



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

ZAVĚŠENÁ LÁVKA PRO PĚŠÍ

CABLE STAYED PEDESTRIAN BRIDGE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štěpán Kapsa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN KOLÁČEK, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav betonových a zděných konstrukcí
Student: **Bc. Štěpán Kapsa**
Vedoucí práce: **Ing. Jan Kolářek, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25
Studijní program: N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Zavěšená lávka pro pěší

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh lávky a variant přemostění zpracujte na základě předaných podkladů (situace, podélný řez, příp. geotechnické poměry). Textová část bude obsahovat popis variant řešení přemostění včetně jejich zhodnocení, podrobný technický popis vybrané varianty a popis veškerých kroků a posudků ve statickém výpočtu, a závěr. Výkresová dokumentace bude obsahovat dispoziční výkresy (půdorys, podélný řez, příčné řezy, atd.), výkresy výztuže vybraných částí konstrukce a minimálně jeden detail určený vedoucím práce. Statický výpočet bude vypracován dle norem EN (mezní stavy) a uplatní se v něm řešení s postupnou výstavbou nosné konstrukce z předpjatého betonu. Ostatní úpravy lze provádět podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Cílem práce je pro zadaný problém navrhnout dvě až tři varianty řešení přemostění a zhodnotit je. Pro vybranou variantu lávky bude vypracován podrobný statický výpočet všech částí nosné konstrukce a bude vypracována odpovídající výkresová dokumentace včetně vizualizace celé konstrukce.

Diplomovou práci je třeba vypracovat a rozčlenit podle následující struktury:

Textová část

Přílohy textové části:

P1 Použité podklady a varianty řešení

P2 Výkresová dokumentace

P3 Stavební postup a vizualizace

P4 Statický výpočet

Diplomová práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě.

Seznam doporučené literatury a podklady:

Základní normy:

ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů.

ČSN 73 6214 Navrhování betonových mostních konstrukcí.

ČSN EN 1990 včetně změny A1: Zásady navrhování konstrukcí.

ČSN EN 1991-2: Zatížení mostů dopravou.

ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.

ČSN EN 1992-2: Betonové mosty. Navrhování a konstrukční zásady.

Literatura doporučená vedoucím diplomové práce.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 31. 3. 2024

L. S.

doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.
vedoucí ústavu

Ing. Jan Kolářek, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem a posouzením zavěšené lávky pro pěší. Z navržených variant byla vybrána zavěšená konstrukce, která byla analyzována pomocí programu ANSYS Mechanical APDL. Bylo provedeno statické posouzení všech nosných částí konstrukce z hlediska mezních stavů použitelnosti a únosnosti. V závěru práce byla provedena i dynamická analýza.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zavěšená konstrukce, mezní stavy použitelnosti, mezní stavy únosnosti, výchozí stav, lávka, analýza

ABSTRACT

The thesis focuses on the design and assessment of a cable stayed pedestrian bridge. Among the proposed variants, a cable stayed structure was selected and analyzed using the ANSYS Mechanical APDL software. A static assessment of all load-bearing components of the structure was conducted with regard to serviceability and ultimate limit states. Finally, a dynamic analysis was also performed.

KEYWORDS

Cable stayed structure, serviceability limit states, ultimate limit states, initial state, footbridge, analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KAPSA, Štěpán. *Zavěšená lávka pro pěší*. Brno, 2025. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí Ing. Jan Koláček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Zavěšená lávka pro pěší* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17. 1. 2025

Bc. Štěpán Kapsa

autor

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat všem lidem, kteří mi nějakým způsobem pomohli při psaní mé diplomové práce. Obrovské díky patří mé rodině za jejich podporu a také kamarádům a spolužákům za jejich cenné rady a pomoc. Chtěl ale také hlavně poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Janu Koláčkovi, Ph.D. za jeho ochotu, pomoc a cenné rady, které mi vždy pomohly při návrhu této konstrukce.

