

CAMEA, spol. s r. o.
Karásek 2290/1m
621 00 Brno, CZE

Most Staré Hobzí ev. č. 152-077

**ZPRÁVA O PŘEPOČTU MOSTNÍ KONSTRUKCE NA
ÚČINKY DEFINOVANÉHO POHYBLIVÉHO ZATÍŽENÍ
A POROVNÁNÍ S MĚŘENÍMI IN SITU**

Brno, leden 2023

Zpracovali:.

Ing. Ondřej Januš, PhD.

Ing. Jakub Venclovský, PhD.

Prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc. Dr.h.c.

Prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc. Dr.h.c.

Jednatel společnosti

Obsah

1. Účel práce	4
2. Podklady	4
2.1. Statický výpočet	4
2.2. Měření konstrukce in-situ	4
3. Matematický model (MKP model)	4
3.1. Popis modelů	4
3.2. Porovnání modelů	7
3.3. Stav betonové konstrukce	11
4. Účinky pohyblivého zatížení	12
4.1. Vypočtené hodnoty deformace a přetvoření v měřených bodech	12
4.2. Výpočet rychlosti a zrychlení konstrukce v měřených bodech z matematického modelu ...	15
4.2.1. Aproximace vypočtených hodnot průhybu mostu v měřených bodech	15
4.2.2. Výpočet rychlosti deformace a zrychlení v daném místě ve svislém směru	19
4.3. Porovnání chování numerického modelu a reálné konstrukce při pojezdu vozidla	22
4.4. Některé úvahy o využitelnosti měření na základě matematického modelu mostní konstrukce	40
4.5. Některé úvahy o využitelnosti měření na základě matematického modelu mostní konstrukce	41
5. Závěr	45

1. Účel práce

Účelem provedených prací bylo vytvoření numerického modelu na základě statického výpočtu provedeného firmou Pris spol. s r. o. Numerický model sloužil pro stanovení napětí, přetvoření a deformace konstrukce. Numerický model sloužil také pro ověření stavu napětí při charakteristické kombinaci (ovlivnění tuhosti prvku vlivem vzniku ohybových trhlin). S použitím numerického modelu lze stanovit závislost deformace konstrukce na poloze projíždějícího vozidla. Následnou derivací této deformace je možné určit rychlost a zrychlení konstrukce ve svislém směru a tím ověřit a dále zpřesnit údaje dopočítané z reálného měření zrychlení pomocí akcelerometru provedeného firmou CAMEA, spol. s r. o. Při integraci je však nutné určit integrační konstantu (posunutí ve směru svislé osy), tj. alespoň pro jeden časový okamžik. Pro stanovení integrační konstanty slouží numerický model.

2. Podklady

2.1. Statický výpočet

Podkladem pro matematický model byl statický výpočet (stupeň DSP+ZDS/PDPS) provedený firmou Pris spol. s r.o. z listopadu 2015. V souladu se statickým výpočtem byla zadána geometrie matematického modelu, způsob podepření, dráha předpínacích lan a zatížení.

2.2. Měření konstrukce in-situ

Zpráva z měření/vyhodnocení:

- [1] CAMEA, spol. s r. o. – Shrnutí testů na lokalitě Staré Hobzí 15.10.2021

Data z měření:

- [2] Nezpracovaná data měření akcelerometry společně s výsledky jejich zpracování pro vozidla Blue Scania a White (předáno 26.9.2022)
[3] Nezpracovaná data měření akcelerometry společně s výsledky jejich zpracování pro vozidla Blue Iveco a Red (předáno 25.10.2022)
[4] Hmotnost vozidel Blue Scania a White včetně rozložení zatížení na jednotlivá kola (předáno 24.8.2022)
[5] Hmotnost vozidel Blue Iveco a Red včetně rozložení zatížení na jednotlivá kola (předáno 25.10.2022)

Na základě zprávy z měření zpracované firmou CAMEA, spol. s r. o. bylo v matematickém modelu definováno umístění a typ použitých snímačů. Zpracovaná data z měření akcelerometrů byla využita pro porovnání s chováním numerického modelu (deformace, rychlosti a zrychlení ve svislém směru). Využita byla rovněž měřená rychlost průjezdu vozidel. Data z měření akcelerometrem in-situ jsou značně ovlivněna šumem, který je pro daný typ snímače přirozenou vlastností. Data jsou při zpracování vhodně filtrována.

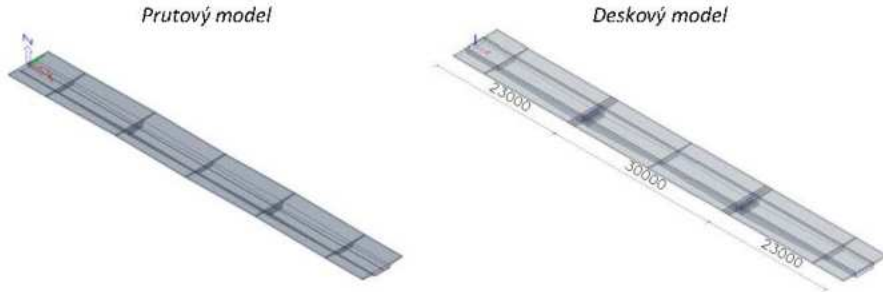
3. Matematický model (MKP model)

3.1. Popis modelů

Byly vytvořeny dva numerické modely mostu, jejichž chování bylo následně vzájemně porovnáno: a) prutový model, b) prostorový deskový model. U obou modelů je obloukový tvar konstrukce idealizován lineárním náběhem v podélném směru. Prutový model umožňoval přesně definovat tvar průřezů včetně všech náběhů průřezu (Obr. 3:). U deskového modelu byl z důvodu generace sítě

konečných prvků zjednodušen tvar průřezu (náběhy nosníku byly zjednodušeně nahrazeny průměrnou šířkou nosníku, Obr. 4:). Předpínací lana jsou v případě prutového modelu nahrazena předpínacím kabelem skládajícím se z osmi lan. U deskového modelu jsou lana modelována v jejich skutečných polohách (Obr. 5:). U obou modelů podélný tvar předpínacích lan respektuje projektovaný průběh.

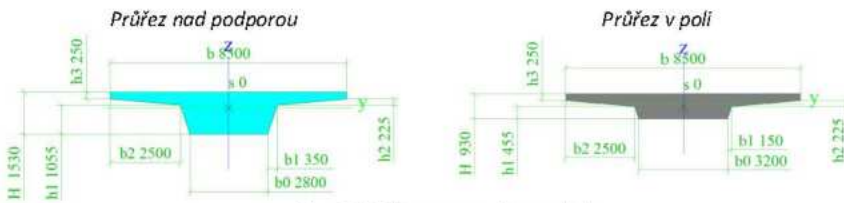
Okrajové podmínky obou modelů respektovaly skutečné uložení mostu na podporách.



Obr. 1: Axonometrie použitých modelů



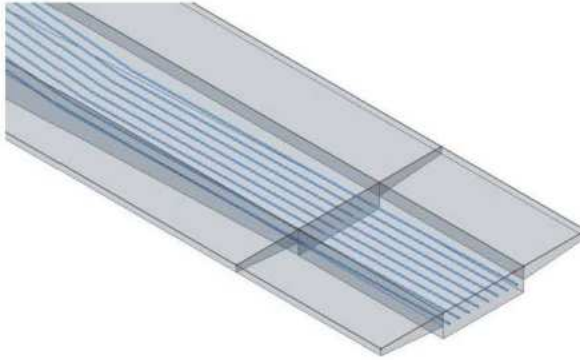
Obr. 2: Podélný řez deskovým modelem



Obr. 3: Průřezy prutového modelu



Obr. 4: Průřezy deskového modelu



Obr. 5: Předpínací lana deskového modelu

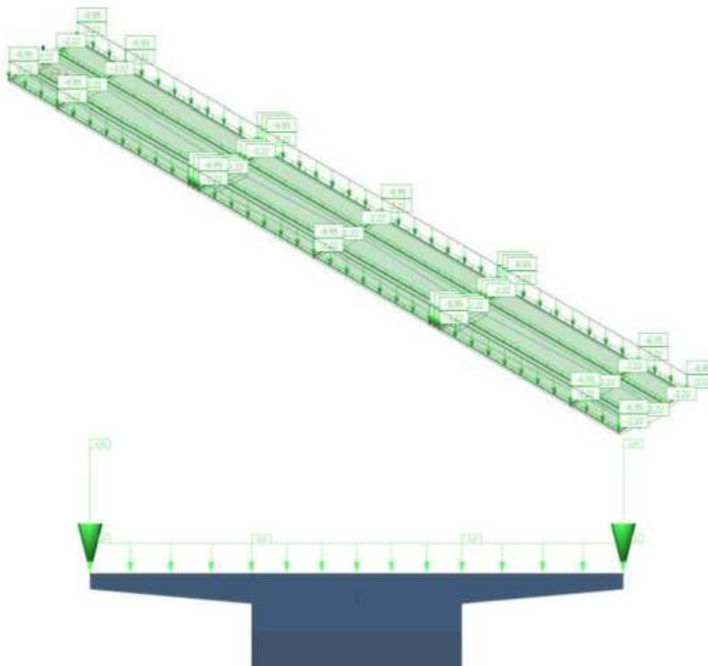
Zatížení bylo rozděleno do čtyř zatěžovacích stavů (pohyblivé zatížení je dále rozděleno na dílčí zatěžovací stavy dle polohy vozidla, viz dále). Vlastní tíha byla generována automaticky program dle zadaných průřezu a objemové hmotnosti materiálů. Uvažované zatěžovací stavy jsou

ZS1 – vlastní tíha (generováno automaticky)

ZS2 – předpětí

ZS3 – ostatní stálé zatížení

ZS4 až ZS182 – Pohyblivé zatížení dopravou

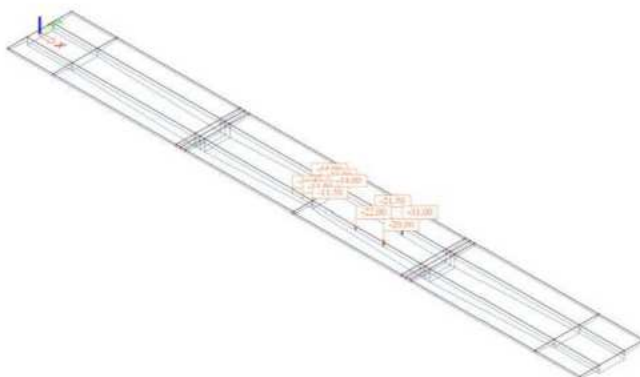


Obr. 6: Ostatní stálé zatížení deskového modelu

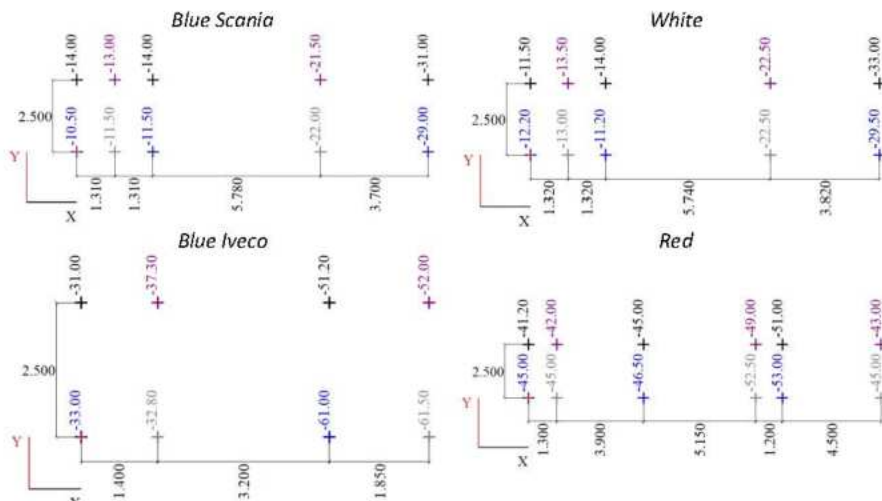
Pohyblivé zatížení dopravou bylo uvažováno v obou použitých modelech.

