



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

**ZESILOVÁNÍ BETONOVÝCH MOSTŮ PŘEDPÍNACÍMI
KABELY S VYUŽITÍM INŽENÝRSKÉ OPTIMALIZACE**

STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BRIDGES WITH PRESTRESSING CABLES USING

ENGINEERING OPTIMIZATION

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

PHD THESIS SUMMARY

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. ADAM SVOBODA

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV KLUSÁČEK, CSc.

BRNO 2024

Klíčová slova:

Zesilování, železobetonové mosty, dodatečné předpětí, inženýrská optimalizace

Keywords:

Strengthening, reinforced concrete bridges, post-tensioning, engineering optimization

© 2024 Adam Svoboda

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Ústav betonových a zděných konstrukcí
Veveří 331/95
602 00 Brno

Typeset by L^AT_EX

SVOBODA, Adam. Zesilování betonových mostů předpínacími kabely s využitím inženýrské optimalizace. Brno, 2024. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Školitel doc. Ing. Ladislav Klusáček, CSc.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Cíl disertační práce	2
1.2	Omezení disertační práce	2
2	Současný stav železobetonových mostů v ČR	3
3	Životní cyklus mostní konstrukce	7
4	Zesilování mostů dodatečným předpětím	9
5	Inženýrská optimalizace metody dodatečného předpínání	11
5.1	Návrhová inženýrská optimalizace	12
5.1.1	Sestavení optimalizační úlohy	16
5.1.2	Interpretace výsledků optimalizační úlohy	16
5.2	Konstrukční inženýrská optimalizace	23
5.2.1	Experimentální ověření chování lan v deviátorech	25
5.2.2	Popis experimentálního dílce	25
6	Závěr	27
6.1	Naplnění cílů disertační práce	29
6.2	Možné další směry výzkumu	30
	O autorovi	36

1 Úvod

Disertační práce 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 také ekonomický problém nejen v ČR, ale také v mnoha zemích světa. Otázka údržby a hospodaření s mosty se tak stala jednou z největších výzev jednak 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 součást. V technicky vyspělých zemích je 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 mostu je také mnohonásobně šetrnější k životnímu prostředí, neboť nedochází k tak velkému přesunu stavebních hmot, ale dochází z velké části ke znovu využití původních stavebních materiálů [1].

Důvody, které vedou k rozhodnutí o zesilování mostů, lze shrnout do několika bodů:

- nevyhovující zatížitelnost plynoucí ze zvýšení intenzity dopravního zatížení oproti době, ve které byly konstrukce navrženy;
- omezené nebo nedostatečné provádění údržby po dobu provozování mostu (použití rozmrazovacích solí zejména v oblastech s chladným podnebím);
- nízká kvalita stavebních materiálů;
- nové bezpečnostní a technické standardy;
- snížení škodlivého vlivu na životní prostředí.

Pro výběr vhodné metody zesilování nebo opravy mostu jsou pro správce mostů nejdůležitější následující požadavky:

- finanční náklady;
- minimalizace narušení provozu během realizace.

Problematiku zesilování a opravy mostů je třeba chápat jako multidisciplinární činnost, která zahrnuje nejen aspekty mostního inženýrství, ale také územní plánování, řízení dopravy a výstavby. Specifické problémy dané geografickou polohou, místními podmínkami a demografickými potřebami území mohou zcela ovlivnit výběr metody pro zesílení, materiálovou podstatu řešení a celkový přístup. Proto je důležité zajistit systematickou interakci mezi jednotlivými obory a tím minimalizovat nejen náklady, ale také narušení plynoucí z rekonstrukce v okolí stavby.

1.1 Cíl disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je 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 kanálků) vybudovaných v původních strukturách zesilovaných mostů.

Dílčím cílem disertační práce je ověření konstrukčního utváření deviátorů v původním betonu mostních konstrukcí s malým poloměrem zakřivení ($R = 1,50\text{ m}$) a jejich vliv na spolehlivost předpínacích lan typu monostrand. Vlivem dispozičních omezení je u těchto aplikací nutné navrhovat minimální poloměry zakřivení, ale prozatím neexistuje ucelená metodika popisující dostatečně podrobným způsobem aplikaci zesílení mostů dodatečnými volnými předpínacími kabely spolu s ověřením tohoto klíčového detailu.

Závěrečnou část disertační práce tvoří tzv. case studies neboli případové studie, na kterých je prezentována jednak vysoká efektivita metody dodatečného předpínání, ale také ukazují aplikace metody náhradních kabelových kanálků vč. ověření pomocí provedených zatěžovacích zkoušek.

1.2 Omezení disertační práce

První omezení disertační práce spočívá v zaměření se pouze na zesilování železobetonových (zkr. žb) silničních mostů, které byly budovány mezi lety 1900-1940 v České republice. V tomto období, kdy se v českých zemích pohybujeme na počátku železobetonu v mostním stavitelství, se zpravidla konstruovaly a navrhovaly mosty deskové či trámové prosté (klasické trámové nebo parapetní; s horní nebo s dolní mostovkou). Disertační práce tak bude zaměřena výhradně na tyto konstrukční typy. Toto omezení disertační práce má svůj logický původ ve faktu, že právě tyto nejstarší mosty zpravidla již nevyhovují dnešním potřebám dopravní infrastruktury a jsou nejčastěji předmětem rozhodnutí o zbourání nebo provedení rekonstrukce.

Dalším omezením disertační práce je výhradní využívání evropských technických standardů a normativních předpisů dle Eurokódu 2 [2], [3] ve všech výpočtových částech práce. Aktuálně platné evropské normativní předpisy využívají pro návrh a posouzení konstrukcí tzv. metodu mezních stavů (metoda dílčích/parciálních součinitelů), která posudky vztahuje ke dvěma základním mezním stavům - mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti.

2 Současný stav železobetonových mostů v ČR

Jaký je skutečný stav železobetonových mostů v ČR? Tato otázka zaznívá v technické odborné společnosti čím dál častěji. Po nedávných haváriích mostů (zejména z předpjatého betonu, jejichž riziko náhlého zřícení je vyšší) tato otázka rezonuje i v laické veřejnosti. Vzhledem k omezenému rozsahu disertační práce se tato kapitola bude věnovat pouze stavu mostů z let 1900-1940.

Pro zajištění bezpečné provozuschopnosti mostů na pozemních komunikacích byl v ČR definován systém pravidelných prohlídek podle technické normy ČSN 73 6221 [4]. Každý vlastník mostu nebo jeho správce je povinen vykonávat mostní prohlídky resp. jejich vykonávání zajistit. Mosty na dálnicích a silnicích jsou ve správě Ředitelství silnic a dálnic České republiky (dále ŘSD ČR). Mosty na silnicích II. a III. třídy jsou ve vlastnictví krajů. Mosty na místních komunikacích jsou ve vlastnictví měst a obcí. Ostatní zbývající mosty mají soukromé vlastníky.

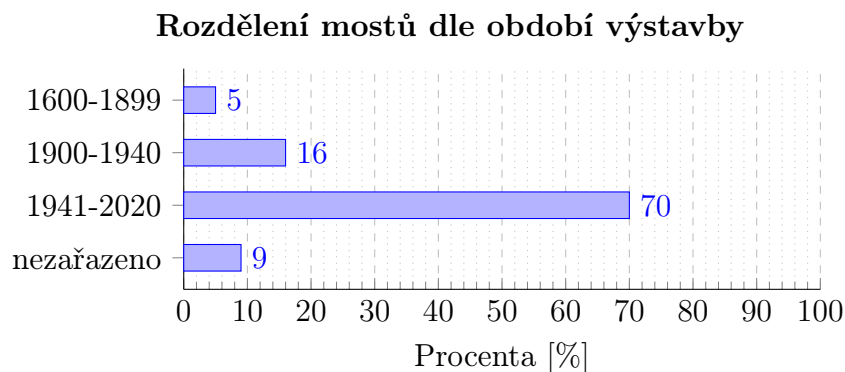
V ČR neexistuje žádná instituce, která by sledovala povinnost vlastníků mít evidenci mostů, které spravují, podle technické normy ČSN 73 6220 [5] a ani provádění mostních prohlídek podle ČSN 73 6221 [4], jejichž výsledky by byly uchovány právě v evidenci. Nejrozsáhlejší společnou evidenci mostů má ŘSD ČR a krajské správy. V této evidenci je k lednu 1. 1. 2021 v České republice evidováno celkem 17 889 mostů na dálnicích a silnicích I. až III. třídy. Počet mostů na místních komunikacích ve městech a obcích se odhaduje na dalších 18 000 až 20 000. Některá velká města evidenci mají (např. Praha, Brno, Ostrava atd.), některá města mají evidenci pouze částečnou, ale většina měst a obcí žádnou evidenci nemají [6]. Dále budou uváděna statistická data pouze z databáze ŘSD ČR a krajských správ, která byla pro potřeby disertační práce získána od Odboru silniční databanky a NDIC.

období	jiný	zdívo	dřevo	ocel	prostý bet.	ŽB	PB	spřaž. kce	celk.
1600-1899	4	698	0	61	6	81	6	4	860
1900-1940	17	464	0	241	52	1986	28	6	2794
1941-2020	204	267	1	1016	75	6442	4473	75	12553
nezařazeno	178	623	0	107	22	693	53	6	1682
celkem	403	2052	1	1425	155	9202	4560	91	17889

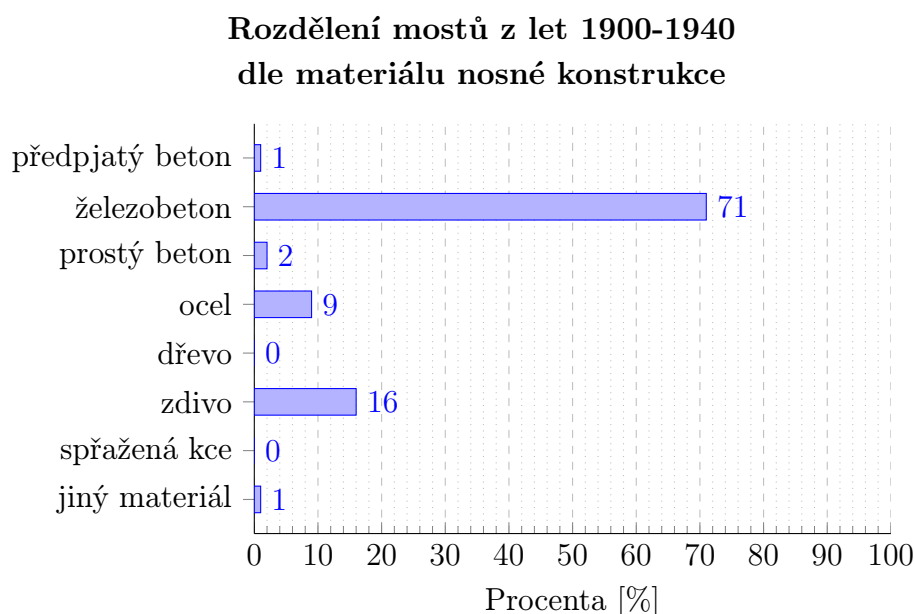
Tab. 1: Celkový počet mostů v evidenci ŘSD ČR a krajských správ k 1. 1. 2021.

V Tab. 1 je uveden celkový počet mostů v evidenci. Pro potřeby disertační práce a pro větší přehlednost jsou počty mostů v této tabulce roztrženy dle období jejich výstavby, a také dle převládajícího materiálu nosné konstrukce. Z evidence je zřejmé, že z celkového počtu mostů 17 889 bylo v období mezi lety 1900-1940 postaveno celkem 2 794 mostů. V procentuálním vyjádření, které je graficky zobrazeno na Obr. 1, tato skupina představuje 16 % z celkového počtu mostů. Z uvedených dat také vyplývá, že naprostá většina těchto mostů jsou právě mosty železobetonové (celkem 1 986 mostů), které jsou předmětem zkoumání v rámci tématu disertační práce. Procentuálně je to 71 % mostů z celkového počtu mostů, které byly vystavěny v tomto období. Je obecně známo, že železobeton, jako konstrukční materiál, se nejprve uplatnil v mostním stavitelství a až poté pronikl i do dalších odvětví stavební výroby. Díky železobetonu bylo na přelomu 20. století umožněno mostním inženýrům navrhovat mosty větších rozpětí pro

překlenutí překážek a vytváření elegantnějších, lehčích mostních konstrukcí oproti konstrukcím z kamenného zdiva, které byly v té době považovány za tradičnější a známé konstrukce. V období 1900-1940 již mosty ze zdiva tvořily pouze 16 % z celkového počtu vybudovaných mostů. Zbývajících 13 % mostů byly mosty nejčastěji ocelové a betonové prosté, viz Obr. 2.



Obr. 1: Rozdělení mostů dle období jejich výstavby.



Obr. 2: Rozdělení mostů postavených v letech 1900-1940 dle převažujícího materiálu nosné konstrukce.

Fakt, že v ČR neexistuje centrální evidence mostů významně ovlivňuje vyhodnocení dostupných dat o stavebním stavu mostů a zejména vypovídací schopnost získaných výsledků, protože v ČR existují tisíce mostů (až polovina všech mostů), o kterých nejsou známy žádné informace.

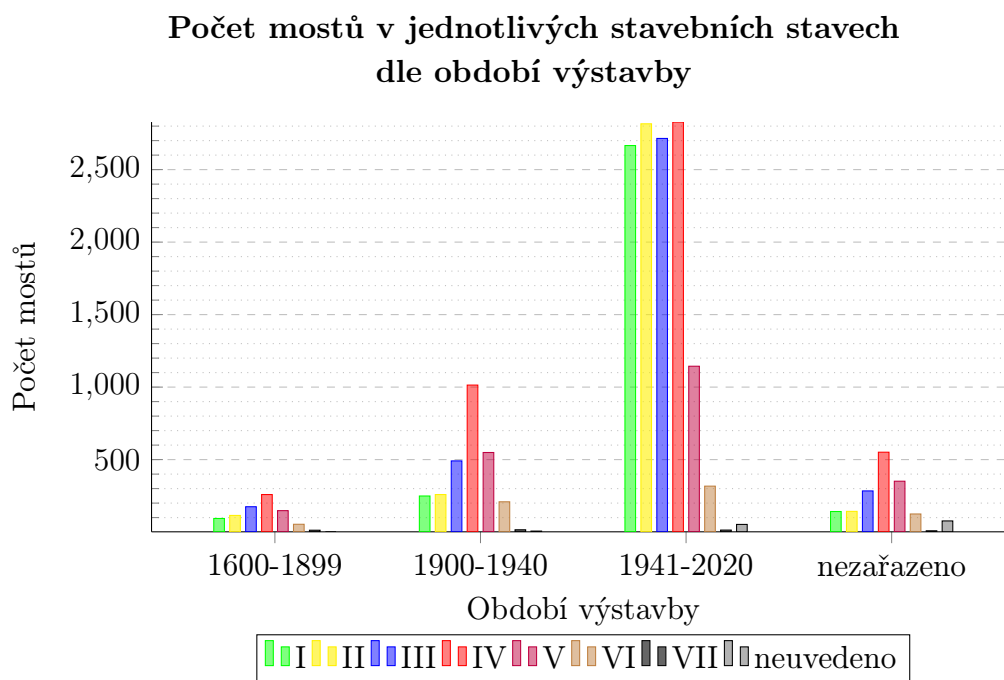
Stanovení stavebního stavu mostu je výsledkem činností prováděných během mostní prohlídky, jejíž četnost je dána normou [4] v závislosti na aktuálním klasifikačním stupni stavu mostu - jednou za 2 až 6 let. V rámci těchto prohlídek se mosty zatřídí do 7 skupin z hlediska jejich tzv. stavebního stavu (I - stav bezvadný až VII - stav havarijný) [6].

