

# Zesilování betonových mostů předpínacími kabely s využitím inženýrské optimalizace



Ing. Adam Svoboda, Ph.D.  
Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta stavební, Ústav betonových  
a zděných konstrukcí

DOI:10.64720/SO.2026.02.AS01

Článek se zabývá zesilováním železobetonových mostů vybudovaných mezi lety 1900-1940, které jsou stále důležitou součástí silniční dopravní infrastruktury České republiky. Vhodnou volbou metody zesílení lze dosáhnout efektivního využití stávající konstrukce, která splňuje veškeré požadavky na ni kladené z pohledu požadované zatížitelnosti. Hlavním cílem výzkumu je zavedení inženýrských optimalizačních přístupů pro navrhování systému zesílení železobetonových mostů metodou dodatečného předepnutí předpínacími lany typu monostrand vedenými v náhradních kabelových kanálcích (metoda náhradních kabelových kanálek = SCDM) zhotovených v původních strukturách zesilovaných mostů.

**Klíčová slova:** zesilování, železobetonové mosty, dodatečné předpětí, inženýrská optimalizace

*This paper deals with the strengthening of reinforced concrete bridges built between 1900-1940, that still represent an important part of the road infrastructure of the Czech Republic. Selection of the strengthening method for the existing bridges represents an efficient alternative to a complete replacement of the bridge structure, both from the technical and especially from the economic point of view. That plays a significant role in the decision-making process in bridge management. By choosing an appropriate strengthening method, the existing reinforced structure can be used efficiently while meeting all the requirements. The main objective of this research is to introduce engineering optimization approaches to the design of strengthening system for reinforced concrete bridges using the method of post-tensioning with prestressing cables led in substitute cable ducts (substitute cable duct method = SCDM) drilled in the original structures of the strengthened bridges.*

**Keywords:** strengthening, reinforced concrete bridges, post-tensioning, engineering optimization

## 1 ÚVOD

Článek, který svým obsahem vychází ze stejnojmenné disertační práce autora [1], se zabývá aktuální problematikou dopravního stavitelství a konstrukčního inženýrství, a to zesilováním železobetonových mostů vybudovaných mezi lety 1900-1940, které jsou důležitou součástí silniční dopravní infrastruktury České republiky. Zesilování stávajících mostů představuje efektivní alternativu k nahrazení celé mostní konstrukce, a to jak z technického, tak zejména z ekonomického hlediska, které v rozhodovacím procesu v rámci hospodaření s mosty hraje významnou roli.

V posledních dvou až třech dekadách jsou inženýři v oblasti mostního stavitelství svědky zhoršení stavu mostních konstrukcí, které nyní představuje vážný technický a ekonomický problém nejen v ČR, ale také v mnoha zemích světa. Otázka údržby a hospodaření s mosty se tak stala jednou z největších výzev nejen mostních inženýrů (z technického hlediska), ale také zejména mostních správců, kteří musí zajistit bezpečnou provozuschopnost spravovaných mostů a musí si často vystačit pouze s omezenými finančními prostředky. Termín hospodaření s mosty je obvykle definován jako soubor systematických činností zajišťovaných správcem mostní konstrukce, které mají zajistit řádnou a bezpečnou provozuschopnost mostu. Tyto činnosti obvykle zahrnují prohlídky, diagnostické průzkumy, opravy, zesilování příp. výměnu celé konstrukce nebo její součásti. V technicky vyspělých zemích jsou zesilování a opravy mostů často preferovanou variantou oproti náročné výměně celé konstrukce. Vhodnou volbou metody zesílení lze dosáhnout efektivního využití stávající konstrukce, která splňuje veškeré požadavky na ni kladené z dnešního pohledu bezpečnosti

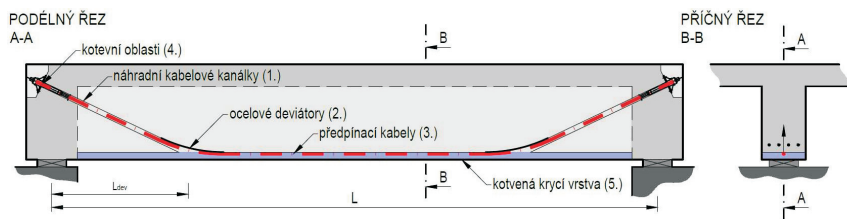
(požadované zatížitelnosti) a provozuschopnosti za současného minimálního dopravního omezení během realizace v daných podmínkách. Rekonstrukce mostu oproti výstavbě nového je také mnohonásobně šetrnější k životnímu prostředí, neboť nedochází k tak velkému přesunu stavebních hmot, ale z velké části k opětovnému využití původních stavebních materiálů [2].

Článek stručně popisuje zavedení inženýrských optimalizačních přístupů pro navrhování systémů zesílení železobetonových mostů metodou dodatečného předepnutí předpínacími lany typu monostrand vedenými v náhradních kabelových kanálcích (metoda náhradních kabelových kanálek = SCDM) vybudovaných v původních strukturách zesilovaných mostů.

## 2 ZESILOVÁNÍ MOSTŮ DODATEČNÝM PŘEDPĚTÍM

Dodatečné předpínání je vhodnou metodou pro zesílení železobetonových mostních konstrukcí, která již byla v minulosti inženýrsky aplikována na historických železobetonových mostech prostých i spojitých s rozpětím polí od 8 do 30 m.