U prutového modelu bylo použito idealizované zatížení, které působí v těžišťové ose mostovky¹ (nebyla uvažována skutečná poloha působícího zatížení vzhledem k ose mostu; dále nebylo uvažováno nerovnoměrné zatížení kol náprav, které bylo získáno vážením vozidel).

U deskového modelu byly definovány dva dopravní pruhy (směr Slavonice i směr Staré Hobzí) včetně přesného rozložení zatížení na jednotlivá kola, Obr. 8: . Zatížení dopravou se pohybovalo v definovaných pruzích v kroku 1 metr, Obr. 7: .



Obr. 7: Jedna z poloh pohyblivého zatížení na deskovém modelu (Blue Scania)



Obr. 8: Zatížení pohyblivým zatížením – rozdělení zatížení na jednotlivá kola

3.2. Porovnání modelů

Chování prutového a deskového modelu bylo následně porovnáno; bylo provedeno srovnání normálového napětí na horních i spodních vlákních (betonového) průřezu a deformace konstrukce,

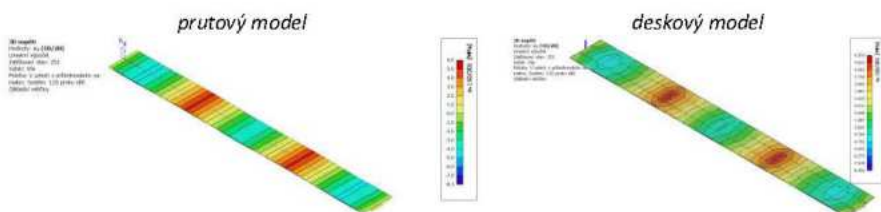
¹ Tj. v podélné ose mostu

Tab. 1. Průběh napětí a deformace konstrukce jsou pro oba modely zobrazeny na Obr. 9: až Obr. 17: . Oba použité modely vykazují velmi dobrou shodu.

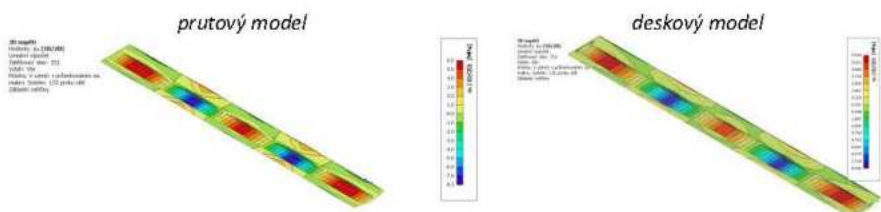
Pro další vyhodnocení je tak použit pouze deskový model.

Tab. 1: Porovnání prutového a deskového modelu

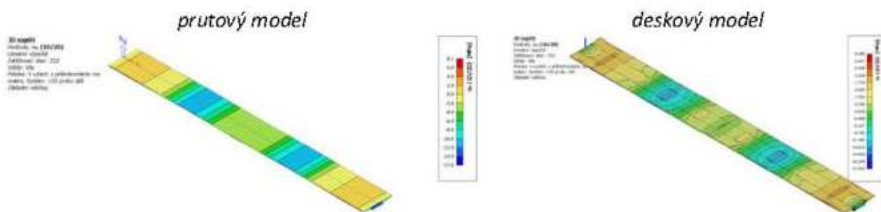
porovnávaná veličina	prutový m.	deskový m.	rozdíl
ZS 1 σ_{\max} [MPa]	6,5	6,6	2%
ZS 1 σ_{\min} [MPa]	8,3	8,5	2%
ZS 2 σ_{\max} [MPa]	8,1	8,3	2%
ZS 2 σ_{\min} [MPa]	17,6	17,9	2%
ZS 3 σ_{\max} [MPa]	1,6	1,6	0%
ZS 3 σ_{\min} [MPa]	1,9	1,9	0%
ZS 1 u_{tot} [mm]	11,1	11,3	2%
ZS 2 u_{tot} [mm]	22,4	21,5	4%
ZS 3 u_{tot} [mm]	2,6	2,9	10%



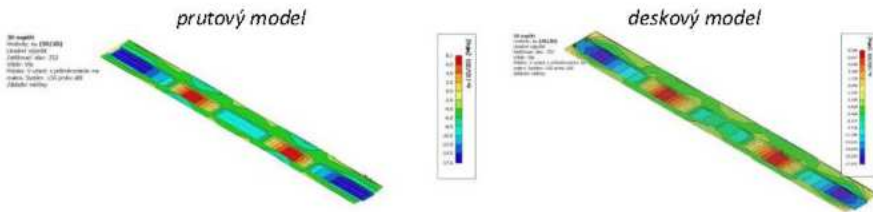
Obr. 9: ZS 1 – normálové napětí – horní povrch



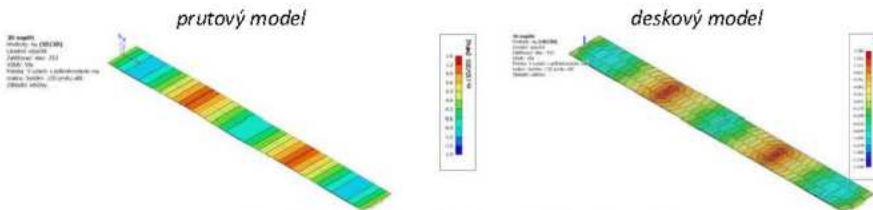
Obr. 10: ZS 1 – normálové napětí – spodní povrch



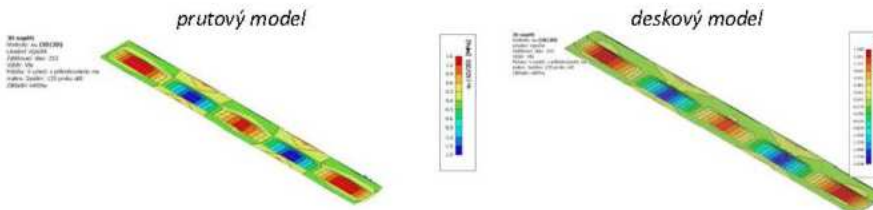
Obr. 11: ZS 2 – normálové napětí – horní povrch



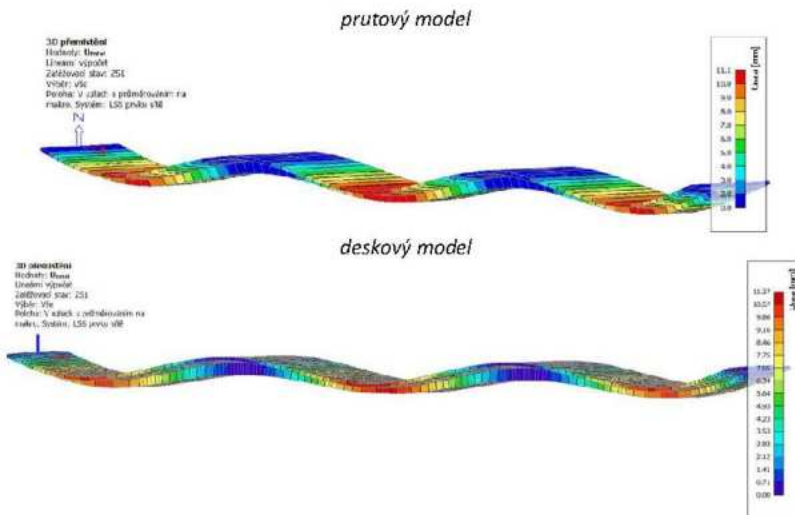
Obr. 12: ZS 2 – normálové napětí – spodní povrch



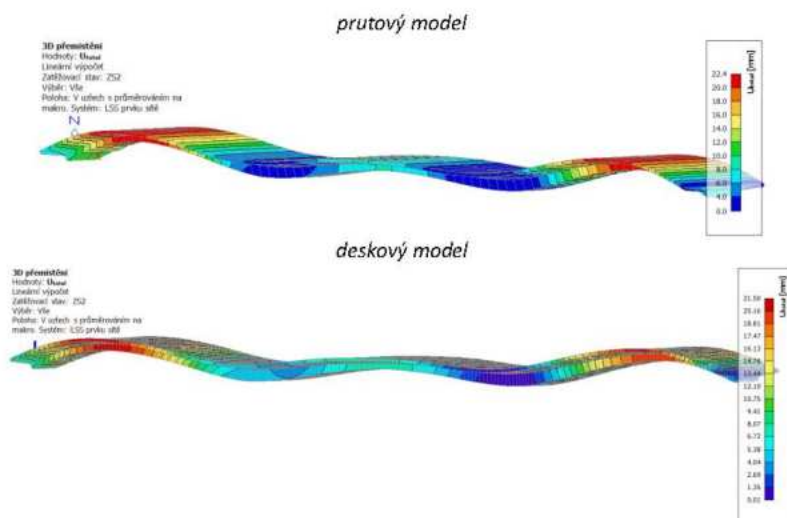
Obr. 13: ZS 3 – normálové napětí – horní povrch



