

# OPTIMALIZACE NÁVRHU LETMO BETONOVANÉHO DÁLNIČNÍHO MOSTU

Jiří Keclík, \*

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

## ABSTRAKT

Článek se zabývá optimalizací návrhu letmo betonovaného mostu. Příspěvek je shrnutím optimalizační části autorovy diplomové práce, která se mimo jiné zabývá celkovým návrhem letmo betonované konstrukce na připravovaném úseku dálnice D11 Trutnov – Státní hranice. Optimalizace nosné konstrukce mostu je provedena v autorem vytvořeném software. Program pracuje v prostředí MS Excel a je propojený se SCIA Engineer. Hlavní pozornost je věnována postupu optimalizace zaměřené na redukci hmoty konstrukce a odpovídajícím úpravám předpětí. Optimalizace klade důraz na nalezení konstrukce s ideální geometrií, která splňuje požadavky platných evropských norem, a zároveň bude neekonomičtější. Článek shrnuje výsledky provedené analýzy a upozorňuje na možná úskalí optimalizace v inženýrské praxi.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Betonové mosty • Letmá betonáž • Předpjatý beton  
• Parametrizace • Optimalizace

## ABSTRACT

The article is focused on optimisation of design of a highway bridge built by free cantilever method. The paper summarizes optimisation part of the author's diploma thesis, which includes a full design of a bridge built by free cantilevering on the planned section of the highway D11 Trutnov - State border. The optimisation of the bridge superstructure is performed in software created by the author. It's programmed in MS Excel spreadsheet environment and is connected with SCIA Engineer. The main attention is dedicated to the optimisation process focused on material reduction and related modifications of prestressing reinforcement. The optimisation emphasizes finding a structure with an optimum geometry, that meets requirements of applicable EN standards and is the most economical. The article summarizes the results of the analysis and points out possible difficulties of optimization in engineering.

## KEYWORDS

Concrete bridges • Free cantilever method • Prestressed concrete • Parametrisation • Optimisation

## 1. ÚVOD

Ačkoliv topografie České republiky příliš nepřeje výstavbě největších mostních konstrukcí, je v tuto chvíli připravováno několik projektů mostních konstrukcí s velkým rozpětím, u nichž se využije principů letmé betonáže. Uvážíme-li rozměry průřezů a celkovou hmotu velkorozponových konstrukcí, je logické, že je nutné u nich provádět optimalizaci. Její využití se projeví nezanedbatelnou ekonomickou úsporou, a to nejen materiálovou, ale i časovou. S těmito úsporami se pojí i menší potřeba nasazení kapacit a redukuje se uhlíková stopa konstrukce. Při práci na RDS (realizační dokumentace stavby) v kooperaci s realizační firmou může být takový přístup k výpočtu velmi výhodný pro všechny zúčastněné subjekty.

Pomineme-li zpracování konstrukčních úprav do statického modelu ručně, nabízí se v současné době mnoho nástrojů pro parametrizaci nebo dokonce automatickou optimalizaci algoritmem na základě zadaných okrajových podmínek. Je pouze na projektantovi nakolik časově úspornou a kontrolovatelnou formu parametrizace a s ní spjatného optimalizačního procesu zvolí. Cílem je mít jednotlivé kroky výpočtu ve svých rukou, neboť ekonomičnost konstrukce se neodvíjí pouze od minimalizace materiálu, ale i zachování rozumných konstrukčních zásad.

Návrh ekonomické konstrukce proto vyžaduje hluboké znalosti problematiky návrhu z statického, konstruktérského ale i zhotovitelského hlediska.

Tento příspěvek shrnuje výsledky autorovy diplomové práce. Věnuje se procesu zvolené optimalizace dálničního letmo betonovaného komorového mostu na D11 a zhodnocení výsledků optimalizace na základě různých aktuálních kritérií.

