

NÁVRH MOSTU NA SILNICI I/27 NA OBCHVATU PLASŮ PŘES ÚDOLÍ ŘEKY STŘELY

Jan Janoušek, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thakurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
jan.janousek.1@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Článek pojednává o návrhu a statickém posouzení mostu na plánovaném obchvatu Plasů přes údolí řeky Střely na silnici I/27. V úvodu jsou popsány 4 uvažované varianty a následně vybrána finální varianta přemostění. Tou se stal železobetonový obloukový most s horní mostovkou. Vybraná varianta je následně podrobněji popsána z hlediska návrhu jednotlivých prvků a jejich posouzení. Důraz byl kladen zejména na návrh geometrie oblouku a postupu výstavby. V dalších částech jsou popsány ostatní konstrukční prvky, nosná konstrukce, spodní stavba a založení, z hlediska návrhu a posouzení konstrukce během výstavby a v konečném stavu. Konstrukce byla posouzena v mezních stavech únosnosti a použitelnosti s využitím výpočetních programů a ručních posudků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Obloukový most • Železobetonová konstrukce • Postup výstavby
• Předpjatý beton • Letmá betonáž

ABSTRACT

This article deals with the design and structural assessment of the bridge on the newly planned Plasy bypass over the valley of the Střela river on the road I/27. Four alternatives were considered, as described in the introduction, one of which is chosen for detailed design. The first variant, an Arch bridge with upper deck, was selected. The selected variant is closely described in terms of the design of the individual elements and their assessment. The emphasis was on the design of the arch geometry and construction process. In the following sections, the parameters of the superstructure, substructure and foundations are described in terms of design and assessment methods. Structure was assessed for both serviceability and ultimate limit states using software and manual verification, some of were verified during construction process.

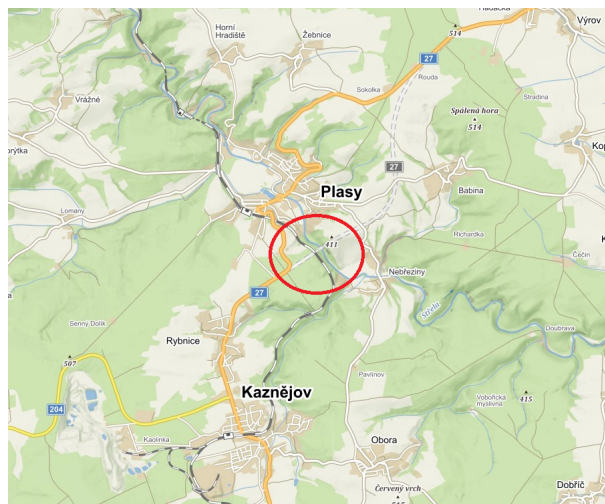
KEYWORDS

Arch bridge • Reinforced concrete structure • Procedures of construction • Prestressed concrete • Cantilever method

1. ÚVOD

Předmětem článku je návrh přemostění údolí řeky Střely na silnici I/27 na obchvatu obce Plasy. Mostní objekt je situován v extravilánu obce Plasy na plánované přeložce silnice I/27, která bude sloužit k vedení veřejné dopravy mimo město a dojde tak ke snížení negativního vlivu dopravy na chráněné objekty a zastavěné území podél stávající silnice a ke zvýšení plynulosti a bezpečnosti

dopravy. Konstrukce převádí komunikaci kategorie S9,5/70 přes rozsáhlé a hluboké údolí řeky Střely, kde přemost'uje polní a lesní cesty, železniční trať č. 160 a řeku Střelu. Právě kvůli údolí řeky Střely, které je velmi exponované jak z Plaské strany, tak od Nebřezin, jsou kladeny zvláštní požadavky na šetrné začlenění mostu do krajiny a zároveň na minimalizaci stavebních prací v údolí.



Obrázek 1: Poloha stavby.