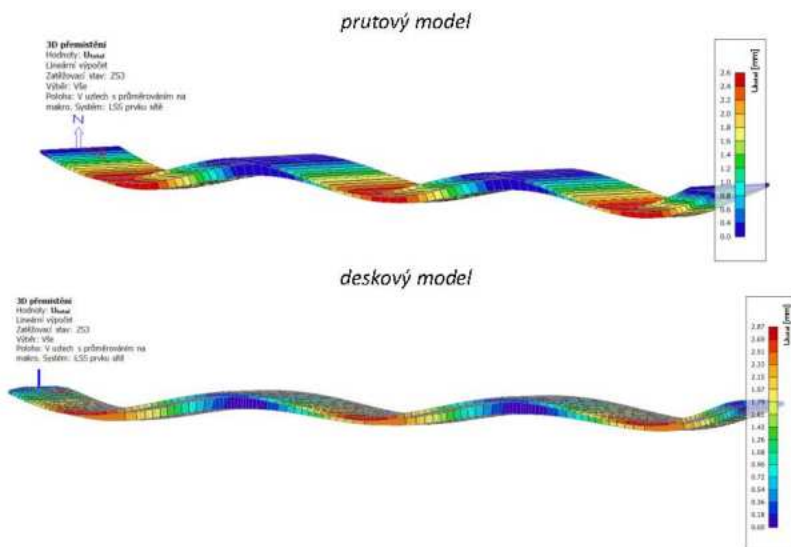
Obr. 14: ZS 3 – normálové napětí – spodní povrch



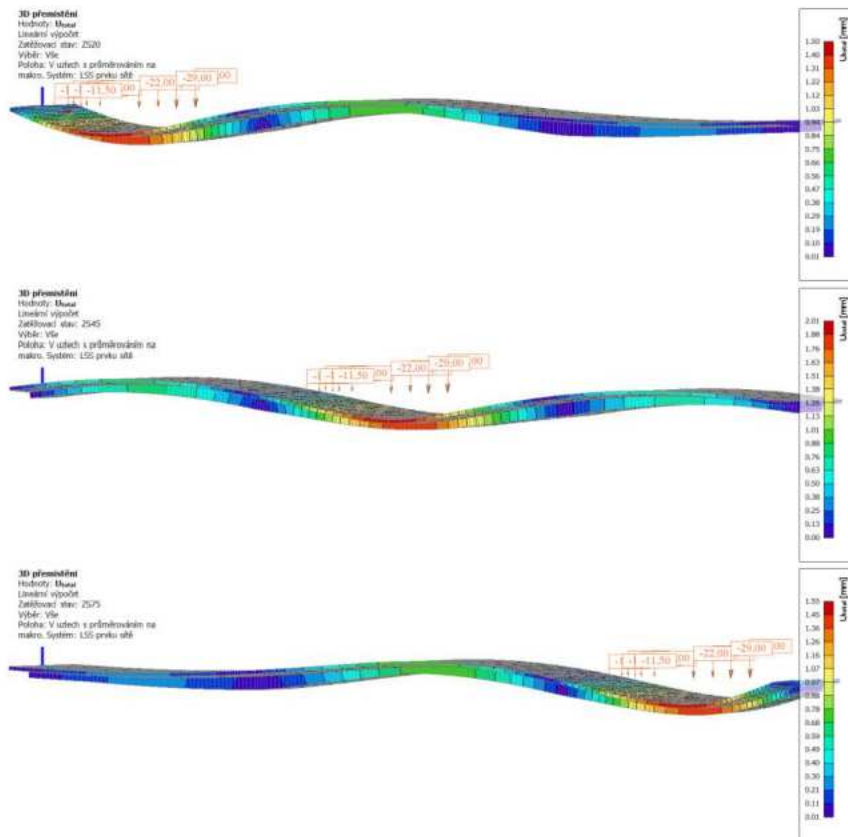
Obr. 15: ZS 1 – přemístění



Obr. 16: ZS 2 – přemístění



Obr. 17: ZS 3 – přemístění



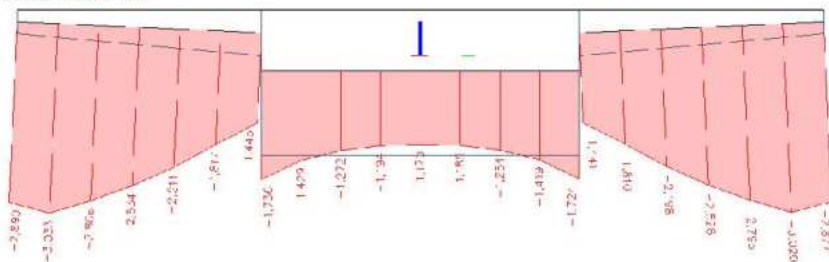
Obr. 18: Pohyblivé zatížení – přemístění pro tři různé polohy pohyblivého zatížení

3.3. Stav betonové konstrukce

Na deskovém modelu byla vytvořena charakteristická kombinace zatížení pro mezní stav použitelnosti. Bylo prokázáno, že se i při charakteristické kombinaci (včetně pohyblivého zatížení) celý průřez nachází v tláčené oblasti (normálové napětí $-1,17$ MPa na spodních vláknech, Obr. 19:) po celé délce konstrukce. Z tohoto důvodu se neočekává snížení tuhosti vlivem vzniku ohybových trhlin a je oprávněné předpokládat lineární chování konstrukce (použití lineárního výpočtu).

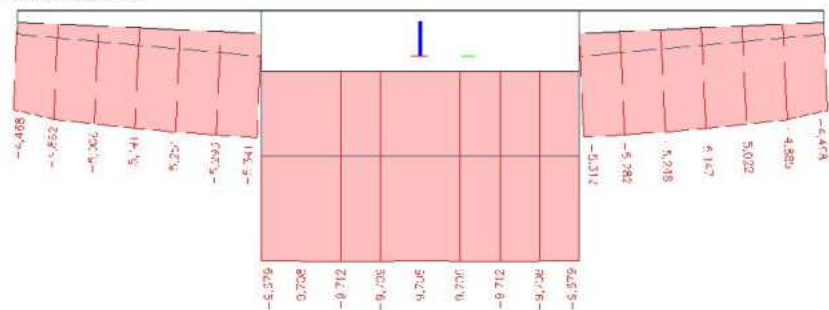
spodní vlákna

2D napětí/přetvoření
 Hodnoty: σ_x
 Lineární výpočet
 Kombinace: MSP-Char (auto)
 Extrém: 52
 Věže: SE6
 Poloha: V uzlech s průměrováním na makro. System: LSS prvku sítě



horní vlákna

2D napětí/přetvoření
 Hodnoty: σ_x
 Lineární výpočet
 Kombinace: MSP-Char (auto)
 Extrém: 52
 Věže: SF6
 Poloha: V uzlech s průměrováním na makro. System: LSS prvku sítě



Obr. 19: Napětí od charakteristické kombinace (včetně pohyblivého zatížení) v nejexponovanějších řezech konstrukce

4. Účinky pohyblivého zatížení

Vzhledem k dobré shodě obou numerických modelů byl v dalším vyhodnocení použit pouze prostorový deskový model, který umožňuje zohlednit reálnou polohu a zatížení jednotlivých kol pojíždějících vozidel včetně přiřazení jízdních pruhů.

4.1. Vypočtené hodnoty deformace a přetvoření v měřených bodech

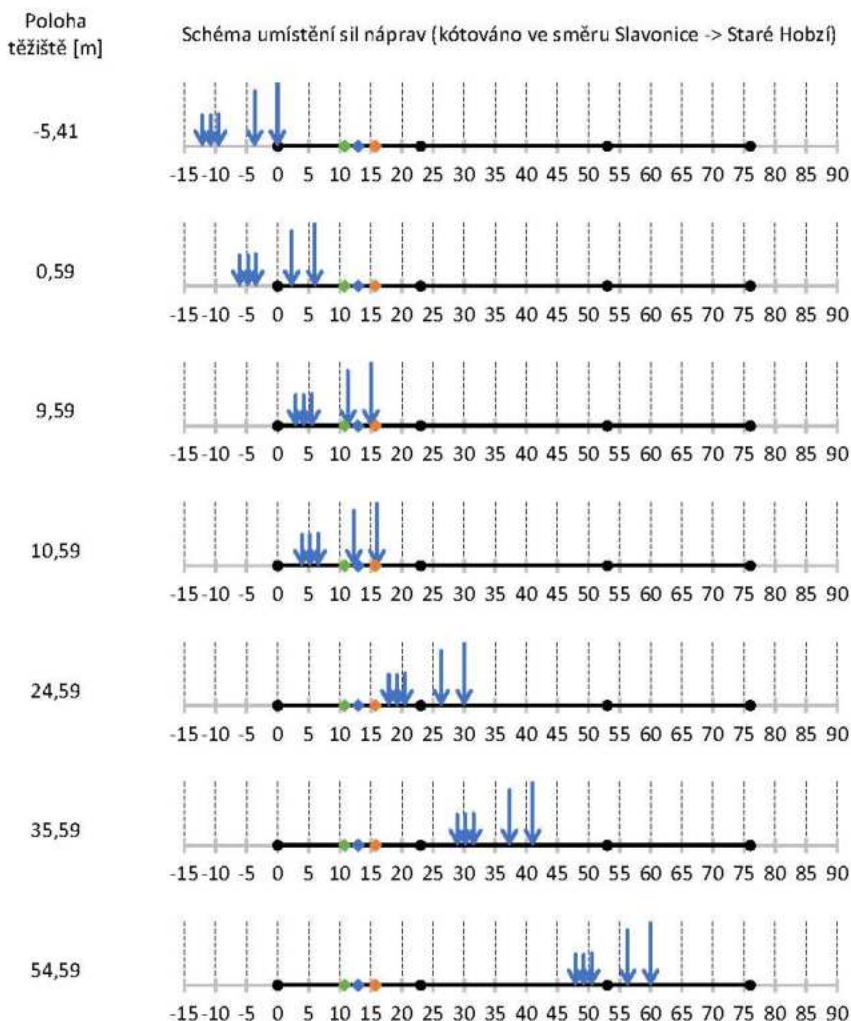
V místech konstrukce, kde byly při zkoušce in-situ umístěny snímače, byly v numerickém modelu odečítány hodnoty přetvoření a deformace (průhybu konstrukce). Jedná se o tři polohy v prvním poli ve směru od Slavonic (označení Řez I – 13,26m od začátku mostovky; Řez II – 15,76m; Řez III – 10,76m). Při reálném měření odpovídalo měření akcelerometry řezu III. Na Obr. 21: až Obr. 24: je

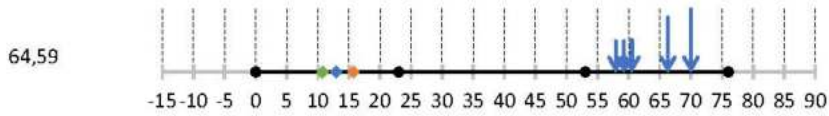
vynesena závislost přetvoření spodního povrchu a svislé deformace ve všech monitorovaných bodech na poloze vozidla Blue Scania.