Základní konstrukční uspořádání předpínacích kabelů při zesilování železobetonových mostů metodou náhradních kabelových kanálek je pro ilustraci uvedeno na obr. 1, na kterém jsou schematicky na příkladu prostě uloženého trámového mostu uvedeny a popsány základní konstrukční prvky metody SCDM – náhradní kabelové kanálky, ocelové deviátory, předpínací kabely, kotevní oblasti a kotvená krycí vrstva. Jednotlivé konstrukční prvky jsou uvedeny v pořadí, v jakém se postupně realizují během aplikace zesílení.



**obr. 1** Konstruktivní uspořádání dodatečného předpětí náhradních kabelových kanálků pro zesílení trémového prostě uloženého mostu (číslo v závorce určuje pořadí během realizace zesílení)

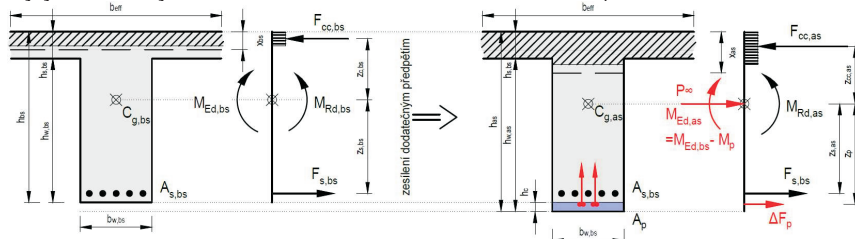
Metoda dodatečného předepnutí mostní železobetonové konstrukce je jediná metoda, která patří do skupiny aktivních metod. To znamená, že oproti ostatním přístupům se zesilující systém podílí na přenosu zatížení po celou dobu provozování konstrukce, tedy i v případech, kdy most není zatížen nahodilým zatížením (doprava). Metoda dodatečného předpětí je také prakticky jediná metoda, která zvyšuje užitkovou hodnotu konstrukce nejen z pohledu mezních stavů únosnosti (zvýšení momentové únosnosti, redukce posouvajících sil), ale také z pohledu mezních stavů použitelnosti (redukce průhybů, uzavírání trhlin) a únavy. Předpětí svým působením redukuje účinky od zatížení a zpravidla bývá navrženo tak, aby byly zmenšeny zejména účinky vlastní tíhy (jak momentové účinky, tak i účinky posouvajících sil), resp. stálého zatížení (aplikace LBM). Působení předpětí celkově přispívá k příznivému chování konstrukce a také k prodloužení její životnosti. Normálová síla v zesilovaném průřezu kromě vytvoření tlakové rezervy pro přenos účinků vnějšího zatížení také způsobuje uzavření trhlin v betonu a tím zabraňuje přístupu agresivních látek z okolního prostředí k betonářské výztuži. Dochází tak ke zpomalení procesu degradace výztuže a ke zvýšení odolnosti průřezu. Normálová tlaková síla v průřezu je také příznivá z pohledu chování mostní železobetonové konstrukce, která je vystavena pravidelnému opakovanému zatěžování, z hlediska posouzení únavy, kdy v průřezu nedochází k nežádoucímu rozkmitu napětí (změna tlak/tah) nebo je tento rozkmit účinně redukován.

Redukce účinků vnějšího zatížení spočívá ve vhodně navržení systému předpětí, který předpínací silou spolu s radiálními silami působícími v místech změny trajektorie předpínací výztuže vyvozuje v konstrukci ohybový moment  $M_p$ . Moment od předpětí působí proti účinkům zatížení  $M_{Ed,bs}$  a tím konstrukci odlehčuje. Tento efekt odlehčení je velmi významný, neboť již při relativně malém odlehčení vzniká v konstrukci momentová rezerva pro přenos nahodilých zatížení (zatížení od dopravy). To je důvodem vysoké efektivity metody dodatečného předpínání. Společně s redukcí ohybových momentů dochází také vlivem radiálních sil k účinné redukci sil posouvajících. Princip zvýšení únosnosti průřezu je graficky znázorněn na obr. 2. Původně čistě ohýbaný průřez po zesílení působí jako průřez mimostředně tlačенý v kombinaci s ohybem (M+N). Vlivem působící předpínací síly  $P_{pc}$  dochází v průřezu k posunu neutrální osy a zvětšení výšky tlačенého betonu  $x_{as}$ , resp. zvětšení síly v tlačенém betonu  $F_{cc,as}$ . Tím roste i momentová únosnost v mezním stavu  $M_{Rd,as}$ . Zároveň lze do momentové únosnosti započítat i sílu  $\Delta F_p$  (na ra-

meni  $z_p$ ) vznikající v mezním stavu vlivem protažení předpínací výztuže ( $\Delta F_p = \Delta\sigma_p \cdot A_p$ , kde pro předpínací výztuž bez soudržnosti platí  $\Delta\sigma_p = 100 \text{ MPa}$ ).

Statické působení předpínacích kabelů dodatečně zabudovaných do původních železobetonových konstrukcí je v zásadě shodné s působením předpínací nesoudržné výztuže v běžném předpjatém betonu. Toho je dosaženo tím, že kabely

dodatečného předpětí jsou s pomocí náhradních kanálků zabudovány do průřezu zesilovaných konstrukcí podobně, jako je tomu u nových předpjatých konstrukcí. Rozdíly v provozním stádiu nejsou prakticky žádné, zde se projevují příznivě především radiální účinky vložené předpínací soustavy, zatímco účinek příznivého působení samotné předpínací síly se sice projevuje v nárůstu mezního momentu únosnosti, ale tento efekt není tolik výrazný. To je dáno malými, ale zcela postačujícími stupni předpětí  $\lambda = 0,10$  až  $0,25$  dle [3]. Mezní momenty únosnosti po zesílení mírně rostou, a to právě díky dodatečně působícím předpínacím silám, které převedou původní čistě ohýbané průřezy na průřezy mimostředně tlačенé v kombinaci s ohybem.