2. NÁVRH VARIANT PŘEMOSTĚNÍ

Konstrukční řešení jednotlivých variant vychází z požadavků uvedených výše. Především jde o možnost překlenout co možná největší část údolí nad řekou Střelou jedním polem a možností výstavby takové konstrukce bez nutnosti přístupu pod most. Zároveň je kladen důraz i na estetickou stránku konstrukce tak, aby nedošlo k významnému narušení krajiny. Směrové a výškové řešení mostu odpovídá vedení trasy I/27. Zvažované byly následující varianty:

1. Železobetonový obloukový most
2. Vzpěradlový most s ocelovou mostovkou
3. Extradosed konstrukce
4. Letmo betonovaná konstrukce

Všechny 4 varianty splňují požadavek na možnost realizace nad řekou bez nutnosti přístupu do údolí. První varianta jej překlene pomocí oblouku s teoretickým rozpětím 180,0 m, jenž je zhotoven metodou letmé betonáže s vyvšováním. V případě druhé varianty

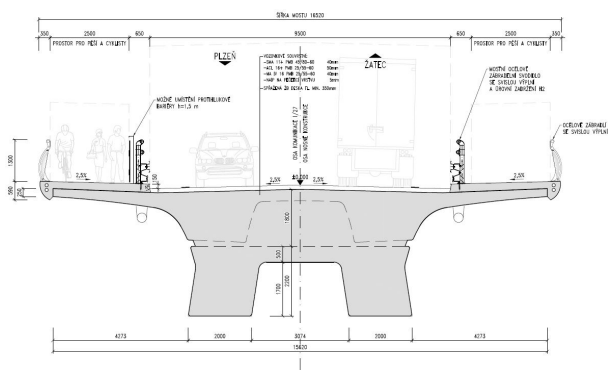
* Školitel: doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEng.

je spřažená ocelobetonová mostovka, zhotovená podélným výsuvem, nad řekou podepřena pomocí šikmých železobetonových vzpěr s teoretickým rozpětím podpor v patě 180,3 m. Třetí varianta, komorový nosník zavěšený pomocí extradosed kabelů nad hlavním a přilehlých dvou polích, je nad řekou letmo betonovaná s délkou hlavního pole 160,0 m. Čtvrtá varianta je řešená obdobně jako třetí, shodně se jedná o komorový spojitý nosník s délkou hlavního pole 160,0 m realizovaný letmou betonáží.

Po pečlivém zvážení byla jako nejvhodnější vybrána první varianta, která je dále podrobněji popsána.

2.1. Popis navržené konstrukce

Mostní objekt je tvořen železobetonovým obloukem s horní mostovkou o celkové délce mostu 483,600 m. Nosná konstrukce je navržena jako spojitý nosník o 14 polích s dvoutrámovým průřezem z předpjatého betonu (C40/50). Podepřena je krajními opěrami, pilíři s ložisky, rámovými stojkami a nad nejhlubším místem údolí pak obloukem. S ním je mostovka nad vrcholem tuze spojená v délce 18,0 m tak, že tvoří jeden plný průřez. Oblouk je železobetonový (C40/50), oboustranně vetknutý v patkách s teoretickým rozpětím 180,0 m a vzepětím 44,295 m. Průřez oblouku má tvar obráceného "U" a jeho výška je proměnná, ve 20 m dlouhém úseku ve vrcholu má konstantní výšku 2,200 m a zvětšuje se směrem k patkám až na 3,800 m. Rozpětí jednotlivých polí je (ve směru na Žatec) 25,0 + 8 x 32,0 + 66,0 (vč. 18 m dlouhého úseku tuhého spojení s obloukem) + 3 x 32,0 + 25,0 m. Založení opěr, pilířů a oblouku je plošné, opěry na náspu jsou založeny na pilotách. Na Obr. 2 je znázorněn vzorový příčný řez ve vrcholu oblouku - v místě tuhého spojení oblouku a mostovky.



Obrázek 2: Vzorový příčný řez ve vrcholu oblouku.

3. OBLOUK

3.1. Návrh tvaru střednice

Vhodně zvoleným tvarem střednice oblouku lze výrazně snížit ohybové momenty a tahová napětí vyvolané stálým zatížením. Tím lze dosáhnout úspory materiálu, ať už snížením množství potřebné betonářské výztuže, nebo zmenšením průřezové plochy. Optimalizace tvaru střednice je provedena pro známé rozpětí a vzepětí oblouku, rozložení vlastní tíhy a pro všechna ostatní stálá zatížení. Do výpočtu lze zahrnout i část rovnoměrného zatížení z modelu LM1, to je ale, vzhledem k velikosti vlastní tíhy, zanedbatelné a není uváženo. Ideální tvar střednice by měl sledovat průběh tlakové čáry. Ten je stanoven s využitím předpokladu o konstantní obloukové síle (1). Na náhradním prostém nosníku, odpovídajícím

půdorysnému průmětu oblouku, je stanoven průběh ohybového momentu od všech stálých zatížení působících na oblouk.