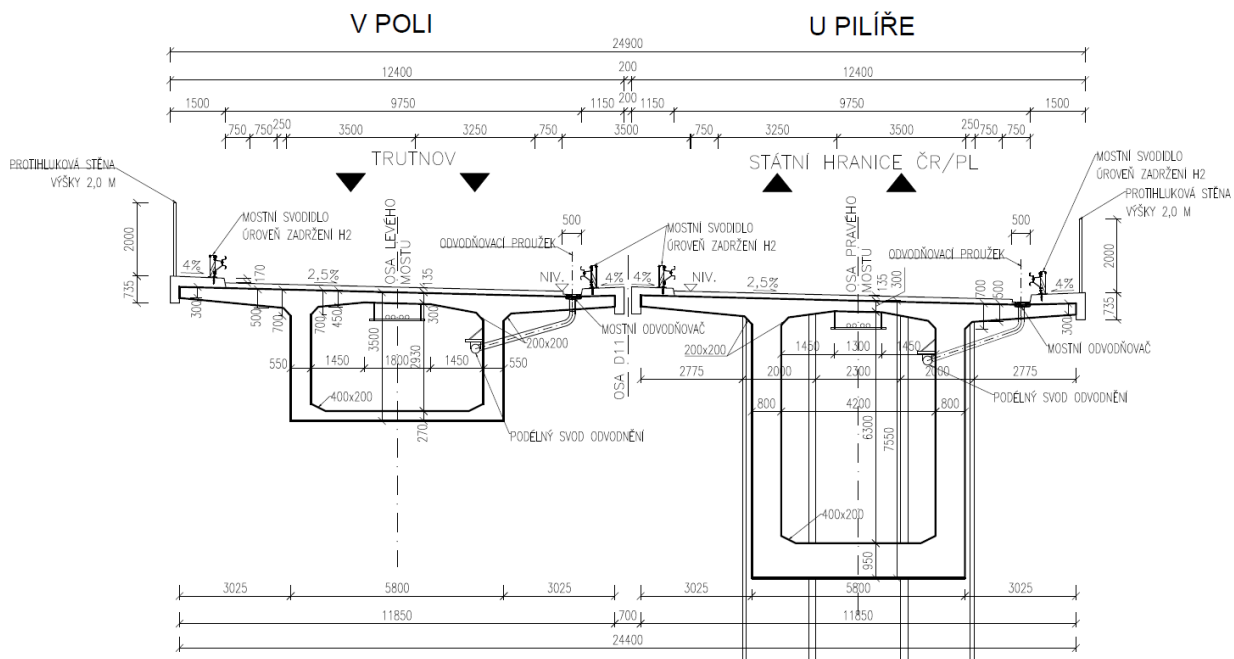
## 2. POSUZOVANÁ KONSTRUKCE

Navrhovaná mostní konstrukce je součástí stavby D11 úsek Trutnov – Státní hranice a je tvořená dvojicí komorových letmo betonovaných mostů se svislými stěnami. Konstrukce je o 3 polích 90 + 150 + 90 metrů. Oba mosty mají šířku nosné konstrukce 11,85 metrů. Každý z mostů převádí dva jízdní pruhy a revizní chodník. Finální varianta nosné konstrukce má v oblasti zárodků výšku 7,55 metrů a uprostřed rozpětí 3,50 metrů. Na opěrách je most uložen na dvojicích hrncových ložisek, podpěry P2 a P3 tvoří dvojice stěn, které jsou vetknuty

---

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

do nosné konstrukce. Podpěry jsou založeny hlubinně na velkopřůměrových pilotách.



Obrázek 1: Vzorový příčný řez nosnou konstrukcí s finální geometrií

## 2.1. Materiálové parametry

Materiály konstrukce mostu jsou voleny s ohledem na dobrou dostupnost a zpracovatelnost. Betony vysokých tříd nebyly využívány, protože jsou v ČR obtížně dostupné a zároveň mnohdy nastávají problémy s jejich čerpatelností. Spodní stavba a založení jsou navrženy z betonu C30/37. Třída betonu nosné konstrukce je zvolena C45/55. Konstrukce je vyztužena betonářskou výztuží třídy B500 s třídou tažnosti B. Předpínací výztuž je tvořena ze splétaných sedmidrátových lan s velmi nízkou relaxací Y1860-S7-15,7. Předpínací výztuž je vedena v ocelových korugovaných kanálcích.