V Tab. 2 jsou přehledně uvedeny počty mostů v jednotlivých stavebních stavech k 1. 1. 2021. Pro účely disertační práce jsou opět mosty rozděleny do tří skupin podle období jejich výstavby (1600-1899, 1900-1940, 1941-2020). Z uvedených dat lze konstatovat, že:

- 56,7 % mostů, je ve stavebním stavu I až II (bezvadný, velmi dobrý, dobrý);
- 26,0 % mostů je ve stavu IV (uspokojivý);
- 16,5 % mostů je ve stavu V až VII (špatný, velmi špatný, havarijní);
- 0,8 % mostů nelze zařadit.

období	neuv.	I	II	III	IV	V	VI	VII	celk.
1600-1899	2	94	115	175	259	148	54	13	860
1900-1940	7	249	259	491	1014	549	209	16	2794
1941-2020	53	2666	2816	2715	2828	1144	317	14	12553
nezařazeno	77	142	143	284	551	351	125	9	1682
celkem	139	3151	3333	3665	4652	2192	705	52	17889

Tab. 2: Počet mostů v evidenci ŘSD ČR a krajských správ v jednotlivých stavebních stavech k 1. 1. 2021.



Obr. 3: Počet mostů v jednotlivých stavebních stavech v závislosti na období výstavby.

Graficky jsou informace o stavebních stavech vyobrazeny na sloupcovém grafu na Obr. 3. Při pohledu na skupinu mostů z let 1900-1940 je ovšem patrné, že předchozí procentuální rozdělení, které bylo vztaženo na všechny mosty v evidenci, této skupině neodpovídá. Pro skupinu mostů z let 1900-1940 je procentuální zastoupení stavebních stavů následující:

- 35,8 % mostů z let 1900-1940 je ve stavu I až III;
- 36,3 % mostů z let 1900-1940 je ve stavu IV;
- 27,7 % mostů z let 1900-1940 je ve stavu V až VII;
- 0,3 % mostů z let 1900-1940 nelze zařadit.

neuv.	I	II	III	IV	V	VI	VII	celk.
4	180	185	366	742	384	120	5	1986

Tab. 3: Počty železobetonových mostů z let 1900-1940 v jednotlivých stavebních stavech k 1. 1. 2021.

V Tab. 3 jsou uvedeny počty pouze železobetonových mostů z let 1900-1940 v jednotlivých stavebních stavech I až VII. Procentuální zastoupení žb mostů v jednotlivých stavebních stavech odpovídá procentuálnímu zastoupení stavebních stavů celé skupiny mostů z let 1900-1940, a sice:

- 36,8 % žb mostů z let 1900-1940 je ve stavu I až III;
- 37,4 % žb mostů z let 1900-1940 je ve stavu IV;
- 25,6 % žb mostů z let 1900-1940 je ve stavu V až VII;
- 0,2 % žb mostů z let 1900-1940 nelze zařadit.

Ze získaných dat k 1. 1. 2021 lze konstatovat, že pouze 36,8 % železobetonových mostů z let 1900-1940 je v takovém stavebním stavu (bezvadný, velmi dobrý, dobrý), který z pohledu technické stránky věci nevyžaduje větší sanační zásah a pro jejich další provozování je nutné pokračovat v běžné pravidelné údržbě. Rekonstrukce a zesílení těchto mostů může být vyvoláno potřebou vyšší zatížitelnosti či z dispozičních důvodů (např. rozšíření dopravního prostoru apod.).

neuv.	deska prostá	deska spojitá	klenba	oblouk	rám	trám prostý	trám spojitý	celk.
84	805	24	63	56	83	784	87	1986

Tab. 4: Rozdělení železobetonových mostů z let 1900-1940 dle konstrukčního typu.

Většina železobetonových mostů z let 1900-1940, celkem 63,0 %, je ale v takovém stavebním stavu (uspokojivý, špatný, velmi špatný, havarijní), který již vyžaduje v rámci zachování bezpečného provozu na pozemních komunikacích zásah v podobě celkové rekonstrukce, kterou je velmi vhodné doplnit i o část zesílení nosné konstrukce. Zesílení nosné konstrukce umožní tyto mosty využívat pro dnešní zvýšené intenzity dopravních zatížení a také lze prodloužit jejich provozuschopnost o desítky let aniž by došlo ke snížení jejich bezpečnosti. Dalším benefitem provádění rekonstrukcí vč. zesílení je úspora finančních prostředků, které lze dále investovat do

prvků dopravní infrastruktury. Alternativně lze u těchto mostů uvažovat s jejich úplnou náhradou konstrukcemi novými. Toto řešení, které může být v konkrétních případech opodstatněné, ale vyžaduje zpravidla větší omezení provozu během stavby a také je tato varianta řešení řádově dražší.

Druh údržby, opravy nebo opatření	Klasifikační stupeň stavebního stavu						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Nestavební údržba	•	•	•	•	•	•	•
Stavební údržba	•	•	•	•	•	•	•
Oprava				•	•	•	•
Rekonstrukce					•	•	•

Provádění příslušného druhu údržby označeno symbolem "•".

Tab. 5: Druhy údržby, oprav a opatření k zajištění bezpečnosti dopravy podle stavebního stavu mostu nebo jeho části [4].

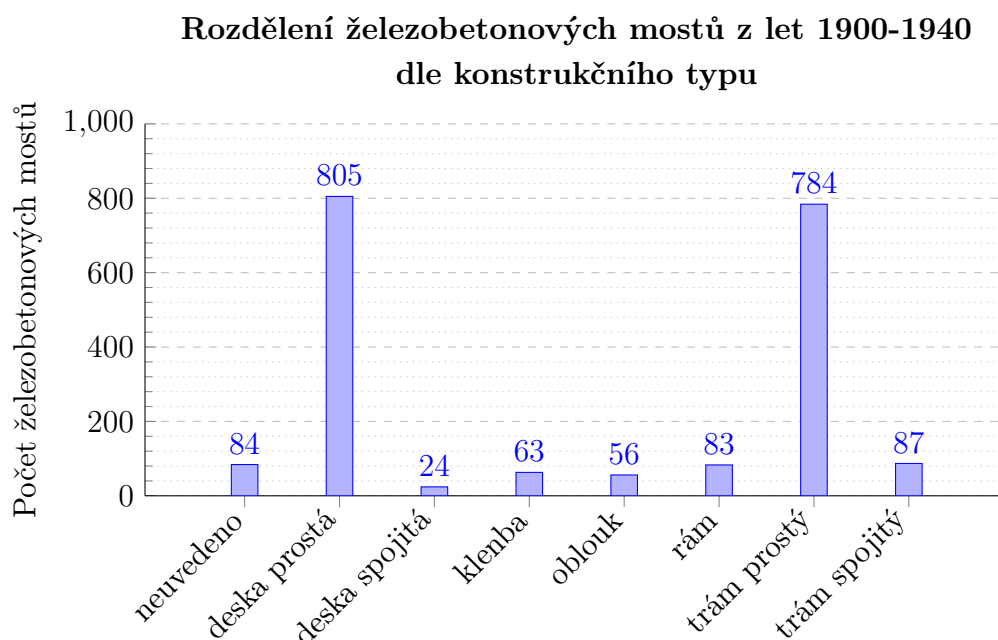
V Tab. 4 a na Obr. 4 jsou pro další ilustraci současné situace železobetonových mostů velkého stáří zobrazeny jejich počty dle použitého konstrukčního typu. Naprostá většina těchto mostů je tvořena prostou deskou či prostým trámem. Toto není nijak překvapivé vzhledem k výpočtovým možnostem doby, ve které tyto mosty byly navrhovány. Nicméně právě tyto konstrukční typy jsou nejvhodnější pro zesílení metodou dodatečného předpínání, kterou se disertační práce zabývá.

V závěru této kapitoly můžeme shrnout, že na silniční síti v ČR se k 1. 1. 2021 dle evidence ŘSD ČR nachází 1986 železobetonových mostů, jejichž stáří je cca 80-120 let. Nejčastěji se jedná o mosty malých až středních rozpětí konstrukčního typu deska prostá nebo trám prostý. Na základě vyhodnocení dat evidence (stavební stav mostů) až 63 % z nich (1251 mostů) nutně vyžaduje ve velmi blízké době provedení celkové rekonstrukce (ideálně vč. zesílení) tak, jak to udává Tab. 5 podle [4], a nebo budou nahrazeny mosty novými.

3 Životní cyklus mostní konstrukce

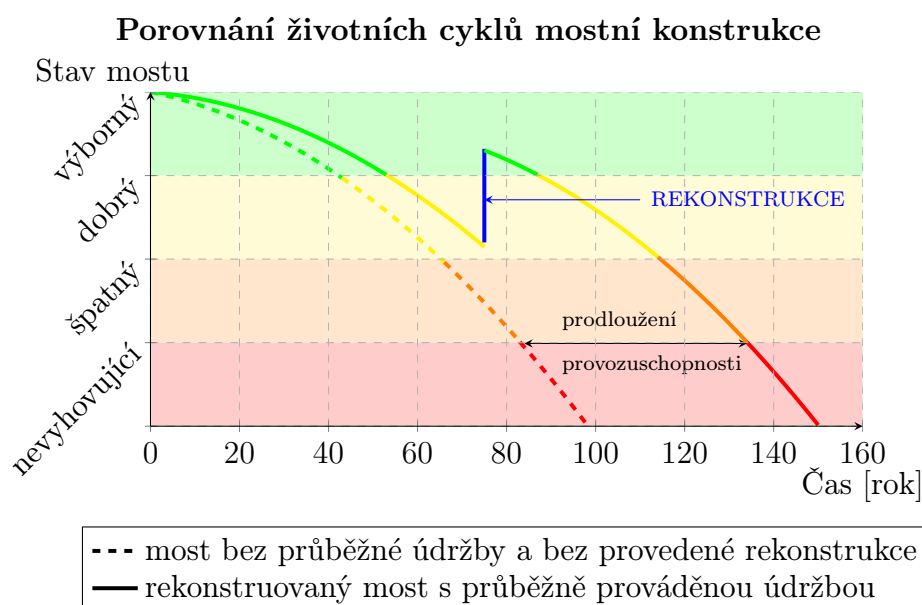
Provozní schopnost existujících mostních konstrukcí je velmi důležitá pro zajištění bezpečné a udržitelné dopravy. Zástavba jako taková má navíc i každoročně vzrůstající ekonomický a politický přínos. Z těchto důvodů je hodnocení existujících konstrukcí velmi významným technickým úkolem a stavební inženýři jsou stále častěji vyzýváni k tomu, aby navrhovali způsoby, jak prodloužit životnost mostních konstrukcí (často s přihlédnutím k omezeným nákladům) [7].

Most zpravidla plní svoji funkci několik desítek let a stává se tak trvalou součástí okolního prostředí s velkým společenským významem, který klade mimořádné nároky na jeho spolehlivost a také životnost. S pojmy spolehlivost a životnost je velmi spjat celý životní cyklus mostní konstrukce - od vybudování mostu, přes jeho provozování, údržbu, opravu (příp. rekonstrukci/zesílení) až po vyřazení mostu z provozu a jeho demolici. Spolehlivost je schopnost plnění požadované funkce při dodržení provozních požadavků. Životnost je vlastnost konstrukce, která zabezpečuje efektivnost při zadaných provozních podmínkách [8].



Obr. 4: Rozdělení železobetonových mostů z let 1900-1940 dle konstrukčního typu.

Otázka životnosti mostu, resp. jeho životního cyklu, je velmi komplexní a je třeba ji řešit s přihlédnutím k ostatním souvislostem a teoretickým poznáním spolehlivostních problémů. Pro její zodpovězení je také třeba kontinuálně získávat a shromažďovat relevantní data o reálném stavebním stavu mostních objektů v závislosti na čase. Vzhledem k velkému množství okrajových podmínek prakticky doposud neexistuje ověřený postup na objektivní určení průběhu životního cyklu mostu v čase.



Obr. 5: Porovnání životního cyklu mostu bez pravidelně prováděné údržby a identického rekonstruovaného mostu s pravidelně prováděnou údržbou [9].

Pro ilustraci je na Obr. 5 zobrazeno teoretické porovnání životních cyklů železobetonové

mostní konstrukce. Křivky grafu nereprezentují zcela přesné průběhy poklesu stavebního stavu (spolehlivosti) v závislosti na čase (životnosti), nicméně předpokládaný vliv provedení rekonstrukce/zesílení je z grafu zřejmý. Čárkovaná křivka představuje pokles stavebního stavu železobetonového mostu v čase bez prováděné údržby mostu (teoretická navrhovaná životnost 100 let). Oproti tomu plná křivka představuje ten samý most, ale tentokrát v případě, kdy je na mostě prováděna pravidelná údržba, která by sama o sobě zajistila prodloužení životnosti až o desítky let oproti mostu bez údržby. Zároveň byl most kolem stáří 80 let rekonstruován/zesílen (modrá křivka), což prodloužilo jeho provozuschopnost o další desítky let. Tímto grafem je ilustrována podstata udržitelného přístupu k hospodaření s mosty.

Pro zajištění provozuschopnosti a udržitelnosti dopravy je velmi účelné mostní objekty rekonstruovat/zesilovat, neboť tímto zásahem se konstrukce dostává do téměř výchozího projektovaného bezvadného stavu, často je konstrukce schopna splnit i zvýšené požadavky plynoucí z nových dopravních potřeb a její životní cyklus je tak prodloužen o desítky let za současné minimalizace finančních a dalších nákladů (sociální, ekologické atd.).

Nesmíme také zapomenout, že stavební činnosti mohou mít značný dopad na životní prostředí, ve kterém žijeme. Výstavba nové konstrukce obvykle vyžaduje větší množství energie a materiálů než rekonstrukce (zesílení), což v konečném důsledku způsobuje řádově vyšší emise skleníkových plynů (zejména CO_2) a více tak přispívá k negativnímu ekologickému otisku.

Nová výstavba často vyžaduje těžbu surovin a materiálů oproti zesílení původní konstrukce, které využívají v mnohem větší míře již existující materiály. Neustálá potřeba těžby nových surovin má negativní vliv na životní prostředí včetně degradace půdy a ohrožení biodiverzity.

V případech, kdy je rozhodnuto o nahrazení původní konstrukce dochází k významnému množství stavebního odpadu (z demolice apod.), který poté končí na skládkách. Správná likvidace a recyklace těchto materiálů je klíčová pro minimalizaci environmentálního dopadu. Například betonové díly lze recyklovat a použít znovu v jiných projektech. Rekonstrukce účinně minimalizují již samotný vznik stavebního odpadu.

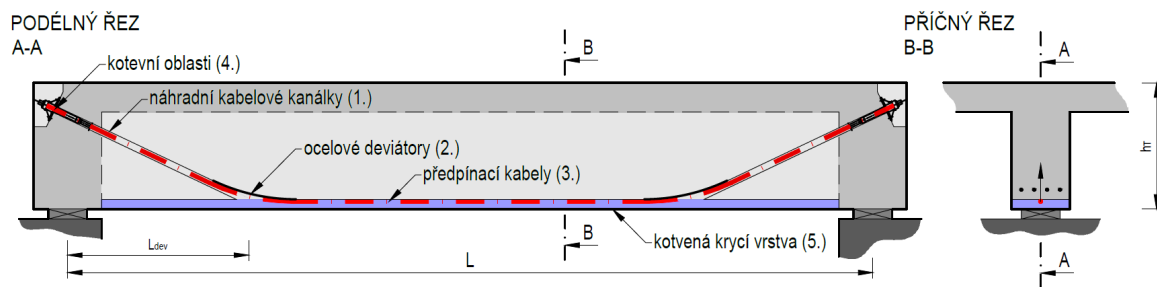
Celkově lze říci, že z hlediska životního prostředí je rekonstrukce obvykle příznivější než nová výstavba, pokud jsou provedeny s ohledem na udržitelnost a efektivitu zdrojů. Nicméně, správné rozhodnutí závisí na konkrétní situaci a mělo by zohledňovat mnoho faktorů včetně životnosti a stavu stávající konstrukce, potřeb uživatelů a cílů investiční akce. Environmentální aspekt rekonstrukcí železobetonových konstrukcí je zásadní pro snižování negativního dopadu na životní prostředí a podporu udržitelného rozvoje v oblasti stavebnictví.

