

BETONOVÉ MOSTY STŘEDNÍCH ROZPĚTÍ NA VYSOKORYCHLOSTNÍCH TRATÍCH

Pavel Vrba, *

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

ABSTRAKT

Tato práce je věnována úvodu do problematiky mostů středních rozpětí na vysokorychlostních tratích. Zásadním aspektem při návrhu mostní konstrukce vysokorychlostních tratí je odezva na zatížení dynamického charakteru, která při vysokých rychlostech vlakových souprav vznikají.

Práce popisuje problematiku dynamického zatížení železničních mostů. Věnuje se způsobům konstrukčního řešení pro mosty s rozpětí polí 25-35m. Představené idealizované průřezy nosníků jsou podrobeny dynamické analýze, která ukazuje benefity využití betonových mostních průřezů. V závěru je pozornost věnována vlivu parametrů hmotnosti a tuhosti na dynamickou odezvu konstrukce.

Motivací práce je nalezení vhodné geometrie betonového průřezu a její propojení s principy prefabrikace. Důsledkem toho by došlo k usnadnění výstavby a úspoře prostředků při výstavbě mostů vysokorychlostních tratí v ČR. Tento článek je úvodem pro další výzkum vedoucí ke zrychlení výstavby za využití prefabrikace na vysokorychlostních tratích.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vysokorychlostní trať, dynamická analýza, most, prefabrikace

ABSTRACT

The presented paper is dedicated to the subject matter of bridges with medium spans carrying a high-speed rail. The main focus during bridge design is the response to dynamic loading due to the high speed of the train.

The presented work describes the dynamic loading of railway bridges. It takes a look into the constructional solutions of bridges with a span in the range of 25 to 35 meters. Introduced ideal cross-sections of various shapes and materials are subjects to dynamic analysis which shows us the benefits in the application of concrete cross-sections. In the last part, the paper focuses on the effects of individual parameters of mass and stiffness with the connection to the dynamic response.

The main motivation is to find a convenient concrete cross-section and combination with the prefabrication process. The idea behind motivation is a possibility that could save us resources and accelerate the construction of high-speed rails in the Czech republic. The paper is the introduction for future research to accelerate construction by using prefabrication methods on the construction of the high-speed rails.

KEYWORDS

High speed railway, dynamic analysys, bridge, precast

1. ÚVOD

Projekty stavbeb vysokorychlostních tratí na území české republiky s sebou přináší potřebu přemostění řady stávajících komunikací, vodních toků a terénních překážek. Návrh mostních konstrukcí pro traťové rychlosti přesahující 200km/h s sebou přináší značná dynamická zatížení, která musí být v návrhu zohledněna a značným způsobem tak ovlivňují charakter mostních konstrukcí.

V současné době na našem území probíhá příprava pilotních projektů rychlých spojení. Pro projektování vysokorychlostních tratí v minulých letech vznikla řada studií a podkladových materiálů vycházející ze zkušeností zahraničních kolegů, zejména z Francie a Rakouska. Na základě těchto podkladů se preferovaným řešením mostních konstrukcí středních rozpětí polí (cca 35m) stávají ocelobetonové spřažené konstrukce. Německo naopak preferuje předpjaté mostní konstrukce na těchto tratích.

Tato práce reprezentuje snahu o nalezení efektivního použití betonových průřezů na mostech středních rozpětí. Hlavním cílem je nalezení vhodné geometrie betonového mostního průřezu pro rozpětí cca 20-35m, její propojení s technologií prefabrikace a v ideálním případě standardizace takového řešení pro lokální podmínky ČR. Pomyslným vzorem pro tuto myšlenku je Čínský systém SBBs.

1.1. Vysokorychlostní tratě

Historie vysokorychlostních tratí (dále jen VRT) sahá do 50. a 60. let minulého století, kdy se touto myšlenkou dopravy začali zabývat v Japonsku a Francii. Následoval rozvoj v evropských zemích jako je Itálie, Německo, Španělsko a Velká Británie. Aktuálně je boom VRT ztelný zejména v asijských zemích jako je Čína, Taiwan a Jižní Korea. V současné době probíhá stavba prvních úseků VRT i v Kalifornii.

VRT jsou tratě umožňující vlakové soupravě dosažení rychlosti 250km/h a větších. V ČR se lze setkat s označením „rychlá spojení“. Plány Evropské unie, k jejíž plněním se ČR zavázala v roce 2011 je kompletní síť evropských VRT do roku 2050.