OBSAH

1 ÚVOD.....	7
2 VARIANTY PŘEMOSTĚNÍ.....	8
2.1 VARIANTA A.....	8
2.2 VARIANTA B.....	9
2.3 VÝBĚR VARIANTY	10
3 POPIS ZVOLENÉ VARIANTY	10
4 POUŽITÉ MATERIÁLY	13
5 VÝPOČETNÍ MODEL	13
5.1 Zatížení.....	13
5.2 Posouzení konstrukce.....	14
6 DYNAMICKÁ ANALÝZA.....	14
7 ZÁVĚR.....	15
13 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	16
14 SEZNAM PŘÍLOH	17
15 SEZNAM OBRÁZKŮ	18

1 ÚVOD

Cílem diplomové práce bylo navrhnout konstrukci lávky pro pěší. Byly zpracovány varianty přemostění daného terénu, z nichž byla vybrána zavěšená konstrukce lávky, která byla dále podrobně rozpracována.

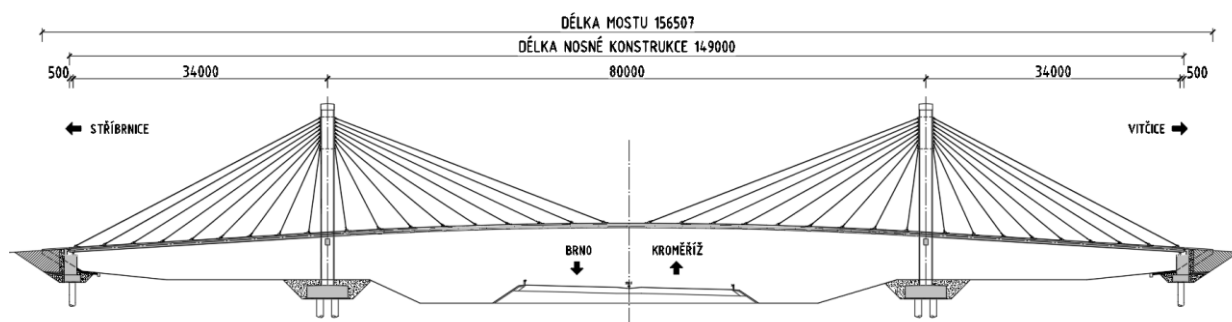
Díky několika výpočetním modelům byl nalezen tzv. „výchozí stav“ konstrukce lávky, na který bylo dále aplikováno zatížení a konstrukce byla posouzena ze statického hlediska na mezní stavy použitelnosti a únosnosti. V tomto stavu byla hledána také rovnováha sil působících v pylonu. Součástí práce byla taky dynamická analýza, ve které byly zjištěny vlastní tvary konstrukce a zjištěna odezva na harmonické zatížení.

2 VARIANTY PŘEMOSTĚNÍ

2.1 VARIANTA A

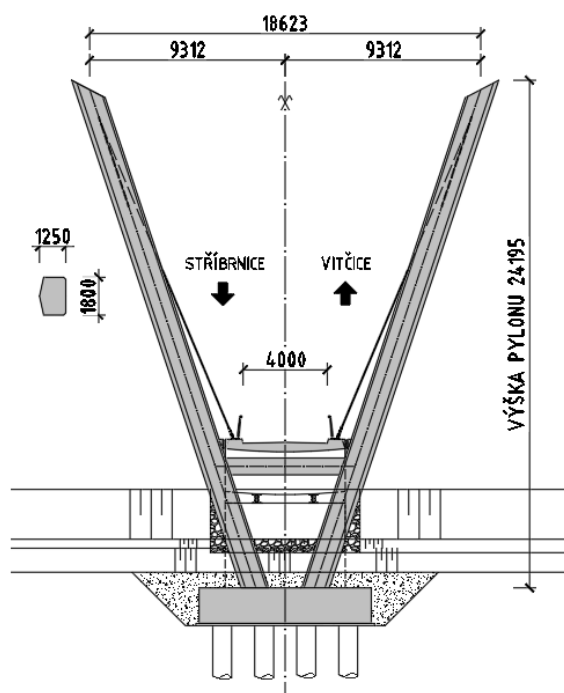
V první variantě se jednalo o zavěšenou lávku s deskovou mostovkou. Mostovka je zavěšena na dvojicích pylonů, které jsou navíc v příčném směru rozevřeny do tvaru písmene V. Pylony jsou vzájemně spojeny pomocí příčníků. Protože konstrukce lávky přemostňuje dálnici, byl navržen postup výstavby pomocí letmé montáže. To mělo za následek rozdělení mostovky na monolitické a segmentové části, které na sebe plynule navazují. Aby byl zachován průjezdní prostor dálnice, byla niveleta lávky vedena ve výškovém parabolickém oblouku ve střední části, na kterou navazují krajní části s konstantním stoupajícím a klesajícím sklonem 6%.

