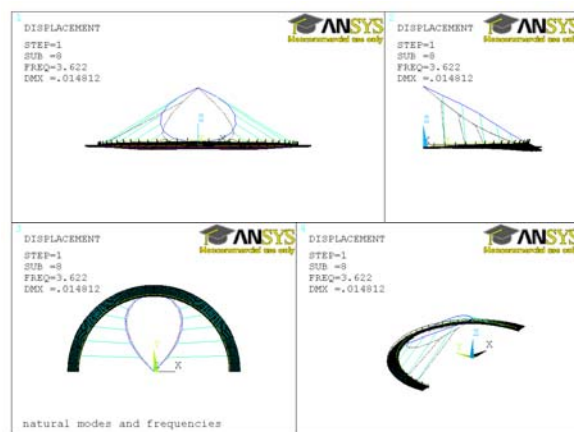
Vlastní tvary	Tuhosti pružin "weak springs"						
	1 N/m	odchylka*	10 N/m	100 N/m	odchylka*	1000 N/m	odchylka*
	[Hz]	[%]	[Hz]	[Hz]	[%]	[Hz]	[%]
1.	0.76	100.1	0.76	0.76	99.4	0.75	99.2
2.	0.94	101.4	0.93	0.91	97.9	0.90	97.3
3.	1.17	102.8	1.13	1.09	96.1	1.08	95.1
4.	1.71	102.8	1.67	1.60	95.9	1.58	94.9
5.	2.06	84.7	2.43	2.35	96.7	2.33	95.9
6.	2.06	68.6	3.00	3.22	107.1	3.19	106.3

* odchylka od varianty s tuhostí 10 N/m

S použitou hodnotou tuhosti 10 N/m má první vertikální ohybová frekvence hodnotu $f_{V(1)} = 0,76 \text{ Hz}$ (Obr. 6.21). První ohybový vodorovný tvar je až sedmý o frekvenci $f_{H(7)} = 3,53 \text{ Hz}$. Opět nelze mluvit o rezonanci, protože vodorovný ohybový tvar následuje daleko za prvním svislým tvarem. První torzní tvar je osmý s frekvencí $f_{T(8)} = 3,62 \text{ Hz}$ (Obr. 6.22) a jemu odpovídá svislý ohybový tvar druhý s frekvencí $f_{V(2)} = 0,76 \text{ Hz}$.



Obr. 6.21 První vlastní svislý ohybový tvar



Obr. 6.22 První torzní tvar

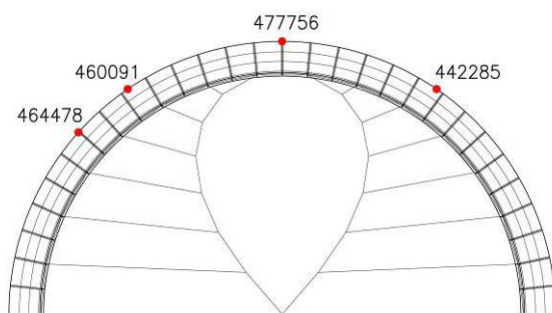
První torzní tvar je osmý s frekvencí $f_{T(8)} = 3,62 \text{ Hz}$ a jemu odpovídající svislý ohybový tvar je druhý s frekvencí $f_{V(2)} = 0,76 \text{ Hz}$, oba jsou vidět na Obr. 5.9 a Obr. 5.10.

Jejich poměr má hodnotu 4,76, což je větší než dovolená hodnota 2,50, takže nedojde ke kmitání vlivem bočního větru (*Phenomen of Flutter* viz kapitola 3.2.1).

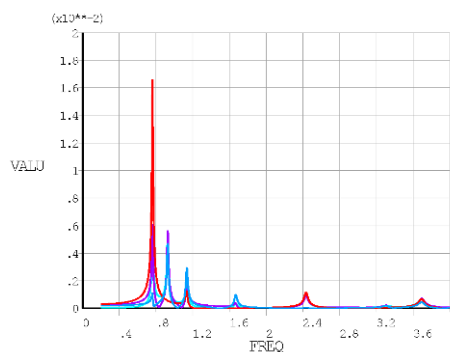
I u modální analýzy se ukazuje menší ohybová tuhost mostovky způsobená visutým lanem. Srovnání vlastních tvarů obou variant je v Tab. 6.10, kde první ohybová frekvence visuté varianty leží níže o cca 0,25 Hz. Torzní a vodorovná frekvence zůstaly přibližně stejné.

6.3.2 Harmonická analýza

Vzhledem k nízko položeným vlastním frekvencím by mohla být konstrukce citlivá na lidskou chůzi, proto je doporučeno spočítat a vyhodnotit i harmonickou analýzu.



Obr. 6.23 Poloha sledovaných a budících uzlů



Obr. 6.24 Ustálená odezva uzlu 477756

Pulsující síla v uzlu 477756 $f = 0,761 \text{ Hz}$ (budící frekvence ve špičce odezvy) $U_{\text{peak}} = 0,01569 \text{ m}$ (max. vert. posunutí ve špičce odezvy) $F = 180 \sin 4,781504 t \text{ [N]}$ (pulsující síla) $u = 0,01569 \sin 4,781504 t \text{ [m]}$ (vert. posunutí) $\phi = 89,3141^\circ$ (fázový úhel) $v_{\text{max}} = 0,075 \text{ m/s}$ (maximální rychlost) $a_{\text{max}} = -0,359 \text{ m/s}^2$ (maximální akcelerace) Procentuální vyjádření podmínky $a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 82,25\%$ $a_{\text{max}} = 0,359 \text{ m/s}^2$ OK $a_{\text{lim}} = 0,436 \text{ m/s}^2$	Pulsující síla v uzlu 460091 $f = 0,761 \text{ Hz}$ (budící frekvence ve špičce odezvy) $U_{\text{peak}} = 0,00572 \text{ m}$ (max. vert. posunutí ve špičce odezvy) $F = 180 \sin 4,781504 t \text{ [N]}$ (pulsující síla) $u = 0,00572 \sin 4,781504 t \text{ [m]}$ (vert. posunutí) $\phi = 88,5332^\circ$ (fázový úhel) $v_{\text{max}} = 0,027 \text{ m/s}$ (maximální rychlost) $a_{\text{max}} = -0,131 \text{ m/s}^2$ (maximální akcelerace) Procentuální vyjádření podmínky $a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 29,97\%$ $a_{\text{max}} = 0,131 \text{ m/s}^2$ OK $a_{\text{lim}} = 0,436 \text{ m/s}^2$
Pulsující síla v uzlu 442285 $f = 0,761 \text{ Hz}$ (budící frekvence ve špičce odezvy) $U_{\text{peak}} = 0,00571 \text{ m}$ (max. vert. posunutí ve špičce odezvy) $F = 180 \sin 4,781504 t \text{ [N]}$ (pulsující síla) $u = 0,00571 \sin 4,781504 t \text{ [m]}$ (vert. posunutí) $\phi = 88,5355^\circ$ (fázový úhel) $v_{\text{max}} = 0,027 \text{ m/s}$ (maximální rychlost) $a_{\text{max}} = -0,131 \text{ m/s}^2$ (maximální akcelerace) Procentuální vyjádření podmínky $a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 29,94\%$ $a_{\text{max}} = 0,131 \text{ m/s}^2$ OK $a_{\text{lim}} = 0,436 \text{ m/s}^2$	Pulsující síla v uzlu 464478 $f = 1,135 \text{ Hz}$ (budící frekvence ve špičce odezvy) $U_{\text{peak}} = 0,00217 \text{ m}$ (max. vert. posunutí ve špičce odezvy) $F = 180 \sin 7,131415 t \text{ [N]}$ (pulsující síla) $u = 0,00217 \sin 7,131415 t \text{ [m]}$ (vert. posunutí) $\phi = -92,7778^\circ$ (fázový úhel) $v_{\text{max}} = 0,015 \text{ m/s}$ (maximální rychlost) $a_{\text{max}} = -0,110 \text{ m/s}^2$ (maximální akcelerace) Procentuální vyjádření podmínky $a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 25,25\%$ $a_{\text{max}} = 0,110 \text{ m/s}^2$ OK $a_{\text{lim}} = 0,436 \text{ m/s}^2$

Obr. 6.25 Harmonická odezva uzlu 477756

Sledované uzly jsou na Obr. 6.25. Jak je uvedeno v kapitole 3.2.2 srovnáváme maximální dosaženou rychlost s hodnotou doporučenou. Dosažená maximální rychlost má hodnotu $0,075 \text{ ms}^{-1}$, což je hodnota vyšší než doporučená $0,024 \text{ ms}^{-1}$. U limitního zrychlení byla hodnota dodržena. Nejvyšší hodnota zrychlení byla $0,359 \text{ ms}^{-2}$, což splňuje doporučení $0,436 \text{ ms}^{-2}$. Proti zavěšené variantě se opět projevila nižší tuhost pro stejnou hmotu mostovky jednak na maximální rychlosti a jednak na nejvyšší hodnotě zrychlení.

6.4 Zhodnocení a dílčí závěry

Z dosavadních výsledků vyplývá, že konstrukce lávky, kde je mostovka půdorysně zakřivená a zavěšená pouze na vnitřním okraji, může velmi dobře fungovat pro běžné zatížení působící na lávkách, jak při prostém zavěšení, tak i při použití visutého lana ve variantě vnitřní.

Tab. 6.10 Srovnání vlastních tvarů visuté a zavěšené varianty

Varianta		zavěšená				visutá			
tvar		frekvence [Hz]		tvar		frekvence [Hz]		tvar	
svislý	1.	1.05		B	$f_{(1)}$	0.76		A	$f_{(1)}$
	2.	1.09		A	$f_{(2)}$	0.91		B	$f_{(2)}$
vodorovný	1.	3.40		C	$f_{(7)}$	3.62		C	$f_{(10)}$
torzní	1.	4.84		D	$f_{(10)}$	5.02		D	$f_{(12)}$
Tvar A		Tvar B		Tvar C		Tvar D			
									

Závěrem je nutno podotknout, že je nutné verifikovat tyto znalosti na modelu většího měřítka. Zejména se jedná o ověření výchozího stavu visuté varianty a ověření namáhání ocelové trubky a betonové desky mostovky. Model by mohl vystihnout i chování předpínacího kabelu, zejména jeho tření vlivem zalomení v příčnicích a velikost podélného předpětí betonové desky mostovky, chování visutého lana a jeho namáhání. Dále byl v celé studii opomíjen vliv deformace pylonu a to jak jeho osová tuhost z hlediska poklesu podpor, tak i jeho ohybová tuhost z hlediska vodorovných deformací, které by významně mohly ovlivnit výsledné svislé posunutí.

7. Model půdorysně zakřivených lávek v měřítku 1:10

Cílem experimentu bylo ověření konstrukčního řešení, navrženého postupu hledání výchozího stavu konstrukce, odezvy konstrukce na zatížení a zjištění mezní únosnosti konstrukce. Ověření obou variant bude provedeno v jednom modelu, který vznikne spojením zavěšené a visuté konstrukce ve vrcholu pylonu (studie kapitol 5 a 6).

Nejdříve je vysvětlen princip modelové podobnosti, který byl využit při návrhu zmenšeného modelu lávek. Dále je zde popsáno konstrukční řešení modelu včetně konečného postupu výstavby, osazení modelu měřicími snímači a provedení statické a mezní zatěžovací zkoušky. Poslední část kapitoly se věnuje vyhodnocení a srovnání výsledků z výpočtového modelu proti provedenému fyzikálnímu modelu z pohledu výchozího stavu, statické zatěžovací zkoušky a mezní zatěžovací zkoušky.

7.1 Modelová podobnost

Při řešení konstrukcí na modelech se obecně mění geometrické rozměry skutečné konstrukce i velikost vnějších sil. Z hlediska funkčnosti modelu a zejména s ohledem na výhodnou pozdější interpretaci naměřených výsledků byl aplikován postup, který vychází z přímé fyzikální podobnosti mezi skutečnou konstrukcí a modelem. Musí tedy být zvoleno nějaké měřítko, které umožní například umístit model do zkušební haly. Studie má půdorysné rozměry 64 x 64 m a proto jako měřítko bylo zvoleno $M = 10$ (1:10), tzn. že konstrukce byla zmenšena 10x proti skutečnosti (6,4 x 6,4 m).

Tab. 7.1 Tabulková podobnost mezi skutečnou konstrukcí S a modelem M

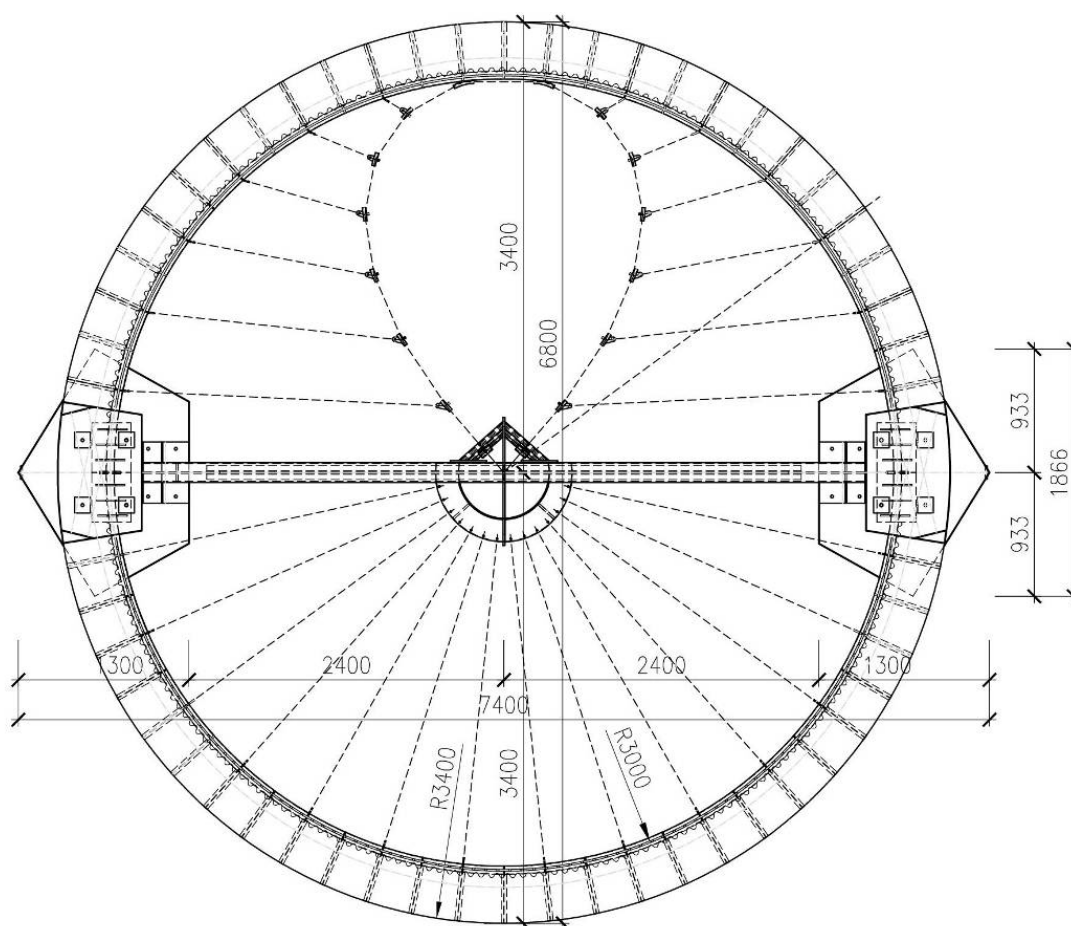
Parametr	Symbol	Měřítko	Parametr	Symbol	Měřítko
Délka	L	$\frac{L_S}{L_M} = \lambda = M$	Posunutí	v	$\frac{v_S}{v_M} = \lambda$
Plocha	A	$\frac{A_S}{A_M} = \lambda^2$	Rychlost	v'	$\frac{v'_S}{v'_M} = \sqrt{\lambda}$
Objem	V	$\frac{V_S}{V_M} = \lambda^3$	Zrychlení	v''	$\frac{v''_S}{v''_M} = 1$
Osamělá síla	F	$\frac{F_S}{F_M} = \lambda^2$	Modul pružnosti	E	$\frac{E_S}{E_M} = 1$
Liniové zatížení	q	$\frac{q_S}{q_M} = \lambda$	Poměrné přetvoření	ε	$\frac{\varepsilon_S}{\varepsilon_M} = 1$
Plošné zatížení	p	$p_S = p_M$	NAPĚTÍ	σ	$\frac{\sigma_S}{\sigma_M} = 1$

Vzhledem ke skutečnosti, že bude pro model použit stejný materiál jako na skutečné konstrukci, odpovídá napětí na modelu napětí na skutečné konstrukci. Z principů podobnosti

dále vyplývá, že má-li být dosaženo stejných napětí na modelu jako na skutečné konstrukci, je nutné provést tzv. zvýšení stálého zatížení v příslušném poměru za předpokladu zachování ostatních případů podobnosti. Základní vztahy zvolené podobnosti mezi veličinami jsou přehledně vyjádřeny v Tab. 7.1 a další podrobnosti jsou v dizertační práci [28].

7.2 Konstrukční řešení

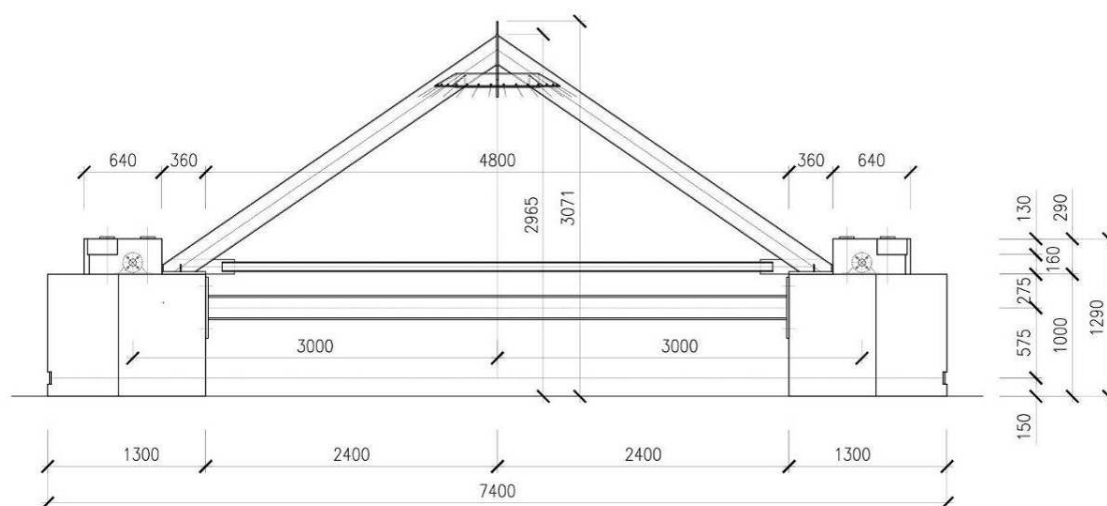
Jedná se o konstrukci, která je tvořena zakřiveným betonovým pásem vyztuženým ocelovou trubkou vloženou na jeho vnitřní hranu (Obr. 7.1 a Obr. 7.2). Model má rozpětí 6,0 m a je situován v půdorysném oblouku, kde osa modelu je v poloměru 3,2 m. Mostovka vyplní úhel přesně 360°. Betonový pás a ocelová trubka jsou vetknuty do opěrných bloků, na kterých je model založen.



Obr. 7.1 Schematický půdorys modelu

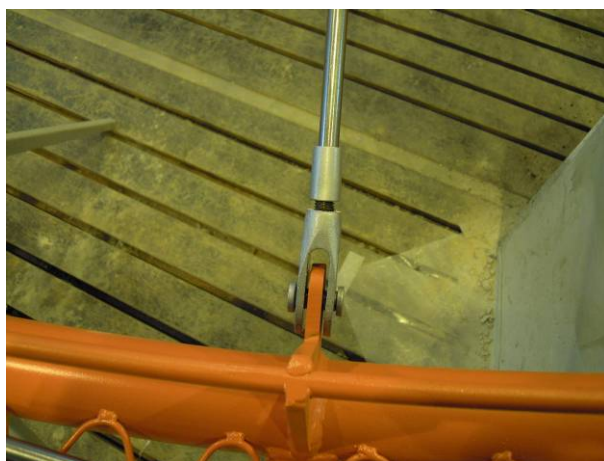
Předpětí je vedeno pomocí dvou monostrandů $\varnothing 9,3$ mm jednak v zábradlí a jednak pod mostovkou ve výztužných příčnicích. Mostovka je na jedné straně podpírána 14-ti závěsy, které jsou zavěšeny na pylonu a na druhé straně je podporována 12-ti závěsy, které jsou zavěšeny na visutém laně. Visuté lano je pak zakotveno v hlavě pylonu.