4 Zesilování mostů dodatečným předpětím

Metoda dodatečného předpínání je vhodná a v minulosti již byla 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 kanálků je pro ilustraci uvedeno na Obr. 6. Na obrázku jsou schematicky na příkladu prostě uloženého trámového mostu uvedeny a popsány základní konstrukční prvky metody - náhradní kabelové kanálky, ocelové deviátory, předpínací kabely, kotevní oblasti a kotvená krycí vrstva. Jednotlivé konstrukční prvky jsou uvedeny v pořadí, v ja-

kém se postupně realizují během aplikace zesílení a v podkapitolách disertační práce jsou blíže popsány.



Obr. 6: Konstrukční uspořádání dodatečného předpětí metody náhradních kabelových kanálků pro zesílení trámového 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 (dopravou). 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.

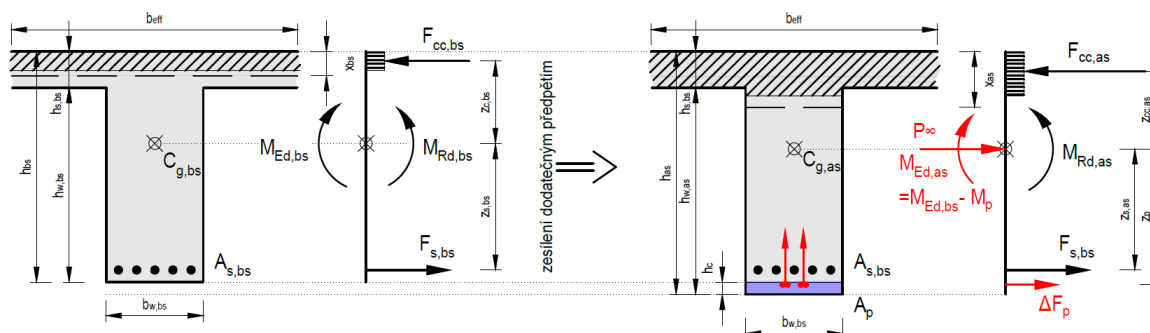
Předpětí svým působením redukuje účinky od zatížení a zpravidla bývá navrženo tak, aby byly zmenšeny zejména účinky vlastní tíhy (jak momentové účinky, tak i účinky posouvajících sil), resp. stálého zatížení (aplikace LBM). Působení předpětí celkově přispívá k příznivému chování konstrukce a také k prodloužení 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 také způsobuje příznivější 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.

Na zesílení průřezu se v případě dodatečného předpínání konstrukce podílejí dva efekty:

1. Redukce účinků na straně vnějšího zatížení.
2. Zvýšení únosnosti průřezu - kombinace $M+N$.

Redukce účinků vnějšího zatížení spočívá ve vhodně navrženém 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

Statické působení předpínacích kabelů dodatečně zabudovaných do původních železobetonových konstrukcí je v zásadě shodné s působením přepínací nesoudržné výztuže v běžném předpjatém betonu. To 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 [10]. Mezní momenty únosnosti po zesílení mírně rostou, a to právě díky dodatečně působícím předpínacím silám, které převedou původní čistě ohýbané průřezy na průřezy mimostředně tlačené v kombinaci s ohybem.



Obr. 7: Zesílení metodou dodatečného předpětí - silové schéma.

5 Inženýrská optimalizace metody dodatečného předpínání

V této kapitole disertační práce se autor zabývá nalezením optimálního řešení návrhu dodá-

tečného předpínacího systému pro zesilování železobetonových mostů z let 1900-1940. Obecně lze směry výzkumu, které si kladou za cíl nalezení optimálního návrhu, rozdělit do dvou vzájemně se doplňujících větví:

- návrhová inženýrská optimalizace;
- konstrukční inženýrská optimalizace.

5.1 Návrhová inženýrská optimalizace

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.

V minulosti již byla metoda náhradních kabelových kanálků inženýrsky aplikována na železobetonových mostech prostých i spojitých s rozpětím polí od 8 do 30 m, které byly vybudovány na počátku 20. století. Takzvaný inženýrský způsob návrhu systému dodatečného předpětí vychází pouze ze zkušeností autora a jeho citu pro danou konstrukci. Tento postup lze také nazvat jako "inženýrsky konstrukčně-statický", který se opírá pouze o konstrukční možnosti uspořádání předpínací soustavy a redukci zejména momentových účinků vlastní tíhy zesilované konstrukce, přičemž až následně se posuzují další návrhové podmínky, kterými jsou zejména ověření dostatečné únosnosti pro působení posouvajících sil (posouzení smykové únosnosti), splnění podmínek omezující napětí v průřezu, napjatost vyvolaná lokálně působícími silami v kotevních oblastech a v místech deviátorů.

V inženýrském konstrukčně-statickém přístupu se projektant často dostává do situace, kdy nějaká z nutných podmínek (zatížitelnost, mezní stavy únosnosti, mezní stavy použitelnosti apod.) nevyhovuje a to vede na opakování návrhu. Ve druhém projekčním pokusu se zpravidla přistupuje ke změně počtu kabelů (lan), případně se upravuje celková trajektorie vedení předpínací výztuže. V některých případech, zejména u spojitých konstrukcí s relativně velkými rozdíly mezi rozpětími jednotlivých polí, tento postup vede i na rozdělení předpětí do několika na sobě nezávislých fází a nebo také vede k návrhu dodatečného předpětí v kombinaci se spřaženou mostovkovou deskou. Celý tento časově velmi náročný proces lze ve své podstatě z pohledu projektanta označit za přirozené hledání tzv. optimálního řešení pomocí jednotlivých iterací (implicitní optimalizace), kterými se projektant blíží k vyhovujícímu řešení. Ovšem bez hlubší znalosti příčinných souvislostí ovlivnění jednotlivých výstupů návrhovými proměnnými.

Výzkum v oblasti návrhové optimalizace byl zaměřen v prvé řadě na algoritmizaci výpočtového návrhu dodatečné předpínací soustavy resp. algoritmizaci vztahů vstupních parametrů navrhované a dodatečně aplikované předpínací soustavy.

- trajektorie předpínacích kabelů (umístění deviátorů po délce konstrukce);
- počet předpínacích lan v kabelech (velikost předpínací síly).

Uvažujeme-li v inženýrské úloze vstupující návrhové proměnné jako osy n -dimensionálního prostoru, potom 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) [11].

Základnu pro porovnání návrhů tvoří právě 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 [12].

V případě zesilování železobetonových mostů metodou dodatečného předpětí mohou být těmito kritérii následující efektivity systému:

- redukce ohybových momentů;
- redukce posouvajících sil;
- zatížitelnost stanovená z momentové únosnosti;
- zatížitelnost stanovená ze smykové únosnosti;
- zatížitelnost stanovená z normálových napětí na průřezu;
- zatížitelnost stanovená z výpočtu max. šířky trhlin.

V prostředí zesilování železobetonových mostů dodatečným předpětím může být zvolenou cílovou funkcí např.:

- minimalizace ceny (např. minimalizace objemů materiálů apod.);
- minimalizace realizační náročnosti (např. minimalizace vrtacích prací).

Tento postup může být vhodný pro projektanty, kteří teprve vstupují do problematiky zesilování konstrukcí a nemají možnost opírat se o již řadu podobně zesílených konstrukcí. Rovněž rychlost řešení se předpokládá významně vyšší, než u předchozí metody založené z velké části na zkušenosti řešitele. Optimalizační přístupy v návrhu také umožňují zapracovat současné posouzení podle mezních stavů únosnosti i použitelnosti.

Výše uvedený způsob navrhování zesílení existujících mostů metodou dodatečného předpínání můžeme nazvat „optimalizovaným víceparametrickým návrhem zesílení“.

V současné době se čím dál častěji setkáváme s tématem konstrukční optimalizace, jejíž matematické metody se za posledních 40 let významně vyvíjely a nyní pronikají do všech oborů inženýrského návrhu.

Podstatou navrhovaného výzkumu je rozvíjení metody zesilování mostů pomocí volných předpínacích kabelů v dodatečně vrtaných kabelových kanálcích s využitím dostupných metod optimalizace.

Předpokladem úspěšného návrhu je dosažení limitní hodnoty hodnotícího kritéria (účelové funkce). Účelová funkce je závislá na navrhovaných charakteristikách systému (rozměry, maximální využití pevnostních a stabilitních vlastností, či vlastnosti spojené s dynamickým namáháním konstrukce) [13]. V případě navrhování novostaveb jsou účelové funkce nejčastěji: minimalizace finančních nákladů, minimální hmotnost konstrukce či maximální tuhost. V oboru rekonstrukcí mostů je velmi problematické formulovat podmínky, které musí návrh zesílení splňovat.

Podle [13] se nejčastěji optimalizační problém matematicky formuluje:

$$\min\{f(\mathbf{x})|\mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u; h(\mathbf{x}) = 0; g(\mathbf{x}) \leq 0\} \quad (1)$$

Obecný systematický postup návrhu konstrukce nebo její části s využitím optimalizačního přístupu a metod lze podle [14] rozdělit do osmi na sebe navazujících kroků:

1. **Poznání vnějších podmínek.** Vnějšími podmínkami rozumíme takové podmínky, za nichž bude daná mostní konstrukce existovat a plnit svůj účel, tím se definuje tzv. návrhové prostředí. V této první fázi návrhu je úkolem projektanta co nejpřesněji formulovat a popsat soubor požadavků a parametrů, kterým má daný navrhovaný konstrukční systém v daném návrhovém prostředí vyhovět. Součástí této fáze je také popis výchozích geometrických a dispozičních omezení za současného poznání výchozího stavu konstrukčního systému.
2. **Stanovení kritérií určení optima.** V této fázi návrhu hledá projektant kritéria, dle kterých lze objektivně hodnotit tzv. efektivitu systému neboli kvalitu navržené konstrukce nebo její části. Dosažne-li tento faktor konstrukce svého extrému, znamená to, že bylo dosaženo optimálního stavu z pohledu zvoleného kritéria. Optimální návrh konstrukce je takové uspořádání, které je dle zavedeného kritéria ovlivňující výsledný návrh nejlepší z možných řešení a zároveň je toto řešení přijatelné pro dané vedlejší podmínky návrhového prostředí.

Zvolená kritéria tvoří základnu pro porovnání návrhů a definují míru kvality. Umožňují projektantovi rozhodnout se mezi různými návrhovými uspořádáními. Stanovení kritérií je obvykle výsledkem vyhodnocení požadavků a cílů kladených na daný systém.

3. **Volba návrhových proměnných.** Obecně se definují tři typy návrhových proměnných označené jako soubory proměnných $\mathbf{x}_r$, $\mathbf{x}_t$ a $\mathbf{x}_m$, které jsou nazývány postupně jako rozměrové proměnné, tvarové proměnné a materiálové proměnné. Tyto návrhové proměnné lze souhrnně zapsat sloupcovým vektorem:

$$\mathbf{x}_N = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_m \\ \mathbf{x}_t \\ \mathbf{x}_r \end{pmatrix} \quad x \in \mathbb{E}^n. \quad (2)$$

Rozměrové proměnné definují jednotlivé rozměry, tvarové proměnné definují prostorové uspořádání systému prvků a materiálové proměnné definují mechanické vlastnosti použitých materiálů.

4. **Stanovení vedlejších podmínek.** Návrhový bod je přijatelným, pokud při daných vnějších podmínkách nenastane některý ze základních mezních stavů. Proto je základní úlohou této fáze detailní poznání mezních stavů či jinak uvažovaných omezení, analytického popisu chování konstrukce a jejich matematické vyjádření. Úplnost závisí na dokonalosti analýzy konstrukce. Za vedlejší podmínky je nutno uvažovat pevnostní podmínky a také vztahy popisující chování konstrukce, jako jsou rovnice rovnováhy, deformační podmínky a konstitutivní vztahy.

$$\bar{h}_l(\mathbf{x}_N) = 0, \quad (l = 1, 2, \dots, K) \quad (3)$$

$$\bar{g}_l(\mathbf{x}_N) \leq 0, \quad (l = 1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

Omezení, aby přijatelné návrhové body neobsahovaly souřadnice, které porušují zvolené hodnotové limity proměnných, je vyjádřeno vedlejšími podmínkami.

$$\mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u \quad (5)$$

kde $\mathbf{x}$ představuje vektor těch proměnných, jejichž žádaná hodnota je omezena dolní $\mathbf{x}_l$ a horní $\mathbf{x}_u$ mezí.

5. **Sestavení matematického modelu technické úlohy.** V průběhu řešení úlohy vychází najevo, že vystupujících proměnných je více nežli jen námi zvolené návrhové proměnné $\mathbf{x}_N$. Proměnné, které se v úloze vyskytly mimo vůli projektanta, nazýváme analytickými proměnnými jelikož je získáváme na základě analytického rozboru navržené konstrukce (např. napětí, deformace, vlastní frekvence, atd.). Spolu s vektorem návrhových proměnných $\mathbf{x}_N$ pak vektor analytických proměnných tvoří vektor proměnných úlohy

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_N \\ \mathbf{x}_A \end{pmatrix} \mathbf{x} \in \mathbb{E}^p. \quad (6)$$

6. **Výběr vhodné matematické optimalizační metody.** Optimalizačních metod je celá řada a liší se od sebe mnoha způsoby. Konstruktor může použít pouze tu metodu, ke které má dostatečné matematické a programové zázemí a která k řešení vyžaduje takové množství času a námahy, aby řešení problému zvolenou metodou bylo přínosné.

7. **Vlastní optimalizace.** Tato fáze obsahuje rozřešení matematické formulace dané úlohy. Termín optimalizace označuje rozličné matematické metody, které minimalizují (resp. maximalizují) cílovou funkci. Říkáme, že pro známe prostředí a zadaná specifika bude mít návrhový vektor $\mathbf{x}$ optimální nastavení $\hat{\mathbf{x}}$, pokud (v případě hledání maxima)

$$f(\hat{\mathbf{x}}) = \max_{\mathbf{x} \in \wp} f(\mathbf{x}), \quad (7)$$

kde množina $\wp$ je množina všech přípustných návrhových bodů, která vyhovují formulovaným vedlejším podmínkám.

$$h_l(\mathbf{x}) = 0, \quad (l = 1, 2, \dots, K) \quad (8)$$

$$g_l(\mathbf{x}) \leq 0, \quad (l = 1, 2, \dots, k) \quad (9)$$

V této fázi návrhu dochází k matematickému zpracování výše uvedené optimalizační úlohy.

8. **Technická interpretace získaného řešení.** Výsledné řešení optimalizační úlohy je třeba "přeložit do jazyka techniků" a případně upravit pro praktické použití.

V podkapitolách disertační práce je uveden podrobný postup sestavení optimalizační úlohy pro řešení inženýrské úlohy návrhu zesílení železobetonové deskové prosté mostní konstrukce, které byly navrhovány v letech 1900-1940. Podle databáze mostních konstrukcí je na české silniční síti z tohoto období těchto mostů nejvíce (viz Tab. 4 v kap. 2). Typické rozpětí těchto konstrukcí je v rozmezí 8-16 m.

5.1.1 Sestavení optimalizační úlohy

Optimalizační úloha je definována cílovou funkcí, návrhovými proměnnými a vedlejšími podmínkami, které jsou ve zkrácené podobě shrnuty níže v Tab. 6:

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 ČR, Obr. 4). Pro optimalizační úlohu trémové konstrukce je nutné oproti optimalizační úloze pro deskové konstrukce (obdélníkový průřez o rozměrech h_s a $b = 1\text{ m}$) 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 cílová funkce podle kap. 5.1 disertační práce jsou v případě optimalizační úlohy trémové prosté konstrukce zachovány.

Aplikovatelnost optimalizační úlohy pro spojitý železobetonový mosty (5,5 % z celkového počtu mostů) by byla podmíněna dílčími úpravami úlohy, a sice:

- úprava cílové funkce, která by reflektovala počet polí spojitý konstrukce;
- úprava návrhových proměnných zavedením dalším proměnných upravující jednotlivé vzdálenosti umístění deviátorů od teoretických podpor jednotlivých polí;
- zavedení dalších kritických řezů nosné spojitý konstrukce vč. výpočtu účinků od zatížení a předpětí, které musí splňovat všechny definované vedlejší podmínky.