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

Skrze území ČR by v budoucnu mělo pomoci VRT dojít k propojení evropských měst jako jsou Drážďany, Wrocław, Katowice, Bratislava nebo Vídeň a zakomponování našich významných měst do této sítě.

1.2. Dynamické zatížení

Vlakové soupravy projíždějící rychlostí přesahující 200km/h generují značná dynamická zatížení podobným Rayleiovým vlnám. Jedná se o povrchové vlnění s kruhovým charakterem jehož následkem je oscilace povrchu. Jedná o zatížení technickou seismicitou jejíž účinky je nutno analyzovat a návrh mostu uzpůsobit.

Z dynamické pohybové rovnice vynuceného kmitání lze stanovit parametry, které mají hlavní vliv na dynamickou odezvu konstrukce. Jsou jimi tuhost, hmotnost, útlum a časový průběh zatížení.

$$K\tau(t) + C\dot{r}(t) + M\ddot{r}(t) = f(t) \quad (1)$$

Hmotnost zahrnuje vlastní tíhu samotné konstrukce, ale i dalších stálých konstrukcí a vybavení mostního svršku, které ovlivňují dynamické chování. Tuhost je dána průřezovými a materiálovými charakteristikami nosné konstrukce. Tyto dvě složky jsou v moci mostního inženýra a jeho návrhu.

Průběh zatížení je odvozený od použitého vlaku a traťové rychlosti. Zatížení definuje norma formou HSLM sestav nebo výrobce konkrétní vlakové soupravy.

Útlum je klíčovým parametrem dynamické analýzy, jehož hodnotu nelze spolehlivě odhadnout. Hodnota je zde ovlivněna použitým materiálem a jeho vadami, skladbou kolejového svršku nebo charakterem deformace. Z tohoto důvodu jsou v eurokódu uvedeny doporučené spodní meze předpokládaného útlumu, které vychází z měření na již realizovaných konstrukcích.

1.3. Požadavky na mosty HSR

Na VRT tratích se jako kritické parametry při posouzení ukazují omezení ze strany posudku mezního stavu použitelnosti. Eurokód ČSN EN 1990 ed.2 hlídá parametry jako je natočení koncového příčnicku, průhyb konstrukce, ale také zrychlení konstrukce. Snahou je zaručení dostatečného komfortu jízdy pro cestující. S ohledem na rozsah prezentované práce byly pro popis chování konstrukce prozatím vybrány parametry průhybu a zrychlení konstrukce. Pro zvolený typ konstrukcí se limitní hodnoty těchto parametrů vyskytují ve středu rozpětí. Zároveň však byly ověřovány hodnoty zrychlení konstrukce cca ve čtvrtině rozpětí, které se blížily hodnotám ve středu pole.

2. DYNAMICKÁ ANALÝZA ŽELEZNIČNÍCH MOSTŮ

Pro názorné představení problematiky dynamického chování mostního průřezu byly vybrány tři varianty příčných řezů vhodné pro řešené rozpětí (25-35m). Jedná se o známé konstrukční varianty betonového dvoutrámu, betonových předpjatých nosníků se spřahující deskou a ocelových nosníků se spřahující deskou. Pro použití na tratích VRT byly použity robustnější rozměry a aplikovány způsobilosti drážních staveb.

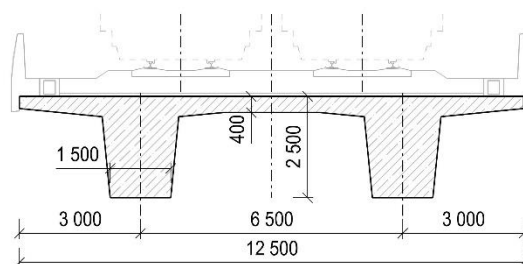
U všech průřezů bylo použito shodné dvoukolejné uspořádání s kolejovým ložem splňující požadavky na rychlost 300km/h dle vnitřního předpisu SŽ. S ohledem na charakter uvedeného dokumentu nemůže být mostní svršek blíže specifikován.