Závěsy jsou tvořeny ocelovou tyčí $\varnothing 12$ mm třídy oceli S355 opatřené na obou koncích závitem pro rektifikaci jejich délky (Obr. 7.3). Pro visuté lano bylo použito jednopramenné vinuté lano 1x19 průměru $\varnothing 16$ mm opatřené už z výroby zalisovanými koncovkami umožňující délkovou rektifikaci. Z důvodu malého poloměru oblouku (cca okolo 1,0 m) nemohl být použit monostrand.



Obr. 7.2 Schematický pohled na model

Spojení závěsů s visutým lanem Obr. 7.4 je realizováno pomocí zámečnického výrobku, který je tvořen ocelovou trubkou $\varnothing 26,9/3,2$, styčnickovým plechem tloušťky 8 mm, maticí M12, šroubem M12 a speciálně vytvarovanými podložkami.



Obr. 7.3 Detail napojení styčnickového plechu zábradlí na závěs



Obr. 7.4 Detail styku závěsu s visutým lanem

Na ocelové trubce, kterou prochází visuté lano, jsou navařeny na jedné straně styčnickový plech a na druhé protilehlé straně matice M12. Maticí prochází šroub, který pomocí speciálně vytvarované podložky ve tvaru půlměsíce, přiložené uvnitř trubky na lano,

fixuje polohu trubky vůči lanu. Styčnickový plech umožňuje použití typizovaných vidliček s čepy (čep se provleče otvorem ve styčnickovém plechu). Zámečnický výrobek je ještě jištěn lanovou svorkou.

7.2.1 Založení modelu

Založení modelu tvoří dva základové opěrné bloky půdorysného tvaru nepravidelného pětiúhelníku výšky 1,0 m. Bloky svými rozměry zajišťují dostatečnou stabilitu celého modelu v příčném směru. Pro zajištění stability v podélném směru byly bloky mezi sebou v horní části spojeny ocelovým profilem HEB 200 a v dolní části bylo předepnuto předpínací lano typu monostrand průměru 12,5 mm. Tím se vytvořil systém táhla a vzpěry, který zajistil dostatečnou stabilitu v podélném směru.

Na opěrných blocích byly vybetonovány kotevní bloky, do kterých jsou kotveny předpínací kabely, a do kterých je vetknuta mostovka. Kotevní bloky byly přichyceny k opěrným blokům pomocí čtyř závitových tyčí a do spáry mezi oba bloky se vložila tvrdá pryž, která umožnila snadnější demontáž při odstraňování modelu.

Dále je na opěrných blocích zakotven ocelový pylon ve tvaru písmene A, jehož vrchol je umístěn nad středem kružnice, která tvoří mostovku. Pylon je vyroben z ocelového profilu Jäckl rozměrů 200/150 mm s tloušťkou stěny 8 mm. Hlava pylonu je tvořena ze strany visuté části čtvercovým profilem Jäckl rozměrů 80/80 mm s tloušťkou stěny 10 mm, do kterého jsou zakotveny oba konce visutého lana. Ze strany zavěšené vychází z pylonu kšilt tvořený ocelovým plechem výšky 100 mm a tloušťky 10 mm, do kterého jsou zakotveny všechny závěsy. Třída materiálu pylonu a všech jeho částí je S355.

7.2.2 Příčný řez

Příčný řez z předchozích studií byl zmenšen na základě modelové podobnosti a poté upraven s ohledem na sortiment a možnosti betonáže. Ocelová trubka byla zvolena průměru 63 mm o tloušťce stěny 3,6 mm, tloušťka desky byla z důvodu betonáže navržena 20 mm. Spojení betonové desky a ocelové trubky je navrženo spřažením pomocí spřahovací výztuže a spřahovacích prvků na příčnících.

Spřahovací výztuž je tvořena drátem průměru 4 mm, který je profilován do tvaru vlnovky přivařené zhruba v ose desky na ocelovou trubku. Jako spřahovací prvky byly použity šrouby M5/16 vycházející z příruby příčníků opatřené na konci velkopřůměrovými podložkami. Šrouby mají zápusťnou hlavu, aby nepřekážely při bednicích a odbedňovacích pracích.

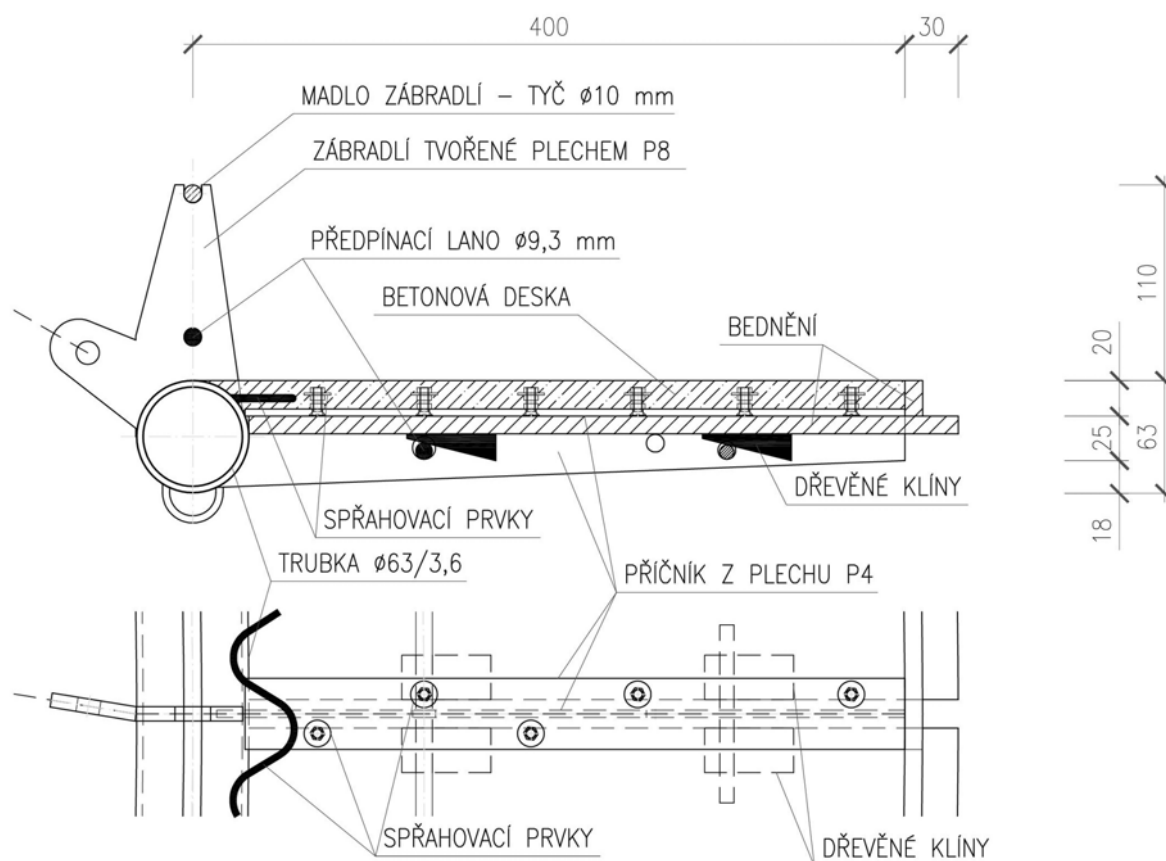
Příčníky tvaru T jsou tvořeny ze dvou plechů, stojiny a příruby, tloušťky 4 mm a šířky 40 mm. Stojina příčnicku je opatřena třemi otvory, jedním pro předpínací kabel pod mostovkou, jedním pro uchycení balastního zatížení a jedním pro bednění mostovky.

V přírubě je 6 otvorů pro spřahovací prvky (viz Obr. 7.5). Příčníky jsou přivařeny k ocelové trubce.

Zábradlí je tvořeno plechem tloušťky 8 mm přivařeným k ocelové trubce. Součástí plechu je i styčnickový plech, který slouží pro napojení závěsů (Obr. 7.3). Rovněž v zábradlí je vyvrtán otvor pro předpínací kabel. Plechy zábradlí jsou v horní části opatřeny madlem z ocelové tyče $\varnothing 10$ mm, které není spojeno s kotevním blokem.

Bednění betonové desky mostovky bylo vytvořeno pomocí vodovzdorné překližky, která se vkládala mezi příčníky. Překližka se pod přírubami příčníků fixovala pomocí dřevěných klínů Obr. 7.5, aby byla umožněna snadná demontáž bednění.

Z důvodu nemožnosti vyztužení betonové desky tloušťky 20 mm (nad příčníky pouze 16 mm) klasickou betonářskou výztuží bylo rozhodnuto o vyztužení pomocí drátkobetonu na jedné polovině modelu (visutá varianta) a vláknobetonu na druhé polovině (zavěšená varianta). U obou betonových směsí byl při návrhu kladen velký důraz na malé smršťování.



Obr. 7.5 Příčný řez

7.2.3 Balastní zatížení

Jak bylo řečeno v kapitole 7.1, konstrukce mostovky musí být s ohledem na modelovou podobnost dovážena. Pro zvolené měřítko 1:10 je na každém příčníku zavěšena

pomocí lanka zátěž o váze 75 kg. Zátěž je tvořena betonovým blokem o hmotnosti 56 kg a dvěma ocelovými válci o hmotnosti jednoho válce 9,7 kg. Lanko bude navázáno na ocelovou trubku (zespod je oko pro přichycení, viz Obr. 7.5) a příčník mostovky přesně v místě těžiště mostovky viz Obr. 7.10.

7.3 Postup výstavby modelu

Model byl postaven ve Sdružených laboratořích pro zkoušení nosných konstrukcí Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí FAST VUT v Brně. Vlastní práce na modelu byly prováděny pracovníky a doktorandy Ústavu betonových a zděných konstrukcí ve spolupráci s Ústavem stavebního zkušebnictví.

Původně byl pro studii uvažován postup výstavby na pevné skruži, který je používán zejména tam, kde je mostovka celá tvořena monolitickým betonem. Protože příčný řez je tvořen kombinací ocelové trubky a betonové desky, může se s výhodou ocelová část mostovky vyrobit v dílně, pomocí jeřábu smontovat a poté se může provést bednění a betonáž již na vybudované ocelové konstrukci bez nutnosti pevné skruže. Základní body postupu výstavby pro model byly následující:

- vytvoření a usazení opěrných bloků,
- smontování ocelové konstrukce pylonu a mostovky. Konstrukce budované mostovky bude provizorně podepřena ve třech bodech na každé polovině lávky,
- osazení závěsů a visutého lana,
- vytvoření bednění mostovky a krajních kotevních bloků,
- vyztužení kotevních bloků, zejména oblastí pod kotvami,
- dovážení modelu – zavěšení závaží pod mostovku,
- napnutí kabelů v zábradlí a pod mostovkou na 50% finální síly,
- betonáž mostovky a kotevních bloků,
- po zatvrdnutí betonu se provede dopnutí kabelů na finální síly,
- osazení modelu měřicí technikou,
- provedení zatěžovací zkoušky na základní typy zatížení.

Během listopadu a prosince 2010 byly vyrobeny ve specializované zámečnické dílně všechny ocelové části modelu – mostovka, pylon, všechny závěsy a spojovací prvky mezi visutým lanem a závěsy. Visuté lano, vidličky pro spojení závěsů s mostovkou a visutým lanem a příslušenství k nim byly zapůjčeny firmou Macalloy.

Práce na vlastní montáži modelu započaly v lednu 2011 a díky velmi pečlivé přípravě trvaly pouze 5 týdnů včetně veškerých bednicích a vyztužovacích prací a betonáže.

Základ modelu tvořily 2 základové betonové bloky, které se osadily do projektované pozice. Vzhledem k předchozímu použití bloků na jiných experimentech bylo nutno bloky

v horní části sanovat a následně na jejich horním povrchu vytvořit nové kotevní šrouby pro zakotvení ocelové trubky mostovky a pylonu.



Obr. 7.6 Usazování základových bloků, předvyrobená ocelová část mostovky



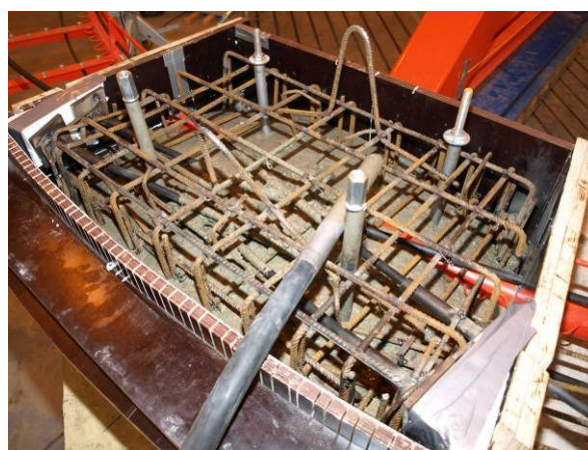
Obr. 7.7 Osazení závěsů, montážní podepření mostovky

Po vyrobení a dovozu ocelové konstrukce mostovky a pylonu byla provedena její montáž na základové bloky. Mostovka byla montážně podepřena na každé straně pomocí tří stojek.

Poté bylo aktivováno visuté lano. Lano, které bylo tvořeno vinutím, se několikrát zatížilo a odlehčilo. Aktivace byla nutná z důvodu, že zatížené lano prodělavá dva druhy protažení: trvalé prvotní protažení a běžné elastické protažení. První z nich závisí na konstrukci lana a je způsobeno tím, že se jednotlivé dráty lana ukládají pod zatížením do výhodnější polohy.



Obr. 7.8 Aktivace visutého lana



Obr. 7.9 Betonáž kotevních bloků

Prvotní protažení může být mezi 0,10 a 0,75% délky lana, a to v závislosti na velikosti zatížení (popřípadě na jeho proměnlivosti u opakovaných zatížení) a mělo by být při návrhu vždy bráno v úvahu.

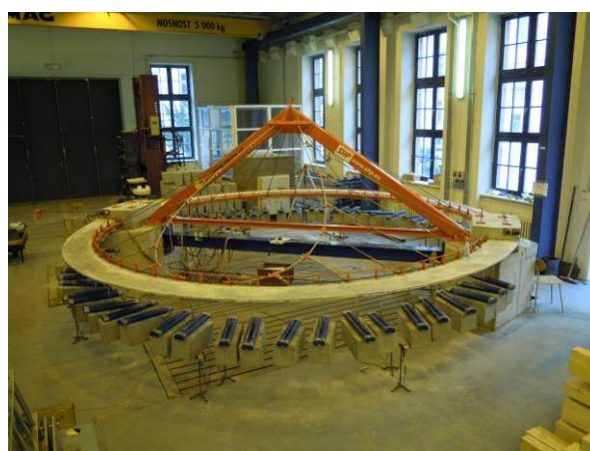
Při aktivaci visutého lana se sledovalo napětí a deformace. Aktivace skončila ustálením vztahu mezi napětím a deformací podle Hookova zákona, což odpovídá druhému typu protažení, a to běžnému elastickému.

Aktivované visuté lano se spolu se závěsy osadilo na model a začaly práce na bednění, výztuži a betonáži kotevních bloků. Po vytvrdnutí betonu kotevních bloků se provedlo napnutí kabelů zábradlí na obou polovinách modelu na 50% jejich finální síly.

V další fázi výstavby bylo na model zavěšeno závaží, které dle modelové podobnosti doplňuje stálé zatížení modelu. Poté se rektifikovaly závěsy a visuté lano tak, aby byla mostovka ve vodorovné poloze. Dodržená tolerance ± 25 mm byla měřena pomocí nivelačního přístroje.



Obr. 7.10 Osazení závaží a bednění mostovky



Obr. 7.11 Hotový model

Další náročnou operací bylo osazení bednění mostovky včetně náběhů u podpor. Bednění bylo uvažováno tak, aby odbedňovací práce byly co nejjednodušší. Betonáž proběhla v jeden den ve dvou etapách: v dopolední etapě se betonovala část visutá a v odpolední etapě část zavěšená. Díky postupu ošetřování desky kropením vodou byla deska homogenní a nevznikla vlivem smršťování betonu žádná trhлина.

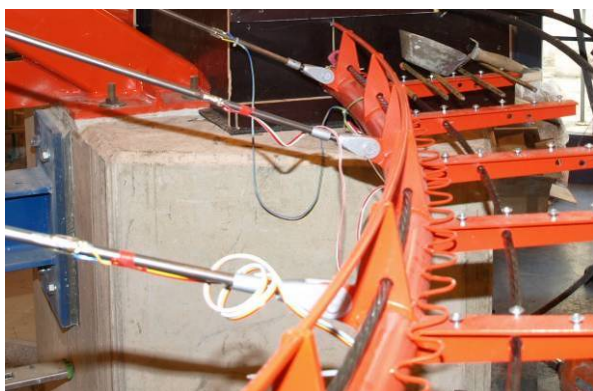
Nakonec se provedlo dopnutí kabelů v mostovce a v zábradlí na finální síly. Aby bylo umožněno ustálení průhybů a dosednutí všech částí modelu, byl model lávky několikrát zatížen a odtížen nahodilým zatížením, střídavě na obou stranách. Výstavba modelu tak byla ukončena dne 18.2.2011. Podrobná fotodokumentace modelu včetně výstavby je uvedena v příloze B.

7.4 Osazení modelu měřicí technikou

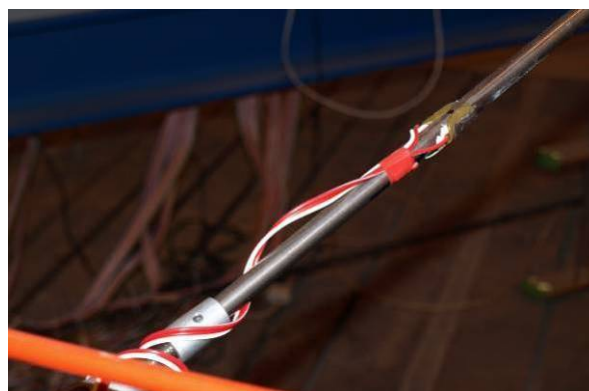
Osazení modelu měřicí technikou se provádělo současně s montáží modelu, respektive se vznikem jeho jednotlivých částí. Mezi použitou měřicí aparaturu patřily tenzometry, siloměry, magnetoelastické snímače (ME snímače) a průhyboměry.

7.4.1 Tenzometry

Poměrná přetvoření pro stanovení tahových sil v závěsech byla měřena pomocí odporových tenzometrů LY11 10/350 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (dále jen HBM). Na každém závěsu byly osazeny dva tenzometry, jejichž výsledné hodnoty byly průměrovány z důvodu eliminace nepatrného ohybového namáhání. Tenzometry byly nalepeny na očištěný povrch ocelových závěsů vždy ve stejné výškové úrovni nad mostovkou a byly označeny u zavěšené části TZZ01 až TZZ14 a u visuté části TVZ01 až TVZ10. Závěsy, nacházející se ve střední části visuté varianty, nebyly pro svou malou délku měřeny.



Obr. 7.12 *Tenzometry na závěsech*



Obr. 7.13 *Detail umístění tenzometrů závěsů*

Složitější bylo měření poměrného přetvoření u visutého lana. Původně se uvažovalo o magnetoelastickém snímači síly (tzv. Jaroševič), který se běžně u lan využívá. Materiál použitého lana je však nemagnetický, což metodu měření znemožňuje. Již z výroby je visuté lano na obou koncích opatřeno speciálními koncovkami se závitem. Na hladký povrch koncovek bylo však možné osadit tenzometry LY11-6/350. Opět byla použita dvojice tenzometrů na každém konci podobně jako u závěsů. Bohužel, tenzometry na koncovkách byly umístěny příliš blízko přípravku na zakotvení lana, čímž došlo k jejich stržení již při rektifikaci lana. Měření z těchto tenzometrů označené jako TVL01 a TVL02 není úplné a nedá se pro bližší analýzu použít.

Pro měření přetvoření na ocelové trubce mostovky bylo použito opět tenzometrů LY11 10/350 firmy HBM, které byly umístěny na začátku, v polovině, ve třech čtvrtinách a na konci půloblouku zavěšené a visuté části. Každé měřičské místo obsahovalo dva tenzometry – na horním a spodním povrchu trubky – u zavěšené varianty označené TZT01 až TZT08 a u visuté varianty TVT01 až TVT08.