Poloha vozidla je vynášena ve dvou různých variantách:

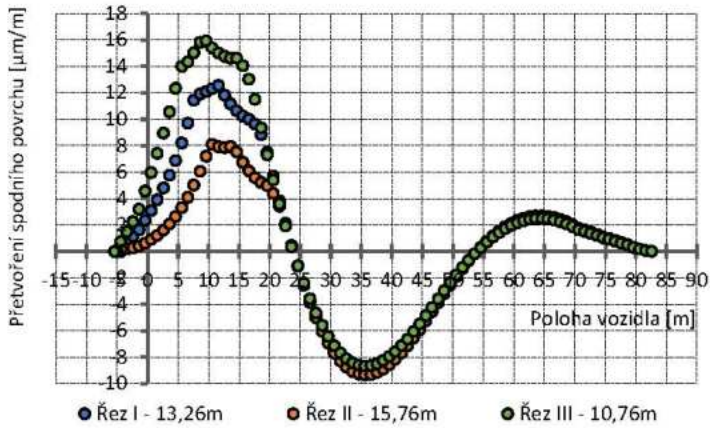
- pro polohu první nápravy (nulová poloha = umístění první nápravy na počátek mostu),
- pro polohu těžiště (nulová poloha = umístění těžiště vozidla na počátek mostu (nápravy před těžištěm jsou v nulové poloze již přítomny na mostu).

Při dalším vyhodnocení je použita především varianta b) (vynášení v závislosti na poloze těžiště vozidla). Schématicky je pojezd vozidla Blue Scania pouze ve vybraných polohách zobrazen na Obr. 20: včetně znázornění podpor a umístění snímačů.

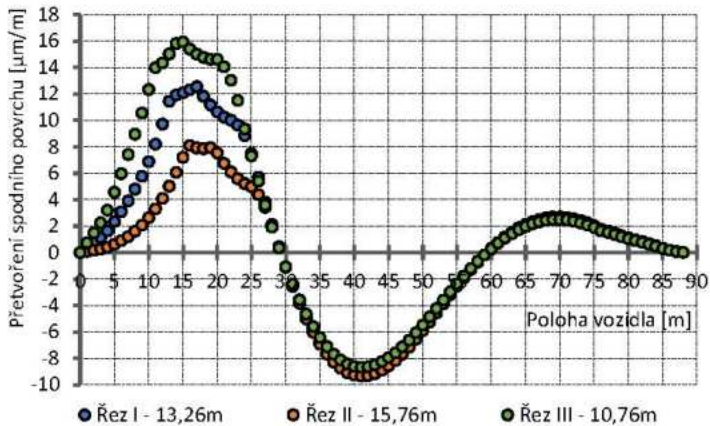




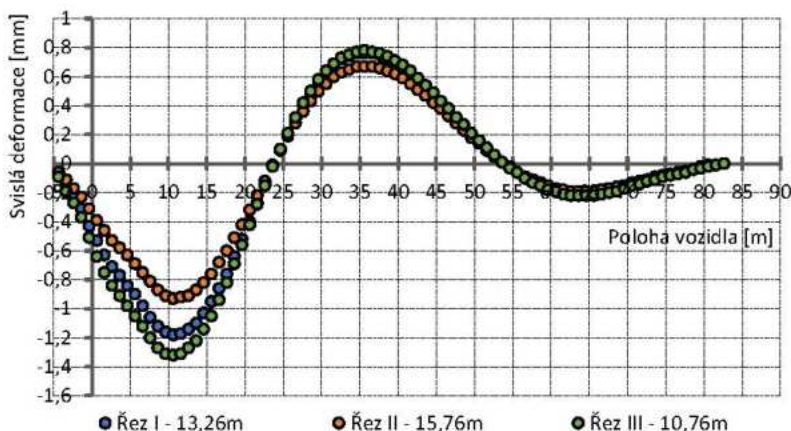
Obr. 20: Schématické znázornění pojezdu vozidla Blue Scania ve směru Slavonice -> Staré Hobzí



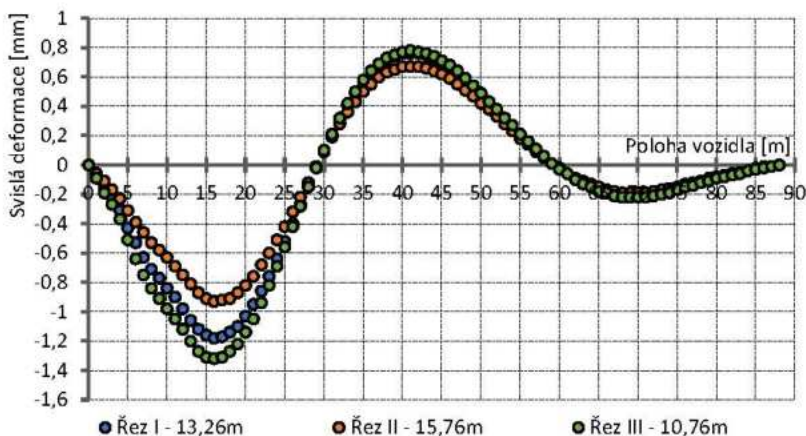
Obr. 21: Závislost poměrného přetvoření spodního povrchu prvního pole na poloze těžiště vozidla; vozidlo Blue Scania



Obr. 22: Závislost poměrného přetvoření spodního povrchu prvního pole na poloze vozidla (první nápravy); vozidlo Blue Scania



Obr. 23: Závislost svislé deformace prvního pole na poloze těžiště vozidla; vozidlo Blue Scania



Obr. 24: Závislost svislé deformace prvního pole na poloze vozidla (první nápravy); vozidlo Blue Scania

4.2. Výpočet rychlosti a zrychlení konstrukce v měřených bodech z matematického modelu

4.2.1. Aproximace vypočtených hodnot průhybu mostu v měřených bodech

Vzhledem k tomu, že pro výpočty byl použit statický, časově nezávislý, model, nelze z výsledků výpočtů přímo stanovit hodnoty rychlosti posunutí (průhybu) a zrychlení.

Pro potřeby porovnání s reálným měřením je pro danou závislost zatěžování (= rychlost vozidla) možné z přemístění stanovit derivací rychlost konstrukce a následnou derivací rychlosti také zrychlení

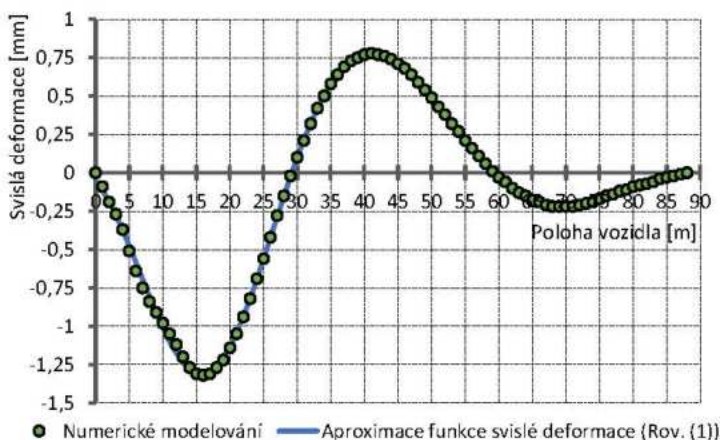
v měřených bodech. Pro výpočet derivací byla závislost svislé deformace v řezu III (odpovídá poloze osazených akcelerometrů) na poloze vozidla nahrazena funkcí (rov. (1)). Následně byla provedena kalibrace parametrů funkce pro všechny vozidla, viz Tab. 2. Vliv pojezdu vozidel je proveden pro směr pojezdu ve směru od Slavonic do Starého Hobzí.

$$y = \frac{a_2x^2 + a_1x + a_0}{b_2x^2 + b_1x + b_0} \sin(c(x - x_0)) + y_0 \quad (1)$$

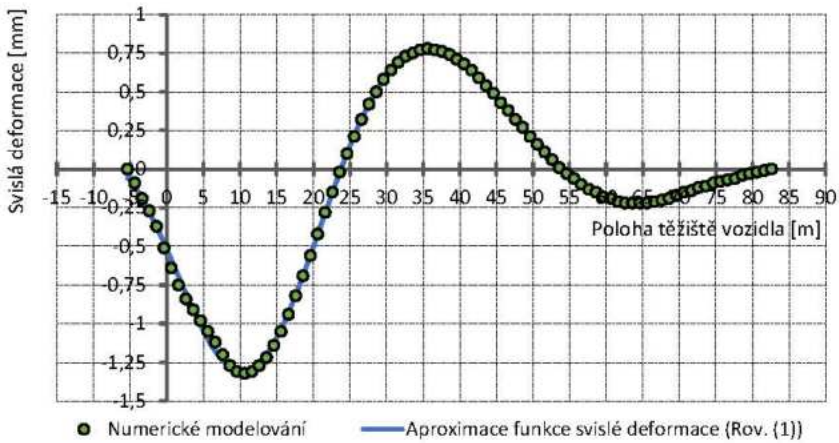
Tab. 2: Kalibrace funkce pro svislou deformaci

Param.	Blue Scania	White	Blue Iveco	Red
a_2	-4,238E-02	2,000E-03	6,979E-03	-4,104E-05
a_1	3,257E+00	-1,592E-01	-7,845E-01	3,310E-03
a_0	-6,166E+00	-5,905E+00	-6,382E-01	3,933E-02
b_2	-3,817E-02	8,094E-03	8,102E-03	-2,702E-05
b_1	1,138E+00	-2,630E-01	-5,037E-02	1,043E-03
b_0	-3,432E+01	7,970E+00	2,137E+00	-3,332E-02
c	-8,297E-02	1,059E-01	1,092E-01	1,006E-01
x_0	-4,794E+01	-3,187E-01	-2,795E+00	1,098E+00
y_0	-1,848E-01	1,252E-02	9,318E-02	-1,038E-01

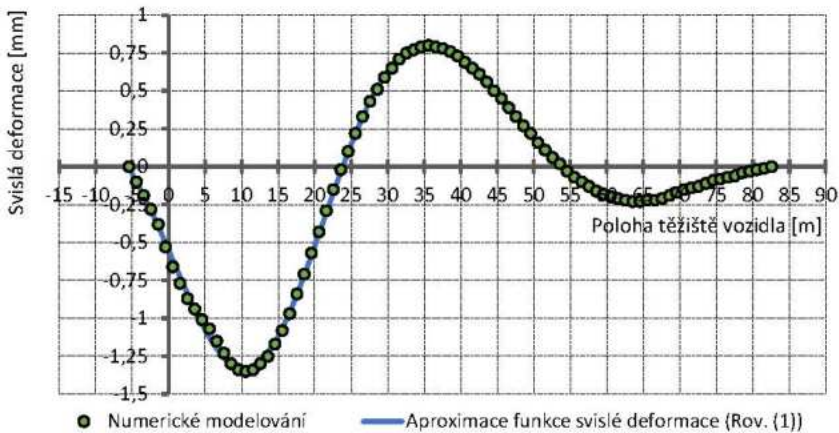
Na Obr. 25: a Obr. 26: je znázorněno porovnání mezi diskrétními hodnotami z numerického modelu a aproximované funkce vozidla Blue Scania pro polohu první nápravy resp. těžiště vozidla. Na Obr. 27: až Obr. 29: je následně zobrazeno porovnání pro zbylá tři vozidla v závislosti na poloze těžiště vozidla. Aproximované funkce vykazují velmi dobrou shodu s numerickým modelem pro všechna uvažovaná vozidla.



