

MOST PŘES ÚDOLÍ ŘEKY BYSTRICE NA SILNICI I/13

Martin Neradilek, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
martin.neradilek@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

S ohledem na počáteční stádium autorova doktorského studia je příspěvek věnován popisu jeho diplomové práce, která se zabývala návrhem mostu přes údolí řeky Bystrice. V diplomové práci bylo přiblíženo zájmové území stavby a byla provedena rešerše referenčních staveb se zaměřením na technologii výstavby. Následovalo variantní řešení, které pomocí přehledných výkresů představilo celkem 11 různých variant přemostění. Jako nejvhodnější byla vybrána dvojice rovnoběžných komorových mostů o 9 polích, které jsou budovány technologií výsuvné skruže. Tato varianta byla upravena pro potřeby konkrétní spodní výsuvné skruže ŽM16 firmy Metrostav. Komentovaný statický výpočet se s ohledem na navržený postup výstavby věnoval návrhu a posouzení hlavní nosné konstrukce, spodní stavby a založení mostu. Uvedené části diplomové práce jsou shrnuty v tomto příspěvku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Předpjatý komorový most • Technologie výstavby • Spodní výsuvná skruž • Předpínací systém • Štíhlý pilíř

ABSTRACT

With regard to the initial stage of the author's doctoral study, the paper is devoted to the description of his diploma thesis, which dealt with the design of a bridge over the Bystrice river valley. The construction site boundary conditions and a state-of-art on the reference bridges with focus on their construction method were introduced in the diploma thesis. In total 11 alternate solutions of the bridge were presented by basic drawings. Design of two parallel box girder bridges built by the movable scaffolding system was chosen as the most suitable. This variant was adapted for needs of specific underslung movable scaffolding system ŽM16 owned by the company Metrostav. Static calculation dealt with design and assessment of the main structure, substructure and foundation of the bridge considering the selected construction method. The mentioned parts of the diploma thesis are summarized in this paper.

KEYWORDS

Prestressed box girder bridge • Construction method • Underslung movable scaffolding system • Prestressing system • Slender pier

1. ÚVOD

Příspěvek shrnuje diplomovou práci, která se zabývala návrhem mostu přes údolí řeky Bystrice na směrově rozdělené silnici I/13 – Kladrubská spojka. Téma je vybráno s ohledem na počáteční

stádium autorova doktorského studia a nemá souvislost s tématem budoucí disertační práce.

Délka přemostění řešeného mostu je téměř 450 m, výška nad terémem dosahuje v nejhlubší části údolí až 34 m a přemostění komplikuje velký počet překážek.

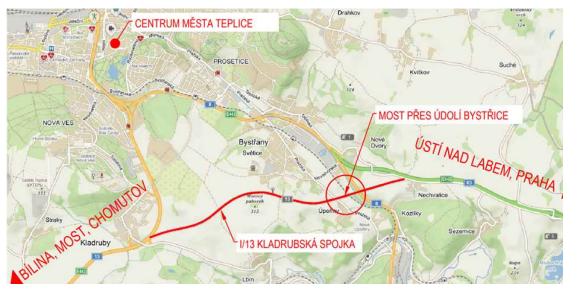
V první části příspěvku je popsán variantní návrh dispozičního uspořádání a technologie výstavby, se kterým je svázán popis zájmového území stavby a rešerše pro prohloubení znalostí v dané problematice. Pro další část práce byla jako výsledek vybrána dvojice rovnoběžných komorových mostů o 9 polích s rozpětím nejdelšího pole 53 m.

V kapitole věnované postupu výstavby jsou popsány úpravy a rozpracování výsledné varianty dle požadavků zvolené technologie, kterou je výstavba po polích pomocí spodní výsuvné skruže ŽM16 firmy Metrostav Infrastructure, a.s.

Hlavním cílem diplomové práce bylo v největší možné míře využít poskytnuté podklady k výsuvné skruži a zabývat se podrobným návrhem a posouzením postupu výstavby nosné konstrukce, pro který je velice důležitý vhodný návrh uspořádání předpínací výztuže. V příspěvku je věnována pozornost také postupné betonáži a předpínání průřezu, které je pro tento typ konstrukcí typické.

Další kapitola se věnuje statické analýze, ve které byl nejpodrobněji řešen podélný směr nosné konstrukce. Důraz je kladen na popis návrhu uspořádání předpětí včetně porovnání ekonomické náročnosti jednotlivých variant. Pro výsledné uspořádání předpětí byla analyzována postupná výstavba příčného řezu s ohledem na postupné napínání, diferenční smršťování i interakci nosné konstrukce a výsuvné skruže. Pomocí deskostěnového modelu byl posouzen také příčný směr nosné konstrukce.