Úprava optimalizační úlohy pro spojitý mostní konstrukce je již mimo rozsah zpracovávaný touto disertační prací, ale otevírá se tím možnost dále rozšiřovat optimalizační úlohy i pro tyto dosud neřešené konstrukce.

5.1.2 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?). Pakliže 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.

Cílová funkce:	$l_p = n_p \cdot (2 \cdot l_{p1} + l_{p2})$	5.87
Návrhové proměnné:	L_d	
	n_p	
	e_p	
Vedlejší podmínky:	$n_p \geq 1, \quad n_p \in \mathbb{Z}$	5.90
	$l_{p2} \geq \frac{L_{eff}}{2}$	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
	$p_d \leq 130 \text{ kN/m}$	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

Tab. 6: Shrnutí parametrů optimalizační úlohy.

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

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. 8 a trámová prostá konstrukce (parapetní most) podle Obr. 15.

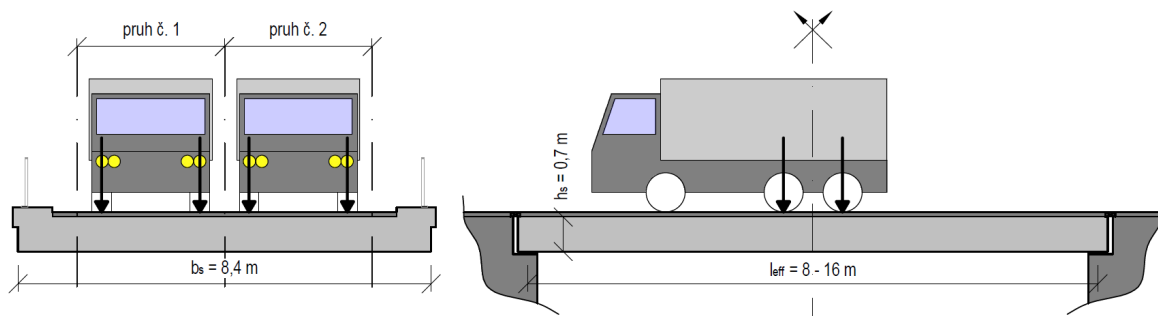
A. Desková prostá konstrukce

Geometrické a materiálové charakteristiky deskového mostu byly navrženy podle předpokládané doby výstavby mezi lety 1900-1940 a jsou uvedeny níže. Pro porovnání jsou v této kapi-

tole uvažovány 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.).

Základní uvažované charakteristiky ukázkové úlohy optimalizace A:

- Skupina pozemní komunikace 1;
- Požadavek zajištění normální V_n a výhradní V_r zatížitelnosti;
- Požadavek max. šířky trhliny $w_{k,lim} = 0,200 \text{ mm}$;
- Materiálové charakteristiky: pevnostní třída betonu dle [15] C 20/25, druh betonářské výztuže dle [15] Cb, předpínací výztuž Y1860-S7-15,7;
- Geometrické charakteristiky: $h_s = 0,7 \text{ m}$, $b_s = 8,4 \text{ m}$, $L_{eff} = 8 \text{ } \checkmark \text{ } 16 \text{ m}$;
- Stupeň vyztužení stávající betonářskou výztuží: $\rho_{sl} = 0,004 \text{ } \checkmark \text{ } 0,0101$.



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

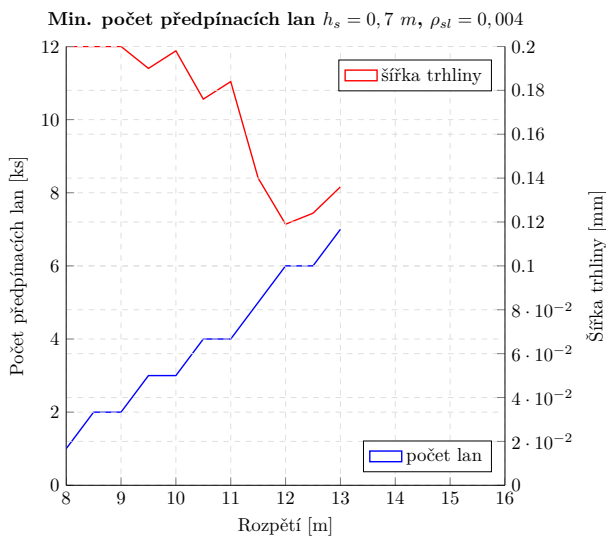
V rámci optimalizační úlohy bylo voleno proměnné rozpětí deskové konstrukce v rozmezí 8 až 16 m a také proměnné vyztužení železobetonové konstrukce betonářskou výztuží, které je vyjádřeno proměnným stupněm vyztužení v rozmezí 0,004 až 0,0101.

Pro každý stupeň vyztužení deskové konstrukci byly sestaveny 2 grafy:

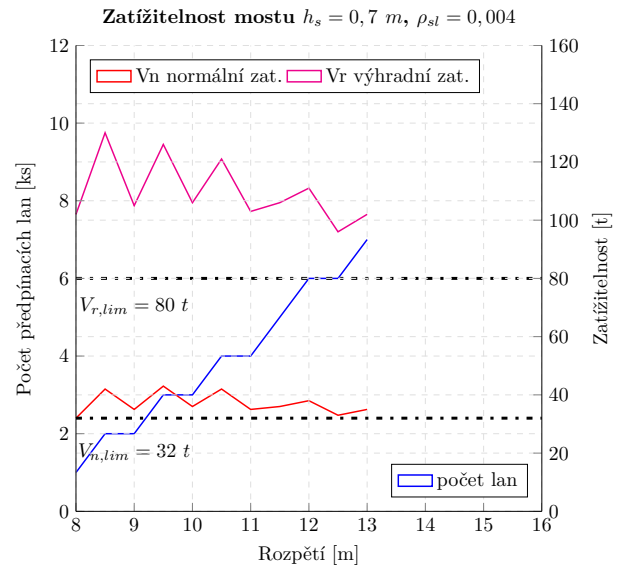
- Graf závislosti min. počtu předpínacích lan a šířky trhliny na rozpětí deskové konstrukce - graf vlevo.
- Graf závislosti min. počtu předpínacích lan a normální/výhradní zatížitelnosti na rozpětí deskové konstrukce s vyznačením limitních hodnot - graf vpravo.

Z předložených grafů v disertační práci je zřejmé, že ne pro všechny konfigurace úlohy bylo nalezeno optimální řešení (Obr. 9 až Obr. 10). 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.

Vykreslovací krok vzhledem k rozpětí byl ve grafech zvolen 0,5 m.



Obr. 9: Min. počet lan a šířka trhliny, $h_s = 0,7 \text{ m}$, $\rho_{sl} = 0,004$, sk. 1.



Obr. 10: Zatížitelnost mostu, $h_s = 0,7 \text{ m}$, $\rho_{sl} = 0,004$, sk. 1.

B. Desková prostá konstrukce

Optimalizační úloha byla zpracována pro stejnou mostní konstrukci jako v případě optimalizační úlohy A (Obr. 8).

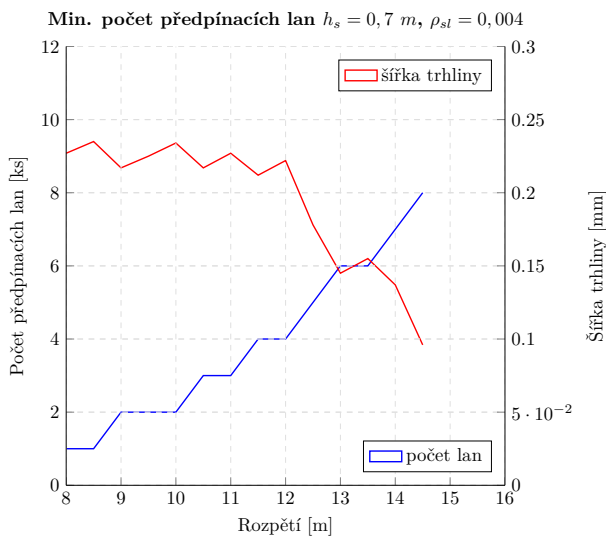
Rozdílnost řešení je dána jinými požadavky na most plynoucí z umístění na nižší třídě komunikace (skupina pozemní komunikace 2) a povolení max. šířky trhliny 0,3 mm (požadavek dekomprese u těchto historických konstrukcí nemá velké opodstatnění).

Základní uvažované charakteristiky ukázkové úlohy optimalizace B:

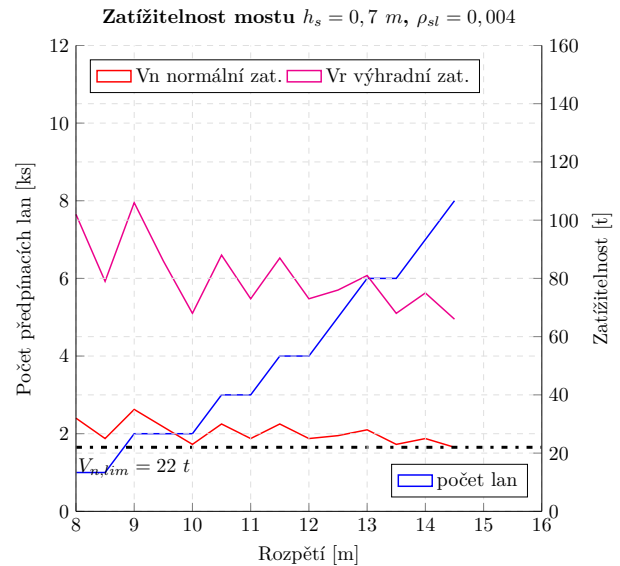
- Skupina pozemní komunikace 2;
- Požadavek zajištění normální V_n zatížitelnosti;
- Požadavek max. šířky trhliny $w_{k,lim} = 0,300 \text{ mm}$;
- Materiálové charakteristiky: pevnostní třída betonu dle [15] C 20/25, druh betonářské výztuže dle [15] Cb, předpínací výztuž Y1860-S7-15,7;
- Geometrické charakteristiky: $h_s = 0,7 \text{ m}$, $b_s = 8,4 \text{ m}$, $L_{eff} = 8 \text{ } \checkmark \text{ } 16 \text{ m}$;
- Stupeň vyztužení stávající betonářskou výztuží: $\rho_{sl} = 0,004 \text{ } \checkmark \text{ } 0,0101$.

Níže uvedené grafy řešení optimalizační úlohy jsou zpracovány pro stejný interval rozpětí a stupně vyztužení betonářskou výztuží, jako v případě úlohy A.

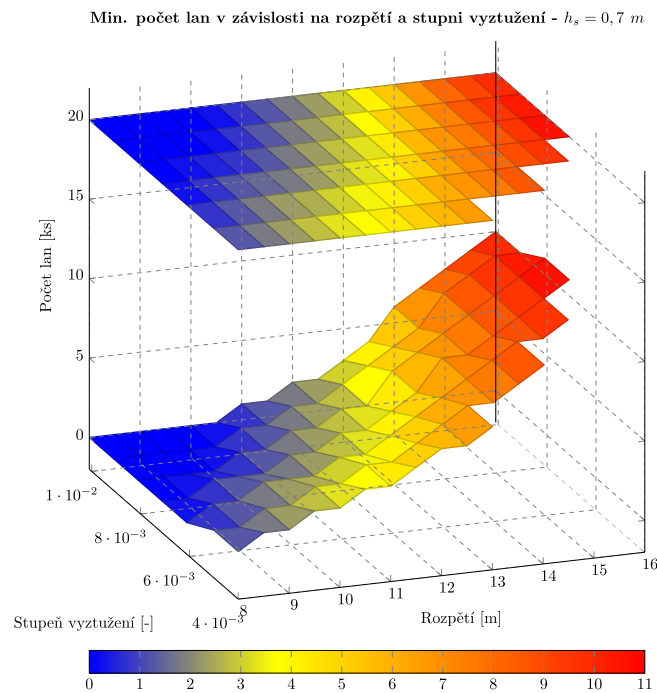
Snížení nároků na limitní zatížitelnost a šířku trhliny umožňuje použití menšího počtu předpínacích lan, než tomu je v případě úlohy A. Řešení nebylo nalezeno (řešič nedokonvergoval) pouze pro větší rozpětí při nejnižším stupni vyztužení 0,004 (Obr. 11 a Obr. 12). V ostatních případech bylo nalezeno řešení pro celý rozsah rozpětí.



Obr. 11: Min. počet lan a šířka trhliny, $h_s = 0,7 \text{ m}$, $\rho_{sl} = 0,004$, sk. 2.



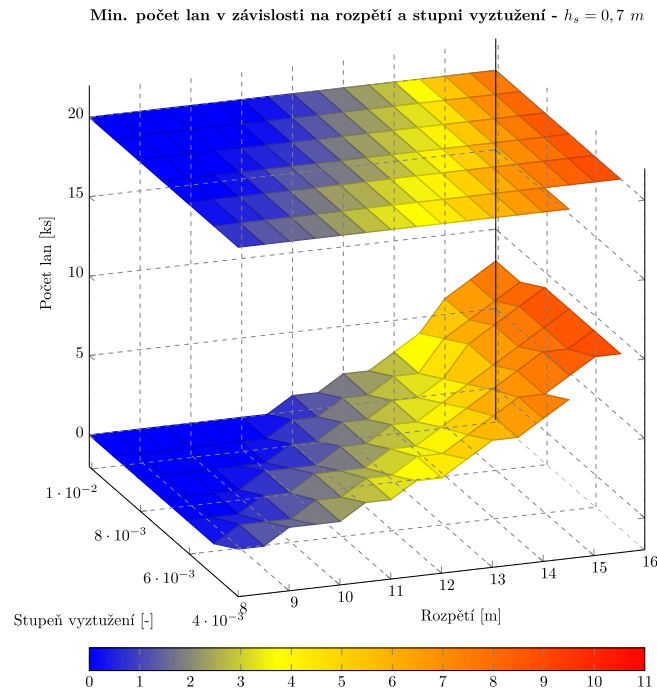
Obr. 12: Zatížitelnost mostu, $h_s = 0,7 \text{ m}$, $\rho_{sl} = 0,004$, sk. 2.



Obr. 13: Graf závislosti min. počtu lan na rozpětí a stupni vyztužení deskového mostu A s $h_s = 0,7 \text{ m}$ podle Obr. 8 (skupina pozemní komunikace 1).

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. 13 a Obr. 14). Plošné grafy zobrazují výsledné hodnoty min. počtu předpínacích lan pro zesílení mostní konstrukce za současného splnění požadavků zatížitelnosti. Na Obr. 13 se jedná o požadavky pro mosty umístěné ve skupině pozemních komunikací 1 (min.



Obr. 14: Graf závislosti min. počtu lan na rozpětí a stupni vyztužení deskového mostu B s $h_s = 0,7 \text{ m}$ podle Obr. 8 (skupina pozemní komunikace 2).

hodnoty: $V_n = 32 \text{ t}$, $V_r = 80 \text{ t}$), na Obr. 14 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 výztuží. 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.

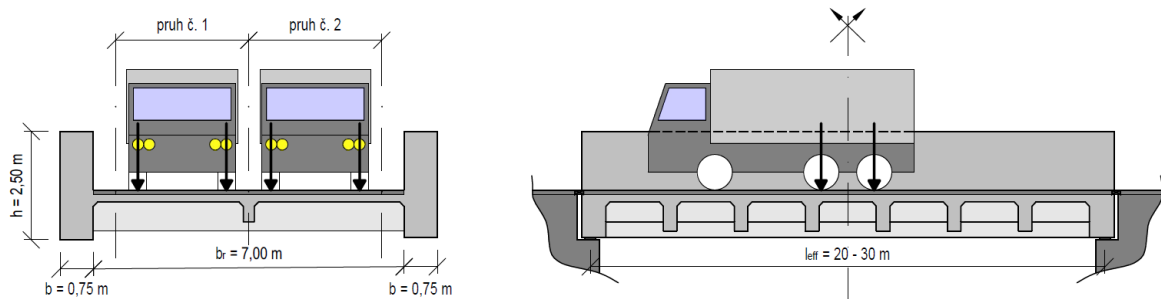
C. Trámová prostá konstrukce

V pořadí třetí ukázková optimalizační úloha C se věnuje návrhu zesílení trémové prosté mostní konstrukce podle Obr. 15.