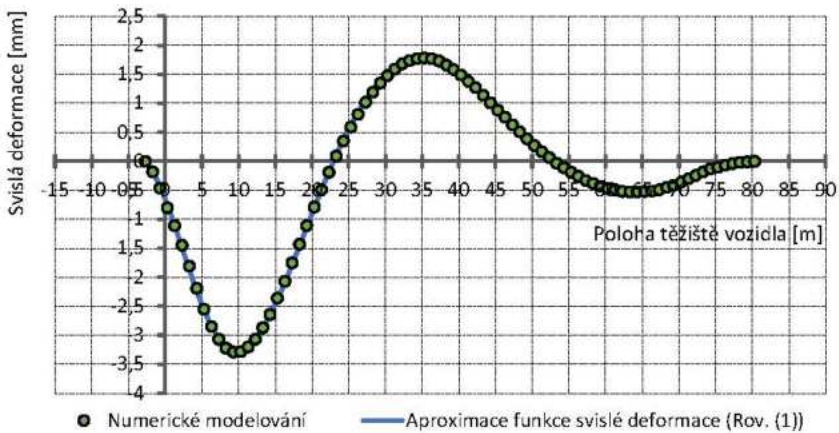
Obr. 25: Porovnání diskrétních hodnot svislé deformace z numerického modelu a aproximované funkce pro pojezd kamionu Blue Scania v závislosti na poloze první nápravy



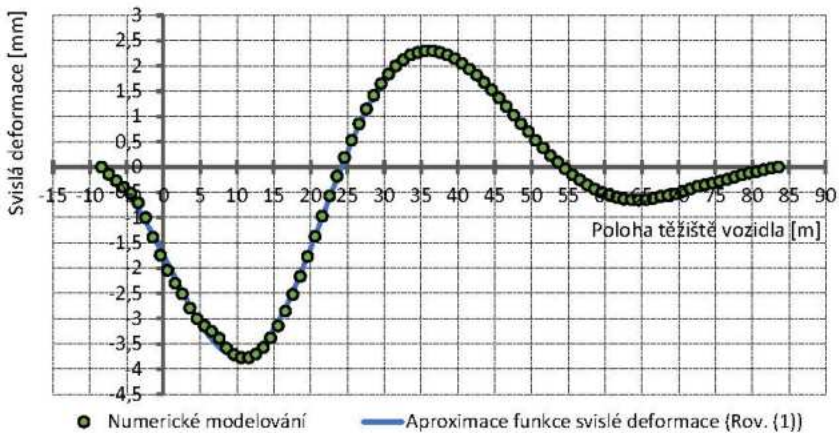
Obr. 26: Porovnání diskrétních hodnot svislé deformace z numerického modelu a aproximované funkce pro pojezd kamionu Blue Scania v závislosti na poloze těžiště vozidla



Obr. 27: Porovnání diskrétních hodnot svislé deformace z numerického modelu a aproximované funkce pro pojezd kamionu White v závislosti na poloze těžiště vozidla

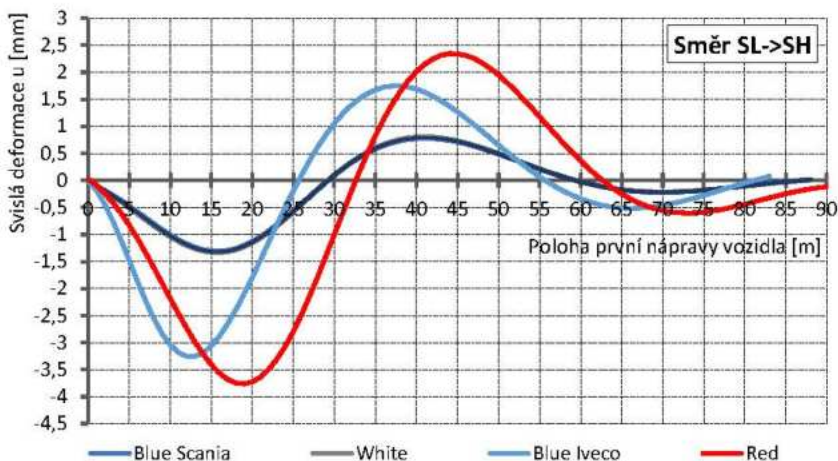


Obr. 28: Porovnání diskrétních hodnot svislé deformace z numerického modelu a aproximované funkce pro pojezd kamionu Blue Iveco v závislosti na poloze těžiště vozidla

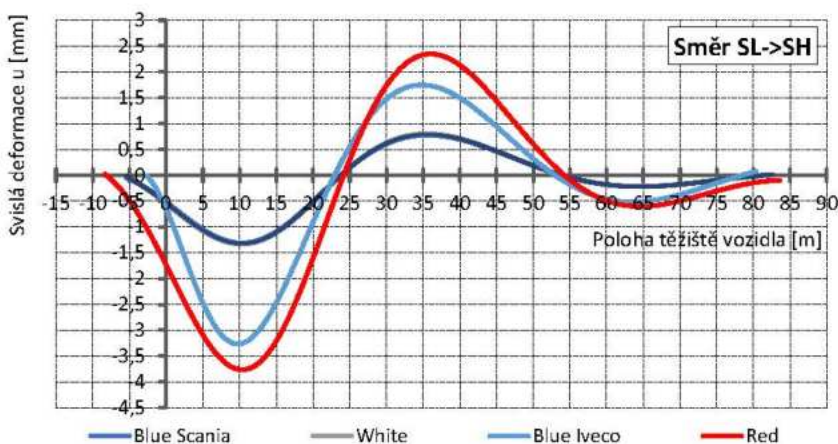


Obr. 29: Porovnání diskrétních hodnot svislé deformace z numerického modelu a aproximované funkce pro pojezd kamionu Red v závislosti na poloze těžiště vozidla

Na Obr. 30: a Obr. 31: je provedeno porovnání aproximovaných funkcí pro všechna uvažovaná vozidla. Patrný je vliv rozměrů, a především hmotnosti vozidel, na deformaci konstrukce.



Obr. 30: Kalibrováné funkce svislé deformace v závislosti na poloze první nápravy – porovnání vozidel



Obr. 31: Kalibrováné funkce svislé deformace v závislosti na poloze těžiště – porovnání vozidel

4.2.2. Výpočet rychlosti deformace² a zrychlení v daném místě ve svislém směru

Aproximované funkce byly následně derivovány pro zjištění rychlosti změny průhybu (Obr. 32: a Obr. 33:) a zrychlení (Obr. 34: a Obr. 35:) pro zvolenou rychlost pojezdu vozidla 73 km/h (20,28 m/s). Položí-li se

$$\begin{aligned}
 A &= a_2x^2 + a_1x + a_0, & A' &= 2a_2x + a_1, & A'' &= 2a_2, \\
 B &= b_2x^2 + b_1x + b_0, & B' &= 2b_2x + b_1, & B'' &= 2b_2, \\
 C &= c(x - x_0), & & & &
 \end{aligned} \quad (2)$$

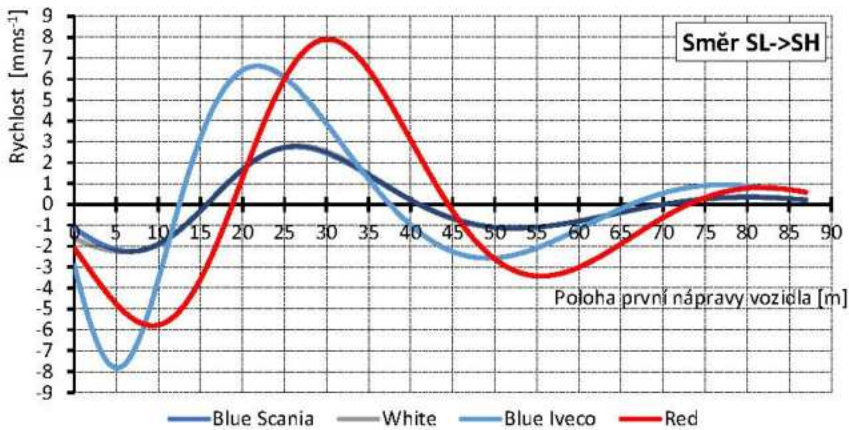
² Jedná se o rychlost změny průhybu (= rychlost deformace), resp. o zrychlení konstrukce ve svislém směru

původní funkci deformace (1) lze nyní vyjádřit jako $y = \frac{A}{B} \sin C + y_0$ a rychlost změny průhybu y' [mm s^{-1}] lze spočítat jako derivaci této funkce y podle času t , který je součástí polohy vozidla x jako $x = vt$, kde v [m s^{-1}] je rychlost pojezdu vozidla. Platí (rozlišovat malé c a velké C)

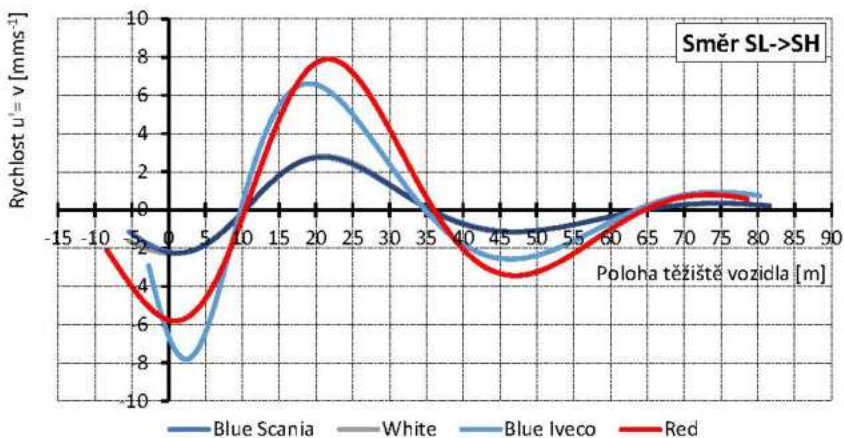
$$y' = \frac{dy}{dt} = \frac{dy dx}{dx dt} = \left(\frac{A'B - B'A}{B^2} \sin C + \frac{A}{B} c \cos C \right) v. \quad (3)$$