Důležitou částí statického výpočtu bylo posouzení vysokých pilířů s ohledem na jejich štíhlost a účinky II. řádu. Pro návrh a realizaci je zásadní problematika založení mostu ve velmi nepříznivých geotechnických podmínkách, které bude věnována poslední část tohoto článku.



Obrázek 1: Lokalita stavby

* Školitel: doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.

2. KONCEPČNÍ NÁVRH PŘEMOSTĚNÍ

Samotný návrh začal popisem zájmového území a návštěvou lokality. Údolí křížuje velké množství překážek. Jedná se o železniční trať, silnici I. a III. třídy, koryto řeky Bystřice a různé inženýrské sítě. Tvar údolí je poměrně netypický a obsahuje pozvolnou část bilinského svahu, údolní nivu řeky a strmý svah směrem k ústecké opěře. Sklony svahů i překážky jsou zároveň poměrně šikmé vůči směru trasy. Na volbu výsledné varianty měly vliv také velice nepříznivé geologické poměry a neúnosné slínovce kategorie F8 CH v podloží údolní nivy.

Se znalostí okrajových podmínek a na základě provedené rešerše byly následně navrhovány jednotlivé varianty, které byly rozděleny do několika kategorií. Do kategorie s nejmenším rozpětím polí byly zařazeny mosty jednotrámové, dvoutrámové a mosty z prefabrikovaných nosníků. S maximálním rozpětím polí 36-45 m se ukázalo, že výška mostu nad terémem a velký počet vysokých pilířů není pro návrh vhodný jak z estetického, tak ekonomického hlediska.

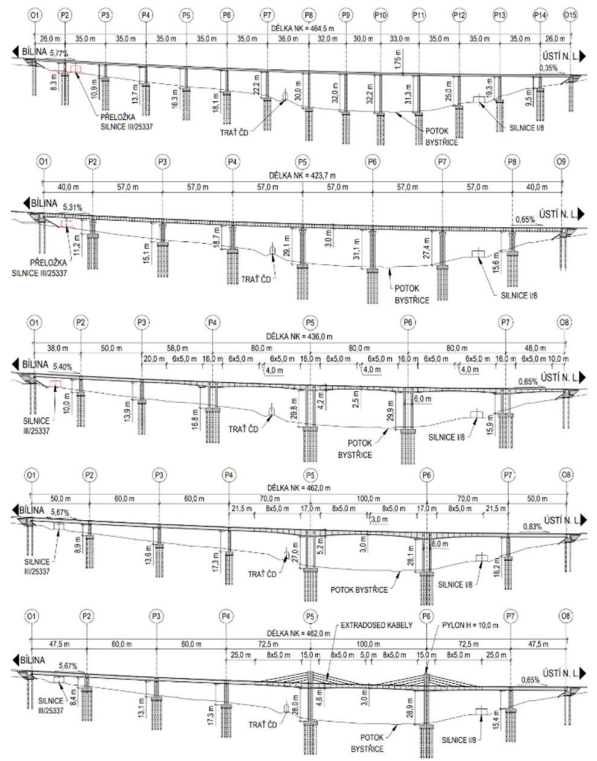
Dále byly zvažovány varianty s jedinou nosnou konstrukcí s velmi vyloženými konzolami a dvojice samostatných komorových letmo betonovaných mostů. Tyto varianty i přes velice příznivý vzhled nebyly zvoleny kvůli geologickým poměrům. V případě nadměrného sedání by u rámově spojené spodní stavby a nosné konstrukce nebylo možné provést výškovou rektifikaci a u jediné nosné konstrukce by při výškové rektifikaci muselo dojít k celkové uzavírce úseku, zatímco u dvojice samostatných konstrukcí by bylo možné provést uzavírku po polovinách zvláště pro každý most.

Jako nejvhodnější se proto ukázaly varianty spojených komorových nosníků uložených na ložiskách. Rozpětí bylo navrženo tak, aby nepřesahovalo 60 m a bylo realizovatelné jak technologií výsuvné skruže, tak letmou montáží segmentů.