Svislá pořadnice tlakové čáry je pak stanovena ze vztahu (2).

$$H = \frac{M_{max}}{f} = \frac{2903027,7}{44,295} = 65538,5 \text{ kN} \quad (1)$$

$$z_{(x)} = \frac{M_{(x)}}{H} = \frac{M_{(x)}}{65538,5} [m] \quad (2)$$

Výsledná křivka je znázorněna na Obr. 3. Její průběh nejvíce připomíná lomenici s lomy v místě stojek. Z průběhu je zřejmé, že běžné křivky tlakovou čáru nepokryjí, proto je tvar střednice hledán tak, aby tlaková čára působila v jádře průřezu. První zvažovanou křivkou byla parabola 4° podle Chambauda (3).

$$z_{(x)} = f \left[(1 - \varepsilon) \frac{x^2}{a^2} + \varepsilon \frac{x^4}{a^4} \right] \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\pi - 1}{\pi + 5} \quad (4)$$

$$\pi = \frac{g_p + \frac{p}{2}}{g_v + \frac{p}{2}} \quad (5)$$

Kde parametr f je vzepětí oblouku, a je polovina rozpětí oblouku a ε je rozdíl pořadnic paraboly 4° a 2° ve čtvrtině rozpětí. Parametr π představuje poměr zatížení v patě oblouku a ve vrcholu, g_p a g_v jsou hodnoty zatížení vlastní tíhou na 1 m délky a p je hodnota proměnného zatížení na 1 m délky. Vhodnou volbou parametru π byla nalezena křivka s průběhem relativně dobře pokrývajícím průběh tlakové čáry. V "nejhorší" části se tlaková čára vzdaluje od hranice jádra průřezu o méně než 18 cm, takže od stálých zatížení vznikají ohybové momenty, ale vzhledem k velikosti excentricity dosahují přijatelných hodnot.

Další zvažovanou možností byla parabola 2°, ta se ale vzdaluje od tlakové čáry až příliš (zejména u stojek P9 a P12), že by její použití bylo nevhodné. Použita je tedy parabola 4° s předpisem:

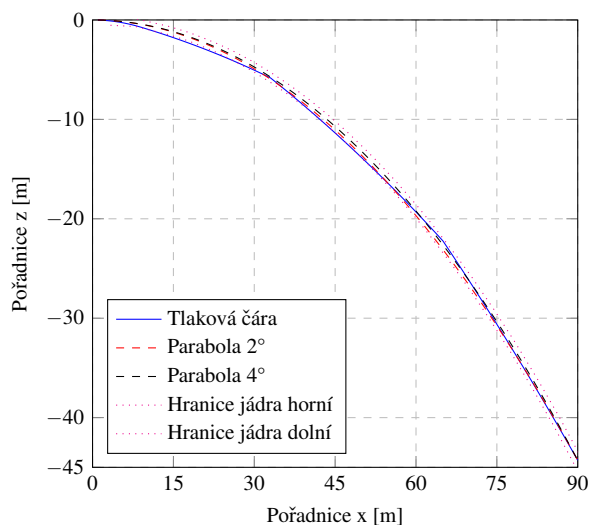
$$z_{(x)} = 5,233 \times 10^{-3} \times x^2 + 2,903 \times 10^{-8} \times x^4 [m] \quad (6)$$

3.2. Postup výstavby

Výstavba oblouku je navržena metodou letmé betonáže s postupným vyvěšováním, probíhající symetricky z obou patek. Jednotlivé lamely jsou realizovány pomocí betonářského vozíku a jsou vyvěšeny pomocí předpínacích lan přes pilíře P8 a P13, v horní části pak přes provizorní pylony. Jedna polovina oblouku je složená z 13,0 m dlouhého zárodku, 17 lamel dlouhých 5,0 m a jedné lamely dlouhé 4,0 m. Ve vrcholu je uzavírací spára dlouhá 2,0 m. Analýza oblouku během výstavby je provedena v programu SCIA Engineer s využitím lineárních fází výstavby. Výpočet je proveden v rovině XZ, celkem zahrnuje 110 fází výstavby od zhotovení spodní stavby až po aplikaci ostatního stálého zatížení.