Namáhání ocelového pylonu bylo měřeno rovněž tenzometricky. Jedna strana pylonu byla osazena v jednom řezu 4 tenzometry TP01 až TP04 (na horním, spodním, levém a pravém povrchu) stejného typu jako u ocelové trubky.

Posledním měřeným prvkem byla mostovková deska. Zde byly použity rovněž tenzometry LY41-20/120 od firmy HBM.



Obr. 7.14 *Koncovka visutého lana s odporovými tenzometry*



Obr. 7.15 *Detail kotvení visutého lana*



Obr. 7.16 *Tenzometr na ocelové trubce na horním povrchu*



Obr. 7.17 *Měřicí aparatura uvnitř modelu lávky*



Obr. 7.18 *Tenzometry na pylonu*



Obr. 7.19 *Tenzometry na mostovkové desce*

Celkem byly pomocí dvou tenzometrů (na horním a spodním povrchu desky) osazeny 3 měřičské řezy v části zavěšené TZD01 až TZD06 a 4 měřičské řezy na visuté části modelu

TVT01 až TVT08. Tenzometry byly v příčném řezu umístěny co nejblíže těžišti celého příčného řezu mostovky.

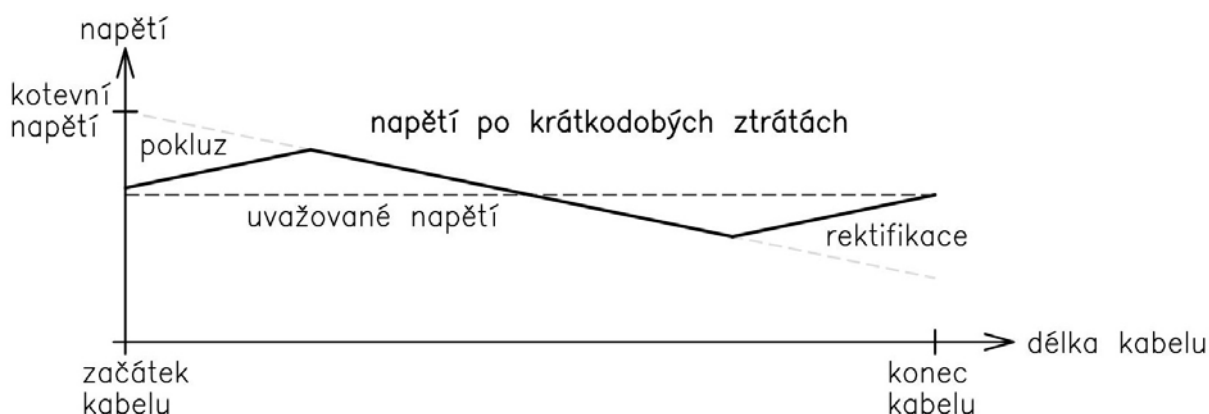
Měření poměrných přetvoření byla prováděna kontinuálně během výstavby i během jednotlivých zatěžovacích zkoušek pomocí ústřední HBM Spider 8. Přesné osazení tenzometrů je zobrazeno ve výkresové dokumentaci v příloze D.

7.4.2 Siloměry a magnetoelastické snímače

Pro měření předpínacích sil v kabelech v zábradlí byly použity siloměry příslušného rozsahu umístěné pod kotvou na napínaném konci. Siloměry ověřovaly hodnoty kotevní předpínací síly a rovněž předpínací síly po zakotvení. Siloměr kabelu v zábradlí zavěšené varianty nesl označení SZ01 a kabelu visuté varianty SV01.

Cílem měření bylo mimo jiné napnout kabely zábradlí tak, aby se dle výpočtů dosáhlo konstantní hodnoty předpětí po celé délce kabelu, což ale díky ztrátám předpětí není možné. Proto byla zvolena metoda, kdy se dosáhne konstantní hodnoty předpětí z výpočtu alespoň na začátku, uprostřed a na konci kabelu.

Pro zjištění okamžitých ztrát předpětím, zejména ztráty třením, byly na druhém nenapínaném konci kabelů umístěny magnetoelastické snímače JZ01 a JV01. Společným vyhodnocením naměřených hodnot je možné ztráty třením vyčíslit a kabely dopnout tak, aby napětí uprostřed odpovídalo hodnotě předpětí z výpočtu. Na začátku kabelu (napínaný konec) se dosáhne konstantní projektované hodnoty napětí díky pokluzu a na konci kabelu (nenapínaný konec) se pomocí rektifikační podložky dopíná kabel opět do projektované hodnoty napětí (Obr. 7.20).



Obr. 7.20 Průběh napětí v kabelu po délce

Předpínací kabely v mostovce byly osazeny ME snímači JZ02 a JV02 pouze na nenapínaném konci z důvodu nedostatku potřebných siloměrů. Protože určení okamžitých ztrát tak nebylo možné zjistit, musel se provést jejich odhad na základě dosažených okamžitých ztrát v kabelech v zábradlí. Další postup pro dosažení projektované hodnoty napětí na začátku, uprostřed a na konci kabelu byl shodný jako u kabelů v zábradlí.

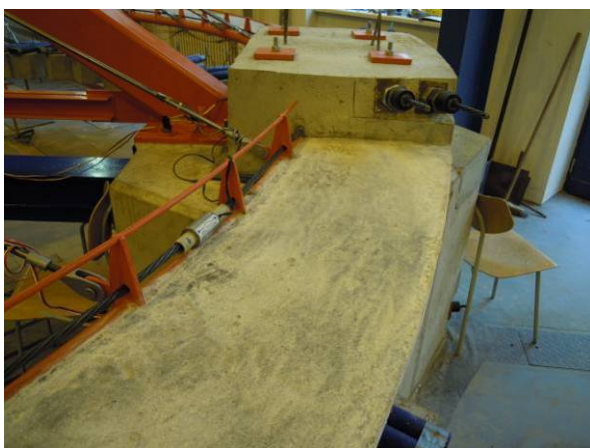
Přesné polohy ME snímačů a siloměrů jsou zobrazeny na výkresech v příloze D předkládané dizertační práce.



Obr. 7.21 Siloměr SV01 pod kotvou kabelu



Obr. 7.22 Rektifikační šrouby na koncích



Obr. 7.23 ME snímač JV01 kabelu zábradlí



Obr. 7.24 ME snímač JZ02 kabelu mostovky

7.4.3 Průhyboměry

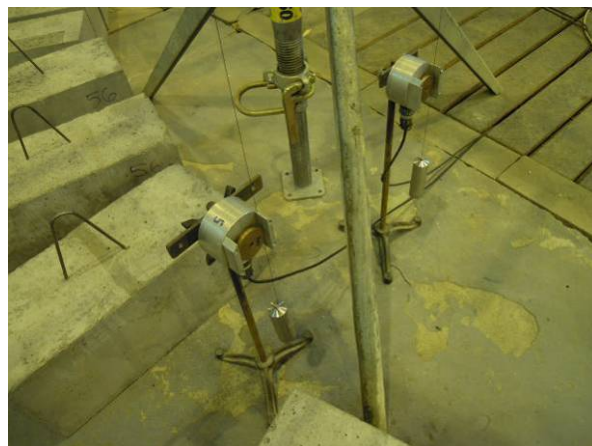
Měření průhybů konstrukce modelu bylo zajištěno potenciometrickými snímači, které byly instalovány po odstranění provizorního podepření mostovky (před osazením dodatečného závaží). Měřičské řezy byly zvoleny ve čtvrtinách modelu, tři snímače na zavěšené a tři na visuté variantě.

V každém měřickém řezu byly měřeny svislé posuny na obou koncích příčného řezu, tj. na spodní části ocelové trubky mostovky (bod 1 na Obr. 7.27) a na konzolovém okraji ocelových příčníků mostovky (bod 2 na Obr. 7.27). Mostovka nebyla po dokončení výstavby ve vodorovné rovině, a proto nebylo možné měřit přímo její náklon v příčném směru.

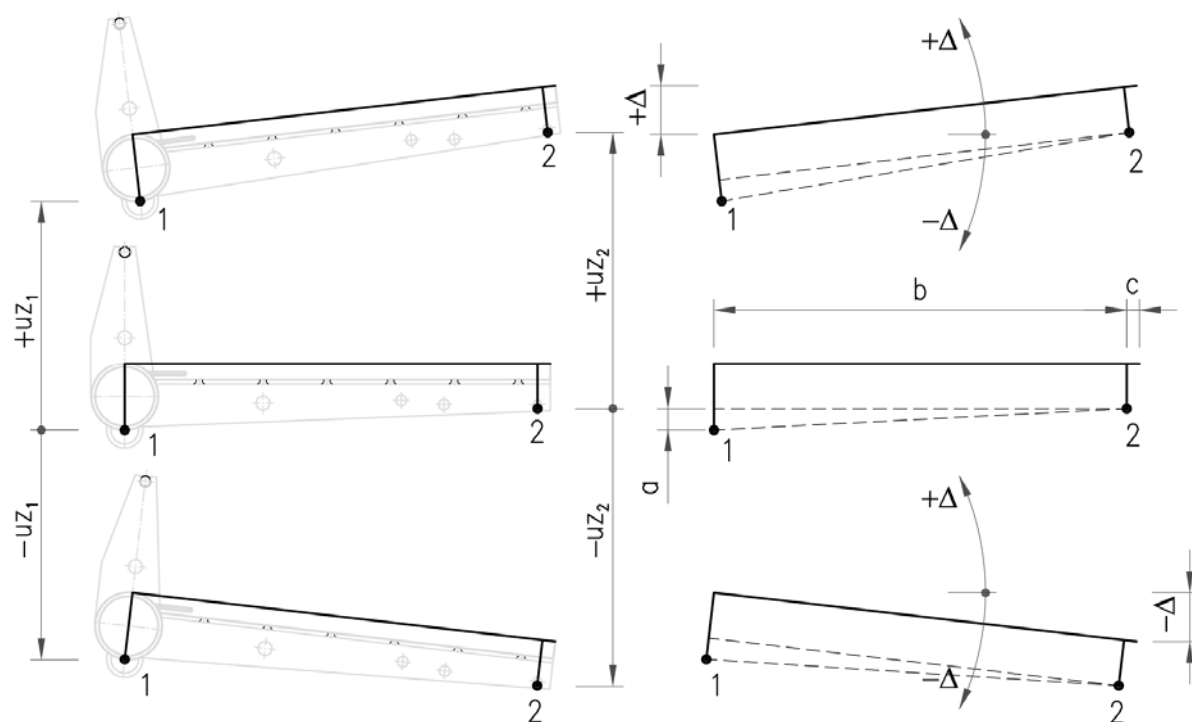
Pro výpočet náklonu mostovky Δ byl proto použit přepočet. V přepočtu by mělo být správně uvažováno i s počátečním náklonem mostovky, který byl ale zanedbán (na počátku tak byla mostovka uvažována jako vodorovná), protože hodnota počátečního náklonu byla velmi malá a ovlivňovala by tak celkový náklon v řádech setin milimetrů.



Obr. 7.25 Snímače průhybu v jednom měřičském řezu



Obr. 7.26 Detail snímačů s invarovým drátem s měřičským bodem



Obr. 7.27 Veličiny pro zjištění náklonu mostovky Δ

Pro náklon mostovky Δ bez vlivu počátečního náklonu byl odvozen dle Obr. 7.27 následující vztah:

$$\Delta = \frac{b \cdot (b + c) \cdot (uz_2 - uz_1 + a) - a \cdot (b + c) \cdot \sqrt{a^2 + b^2 - (uz_2 - uz_1 + a)^2}}{a^2 + b^2} \quad [m], \quad (7.1)$$

kde je a výškový rozdíl mezi měřenými body 1 a 2 při vodorovné mostovce [m], ($a = 0,023$ m),

- b půdorysný průmět mezi měřenými body 1 a 2 při vodorovné mostovce [m], ($b = 0,385$ m),
 c rozdíl šířky betonové desky a rozměru b [m] ($c = 15$ mm),
 uz_1, uz_2 svislé posuny v bodech 1 a 2 [m].

Snímače průhybu na zavěšené části nesou označení PZ01 až PZ06 a na visuté PV01 až PV06. Průhyby byly měřeny kontinuálně po celou dobu výstavby a v průběhu zatěžovacích zkoušek. Pro záznam hodnot byla opět použita ústředna HBM Spider 8 spojená s notebookem vybaveným měřicím softwarem Catman-Easy.

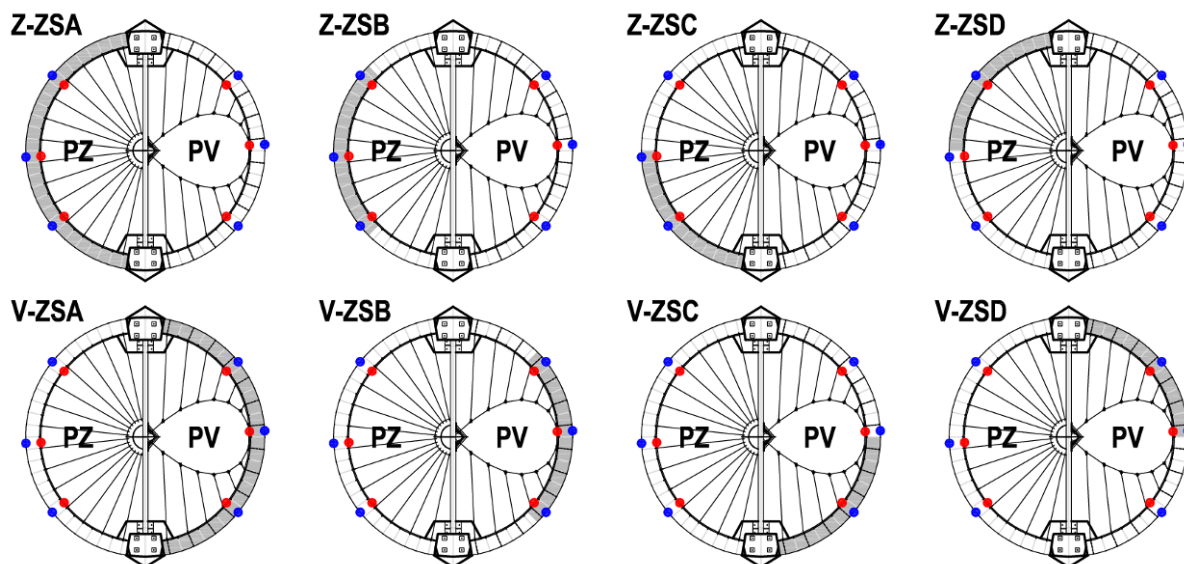
Přesné osazení průhyboměrů je zobrazeno na výkresech přílohy D.

7.5 Zatěžovací zkoušky modelu

Na dokončeném modelu byly nejprve provedeny základní zatěžovací zkoušky, ověřující jeho funkčnost a správnost vypočtených výsledků ze statické analýzy konstrukce, a mezní zatěžovací zkoušky, které stanovily únosnost konstrukce a mechanismus porušení.

7.5.1 Statická zatěžovací zkouška

Pro obě části modelu (každou polovinu zvlášť) byly uvažovány 4 zatěžovací stavy (Obr. 7.28). Spojité rovnoměrné zatížení o hodnotě 4 kNm^{-2} , představující zatížení lidmi, bylo postupně umístěno na celé délce mostovky, na jejím středu, a na obou jejích polovinách.



Obr. 7.28 Uvažované zatěžovací stavy – hodnota zatížení 4 kNm^{-2}

Zatěžovací zkouška byla provedena 21.2.2011 a všechny stavy byly změřeny během jednoho dne. Model byl postupně zatěžován válci tvořenými novodurovou trubkou průměru 200 mm a výšky 275 mm, které byly vyplněny prostým betonem. Jeden válec vážil 17,7 kg.

Zatížení o velikosti 4 kNm^{-2} bylo simulováno osazením třech těchto válců nad každým příčným mostovky.

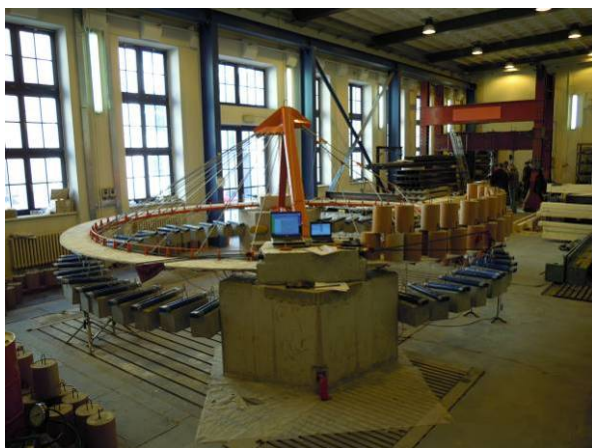
V jednotlivých zatěžovacích stavech proběhlo postupné přitížení modelu, následovala doba nutná na ustálení průhybu, postupné odlehčení a opět čekání na ustálení průhybu po ukončení zatěžovacího stavu. Přitěžování i odlehčování bylo rozděleno na tři postupné kroky v trvání 5–ti minut. Doba ustalování průhybu v obou případech (pritížení i odlehčení) byla 20 minut. Jeden zatěžovací stav trval tedy přesně 60 minut.



Obr. 7.29 *Zatěžovací stav V-ZSA*



Obr. 7.30 *Zatěžovací stav V-ZSB*



Obr. 7.31 *Zatěžovací stav V-ZSC*



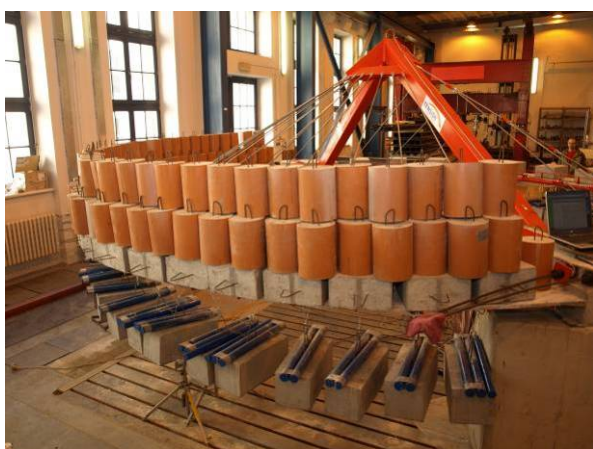
Obr. 7.32 *Zatěžovací stav V-ZSD*

7.5.2 Mezní zatěžovací zkouška

Mezní zkouška byla provedena pro každou polovinu modelu zvlášť. Zatížení bylo uvažováno jako 1,35 – násobek vlastní tíhy na obou polovinách a 2,20 – násobek užitého zatížení 4 kNm^{-2} na zkoušené polovině.

Mezní zkouška proběhla 28.2.2011, opět v jednom dni pro obě poloviny modelu. Pro simulaci výše uvedeného zatížení byly použity válce popsané v předchozí kapitole,

doplněné o betonové kvádry o rozměrech 330 x 350 x 180 mm z prostého betonu, vážící 48 kg. Pro sledovanou polovinu modelu byly betonové kvádry umístěny přímo na povrch mostovky (první řada zátěže) – jeden kvádr na každý příčný. Na horní povrch kvádrů byly poté umístěny válce ve třech vrstvách. Na druhé straně modelu (zatížené pouze 1,35 – násobkem vlastní tíhy) byly umístěny jen betonové kvádry v polovičním počtu – jeden kvádr na dva příčnky. Mezní zkouška každé poloviny modelu se opět skládala z postupného přitěžování, čekání na ustálení průhybu, z postupného odlehčování a čekání na ustálení průhybu po mezním stavu. Přitěžování i odlehčování mělo opět tři kroky trvající 55 minut, fáze ustálení při mezním zatížení a fáze odlehčení bez zatížení trvaly 50 minut. Celkem jeden mezní stav trval 3,5 hodiny.



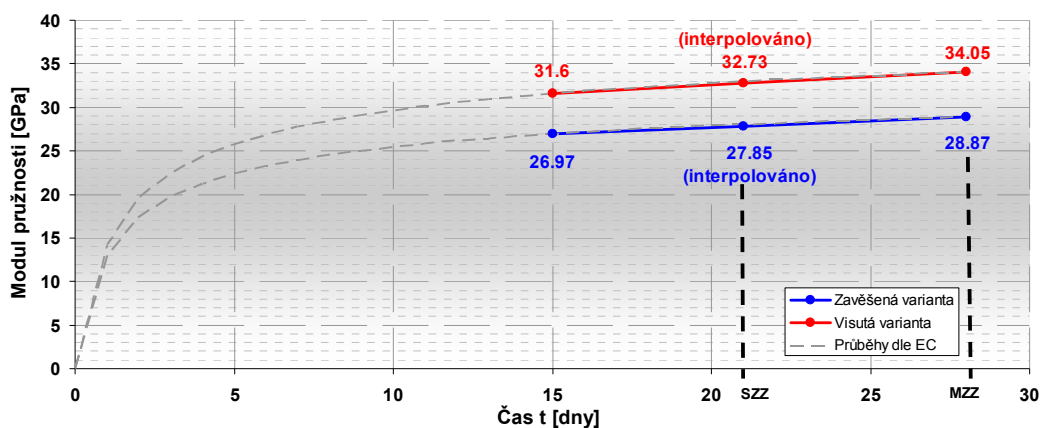
Obr. 7.33 Mezní zatěžovací zkouška pro zavěšenou část Z-MZZ



Obr. 7.34 Mezní zatěžovací zkouška pro zavěšenou část V-MZZ

7.6 Materiálové charakteristiky betonových směsí

Návrh jednotlivých receptur betonových směsí provedl prof. Ing. Ivailo Terzijski, CSc.