Pro účely této práce byla vybrána modelová situace:

- Konstrukce o jenom poli rozpětí 30m
- Statické schéma prostý nosník
- Konstrukční výška průřezu $h=2/25L$
- Přímé směrové i výškové vedení

2.1. Betonový dvoutrám

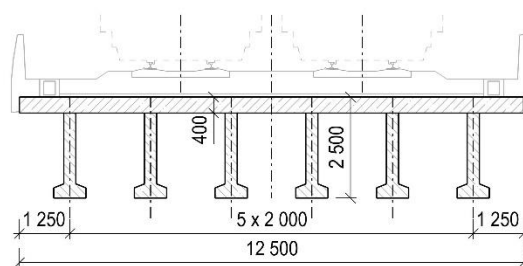
Dvoutrámový průřez z předpjatého betonu, který pro aplikaci na VRT využívá větší šířky trámů a s tím rostoucí hmotnosti i tuhosti. Jedná se o systém používaný na německých VRT, kde nahrazuje předpjaté komorové průřezy u menších rozpětí.



Obrázek 1 - Betonový dvoutrám

2.2. Betonové spřažené nosníky

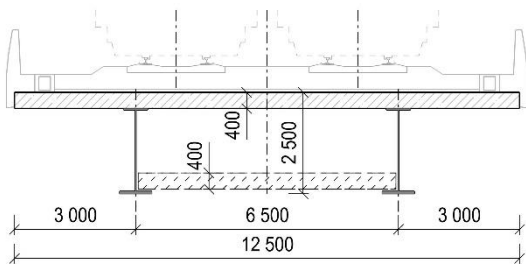
Nosníky z předpjatého betonu se spřahující deskou. Pro využití na VRT lze předpokládat větší počet nosníků. S ohledem na relativně malou hmotnost jednotlivých nosníků umožňuje toto řešení využití prefabrikace v evropských podmínkách. Obdobné řešení je známé na řadě evropských VRT a aktuálně aplikované při výstavbě VRT v Kalifornii.



Obrázek 2 - Betonové spřažené nosníky

2.3. Ocelobetonový spřažený průřez

Dvojice ocelových nosníků se spřahující železobetonovou deskou je na novostavbách českých železnic preferovaný systém pro střední rozpětí polí. Na VRT ve Francii je průřez často modifikován pomocí spodní železobetonové desky, která zvyšuje hmotu průřezu a v nadpodporových oblastech spojitých nosníků i tuhost.



Obrázek 3 - Ocelobetonový spřažený průřez

2.4. Způsob modelování

Nosná konstrukce byla modelována pomocí roštové náhrady. Diskretizace hmoty a zadání dynamického zatížení v podélném směru byly umožněny uzly umístěnými po vzdálenosti 1m. Správnost výpočetního modelu byla ověřena na zjednodušeném prutovém modelu. Pro betonový dvoutrám byl vytvořen ověřující deskostěnový model. Základními materiály jsou beton pevnostní třídy C35/45 a konstrukční ocel S355 s materiálovými vlastnostmi dle eurokódu. Pro výpočet bylo použito výpočetních softwarů MIDAS Civil a SCIA Engineer.

2.5. Způsob modelování

Průřezové charakteristiky zvolených průřezů a klíčové hodnoty statických zatížení jsou shrnuty v tabulce číslo 1. Průřez předpjatých betonových nosníků vychází z tuhosti betonového dvoutrámu, avšak s redukovanou hmotností. Vyšší hmotnost betonového dvoutrámu se projevila nižší hodnotou vlastní frekvence.

Ocelobetonový spřažený průřez je reprezentován svým základním tvarem a následně i variantou se spodní betonovou deskou. Přestože se jedná o shodný průřez, ve kterém je deska modelována formou zatížení, dochází rovněž k redukci hodnoty vlastní frekvence u těžšího průřezu. U ocelobetonových průřezů nebyly uvažovány průřezové charakteristiky betonu s trhlinami. Získané výsledky zejména deformací lze považovat za nadhodnocené.