Realizace jedné lamely je ve výpočtu rozdělena do 5 kroků:

1. Osazení (přesun) bednění: dokončená lamela zatížená koncovými silami (svislou silou a ohybovým momentem) od tíhy betonářského vozíku,
2. Osazení a aktivování (napnutí) závěsu: na dokončenou lamelu je přidán a následně napnut závěs,



Obrázek 3: Průběh tlakové čáry, paraboly 4° a paraboly 2° a hranice jádra průřezu pro střednici tvaru paraboly 4°

3. Betonáž nové lamely: předchozí (dokončená) lamela je zatížena koncovými silami od tíhy mokrého betonu nové lamely,
4. Přidání prvku (nové lamely): do výpočetního modelu je přidána nová lamela (nový prvek),
5. Vyschnutí nové lamely: nová lamela je zatížena vlastní tíhou a předchozí lamela je zatížena koncovými silami od tíhy mokrého betonu nové lamely s opačným znaménkem

Následuje přesun bednění a realizace následující lamely. Závěsy jsou ve výpočtu napnuty v jednom kroku ve fázi, kdy jsou přidány do konstrukce. Hodnota napínací síly byla stanovena iterativně na základě sledování deformací a normálového napětí v lamelách, které bylo omezeno hodnotami $\sigma_{x,min} = 0.6 \times f_{ck}(t)$ a $\sigma_{x,max} = f_{ctm}(t)$. Po dokončení posledních lamel byla do obou polovin oblouku vnesena normálová síla o velikosti odpovídající přibližně 1/4 normálové síly působící ve vrcholu dokončeného oblouku. Pro snížení ohybových momentů, vznikajících během výstavby, byla tato síla aplikována s excentricitou. Poté byla dobetonována uzavírací spára ve vrcholu o šířce 2,0 m a obě poloviny oblouku propojeny. Následně byly odstraněny závěsy na provizorním pylonu a část závěsů na pilířích, zbylá část je odstraněna až po dokončení mostovky pro snížení namáhání oblouku během její realizace. Výstavba dále pokračuje realizací stojek na oblouku a zbývajících polí mostovky.

4. NOSNÁ KONSTRUKCE MOSTOVKY

K návrhu mostovky a předpětí byl využit globální prutový 3D model s fázemi výstavby, který je zároveň použit i pro stanovení účinků zatížení na spodní stavbu a založení. Příčný roznos zatížení na jednotlivé trámy byl stanoven na deskovém modelu.