Závěsy jsou u této varianty kotveny v mostovce, a tak vzniká samokotvený systém, který byl požadován investorem.



Obrázek 1 - Varianta A - podélný řez

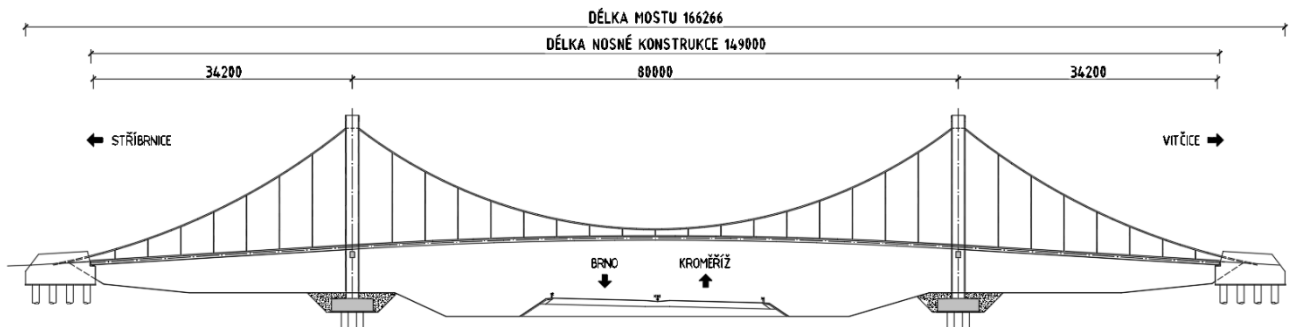
Uložení mostovky bylo navrženo pomocí ocelových kyvných stojek, aby nedocházelo k nadzdvížení mostovky v krajních částech. Závěsy jsou v hlavě pylonu osazeny na kotevní plech.



Obrázek 2 - Varianta A - příčný řez

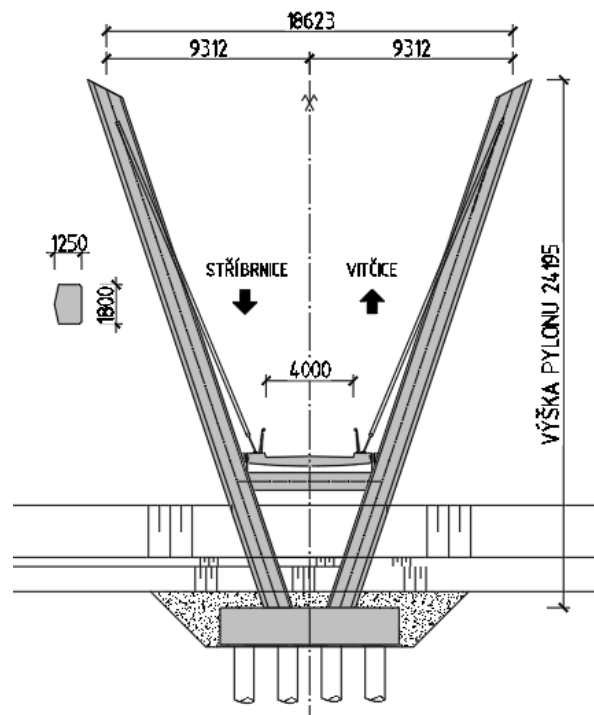
2.2 VARIANTA B

VARIANTOU B JE VISUTÁ KONSTRUKCE, KTERÁ JE KOTVENA V KOTEVNÍCH BLOCÍCH A TÍHA MOSTOVKY JE VYNÁŠENA PROSTŘEDNICTVÍM NOSNÝCH LAN, KTERÉ JSOU S MOSTOVKOU SPOJENY POMOCÍ ZÁVĚSŮ.