## 2.2. Zatížení a zatěžovací stavy

Pro optimalizační proces jsou zahrnuta všechna stálá zatížení, zahrnující vlastní tíhu, ostatní stálá zatížení a předpětí. Zároveň jsou v příslušných časových krocích aplikována a odebrána zatížení betonázním vozíkem a čerstvým betonem. V podrobném návrhu optimalizací vybrané geometrie jsou použita další zatížení, například dopravou, teplotou nebo nerovnoměrným sedáním, která jsou pro podrobný návrh podstatná.

## 2.3. Časová osa

Most je navrhován na životnost 100 let. Optimalizační proces zohledňuje jednotlivé kroky výstavby, při kterých vznikají nové entity, a tím se mění i zatěžovací stavy. Výpočet je prováděn metodou časově závislé analýzy, která zároveň vyšetřuje reologické vlivy betonu a zohledňuje vývoj předpínací síly v čase. Takt betonáže jednotlivých lamel je nastaven na 7 dní, což je čas, který je pro realizaci běžný.

Případné časové odchylky jednotlivých kroků plynoucí z realizace je možné snadno měnit. To zajišťuje vysoká variabilita parametrů autorem vytvořeného programu.

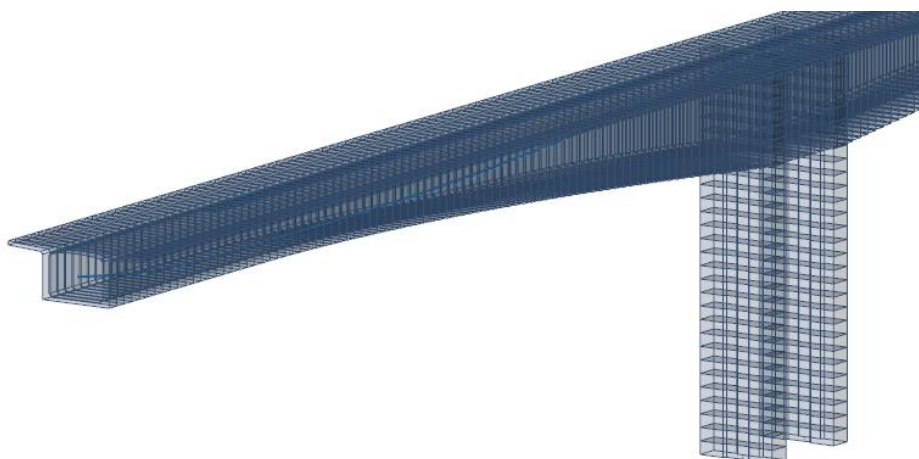
## 3. METODY

Optimalizace nosné konstrukce mostu je provedena v autorem vytvořeném programu pracujícím v tabulkovém procesoru MS Excel, který pro výpočet vnitřních sil využívá propojení s prostředím a funkcionalitami SCIA Engineer. Konečný návrh nosné konstrukce je výsledkem množství iteračních kroků spočívajících v autorem přímo řízených úpravách parametrů. Měněné parametry jsou definovány v kapitole 3.2..

### 3.1. Použité modely

Pro výpočet jsou použity tři modely. K určení vlivu smykového ochabnutí je využito porovnání normálových napětí na dvou modelech, a to desko-stěnovém a prutovém. Použitý prutový model je oprostěn od předpínací výztuže a ocelových pásků, které jsou jinak využívány pro modelování letmo betonovaných či montovaných konstrukcí. Zároveň je prutový model tvořen v podobě, jakou bude mít most při uvedení do provozu a nezohledňuje fáze výstavby. Oba tyto modely jsou zatíženy plošným zatížením 10 kN/m<sup>2</sup>. Na základě porovnání vypočtených napětí jsou stanoveny zvětšující koeficienty napětí.