**obr. 2** Zesílení metodou dodatečného předpětí - silové schéma

### 3 INŽENÝRSKÁ OPTIMALIZACE METODY DODATEČNÉHO PŘEDPÍNÁNÍ

Metoda dodatečného předpínání, která je oproti celosvětově známému a rozšířenému externímu vedení kabelů na Ústavu betonových a zděných konstrukcí FAST VUT v Brně rozšířena o systém náhradních kabelových kanálků, je z několika hledisek neefektivnější metodou pro zesílení historických železobetonových trémových nebo deskových mostů malých až středních rozpětí. Zesilované konstrukci přináší kromě posílení ohybové a smykové únosnosti (mezní stavy únosnosti) také mnoho dalších benefitů (mezní stavy použitelnosti), které jiné metody nejsou schopny zajistit. Výzkumné činnosti se zabývají nalezením optimálního řešení návrhu dodatečného předpínacího systému pro zesilování železobetonových mostů z let 1900–1940.

Optimalizace je proces, systematický postup, který se používá k získání nejlepšího možného řešení např. inženýrského problému za daných podmínek. Z matematického pohledu je optimalizační proces hledání nejlepšího (optimálního) řešení z množiny možných variant za určitých omezení a podmínek. Tato matematická disciplína zahrnuje hledání minima a maxima cílové funkce k definovaným proměnným. Matematická definice optimalizace poskytuje rámec pro systematické řešení různých problémů (např. právě inženýrských), a to prostřednictvím použití matematických metod a algoritmů, které pomáhají nalézt optimální řešení pro daný problém. Mezi základní

matematické metody optimalizace patří například gradientní metoda, metoda simplex nebo genetické algoritmy a další.

Podstatou výzkumu je rozvíjení metody zesilování mostů pomocí volných předpínacích kabelů v dodatečně vrtaných kabelových kanálcích s využitím dostupných metod optimalizace. Výzkum v oblasti návrhové optimalizace byl zaměřen v první řadě na algoritmizaci výpočtového návrhu dodatečné předpínací soustavy resp. algoritmizaci vztahů vstupních parametrů navrhované a dodatečně aplikované předpínací soustavy. Návrhová proměnná SCDM byla trajektorie předpínacích kabelů (umístění deviátorů po délce konstrukce) a také počet předpínacích lan v kabelech (velikost předpínací síly).

Uvažujeme-li v inženýrské úloze vstupující návrhové proměnné jako osy  $n$ -dimensionálního prostoru, pak každý bod v tomto tzv. návrhovém prostoru představuje v úvahu přicházející návrh. Takový návrhový bod je přijatelným, pokud při daných kritériích definovaných vnějšími podmínkami nenastane některý z nepřijatelných scénářů (nesplnění vedlejších podmínek) [4].

Základnu pro porovnání návrhů tvoří zvolená kritéria, která definují míru kvality a tím nám umožňují rozhodnout se mezi různými návrhovými uspořádáními. Stanovení kritérií je obvykle výsledkem vyhodnocení požadavků a cílů kladených na daný systém. Optimální uspořádání systému je pak takové uspořádání, které je dle zavedeného hlediska nejlepší z možných řešení a které je také přijatelné při daných vedlejších podmínkách [5].

Předpokladem úspěšného návrhu je dosažení limitní hodnoty hodnotícího kritéria (cílová funkce). Cílová funkce je závislá na navrhovaných charakteristikách systému (rozměry, maximální využití pevnostních a stabilitních vlastností, či vlastnosti spojené s dynamickým namáháním konstrukce) [6]. V případě navrhování novostaveb jsou cílovými funkcemi nejčastěji minimalizace finančních nákladů, minimální hmotnost konstrukce či maximální tuhost. V oboru rekonstrukcí mostů je určení cílové funkce problematictější a závisí na dané situaci a kladených kritériích. Dále v textu bude ukázáno využití inženýrského optimalizačního přístupu s cílovou funkcí definovanou s cílem minimalizace délky předpínacích lan (umístění deviátorů a počet lan).

Podle [6] se nejčastěji optimalizační problém matematicky formuluje:

$$\min \{f(x) | x_i \leq x \leq x_u; h(x) = 0; g(x) \leq 0\} \quad (1)$$

Dále je uveden zápis optimalizační úlohy pro řešení inženýrského problému návrhu zesílení železobetonové deskové prosté mostní konstrukce, jak byly navrhovány v letech 1900–1940. Podle databáze mostních konstrukcí je na české silniční síti z tohoto období takových mostů nejvíce. Typické rozpětí těchto konstrukcí je v rozmezí 8–16 m.

### 3.1 Sestavení optimalizační úlohy

Optimalizační úloha, která je podrobně popsána v [1], je definována cílovou funkcí, návrhovými proměnnými a vedlejšími podmínkami, které jsou ve zkrácené podobě shrnuty v tab. 1.