Obrázek 3 - Varianta B - podélný řez

NA ROZDÍL OD VARIANTY A BY BYLA CELÁ KONSTRUKCE ROZDĚLĚNA NA SEGMENTY, KTERÉ BY BYLY POSTUPNĚ MONTOVÁNY. ODKLON PYLONŮ BY ZŮSTAL STEJNÝ JAKO V PŘEDCHOZÍ VARIANTĚ A MOSTOVKA MÁ PO CELÉ DÉLCE KONSTANTNÍ PŘŮŘEZ. MOSTOVKA JE NA OPĚRÁCH ULOŽENA NA POSUVNÁ LOŽISKA. PYLONY JSOU STEJNĚ JAKO U VARIANTY A SPOJENY S PŘÍČNÍKEM, KTERÝ POMÁHÁ ZVÝŠIT PROSTOROVOU TUHOST KONSTRUKCE.



Obrázek 4 - varianta B - příčný řez

2.3 VÝBĚR VARIANTY

U obou variant byly zhodnoceny výhody a nevýhody těchto konstrukcí. Klíčovou roli sehrál požadavek investora, který si přál, aby byla konstrukce samokotvená a nevznikaly tak v krajině cizí prvky.

Varianta B má, i možná přes její lepší estetiku v krajině, velké požadavky na založení, a tak je zřejmé, že náklady oproti variantě A by se o dost prodražily. Varianta A je větší dominantou v krajině a do krajiny lépe zapadá. U této varianty jsou také průřezy mostovky v segmentové části vylehčeny oproti plnému průřezu krajního pole, a tak by se segmenty při montáži lépe manipulovalo.

Na základě uvedených faktů byla vybrána **varianta A** pro podrobnější rozpracování, protože naprosto splňuje očekávání investora a stavební náklady byly u této stavby odhadnuty podstatně nižší.

3 POPIS ZVOLENÉ VARIANTY

Niveleta mostovky byla navržena se stoupající a klesající částí 6,0 %. Ve střední části je niveleta vedena ve výškovém parabolickém oblouku.

Rozpětí mostu	34 + 80 + 34 = 148 m
Délka přemostění	147,09 m
Délka nosné konstrukce	149 m
Délka mostu	156,51 m
Úhel křížení	101,057g
Výška pylonů	24,195 m
Výška opěry 1	2,647 m
Výška opěry 2	2,667 m
Výška mostu	10,51 m
Volná šířka	4,00 m
Šířka mostovky	5,72 m