Algoritmus pro řešení deskové konstrukce (obdélníkový průřez o šířce 1 m) lze instantně upravit a použít pro řešení úlohy zesílení hlavních nosníků prosté trémové konstrukce změnou rozměrů obdélníkového železobetonového průřezu. Další úprava spočívá v zadání počtu trámů a zavedení pořadnice roznosu nesymetrického zatížení pro získání nejméně příznivých účinků na jeden nosný trám. Další podmínky výpočtu jsou totožné s řešením úloh A a B.

Základní uvažované charakteristiky ukázkové úlohy optimalizace C:

- Skupina pozemní komunikace 2;
- Požadavek zajištění normální V_n zatížitelnosti;
- Požadavek max. šířky trhliny $w_{k,lim} = 0,300 \text{ mm}$;



Obr. 15: Trámový most optimalizační úlohy.

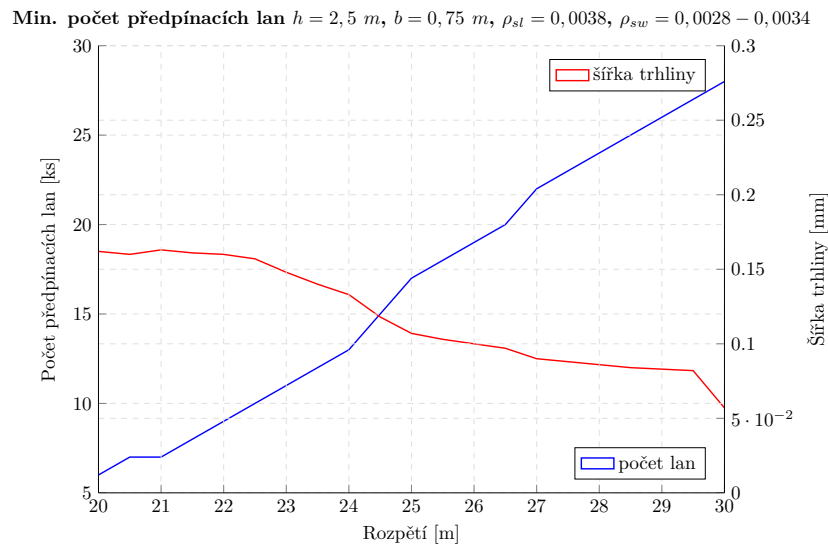
- Materiálové charakteristiky: pevnostní třída betonu dle [15] C 20/25, druh betonářské výztuže dle [15] Cb, předpínací výztuž Y1860-S7-15,7;
- Geometrické charakteristiky: $h = 2,5 \text{ m}$, $b = 0,75 \text{ m}$, $L_{eff} = 20 \text{ } \checkmark \text{ } 30 \text{ m}$;
- Stupeň vyztužení stávající podélnou betonářskou výztuží: $\rho_{sl} = 0,0038$;
- Stupeň vyztužení stávající smykovou betonářskou výztuží: $\rho_{sw} = 0,0028 \text{ } \checkmark \text{ } 0,0034$.

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.

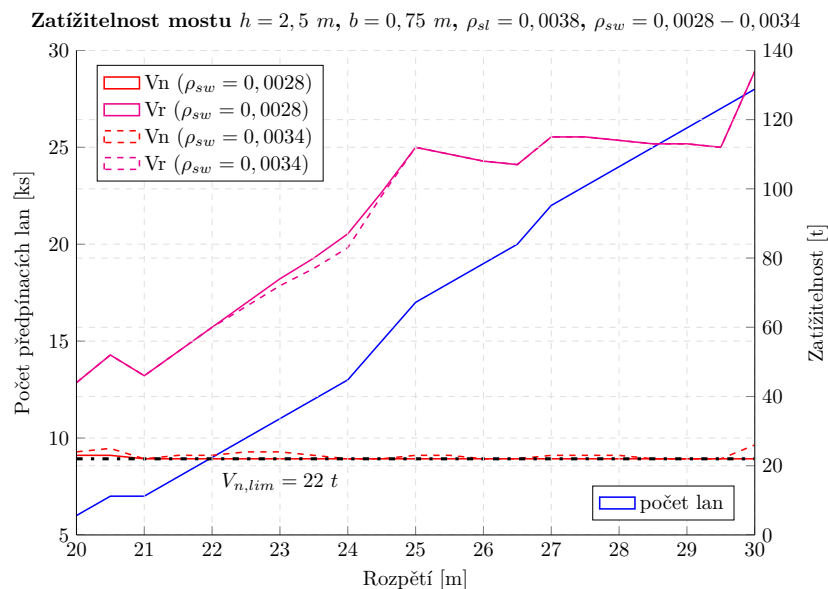
Výsledný minimální počet předpínacích lan zkoumané trámové konstrukce o rozpětí 20 až 30 m je ukázán na Obr. 16 vč. posuzované šířky trhliny. Zatížitelnost je pak ukázána na Obr. 17.

Na tomto příkladě optimalizační úlohy je prezentován vliv stupně vyztužení smykovou výztuží, neboť v případě zesilování trámových konstrukcí bývá smyková únosnost často rozhodujícím mezním stavem. To je odlišnost oproti deskovým konstrukcím. Z toho také plyne optimalizace umístění deviátorů vůči teoretickým kloubovým podporám (návrhová proměnná L_d viz kap. 5.1.1 disertační práce). 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 na umístění deviátoru do čtvrtiny rozpětí (L_d/L_{eff}) není-li rozhodujícím mezním stavem smyk. Pokud ano, je nutné posunout deviátory blíže k teoretickým podporám s cílem větší redukce posouvajících sil v podporových oblastech.

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. 18. Plnou čarou je zobrazeno umístění deviátorů mostu s nižším stupněm smykového vyztužení, čárkovane 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 ($L_d = 0,25 \cdot L_{eff}$).



Obr. 16: Minimální počet předpínacích lan a šířka trhliny trémového mostu optimalizační úlohy C.



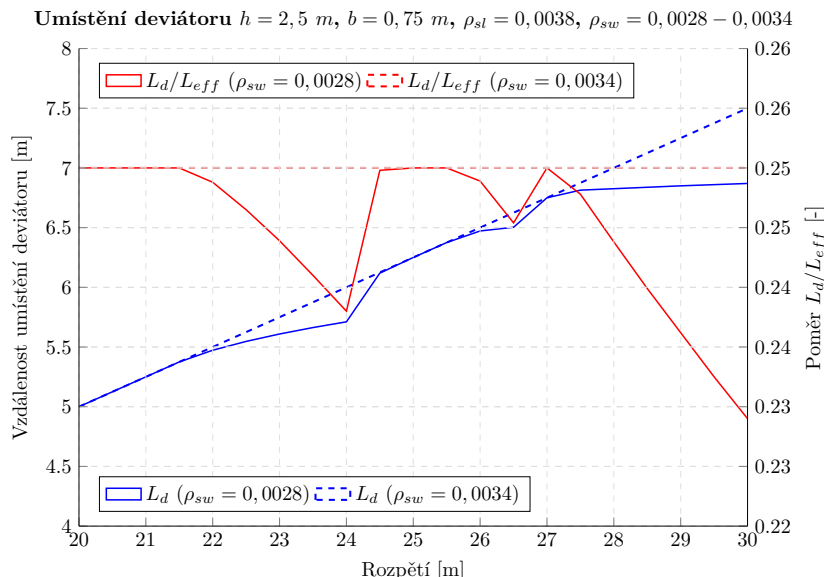
Obr. 17: Zatížitelnost trémového mostu optimalizační úlohy C s různým stupněm smykového vyztužení.

5.2 Konstrukční inženýrská optimalizace

Optimalizace konstrukční se oproti té návrhové věnuje technickému vývoji konstrukčních detailů jednotlivých prvků metody náhradních kabelových kanálků pro zajištění dlouhodobé spolehlivosti a životnosti celého systému. Klíčovými prvky jsou zejména:

- deviátory v místech změny trajektorie předpínacích lan;
- kotevní oblasti.

Přenos radiálních sil do betonu zesilované konstrukce je v metodě náhradních kabelových kanálků zajištěn ocelovými deviátory, které jsou umístěny přímo ve vyústění dodatečně vr-



Obr. 18: Umístění deviátorů (vzdálenost L_d) po délce trámové nosné konstrukce.

taných kanálků. Z dispozičních a geometrických důvodů je nutné tyto deviátory navrhovat s relativně malými poloměry zakřivení. Tato kapitola disertační práce se věnuje konstrukční optimalizaci deviátorů ve smyslu ověření chování předpínacích lan v deviátorech o malých poloměrech $R = 1,5 \text{ m}$, které jsou využívány pro zesílení mostních konstrukcí metodou dodatečného předpínání s využitím náhradních vrtaných kabelových kanálků.

Poloměr zakřivení $1,5 \text{ m}$ nesplňuje standardní podmínky používání podle evropských technických norem, kdy je jako nejmenší poloměr křivosti udávána hodnota $R = 2,5 \text{ m}$. Avšak použití menších poloměrů zakřivení je povoleno podle ETA (European Technical Assessment = Evropské technické posouzení) ETA představuje nezávislý celoevropský postup pro posuzování základních užitných vlastností nestandardních stavebních výrobků. Deviátory s poloměrem křivosti, který je menší než $2,5 \text{ m}$, je možné používat za podmínky provedení testování [16].

Deviátory musí podle [2] splňovat následující kritéria:

- musí odolávat podélným a příčným silám, kterými na něj předpínací vložka působí a přenášet tyto síly do konstrukce;
- musí zabezpečit, že poloměr křivosti předpínací vložky nezpůsobí zvýšená napětí ve výztuži nebo její porušení.

Tato obecná kritéria jsou dále upřesněna pro použití deviátorů s předpínací výztuží typu monostrand:

- max. přípustný tlak pod kritickým lanem je omezen hodnotou $p_{R,max} = 130 \text{ kN/m}$ [16];
- musí být zachována celistvost primární ochrany lana, tzn. nesmí být protržen HDPE obal lana [2];
- musí být zachována ovalita lana (nesmí dojít ke zploštění), kdy max. příčné přetvoření lana při zatížení musí být menší než $3,0 \%$ [2];

5.2.1 Experimentální ověření chování lan v deviátorech

Pro ověření skutečného působení předpínacích lan v deviátorech o malém poloměru zakřivení, byl na Ústavu betonových a zděných konstrukcí na VUT FAST v Brně navržen zkušební železobetonový dílec, který simuluje oblast deviátoru sanované konstrukce.

Cílem experimentu je ověření aplikace dodatečného předpínání stávajících konstrukcí za použití předpínacích lan v chráničkách z HDPE (tzv. monostrandů) v deviátorech o poloměru zakřivení $R = 1,5\text{ m}$.

Pro naplnění cíle experimentu je nutné navrženou metodikou zkoumat vliv poloměru zakřivení na tyto měřené veličiny:

- zachování ovality průřezu předpínacího lana v chráničce. Při menších poloměrech zakřivení sedla dochází ke zploštění lana, které může ohrozit celistvost HDPE chráničky monostrandu.
- deformace HDPE chráničky předpínacího lana. U lana vedeného v poloměru zakřivení $R = 1,5\text{ m}$ nesmí dojít k poškození chráničky, tj. primární ochrany lana, a tedy i ke snížení životnosti celého předpínacího systému.
- normálové síly v předpínacím lanu. Síla v laně je měřena před a za zakružovacím obloukem lana, z takto naměřených hodnot lze experimentálně stanovit součinitel tření pro výpočet okamžitých ztrát předpětí při použití deviátorů o malém poloměru zakřivení.

5.2.2 Popis experimentálního dílce

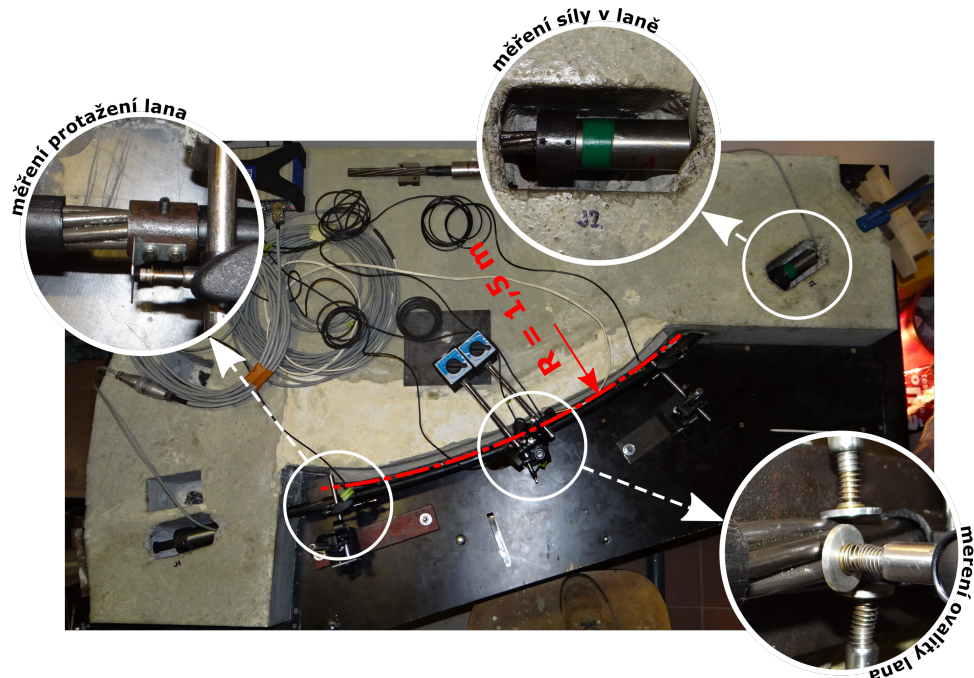
Pro experimentální účely byl navržen betonový stěnový dílec tvaru písmene L o rozměrech $1375 \times 900\text{ mm}$ a tloušťky 120 mm (19). Vlastní deviátor je vytvořen z pásové konstrukční oceli délky 700 mm , šířky 50 mm a tloušťky plechu 5 mm . Na plech je přivařena pomocná kulatina $\phi 8\text{ mm}$ délky 50 mm , která je na plech umístěna po 100 mm . Tato pomocná kulatina zajišťuje polohu monostrandu na deviátoru. Plech deviátorů je k dílci osazen do vysokopevnostního mikrobetonu tl. $2 - 4\text{ mm}$ a jeho poloha je zajištěna šrouby se zapuštěnou hlavou.

Primárním cílem navrženého experimentálního dílce je ověření chování předpínacích lan typu monostrand (ozn. Y1860-S7-15,7) v deviátoru o poloměru $R = 1,5\text{ m}$, který je využíván v metodě náhradních kabelových kanálků. Další směr výzkumu může být zaměřen na zkoumání ještě menších poloměrů zakřivení deviátorů (600 mm a 1000 mm), které ale nejsou v reálné praxi osazovány, nicméně i tyto poloměry lze pomocí dílce v budoucnosti testovat skrze připravené komory pro umístění snímačů.