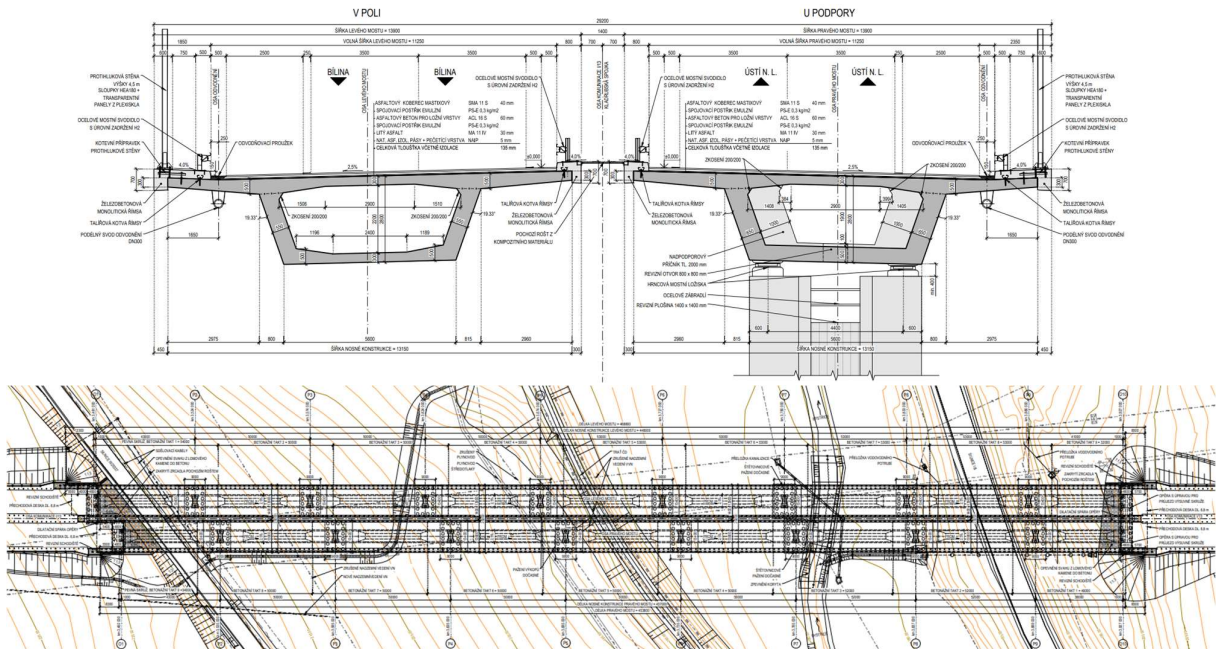
Výsledná varianta obsahuje dvojici mostů o 9 polích s komorovým průřezem výšky 2,8 m. Rozpětí polí je

43+3x50+4x53+41 m u levého a 43+5x50+2x52+38 m u pravého mostu.

Levý a pravý most jsou vzájemně odsazeny tak, aby i při maximálním rozpětí pouze 53 m respektovaly veškeré důležité překážky a měly vhodný poměr jednotlivých polí včetně polí krajních. Rozmístění pilířů zároveň kopíruje tvar údolí a rozdělená opěra přináší výraznou úsporu při zemních pracích, protože navazuje na stávající svah u silnice III. třídy.



Obrázek 2: Podélné řezy některých zvažovaných variant



Obrázek 3: Vzorový příčný řez a půdorys výsledné variant

* Školitel: doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.

3. POSTUP VÝSTAVBY

Návrh výsledné varianty respektoval požadavky konkrétní výsuvné skruže ŽM16, ke které byly autorovi poskytnuty podklady od firmy Metrostav. Pro její optimální nasazení byl upraven tvar příčného řezu, nadpodporových příčníků a pilířů.

Dále byla navržena montážní plošina za ústeckou opěrou, na které byla skruž montována a demontována. S ohledem na výsuv skruže z prostoru za mostem byla tato opěra navržena jako průjezdná. Během výstavby obsahuje pouze dřík, zbylá část včetně křídel bude zhotovena až po dokončení celé nosné konstrukce.

Technologicky náročnou operací je příčný přesun skruže z pravého na levý most. Z toho důvodu byl směr výstavby navržěn tak, aby se tento přesun prováděl u bílinské opěry s mírnějšími sklonovými poměry terénu.

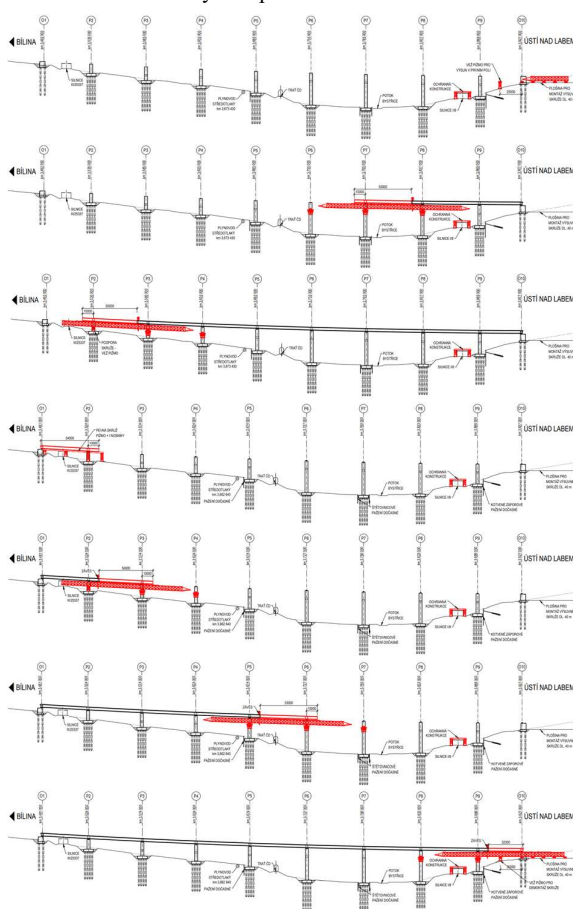
V krajním poli u bílinské opěry již není dostatečná výška pod mostem pro umožnění průjezdu příhradových nosníků výsuvné skruže. Poslední pole pravého mostu a první pole levého mostu proto budou stavěny na pevné skruži z věží PIŽMO a vysokých I nosníků.