tab. 1 Shrnutí parametrů optimalizační úlohy

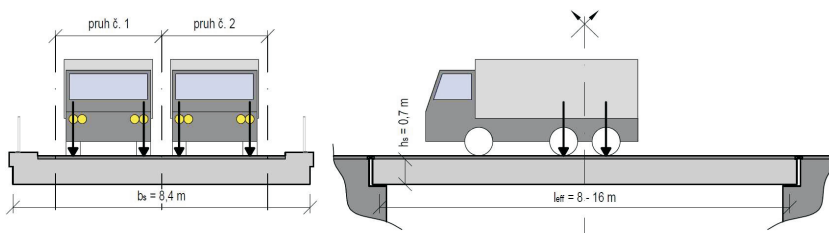
Cílová funkce:	$I_p = n_p \cdot (2 \cdot I_{p1} + I_{p2})$	5.87
Návrhové proměnné:	$L_d$	
	$n_p$	
	$e_p$	
Vedlejší podmínky:	$n_p \geq 1, \quad n_p \in Z$	5.90
	$I_{p2} \geq \frac{L_{eff}}{2}$	5.94
	$\alpha_{min} \leq \arctan \frac{Z_{cg} + e_p}{L_d} \leq \alpha_{max}$	5.91
	$e_{p,min} \leq e_p \leq e_{p,max}$	5.96
	$p_d \leq 130 \text{ kNm}^{-1}$	5.95
	$M_p \leq M_{gk}$	5.99
	$M_{p,sup} \leq M_{Rd,sup}$	5.98
	$v_{n,min} \leq v_n = \frac{M_{Rd} - M_{Ed}}{M_{vnd}}$	5.100
	$v_{n,min} \leq v_n = \frac{V_{Rd} - V_{Ed}}{V_{vnd}}$	5.101
	$v_{r,min} \leq v_r = \frac{M_{Rd} - M_{Ed}}{M_{vrd}}$	5.112
	$v_{r,min} \leq v_r = \frac{V_{Rd} - V_{Ed}}{V_{vrd}}$	5.113
	$\sigma_{c,char} \leq k_1 \cdot f_{ck}$	5.102
	$\sigma_{s,char} \leq k_4 \cdot f_{yk}$	5.104
	$\sigma_{c,kvaz} \leq k_2 \cdot f_{ck}$	5.106
	$W_k \leq W_{k,lim}$	5.108
	$\sigma_{c,cast} \leq 0$	5.110

Uvedená optimalizační úloha je sestavena pro nalezení řešení zesílení prosté konstrukce deskové nebo trémové, které představují z celkového souboru mostů mezi lety 1900–1940 80 % (dle evidence ŘSD). Pro optimalizační úlohu trémové konstrukce je nutné oproti optimalizační úloze pro deskové konstrukce (obdélníkový průřez o rozměrech  $h_s$  a  $b = 1$  m) upravit účinky zatížení na jednotlivé trámy o rozměrech  $h$  a  $b$  včetně pořadnice roznosu zatížení a upravit vyztužení původní betonářskou výztuží vč. smykové výztuže (u trémových konstrukcí je smykové namáhání často rozhodující). Ostatní podmínky a účelová funkce jsou v případě optimalizační úlohy trémové prosté konstrukce zachovány.

### 3.2 Interpretace výsledků optimalizační úlohy

Interpretace výsledků získaných řešením optimalizační úlohy v první řadě představuje prvotní kontrolu správnosti algoritmu. Interpretace zahrnuje kontrolu proměnných, které reprezentují řešení problému, kontrolu omezení, jsou-li splněny všechny definované podmínky a také kontrolu získané cílové funkce (bylo nalezeno skutečné minimum či maximum?). Pokud veškeré kontroly potvrdily správnost řešení, lze přistoupit k technické interpretaci výsledků v kontextu původního problému, který byl řešen optimalizační úlohou. Nalezená řešení musí splňovat technický cíl, pro který byla úloha sestavena.

Velmi užitečná je vizuální interpretace výsledků v podobě grafů, které zobrazují nalezená řešení a případně ukazují jednotlivé závislosti proměnných daného systému.

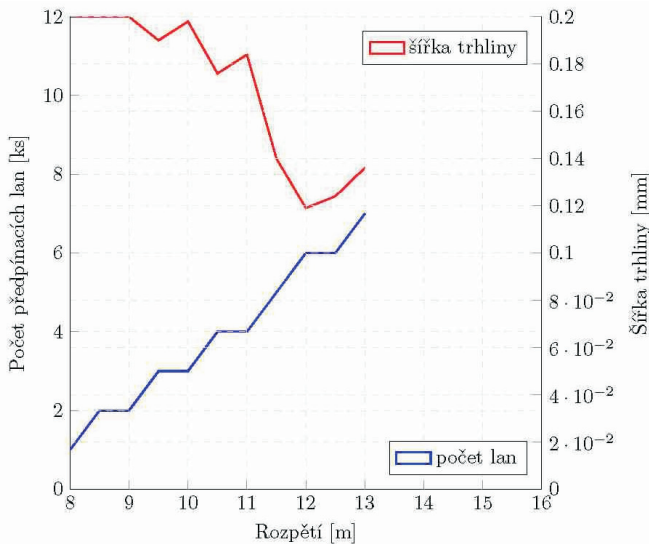


obr. 3 Deskový most s výškou desky 0,7 m a šířkou desky 8,4 m ukázkové optimalizační úlohy č. 1 a 2

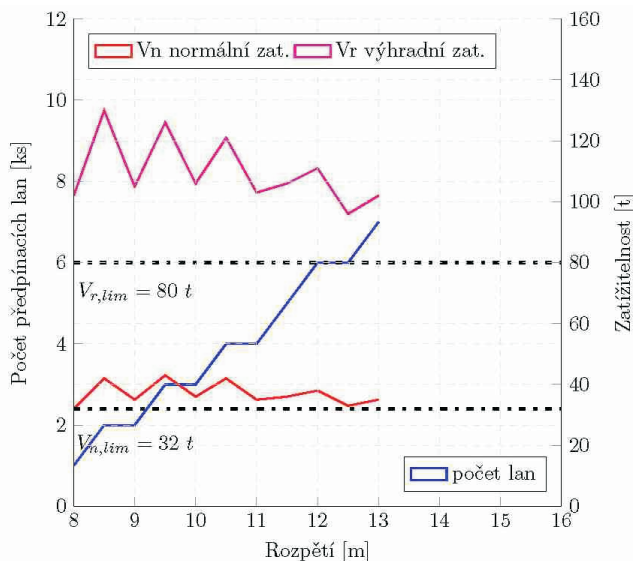
Z důvodu velké variability optimalizačních úloh, které mohou být sestaveny pro různé materiálové charakteristiky (beton, ocel, stupeň vyztužení), odlišné požadavky a také pro rozličné geometrie mostů, byla pro ukázkovou aplikaci metody zvolena desková prostá konstrukce podle obr. 3 a trémová prostá konstrukce (parapetní most) podle obr. 10.