Obr. 7.35 Časový průběh modulu pružnosti betonu v tlaku

Pro srovnání fyzikálního a výpočtového modelu bylo nutné upřesnit ve výpočtovém modelu některé materiálové charakteristiky betonu mostovky, zejména pak objemovou hmotnost a moduly pružnosti.

Statický modul pružnosti byl zkoušen na trámcích o rozměrech 100 x 100 x 400 mm v 15–ti a 28–ti dnech. Hodnoty modulu pružnosti pro statickou zatěžovací zkoušku (SZZ), která se z časových důvodů musela konat ve 21–ti dnech, byly interpolovány (Obr. 7.35). Mezní zatěžovací zkouška (MZZ) se konala přesně ve 28–ti dnech.

Objemová hmotnost, pevnost betonu v tlaku a v tahu za ohybu (Tab. 7.2 a Tab. 7.3) se zjišťovaly na trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm.

Tab. 7.2 Fyzikální a mechanické vlastnosti vláknobetonové směsi zavěšené části

Stáří	Vlastnost	Jednotka	Hodnota
7 dní	Objemová hmotnost	kg/m ³	2348
	Pevnost v tlaku	MPa	57.8
	Pevnost v tahu za ohybu	MPa	5.9
14 dní	Objemová hmotnost	kg/m ³	2344
	Pevnost v tlaku	MPa	64.1
	Pevnost v tahu za ohybu	MPa	5.6
15 dní	Statický modul pružnosti	GPa	27.0
28 dní	Objemová hmotnost	kg/m ³	2349
	Pevnost v tlaku	MPa	69.1
	Pevnost v tahu za ohybu	MPa	6.6
	Statický modul pružnosti	GPa	28.9

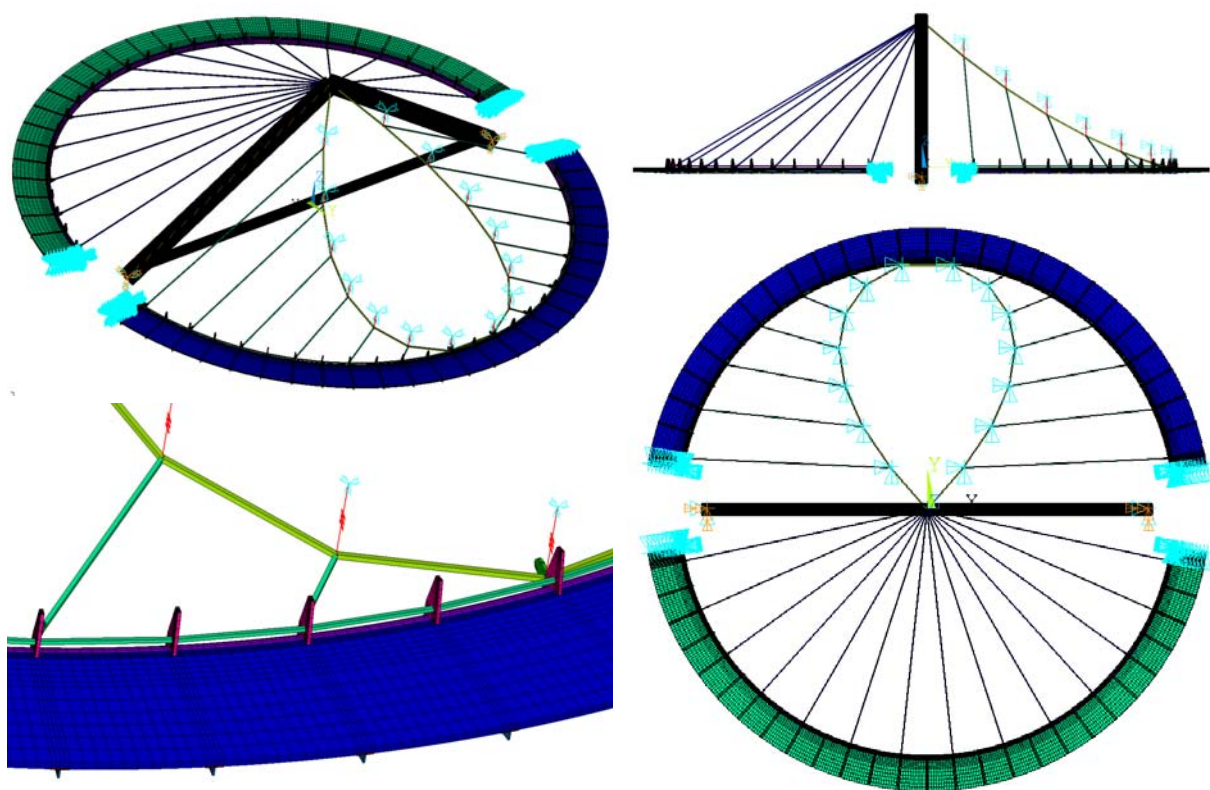
Tab. 7.3 Fyzikální a mechanické vlastnosti drátkobetonové směsi visuté části

Stáří	Vlastnost	Jednotka	Hodnota
7 dní	Objemová hmotnost	kg/m ³	2390
	Pevnost v tlaku	MPa	66.0
	Pevnost v tahu za ohybu	MPa	7.1
14 dní	Objemová hmotnost	kg/m ³	2404
	Pevnost v tlaku	MPa	77.6
	Pevnost v tahu za ohybu	MPa	7.7
15 dní	Statický modul pružnosti	GPa	31.6
28 dní	Objemová hmotnost	kg/m ³	2395
	Pevnost v tlaku	MPa	84.8
	Pevnost v tahu za ohybu	MPa	7.1
	Statický modul pružnosti	GPa	34.1

7.7 Výpočtové modely

Pro ověření namáhání jednotlivých částí modelu, pro zjištění posunů a náklonů mostovky a v neposlední řadě pro analýzu ocelového pylonu muselo být sestaveno a analyzováno několik výpočtových modelů. Tyto modely byly vytvořeny v programovém prostředí ANSYS se skutečnými rozměry testovaného modelu lávky.

První dva modely se diskrétně věnovaly mostovce, nejdříve ve variantě zavěšené a potom ve variantě visuté. U obou modelů byly vytvořeny ještě alternativy, které neuvažovaly spřažení ocelové a betonové části. Modely byly využity pro dimenzování příčníků, které by nesly prakticky celé zatížení betonové desky a proměnného zatížení.



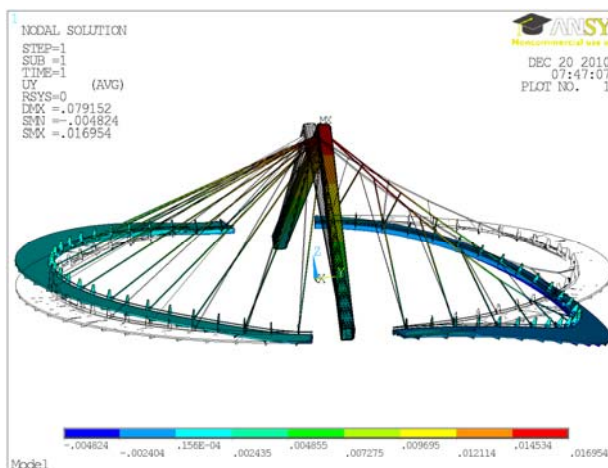
Obr. 7.36 Pohledy na výpočtový model

Spojení obou modelů vytvořilo třetí a čtvrtý výpočtový model. Třetí výpočtový model neobsahuje pylon, který je nahrazen neposuvnou podporou. Ve čtvrtém modelu je vymodelován ocelový pylon tvaru písmene A. Chování pylonu je důležité nejen pro svislé posuny a náklon mostovky obou variant při nesymetrickém zatížení, ale i pro zjištění příčného namáhání pylonu z hlediska dimenzování kotvení na opěrných blocích a stability proti překlopení celého modelu. Z výsledků čtvrtého modelu vyplývá, že pro vlastní tíhu jsou posuny mostovky ve všech směrech prakticky nezměněny, proti modelům bez pylonu. Pylon

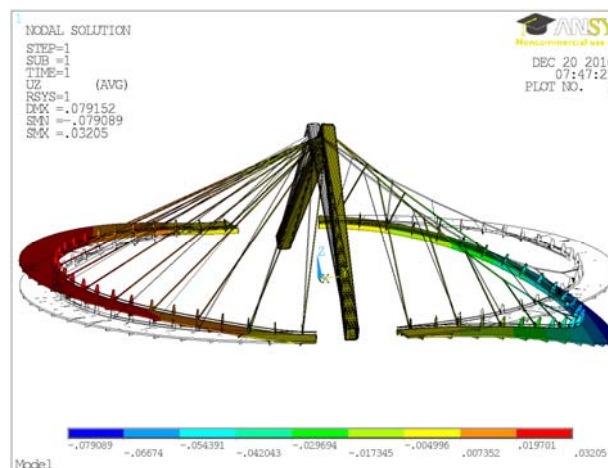
v příčném směru není prakticky namáhán, jeho namáhání tvoří pouze svislá reakce od závěsů a visutého lana.

Pro zjištění stability proti překlpení byl čtvrtý model zatížen na visuté straně dvojnásobkem proměnného zatížení chodci ($2 \times 4 \text{ kNm}^{-2} = 8 \text{ kNm}^{-2}$). Reakce z pylonu se pak dosadily do stabilitního výpočtu, který prokázal, že celý model je stabilní. Zatížení ještě vyvolává maximální příčné ohybové namáhání pylonu. Hodnoty ohybového namáhání jsou do $\pm 100 \text{ MPa}$ a převážnou část tvoří osově normálové namáhání.

Dalším porovnávacím kritériem je srovnání svislého posunu (ve směru osy z) od modelů bez pylonu a s pylonem. Pokud srovnáme dvojnásobek nahodilého proměnného zatížení umístěného pouze na visuté části, tak svislý posun mostovky uz uprostřed rozpětí je ve variantě bez pylonu $-32,00 \text{ mm}$. Posun pro variantu s pylonem je $uz = -79,00 \text{ mm}$. Je to způsobeno příčným náklonem pylonu o 17 mm . Svislý průhyb mostovky se přibližně dvakrát zhoršil, tzn. že záleží i na příčné tuhosti pylonu, která musí být uvažována.



Obr. 7.37 Posun ux (na visuté straně $2 \times 4 \text{ kNm}^{-2}$)



Obr. 7.38 Posun uz (na visuté straně $2 \times 4 \text{ kNm}^{-2}$)

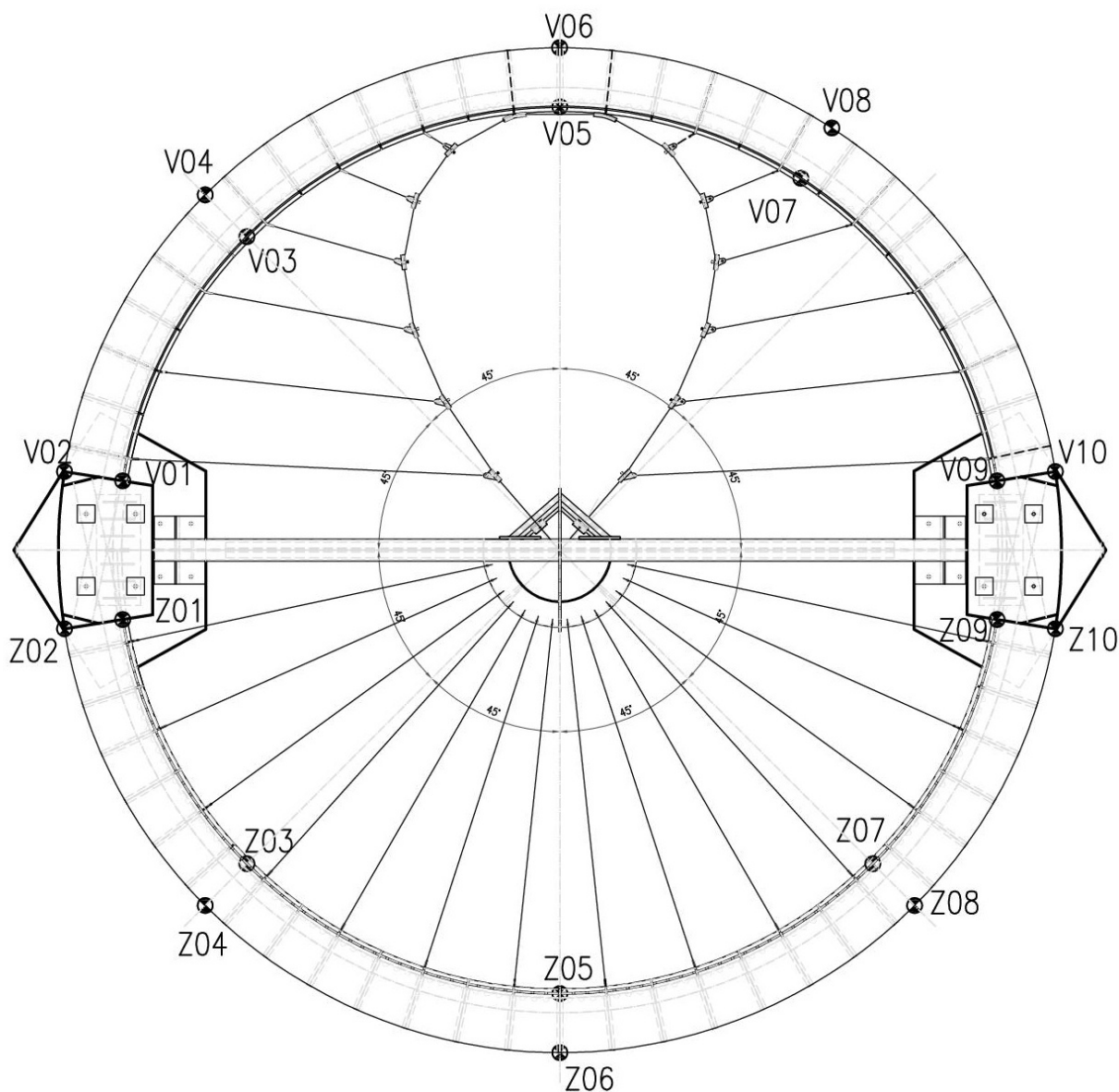
Všechny použité konečné prvky jsou převzaty ze studií v kapitolách 5 a 6. Pro modelování pylonu bylo využito prutového prvku BEAM188. Model byl také doplněn o „weak springs“ popsané v kapitole 6.3.1.

7.8 Srovnání výsledků mezi výpočtovým a fyzikálním modelem

7.8.1 Výchozí stav

Po skončení výroby ocelové konstrukce bylo zjištěno, že vlivem svařování tenkostěnných prvků se díky velkému bodovému tepelnému namáhání ocelová část mostovky příčně zkroutila, tzn. došlo k náklonu mostovky o cca $+17 \text{ mm}$ již z výroby. Proto bylo nutné od náklonů změřených ve výchozím stavu odečíst hodnoty výrobního náklonu.

Svislé posuny byly proto měřeny po dokončení výchozího stavu pomocí nivelačního přístroje a nivelační latě postupem technické nivelace. Od pevného bodu umístěného v úrovni horního povrchu mostovky u kotevního bloku (bod V01 v Obr. 7.39) se zaměřilo převýšení všech bodů rozmístěných na obou stranách mostovky (Obr. 7.39), ze kterých se pak vypočetly svislé posuny a náklony mostovky shrnuté v Tab. 7.4 a Tab. 7.5.



Obr. 7.39 Polohy bodů technické nivelace

Svislé posuny horního povrchu ocelové trubky (liché hodnoty s počátečním písmenem Z v Tab. 7.4) mezi kotevními bloky dosahují u zavěšené varianty nejvyšší hodnoty -9 mm v místě Z03 a u visuté varianty (liché hodnoty s počátečním písmenem V v Tab. 7.4) -14 mm v místě V07.

Hodnoty náklonu byly v posledním řádku v Tab. 7.5 opraveny o hodnotu výrobního náklonu. Výsledná hodnota náklonu uprostřed rozpětí dosahuje u zavěšené varianty -2 mm a u visuté varianty -10 mm.

Tab. 7.4 Svislé průhyby fyzikálního modelu stanoveného nivelací

	Z01 [mm]	Z02 [mm]	Z03 [mm]	Z04 [mm]	Z05 [mm]	Z06 [mm]	Z07 [mm]	Z08 [mm]	Z09 [mm]	Z10 [mm]
Výchozí stav	-4	3	-9	4	4	19	3	20	6	17
	V01 [mm]	V02 [mm]	V03 [mm]	V04 [mm]	V05 [mm]	V06 [mm]	V07 [mm]	V08 [mm]	V09 [mm]	V10 [mm]
Výchozí stav	0	12	-3	10	-10	-3	-14	-9	-2	23

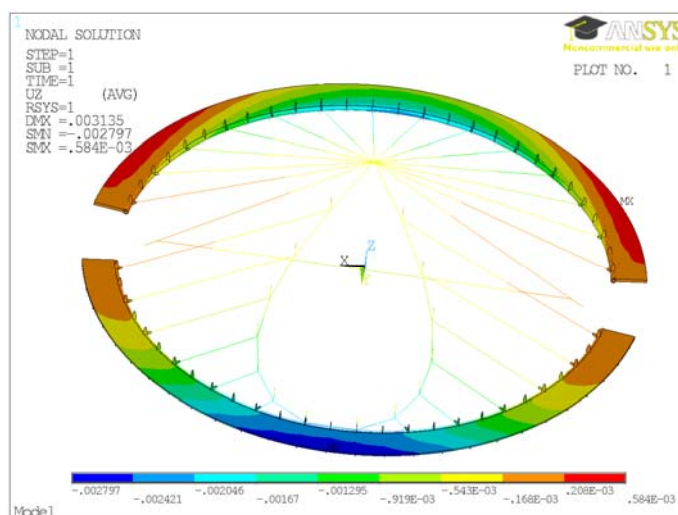
Pozn.: poloha míst pro technickou nivelaci viz Obr. 7.39

Tab. 7.5 Náklon mostovky fyzikálního modelu

	Z01-Z02 [mm]	Z03-Z04 [mm]	Z05-Z06 [mm]	Z07-Z08 [mm]	Z09-Z10 [mm]	V01-V02 [mm]	V03-V04 [mm]	V05-V06 [mm]	V07-V08 [mm]	V09-V10 [mm]
Výchozí stav	7	13	15	17	11	12	13	7	5	25
Výchozí stav*	-10	-4	-2	0	-6	-5	-4	-10	-12	8

* stav po odečtu výrobního náklonu mostovky $+17$ mm

Na výpočtovém modelu se podařilo dosáhnout svislého posunu horního povrchu ocelové trubky maximálně -2 mm shodně u zavěšené i visuté varianty a náklonů uprostřed rozpětí -1 mm u zavěšené a -2 mm u visuté varianty (Obr. 7.40).



Obr. 7.40 Svislé průhyby výpočtového modelu ve výchozím stavu [m]

Rozdílné hodnoty měření na fyzikálním modelu zejména u visuté varianty mohou být způsobeny dalšími jevy, které výpočtový model nezohlednil, například smršťování a dotvarování betonu. Oba jevy vyvolají v trubce tlakové namáhání (pokles mostovky), ale převažující vliv bude mít dotvarování betonu, protože smršťování betonu bylo do značné míry kompenzováno každodenním ošetřováním betonu až do stáří 14 – ti dní.

Rozdílné hodnoty měření se však dále do měření zatěžovacích zkoušek neprojeví, protože pro každý další zatěžovací stav se posuny stavů odečítají od výchozího stavu a stanovuje se rozdíl, který se srovnává s rozdílem od výpočetního modelu.

Předpínací kabely měly ve výchozím stavu napětí prakticky shodné s výpočetním modelem (Tab. 7.6). Cílem předpětí bylo nejen vyrovnat náklon, ale i vytvořit tlakovou rezervu v betonové desce, jak ukazuje Tab. 7.7.