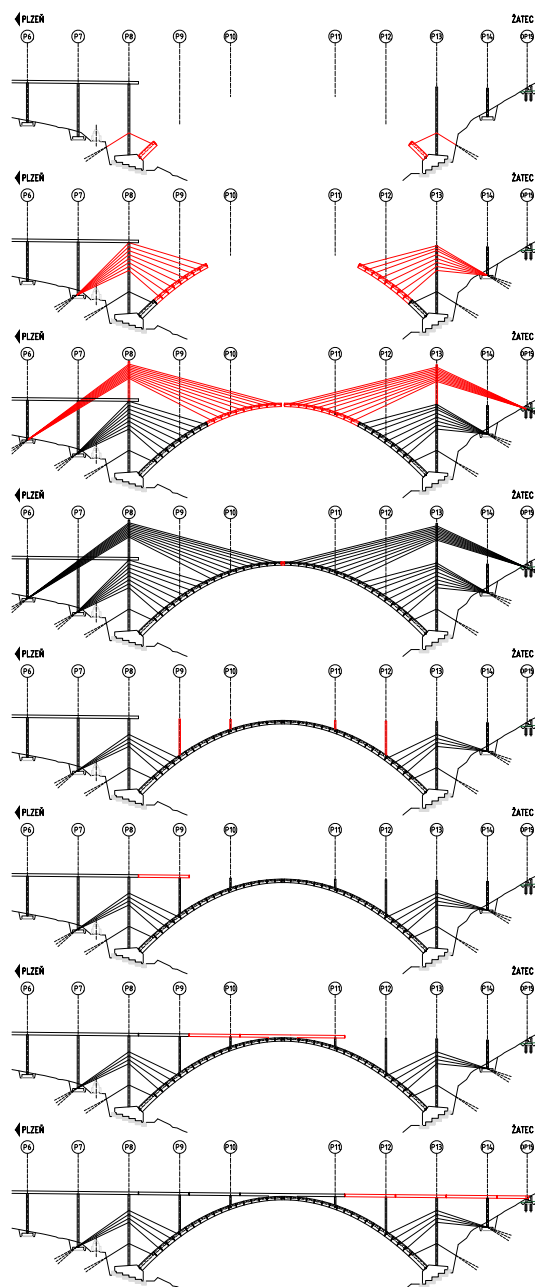
4.1. Předpětí mostovky

Předpětí mostovky je navrženo pomocí 16-ti kabelů složených z 19-ti lan Y1860 0,6"S. V každé pracovní spáře je kotvená polovina kabelů a druhá polovina je průběžná. Nosná konstrukce je posouzena pro mezní stavy použitelnosti a únosnosti během výstavby a na konci životnosti v programu Idea Statica RCS. Během

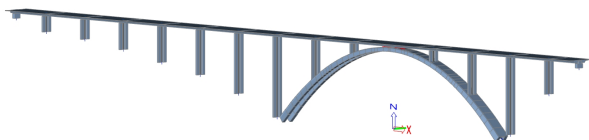
výstavby je posouzení provedeno pro stav, kdy jsou předepnuté pouze kabely kotvené na konci právě dokončeného betonážního taktu, tzn. je předepnuta pouze polovina kabelů s uvážením okamžitých ztrát předpětí. Stárí betonu je dle zvolené časové osy 7 dní a posouzení je provedeno pro odpovídající vlastnosti betonu. Dále jsou provedeny posudky mostovky na konci životnosti.

4.2. Výstavba mostovky

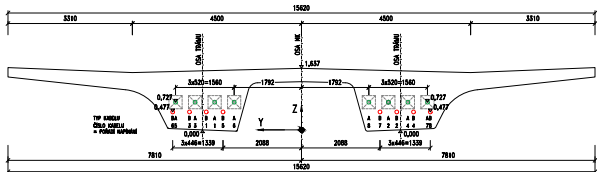
Výstavba mostovky se, vzhledem k uspořádání konstrukce v podélném směru, předpokládá na horní výsvuně skruži, díky čemuž plně odpadne nutnost přístupu pod most při realizaci mostovky. Realizace je rozdělena na 12 betonážních taktů délky 32,0 m, 66,0 m dlouhý takt nad obloukem a 20,0 m takt v poli 14. Výstavba je



Obrázek 4: Zjednodušené schéma postupu výstavby oblouku.



Obrázek 5: Globální výpočetní model konstrukce.

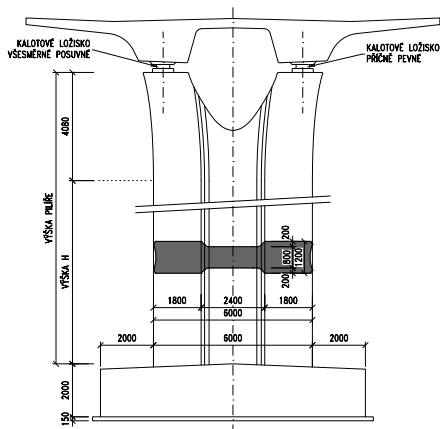


Obrázek 6: Schéma rozmístění předpínacích kabelů v pracovní spáře.

navržena z jedné strany od OP1 (od plzeňské opěry) v celé délce mostu, s pracovní spárou vždy 7 m za podpěrou.

5. SPODNÍ STAVBA

Spodní stavba je tvořena krajními opěrami, pilíři a rámovými stojkami ze železobetonu (C30/37). Posudky MSÚ a MSP jsou provedeny v programu Idea Statica na dokončené konstrukci. Typický tvar průřez pilířů a stojek je znázorněn na Obr.7.