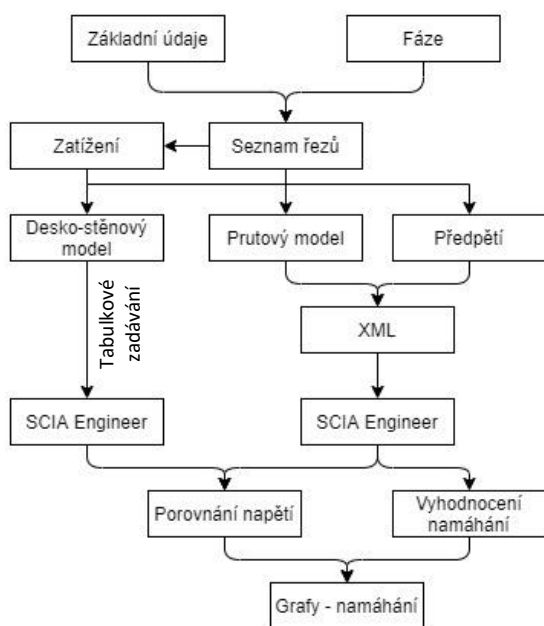
Stanovení vnitřních sil a průhybů pro optimalizaci, ale i finální návrh konstrukce, je provedeno na komplexním prutovém modelu využívajícím časově závislé analýzy. Model obsahuje ocelové pásky, předpínací výztuž a vystihuje skutečný postup výstavby. Je modelován dílci s konečnou délkou 1 metru.



Obrázek 2: Vizualizace podrobného prutového modelu

### 3.2. Optimalizační proces

Optimalizační proces je celý veden ve vlastním programu vytvořeném v MS Excel. Propojení se SCIA Engineer je použito pouze k vypočtení vnitřních sil a průhybů, které jsou následně exportovány a opět převedeny do MS Excel. V něm jsou poté vyhodnoceny.



Obrázek 3: Struktura programu

Program z konečného počtu volných parametrů volených autorem automaticky generuje entity (uzly, pruty, desky, zatížení apod.) potřebné pro vytvoření výpočetního modelu. V případě desko-stěnového modelu je pro program postačující, že je importuje do SCIA Engineer pomocí funkcionality „Tabulkové zadávání“. V případě výrazně složitějších prutových modelů s parametrickými průřezí vytváří program projekt výpočetního modelu prostřednictvím souboru XML. Soubor XML je formát exportu projektu vytvořeného ve SCIA Engineer a jeho nespornou výhodou je strojová i lidská čitelnost. Vzhledem k tomu, že používá

řádkovou strukturu, je jednoduché ho prostřednictvím vzorců automaticky měnit na základě zadávaných parametrů.

Po importu vstupních dat z programu v MS Excel do SCIA Engineer je proveden přednastavený výpočet. Exportované vnitřní síly a průhyby jsou přeneseny zpět do tabulkového procesoru. Po jejich nahrání prostřednictvím makra jsou vypočtena normálová napětí se zahrnutím vlivu smykového ochabnutí. Stanovená napětí jsou následně posouzena autorem a na základě vyhodnocení dochází k přijetí dalších konstrukčních úprav.