Pro úsporu materiálu skruží bude zhotoveno první pole levého mostu s předstihem před příčným přesunem výsuvné skruže a stejná skruž bude následně využita pro dokončení posledního taktu pravého mostu.

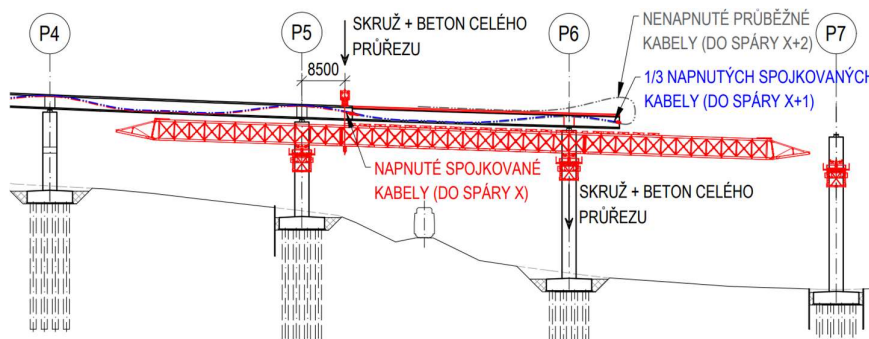
Pro výstavbu je důležitá dočasná fixace nosné konstrukce k opěře před dosažením taktu s pevným ložiskem. Z bezpečnostních důvodů je navržena také ochranná konstrukce nad silnicí I. třídy.

Most je stavěn postupně po betonážních taktích s převislou konzolou délky 10 m. Pro snížení namáhání skruže a z technologických důvodů je navržena výstavba betonážního taktu po částech. Nejprve je betonována a částečně předepnuta spodní

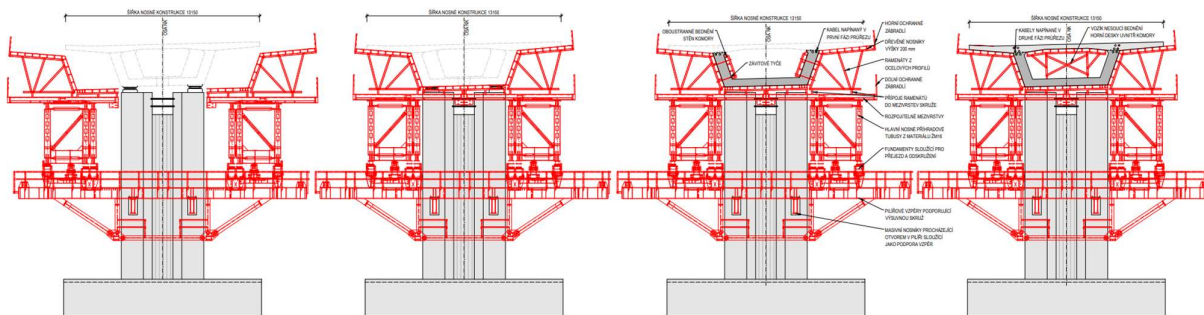
část (dolní deska a stěny) a následně je po 7 dnech betonována horní deska s následným dopnutím celého taktu.



Obrázek 4: Výstavba levého a pravého mostu



Obrázek 5: Detail fáze betonáže horní desky



Obrázek 6: Postupná výstavba a napínání příčného řezu

4. STATICKÁ ANALÝZA NOSNÉ KONSTRUKCE

4.1. Variantní návrh uspořádání předpětí

Důležitou částí práce byl návrh uspořádání předpětí. V této části byl uvažován prutový výpočetní model se zohledněním fázi výstavby po jednotlivých betonážních takttech. Tento model při variantním návrhu předpětí neuvvažoval postupnou výstavbu příčného řezu.

Již u první varianty se ukázalo, že je nutné řešit kromě statických účinků také konstrukční uspořádání s ohledem na prostorové požadavky v kotevních čelech pracovních spár.