Obrázek 7: Tvar pilíře s ložisky.

5.1. Kostrukce pilířů

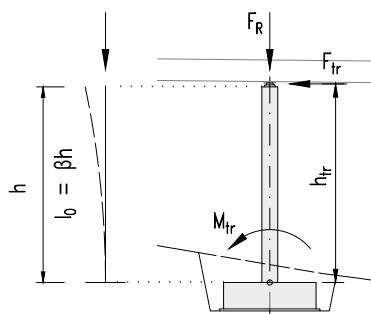
Pilíře a stojky jsou navrženy jako velmi štíhlé a tvarované, se zúženou stěnou ve střední části. Pilíře a stojky mají půdorysné rozměry $1,2 \times 6,0$ m a dosahují výšek od 9 do 45 m, část z nich podpírá mostovku pomocí ložisek a část je s mostovkou spojena rámově. Stojky na oblouku mají rozměry $0,9 \times 6,0$ m, dosahují výšek do 23 m a jsou doplněny o průchozí otvor, aby byl umožněn pohyb po horním povrchu oblouku. Vzhledem ke štíhlosti jsou při posouzení zahrnuty účinky 2. řádu, které jsou stanoveny pomocí výpočetního programu. Při výpočtu účinků druhého řádu byly uvažovány následující součinitele β a účinné délky:

1. pilíře s ložisky $\beta = 2,0$, ($l_0 = 2,0 \times h$)
2. stojky tuze spojené s mostovkou $\beta = 1,0$, ($l_0 = 1,0 \times h$)
3. stojky na oblouku $\beta = 0,75$, ($l_0 = 0,75 \times h$)

5.2. Tření v ložiskách

Ve výpočtovém modelu jsou ložiska modelována jako klouby na konci prutu s uvolněním posunu ve směru podélné osy mostu a rotace. Reálně však v těchto vazbách vznikají vlivem tření síly, které musejí pilíře přenést. Proto je při stanovení účinků zatížení na pilíře připočtena podélná síla F_{tr} působící v úrovni třecí plochy ložiska. Síla F_{tr} je stanovena jako součin celkové svislé síly F_R působící v dané vazbě (součet vlastní tíhy mostovky, ostatního stálého zatížení a poloviny rovnoměrného zatížení z modelu LM1) a součinitele tření μ (7). Ten byl uvažován hodnotou 0,07 odpovídající ložiskům s teflonovou třecí vrstvou.

$$F_{tr} = \mu \times F_R \quad (7)$$



Obrázek 8: Schéma působení sil od tření v ložisku a účinné délky

6. ZALOŽENÍ

Geotechnické poměry v místě stavby jsou jednoduché, skalní podloží se nachází v malé hloubce pod terénem a podzemní voda nebyla zastižena. Díky tomu jsou všechny podpěry, mimo opěr na náspu, založeny plošně. Při návrhu a posudcích byly použity parametry zemin doporučené v geotechnickém pasportu. Posouzení je, vzhledem k rozsahu práce, provedeno pro základ pilíře P4 a levou patku oblouku.

6.1. Založení pilíře P4

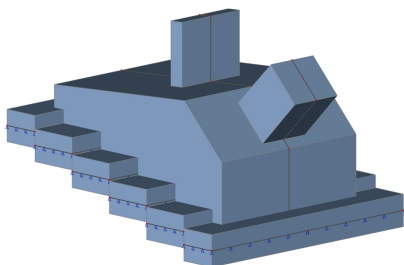
Založení pilířů je na železobetonových základech o půdorysných rozměrech $7,0 \times 10,0$ m a výšce 2,0 m. Základová spára je cca 3,3 m pod úrovní původního terénu, kde se již vyskytují štěrky hlinité tř. G4. Posudek základu je proveden v programu Geo 5 - patky pro 3 zatěžovací případy - maximální normálová síla N, maximální ohybový moment M_y a maximální ohybový moment M_z .