### A Desková prostá konstrukce

Geometrické a materiálové charakteristiky deskového mostu byly uvažovány podle předpokládané doby výstavby mezi lety 1900–1940 (beton C 20/25, ocel druhu Cb). Pro porovnání jsou



obr. 4 Min. počet lan a šířka trhliny,  $h_s = 0,7 \text{ m}$ ,  $\rho_{sl} = 0,004$ , sk. 1



obr. 5 Zatížitelnost mostu,  $h_s = 0,7 \text{ m}$ ,  $\rho_{sl} = 0,004$ , sk. 1

ukázány 2 optimalizační úlohy zesílení identické mostní konstrukce. Úlohy se liší pouze v požadavcích, které mají být splněny (odlišná skupina pozemní komunikace a z toho plynoucí různé nároky na zatížitelnost atd.).

V rámci optimalizační úlohy bylo voleno proměnné rozpětí deskové konstrukce v rozmezí 8 až 16 m a také proměnné vyztužení železobetonové konstrukce betonářskou výztuží, které je vyjádřeno proměnným stupněm vyztužení v rozmezí 0,004 až 0,0101.

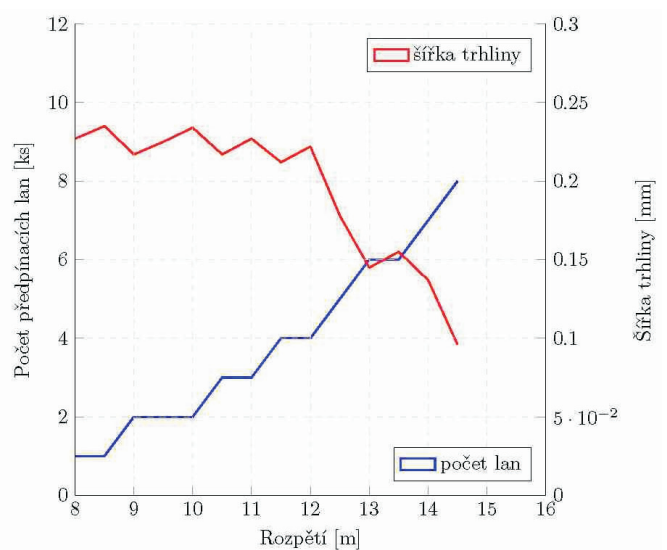
Pro každý stupeň vyztužení deskové konstrukce byly sestaveny dva grafy, a to graf závislosti min. počtu předpínacích lan a šířky trhliny na rozpětí deskové konstrukce (obr. 4) a graf závislosti min. počtu předpínacích lan a normální/výhradní zatížitelnosti na rozpětí deskové konstrukce s vyznačením limitních hodnot (obr. 5).

Vykreslovací krok vzhledem k rozpětí byl v grafech zvolen 0,5 m. Z předložených grafů je zřejmé, že ne pro všechny konfigurace úlohy bylo nalezeno optimální řešení. Jedná se o případy, ve kterých pro dané rozpětí a relativně nízký stupeň vyztužení nebylo možné vyhovět všem vedlejším podmínkám návrhu a iterační optimalizační metoda tak nedokonvergovala k řešení.

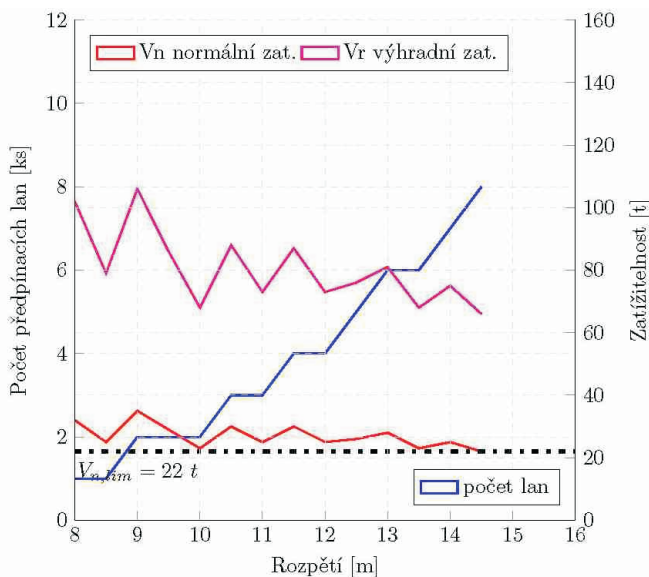
### B Desková prostá konstrukce

Optimalizační úloha byla zpracována pro stejnou mostní konstrukci jako v případě optimalizační úlohy A (obr. 3). Rozdílnost řešení je dána jinými požadavky na most plynoucí z umístění na nižší třídě komunikace (skupina pozemní komunikace 2) a povolání max. šířky trhliny 0,3 mm (požadavek dekomprese u těchto historických konstrukcí nemá reálné opodstatnění).