První návrh obsahuje celkem 16x22 lanových kabelů, které jsou vedeny spojitě přes 2 pole a jsou spojovány po polovinách v každé pracovní spáře. Právě kotvení 4 kabelů v jedné stěně společně s dalšími 4 průchozími kabely se ukázalo jako velice nevhodné a v dalších variantách bylo nutné redukovat počet kotvených kabelů ve stěně na 3.

Pro redukci kotvených kabelů a pro splnění normových kritérií na napěťové stavy byly u druhé varianty navrženy příložky. Z porovnání metody vyrovnání napětí a vyrovnání zatížení je však jednoznačně patrné, že tyto kabely pouze vykrývají tahová napětí a nemají pozitivní vliv na průhyby ani redukci posouvající síly. Kromě toho jsou špatně proveditelné s ohledem na zvolený postup výstavby.

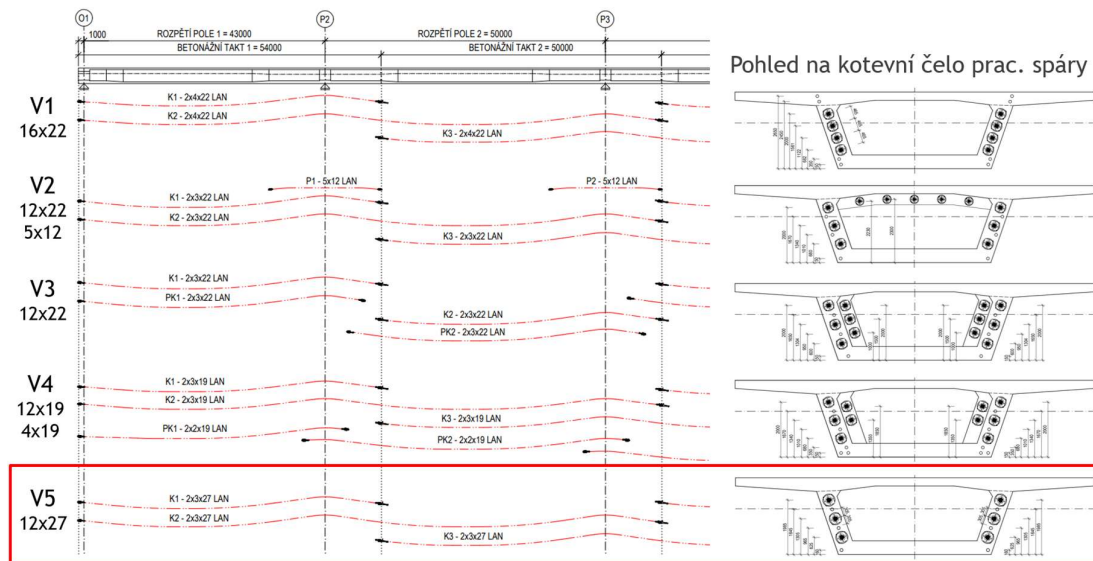
Velice zajímavou alternativou spojitých dvoupolových kabelů prezentuje varianta 3. Ta obsahuje pouze jednopolevé kabely, z nichž je polovina spojována po každém taktu a druhá polovina je překotvována v 3 m dlouhém rozšíření stěny, které se nachází 3 m od pracovní spáry, čímž je dodrženo kritérium na maximální počet kotvených kabelů v jednom řezu.

Tyto kabely mají velkou výhodu ve velikosti ztrát třením a vytváří výraznou úsporu v potřebném počtu předpínacích lan proti dlouhým dvoupolovým kabelům. Tato výhoda je však vykoupena až trojnásobným nárůstem počtu kotev.

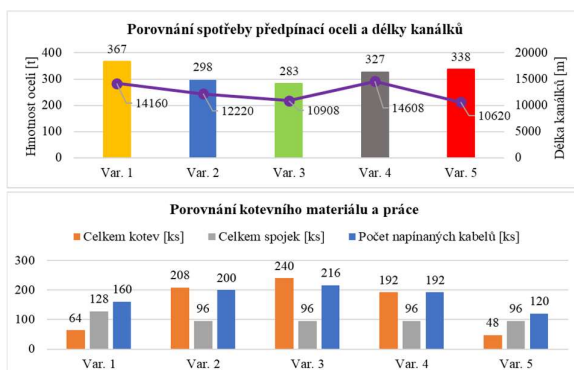
Čtvrtá varianta obsahuje část kabelů dvoupolových a část kabelů překotvovaných. Vzhledem k tomu, že u dvoupolových kabelů je náročná práce s těžkými průběžnými kabely a u překotvování je problematické kotvení kabelů uvnitř komory, nebylo by výhodné u jedné varianty obě nevýhody kombinovat.