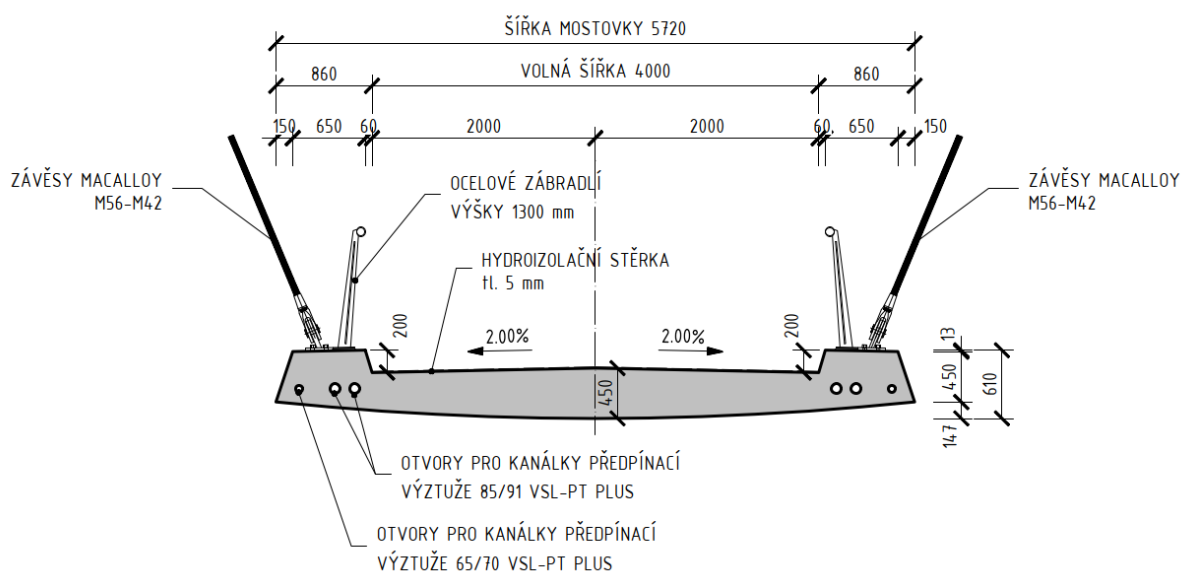
Hlavní nosná konstrukce mostovky i pylonů byla navržena z betonu třídy C45/45. Základové konstrukce byly voleny z betonu C30/37. Betonářská výztuž byla zvolena B500B a předpínací výztuž Y1770 S7-15,7. Předpínací výztuž tvoří 4 dvanácti lanné kabely s kotvami VSL – typ GC a 2 sedmi lanné kabely se stejným typem kotev. Závěsy byly zvoleny jako konstrukční táhla 460 od firmy Macalloy. Mostní závěry byly zvoleny chodníkové TO100 s posuny +/- 50 mm od firmy Freyssinet v celkovém počtu 2 ks. Elastomerová ložiska byla zvolena dle katalogu firmy Arfen v celkovém počtu 4 ks. Zábradlí bylo předběžně navrženo z oceli S235 s mřížovou výplní.

Povrch mostovky bude po dokončení výstavby opatřen vrstvou hydroizolační stěrky o tloušťce 5 mm.

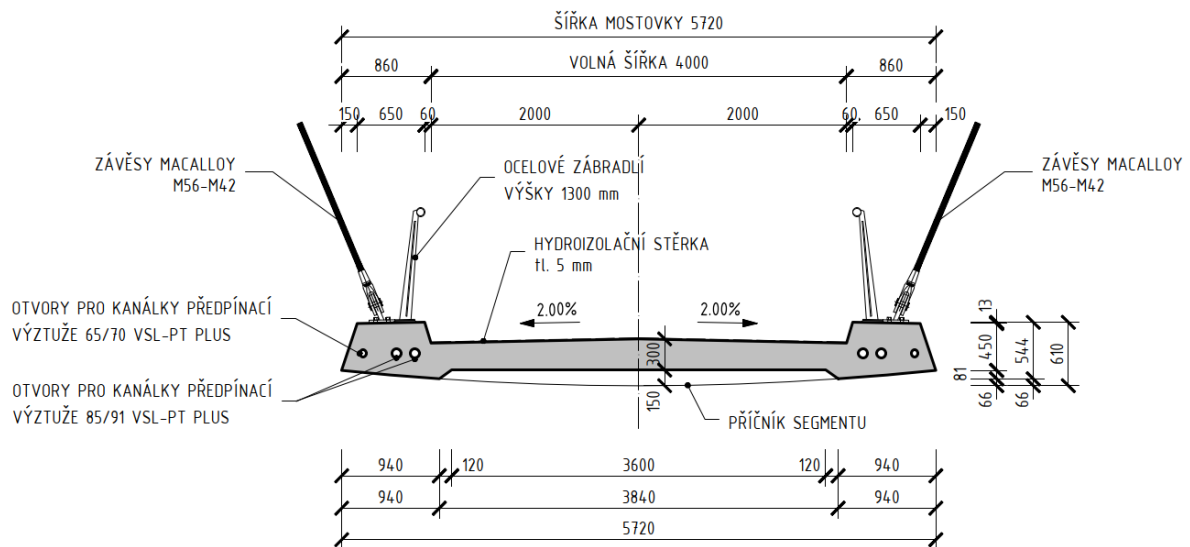
Celkové délky závěsů:

M56 (Φ52 mm)	433,04 m
M48 (Φ45 mm)	1031,63 m
M42 (Φ39 mm)	190,808 m

Systém kotvení závěsů do mostovky a naváděcí systém segmentů při montáži tvořený ocelovými prvky vyplněnými betonem byl navrženo na základě použitých podkladů uvedených v příloze P1. V pylonu jsou závěsy kotveny pomocí ocelového kotevního plechu S235.

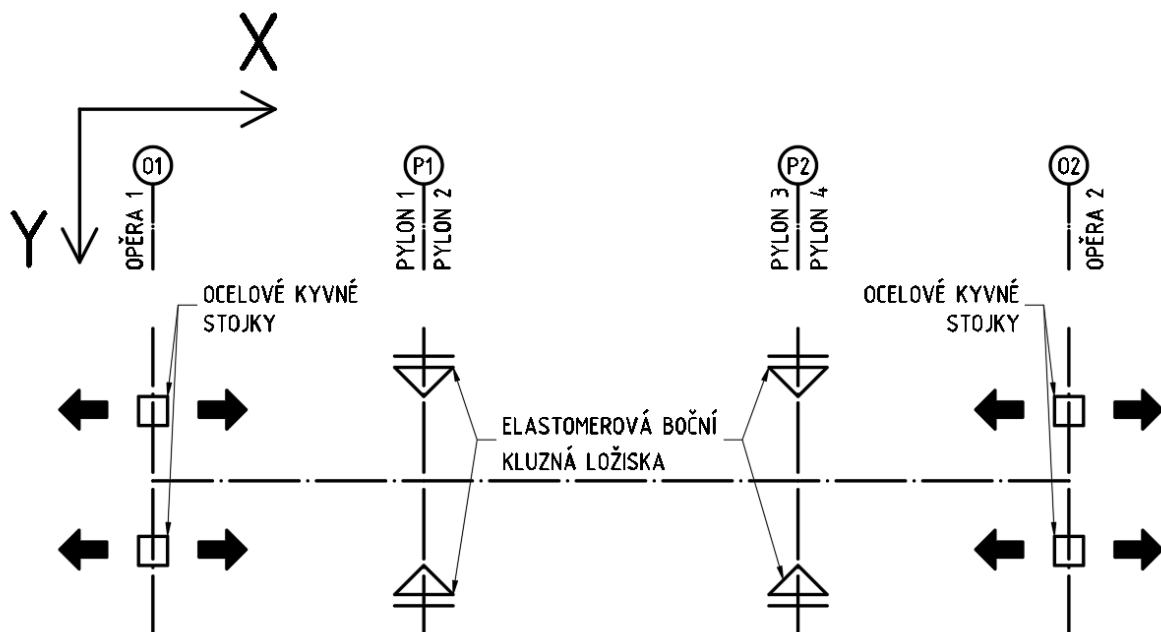


Obrázek 5 - Příčný řez monolitickou částí mostovky



Obrázek 6 - Příčný řez segmentem

Schéma uložení mostovky



Obrázek 7 - Schéma uložení mostovky

Navržené ocelové kyvné stojky umožňují posun v podélném směru mostovky (X) a rotaci kolem Y. Ostatním posunům a pootočením bylo ve výpočetním modelu bráněno.