Podobně zrychlení změny průhybu y'' [mm s^{-2}] lze spočítat jako

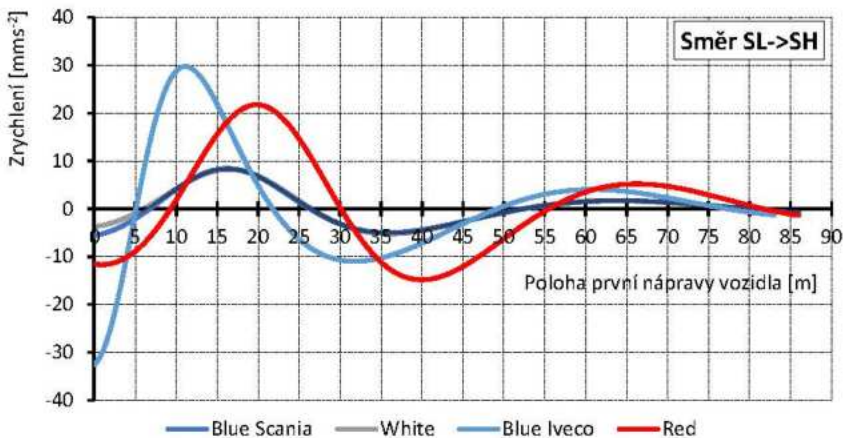
$$y'' = \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{dy'}{dt} = \frac{dy' dx}{dx dt} = \left(\frac{(A''B - B''A)B - 2(A'B - B'A)B'}{B^3} \sin C + 2 \frac{A'B - B'A}{B^2} c \cos C - \frac{A}{B} c^2 \sin C \right) v^2. \quad (4)$$



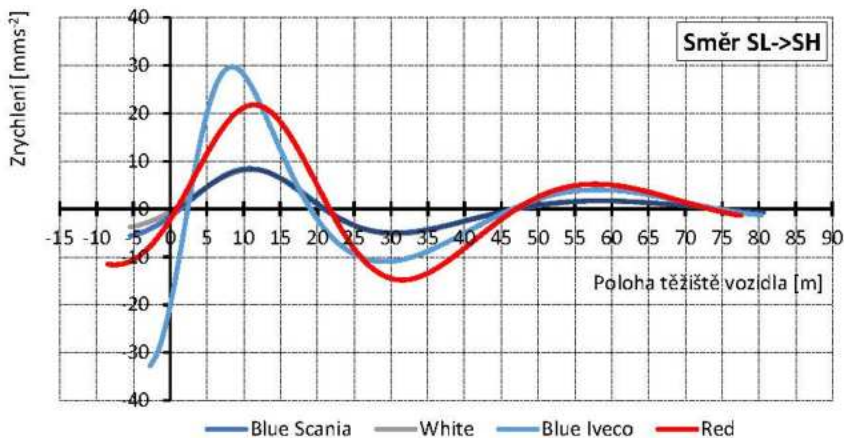
Obr. 32: Rychlost (první derivace) deformace v závislosti na poloze první nápravy pro rychlost pojezdu 73 km/h – porovnání vozidel



Obr. 33: Rychlost (první derivace) deformace v závislosti na poloze těžiště pro rychlost pojezdu 73 km/h – porovnání vozidel



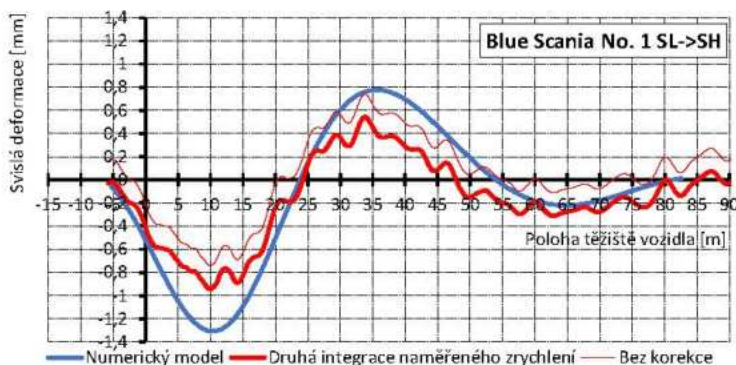
Obr. 34: Zrychlení (druhá derivace deformace) v závislosti na poloze první nápravy pro rychlost pojezdu 73 km/h – porovnání vozidel



Obr. 35: Zrychlení (druhá derivace deformace) v závislosti na poloze těžiště pro rychlost jezdce 73 km/h – porovnání vozidel

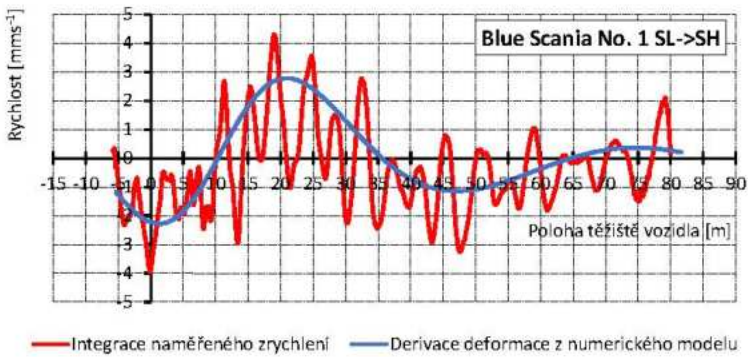
4.3. Porovnání chování numerického modelu a reálné konstrukce při jezdce vozidla

Pro vybrané jezdce vozidel bylo provedeno porovnání s výsledky numerického modelu. V případě prvního měření (vozidla Blue Scania a White) byla data vyhodnocena na základě měření dat pomocí akcelerometru Acc2. V případě druhého měření (vozidla Blue Iveco a Red) byla použita data z měření akcelerometru Acc1 a Acc3³. Byla provedena korekce dat (posunutí ve svislém a vodorovném směru) – umístění počátku měření do okamžiku vjezdu vozidla na konstrukci.

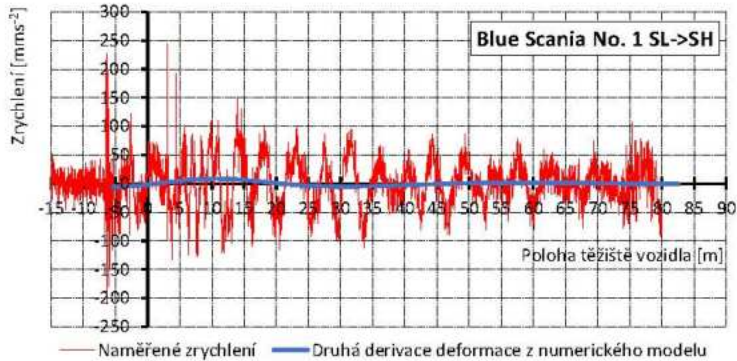


Obr. 36: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na jezdce vozidla – Blue Scania No. 1 – řez 10,76m

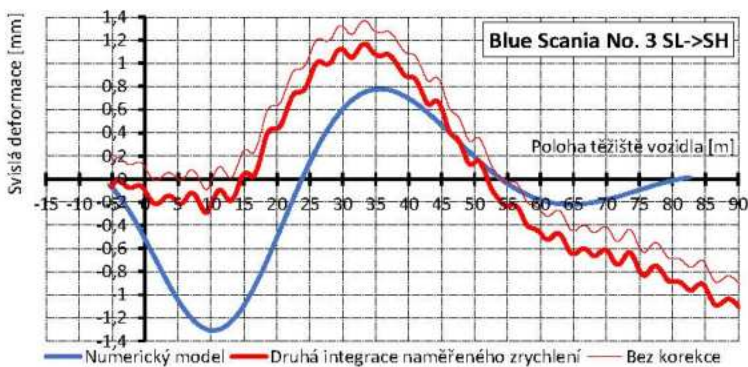
³ U vozidla Blue Iveco nejsou k dispozici zpracovaná data pro Acc3, použít pouze Acc1.



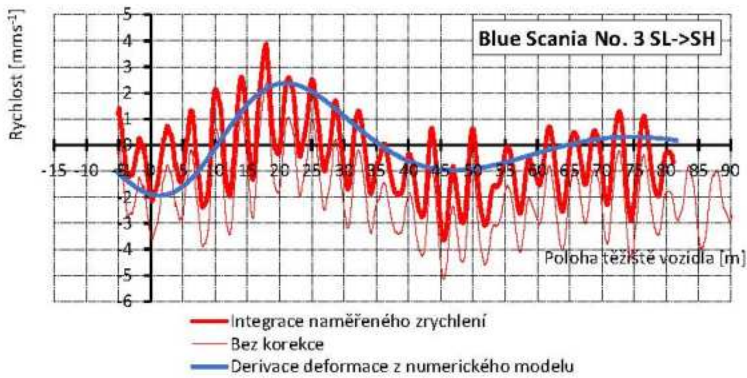
Obr. 37: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Scania No. 1 – řez 10,76m



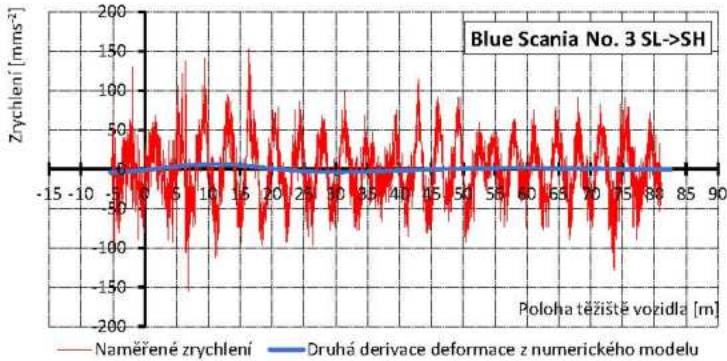
Obr. 38: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Scania No. 1 – řez 10,76m



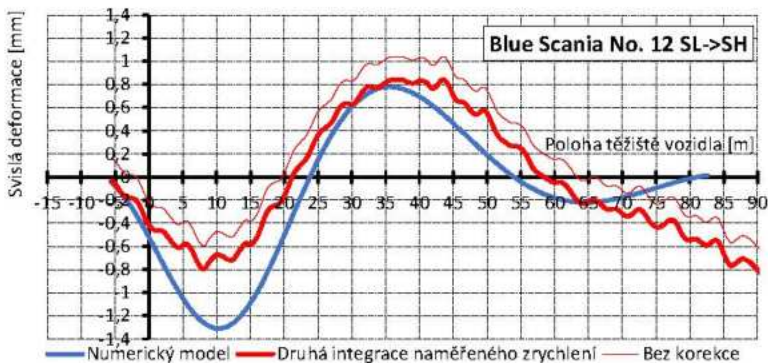
Obr. 39: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – Blue Scania No. 3 – řez 10,76m