Tab. 7.6 *Síly v předpínacích kabelech ve výchozím stavu*

Část	Místo	Poloha	Číslo	Analýza [kN]	Měření [kN]	Měření-Analýza [kN]
visutá	zábradlí	Z*	SV01	45.8	47.2	1.4
		K*	JV01	45.8	43.2	-2.6
	mostovka	Z*	JZ02	22.9	22.4	-0.5
zavešená	zábradlí	Z*	SZ01	50.5	50.7	0.3
		K*	JZ01	50.5	49.0	-1.5
	mostovka	Z*	JV02	29.1	28.3	-0.8

* Z začátek, K konec, začátek je brán jako opěra, kde jsou umístěny siloměry SZ01 a SV01

V Tab. 7.7 je vidět v prvních sloupcích napětí a přetvoření z analýzy výchozího stavu betonové desky bez zahrnutí vlivu smršťování a dotvarování a bez vlivu postupné výstavby. Pro porovnání jsou v posledních sloupcích Tab. 7.7 hodnoty napětí a přetvoření z fáze dopnutí kabelů v zábradlí a napnutí kabelů mostovky (poslední fáze před výchozím stavem), kde je tlaková rezerva cca 4,5 MPa (čtvrtý sloupec v Tab. 7.7).

Tab. 7.7 *Napětí a přetvoření v betonové desce mostovky*

Stav		Výchozí stav		Dopnutí kabelů			
		Napětí v analýze [MPa]	Přetvoření v analýze [μm/m]	Napětí v analýze [MPa]	Analýza [μm/m]	Měření [μm/m]	Rozdíl* [μm/m]
Deska	TZD01	-6.86	-262.3	-5.4	-202.1	-165.9	36.2
	TZD02	-7.44	-255.9	-4.1	-142.1	-142.2	-0.1
	TZD03	-6.03	-236.2	-4.9	-181.4	-135.5	45.9
	TZD04	-7.64	-263.2	-4.1	-144.2	-141.2	3.0
	TZD05	-5.86	-223.5	-3.6	-137.8	-130.8	7.0
	TZD06	-7.58	-261.6	-4.4	-151.4	-170.6	-19.2
Deska	TVD01	-6.26	-207.6	-4.4	-140.1	-103.3	36.8
	TVD02	-8.42	-246.4	-5.1	-148.3	-104.3	44.0
	TVD03	-7.50	-244.2	-5.4	-136.0	-140.3	-4.3
	TVD04	-8.93	-261.1	-4.6	-172.1	-160.2	11.9
	TVD05	-6.13	-205.7	-4.9	-155.8	-155.5	0.3
	TVD06	-8.67	-253.5	-4.8	-140.8	-137.4	3.3
	TVD07	-6.31	-204.1	-3.9	-127.2	-154.5	-27.3
	TVD08	-8.30	-244.1	-5.1	-150.4	-153.6	-3.1

Data z tenzometrů na ocelové trubce se do času statické zatěžovací zkoušky nepodařilo rekonstruovat. Při ošetřování betonové desky klopením zatekla i přes jejich ochranu voskem voda do tenzometrů a to způsobilo na řadě z nich dočasný zkrat. Jakmile

se přestalo kropit, tak po čase tenzometry vyschly a na začátku zatěžovací zkoušky byly opět funkční.

Posledním analyzovaným prvkem modelu byly závěsy. Přetvoření a síly z výchozího stavu jsou shrnuty v Tab. 7.8, kde jsou vidět relativně malé rozdíly v přetvoření mezi měřeními a analýzou. Jediný významný rozdíl je v krajním závěsu zavěšené varianty TZZ14. Rozdíl byl způsoben rektifikací sil, respektive přetvoření, v závěsech. Rektifikace probíhala po montáži celého modelu, kdy byla snaha dosáhnout přetvoření v závěsech podle výpočtu na matematickém modelu. Rektifikace spočívala v otáčení ocelové tyče závěsu, který byl osazen na obou stranách ocelovými vidličkami s protiběžnými závity. Otáčení závěsu jedním směrem zkracovalo jeho délku a zvyšovalo přetvoření a obráceně. Při rektifikaci jednoho závěsu docházelo ke změně přetvoření ve všech ostatních. V podstatě jde o nekonečný proces, který byl ukončen v rámci tolerance měření cca $\pm 20 \mu\text{m/m}$, který nebyl dodržen pouze u jednoho závěsu TZZ14.

Tab. 7.8 Přetvoření a síly v závěsech ve výchozím stavu

	Výchozí stav - přetvoření			Výchozí stav - síly				
	Analýza [$\mu\text{m/m}$]	Měření [$\mu\text{m/m}$]	Měření - Analýza [$\mu\text{m/m}$]	Analýza [kN]	Měření* [kN]	Měření** [kN]	Měření* - Analýza [kN]	Měření** - Analýza [kN]
TZZ01	112.2	96.4	-15.8	2.665	2.290	2.711	-0.375	0.046
TZZ02	135.6	164.7	29.1	3.220	3.912	4.533	0.692	1.313
TZZ03	139.5	160.8	21.4	3.312	3.820	4.435	0.508	1.123
TZZ04	139.2	168.5	29.3	3.307	4.003	4.633	0.696	1.327
TZZ05	139.9	177.2	37.3	3.323	4.208	4.867	0.886	1.544
TZZ06	140.6	150.3	9.7	3.339	3.569	4.141	0.230	0.801
TZZ07	140.9	136.8	-4.1	3.348	3.249	3.788	-0.098	0.441
TZZ08	140.9	136.8	-4.1	3.348	3.249	3.788	-0.098	0.441
TZZ09	140.6	149.3	8.7	3.339	3.546	4.116	0.207	0.776
TZZ10	139.9	156.0	16.1	3.323	3.706	4.308	0.383	0.985
TZZ11	139.2	136.8	-2.4	3.307	3.249	3.788	-0.057	0.482
TZZ12	139.4	154.1	14.7	3.312	3.660	4.253	0.348	0.941
TZZ13	135.6	149.3	13.7	3.220	3.546	4.116	0.326	0.896
TZZ14	112.2	174.3	62.2	2.664	4.140	4.800	1.476	2.136
TVZ01	131.9	106.0	-25.9	3.133	2.518	2.880	-0.614	-0.253
TVZ02	161.0	130.1	-30.9	3.824	3.089	3.430	-0.734	-0.394
TVZ03	179.5	161.8	-17.7	4.263	3.843	4.180	-0.420	-0.083
TVZ04	196.4	233.0	36.6	4.664	5.533	5.930	0.869	1.266
TVZ05	219.8	217.6	-2.2	5.221	5.168	5.450	-0.053	0.229
TVZ06	219.8	239.7	19.9	5.221	5.693	6.010	0.472	0.789
TVZ07	196.4	229.1	32.7	4.664	5.442	5.830	0.778	1.166
TVZ08	179.5	176.2	-3.3	4.263	4.186	4.550	-0.077	0.287
TVZ09	161.0	156.0	-5.0	3.824	3.706	4.110	-0.118	0.286
TVZ10	131.9	116.6	-15.3	3.133	2.770	3.160	-0.363	0.027

* použito modulu pružnosti $E_s = 210 \text{ GPa}$

** použito grafů z Obr. 7.40

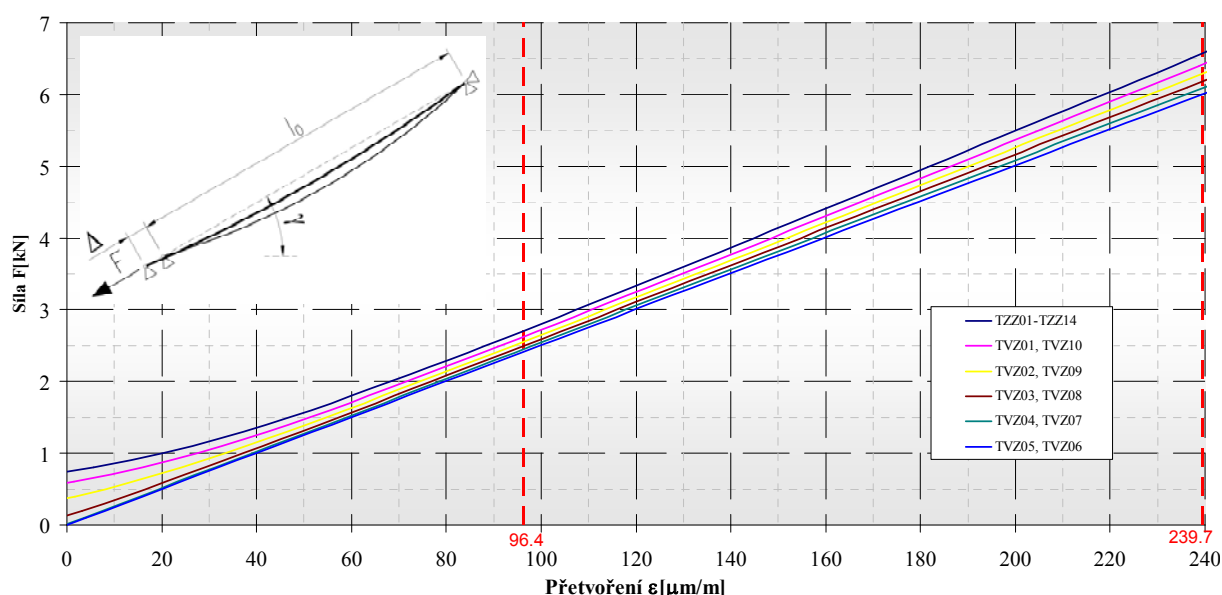
V pravé části tabulky Tab. 7.8 jsou z poměrného přetvoření vypočteny síly, které působí v závěsech. Rozdíly kopírují rozdíly v přetvoření (Hookův zákon). Je nutno si ale uvědomit, že při výpočtu je uvažováno pouze s osovou tuhostí závěsu, protože se předpokládá, že bude převažující, a s lineárním vztahem mezi napětím a přetvořením.

V [32] je popsán jev, že pokud je závěs namáhán menším napětím, než je 10% jeho únosnosti, může být chování takového závěsu nelineární, a tedy nemusí platit Hookův zákon. Když se vezme v úvahu největší přetvoření z měření ze závěsu TZV06 ve visuté části

a vynásobí se modulem pružnosti oceli, výsledkem je napětí, které je skutečně menší než 10% jeho únosnosti:

$$\sigma_{TVZ06} = \varepsilon_{TVZ06} \cdot E = 239,7 \cdot 10^{-6} \cdot 210 \cdot 10^9 = 50,34 \text{ MPa} < 0,1 \cdot f_u = 0,1 \cdot 510 = 51,5 \text{ MPa}. \quad (7.2)$$

Aby se ohybová tuhost závěsu zahrnula do analýzy, byla vytvořena studie, která vycházela z [32] (str. 148 a 149). Studie byla postupně aplikována na všechny závěsy. Principem bylo vyjmout jednotlivě každý závěs, který má svou délku l_0 a úhel γ a zatěžovat ho silou F od hodnoty 0 kN do hodnoty 7 kN (přírůstek 0,1 kN) a sledovat jeho přetvoření $\varepsilon = \Delta/l_0$. Závislost je potom vynesena na Obr. 7.41. Závěs byl modelován pomocí prutového prvku BEAM44 a základní vstupy pro všechny závěsy jsou v Tab. 7.9.



Obr. 7.41 Závislost přetvoření závěsů na jeho síle s vlivem ohybové tuhosti závěsů

Na Obr. 7.41 je červeně vyznačen rozsah měření (minimální a maximální dosažené přetvoření) a z něj vyplývá, že závislost pro všechny závěsy je v tomto úseku lineární (platí Hookův zákon). V Tab. 7.9 je hodnota tečného modulu pružnosti E_t v lineární části pro každý závěs. Hodnota modulu pružnosti s vlivem ohybové tuhosti je mírně vyšší (až o 15%), jak ukazuje poměr tečného modulu pružnosti ku klasickému sečnovému modulu pružnosti oceli v posledním řádku tabulky.

Vliv ohybové tuhosti je patrný více u delších závěsů, které jsou skloněny pod menším úhlem. Jednoduché vysvětlení je v tom, že bez ohybové tuhosti (závěs je na počátku rovný) se působením síly F závěs prodlouží o Δ a pokud se má s ohybovou tuhostí (závěs je na počátku prohnutý) dosáhnout stejné Δ , je třeba sílu F nepatrně zvýšit.

Síly v závěsech pak byly pomocí této studie vypočteny do Tab. 7.8. Vliv byl sice porovnán z výpočtem na matematickém modelu, ale je spíše teoretický, protože v matematickém modelu není efekt ohybové tuhosti zahrnut. Rozdíl je tedy pouze ve velikosti modulu pružnosti.

Tab. 7.9 Vstupní hodnoty a výsledky studie vlivu ohybové tuhosti závěsů

Varianta	Zavěšená	Visutá				
Označení závěsů	TZZ01-TZZ14	TVZ01, TVZ10	TVZ02, TVZ09	TVZ03, TVZ08	TVZ04, TVZ07	TVZ05, TVZ06
d [mm]	12					
A [m ²]	0.0001131					
f _u [MPa]	510					
f _y [MPa]	355					
γ [g/m ³]	7850					
E _s [GPa]	210					
l ₀ [m]	3.3960	2.7562	2.1258	1.5325	0.9970	0.5396
γ [°]	30.00	27.65	25.41	23.25	21.09	18.83
E _t [GPa]	241.6	235.9	231.9	228.2	224.9	221.7
E _t / E _s [-]	1.15	1.12	1.10	1.09	1.07	1.06

Na fyzikálním modelu byly použity závěsy Ø12 mm z materiálu S355. Podle předešlé studie je patrné, že závěsy jsou předimenzovány, což však mělo hned dva důvody:

- Závěsy nebyly důležitým sledovaným prvkem modelu, a proto nebylo žádoucí, aby závěsy při mezní zatěžovací zkoušce selhaly.
- Firma, která zprostředkovala zapůjčení závěsové techniky, měla skladem prvky pro závěsy průměru Ø12 mm.

V dalších analýzách proto nebude vyhodnocováno přetvoření ani síly v závěsech.

7.8.2 Statická zatěžovací zkouška

Porovnání výsledků průhybů mezi výpočtovým modelem (analýza) a fyzikálním modelem (měření) pro jednotlivé zatěžovací stavy jsou od všech čidel přehledně znázorněny v příloze C.

V Tab. 7.10 je sledován svislý průhyb v polovině rozpětí části zavěšené a svislý průhyb v polovině rozpětí části visuté. Zvlášť jsou zpracovány průhyby konzolového okraje ocelového příčnicku a spodního povrchu ocelové trubky. Poslední sloupce jsou věnované absolutnímu rozdílu mezi analýzou a měřením.

Další porovnávanou veličinou je náklon mostovky, který je rovněž uveden v Tab. 7.11. Znaménková konvence náklonu mostovky se řídí dle Obr. 7.27. Z výsledků je vidět, že visutá část modelu je ohybově méně tuhá než zavěšená část. Menší tuhost mostovky je způsobena visutým lanem, které změkčuje ohybovou tuhost mostu, což je patrné i u porovnání náklonů mostovky. Vzhledem ke stejnému uspořádání mostovky a stejnému rozpětí lze říci, že průhyby visuté varianty jsou podle měření 1,3 – 1,7 násobkem průhybů zavěšené varianty od stejně uspořádaného plošného zatížení.

Z porovnání analýzy a měření vyplývá, že u zatížení kladeného na zavěšenou část jsou výsledky analýzy nižší než u visuté části (jakoby na straně nebezpečné) a obráceně.

Zde je na místě poukázat na to, že výpočtový model nemůže nikdy plně vystihnout chování skutečné konstrukce a v případě, že je úloha silně nelineární a obsahuje lanové prvky, to platí dvojnásob. Proto byla snaha modifikovat výpočtový model a sledovat, jak se na něm budou měnit svislé posuny mostovky, což by mohlo vysvětlit některé jevy, které ovlivnily výsledky měření na fyzikálním modelu.

Tab. 7.10 Svislé průhyby v polovině rozpětí od zatěžovacích stavů

Svislý průhyb ocelové trubky v polovině rozpětí						
Část Čidlo	Analýza		Měření		Měření - Analýza	
	zavěšená	visutá	zavěšená	visutá	zavěšená	visutá
	PZ03 [mm]	PV03 [mm]	PZ03 [mm]	PV03 [mm]	PZ03 [mm]	PV03 [mm]
Z-ZSA	-15.0	18.1	-20.0	21.6	-5.0	3.5
Z-ZSB	-12.2	14.1	-15.2	15.7	-3.0	1.6
Z-ZSC	-8.3	9.6	-9.8	10.1	-1.5	0.5
Z-ZSD	-7.8	9.6	-10.5	11.3	-2.7	1.7
V-ZSA	14.6	-29.0	17.5	-26.7	2.9	2.3
V-ZSB	12.8	-30.5	13.4	-25.6	0.7	4.8
V-ZSC	7.8	-15.0	8.3	-12.8	0.4	2.3
V-ZSD	7.8	-16.8	8.5	-15.3	0.6	1.6
Svislý průhyb konzolového okraje ocelového příčnicku v polovině rozpětí						
Část Čidlo	Analýza		Měření		Měření - Analýza	
	zavěšená	visutá	zavěšená	visutá	zavěšená	visutá
	PZ04 [mm]	PV04 [mm]	PZ04 [mm]	PV04 [mm]	PZ04 [mm]	PV04 [mm]
Z-ZSA	-23.1	21.5	-27.0	26.0	-3.9	4.4
Z-ZSB	-19.3	16.8	-20.6	18.9	-1.3	2.1
Z-ZSC	-13.2	11.4	-13.7	12.1	-0.5	0.7
Z-ZSD	-11.9	11.4	-13.9	13.8	-2.0	2.4
V-ZSA	16.8	-39.7	19.8	-36.8	3.1	2.9
V-ZSB	14.7	-41.7	15.2	-35.7	0.6	6.0
V-ZSC	9.0	-20.5	9.4	-17.5	0.4	3.0
V-ZSD	9.0	-23.5	9.6	-21.7	0.6	1.7

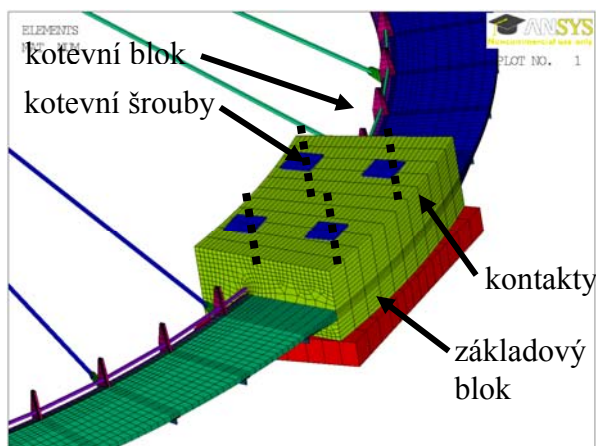
První modifikací byla změna modulů pružnosti betonu na obou částech modelu, která nevyvodila skoro žádnou změnu svislých posunů a to i při změně modulu pružnosti o ± 10 GPa. To se dá snadno vysvětlit pomocí podélné ohybové tuhosti mostovky. Ohybová tuhost v podélném směru ocelového průřezu mostovky je o hodně větší než ohybová tuhost betonové desky mostovky. To znamená, že v podélném směru nese většinu namáhání ocelová trubka, proto změna modulu pružnosti betonu nemá v uspořádání mostovky skoro žádný vliv.

Další modifikací, která by mohla svislé průhyby mostovky ovlivnit, bylo zkusit vystihnout lépe podmínky uložení. Nejprve byl přesně vymodelován kotevní blok spojený s mostovkou obou částí. Dále se domodelovaly kotevní šrouby, kotevní plechy, vrchní část základového bloku a mezi vrchní část základového bloku a spodní plochu kotevního bloku byly umístěny kontakty představující uložení kotevního bloku na podpory (Obr. 7.42).