Snížení nároků na limitní zatížitelnost a šířku trhliny umožňuje použití menšího počtu předpínacích lan, než tomu je v případě úlohy A. Řešení nebylo nalezeno (řešič nedokonvergoval) pouze pro větší rozpětí při nejnižším stupni vyztužení 0,004 (obr. 6 a obr. 7).



obr. 6 Min. počet lan a šířka trhliny,  $h_s = 0,7 \text{ m}$ ,  $\rho_{sl} = 0,004$ , sk. 2

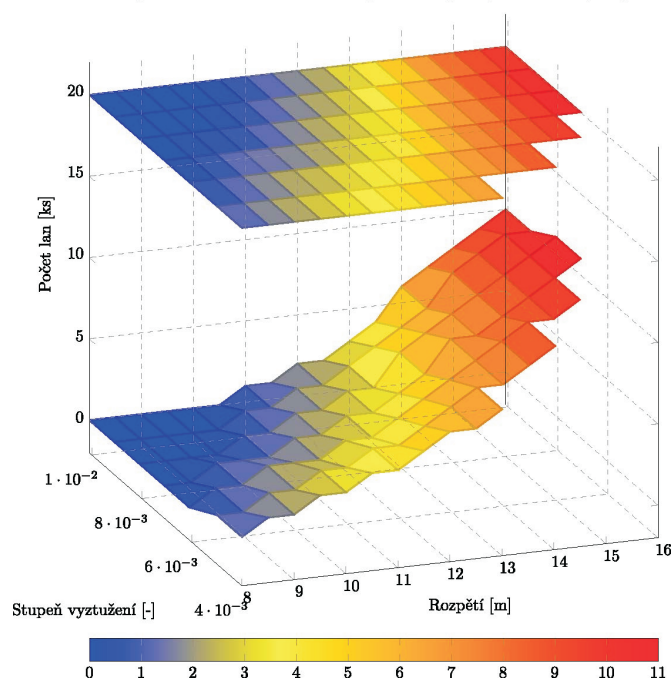


obr. 7 Zatížitelnost mostu,  $h_s = 0,7 \text{ m}$ ,  $\rho_{st} = 0,004$ , sk. 2

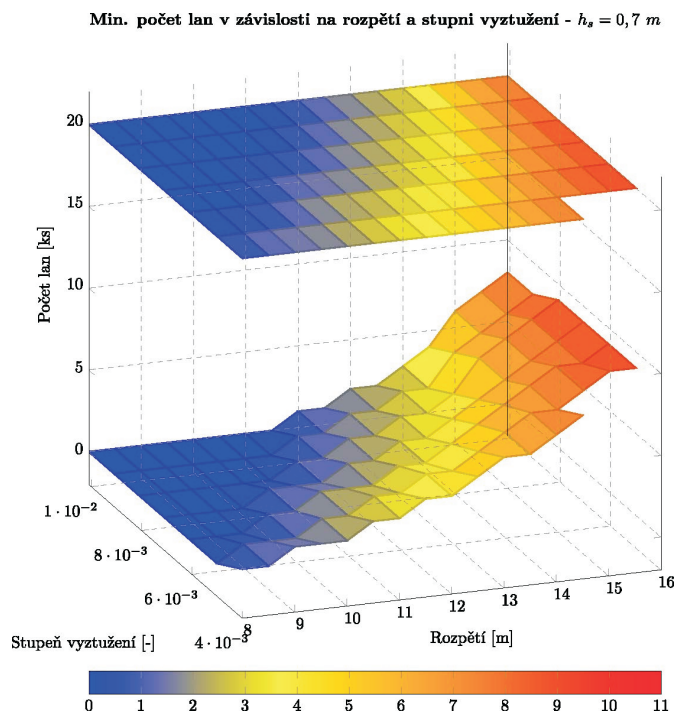
### Porovnání úlohy A a B deskové mostní konstrukce

Porovnání získaných výsledků optimalizační úlohy minimálního počtu předpínacích lan v závislosti na stupni vyztužení a rozpětí deskové prosté mostní konstrukce A a B je zobrazeno na 3D grafech (obr. 8 a obr. 9). Plošné grafy zobrazují výsledné hodnoty min. počtu předpínacích lan pro zesílení mostní konstrukce za současného splnění požadavků zatížitelnosti. Na obr. 8 se jedná o požadavky pro mosty umístěné ve skupině pozemních komunikací 1 (min. hodnoty:  $V_n = 32 \text{ t}$ ,  $V_r = 80 \text{ t}$ ), na obr. 9 jsou zobrazeny výsledky pro stejný most, který je ale umístěn ve skupině pozemních komunikací 2 (min. hodnoty:  $V_n = 22 \text{ t}$ ,  $V_r = 40 \text{ t}$ ). Min. počet předpínacích lan je reprezentován barevnou škálou, kdy modrou barvou jsou vyznačeny mosty o malých rozpětích s vyšším stupněm vyztužení podélnou vyztuží.

Min. počet lan v závislosti na rozpětí a stupni vyztužení -  $h_s = 0,7 \text{ m}$



obr. 8 Graf závislosti min. počtu lan na rozpětí a stupni vyztužení deskového mostu A s  $h_s = 0,7 \text{ m}$  podle obr. 3



obr. 9 Graf závislosti min. počtu lan na rozpětí a stupni vyztužení deskového mostu B s  $h_s = 0,7 \text{ m}$  podle obr. 3

ztuží. V těchto konfiguracích není potřeba most dodatečně předpínat. Naopak červenou barvou jsou vyznačeny konfigurace mostů s největším rozpětím a nejvyšším stupněm vyztužení stávající výztuží, kdy pro zesílení těchto konstrukcí je potřeba největší počet předpínacích lan. V případě mostů, které mají velká rozpětí, ale nízký stupeň vyztužení nebylo možné najít optimální řešení.