Tabulka 1 - Srovnání průřezů

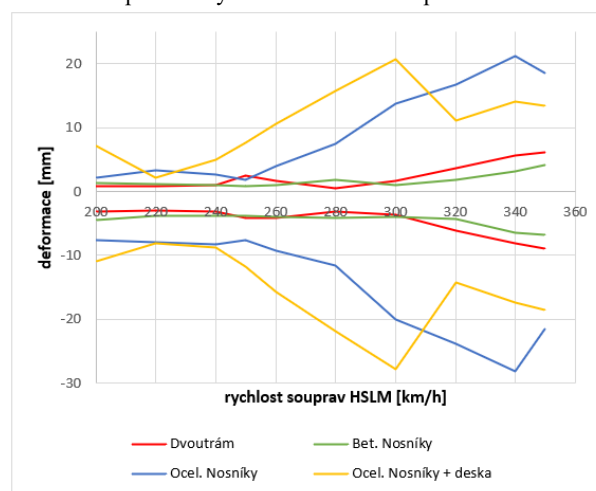
		Dvoutrám	Bet. Nosníky	Ocel. Nosníky	Ocel. Nos. +balast
A	[m ²]	12.180	9.680	1.055	1.055
M	[kN/m]	304.5	242.0	143.8	143.8
I	[m ⁴]	6.972	6.944	0.577	0.577
E	[GPa]	34.1	34.1	210.0	210.0
EI	[GNm ²]	237.6	236.6	121.2	121.2
c	[-]	0.010	0.010	0.005	0.005
ω_M	[Hz]	3.927	4.206	3.511	3.145
ω_T	[Hz]	6.735	4.748	3.985	3.569
G	[kN/m]	140.0	140.0	140.0	210.0

Odezva konstrukce s ohledem na rychlost projíždějících souprav byla pro názornost popsána pomocí grafů č. 1 a 2. Grafem zobrazené křivky jsou obalovými křivkami modelů HSLM A1 až A10.

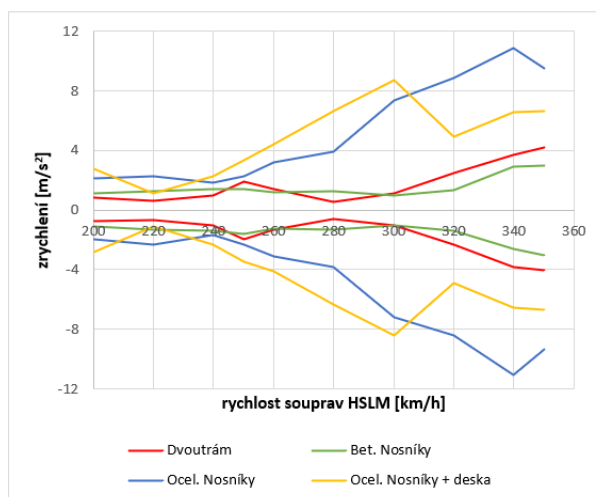
Dle níže uvedených grafů vykazuje průřez využívající předpjaté nosníky plošší křivku deformace i zrychlení. Průřez je z hlediska dynamické odezvy stabilnější. Tento jev je zejména patrný s rostoucí rychlostí.

V případě ocelobetonových spřažených průřezů dochází k obdobnému průhybu avšak při rozdílných rychlostech (přetížený průřez má maximální odezvy při 300km/h). Hlavní rozdíl se projevuje u zrychlení, kdy přetížená konstrukce vykazuje menší hodnoty zrychlení.

Při srovnání betonových oproti ocelobetonovým variantám je z grafů patrný pozitivní vliv většího materiálového útlumu betonu. Betonové průřezы vykazují menší hodnoty zrychlení i průhybu vyplývající z větší tuhosti i hmotnosti. Vhodným naladěním ocelobetonového průřezu by jistě bylo dosaženo přijatelnějších hodnot deformací, zejména účinná by pak byla změna konstrukční výšky průřezu. Principu odladění betonového průřezu byla věnována další kapitola.



Obrázek 4 - Průhyb porovnávaných průřezů



Obrázek 5 - Zrychlení porovnávaných průřezů

3. VLIV PARAMETRŮ PRŮŘEZU

Pro podrobnější popis a pochopení vlivu průřezových charakteristik byla vypracována následující parametrická studie. Všechny náležitosti konstrukce jako je šířkové uspořádání, statické schéma, rozpětí, ostatní stálá a dynamická zatížení odpovídají výše popisovanému postupu. Následující postup uvažuje změnu pouze jednoho ze vstupních parametrů průřezu (A, I_y, E), zatímco ostatní jsou zachovány.

Jako výchozí bod byly zvoleny průřezové charakteristiky odpovídající průřezu předpjatého dvoutrámu.

- Plocha průřezu A = 6,0 m²
- Moment setrvačnosti I_y = 7,0 m⁴
- Pevnostní třída C35/45 (E=34,1 GPa)

Následná studie se zaměřuje pouze na betonové průřezy. Snahou bylo sestavit krajní hodnoty rozsahů, které respektují materiál a technologii předpínání. Jednotlivé parametry průřezu byly upravovány po 5% krocích, případně po pevnostní třídě. Toto podrobné dělení nepřineslo zvláštní zjištění a proto jsou z důvodu čitelnosti grafů prezentovány křivky po 10% krocích.