4 POUŽITÉ MATERIÁLY

Mostovka C45/55 – XD3, XF4

Pylony a příčníky C45/55 – XD1, XF4

Předpínací výztuž – Y1770 – S7 -15,7

Betonářská výztuž – B500B

Závěsy – Maccaloy 460

Kotevní plechy – S235, S355

5 VÝPOČETNÍ MODEL

5.1 Zatížení

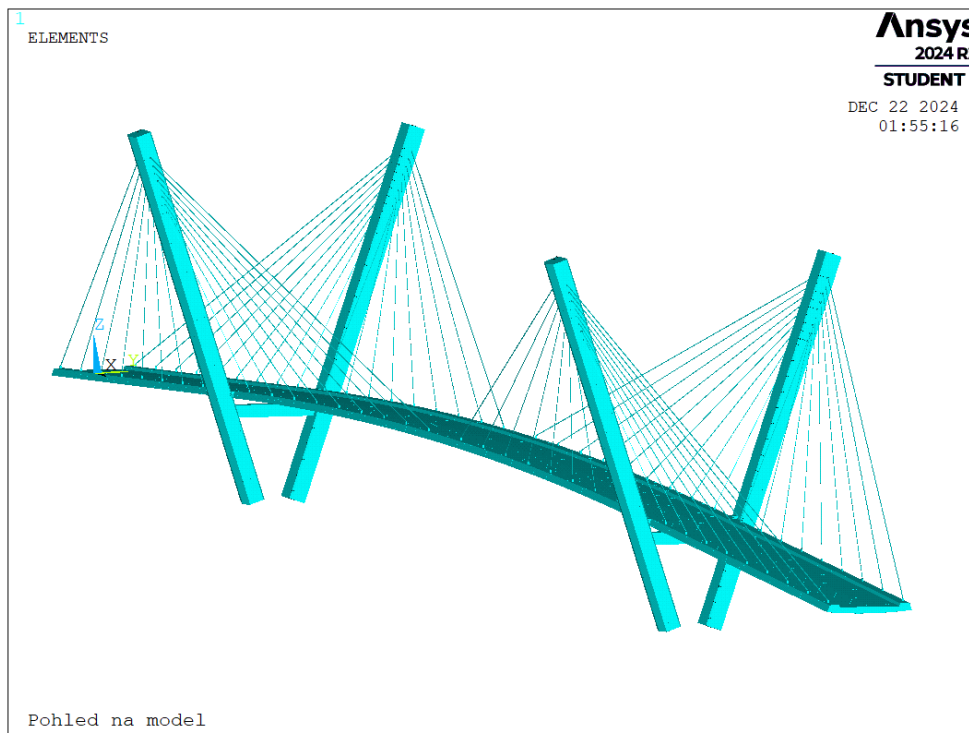
Zatížení uvažované v programu ANSYS:

Vlastní tíha + předpětí (výchozí stav)

ZS1 – ZS5 Chodci – rozdělení do 5 zatěžovacích stavů podle polohy na mostovce

ZS6 – ZS7 Teplota – rovnoměrná složka teploty – oteplení a ochlazení

ZS8 – ZS9 Vítr – uvažován v příčném i podélném směru mostovky



Obrázek 8 - Výpočetní model v ANSYS Mechanical APDL

5.2 Posouzení konstrukce

Hlavním úkolem při návrhu zavěšené lávky bylo najít tzv. výchozí stav konstrukce, při kterém jsou deformace od zatížení stálého minimální a zároveň by v tomto stavu měly být vyrovnány síly v pylonu v podélném i příčném směru tak, aby byl pylon namáhán převážně tlakem. V příčném směru byl hledán odklon pylonu, při kterém je v patě pylonu nulový ohybový moment.

Tohoto stavu bylo dosaženo za pomoci několika pomocných výpočetních modelů a základního principu návrhu zavěšené konstrukce viz příloha *P4 Statický výpočet*. Dále konstrukce byla zatížena a posouzena na MSP a MSU.

V mezním stavu použitelnosti (MSP) z hlediska mostovky byla v segmentové části splněna podmínka omezení napětí v betonu $\sigma_c \leq 0 \text{ MPa}$ pro charakteristickou kombinaci z důvodu projektovaných spár mezi segmenty.