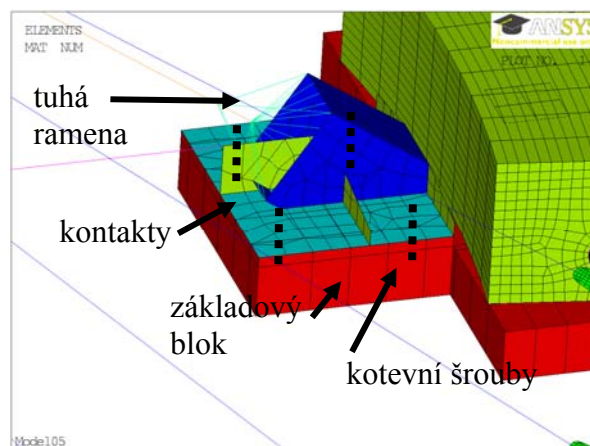
Tab. 7.11 *Náklon mostovky od zatěžovacích stavů*

Náklon mostovky Δ							
Část Z čidel	Analýza		Měření		Měření - Analýza		
	zavěšená PZ03-PZ04 [mm]	visutá PV03-PV04 [mm]	zavěšená PZ03-PZ04 [mm]	visutá PV03-PV04 [mm]	zavěšená PZ03-PZ04 [mm]	visutá PV03-PV04 [mm]	
Z-ZSA	-8.4	3.6	-7.2	4.6	1.2	1.0	
Z-ZSB	-7.4	2.8	-5.6	3.3	1.8	0.6	
Z-ZSC	-5.0	1.9	-4.0	2.1	1.0	0.2	
Z-ZSD	-4.2	1.9	-3.6	2.5	0.6	0.7	
V-ZSA	2.3	-11.2	2.5	-10.6	0.2	0.6	
V-ZSB	2.0	-11.6	1.9	-10.5	-0.1	1.2	
V-ZSC	1.2	-5.7	1.1	-4.9	-0.1	0.8	
V-ZSD	1.2	-6.9	1.2	-6.7	0.0	0.2	

Kontakty se modelovaly jako symetrické pomocí prvků TARGE170 a CONTA174. Typ kontaktu byl ROUGH, tj. umožňují přiblížení či oddálení bloků od sebe (při oddálení začaly být namáhány kotevní plechy a šrouby kotevního bloku), ale nedovolují jejich relativní pohyb (klouzáni). Modifikace se opět na svislých posunech projevila minimálně.



Obr. 7.42 *Kotevní blok*



Obr. 7.43 *Uložení pylonu*

Modifikace by se dala ještě doplnit o výstižnější vymodelování uložení pylonu. To zahrnovalo domodelování základového bloku pod pylonem, kotevních šroubů a kotevního plechu pylonu, mezi které se vložily kontakty.

Opět bylo využito symetrických kontaktů typu ROUGH jako v předchozím případě a platilo, že když se oddálí kotevní plech, tak budou namáhány kotevní šrouby pylonu.

Problém nastal ve spojení pylonu s kotevním plechem. Uzly pylonu modelovaného prutem bylo nutné spojit tuhými rameny s uzly kotevního plechu modelovaného skořepinou. Řešení ovšem výrazně ovlivňoval počet tuhých ramen. Proto byla oblast kotevního plechu vymodelována skořepinou celá, včetně patních výztuh a části pylonu, která se pak nad komplikovaným detailem spojila tuhými rameny s prutem pylonu (Obr. 7.43).

Tab. 7.12 Porovnání výsledků různého uložení pylonu pro stav Z-ZSA

Popis	Pylon			Mostovka - spodní povrch ocelové trubky	
	Pata pootočení [rad] 10^{-4}	Hlava		Visutá část - PV03 uz [mm] -	Zavěšená část - PZ03 uz [mm] -
		vodorovný posun [mm] -	pootočení [rad] 10^{-4}		
měření				21.6	-20.0
modifikace uložení pylonu	10.0	8.3	47.0	19.1	-15.9
dokonalé vetknutí pylonu	0.0	7.8	44.8	18.1	-15.0

Modifikace objasnila, jestli má na pootočení pylonu, resp. na svislé posuny mostovky, vliv osová tuhost kotevních šroubů, nebo tuhost kotevního plechu, resp. tuhost celého detailu. Pro porovnání výsledků byl vybrán stav Z-ZSA. Výsledky modifikace (Tab. 7.12) ukazují jen o málo nižší hodnoty než u dokonale vetknutého pylonu.

Tab. 7.13 Iterace tuhosti pro zavěšenou část pro stav Z-ZSA

Tuhost pružiny [N/m] 10^5	Pylon			Mostovka - spodní povrch ocelové trubky	
	Pata pootočení [rad] 10^{-4}	Hlava		Visutá část - PV03 uz [mm] -	Zavěšená část - PZ03 uz [mm] -
		vodorovný posun [mm] -	pootočení [rad] 10^{-4}		
100000	0.0	7.9	44.8	18.1	-15.0
10000	0.1	7.9	44.9	18.1	-15.0
1000	0.9	7.9	45.3	18.3	-15.2
100	8.2	8.7	49.3	20.0	-16.5
55	13.9	9.3	54.4	21.4	-17.6
33	21.2	10.0	56.4	23.2	-18.9
10	46.9	12.7	70.5	29.3	-23.6

Výpočtový model, který vznikl posledními dvěma modifikacemi, byl už příliš složitý a při zatížení visuté části výpočet nekonvergoval. Proto bylo rozhodnuto nahradit komplikovanou oblast uložení pylonu pružinou a její tuhost najít takovou, aby se nejvíce přiblížila měřenému svislému průhybu spodního povrchu ocelové trubky na obou částech modelu. Tuhost se hledala zvlášť pro zavěšenou variantu, kde byl použit stav Z-ZSA a pro visutou variantu, kde byl použit stav V-ZSA. Výsledky analýzy jsou shrnuty v Tab. 7.13, Tab. 7.14 a v příloze D.

Z výsledků vyplývá, že změkčením pružiny se výsledky zavěšené části přibližují měřeným, ale zároveň výsledky visuté se oddalují naměřeným. Po shrnutí všech modifikací ve výpočtovém modelu se dá konstatovat, že nejlepší přiblížení výsledků analýzy a fyzikálního modelu bylo dosaženo původním výpočtovým modelem s tuze vetknutým pylonem. V dalších kapitolách ale bude přesto uvedeno vždy srovnání s analýzou provedenou s různou úrovní tuhosti pružiny vetknutí pylonu.

Tab. 7.14 Iterace tuhosti pro visutou část pro stav V-ZSA

Tuhost pružiny [N/m] 10^5	Pylon			Mostovka - spodní povrch ocelové trubky	
	Pata pootočení [rad] 10^{-4}	Hlava		Visutá část - PV03 uz [mm] -	Zavěšená část - PZ03 uz [mm] -
		vodrovný posun [mm] -	pootočení [rad] 10^{-4}		
100000	0.0	8.3	47.2	-29.0	14.6
10000	0.1	8.3	47.2	-29.0	14.6
1000	0.9	8.3	47.7	-29.2	14.8
100	8.6	9.1	51.8	-31.0	16.1
10	49.1	13.3	74.0	-40.1	23.5

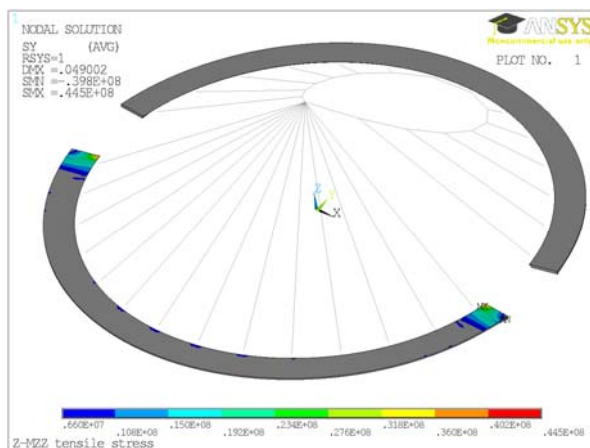
Porovnání výsledků poměrného přetvoření mezi výpočtovým modelem (analýza) a fyzikálním modelem (měření) od jednotlivých zatěžovacích stavů jsou od všech tenzometrů desky, ocelové trubky a pylonu přehledně znázorněny v tabulkách přílohy D, které ukazují velmi dobrou shodu napětí prakticky pro všechny tenzometry. Analýza provedená s různými tuhostmi uložení je provedena pouze pro čidla desky a ocelové trubky v polovině rozpětí. Výsledky jsou obdobné jako u svislých průhybů.

7.8.3 Mezní zatěžovací zkouška

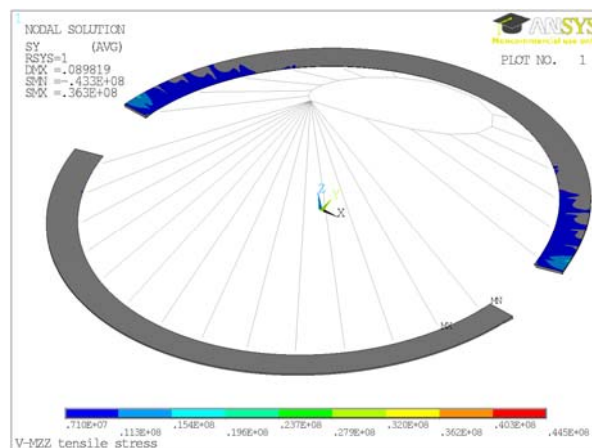
Srovnání průhybů a náklonů mostovky bylo provedeno podobným způsobem jako v předchozí kapitole u SZZ, jak ukazují Tab. 7.15 a Tab. 7.16. Původní výpočtový model je označen jako model bez trhlin, kde se rozdíly mezi analýzou a měřením rozcházejí. To se dalo v případě mezní zkoušky předpokládat, protože jak při zatěžování zavěšené části (označeno Z-MZZ), tak při zatěžování visuté části (označeno V-MZZ) došlo ke vzniku a rozvoji trhlin v betonové desce mostovky a dále zde vstupuje tuhost uložení pylonu, fyzikální nelineární chování betonu a další faktory. V rámci zpřesnění výsledků mezi měřeními a analýzou byl výpočtový model modifikován tak, že v místě tahových namáhání betonu překračujících pevnost v tahu se elementy mostovky zmrazily a tím simulovaly ve výpočtovém modelu trhliny. Model je dále označován jako model s trhlínami.

Na Obr. 7.44 a Obr. 7.45 je vidět tahové napětí při mezní zkoušce na výpočtovém modelu bez trhlin. Hodnoty jsou barevnou stupnicí kresleny pouze pro pevnost betonu v tahu příslušné části zjištěné na fyzikálním modelu a šedou barvou jsou hodnoty pro pevnost betonu v tlaku. U visuté části byla dosažena hodnota pevnosti betonu v tahu 7,10 MPa a u zavěšené

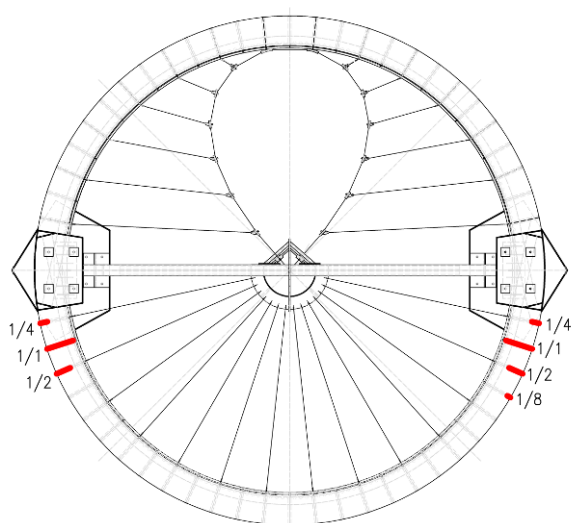
části 6,60 MPa. Na Obr. 7.46 a Obr. 7.47 jsou pro porovnání zaměřené trhliny na fyzikálním modelu. Trhliny vznikly v místech s největším tahovým namáháním. Výpočtový model nezohledňoval menší výšku desky v místech horní pásnice příčníků, kde z důvodu bednění (spodní povrch betonové desky byl ve stejné rovině jako spodní povrch pásnice příčníku) byla deska mostovky o 4 mm tenčí.



Obr. 7.44 Tahové napětí při zatížení zavěšené části (stav Z-MZZ – vláknobeton)



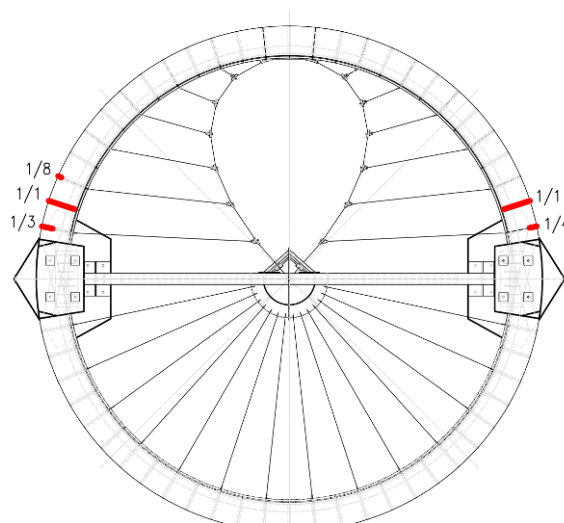
Obr. 7.45 Tahové napětí při zatížení visuté části (stav V-MZZ – drátkobeton)



LEGENDA ROZSAHU TRHLIN

- 1/1 PŘES CELÝ PRŮŘEZ (0,40 m OD VOLNÉHO OKRAJE)
- 1/2 PŘES POLOVINU PRŮŘEZU (0,20 m OD VOLNÉHO OKRAJE)
- 1/3 PŘES TŘETINU PRŮŘEZU (0,14 m OD VOLNÉHO KRAJE)
- 1/4 TRHLINA PŘES ČTVRTINU PRŮŘEZU (0,10 m OD VOLNÉHO OKRAJE)
- 1/8 TRHLINA PŘES OSMINU PRŮŘEZU (0,05 m OD VOLNÉHO OKRAJE)

Obr. 7.46 Zaměření trhlín mostovky na zavěšené části (po stavu Z-MZZ)



LEGENDA ROZSAHU TRHLIN

- 1/1 PŘES CELÝ PRŮŘEZ (0,40 m OD VOLNÉHO OKRAJE)
- 1/2 PŘES POLOVINU PRŮŘEZU (0,20 m OD VOLNÉHO OKRAJE)
- 1/3 PŘES TŘETINU PRŮŘEZU (0,14 m OD VOLNÉHO KRAJE)
- 1/4 TRHLINA PŘES ČTVRTINU PRŮŘEZU (0,10 m OD VOLNÉHO OKRAJE)
- 1/8 TRHLINA PŘES OSMINU PRŮŘEZU (0,05 m OD VOLNÉHO OKRAJE)

Obr. 7.47 Zaměření trhlín mostovky na visuté části (po stavu V-MZZ)

Oslabené průřezy nad příčníky pak celkem logicky vedly ke vzniku trhlín v těchto místech. Porovnání svislých průhybů modelu s a bez trhlín se liší pouze v řádu několika

milimetrů, což opět dokazuje (stejně jako u modifikace výpočtového modelu změnou modulu pružnosti u SZZ), že v podélném směru nese většinu namáhání ocelová trubka.

V příloze D je dále zpracován vliv tuhosti pylonu jako u SZZ. Výsledky ukazují, že čím je uložení pylonu měkčí, tím se výsledky analýzy více přibližují měření. Pro tuhost 3,30 MN/m u modelu s trhlinami jsou výsledky prakticky srovnatelné. Z toho plyne, že tuhost pylonu ovlivňuje dosažené hodnoty MZZ a je nutno s ní počítat.

Výsledky přetvoření ocelové trubky a betonové desky mostovky mezi měřením a analýzou u modelu bez trhlin jsou podobné. Výjimkou jsou některé tenzometry (hlavně TZD01 a TZD02) na zavěšené části, které ukazují rozdílná znaménka při mezním zatížení visuté části. Další výsledky jsou přehledně zpracovány v příloze D.

Tab. 7.15 Svislé průhyby v polovině rozpětí od mezní zatěžovací zkoušky

Svislý průhyb ocelové trubky v polovině rozpětí						
Část Čidlo	Analýza		Měření		Měření - Analýza	
	zavěšená	visutá	zavěšená	visutá	zavěšená	visutá
	PZ03 [mm]	PV03 [mm]	PZ03 [mm]	PV03 [mm]	PZ03 [mm]	PV03 [mm]
Z-MZZ bez trhlin	-30.4	32.3	-57.3	61.5	26.9	-29.3
Z-MZZ s trhlinami	-31.7	32.0	-57.3	61.5	25.5	-29.5
V-MZZ bez trhlin	29.4	-64.5	49.0	-78.3	-19.6	13.8
V-MZZ s trhlinami	29.2	-65.3	49.0	-78.3	-19.8	13.0
Svislý průhyb konzolového okraje ocelového příčnicku v polovině rozpětí						
Část Čidlo	Analýza		Měření		Měření - Analýza	
	zavěšená	visutá	zavěšená	visutá	zavěšená	visutá
	PZ04 [mm]	PV04 [mm]	PZ04 [mm]	PV04 [mm]	PZ04 [mm]	PV04 [mm]
Z-MZZ bez trhlin	-48.9	36.1	-82.1	67.4	33.2	-31.3
Z-MZZ s trhlinami	-50.9	35.7	-82.1	67.4	31.2	-31.7
V-MZZ bez trhlin	31.3	-89.5	54.3	-115.2	-23.0	25.8
V-MZZ s trhlinami	30.9	-90.7	54.3	-115.2	-23.4	24.5

Tab. 7.16 Náklon mostovky od mezní zatěžovací zkoušky

Náklon mostovky Δ						
Část Z čidel	Analýza		Měření		Měření - Analýza	
	zavěšená	visutá	zavěšená	visutá	zavěšená	visutá
	PZ03-PZ04 [mm]	PV03-PV04 [mm]	PZ03-PZ04 [mm]	PV03-PV04 [mm]	PZ03-PZ04 [mm]	PV03-PV04 [mm]
Z-MZZ bez trhlin	-19.2	4.0	-25.7	6.1	-6.5	2.1
Z-MZZ s trhlinami	-19.9	3.8	-25.7	6.1	-5.8	2.3
V-MZZ bez trhlin	1.9	-25.9	5.5	-38.2	3.5	-12.3
V-MZZ s trhlinami	1.8	-26.3	5.5	-38.2	3.7	-11.9

7.9 Měření dynamické odezvy

Účelem měření dynamické odezvy lávek je ověřit druh kmitání a hodnoty frekvencí vlastních tvarů (viz kapitola 3.2.1 Modální analýza) a vyhodnocení ustálené odezvy sledovaných míst, zejména měření rychlosti a zrychlení (viz kapitola 3.2.2 Harmonická analýza). Hodnoty frekvencí a druhu kmitání se určují tak, že na konstrukci se umístí budič a měří se na několika místech posunutí. U budiče lze nastavovat frekvenci, a pokud dojde k rezonanci budiče a konstrukce, tak se jedná o vlastní tvar konstrukce. V případě vyhodnocení ustálené odezvy se vytipují místa s největší výchylkou, do kterých se umístí budič, a snímá se zrychlení konstrukce, které se porovná s dovolenou hodnotou.

Pro porovnání dynamického chování mostní konstrukce by měl být její model optimalizován na dynamické zkoušení. Dynamické chování ovlivňuje například rozložení hmoty (matice hmotnosti), které u mostovky zkoušeného modelu s ohledem na podvěšené balastní závaží není situováno v jejím těžišti, atd.

Provedený fyzikální model byl optimalizován pouze na statické zatížení, takže není možné z jeho dynamické odezvy usuzovat na dynamické chování skutečné konstrukce.

Je možné ovšem provést srovnání dynamické odezvy mezi fyzikálním a výpočetním modelem. Cílem bude odhad klíčových frekvencí modelu lávek a jejich porovnání s výpočetním modelem.

Celé dynamické měření bylo provedeno za pomoci prof. Ing. Jaroslava Smutného, CSc. Na FAST v současné době není dostupná vhodná budící jednotka pro tento druh konstrukce a buzení, a proto byl model lávky vybuzen rozkýváním rukou osoby o váze 85 kg tak, aby působící zatížení bylo přibližně na stejné úrovni.