Proto byla jako poslední a zároveň vítězná navržena varianta obsahující 12 dvoupolových kabelů, které byly pro splnění podmínek MSP složeny z 27lanových kabelů. Tato varianta obsahuje i přes větší spotřebu předpínací oceli minimální počet kotev i napínacích cyklů, což by mohlo mít také pozitivní vliv na pracnost při provádění.

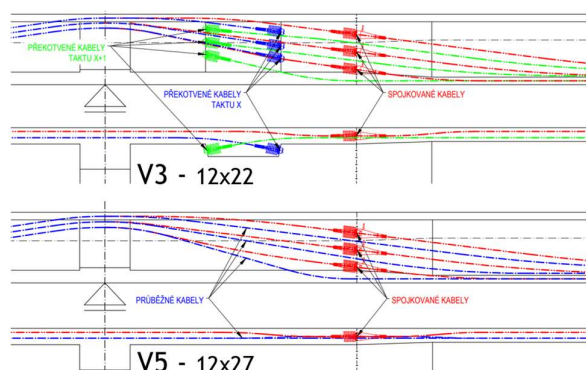
Srovnání jednotlivých variant je provedeno pomocí výkazu položek předpínacích systémů pro obě nosné konstrukce. Tonáž předpínací oceli, délky kanálků, počty kotev a spojek i počty napínacích cyklů jsou vyneseny v příložených grafech.



Obrázek 7: Schéma uspořádání předpětí jednotlivých variant



Obrázek 8: Výkaz položek variant předpětí



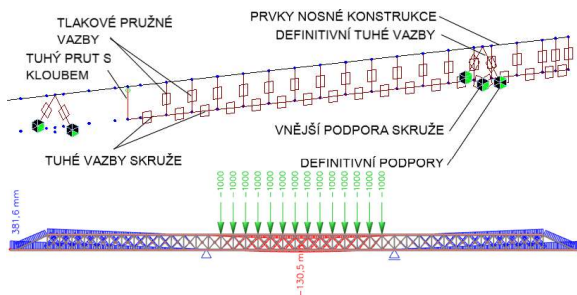
Obrázek 9: Detail pracovní spáry variant 3 a 5

4.2. Postupná výstavba příčného řezu

V této fázi výpočtu byl definován spřažený průřez s účelem respektovat skutečný postup výstavby. S ohledem na postupné napínání byly ve svislé rovině podrobně trasovány jednotlivé předpínací kabely dle schématu předpětí výsledné varianty.

Spodní část průřezu není samonosná a není proto možné ani ve výpočetním modelu tuto část ponechat bez podepření vzdorovat vlastní tíže čerstvého betonu. Proto bylo nutné ve výpočetním modelu definovat skruž, která se skládá z vodorovných tuhých vazeb a svislých pružných vazeb působících pouze v tlaku. Tato sestava vazeb byla propojena pomocí fiktivního prutu s prvky předchozího betonážního taktu a postupně byla aktivována a deaktivována v jednotlivých taktech dle navrženého postupu výstavby.

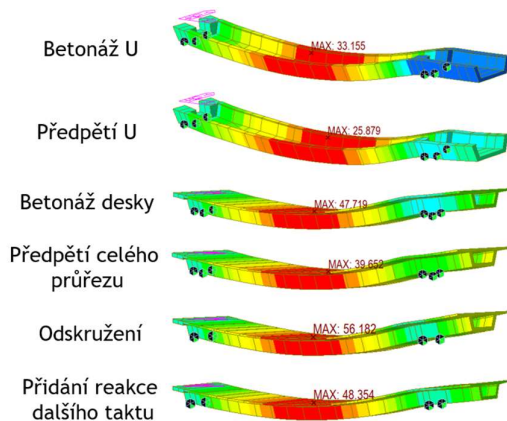
Tuhost skruže byla stanovena na základě deformací pomocného výpočetního modelu, který byl sestaven dle výkresových podkladů skruže z dílců ŽM16 a pomocí kterého byly spočteny také reakce od tíhy skruže a čerstvého betonu na konzolu předešlého taktu.



Obrázek 10: Sestava vazeb výsvné skruže

Tuhost skruže byla důležitá pro zohlednění interakce s nosnou konstrukcí, která se projevila při postupné výstavbě příčného řezu. Skruž svou poddajností umožní značné průhyby, z nichž je nejvíce důležitý přírůstek při betonáži horní desky, která skruž výrazně přitíží a díky průhybu skruže je namáhána i již 7 dní stará spodní část průřezu.

Nárůst se pohybuje dle délky taktu okolo 20 mm. To si lze představit jako vynucený pokles spojitě podpory U průřezu, který vyvolá tahové napětí ve spodních vláknech uprostřed rozpětí až 3,5 MPa. Tuto změnu napjatosti potvrdil hlavní výpočetní model v programu Midas Civil i pomocný model nosníku U průřezu zatížený příslušným poklesem podpor.