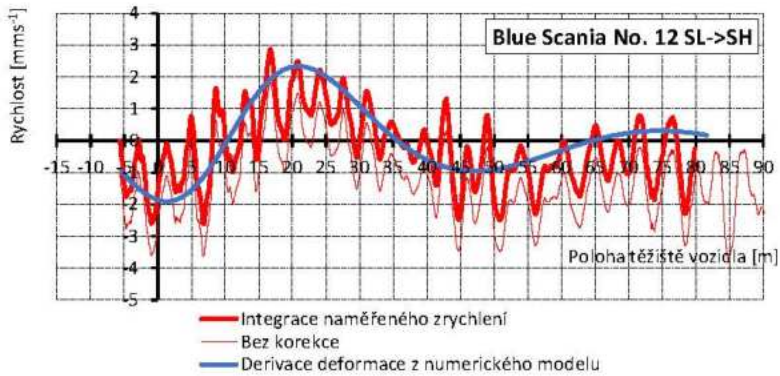
Obr. 40: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Scania No. 3 – řez 10,76m



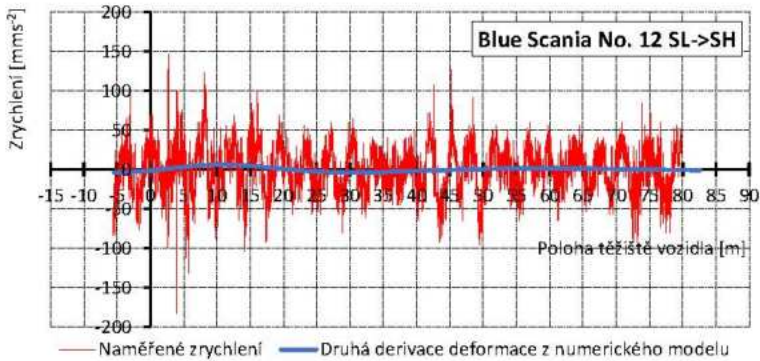
Obr. 41: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Scania No. 3 – řez 10,76m



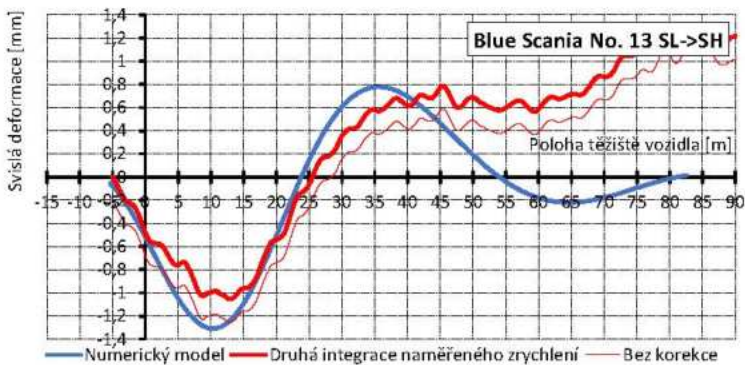
Obr. 42: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – Blue Scania No. 12 – řez 10,76m



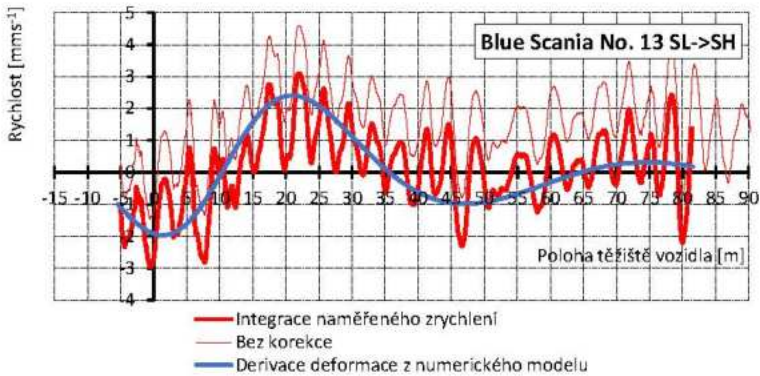
Obr. 43: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Scania No. 12 – řez 10,76m



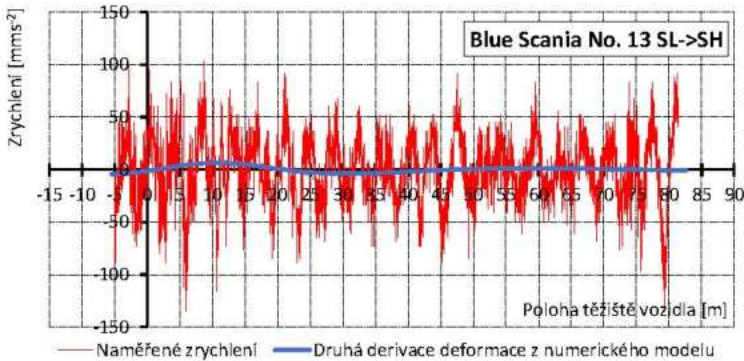
Obr. 44: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Scania No. 12 – řez 10,76m



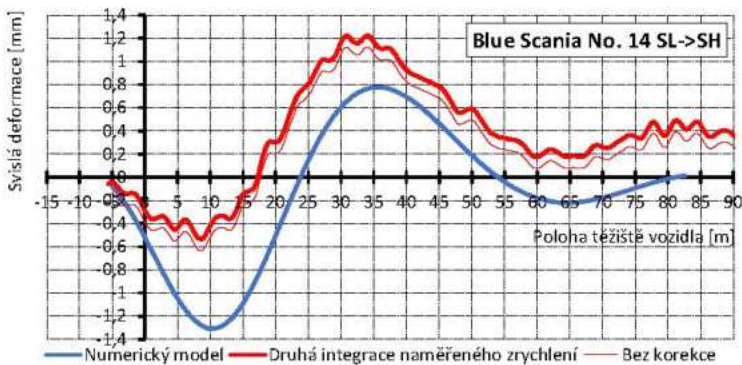
Obr. 45: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – Blue Scania No. 13 – řez 10,76m



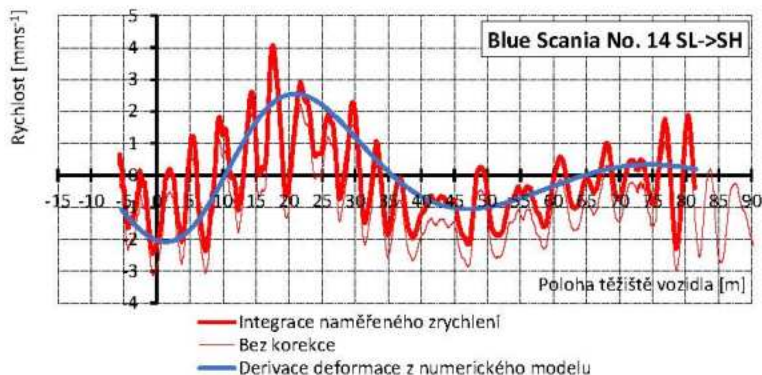
Obr. 46: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Scania No. 13 – řez 10,76m



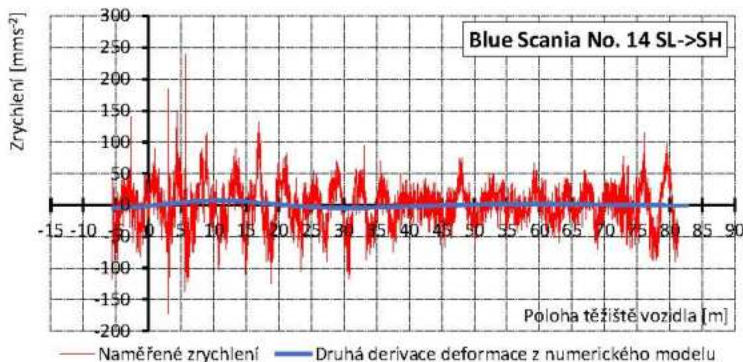
Obr. 47: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Scania No. 13 – řez 10,76m



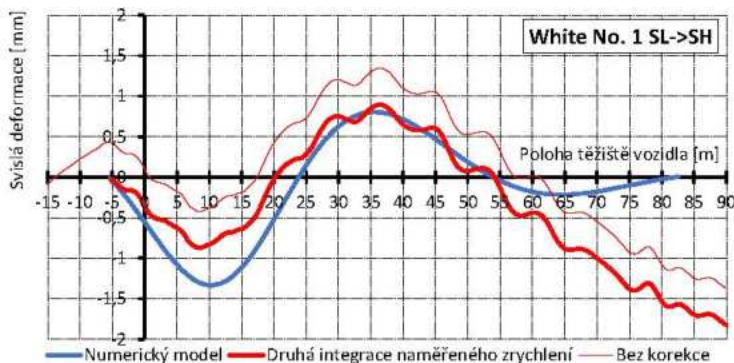
Obr. 48: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – Blue Scania No. 14 – řez 10,76m



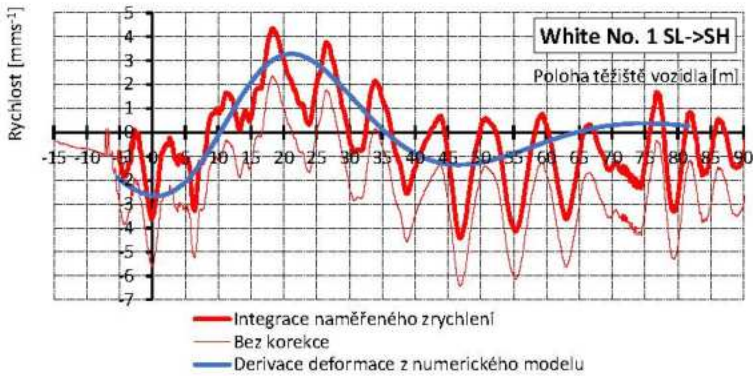
Obr. 49: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Scania No. 14 – řez 10,76m



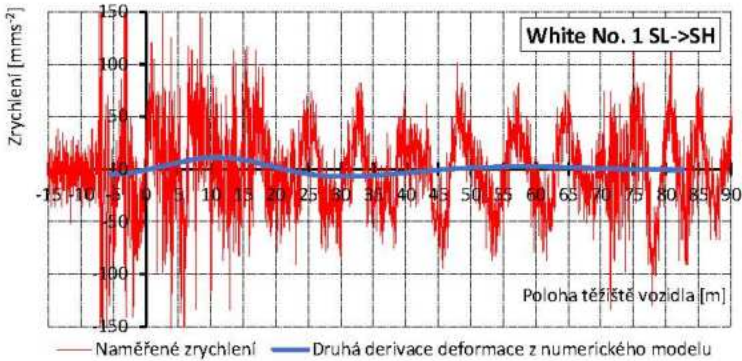
Obr. 50: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Scania No. 14 – řez 10,76m