Z hlediska pylonu nebyla překročena pevnost betonu v tahu pro častou kombinaci zatížení ($f_{ctm} = 3,8 \text{ MPa}$)

Z hlediska závěsů bylo ve všech kombinacích zatížení ověřeno dovolené napětí v závěsech $0,1f_{su} < \sigma_s < 0,45f_{su}$, aby bylo zachováno lineární chování závěsů a aby nedocházelo k relaxaci oceli.

V mezním stavu únosnosti byly posouzeny všechny nosné konstrukce lávky. Mostovka byla posouzena v podélném i příčném směru.

6 DYNAMICKÁ ANALÝZA

V rámci práce byla provedena i dynamická analýza, ve které byly v první fázi zjištěny vlastní tvary konstrukce a dále byla lávka zatížena harmonickým zatížením pro zjištění maximální výchylky v daných bodech. Zjištěné výchylky byly dále přepočítány na zrychlení, které byly porovnávány s limitními hodnotami.

Tato analýza byla provedena podle mezinárodně uznávaného dokumentu JRC, který definuje tzv. kritická pásma frekvencí (rozmezí frekvence lidské chůze).

$$\text{Svislé a podélné kmitání} \rightarrow 1,25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 2,3 \text{ Hz}$$

$$\text{Příčné kmitání} \rightarrow 0,5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 1,2 \text{ Hz}$$

7 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a posoudit zavěšenou lávku pro pěší, čehož bylo dosaženo za pomoci výpočetních programů a ručních výpočtů. Výsledky výpočtu z programu byly u většiny prvků konstrukce ověřeny ručním výpočtem a byla prokázána spolehlivost lávky z hlediska mezních stavů. V práci se podařilo najít zmiňovaný výchozí stav konstrukce, při kterém byly pro zatížení stálé dosaženy minimální deformace a taky byl stanoven úhel odklonu pylonu tak, aby ohybové momenty byly v patě i po délce pylonu co nejmenší. V závěru práce byla provedena dynamická analýza, při které byly stanoveny hodnoty zrychlení a lávka dle postupu v dynamické analýze byla zatříděna do třídy CL1 – konstrukce s maximálním stupněm komfortu.

13 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[2] ČSN EN 1992-1-1. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí: Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. 210 stran. Praha: Český normalizační institut, 2006.

[3] ČSN EN 1992-2. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí: Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady. 90 stran. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[4] VSL International, 2020 [online]. Dostupné z: <http://www.vsl.cz/dodatecne-predpinani/>

[5] KOLÁČEK, Jan, ed. Informace pro studenty. BL012 - Betonové mosty [online]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/BZK/kolacek.j/>

[6] STRÁSKÝ, Jiří. *BETONOVÉ MOSTY*. 79. publikace ČKAIT. Praha: Nakladatelství SEL, 2001. [cit. 2025-01-17].

14 SEZNAM PŘÍLOH

P.1 – Podklady a varianty řešení

P1.01 varianta A

P1.02 varianta B

P.2 – Výkresová dokumentace

P2.01 Půdorys

P2.02 Podélný řez

P2.03 Příčné řezy

P2.04 Výkres předpínací výztuže

P2.05 Výkres betonářské výztuže

P2.06 Detail tvaru segmentu

P.3 – Stavební postup a vizualizace

P3.01 Schéma stavebního postupu

P3.02 Vizualizace

P.4 – Statický výpočet

P4.01 Statický výpočet

P4.02 Výstup z modelu

15 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Varianta A – podélný řez	8
Obrázek 2 - Varianta A – příčný řez	8
Obrázek 3 - Varianta B – podélný řez	9
Obrázek 4 - varianta B – příčný řez.....	9
Obrázek 5 - Příčný řez monolitickou částí mostovky	11
Obrázek 6 - Příčný řez segmentem	12
Obrázek 7 - Schéma uložení mostovky	12
Obrázek 8 - Výpočetní model v ANSYS Mechanical APDL.....	13