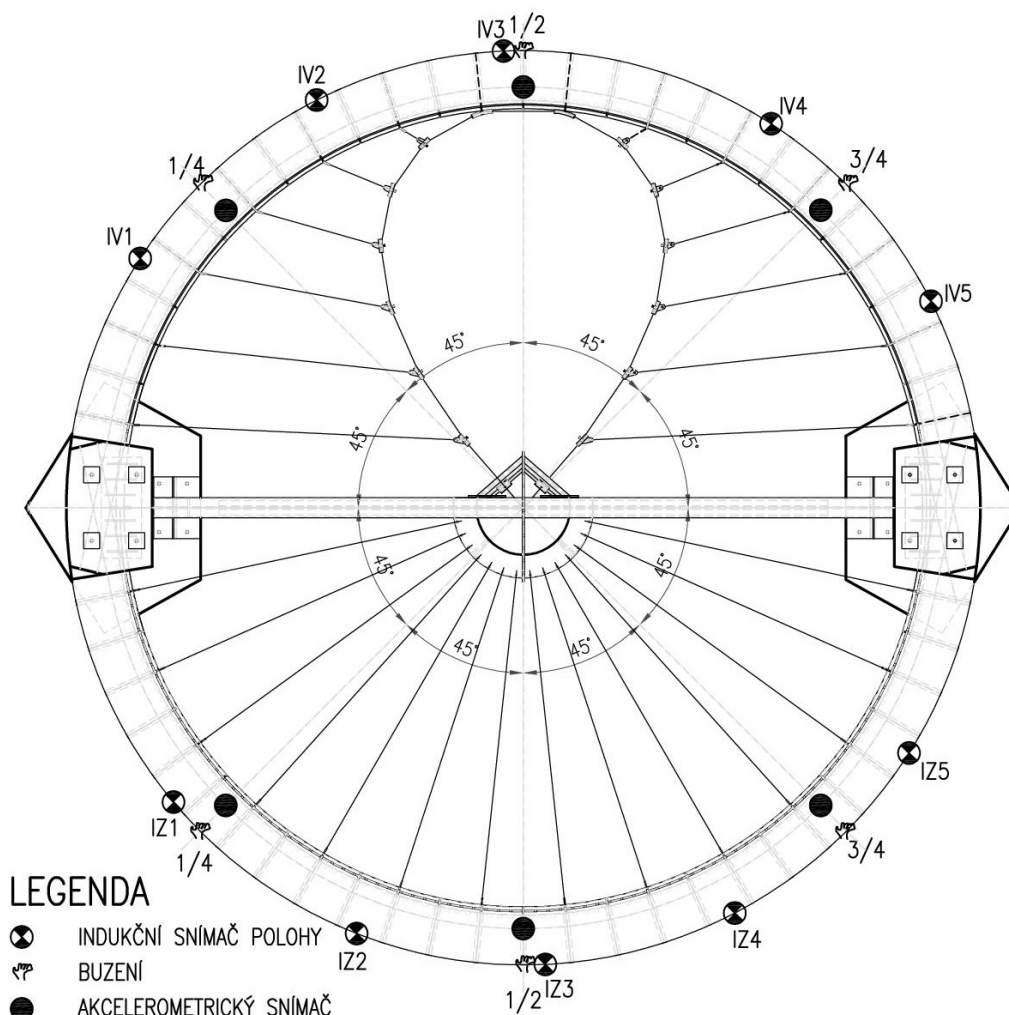
Obr. 7.48 Měřicí ústředna, indukční snímač polohy (průhybů)



Obr. 7.49 Akcelerometrický snímač BK 8340

K měření odezvy lávky na buzení byl použit 10 – ti kanálový multianalizátor Pulse 3560 D s pěti indukčními snímači polohy (vhodné pro oscilující pohyby s velmi malými zdvihy). Snímače byly osazeny pouze na vnější stranu modelu (konzolový okraj

desky) vždy na příslušnou část modelu, která se měřila, buď visutá, nebo zavěšená. Vlastní odezva byla snímána přesným seizmickým akcelerometrickým snímačem BK 8340, což je speciálně vyvinutý snímač pro potřebu nízkofrekvenčních měření na velkých konstrukcích, který se vyznačuje vysokou citlivostí a frekvenčním rozsahem od 0,1 Hz do 1500 Hz.

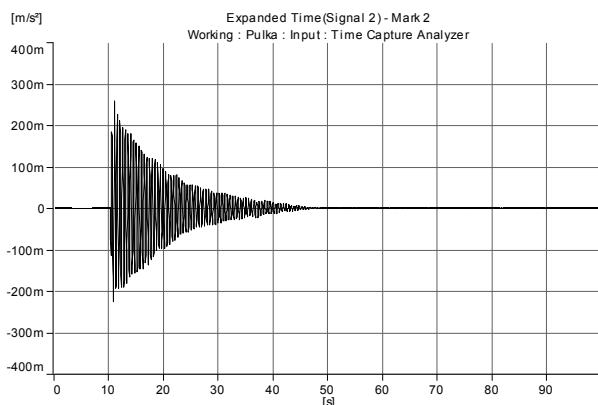


Obr. 7.50 Polohy akcelerometrických snímačů, indukčních snímačů a buzení

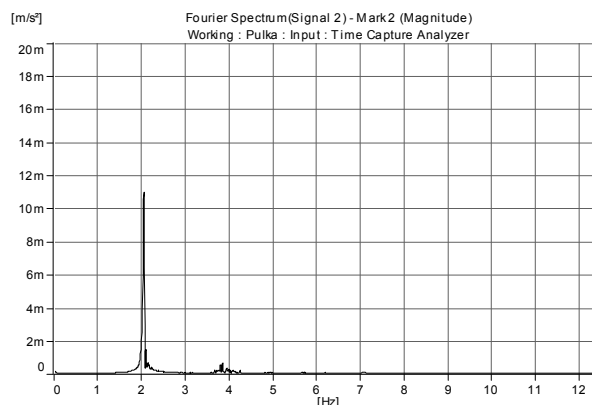
Snímač byl na měřenou konstrukci uchycen s využitím včelího vosku. Jeho nejvhodnější poloha byla určena na základě výpočtového modelu a provedených zkušebních měření. Buzení probíhalo na příslušné části modelu v bodech po obvodu lávky v následujících pozicích – ve čtvrtině (1/4), v polovině (1/2) a ve třech čtvrtinách (3/4), viz Obr. 7.50. Vzhledem k neznámé velikosti síly buzení (rozkývání rukou) se nemohl zpracovat druh kmitání, jeho tvar ani ustálená odezva sledovaných míst, a proto byly vyhodnoceny pouze hodnoty vlastních frekvencí.

K vyhodnocení vlastních frekvencí byla použita spektrální analýza ve frekvenční rovině formou amplitudového spektra (Obr. 7.52). Grafy časové odezvy zrychlení (Obr. 7.51) jsou na buzení použity jen pro ilustraci chování lávky v čase. Nejsou však normovány

na působící budící zatížení. V průběhu měření byl vždy ukládán časový průběh zrychlení zjištěný na snímači zrychlení. Začátek měření byl synchronizován s rozkmitáním lávky. Každé měření bylo ukončeno po cca 50 s.

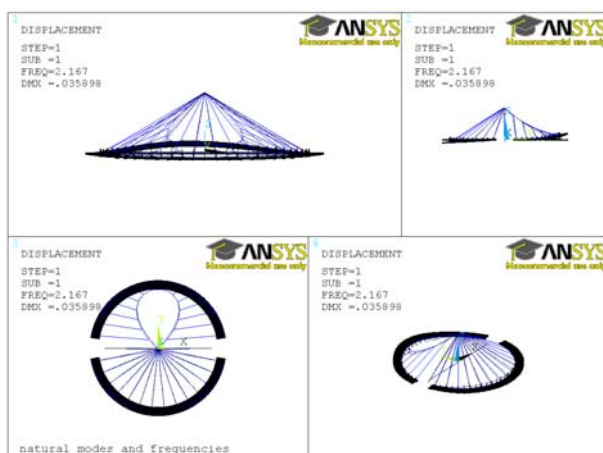


Obr. 7.51 Časová odezva zrychlení – buzení v 1/2 visuté části

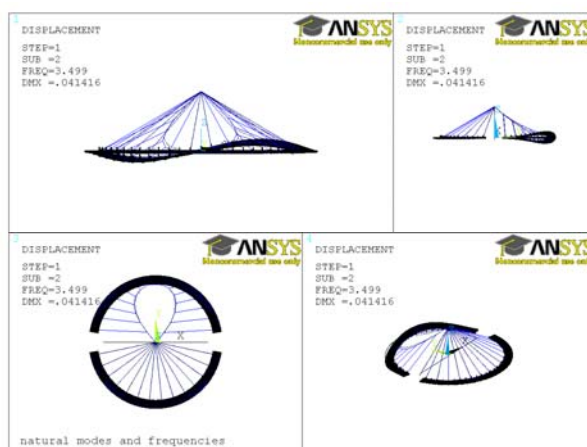


Obr. 7.52 Amplitudové spektrum – buzení v 1/2 visuté části

Z naměřených dat byla postupně vypočítána pro jednotlivé body buzení frekvenční amplitudová spektra. Je vhodné podotknout, že osy v těchto grafech mají lineární měřítka.



Obr. 7.53 První vlastní svislý ohybový tvar



Obr. 7.54 Druhý vlastní svislý ohybový tvar

U všech grafů zobrazujících amplitudová frekvenční spektra pro obě části a všechna místa je patrná klíčová hodnota na frekvenci cca 2,1 Hz. Další hodnoty jsou ve frekvenčních intervalech od 3,4 Hz do 4,2 Hz a 4,8 až 6 Hz, jsou však o téměř řád nižší.

Analýza vlastních tvarů byla provedena i na výpočtovém modelu. První ohybový tvar je znázorněn na Obr. 7.53 a má hodnotu 2,17 Hz, další ohybový tvar je na Obr. 7.54 a má hodnotu 3,50 Hz. Je tedy vidět velmi dobrá shoda s naměřenými údaji.

Z výše uvedeného vyplývá, že předběžné určení vlastních frekvencí je možné i touto metodou, kdy se pro buzení použije rozkývání, což je pro model naprosto dostačující.

8. Závěry dizertační práce

Konstrukce lávky, kde je mostovka půdorysně zakřivená a zavěšená pouze na vnitřním okraji, může velmi dobře fungovat, jak z dosavadních výsledků vyplývá, pro běžné zatížení působící na lávkách, jak pro prosté zavěšení, tak i pro použití visutého lana ve variantě vnitřní. Konstrukce představují alternativu klasických lávek a umožňují navrhnout architektonicky a technicky velmi zajímavá řešení.

Z velkého množství různých křivek pro mostovky byl vybrán tvar půlkružnice, který byl použit pro všechny studie i následný model v měřítku 1:10.

Je na místě připomenout základní cíle práce a provést zhodnocení celé práce. Cíle byly:

1. Analýza rovnováhy a volba uspořádání příčného řezu vhodného pro zavěšení mostovky na vnitřní straně.
2. Vypracování studie, postupu nalezení výchozího tvaru závěsů a následná statická a dynamická analýza vybrané půdorysně zakřivené zavěšené lávky.
3. Vypracování studie, postupu nalezení výchozího tvaru visutého lana a závěsů a následná statická a dynamická analýza půdorysně zakřivené visuté lávky.
4. Experimentální ověření navržených konstrukcí.

1. Analýza rovnováhy a volba uspořádání příčného řezu vhodného pro zavěšení mostovky na vnitřní straně

V první části práce bylo popsáno, jak navrhnout uspořádání příčného řezu a polohu bodu zavěšení tak, aby byla dodržena rovnováha v průřezu a příčný řez nebyl kroucen od vlastní tíhy ani od stálých složek.

Nejdříve byla provedena analýza na průřezu bez vlivu předpětí. Aplikace podmínek rovnováhy na průřez bez předpětí vedla k jednoduchým závěrům o existenci tzv. centra závěsů, tj. bodu, do kterého když bude směřovat rovina závěsu, tak budou podmínky rovnováhy splněny vždy. Centrum závěsů se ověřilo na jednoduché studii půdorysně přímé jednostranně zavěšené mostovky betonového komorového příčného řezu. Mostovka byla podepřena tak, aby nedošlo k posunutí v příčném směru, ale pouze k natočení. Výpočtový model studie byl vytvořen pomocí prutových prvků v programovém prostředí ANSYS, který je pravděpodobně nejvhodnější program pro tyto druhy konstrukcí.

Po provedení výpočtu pouze s vlastní tíhou zůstala mostovka ve všech řezech u závěsů ve vodorovné poloze, což stačilo jako důkaz platnosti předchozích vztahů. Ve studii bylo vidět, že rovnováha se může jednoduše porušit, když se posune bodem zavěšení nahoru nebo dolů. Posunutí bodu zavěšení se dá využít tak, že jevy, které porušují rovnováhu, by se jednoduše eliminovaly drobnou korekcí bodu zavěšení směrem nahoru nebo dolů. Teoreticky pomocí posunu bodu zavěšení lze každý příčný řez vyrovnat do vodorovné polohy.

Poslední část prvního cíle se zabývala analýzou průřezu s předpětím. Předpjatý průřez mostovky, ve kterém jsou vedeny přepínací kabely, má několik výhod. První výhodou, v případě mostovky tvořené jako betonová deska nebo betonová komora, je vytvoření tlakové rezervy, čímž se minimalizuje tahové namáhání krajních vláken mostovky od ohybu. Další výhoda tkví v tom, že pokud bude mostovka půdorysně zakřivena, tak radiální účinky předpínacích kabelů mohou pozitivně ovlivnit rovnováhu v příčném řezu.

Výsledkem analýzy průřezu s předpětím pak je, že pomocí velikosti momentu od předpětí můžeme umístit bod zavěšení prakticky kamkoli. Důležité ovšem je, aby půdorysný průmět závěsu a radiální výslednice kabelů byly kolmé na křivku mostovky. To nastane například, pokud zakřivení mostovky bude tvořit kružnice.

2. Vypracování studie, postupu nalezení výchozího tvaru závěsů a následná statická a dynamická analýza vybrané půdorysně zakřivené zavěšené lávky

Nalezení výchozího tvaru konstrukce je jedna z nejdůležitějších částí návrhu zavěšených konstrukcí. Pro ověření a zjištění postupu pro hledání výchozího stavu se vytvořila studie lávky. Mostovka studie ve tvaru půlkružnice byla zavěšena pouze na vnitřním okraji. Půdorysný průmět závěsů kolmý na křivku mostovky směřoval do jednoho bodu – vrcholu pylonu modelovaného jako neposuvný bod. Mostovka se doplnila ještě o volné předpínací kabely. V konstrukci bylo potřeba zjistit polohu všech předpínacích kabelů a polohu bodu zavěšení tak, aby na konstrukci platily podmínky rovnováhy v průřezu a konstrukce se tak nacházela ve výchozím stavu.

Postup byl takový, že v první fázi se zvolila poloha a velikost předpínacích kabelů v příčném řezu. Síly v kabelech se odhadly tak, aby se v betonové části mostovky vyvodila tlaková rezerva. Ve druhé fázi se podle podmínek rovnováhy na průřezu hledala poloha bodu zavěšení. Pro další návrhy postačí provést podmínky rovnováhy pouze v místech závěsů okolo poloviny rozpětí, popřípadě provést drobnou korekci. Body zavěšení u ostatních závěsů potom zvolíme ve stejné úrovni. Zdůvodněno je to tím, že na drobné odchylky bodu zavěšení u této konstrukce cca do 10 mm není konstrukce tolik citlivá, proto průměrování polohy bodu zavěšení ze všech závěsů, tzn. stejná úroveň bodu zavěšení, má smysl ve zjednodušení návrhu a výroby.

Cílem hledání výchozího tvaru zavěšené konstrukce bylo najít síly a poměrné přetvoření v závěsech takové, aby se dosáhlo nulových svislých posunů mostovky v místech závěsů. Vyzkoušely se čtyři metody pro nalezení výchozího tvaru. Nejlepší výsledky dávala poslední metoda – metoda vyrovnání svislých posunů. Metoda je iterační a na začátku potřebuje libovolné dva kroky. Ve třetím kroku je pak přetvoření v každém závěsu upraveno tak, aby lineární extrapolace nebo interpolace svislého posunu horního povrchu trubky v místě závěsu byla rovna nule, což se podařilo s nečekanou přesností.

V posledním kroku se provedla statická a dynamická analýza. Pro statickou analýzu se výpočtový model zatížil různými polohami rovnoměrného spojitého zatížení chodci

a zatížení teplotou. Největší průhyb vykazalo zatížení chodci, které bylo situováno na polovině rozpětí.

Dynamická analýza zahrnovala výpočet vlastních tvarů konstrukce a z důvodu velmi nízkých prvních ohybových frekvencí i odezvu konstrukce na harmonické buzení. První svislá ohybová frekvence o hodnotě 1 Hz nemusela být kontrolována na možnost vzniku rezonance vodorovného a svislého kmitání v oblasti frekvence lidských kroků. Další podmínka na kmitání vlivem bočního větru (*Phenomen of Flutter*) byla splněna. Z výsledků harmonické analýzy vyplynulo, že konstrukce vykazovala mírně zvýšenou rychlost kmitání, ale limitní zrychlení konstrukce už bylo v pořádku.

3. Vypracování studie, postupu nalezení výchozího tvaru visutého lana a závěsů a následná statická a dynamická analýza půdorysně zakřivené visuté lávky

Nalezení postupu výchozího tvaru visuté zakřivené konstrukce je opět jeden z nejdůležitějších částí návrhu a hned na začátku se rozdělil do tří důležitých kroků.

V prvním kroku se našla předběžná výchozí poloha visutého lana. Postup se rozdělil na výpočet svislého směru a vodorovného směru. Svislý směr byl řešen pomocí převodu visutého lana na řešení rovinného, dokonale ohebného lana. Vodorovný směr byl výsledkem iterace zjednodušeného výpočtového modelu v programu ANSYS. Zjednodušený model sestával pouze z visutého lana a závěsů. Dřevěný model poté ověřil celý postup prvního kroku a potvrdil jeho správnost.

Druhý krok byl návrat k hledání polohy bodu zavěšení a hledání polohy a počtu předpínacích kabelů pomocí rovnováhy na průřezu. Podobný postup se uplatnil u zavěšené varianty. Rozdíl je jen v úhlu závěsů, protože u zavěšené konstrukce známe úhel závěsů před hledáním výchozího stavu, zatímco u visuté konstrukce je to výsledek z předběžného výchozího stavu.

Třetí poslední krok sladil oba předchozí kroky tak, aby svislý posun konstrukce byl minimální. Postačilo drobně zvětšit přetvoření ve visutém laně a dosáhlo se minimálního svislého průhybu.

Následná studie visuté konstrukce ověřila všechny tři kroky. Geometrie studie byla převzata z předchozí studie zavěšené konstrukce.

Poslední krok zahrnoval statickou a dynamickou analýzu. Statická analýza prokázala, že konstrukce je díky visutému lanu ohybově měkčí a dosahuje vyšších průhybů než konstrukce zavěšená. Maximálního průhybu bylo dosaženo u kombinace, kde zatížení chodci bylo situováno okolo středu rozpětí. Hodnota průhybu je silně ovlivněna tuhostí visutého lana.

Dynamická analýza se skládala z analýzy modální a harmonické. Modální analýza odhalila o něco nižší vlastní frekvenci proti zavěšené variantě, a proto byla provedena i harmonická analýza. Z výsledků harmonické analýzy vyplynulo, že konstrukce se chová

podobně jako zavěšená, opět vykazovala mírně zvýšenou rychlost kmitání, ale limitní zrychlení konstrukce už bylo v pořádku.

4. Experimentální ověření navržených konstrukcí

Cílem experimentu bylo ověření konstrukčního řešení, navrženého postupu hledání výchozího stavu konstrukce, odezvy konstrukce na zatížení a zjištění mezní únosnosti konstrukce a to pro obě výše popisované varianty. Ověření obou variant se provedlo v jednom modelu, který vznikl spojením zavěšené a visuté konstrukce ve vrcholu pylonu.

V rámci práce se konstrukce detailně analyzovala z hlediska konstrukčního, neopomenula se modelová podobnost ani postup výstavby modelu. V další části bylo popsáno osazení modelu měřicí technikou, zejména tenzometry, siloměry a ME snímači a průhyboměry. Odpovídající pozornost se věnovala průběhu statické zatěžovací zkoušky a mezní zatěžovací zkoušky. Zkoušky se provedly vždy zvlášť pro zavěšenou část a pro visutou část.

Důležitým bodem byla sumarizace výsledků měření a jejich srovnání s analýzou na výpočtových modelech, které se potom různě upravovaly tak, aby se v jistém smyslu co nejvíce přiblížily měření. Nejde ovšem o to, aby se výsledky analýzy přesně rovnaly měření, ale o to, aby se vysvětlilo, proč se v některých místech měření odchyluje od výpočtového modelu. Výsledky porovnání mezi analýzou a měřením byly vypočteny u výchozího stavu, u statické zatěžovací zkoušky a u mezní zatěžovací zkoušky.