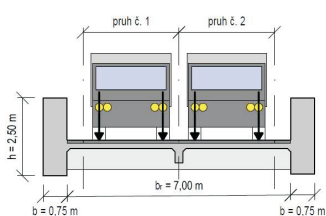
### C Trámová prostá konstrukce

V pořadí třetí ukázková optimalizační úloha C se věnuje návrhu zesílení trámové prosté mostní konstrukce podle obr. 10. Algoritmus pro řešení deskové konstrukce (obdélníkový průřez o šířce 1 m) lze instantně upravit a použít pro řešení úlohy zesílení hlavních nosníků prosté trámové konstrukce změnou rozměrů obdélníkového železobetonového průřezu. Další úprava spočívá v zadání počtu trámů a zavedení pořadnice roznosu nesympetrického zatížení pro získání nejméně příznivých účinků na jeden nosný trám. Další podmínky výpočtu jsou totožné s řešením úloh A a B.

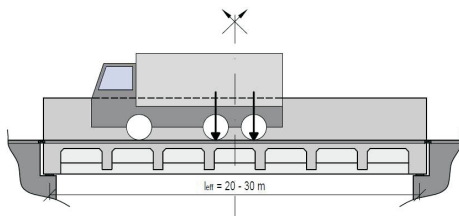
V optimalizační úloze bylo voleno proměnné rozpětí trámové konstrukce v rozmezí 20 až 30 m. Pro vlastní optimalizaci byly zvoleny dvě konfigurace se stejným stupněm vyztužení podélnou výztuží 0,0038, ale s rozdílným stupněm vyztužení smykovou výztuží 0,0028 a 0,0034.

Výsledný minimální počet předpínacích lan zkoumané trámové konstrukce o rozpětí 20 až 30 m je ukázán na obr. 11 vč. posuzované šířky trhliny. Zatížitelnost pak ukazuje obr. 12.

Na tomto příkladu optimalizační úlohy je prezentován vliv stupně vyztužení smykovou výztuží, neboť v případě zesilování trámových konstrukcí bývá smyková únosnost často rozhodující.



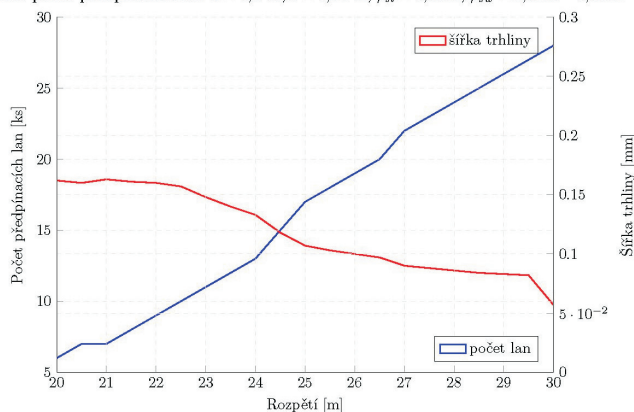
obr. 10 Trámový most optimalizační úlohy



Vliv odsunutí deviátorů blíže k podporám (zkrácení vzdálenosti  $L_d$  a větší redukce smykových sil) pro splnění rozhodujícího mezního stavu namáhání posouvající silou je dokumentováno grafem na obr. 13. Plnou čarou je zobrazeno umístění deviátorů mostu s nižším stupněm smykového vyztužení, čárkovaná jsou zobrazeny výsledky mostu s vyšším stupněm

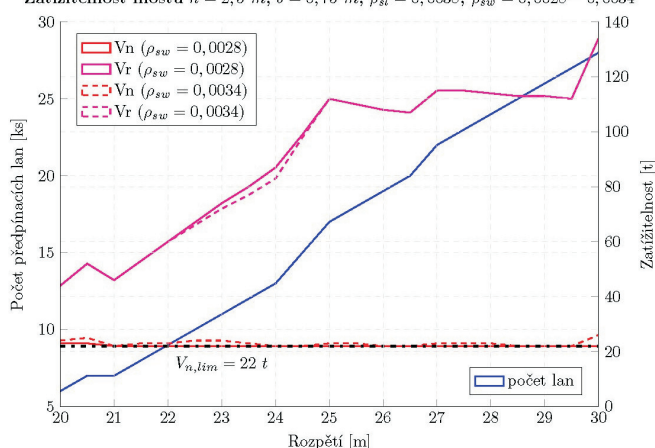
smykového vyztužení. V konfiguracích, ve kterých byl rozhodující mezní stav smyk, došlo u mostu s nižším stupněm smykového vyztužení (plná čára) k odchýlení polohy deviátorů ze čtvrtiny rozpětí blíže k podporám ( $L_d < 0,25 \cdot L_{eff}$ ). Oproti tomu v konfiguracích mostu s vyšším stupněm smykového vyztužení (čárkovaná čára) nebylo smykové namáhání kritické ani v jednom případě, a tak se umístění deviátoru řídilo podmínkou nejkratší dráhy a afinity vnitřních sil ( $L_d = 0,25 \cdot L_{eff}$ ).