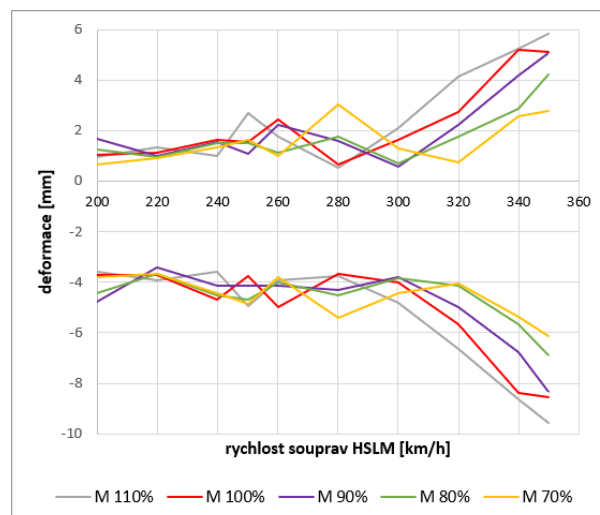
Cílem parametrické studie je definovat vliv jednotlivých parametrů na dynamickou odezvu konstrukce. Získané poznatky by následně mohly vézt k návrhu vhodné geometrie průřezu nebo jako podklad pro práci na typovém řešení.

3.1. Změna hmotnosti

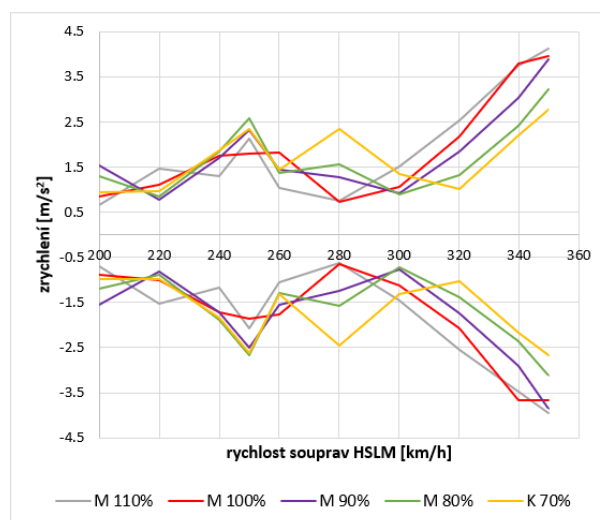
Prvním představovaným fenoménem je vliv hmotnosti betonového průřezu na dynamické chování konstrukce. Výchozí dvoutrámová konstrukce je na grafech reprezentována červenou křivkou M100%.

S rostoucí hmotností klesá hodnota vlastní frekvence kmitání. Dle přiložených výsledkových grafů lze pozorovat do určité míry příznivý vliv snižující se hmotnosti. Za nejideálnější průběh průhybu lze označit zelenou křivku M80% (hmotnost odpovídající nosníkovému průřezu).

Zajímavější vliv hmotnosti je patrný z grafu popisující vliv hmotnosti na svislé zrychlení průřezu. Se snižující hmotností zde roste odolnost průřezů v rychlostech nad 300km/h a naopak dochází k nárůstu hodnot zrychlení u rychlostí cca 250km/h.



Obrázek 6 - Průhyb dle změny hmotnosti



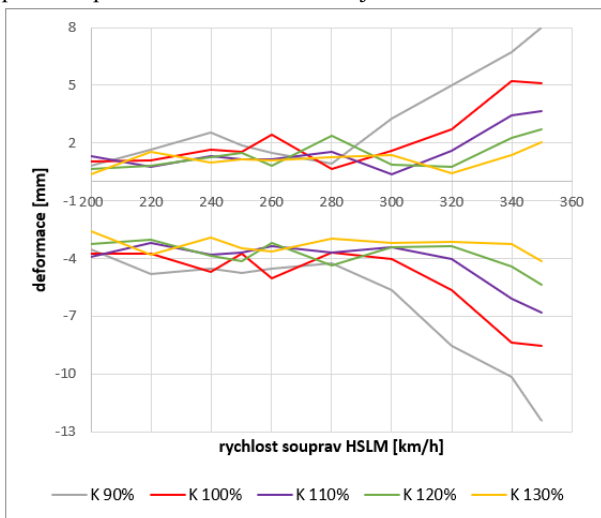
Obrázek 7 - Zrychlení dle změny hmotnosti