Obrázek 11: Průhyby při betonážním taktu

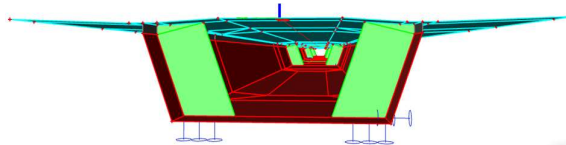
Tato analýza potvrdila důležitost částečného předpětí. Pokud by v průřezu nebyla před betonáží horní desky vyvozena tlaková rezerva částečným předpětím 1 ze 3 kabelů v každé stěně, došlo by tímto jevem k nežádoucímu vzniku trhlin.

Postupná výstavba ukázala také vliv diferenčního smršťování, které s ohledem na různé stáří betonů a různý náhradní rozměr jednotlivých částí způsobovalo tahové napětí v horní desce.

Pro tento výsledný model bylo provedeno posouzení podélného směru nosné konstrukce v mezním stavu únosnosti a mezním stavu použitelnosti.

4.3. Posouzení příčného směru

Pro ověření dimenzí příčného řezu a návrh příčné ohybové výztuže a smykové výztuže v podobě spon byl vytvořen deskostěnový model části konstrukce obsahující 3 pole.

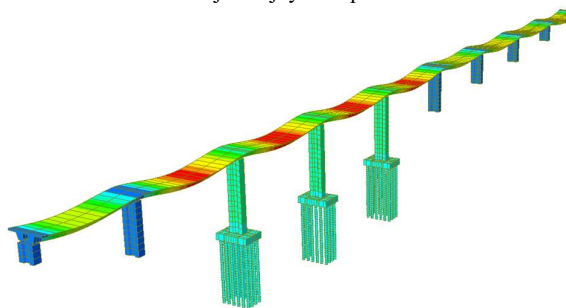


Obrázek 12: Deskostěnový model nosné konstrukce

5. SPODNÍ STAVBA A ZALOŽENÍ MOSTU

Pro návrh mostu bylo důležité také posouzení až 30 m vysokých pilířů. S ohledem na jejich štíhlost bylo nutné zohlednit účinky II. řádu, které byly stanoveny zjednodušenými metodami jmenovité tuhosti a jmenovité křivosti.

Při analýze se s ohledem na redukci vzpěrných délek a rozdělení silových účinků na větší počet pilířů ukázal výhodný návrh většího počtu pevných ložisek. Konkrétně byla pevná ložiska navržena na trojici nejvyšších pilířů.



Obrázek 13: Výpočetní model s pružným pilotovým založením

Poslední část statického výpočtu byla věnována založení mostu. Tato část se ukázala pro realizovatelnost mostu jako kritická, což je způsobeno velice neúnosným podložím v údolní nivě potoka Bystřice, které je tvořeno slínovci s uvedenou hodnotou deformačního modulu pouze 4 MPa.

U pilotových základů bylo při použití parametrů z inženýrsko-geologického průzkumu zjištěno nadměrné sedání přesahující 100 mm. Tyto hodnoty byly získány analytickým výpočtem fiktivního plošného základu i modulem skupiny pilot v programu GEO5.

Autorem byla navržena různá opatření, z nichž je nejdůležitější provedení doplňkového průzkumu a statické zatěžovací zkoušky nesystémových pilot, které by mohly potvrdit či vyvrátit parametry, které udává dosavadní průzkum.

6. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VARIANT PŘEDPĚTÍ

V závěrečné kapitole diplomové práce bylo popsáno ekonomické zhodnocení variant předpětí, které bylo po domluvě s vedoucím diplomové práce poskytnuto firmou VSL Systémy CZ, s.r.o. na základě zaslaných položkových výkazů jednotlivých variant.

Z tohoto zhodnocení bylo zjištěno, že pro celkovou cenu předpínacího systému má poměrně malý vliv počet kotev. Ten se dle očekávání projevuje v rozdílné jednotkové ceně jednotlivých variant. Na celkovou cenu má však nejvýraznější vliv celková tonáž předpínací oceli. Proto by z ekonomického hlediska bylo výhodnější použití jednopólových překotvovaných kabelů, u kterých lze dosáhnout výrazné úspory na množství předpínací výztuže.

Pro výsledný výběr při realizaci stavby by však bylo důležité vybrat nejvhodnější variantu s ohledem na všechny zúčastněné strany – projektanta, zhotovitele i dodavatele předpínacího systému. Kromě této cenové kalkulace se do výsledné ceny může výraznou mírou projevit také vliv pracnosti při provádění, který zvyšuje náklady zhotovitele.