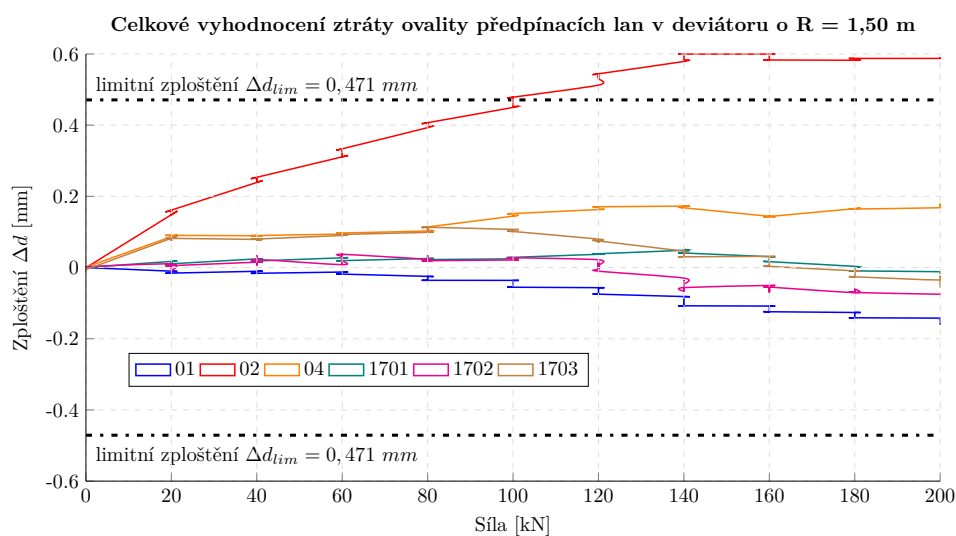
Celkové vyhodnocení ztráty ovality jednotlivých lan je zobrazeno na grafu Obr. 20 (závislost zploštění na působící síle) vč. vyznačené limitní hodnoty zploštění podle podmínek [2].

Na grafu je zobrazeno číselné vyjádření rozdílu absolutních hodnot posunů snímačů Def_1 a Def_2 , které lze přímo porovnat s limitní hodnotou zploštění lana pod zatížením.

Naměřené hodnoty zploštění (ztráty ovality) sedmidrátových předpínacích lan typu monostrand (Y1860-S7-15,7) splňují požadavek uvedený v [2], kdy max. příčné přetvoření lana při zatížení musí být menší než $3,0\%$. Limitní hodnota zploštění pro zkoušená lana je $\Delta d_{lim} = 0,471\text{ mm}$, která byla v naprosté většině případů splněna (viz. vyhodnocení na



Obr. 19: Experimentální dílec pro ověření chování předpínacích lan v deviátoru o malém poloměru zakřivení.



Obr. 20: Celkové vyhodnocení ztráty ovality měřených monostrandů ($R = 1,5 \text{ m}$).

Obr. 20). Pouze v případě předpínacího lana s ozn. 02 došlo k překročení limitní hodnoty zploštění ($\Delta d_{02} = 0,6 \text{ mm} > \Delta d_{lim} = 0,471 \text{ mm}$). Výraznou odlišnost naměřených hodnot zploštění lana č. 02 lze interpretovat jako měřickou chybu, kterou by šlo vyloučit dalším opakováním experimentů s větším souborem dat.

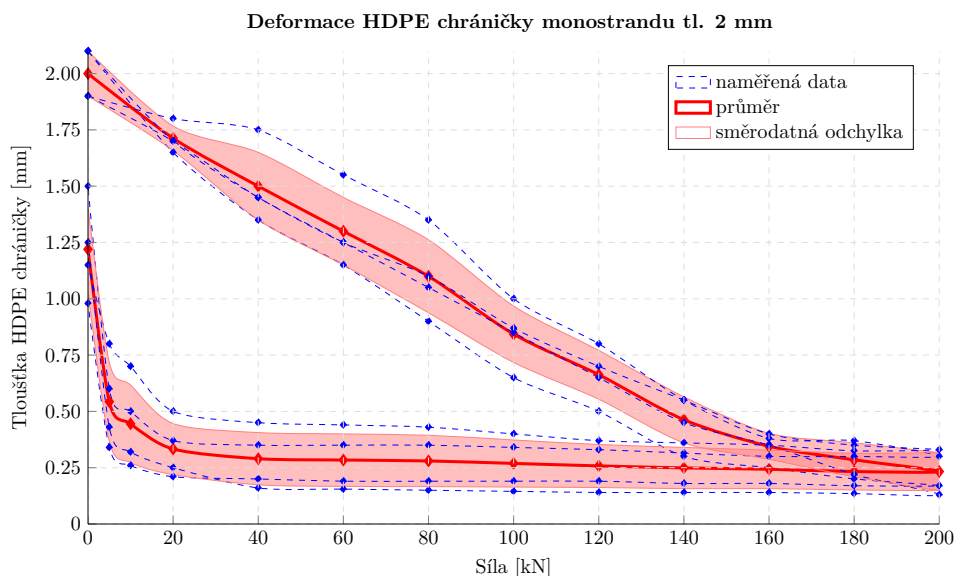
Cílem experimentálního měření ztenčení HDPE chráničky předpínacích lan v deviátoru o poloměru zakřivení $R = 1,50 \text{ m}$ je ověření zachování celistvosti primární ochrany lan proti korozi, která je tvořena HDPE chráničkou.

Na následujícím grafu (Obr. 21) je znázorněn průběh ztenčení HDPE chráničky monostrandu v deviátoru o poloměru zakřivení $1,5 \text{ m}$ vlivem radiálních sil v závislosti na napínací

síle. Měřením listovou spárovou měrkou bylo stanoveno zatlačení HDPE obalu až na hodnotu $t_{HDPE,min} = 0,17 \text{ mm}$ z původní tloušťky $t_{HDPE} = 2,00 \text{ mm}$ primární ochrany lan.

Ze získaných výsledků experimentu lze konstatovat, že nedošlo k porušení celistvosti primární ochrany předpínacích lan ani při maximální předpínací síle u monostrandů typu Y1860/S7-15,7, které jsou vedeny v deviátoru o malém poloměru zakřivení $R = 1,5 \text{ m}$.

Po provedených experimentech byla podrobně zkoumána HDPE chránička každého lana, která byla v části přiléhající k deviátoru viditelně zdeformována od vtlačení jednotlivých drátů předpínacího lana do HDPE. U žádné ze zkoumaných chrániček po provedených testech nedošlo ani k lokálnímu protlačení či protržení primární ochrany lana.



Obr. 21: Deformace HDPE chráničky monostrandu tl. 2 mm ($R = 1,5 \text{ m}$).

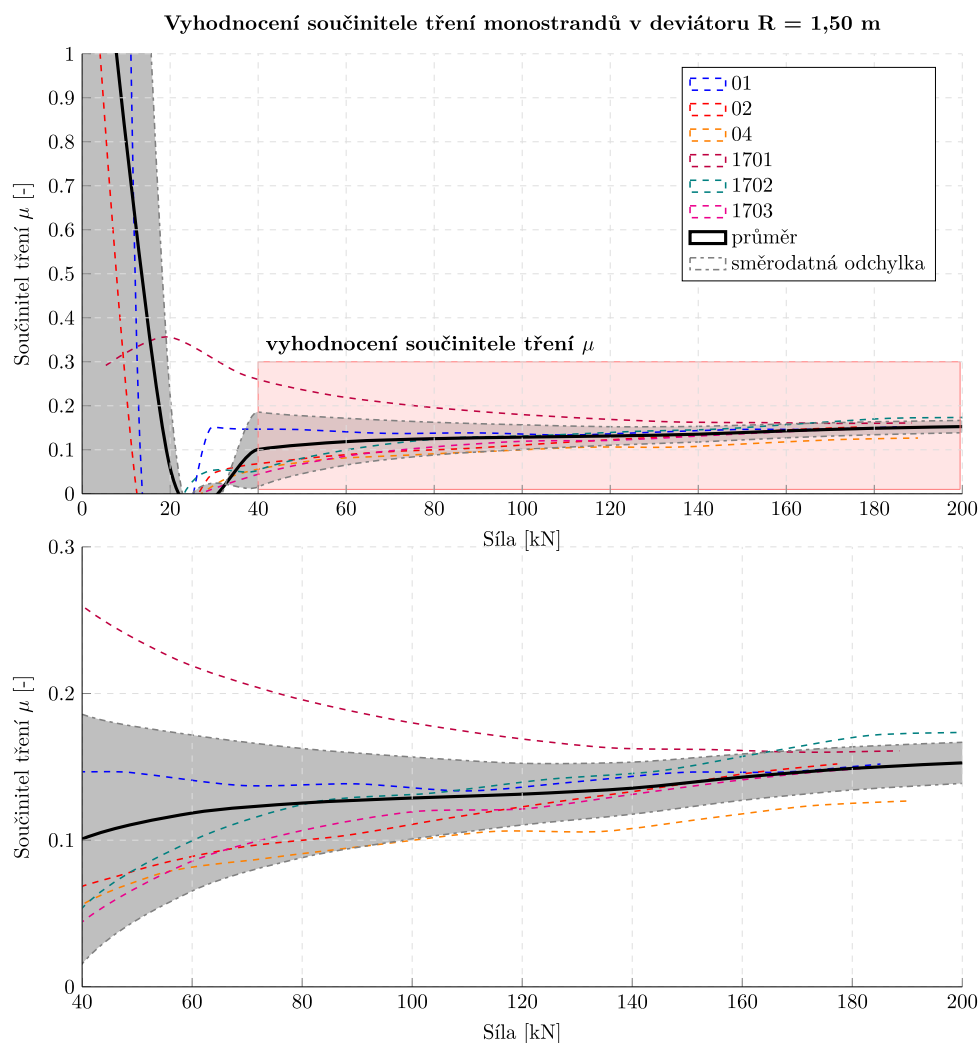
Průměrná hodnota součinitele tření μ lana typu monostrand (Y1860-S7-15,7) vedeného v oblouku o poloměru zakřivení $R = 1,50 \text{ m}$ dosahuje podle provedeného experimentu hodnoty $\mu = 0,13$ (pro interval síly 40-200 kN). Průměrná hodnota součinitele tření pro max. předpínací sílu 200 kN lana vedeného v deviátoru o malém poloměru zakřivení 1,50 m je $\mu = 0,15$.

Porovnáme-li experimentálně stanovené hodnoty součinitele tření μ s hodnotami součinitelů od dodavatelů předpínací výztuže, nejlepší číselné shody součinitele μ bylo dosaženo s dodavatelem AMSYSO, Inc., který v technických podkladech uvádí relativně široký interval součinitele $\mu = 0,05 - 0,15$.

6 Závěr

Disertační práce se zabývá problematikou zesilování železobetonových mostních konstrukcí z let 1900-1940 pomocí dodatečného předpínání metodou náhradních kabelových kanálků, kterou dále rozvíjí zavedením inženýrské optimalizace.

Autor disertační práce se v jednotlivých kapitolách věnuje současnému stavu železobetonových historických mostů v dopravní infrastruktuře ČR, popisuje životní cyklus mostní konstrukce, dobové materiálové charakteristiky, vývoj dopravního zatížení a metody výpočtu žele-



Obr. 22: Celkové vyhodnocení součinitele tření monostrandů v deviátoru $R = 1,5 \text{ m}$.

zobetonových prvků 20. století. V řešeršní části práce autor porovnává různé přístupy k zesilování mostních konstrukcí.

Nejefektivnější metoda pro účinné zesílení železobetonových mostů z let 1900 až 1940 je metoda dodatečného předepnutí s využitím systému náhradních kabelových kanálků, které se věnuje celá druhá část disertační práce. V dosud publikovaných aplikacích byly deviátory předpínacích soustav umísťovány ve vzdálenosti $L_d = L_{eff}/5 - L_{eff}/4$ od podpory, a to na základě inženýrské zkušenosti. V disertační práci 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 (např. minimalizace dráhy předpínacích kabelů a nalezení nejvhodnější pozice pro umístění deviátorů).

Autor se také v práci věnuje konstrukční optimalizaci předpínacích soustav, a to experimentálnímu ověření spolehlivosti vedení předpínacích kabelů v deviátorech o malém poloměru zakřivení ($R = 1,50 \text{ m}$), které jsou využívány v reálných aplikacích dodatečného předpínání existujících mostů.

Poslední kapitola disertační práce je věnována aplikaci metody náhradních kabelových ka-

nálků na skutečných mostních konstrukcích vč. ověření zesílení zatěžovacími zkouškami.

6.1 Naplnění cílů disertační práce

Cílem disertační práce bylo zavedení inženýrských optimalizačních přístupů pro navrhování systémů zesílení železobetonových mostů metodou dodatečného předepnutí předpínacími lany typu monostrand vedenými v náhradních kabelových kanálcích vybudovaných v původních strukturách zesilovaných mostů. Tento cíl byl splněn sestavením algoritmu pro deskové a trámové prosté mostní konstrukce, který optimalizuje návrh dodatečné předpínací soustavy s ohledem na minimalizaci délky použité předpínací výztuže (lana monostrand). Optimálního řešení je dosaženo volbou návrhových proměnných s využitím GRG metody minimalizující cílovou funkci za současného splnění všech vedlejších podmínek návrhu. Návrhové proměnné jsou:

- umístění deviátoru po délce zesilované konstrukce (označ. L_d);
- počet lan v předpínacím kabelu (označ. n_p);
- koncové excentricity předpínacího kabelu (označ. e_p), které lze upravovat podle dispozičních omezení dané konstrukce.

Dílčím cílem disertační práce bylo ověření konstrukčního utváření deviátorů v původním betonu mostních konstrukcí s malým poloměrem zakřivení ($R = 1,50\text{ m}$) a jejich vliv na spolehlivost předpínacích lan typu monostrand. Dílčí cíl byl splněn realizací a vyhodnocením experimentu s předpínacími lany typu monostrand, které byly testovány ve zkušebním stěnovém dílci. Experimentální dílec byl vytvořen pro simulaci oblasti v okolí deviátoru s poloměrem zakřivení ($R = 1,50\text{ m}$). Spolehlivost vedení předpínacích lan v deviátorech o malém poloměru zakřivení nebyla doposud testována, ale kvůli dispozičním omezením jsou tyto deviátory využívány právě pro aplikaci dodatečného předpětí.

Spolehlivost použití deviátorů o poloměru zakřivení 1,5 m byla experimentálně zkoumána a posuzována na základě dvou kritérií:

- zploštění lana a ztráta ovality;
- zachování celistvosti protikoroze ochrany (ztenčení HDPE) chráničky.

Posouzení maximálního zploštění testovaných předpínacích lan splnilo limitní hodnoty zploštění dané technickou normou [2], kdy za limitní hodnotu je považováno max. příčné přetvoření 3 %.

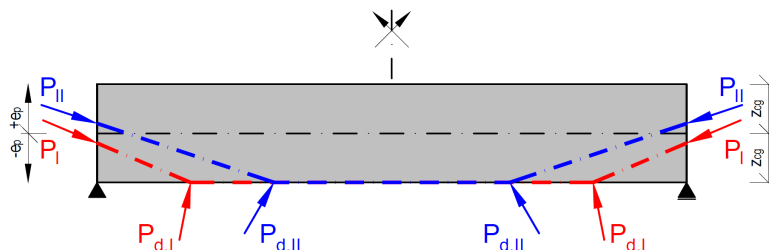
Kritérium celistvosti protikoroze ochrany bylo testováno měřením zbytkové tloušťky HDPE chráničky. U žádného z testovaných předpínacích lan nedošlo k proražení nebo jinému mechanickému porušení HDPE chráničky ani při maximální předpínací síle vyvolující největší radiální účinky na lano v deviátoru.

Dílčím cílem provedeného experimentu na testovacím panelu s deviátorem o poloměru zakřivení 1,50 m bylo určení součinitele tření pomocí měření síly v laně před a za obloukem elastomagnetickými snímači. Průměrná hodnota součinitele tření pro vedení monostrandu v deviátoru o $R = 1,50\text{ m}$ byla dle experimentu stanovena $\mu = 0,13$ (pro interval síly 40-200 kN).

6.2 Možné další směry výzkumu

Problematika dodatečného předpínání více než 80 let starých železobetonových konstrukcí stále představuje oblast, ve které lze realizovat vědecko-výzkumné aktivity.