3.2. Změna tuhosti

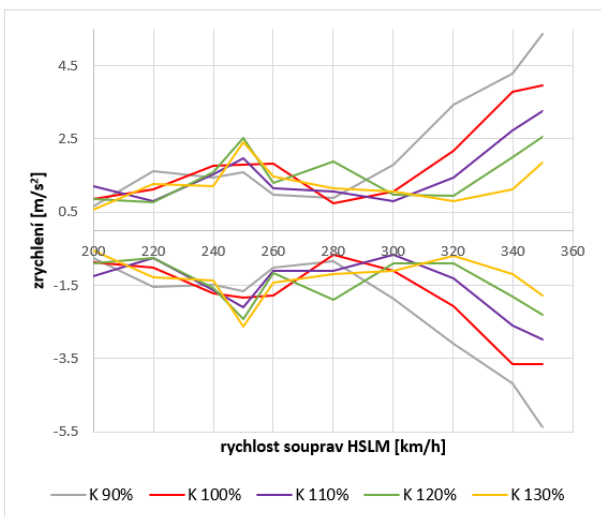
Druhý krok analýzy byl věnován vlivu tuhosti průřezu reprezentované změnou I_y , tedy postup úpravy geometrie. Úprava momentu setrvačnosti může představovat změnu výšky průřezu, nebo například úpravu geometrie, kdy je přesouvána hmota od středu průřezu k jeho krajům.

S rostoucí tuhostí roste hodnota vlastní frekvence kmitání. Z grafu průhybu je pak patrné, že s rostoucí tuhostí průřezu dochází ke zplošťování křivky průhybů, což se pozitivně projevuje zejména ve vyšších traťových rychlostech.

U grafu popisující vývoj zrychlení je vliv tuhosti více komplexní. V nižších traťových rychlostech se jako vhodnější jeví průřezy méně tuhé, které vykazují menší extrém v okolí rychlosti 250 km/h. Naopak se zvyšující se rychlostí je pozitivní přínos větší tuhosti znatelnější.



Obrázek 8 - Průhyb dle změny tuhosti

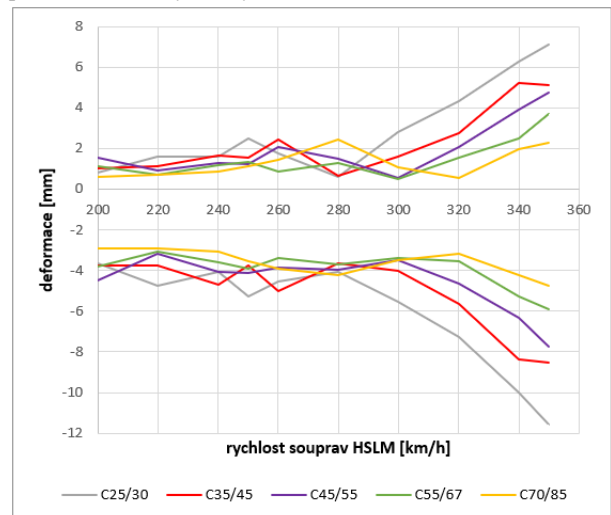


Obrázek 9 - Zrychlení dle změny tuhosti

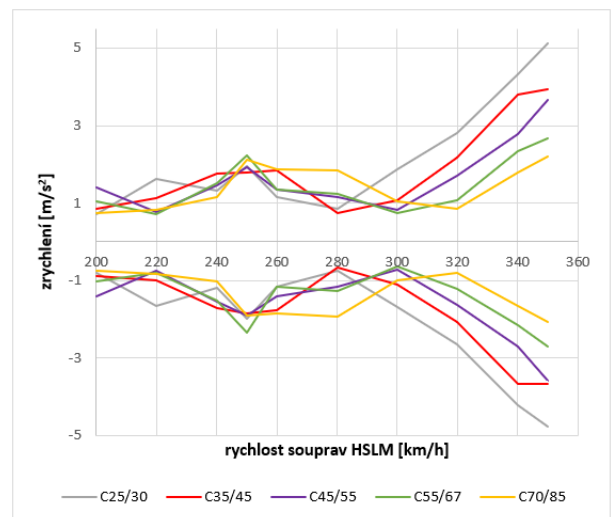
3.3. Změna modulu pružnosti

Závěrem byl zkoumán vliv použití kvalitnějších betonových směsí. Vyšší pevnostní třída se projevila zvyšováním tuhosti průřezu díky rostoucímu modulu pružnosti. Mezi další benefity se řadí větší odolnost proti vlivům prostředí. Naopak zápornou stránkou je nárůst ceny materiálu, zejména u konstrukcí kde není úspora materiálu hlavním cílem.