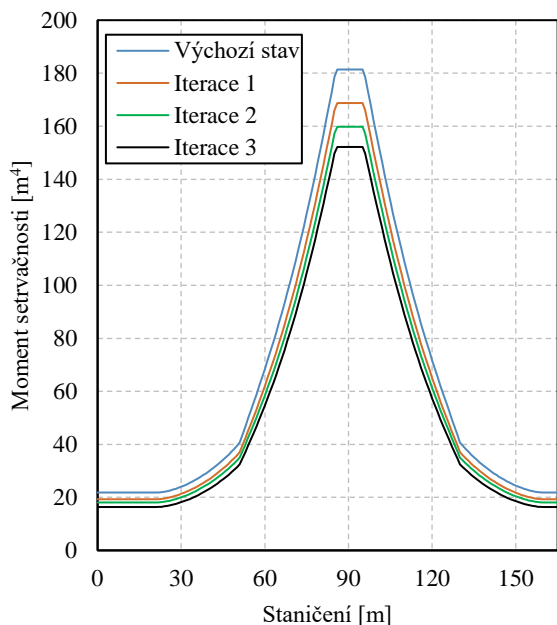
Vzhledem k tomu, že vlastní tíha je pro tento typ konstrukce dominantní, pro optimalizaci jsou sledována normálová napětí od kvazistálé kombinace zatížení ve všech rozhodujících fázích výstavby. Navíc je sledován vývoj dlouhodobého průhybu konstrukce v hlavním poli. Ačkoliv ho lze vyrovnat správným nadvýšením mostu, je odpovídajícím ukazatelem klesající ohybové tuhosti nosné konstrukce vlivem pokračující optimalizace.

S ohledem na charakter konstrukce je řada možných parametrů omezená technologickými limity nebo rozdělením jízdnic pruhů. Mezi takové parametry patří tloušťky stěn nebo šířkové uspořádání průřezu, které jsou od počátku nastaveny na svou optimální hodnotu. Upravovanými parametry jsou výšky průřezu v podporových a mezipodporových řezech, tloušťky dolní desky a velikost předpínací síly pro jednotlivé kabely. Tyto parametry jsou zvoleny z důvodu vysokého vlivu na celkovou hmotu konstrukce a jejich značnou variabilitu.

## 4. VÝSLEDKY

Autor provedl celkem sedmáct iterací zahrnujících změny geometrie a případné úpravy předpínací síly. V této kapitole jsou prezentovány výsledky výchozího stavu, navrženého dle empirie, a tří vybraných reprezentativních iterací. Vybrané iterace splňují veškeré podmínky mezního stavu omezení napětí pro kvazistálou kombinaci zatížení. Z hlediska změny volných parametrů bylo postupováno ve smyslu postupného snižování od původních empirických hodnot. Budeme-li mluvit o podporovém průřezu, došlo optimalizací ke snížení výšky průřezu o 5,6 % a tloušťky spodní desky komory

o 20,8 %. Graf níže zobrazuje postupný úbytek momentu setrvačnosti mezi vybranými iteracemi.



Obrázek 4: Moment setrvačnosti po délce poloviny mostu

Z grafu na obrázku 4 je patrné, že postupem optimalizace došlo především k výrazné redukci momentu setrvačnosti v oblasti zárodků nad pilíři, který se projevil výrazným poklesem celkové tuhosti konstrukce a nutností zvětšování předpínací síly tak, aby normálová napětí stále splňovala požadavky norem.

Pro jednotlivé optimalizační kroky bylo vyhodnoceno pro jednu mostní konstrukci množství použitého materiálu a vyrovnaná výška průřezu. Jeho výsledky jsou shrnuty v tabulce níže.

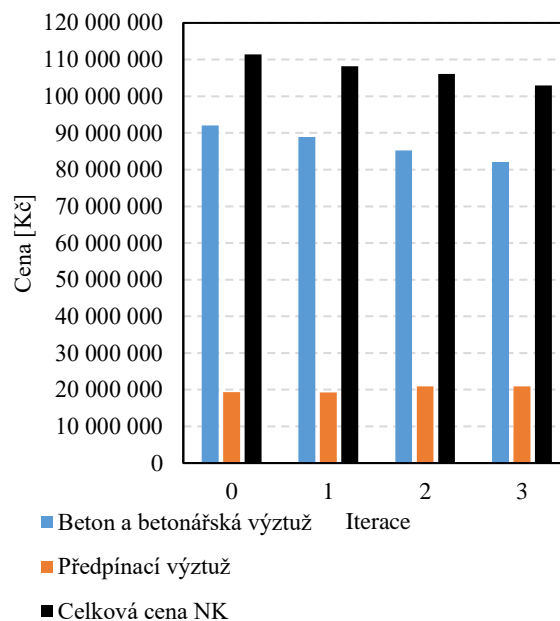
Tabulka 1: Množství spotřebovaného materiálu a vyrovnaná výška průřezu