Navazujícím tématem předložené disertační práce může být optimalizace dodatečných předpínacích soustav se zaměřením na vedení předpínacích kabelů v různých drahách (fázích) s optimálním umístěním dvou a více deviátorů po délce konstrukce (Obr. 23). Cílem takto rozdělených předpínacích soustav je rozložení působení radiálních sil na konstrukci a získání co nejpriznivějšího afinity průběhu vnitřních sil od předpětí k účinkům od ostatních stálých zatížení.

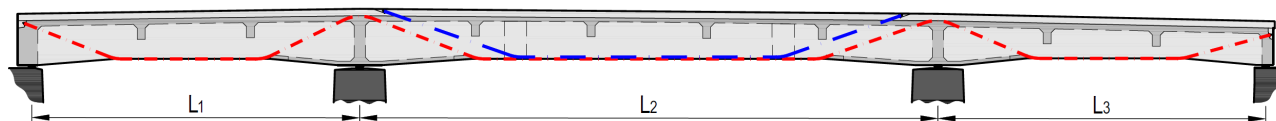


Obr. 23: Pokročilé uspořádání dodatečného předpětí pro zesílení prostých mostů.

Spojité konstrukce z období 1900-1940 jsou spíše výjimečnou záležitostí (z celkového počtu mostů z tohoto období představují pouze necelých 6 %), nicméně jsou také předmětem posuzování a zesilování dle požadavků zatížitelnosti. Další směr výzkumu tak představuje adaptaci inženýrského optimalizačního algoritmu pro návrh zesílení spojitých mostních konstrukcí z let 1900-1940, která je podmíněna následujícími body:

- úprava cílové funkce, která by reflektovala počet polí spojitě konstrukce;
- úprava návrhových proměnných zavedením dalším proměnných upravující jednotlivé vzdálenosti umístění deviátorů od teoretických podpor jednotlivých polí;
- zavedení dalších kritických řezů nosné spojitě konstrukce vč. výpočtu účinků od zatížení a předpětí, které musí splňovat všechny definované vedlejší podmínky.

Spojité konstrukce o více než 2 polích, se také často vyznačují relativně velkými rozdíly v rozpětí krajních a středních polí (viz Obr. 24). U těchto konstrukcí je účelné rozdělit předpínací systém do několika na sobě nezávislých fází a tím optimalizovat účinky předpínací soustavy v relaci na rozpětí aktuálně zesilovaného pole. V minulosti bylo toto "rozfázování" předpětí čistě inženýrským přístupem navrženo, ale doposud nebyla podrobně zkoumána optimalizace těchto soustav včetně zahrnutí nadbetonované sprážené desky do jejího algoritmu.



Obr. 24: Uspořádání dodatečného předpětí ve dvou fázích pro zesílení spojitých mostů.

Reference

- [1] *Management of bridges for strengthening and repair*. Technical Report. Colophon, 2013.
- [2] *Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1)*. European Technical Standard. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2006.
- [3] *EN 1992-2: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 2: Concrete bridges - Design and detailing rules*. European Technical Standard. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2005.
- [4] *ČSN 73 6221 Prohlídky mostů pozemních komunikací. Inspection of road bridges*. Technická norma. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [5] *ČSN 73 6220 (736220) Evidence mostních objektů pozemních komunikací. Register of the road bridges*. Technická norma. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [6] T. Rotter et al. *Stav mostů v České republice*. Brno, 2018, s. 24.
- [7] *ČSN ISO 13822 Bases for design of structures – Assessment of existing structures*. technical Standard. Prague: Czech Office for Standards, Metrology a Testing, 2005.
- [8] V. Tomica, A. Sokolík a Štefan Zemko. *Údržba a rekonštrukcia mostov*. Bratislava: Alfa, 1992, s. 232. ISBN: 80-05-01025-7.
- [9] *Bridge Preservation Guide, Maintaining a Resilient Infrastructure to Preserve Mobility*. Guide. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2018.
- [10] H. Bachmann. “Design of Partially Prestressed Concrete Structures Based on Swiss Experiences”. In: *PCI JOURNAL* 29.4 (1984), s. 84–105. ISSN: 0887-9672.
- [11] A. Ravindran, G. V. Reklaitis a K. M. Ragsdell. *Engineering optimization: methods and applications*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2006, s. 688. ISBN: 978-0-471-55814-9.
- [12] A. Parkinson, R. J. Balling a J. D. Hedengren. *Optimization Methods for Engineering Design: Applications and Theory*. Brigham: Brigham Young University, 2013, s. 208.
- [13] 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.
- [14] T. Mareš. *Základy konstrukční optimalizace*. 1. vyd. Praha: Knižnice konstrukční optimalizace, 2006, s. 307. ISBN: 80-239-6508-5.
- [15] *ČSN 73 0038 Assessment and verification of existing structures - Supplementary guidance*. Technical Standard. Prague: Czech Office for Standards, Metrology a Testing, 2019.
- [16] *European Assessment Document: Post-tensioning Kits for Prestressing of Structures*. Tech. zpr. EOTA, 2016.

- [17] Wikipedie. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*. [Online]. 2023. URL: <https://cs.wikipedia.org/>.
- [18] *Nový mostní řád vydaný rak. ministeriem železnic dne 28. srpna 1904 a týkající se mostů železnicových, nadželeznicových a mostů silnic příjezdných se železnými neb dřevěnými konstrukcemi nosnými*. Technická norma. Praha, 1904.
- [19] *Návrh československého mostního řádu pro silnicové mosty*. Technická norma. Praha, 1923.
- [20] *Jednotný mostní řád: Část I. Navrhování mostů*. Technická norma. Praha: Československá normalizační společnost (ČSN), 1937.
- [21] *Směrnice pro navrhování mostů: Předpisy pro železniční a silniční mosty, Část I*. Technická norma. Praha: Vědecko-technické nakladatelství, 1951.
- [22] *ČSN 73 6202 Jednotný mostní řád. Zatížení a statický výpočet mostů*. Technická norma. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1953.
- [23] *ČSN 73 6203 Zatížení mostů*. Technická norma. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1986.
- [24] *ČSN 73 6222 Zatížitelnost mostů pozemních komunikací. Load bearing capacity of road bridges*. Technická norma. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [25] V. Kukaň, M. Drahorád a T. Dvorský. *Betonové mosty: zatížitelnost : doplňkové skriptum*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, s. 72.
- [26] A. Jílek, L. Grenčík a V. Novák. *Betonové konstrukce I. díl*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985, s. 520.
- [27] F. Klokner a K. Hruban. *Železový beton I. Technologie betonu, konstrukční prvky a výpočty*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1959.
- [28] J. Panáček. *Prvky betonových konstrukcí, Modul CM2 Dimenzování betonových prvků - část 1*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2005.
- [29] T.-Y. Lin a N. H. Burns. *Design of prestressed concrete structures*. 3rd Edition. New York: John Wiley & Sons Inc, 1981, s. 646. ISBN: 978-9812531179.
- [30] *ČSN 73 6203 Traffic loads on bridges*. Technical Standard. Prague: Czech Office for Standards, Metrology a Testing, 2010.
- [31] *ČSN EN 1992 ed. 2 Eurocode: Basis of structural design*. European Technical Standard. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2021.
- [32] *Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges (EN 1991-2)*. European Technical Standard. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2005.
- [33] *First Czechoslovakia Bridge Standard*. Technical Standard. Prague: Czech Office for Standards, 1923.

- [34] *TP 65 Zásady pro dopravní značení na pozemních komunikacích*. Technické podmínky. Praha: Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací, 2013.
- [35] *TP 72 Diagnostický průzkum mostů PK*. Technické podmínky. Praha: Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací, 2008.
- [36] A. Recupero, N. Spinella a C. D. Scilipoti. “Method for Extending Life of Existing Bridge: A Case Study”. In: *8th International Conference in the Low Carbon Era*. Dundee, 2012.
- [37] A. Recupero et al. “Increasing the Capacity of Existing Bridges by Using Unbonded Prestressing Technology: A Case Study”. In: *Advances in Civil Engineering* Vol. 2014 (2014). ISSN: 1687-8086. DOI: [dx.doi.org/10.1155/2014/840902](https://doi.org/10.1155/2014/840902).
- [38] A. Daly a W. Witarnawan. “Strengthening of bridge using external post-tensioning”. In: *Proceedings of the Conference of Eastern Asia Society for Transportation (EASTS '97)*. Seoul, Republic of Korea, 1997.
- [39] A. Daly a W. Witarnawan. “A method for increasing the capacity of short and medium span bridges”. In: *Proceedings of the 10th REAAAConference*. Tokyo, Japan, 2000.
- [40] R. Woodward a A. Daly. *Design of bridges with external prestressing: Construction and testing of a model bridge*. TLR Report 392. Berkshire: TLR - Transport Research Laboratory, 1999.
- [41] L. Klusáček. *Strengthening of structures using post-tensioning by cables in substituted cable ducts and slots*. Brno: Brno University of Technology, 2008.
- [42] M. Petrangeli, G. Usai a E. Zoppis. “Bridge Repair by External Prestress: The Gibe Crossing in Ethiopia”. In: *IABSE Symposium Report 96*. (2009), s. 10–19. DOI: 100.2749/222137809796078469.
- [43] J. Choi. “Comparative study of effective stresses of concrete beams strengthened using carbon-fibre-reinforced polymer and external prestressing tendons”. In: *Structure and Infrastructure Engineering* 10.6 (2014), s. 753–766. DOI: 10.1080/15732479.2012.759977. eprint: <https://doi.org/10.1080/15732479.2012.759977>. URL: <https://doi.org/10.1080/15732479.2012.759977>.
- [44] T. Aravinthan a T. Heidt. “Innovative Strengthening Technique Using Post-Tensioned Fibre Composite Wraps for Bridge Headstocks”. In: *Australian Journal of Structural Engineering* 11.2 (2010), s. 117–128. DOI: 10.1080/13287982.2010.11465060. eprint: <https://doi.org/10.1080/13287982.2010.11465060>. URL: <https://doi.org/10.1080/13287982.2010.11465060>.
- [45] H. Lee, W. T. Jung a W. Chung. “Post-tension near-surface mounted strengthening system for reinforced concrete beams with changes in concrete condition”. In: *Composites Part B: Engineering* 161 (2019), s. 514–529. ISSN: 1359-8368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.149>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983681832701X>.

- [46] T. Mimoto et al. “Strengthening system using post-tension tendon with an internal anchorage of concrete members”. In: *Engineering Structures* 124 (2016), s. 29–35. ISSN: 0141-0296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.003>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029616302681>.
- [47] A. Miyamoto et al. “Behavior of prestressed beam strengthened with external tendons”. In: *Journal of structural engineering New York, N.Y.* 126.9 (2000). cited By 115, s. 1033–1044. ISSN: 07339445. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:9(1033).
- [48] W.-T. Jung et al. “Strengthening Effect of Prestressed Near-Surface-Mounted CFRP Tendon on Reinforced Concrete Beam”. In: *Advances in Materials Science and Engineering* 2018 (2018), s. 18. ISSN: 1687-8442. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9210827>.
- [49] J. Nilimaa et al. “Unbonded Transverse Posttensioning of a Railway Bridge in Haparanda, Sweden”. In: *Journal of Bridge Engineering* 19 (2013). ISSN: 1943-5592. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000527](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000527).
- [50] L. Dai et al. “Strengthening a 20-Year-Old Post-Tensioned Concrete Box Beam with Double-Layer Prestressed Steel Wire Ropes”. In: *Journal of Bridge Engineering* 23.11 (2018), s. 05018009. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001301. eprint: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001301>. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001301>.
- [51] *Spannstahllitzen St 1660/1860 aus sieben kaltgezogenen glatten Einzeldrähten Nenndurchmesser: 6,9-9,3-11,0-12,5-12,9-15,3 und 15,7 mm bzw. mit Korrosionsschutzsystem für Nenndurchmesser: 12,5-12,9-15,3 und 15,7 mm (Monolitze)*. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2018.
- [52] *prEN 10138-3 Prestressing steels - Part 3: Strand*. European Standard. Brussel: European Committee for Standardization, 2005.
- [53] *European technical approval ETA-12/0282. BBR VT CONA CMM Single – Internal Post-tensioning System with 01 Strand (bonded or unbonded)*. European technical approval ETA. Dortmund, 2013.
- [54] P. Cikrle, P. Rovnaníková a A. Dufka. “Charakteristika betonů železobetonových konstrukcí 60. a 70. let 20. století”. In: 18.6 (2018), s. 54–60.
- [55] F. Klokner a K. Hruban. *Železový beton I. díl, Technický průvodce ČMT svazek 24, Technologie betonu, konstrukční prvky a výpočty*. 1. vyd. Spálená 51, Praha 2: Státní nakladatelství technické literatury, 1959, s. 632. ISBN: L17-E1-4-III/7370.
- [56] A. Jílek, L. Grenčík a V. Novák. *Betonové konstrukce, I. díl*. Spálená 51, Praha 2: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1985, s. 520. ISBN: L17-C3-V-41/78240.
- [57] J. Dohnálek a I. Seidlerová. *Dějiny betonového stavitelství v českých zemích do konce 19. století*. 1. vyd. Ostrovní 8, Praha 1: Informační centrum ČKAIT, 1999, s. 328. ISBN: 80-86364-01-1.

- [58] “Technický obzor: Orgán spolku architektů a inženýrů v království Českém”. In: (1893-1918). ISSN: n111b. URL: <https://www.digitalniknihovna.cz/ntk/uuid/uuid:ae7b2bb9-435d-11dd-b505-00145e5790ea>.
- [59] J. Kolář a F. Faltus. *Mostní stavitelství, Část první: Obecné o mostech. Dřevěné mosty. Montážní lešení a skruží. Ocelové mosty*. Praha: Vědecko-technické nakladatelství, 1949. URL: <https://digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:4f0e49f0-34bc-11e4-8f64-005056827e52>.
- [60] J. Tomek a Z. Kleisner. *Betonové mosty II*. Brno: Vysoké učení technické, 1989. URL: <https://digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:a3be10d0-3547-11e4-a8ab-001018b5eb5c>.
- [61] A. Svoboda, L. Klusáček a M. Olšák. “Strengthening and Rehabilitation of U-Shaped RC Bridges Using Substitute Cable Ducts”. In: *Advances in Materials Science and Engineering* 2019 (2019), s. 21. ISSN: 1687-8442. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/8920718>. URL: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2019/8920718/>.
- [62] T. Guo et al. “Time-dependent reliability of strengthened PSC box-girder bridge using phased and incremental static analyses”. In: *Engineering Structures* 117 (2016), s. 358–371. ISSN: 0141-0296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.011>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029616300311>.
- [63] J. Tomek. *Odborný posudek, příjezdný most k elektrárně VD Vír II vyrovnávací nádrž na Svatce*. Tech. zpr. Brno: DIVYP Brno s.r.o., 2002.
- [64] *Magnetoelastický dynamometr Dynamag*. Tech. zpr. INSET s.r.o., 2020.
- [65] A. Svoboda. *Vliv stáří betonu na předpínací sílu*. seminární práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2020.
- [66] L. S. Lasdon et al. “Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming”. In: *ACM Trans. Math. Softw.* 4.1 (1978), 34–50. ISSN: 0098-3500. DOI: 10.1145/355769.355773. URL: <https://doi.org/10.1145/355769.355773>.
- [67] G. B. DANTZIG. *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press, 1991. URL: <http://www.jstor.org/stable/j.ctt1cx3tvq> (cit. 17.03.2024).

O autorovi

Osobní údaje

JMÉNO A PŘÍJMENÍ: Adam Svoboda
DATUM NAROZENÍ: 19. srpen 1990
KONTAKTNÍ ADRESA: Příční 926/14,
664 47 Střelice, Česká republika
NÁRODNOST: česká



E-MAIL: svoboda.a@vut.cz
TEL.: +420 731 033 531

Specializace, vědecké zaměření

Navrhování, zesilování a posuzování železobetonových konstrukcí a konstrukcí z předpjatého betonu.

Diagnostické průzkumy, monitoring a analýza mostních betonových konstrukcí.