6.2. Založení oblouku a pilíře P8

Oblouk je založen pomocí masivního železobetonového bloku o půdorysných rozměrech $14,0 \times 18,0$ m a výšce 3,0 - 10,1 m. Do bloku je vetknut oblouk i stojka P8, která přispívá k jeho stabilizaci. Aby bylo možné přenést vodorovnou složku normálové síly z oblouku, je základová spára stupňovitá. Pro dosažení požadovaného tvaru základové spáry je navržena plomba ze slabě vyztuženého betonu o tloušťce 2,5 m. V místě patky se nachází pokryv

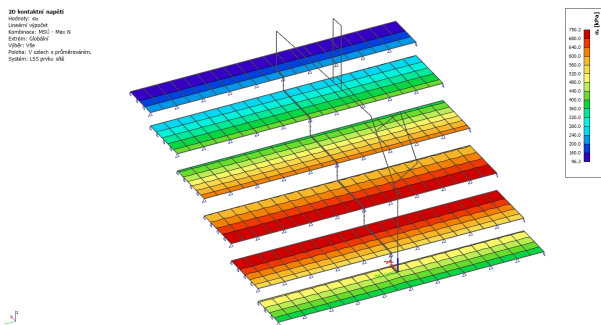
jílovito-šterkovitými deluvii podložních fylitů a šterky hlinité v mocnosti 1,6 m, pod nimi následují silně až mírně zvětralé fylity tř. R4-R3, místy až R2.

Pro posouzení patky jsou sestaveny 3 zatěžovací případy, shodně



Obrázek 9: Model patky oblouku.

s těmi pro posouzení oblouku v patě. K těmto 3 případům jsou přiřazeny odpovídající vnitřní síly v patě pilíře P8 od stejných kombinací a proměnných zatížení. Výpočet kontaktního napětí v základové spáře je proveden v programu Scia Engineer. Patka je modelována jako stěnový prvek se skutečným tvarem a rozměry. Jednotlivé stupně podkladního betonu (plomby) jsou modelovány pomocí deskových prvků. Zatížení je na patku aplikováno přes stěnové prvky, simulující pilíř a oblouk. Desky jsou podepřeny pomocí pružného podloží. To je charakterizováno pomocí Winkler-Pasternakových konstant C1 a C2 stanovených pro parametry podloží v místě patky.



Obrázek 10: Kontaktní napětí v základové spáře.

7. ZÁVĚR

Článek pojednává o autorově diplomové práci, jejímž cílem bylo navrhnout přemostění pozemní komunikace I/27 přes údolí řeky Střely. Ze čtyř koncepčních návrhů byl k podrobnému návrhu vybrán železobetonový obloukový most s horní mostovkou. Konstrukce byla navržena s ohledem na postup výstavby, zejména oblouku. Návrh byl proveden v souladu se souborem norem ČSN EN. Zvláštní pozornost byla věnována návrhu vhodného tvaru střednice oblouku a analýze vnitřních sil během výstavby. Následoval návrh mostovky včetně předpětí, návrh spodní stavby a založení. Výpočet vnitřních sil byl proveden v programu Scia Engineer na prostorovém a rovinném prutovém modelu s lineárními fázemi výstavby. Pro stanovení příčného roznosu na mostovce a pro návrh založení oblouku byl vytvořen deskostěnový prostorový

model. Posudky pro vybrané konstrukční prvky a řezy byly provedeny v programu Idea Statica RCS a posudek plošného základu v programu Geo 5. Konstrukce byla posouzena v mezních stavech použitelnosti a únosnosti. Oblouk a mostovka byly posouzeny na konci životnosti i během výstavby. Posudky bylo prokázáno, že navržená konstrukce je vyhovující v mezních stavech únosnosti i použitelnosti na konci životnosti. Posouzení oblouku během výstavby obsahuje značná zjednodušení, nicméně bylo prokázáno, že navržená konstrukce je vyhovující i během stavebních fází a navržený postup je proveditelný. Z využití průřezů je navíc zřejmé, že je dále možná optimalizace průřezů a úspora materiálu.

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří doc. Ing. Lukáši Vráblíkovi, PhD. za odborné vedení, cenné rady, vstřícnost a čas, který mi věnoval během psaní této práce.

Reference

JANOUSĚK, Jan. Návrh mostu na silnici I/27 na obchvatu Plasů přes údolí Střely. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2022