Číslo iterace	Beton		Předpínací výztuž		Vyrovnaná výška průřezu [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]
	[m <sup>3</sup> ]	[%]	[t]	[%]	
0	4688	100,0	193,586	100,0	1,192
1	4527	96,6	193,024	99,7	1,151
2	4339	92,6	209,231	108,1	1,103
3	4179	89,1	209,218	108,1	1,062

Z tabulky 1 je zřejmé, že optimalizací bylo dosaženo značné úspory betonu, která činí 10,9 %. V absolutních číslech se jedná o 509 m<sup>3</sup> betonu pro jeden most. Zároveň došlo k navýšení spotřeby předpínací výztuže o 8,1 %, respektive o 15,6 tuny. Vyrovnaná výška třetí prezentované iterace činí 1,062, což je ideální hodnota pro komorové mosty.

Údaje z tabulky 1 byly následně využity k vyhodnocení finančních důsledků provedených úprav nosné konstrukce. Pro vyčíslení finančních nákladů byly použity

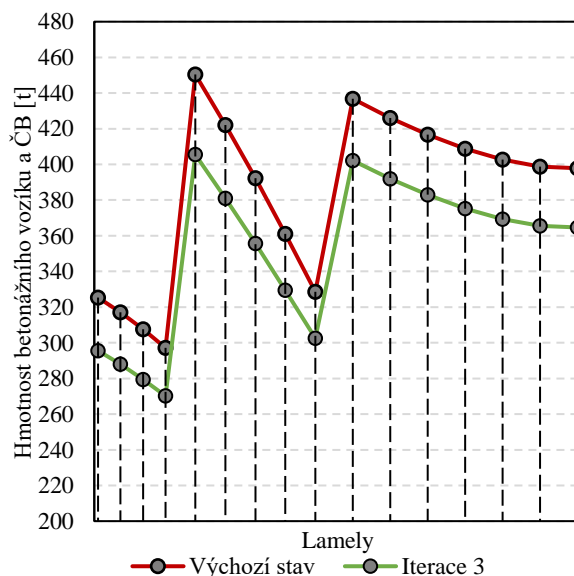
expertní jednotkové ceny OTSKP 2019. Výsledky jsou uvedeny v grafu níže.



Obrázek 5: Vyčíslení stavebních nákladů nosné konstrukce jednoho mostu

Pro vyhodnocení uvedené na obrázku 5 bylo odhadnuto množství betonářské výztuže hodnotou 200 kg/m<sup>3</sup> betonu. Z grafu je patrná významná finanční úspora plynoucí z redukce množství betonu. Úspora na celkové ceně činí zhruba 8,4 mil. Kč pro jedinou mostní konstrukci. Zároveň nezohledňuje další úspory na spodní stavbě, založení, ložiscích nebo režijních nákladech výstavby.