Pedagogické zkušenosti

BLB012	Bakalářský seminář (K-BZK)
BLB014	Specializovaný projekt (K-BZK)
BLA001	Prvky betonových konstrukcí - cv. CZ
BLA002	Betonové konstrukce 1 - cv. CZ
BLA008	Betonové konstrukce (K) - cv. CZ
BLA021	Vybrané statě z betonových a zděných konstrukcí - cv. CZ
BL006	Zděné konstrukce (S) - cv. CZ
BL009	Betonové konstrukce 2 - cv. CZ
BL012	Betonové mosty 1 - cv. CZ
CL063	Betonové mosty 2 (KON) - cv. CZ
CL003	Betonové mosty 2 (DST) - cv. CZ
NLB037	Statika při rekonstrukcích (K) - cv. CZ
NLB024	Statika při rekonstrukcích (S) - cv. CZ
NLB039	Statika při rekonstrukcích (E) - cv. CZ
NLA022	Betonové konstrukce (S) - cv. CZ/EN
NWA020	Realizace a rekonstrukce železobetonových konstrukcí - cv. CZ

Další aktivity a kurzy

- | | |
|-------------|---|
| 2016 – 2024 | aktivní účast na mezinárodních konferencích. Nejvýznamnější konference: <ul style="list-style-type: none">• International PhD Symposium in Civil Engineering, Prague 2018• Structural Faults + Repair and European Bridge Conference, Edinburgh 2022• 5. Brückenkolloquium, Technische Akademie Esslingen, Esslingen 2022 |
| 2017 – 2024 | zapojení do hospodářské činnosti ústavu BZK pod vedením doc. L. Klusáčka (celkem 33 projektů smluvního výzkumu). Nejvýznamnější projekty: <ul style="list-style-type: none">• Statické zajištění a stavební obnova visuté předpjaté lávky v Kroměříži (2018-2021)• Diagnostický průzkum závěsů dálničního zavěšeného mostu přes Labe u Poděbrad (2020)• Diagnostický průzkum předpínací výztuže a statický přepoččet střešních vazníků v areálu firmy DELIMAX a.s., Hodonín (2021)• Doplnkový diagnostický průzkum Libeňského mostu X-656 (2024) |
| 2017 – 2024 | zapojení do znalecké činnosti ústavu BZK: <ul style="list-style-type: none">• znalecký posudek č. 2/2020 v právní věci žalobce STRATOS AUTO proti žalovanému Lubomírovi Pavelkovi• znalecký posudek č. 26/2022 Posouzení technického stavu mostní konstrukce, Bělotín-Rybí (ŘSD ČR)• znalecký posudek č- 24/2023 Posouzení technického stavu mostní konstrukce, Ludgeřovice (ŘSD ČR) |
| 2019 – 2024 | člen pracovní skupiny pro mosty ŘSD ČR |
| 2022 – 2023 | certifikace v oboru koroze a protikorozní ochrany ve stupni KI/3 Korozní inženýr (č. 401-0370) |
| 2017 – 2022 | organizační garant sekce Konstrukce betonové a zděné a člen hlavního organizačního týmu doktorské konference JUNIORSTAV |
| 2018 – 2019 | Specializační studium technického znalectví pro pracovníky znaleckých ústavů na VUT v Brně (ÚSI VUT) |
| 2019 – 2020 | člen pracovní skupiny FAST VUT pro udělení HR Award |

Internacionalizace

31.8. – 9.9.2018	University of Split (Chorvatsko)
8.10. – 19.10.2021	University of Porto (Portugalsko)
15.10. – 23.10.2022	Universidad de Granada (Španělsko)
27.5. – 5.6.2023	University of Algarve (Portugalsko)
18.7. – 25.7.2023	Instituto Politécnico de Coimbra (Portugalsko)
18.10. – 23.10.2023	University of Edinburgh (Velká Británie)
8.4. – 16.4.2024	Técnico Lisboa (Portugalsko)

Zapojení do výzkumných projektů

01/2015 – 12/2015	FYZ FAST	Využití akustických metod pro posouzení stavu koroze u železobetonových konstrukcí (FAST-S-15-2622)
03/2017 – 02/2018	BZK FAST	Analýza vzájemného ovlivňování předpínacího lana a chráničky při menších poloměrech (FAST-J-17-4545)
03/2018 – 02/2019	BZK FAST	Možnosti optimalizace zesílení mostů volnými kabely (FAST-J-18-5431)
03/2019 – 02/2020	BZK FAST	Analýza ověřovacích zatěžovacích zkoušek zesílených mostů dodatečným předpětím (FAST-J-19-5989)
03/2019 – 02/2020	UAMT FEKT, BZK FAST	Možnosti identifikace porušení hydroizolace mostů pomocí senzorů (FAST/FEKT-J-19-5804)
01/2020 – 12/2023	BZK FAST	Upřesnění zbytkové únosnosti předpjatých mostů (CK01000042)
01/2023 – 12/2026	UAMT FEKT, BZK FAST	Optické sledování dynamického spektra předpjatých mostů (CK04000205)
01/2023 – 12/2026	BZK FAST	Pokročilé monitorování a diagnostika mostů s využitím provozní modální analýzy (CK04000261)

Publikace

2024	BOBEK, L.; KLUSÁČEK, L.; SVOBODA, A. Effective strengthening of reinforced concrete corbels using post-tensioning. ENGINEERING STRUCTURES, 2024, roč. 305, s. 1-17. ISSN: 0141-0296 (Q1).
-------------	--

- 2023** KLUSÁČEK, L.; ZICH, M.; NEČAS, R.; POŽÁR, M.; SVOBODA, A.; OLŠÁK, M.; ŠIMEK, O.; KOLÁČEK, J.; BOBEK, L.; STRNAD, J. Hodnocení stavu prefabrikované předpjaté střešní konstrukce. 29. Betonářské dny 2023: sborník ke konferenci. Listopad, 2023. Hradec Králové: Česká betonářská společnost ČSSI, 2023. s. 170-181.
- KLUSÁČEK, L.; ZICH, M.; NEČAS, R.; POŽÁR, M.; OLŠÁK, M.; SVOBODA, A.; ŠIMEK, O.; KOLÁČEK, J.; BOBEK, L.; STRNAD, J. Hodnocení stavu prefabrikované předpjaté střešní konstrukce. Zborník príspevkov z 12. seminára Sanačia betónových konštrukcií. Smolenice: Spektrum STU, 2023. s. 73-81. ISBN: 978-80-227-5370-8.
- 2022** KLUSÁČEK, L.; NEČAS, R.; KOLÁČEK, J.; SVOBODA, A.; OLŠÁK, M.; POŽÁR, M. Oprava lávky přes Moravu v Kroměříži - diagnostika, zesílení, rehabilitace, sledování. MOSTY 2022 27. MEZINÁRODNÍ SYMPOZIUM sborník příspěvků. Brno: SEKURKON s.r.o., 2022. s. 238-245. ISBN: 978-80-86604-84-8.
- KLUSÁČEK, L.; SVOBODA, A.; BUREŠ, J. Prestressed footbridge over Morava River in Kroměříž - strengthening, rehabilitation and measurement using geodetic method in combination with advanced optical methods. 5. Brückenkolloquium. Esslingen: Technische Akademie Esslingen e. V., 2022. ISBN: 978-3-8169-3549-0.
- OLŠÁK, M.; KLUSÁČEK, L.; SVOBODA, A.; NEČAS, R. Long-term Behavior of Prestressed Bridge After Reconstruction And Strengthening by P-T. 18th International Conference: Structural Faults + Repair-2022. Edinburgh: 2022. ISBN: 0-947644-88-1.
- SVOBODA, A.; KLUSÁČEK, L. Experimental measurement of the anchorage length of interrupted prestressing reinforcement. 5. Brückenkolloquium. Esslingen: Technische Akademie Esslingen e. V., 2022. ISBN: 978-3-8169-3549-0.
- SVOBODA, A.; KLUSÁČEK, L.; OLŠÁK, M. Method of Repairing Old Concrete Bridges. 18th International Conference: Structural Faults + Repair-2022. Edinburgh: 2022. ISBN: 0-947644-88-1.
- 2021** SVOBODA, A.; KLUSÁČEK, L.; NEČAS, R.; KOLÁČEK, J.; STRNAD, J.; OLŠÁK, M. Anchorage length of patented wire cables in prestressed bridge girders. Koroze a ochrana materiálů, 2021, roč. 65, č. 3, s. 92-96. ISSN: 0452-599X.
- KLUSÁČEK, L.; NEČAS, R.; POŽÁR, M.; PĚKNÍK, R.; SVOBODA, A. Transverse prestressing and reinforced concrete as the key to restoration of masonry arch bridges. ENGINEERING STRUCTURES, 2021, roč. 245, č. 1, s. 1-20. ISSN: 0141-0296 (Q1).

KLUSÁČEK, L.; NEČAS, R.; KOLÁČEK, J.; SVOBODA, A.; OLŠÁK, M. Podrobný diagnostický průzkum lanových závěsů. Silnice a železnice, 2021, roč. 16, č. 3/2021, s. 95-98. ISSN: 1801-822X.

NEČAS, R.; KLUSÁČEK, L.; KOLÁČEK, J.; SVOBODA, A.; OLŠÁK, M. Diagnostický průzkum lanových závěsů. MOSTY 2021 26. MEZINÁRODNÍ SYMPOZIUM sborník příspěvků. Brno: SEKURKON s.r.o., 2021. s. 169-175. ISBN: 978-80-86604-86-2.

SVOBODA, A.; KLUSÁČEK, L. Dodatečné předpínání historických železobetonových mostů. MOSTY 2021 26. MEZINÁRODNÍ SYMPOZIUM sborník příspěvků. Brno: SEKURKON s.r.o., 2021. s. 176-181. ISBN: 978-80-86604-86-2.

- 2020** SVOBODA, A.; KLUSÁČEK, L.; NEČAS, R.; KOLÁČEK, J.; STRNAD, J.; OLŠÁK, M.; BOBEK, L. Experimentální měření kotevní délky předpínací výztuže mostního prefabrikovaného nosníku I-73. 27. Betonářské dny, sborník ke konferenci. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2020. s. 133-139. ISBN: 978-80-907611-3-1.

KLUSÁČEK, L.; NEČAS, R.; KOLÁČEK, J.; SVOBODA, A.; OLŠÁK, M. Diagnostický průzkum závěsů mostu s ověřením rektifikace. 27. Betonářské dny, sborník ke konferenci. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2020. s. 127-132. ISBN: 978-80-907611-3-1.

- 2019** SVOBODA, A.; KLUSÁČEK, L.; OLŠÁK, M. Strengthening and Rehabilitation of U-Shaped RC Bridges Using Substitute Cable Ducts. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, roč. 2019, č. 8920718, s. 1-21. ISSN: 1687-8442 (Q3).

KLUSÁČEK, L.; NEČAS, R.; KOLÁČEK, J.; SVOBODA, A. Vliv vnějších podmínek na stavební konstrukci z pohledu statika. In Vliv vnějších podmínek na výsledky geodetických měření při použití současných technologií, odborný seminář. Brno: 2019. s. 80-85. ISBN: 978-80-02-02876-5.

KLUSÁČEK, L.; NEČAS, R.; KOLÁČEK, J.; SVOBODA, A.; OLŠÁK, M. Statické zajištění lávky pro pěší přes řeku Moravu v Kroměříži. In 26. Betonářské dny 2019, Sborník ke konferenci. Hradec Králové: Česká betonářská společnost ČSSI, 2019. s. 1-9. ISBN: 978-80-907611-2-4.

KLUSÁČEK, L.; SVOBODA, A. Diagnostika předpínacích kabelů semidestruktivní metodou. In MOSTY 2019 24. MEZINÁRODNÍ SYMPOZIUM sborník příspěvků. Brno: SEKURKON s.r.o., 2019. s. 239-244. ISBN: 978-80-86604-79-4.

- 2018** SVOBODA, A.; KLUSÁČEK, L. Strengthening of Reinforced Concrete Bridges by Post-Tensioning. In Proceedings of The 12th International PhD Symposium in Civil Engineering. Prague: Czech Technical University in Prague, 2018. s. 923-930. ISBN: 978-80-01-06401-6.
- SVOBODA, A. Krátkodobé pokusy s monostrandy. In Juniorstav 2018 - 20. Odborná konference doktorského studia. Sborník příspěvků. Brno: 2018. s. 448-453. ISBN: 978-80-86433-69-1.
- SVOBODA, A.; KLUSÁČEK, L. Results of Short-term Experiments with Monostrands in Saddles with Small Radii. In 24th Concrete Days 2017, 24th International Conference Concrete Days 2017. Solid State Phenomena. Switzerland: Trans Tech Publications, 2018. s. 147-153. ISBN: 978-3-0357-1284-1. ISSN: 1662-9779.
- SVOBODA, A.; KLUSÁČEK, L. Possibility of Increasing the Load Bearing Capacity of Parapet Bridge Structures. In 24th Concrete Days 2017, 24th International Conference Concrete Days 2017. Solid State Phenomena. Switzerland: Trans Tech Publications, 2018. s. 319-324. ISBN: 978-3-0357-1284-1. ISSN: 1662-9779.
- 2017** SVOBODA, A.; KLUSÁČEK, L. Výsledky krátkodobých pokusů s monostrandy v sedlech s malými poloměry. In 24. Betonářské dny 2017 Sborník příspěvků konference. Litomyšl: Česká betonářská společnost ČSSI, 2017. s. 1-7. ISBN: 978-80-906759-0-2.
- SVOBODA, A.; KLUSÁČEK, L. Možnosti zvýšení kapacity parapetních mostních konstrukcí. In 24. Betonářské dny Sborník příspěvků konference. Litomyšl: Česká betonářská společnost ČSSI, 2017. s. 1-7. ISBN: 978-80-906759-0-2.
- KLUSÁČEK, L.; SVOBODA, A. Strengthening of bridges by post-tensioning using monostrands in substituted cable ducts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, roč. 236, č. 1, s. 1-12. ISSN: 1757-8981.
- SVOBODA, A.; STARÝ, M. Působení předpínacích lan bez soudržnosti. In Juniorstav 2017, 19. odborná konference doktorského studia - Sborník ke konferenci. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2017. s. 1-8. ISBN: 978-80-214-5473-6.
- 2016** SVOBODA, A.; STARÝ, M.; KLUSÁČEK, L. Studie chování volných předpínacích lan tzv. monostrandů. In 23. BETONÁŘSKÉ DNY 2016, Sborník příspěvků konference. Litomyšl: Česká betonářská společnost ČSSI, 2016. s. 1-7. ISBN: 978-80-906097-6-1.

Abstrakt

Disertační práce se zabývá zesilováním železobetonových mostů vybudovaných mezi lety 1900-1940, které jsou stále důležitou součástí silniční dopravní infrastruktury České republiky. Zesilování stávajících mostů představuje efektivní alternativu k úplnému nahrazení mostní konstrukce, a to jak z technického, tak zejména z ekonomického hlediska, které v rozhodovacím procesu v rámci hospodaření s mosty hraje významnou roli. Vhodnou volbou metody zesílení lze dosáhnout efektivního využití stávající konstrukce, která splňuje veškeré požadavky na ni kladené z pohledu požadované zatížitelnosti. Hlavním cílem disertační práce je zavedení inženýrských optimalizačních přístupů pro navrhování systému zesílení železobetonových mostů metodou dodatečného předeptnutí předpínacími lany typu monostrand vedenými v náhradních kabelových kanálcích (metoda náhradních kabelových kanálků) zhotovených v původních strukturách zesilovaných mostů. Dílčím cílem disertační práce je ověření konstrukčního utváření deviátorů v původním betonu mostních konstrukcí s různými poloměry zakřivení a jejich vliv na spolehlivost předpínacích lan typu monostrand.

Abstract

This dissertation deals with the strengthening of reinforced concrete bridges built between 1900-1940, which still represent an important part of the road infrastructure of the Czech Republic. The strengthening of 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, which 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 dissertation 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) drilled in the original structures of the strengthened bridges. The sub-objective of this dissertation lies in verification of the structural formation of deviators in the original concrete of the bridge structures with varying radii of curvature and their effect on the reliability of prestressing cables.