Min. počet předpínacích lan  $h = 2,5 \text{ m}$ ,  $b = 0,75 \text{ m}$ ,  $\rho_{sl} = 0,0038$ ,  $\rho_{sw} = 0,0028 - 0,0034$



obr. 11 Minimální počet předpínacích lan a šířka trhliny trámového mostu optimalizační úlohy C

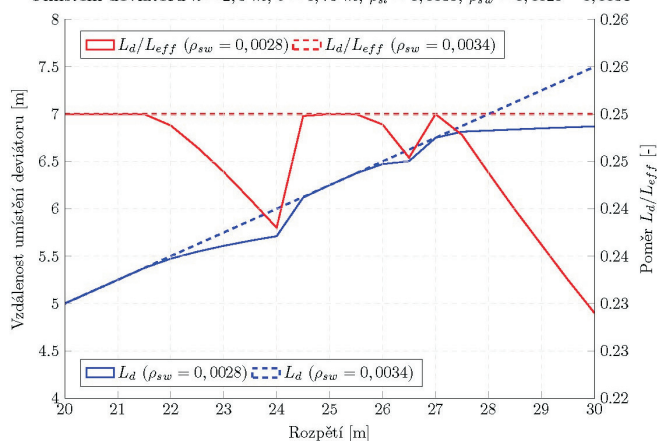
Zatžitelnost mostu  $h = 2,5 \text{ m}$ ,  $b = 0,75 \text{ m}$ ,  $\rho_{sl} = 0,0038$ ,  $\rho_{sw} = 0,0028 - 0,0034$



obr. 12 Zatžitelnost trámového mostu optimalizační úlohy C s různým stupněm smykového vyztužení

cím mezním stavem. To je odlišnost oproti deskovým konstrukcím. Z toho také plyne optimalizace umístění deviátorů vůči teoretickým kloubovým podporám (návrhová proměnná  $L_d$ ). Z pohledu ohybového namáhání na prosté konstrukci hledá algoritmus takové umístění deviátoru  $L_d$ , které nejvíce vyhovuje vedlejším podmínkám (např. afinitě tvaru momentového obrazce) a cílové funkci minimalizace celkové dráhy předpínacích kabelů. To vede nejčastěji k umístění deviátoru do čtvrtiny rozpětí ( $L_d/L_{eff}$ ), pokud není rozhodujícím mezním stavem smyk. Pokud ano, je nutné posunout deviátory blíže k teoretickým podporám s cílem větší redukce posouvajících sil v podpových oblastech.

Umístění deviátoru  $h = 2,5 \text{ m}$ ,  $b = 0,75 \text{ m}$ ,  $\rho_{sl} = 0,0038$ ,  $\rho_{sw} = 0,0028 - 0,0034$



obr. 13 Umístění deviátorů (vzdálenost  $L_d$ ) po délce trámové nosné konstrukce

## 4 ZÁVĚR

Článek, který svým obsahem vychází z disertační práce autora [1], se zabývá problematikou zesilování železobetonových mostních konstrukcí z let 1900–1940 pomocí dodatečného předpínání metodou náhradních kabelových kanálků (SCDM), kterou dále rozvíjí zavedením inženýrské optimalizace.

Nejefektivnější metodou pro účinné zesílení železobetonových mostů z let 1900 až 1940 je metoda dodatečného předepnutí s využitím systému náhradních kabelových kanálků (SCDM). V dosud publikovaných aplikacích byly deviátory předpínacích soustav umisťovány ve vzdálenosti  $L_d = \frac{L_{eff}}{5} - \frac{L_{eff}}{4}$  od podpory, a to na základě inženýrské zkušenosti. V představeném výzkumu je nejprve metoda dodatečného předpínání stávajících mostních konstrukcí podrobně popsána a následně se autor věnuje zavedení principů inženýrské optimalizace pro návrh zesílení železobetonových mostů s cílem nalezení optimálního způsobu předepnutí konstrukce dle zvolené cílové funkce (minimalizace dráhy předpínacích kabelů a nalezení nejvhodnější pozice pro umístění deviátorů). Optimálního řešení pro vybrané typy konstrukcí bylo dosaženo volbou návrhových proměnných s využitím GRG metody minimalizující cílovou funkci za současného splnění všech vedlejších podmínek návrhu.

## ZDROJE

- [1] A. Svoboda. Zesilování betonových mostů předpínacími kabely s využitím inženýrské optimalizace. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2024.
- [2] Management of bridges for strengthening and repair. Technical Report. Colophon, 2013.
- [3] H. Bachmann. Design of Partially Prestressed Concrete Structures Based on Swiss Experiences. In: PCI JOURNAL 29.4 (1984), s. 84–105. issn: 0887-9672.
- [4] A. Ravindran, G. V. Reklaitis a K. M. Ragsdell. Engineering optimization: methods and applications. 2<sup>nd</sup> ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2006, s. 688. isbn: 978-0-471-55814-9.
- [5] A. Parkinson, R. J. Balling a J. D. Hedengren. Optimization Methods for Engineering Design: Applications and Theory. Brigham: Brigham Young University, 2013, s. 208.
- [6] A. Ravindran, K. M. Ragsdell a G. V. Reklaitis. Engineering Optimization Methods and Applications. 2. vyd. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006, s. 681. isbn: 978-0-471-55814-9.

## Lektorský komentář

*V současné době se v České republice nachází velké množství silničních a železničních mostů, které postupně ztrácí, nebo dokonce ztratily původní nosnost a stávají se tak omezením pro plynulost a bezpečnost dopravy. Článek nabízí možné technické řešení zesílení vybraných konstrukcí železobetonových mostů pomocí dodatečného předpínání hlavní nosné konstrukce. Praktické možnosti využití navrhovaného způsobu zesílení jsou jistě závislé na mnoha faktorech, těmi nejdůležitějšími jsou jistě typ a současný technický stav nosné konstrukce. Přesto může navrhovaný systém zesílení v některých případech mostnímu objektu prodloužit jeho životnost, což plně odpovídá principům ekonomického a ekologického chování správce při správě a provozu mostních objektů.*

*Ing. Miroslav Rosmanit, Ph.D., VŠB-TUO Fakulta stavební, Katedra konstrukcí*