Tabulka 1: *Ekonomické zhodnocení variant předpětí*

Varianta	Popis návrhu předpětí	Tonáž s přesahy [t]	Jednotková cena [Kč/t]	Celková cena [Kč bez DPH]
V1	16x22 50%	378,14	93%	100%
V2	12x22 50% + 5x12 100%	311,70	100%	88%
V3	12x22 100%	293,42	98%	81%
V4	12x19 50% + 4x19 100%	332,03	96%	90%
V5	12x27 50%	348,75	92%	91%

7. ZÁVĚR

Velký přínos pro zpracování diplomové práce měla úvodní rešerše, která poskytla množství užitečných informací o referenčních stavbách.

Výsledná varianta se osvědčila i při získání podkladů ke konkrétní výsuvné skruži a potvrdila se její vhodnost pro tuto technologii. Tato varianta zároveň zlepšila statické i dispoziční problémy stávajícího návrhu. Jediným problémem je při použití spodní výsuvné skruže malá výška mostu nad terénem u bílinské opěry, kde bude pro výstavbu krajních polí nutné použít skruží pevnou.

Pro výslednou variantu byl navržen předpokládaný postup výstavby. Důležitou částí byl rozbor betonážního taktu s ohledem na postupnou výstavbu a předpínání příčného řezu. Poslední částí před samotným statickým výpočtem byla analýza výsuvné skruže, která poskytla reakce od tíhy skruže a čerstvého betonu a její tuhosti v jednotlivých místech.

Komentovaný statický výpočet byl vytvořen samostatně pro hlavní části konstrukce. Nejrozsáhlejší část byla věnována podélnému směru nosné konstrukce. Pomocí prutových modelů bez fázovaného průřezu bylo vytvořeno 5 variant uspořádání předpětí, které byly předběžně posouzeny. Na základě multikriteriálního zhodnocení s pomocí výkazu položek předpínacího systému z nich byla vybrána ta, která byla považována za nejvhodnější.

V následující části byl pro tuto variantu vytvořen výpočetní model zohledňující fázovanou výstavbu a předpínání příčného řezu společně se zohledněním tuhosti skruže.

Při posouzení mezního stavu použitelnosti byla prokázána vhodnost návrhu částečného předpětí spodní části průřezu pomocí jednoho z kabelů v každé stěně. Oproti průřezu nefázovanému má vliv také diferenční smršťování, které způsobuje tahové napětí v horní dobetonované desce.

Po dokončení podélného směru byl posouzen také příčný směr nosné konstrukce pomocí deskostěnového modelu. Následně byla posouzena spodní stavba, kde vzhledem ke štíhlosti pilířů bylo nutné zohlednit účinky druhého řádu a ukázala se vhodnost návrhu většího počtu pevných ložisek.

Závěrečná část statického výpočtu byla věnována posouzení založení. S ohledem na velice nepříznivé hodnoty sedání je zásadní na tento problém upozornit a přenechat komplikované založení na dlouhých plovoucích pilotách v neúnosném slínovcovém podloží specialistům v oboru geotechniky a nespolehat se na zjednodušené analytické výpočty.

V poslední části práce byly porovnány jednotlivé varianty předpětí také z ekonomického hlediska, které bylo možné posoudit na základě poskytnutých cenových kalkulací firmy VSL.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Marku Foglarovi, Ph.D., za cenné rady a čas vynaložený ke konzultacím. Mé poděkování patří také panu Ing. Davidu Stempákoví, MBA za poskytnutí podkladů k výsuvným skružím firmy Metrostav Infrastructure a.s. a pánům Ing. Petru Ševčíkovi a Ing. Pavlu Vaňkovi z firmy VSL Systémy CZ, s.r.o. za ekonomické zhodnocení návrhu předpínacího systému.

Reference

- NERADÍLEK, Martin. Most přes údolí řeky Bystřice na silnici I/13. Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební, 2022
- NAVRÁTIL, Jaroslav. Předpjeté betonové konstrukce. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-561-7
- VANĚK, Pavel. Ekonomické vyhodnocení variant předpětí. VSL Systémy CZ, s.r.o.
- SMÍŠEK, Pavel. Poznatky z instalace předpětí do různých typů nosných konstrukcí mostů na D1 Hubová–Ivachnová. *ASB-portal.cz* [online]. 2017 Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/inzenyrske-stavby/mosty/poznatky-zinstalace-predpeti-do-ruznych-typu-nosnych-konstrukci-mostu-na-d1-hubovaivachnova>
- STEMPÁK, David. Podklady k výsuvné skruži ŽM16 firmy Metrostav Infrastructure, a.s.
- MASOPUST, Jan. Navrhování základových a pažicích konstrukcí. 2. vydání. Praha: pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2018. Technická knihovna (ČKAIT). ISBN 978-808-8265-122