Lze konstatovat, že realizovaný fyzikální model prokázal správnost a bezpečnost návrhu studované konstrukce a výstižnost statické analýzy. Výsledky modelu dále potvrdily správnost nalezení výchozího tvaru obou variant a dodržení rovnováhy průřezu při výchozím tvaru. Důležitým výsledkem je také úspěšná realizace modelu, během níž byl ověřen navržený postup výstavby a různá konstrukční řešení. Model se během výstavby choval podle předpokladů předběžné statické analýzy. Provedené zatěžovací zkoušky, jak statická, tak mezní, prokázaly vysokou únosnost a tuhost konstrukce na vnější zatížení. Statická analýza, která zde byla použita, se dá doporučit pro budoucí analýzu podobných konstrukcí. Mezní zatěžovací zkouška potvrdila únosnost konstrukce na normou dané mezní zatížení, i když maximální hodnota mezního zatížení modelu se přímo nezjišťovala.

Zkušenosti z realizace a nabyté výsledky tak mohou tvořit základ pro budoucí návrhy podobných konstrukcí v inženýrské praxi. Provedený experiment přispěl k hlubšímu porozumění problematice půdorysně zakřivených zavěšených a visutých lávek pro pěší zavěšených pouze na vnitřní straně.

Další směr výzkumu

Předložená dizertační práce byla zaměřena na předem úzce vymezený okruh témat týkajících se problematiky půdorysně zakřivených zavěšených a visutých lávek pro pěší zavěšených pouze na vnitřní straně. Při řešení hlavních cílů práce vyplynuly některé problémy

a otázky, které byly vyřešeny buď přibližnou cestou, nebo byly zanedbány. Tyto problémy by mohly určit další směr výzkumu, proto autor práce považuje za důležité se o nich zmínit.

Velmi složitým problémem se ukázalo hledání výchozího tvaru visuté půdorysně zakřivené konstrukce, konkrétně hledání předběžné polohy visutého lana. Postup byl podrobně popsán za použití iteračního postupu v programovém systému ANSYS. Autor se domnívá, že existuje analytické řešení tvaru visutého lana podobně jako je to u visutých konstrukcí s přímou mostovkou, jak je uvedeno například v [17].

Při modelování visutých zakřivených konstrukcí se ukázal další velký problém v konvergenci výpočtu těchto konstrukcí. Zdrojem problému je pravděpodobně styk závěsů a visutého lana. Styk je samozřejmě i u visutých konstrukcí s přímou mostovkou, kde s konvergencí problém není. U půdorysně zakřivené konstrukce je ovšem styk výrazně nakloněn vůči svislé rovině, což je pro výpočetní program zásadní. Problém byl částečně řešen pomocí pružin *weak springs*, popsaných v práci. Řešení, jak se v práci ukázalo, ovlivňuje výsledky dynamické analýzy, a proto by mohlo být předmětem dalšího výzkumu.

Další aspekt, který v práci nebyl řešen, se týká reologických vlastností betonu – dotvarování a smršťování betonu. V příčném řezu studovaných konstrukcí a modelu lávek byla kombinována ocelová trubka s betonovou deskou mostovky. Smršťování betonu, jak bylo ukázáno v modelu lávek, lze výrazně potlačit ošetřováním betonu a důkazem je, že v modelu lávek nevznikly žádné smršťovací trhlinky. Další smršťování betonu by mělo vliv na přerozdělení sil mezi ocelovou trubkou a betonovou deskou, ale patrně by nenabývalo významných hodnot. Dotvarování betonu má vliv na namáhání betonu a jeho deformaci. V případě ocelobetonového průřezu nebyl tento jev přímo studován. V práci se ale provedla studie vlivu modulu pružnosti na chování modelu. Výsledkem bylo, že i při výrazných změnách modulu pružnosti se v betonové desce mění napětí a deformace minimálně. Bylo to dáno tím, že podélné namáhání přenášela z velké části ocelová trubka. Dotvarování a smršťování betonu bude samozřejmě významné u těchto konstrukcí v případě, že mostovka bude celá z betonu, nebo z betonů různého stáří. Pokud bychom chtěli použít nějaké přesné metody jako TDA [27] a podobně, narazíme u řady softwarů na zakřivení mostovky a nesymetrický příčný řez, kde vzdálenost mezi středem smyku a těžištěm je nezanedbatelná.

V současné době jsou již platné normy EUROCODE, kde je uvažováno s různými součiniteli materiálů, zatížení apod. Je nutné si ale uvědomit, že v případě geometricky nelineární konstrukce nelze přenásobovat např. vlastní tíhu součinitelem zatížení a zjišťovat hodnoty vnitřních sil pro posudky. Způsob posouzení nemůže být pro podobné konstrukce použit bez nějaké další modifikace.

9. Seznam použitých zdrojů

- [1] ANSYS, Inc., *Command Reference – Release 12.1*, Ansys, Inc., listopad 2009.
- [2] ANSYS, Inc., *Structural Analysis Guide – Release 12.1*, Ansys Inc., listopad 2009.
- [3] ANSYS, Inc., *Element Reference – Release 12.1*, Ansys Inc., listopad 2009.
- [4] ANSYS, Inc., *Verification Manual for the Mechanical APDL Application – Release 12.1*, Ansys Inc., listopad 2009.
- [5] BITTNAR, Z., ŠEJNOHA, J., *Numerické metody mechaniky I*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1992, ISBN 80-01-00855-X.
- [6] ČSN 73 12 01: *Navrhování betonových konstrukcí*, státní norma, srpen 1986.
- [7] ČSN 73 14 01: *Navrhování ocelových konstrukcí*, státní norma, duben 1995.
- [8] ČSN 73 62 03: *Zatížení mostů*, státní norma, září 1987.
- [9] ČSN 73 62 06: *Navrhování betonových a železobetonových mostních konstrukcí*, státní norma, červen 1972
- [10] ČSN 73 62 07: *Navrhování mostních konstrukcí z předpjatého betonu*, státní norma, říjen 1993.
- [11] Department of Transport, *Design Criteria for Vibration of Footbridges*, BD37/01, Appendix B, UK Highways Agency, 1988.
- [12] Eurocode: ČSN EN 1990: *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*, státní norma, únor 2011.
- [13] Eurocode: ČSN EN 1991-2: *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou*, státní norma, červenec 2005.
- [14] Eurocode: ČSN EN 1992-1-1: *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla pro pozemní stavby*, státní norma, listopad 2006.
- [15] Eurocode: ČSN EN 1992-2: *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady*, státní norma, květen 2007.
- [16] Eurocode: ČSN EN 1993-1-1: *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby*, státní norma, prosinec 2006.

- [17] KADLČÁK, J., *Statika nosných lan visutých střeš*, ACADEMIA, Praha, 1990, ISBN 80-200-0251-0.
- [18] KADLČÁK, J., KYTÝR, J., *Statika stavebních konstrukcí I*, FAST VUT v Brně, Vydavatelství Vutium, Brno, 2001, ISBN 80-214-1877-X.
- [19] KADLČÁK, J., KYTÝR, J., *Statika stavebních konstrukcí II*, FAST VUT v Brně, Vutium, Brno, 2001, ISBN 80-214-1648-3.
- [20] KEIL, A., *The design of curved cable-supported footbridges*, Schlaich Bergermann und Partner, Stuttgart, Germany.
- [21] KOLÁČEK, J., *Model of cable supported bridges*, The 9TH FIB International PHD Symposium in Civil Engineering, Proceedings, Karlsruhe, červenec 2012, ISBN 978-3-96644-858-2, str. 363 – 368.
- [22] KOLÁČEK, J., NEČAS, R., *Návrh přemostění půdorysně zakřivenou konstrukcí*, Dílčí zpráva 2.2.3.1 – P4 centra CIDEAS, Ústav betonových a zděných konstrukcí, FAST VUT v Brně, prosinec 2010.
- [23] KOLÁČEK, J., NEČAS, R., STRÁSKÝ, J., *Curved cable stayed and suspension pedestrian bridges*, FOOTBRIDGE 2011, Sborník příspěvků, Wrocław, červenec 2011, ISBN 978-83-7125-204-4, str. 286 – 287.
- [24] KOLÁČEK, J., NEČAS, R., STRÁSKÝ, J., *Fyzikální model půdorysně zakřivené lávky*, 17. Mezinárodní symposium MOSTY 2012, Sborník příspěvků, Brno, duben 2012, ISBN 978-80-86604-56-5, str. 215 – 220.
- [25] KOLÁČEK, J., NEČAS, R., STRÁSKÝ, J., *Zkouška modelu půdorysně zakřivené visuté a zavěšené konstrukce*, BETON TKS, s.r.o., Brno, prosinec 2011, ISSN 12133116, str. 46 – 52.
- [26] KULHAVÝ, T., *Konstrukce z předpjatého pásu ztužené vnějšími kabely nebo oblouky*, dizertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí, Brno, březen 2002.
- [27] NAVRÁTIL, J., *Předpjaté betonové konstrukce*, VUT v Brně, FAST, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, 2004, ISBN 80-214-2649-7.
- [28] NEČAS, R., *Segmentové konstrukce se spřaženou deskou. Návrh, výroba a zkouška modelu*, dizertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí, Brno, červen 2006.

- [29] NEČAS, R., STRÁSKÝ, J., *Statická a dynamická analýza lávky v San Diegu, Kalifornie, USA*, 18. Betonářské dny, Sborník příspěvků, Hradec Králové, listopad 2011, ISBN 978-80-87158-30-2, str. 202 – 207.
- [30] ŠMIŘÁK, S., *Pružnost a plasticita I pro distanční studium*, VUT v Brně, FAST, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, 1999, ISBN 80-214-1151-1.
- [31] STRÁSKÝ, J., *Betonové mosty*, Nakladatelství ŠEL, spol. s.r.o. Praha, 2001, ISBN 80-86426-05-X.
- [32] STRASKY, J., *Stress Ribbon and Cable Supported Pedestrian Bridges*, Thomas Telford Publishing, London 2005, ISBN 0 7277 3282 X.
- [33] STRÁSKÝ, J., KOLÁČEK, J., NEČAS, R., *Model půdorysně zakřivené lávky pro pěší*, Dílčí zpráva 2.2.3.1 – P5 centra CIDEAS, Ústav betonových a zděných konstrukcí, FAST VUT v Brně, prosinec 2010.
- [34] STRÁSKÝ, J., NEČAS, R., KOLÁČEK, J., *Dynamická odezva betonových lávek*, BETON TKS, s.r.o., Brno, srpen 2009, ISSN 12133116, str. 80 – 87.
- [35] STRÁSKÝ, J., NEČAS, R., KOLÁČEK, J., *Dynamic response of concrete footbridges*, Structural Concrete Vol. 13/2 – Journal of the fib, Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlín, červen 2012, ISSN 1464-4177, str. 109 – 118.
- [36] STRÁSKÝ, J., NEČAS, R.; KOLÁČEK, J. *Dvě zavěšené lávky v městě Eugene, Oregon, USA*, 15. Mezinárodní symposium MOSTY 2010, Sborník příspěvků, Brno, duben 2010, ISBN 978-80-86604-48-0, str. 138 – 142.
- [37] TIMOŠENKO, S. P., *Pročnosť i kolebanija elementov konstrukcij*, Izdatelstvo "NAUKA", Moskva, 1975.
- [38] VLASOV, V., Z., *Tenkostěnné pružné pruty*, Statní nakladatelství technické literatury, Praha 1962, 04-741-62.
- [39] ZŮDA, K., *Mosty IV. Půdorysně zakřivené mostní konstrukce*, VUT Brno, 1971.

10. Seznam použitých zkratk a symbolů

①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥	směry zatížení
A, AREA	plocha
a	výškový rozdíl mezi měřenými body
ADMSUA	přidaná hmota na jednotku plochy
A_{lana}	plocha předpínacího lana
a_{lim}	limitní zrychlení
ALPX, ALPY, ALPZ	součinitel tepelné roztažnosti v příslušné ose
a_{max}	maximální zrychlení
A_{Pi}	plocha předpínacího lana
AREA1, AREA2	plocha na začátku a konci prutu (uzly I a J)
AREASY1, AREASY2	smyková plocha v ose Y (uzly I a J)
AREASZ1, AREASZ2	smyková plocha v ose Z (uzly I a J)
A_{zavesu}	plocha závěsu
b	půdorysný průmět mezi měřenými body
BZ	bod zavěšení
c	rozdíl šířky betonové desky a rozměru b
$C_g, C_{gi}, C.G.$	těžiště průřezu
$C_{Pi}, C_{P1}, C_{P2}, C_{P3}, C_{Pn}$	působíště kabelu
C_s	střed smyku průřezu
C_z	centrum závěsů
d	průměr závěsů
DAMP	součinitel útlumu
DENS	objemová hmotnost
DSCY1, DSCY2	vzdálenost osy prutu od středu smyku ve směru osy Y (uzly I a J)
DSCZ1, DSCZ2	vzdálenost osy prutu od středu smyku ve směru osy Z (uzly I a J)
DX1, DX2	vzdálenost osy prutu od těžiště ve směru osy X (uzly I a J)
DY1, DY2	vzdálenost osy prutu od těžiště ve směru osy Y (uzly I a J)
DZ1, DZ2	vzdálenost osy prutu od těžiště ve směru osy Z (uzly I a J)
E, EX, EY, EZ	modul pružnosti v příslušných osách

EFS, EFSZ, EFSY	tuhost podloží v příslušné ose
E_p	modul pružnosti předpínacího lana
E_s	modul pružnosti oceli
E_t	tečný modul pružnosti oceli
F	síla
f	frekvence při maximální výchylce
f_0	první ohybová frekvence
FREQ	frekvence
f_u	mez pevnosti oceli
f_y	mez kluzu oceli
$\{F^a\}$	vektor aplikovaného zatížení
f_H	vodorovný ohybový tvar
$\{F_i^{nr}\}$	vektor přeneseného zatížení
f_s	frekvence lidských kroků
f_T	torzní tvar
f_V	svislý ohybový tvar
G, G_i	vlastní tíha
$G_{i,mostovka}$	vlastní tíha pouze mostovky
GXY, GYZ, GXZ	modul pružnosti ve smyku v příslušné ose
$G_{i,zaves}$	vlastní tíha pouze závěsu
H, H_i	vodorovná složka síly v závěsu nebo visutém laně
I	označení uzlu
INSTRN	počáteční přetvoření
IXX, IX1, IX2	moment setrvačnosti průřezu k ose X na začátku a konci prutu
IYY, IY1, IY2	moment setrvačnosti průřezu k ose Y na začátku a konci prutu
IZZ, IZ1, IZ2	moment setrvačnosti průřezu k ose Z na začátku a konci prutu
J	označení uzlu
K	označení uzlu
$[K]$	matice tuhosti
$k_i^{n-1, n-2}$	směrnice přímky mezi iteračními kroky

$\{K_i^T\}$	tečná matice tuhosti
L	označení uzlu
$\hat{l}$	délka segmentu oblouku
l_0	počáteční délka závěsu
M	označení uzlu
$[M]$	matice hmot
M_{CS}	moment k bodu C_s
M_i	moment v bodě mostovky
M_G	moment od vlastní tíhy
M_N	moment od závěsu
$M_P, M_{Pi}, M_{Pi}, M_{P_2}, M_{P_3}$	moment od předpětí
M_X, M_Y, M_Z	ohybové momenty k příslušným osám
M_{Yi}, M_{Zi}	ohybové momenty k příslušným osám
MZZ	mezní zatěžovací zkouška
n	normála k přímce, ploše
N, N_i	síla v závěsu, předpínacím laně nebo visutém laně, označení bodu
$N_{i, \text{lano}}$	síla v předpínacím laně
O	označení uzlu
P	označení uzlu
P_i, P_i, P_2, P_3, P_N	radiální složka předpínacího kabelu
PRXY, PRYZ, PRXZ	Poissonův součinitel
R, R_i	poloměr oblouku
ROTX, ROTY, ROTZ	stupně volnosti – rotace okolo příslušných os
$[S]$	matice tuhosti s vlivem předepnutí
SHEARZ, SHEARY	součinitel smykového vychýlení v příslušných osách
SURT	povrchové napětí
SX, SY, SZ	napětí v příslušném směru
SZZ	statická zatěžovací zkouška
T	doba
T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8	uzly pro zadání teploty

T_i	tečná složka závěsu
THETA	úhel sklonu prvního rozhraní u skořepiny
TK(I), TK(J), TK(K), TK(L)	tloušťka skořepiny v jednotlivých uzlech I, J, K a L
TKYB1, TKYB2	vodorovná vzdálenost levého vlákna průřezu od osy prutu (uzly I a J)
TKYT1, TKYT2	vodorovná vzdálenost pravého vlákna průřezu od osy prutu (uzly I a J)
TKZB1, TKZB2	svislá vzdálenost dolního vlákna průřezu od osy prutu (uzly I a J)
TKZT1, TKZT2	svislá vzdálenost horního vlákna průřezu od osy prutu (uzly I a J)
TSF1, TSF2	součinitel smykového zkroucení
u	vektor posunutí
$\{u\}, \{u_i\}, \{u_{i+l}\}$	vektor neznámých posunutí
$\{u_0\}$	vektor posunutí v prvním kroku
u_{peak}	maximální výchylka
UX, UY, UZ	stupně volnosti – posunutí v příslušných osách
ux, uy, uz	posuny k příslušným osám
uz_1, uz_2	svislé posuny
$u_{z,i}$	označení osy svislých posunů horního povrchu trubky
$u_{z,i}^{n-1}, u_{z,i}^{n-2}, u_{z,i}^1, u_{z,i}^2, u_{z,i}^3, u_{z,i}^4, u_{z,i}^5$	svislý posun horního povrchu trubky v iteračních krocích
V, V_i	svislá složka závěsu nebo visutého lana
VALU	hodnoty výchylky v uzlu
VISC	viskozita
v_{max}	maximální rychlost
V-MZZ	mezní zatěžovací zkouška na zavěšené variantě
WARP	stupeň volnosti – deplanace
x	kolmá vzdálenost vedená od C_g k ose závěsu
x_0, y_0, z_0	lokální osy
X, Y, Z	osy souřadného systému, příp. souřadnice v příslušných osách
x_{Mi}, y_{Mi}, z_{Mi}	souřadnice bodu mostovky
x_{Zi}, y_{Zi}, z_{Zi}	souřadnice vrcholu pylonu
Y_{BZ}	vodorovná vzdálenost mezi C_s a BZ
Y_{Cg}	vodorovná vzdálenost mezi C_s a C_g

Z_{BZ}	svislá vzdálenost mezi C_s a BZ
Z_{Cg}	svislá vzdálenost mezi C_s a C_g
$Z_{CPi}, Z_{CP1}, Z_{CP2}, Z_{CP3}, Z_{CPn}$	svislá vzdálenost C_s od působiště kabelu
$Z\text{-MZZ}$	mezní zatěžovací zkouška na visuté variantě
α	sklon závěsů
α_i	svislý úhel mezi H_i a průmětem závěsu
β	úhel segmentu konstrukce určené pro jeden závěs
Δ	náklon mostovky nebo zkrácení závěsu
$\Delta_i, \Delta_1, \Delta_2$	součinitel odchylky G_i od průměru G_i
$\{\Delta u_i\}$	rozdíl mezi dvěma následujícími vektory posunutí
$\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$	rozdíly souřadnic bodů mostovky a vrcholu pylonu
$\{\phi_i\}$	vektor vlastních tvarů
$\varepsilon, \varepsilon_i$	přetvoření v závěsu
$\varepsilon_{i, \text{lano}}$	přetvoření v předpínacím laně
φ_i	vodorovný úhel mezi H_i a průmětem závěsu
$\varepsilon_i^n, \varepsilon_i^{n-1}, \varepsilon_i^{n-2}, \varepsilon_i^1, \varepsilon_i^2, \varepsilon_i^3, \varepsilon_i^4, \varepsilon_i^5, \varepsilon_i^6$	přetvoření v závěsu v iteračních krocích
ε_{Pi}	přetvoření v předpínacím kabelu
$[\sigma_0]$	napětí v prvním kroku iterace
σ_i	napětí v závěsu
σ_P	napětí v předpínacím kabelu
ϕ	průměr
ρ	objemová hmotnost
δ_i	úhel tečny ke křivce mostovky
μ	Poissonova konstanta
γ	sklon závěsu nebo objemová tíha
γ_i	svislý průmět mezi osou závěsu a jeho vodorovným průmětem
π	Ludolfovo číslo
ω_i	vlastní frekvence

11. Seznam příloh

Příloha A	Výsledky statické analýzy a dynamické analýzy zavěšené konstrukce
Příloha B	Výsledky statické analýzy a dynamické analýzy visuté konstrukce
Příloha C	Fotografická dokumentace výstavby modelu
Příloha D	Vyhodnocení průhybů a poměrného přetvoření modelu
Příloha E	Výrobní dokumentace modelu

Pozn.: Přílohy tvoří samostatnou část práce.