Zvýšení hodnoty modulu pružnosti má přímý vliv na tuhost a proto se grafy vyvíjí obdobným způsobem jako v předchozí kapitole. Využití pevnostní třídy C45/55 namísto C35/45 má přínos srovnatelný se zvýšením tuhosti o 10%.



Obrázek 10 - Průhyb dle změny modulu pružnosti



Obrázek 11 - Zryhčení dle změny modulu pružnosti

3.4. Shrnutí

Dle výše uvedených grafů se jako problematické jeví rychlostní spektra kolem 250 a 350 km/h. Pro další zkoumání by bylo vhodné rozšířit zkoumaný rozsah za hranici 350 km/h a tím lépe popsat trend v okolí této rychlosti.

Pro zkoumané rozpětí se jako vhodné jeví použití průřezů s vyšší tuhostí a menší hmotností v porovnání s představeným předpjatým dvourámem. Přínos kvalitnějších betonů je z hlediska dynamické odezvy znatelný, avšak zvyšování tuhosti průřezu lze docílit i vhodnou změnou geometrie.

4. ZÁVĚR

Mosty VRT jsou charakteristické svými masivními rozměry se značnou konstrukční výškou. Touto kombinací je bráněno účinkům dynamického zatížení, které vzniká při vysokých rychlostech vlakových souprav. Proto se vliv hmotnějších a tužších betonových průřezů spolu s vlídnější normovou hodnotou útlumu ukazuje jako pozitivní a vzniká tak prostor pro aplikaci betonu na VRT. Možnou překážkou této iniciativy je nedůvěra dotčených orgánů vůči technologii předjatého betonu.

Od původního záměru aplikace UHPC v rámci nosných prvků bylo s ohledem na závěrečnou část práce upuštěno. Materiál reprezentuje velkou odolnost vůči vlivům prostředí i vysokou hodnotu modulu pružnosti, avšak v kontextu značných rozměrů konstrukce je neekonomický.

Pro další postup budou aplikovány menší kroky v rychlostním rozpětí, pravděpodobně po 10km/h. Další nutnou úpravou je posunutí horního rychlostního spektra alespoň o 20%. Tímto bude prověřeno celé kritické spektrum rychlostí kolem 350km/h.

Hlavním cílem budoucího postupu je stanovení vhodné geometrie průřezu pro jednotlivé rozsahy rozpětí pole. Z dosavadních poznatků se pozitivní přínos masivních a těžkých průřezů s rostoucím rozpětím pole snižuje. Zkoumání vztahů mezi těmito veličinami v souvislosti se změnou rozpětí by mohlo být dalším krokem.

Jedním z důležitých aspektů pro budoucí postup je nalezení vhodného způsobu modelování kolejového lože. Zejména se jedná o vlastnosti kolejového lože spojené s útlumem.

Reference

ČSN EN 1990 ed. 2 (ČSN 73 0002): *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Ed. 2. Praha: ČNI, 2021.

ČSN EN 1991-2 ed. 2 (ČSN 73 6203): *Eurokód: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou*. Ed. 2. Praha: ČNI, 2018.

Manuál pro projektování VRT ve stupni DÚR. Praha, 2020.

VLASÁK, Martin a Filip KUTINA. *Technicko-Provozní studie - Technická řešení VRT: Subsystém INF - Mosty*. Praha, 2017.

DELGADO, Raimundo, Rui CALCADA a António CAMPOS E MATOS. *Bridges for high speed railways*. London, UK: Taylor and Francis Group, 2009. ISBN 978-0-415-47147-3.

DAI, gonglian, Miao SU a Y. Frank CHEN. Design and Construction of Simple Beam Bridges for High-Speed Rails in China: Standardization and Industrialization. In: *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* [online]. 2016, s. 274-282 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: doi:10.3846/bjrbe.2016.32