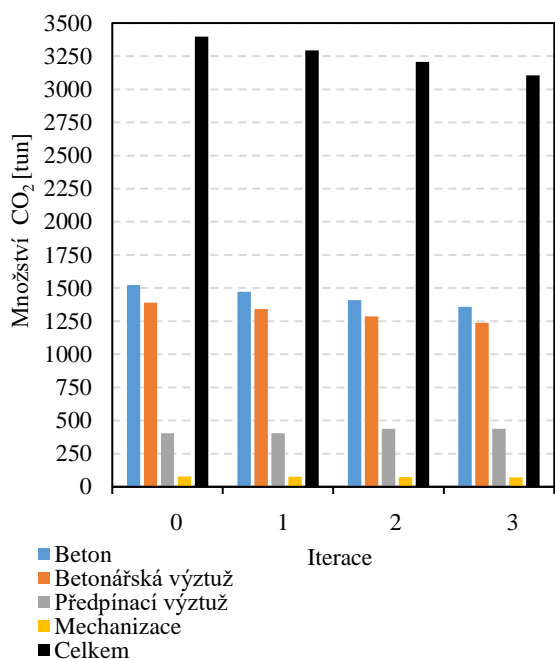
Optimalizace netvoří úsporu pouze v materiálu nosné konstrukce, ale i v nákladech na samotnou výstavbu. Pro vystižení této skutečnosti byl vytvořen graf níže. Zobrazuje rozdíl hmotností betonážního vozíku s čerstvým betonem mezi výchozím stavem a výslednou iterací pro jednotlivé lamely.



Obrázek 6: Hmotnost betonážního vozíku a čerstvého betonu

Graf na obrázku 6 prezentuje významný rozdíl mezi hmotností betonážního vozíku s čerstvým betonem činící minimálně 30 tun. Celý rozdíl je tvořen menším množstvím betonu, protože pro zachování porovnatelnosti je uvažován stejný betonážní vozík. Redukce hmotnosti může být zohledněna použitím méně únosného vozíku, což se projeví dalším zvýšením ekonomičnosti návrhu.

Vysoce aktuální je ekologický aspekt optimalizace s ohledem na potenciál globálního oteplování, který byl vyčíslen v tunách vyprodukovaného CO<sub>2</sub>.



Obrázek 7: Množství vyprodukovaného CO<sub>2</sub>

Z obrázku 7 lze sledovat pokles celkového množství vyprodukovaného CO<sub>2</sub>. Rozdíl pro finální iteraci činí 300 tun. Z grafu lze dále vyvodit, že na ekologičnost projektu má vliv především úspora betonu a betonářské výztuže. Vliv předpínací výztuže je výrazně menší. Je to způsobenou především značným nepoměrem objemu materiálů v konstrukci. Množství vyprodukovaného oxidu uhličitého je totiž pro jednu tunu předpínací výztuže výrazně vyšší než u betonu nebo betonářské výztuže. Vliv mechanizace vůči vlivu použitých materiálů je minimální, přesto lze konstatovat, že také došlo k nezanedbatelnému snížení emisí CO<sub>2</sub>. Dle výsledků propočtu lze konstatovat, že snížení množství použitého materiálu vede k redukci emisí oxidu uhličitého stavební mechanizace o 11,5 %, v absolutních hodnotách o 9 tun.

## 5. ZÁVĚR

V příspěvku byly prezentovány výsledky a vyhodnocení optimalizační studie nosné konstrukce letmo betonovaného mostu zpracované v rámci autorovy diplomové práce. Na základě vyhodnocení lze konstatovat, že optimalizace je významná pro konstrukce s velkými rozpětími a má dopad do finančních i ekologických aspektů stavby. V případě, že je způsob optimalizace a parametrizace uchopen správně,

lze provádět úpravy velmi efektivně a rychle. V tomto případě, kdy byly použity pouze základní a dostupné nástroje trval každý iterační krok zhruba 2 hodiny. V případě, že by projektant volil konstrukční úpravy klasickými změnami v prostředí FEM software, dá se odhadovat, že každá iterace by mohla trvat přibližně 2 pracovní směny, tedy 16 hodin. Při vývoji programu pro optimalizaci a parametrizování konstrukce je vhodná komunikace s dodavatelem vybraného FEM software, pro předejítí zbytečných chyb a získání povědomí o jeho úskalích. Jako rozšíření autorem vytvořeného programu by se dalo navrhnout zahrnutí optimalizace spodní stavby a založení.

## Reference

Jiří, K. (2021). *Optimalizace návrhu letmo betonovaného dálničního mostu* (Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební.).