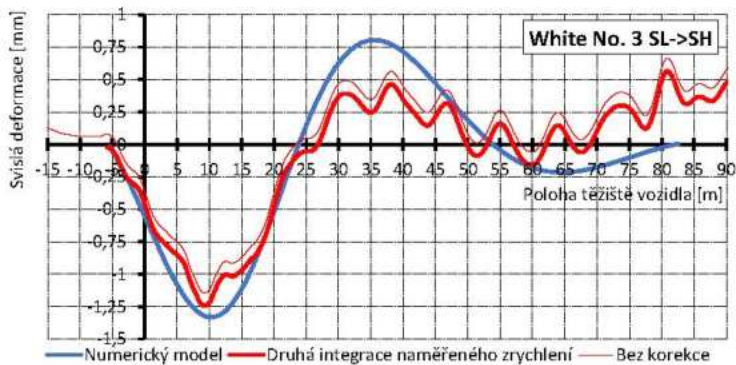
Obr. 51: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – White No. 1 – řez 10,76m



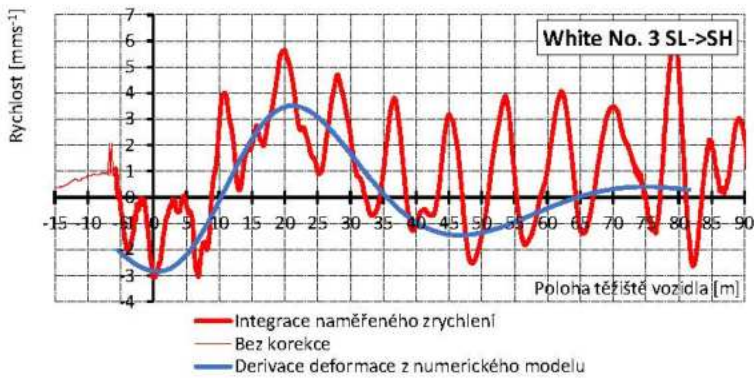
Obr. 52: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – White No. 1 – řez 10,76m



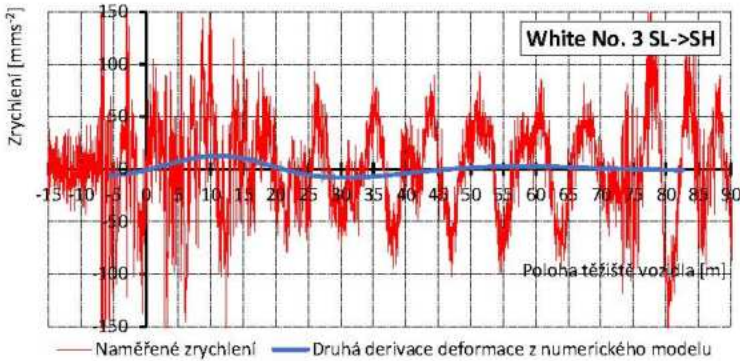
Obr. 53: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – White No. 1 – řez 10,76m



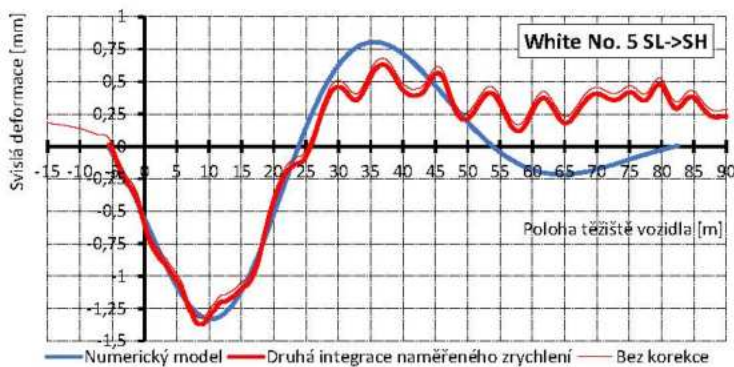
Obr. 54: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – White No. 3 – řez 10,76m



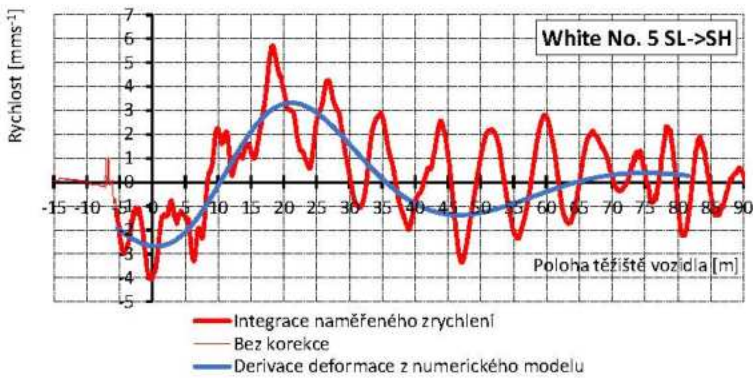
Obr. 55: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – White No. 3 – řez 10,76m



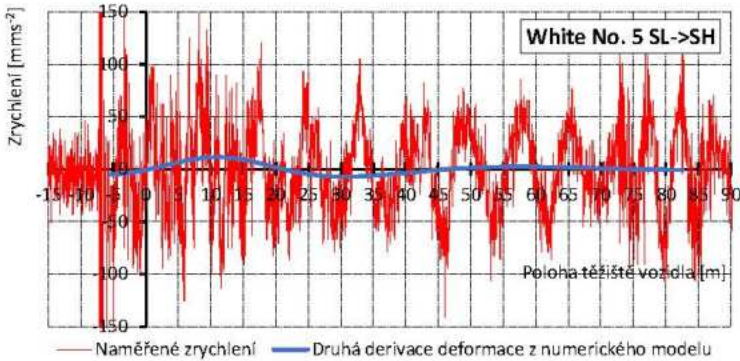
Obr. 56: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – White No. 3 – řez 10,76m



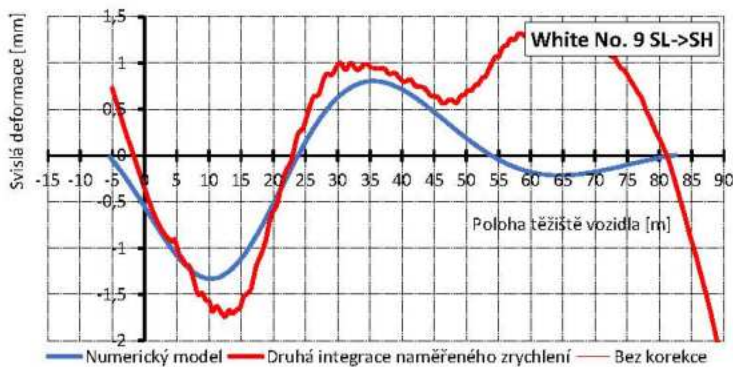
Obr. 57: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – White No. 5 – řez 10,76m



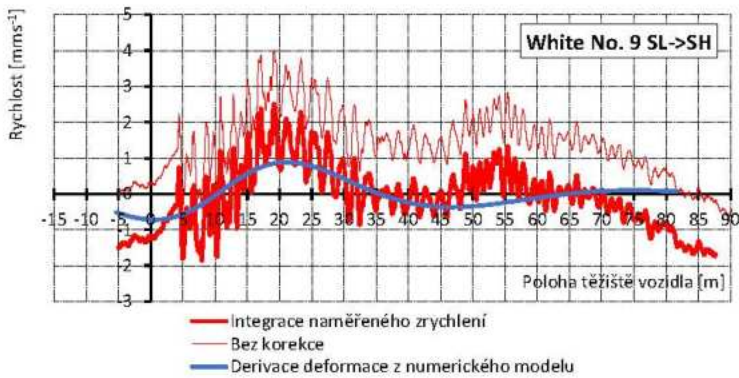
Obr. 58: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – White No. 5 – řez 10,76m



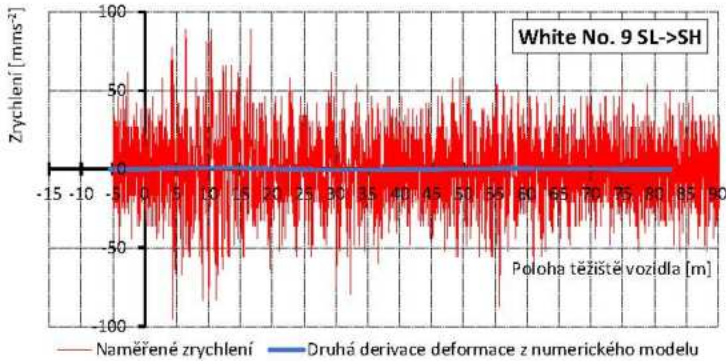
Obr. 59: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – White No. 5 – řez 10,76m



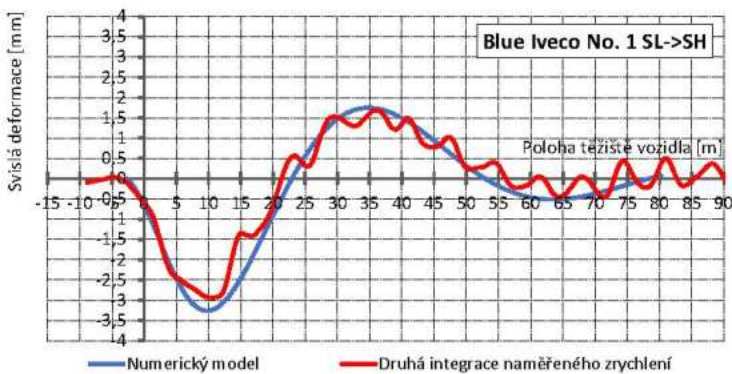
Obr. 60: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – White No. 9 – řez 10,76m



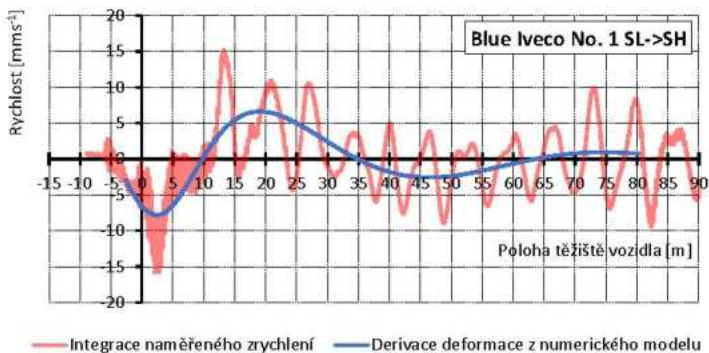
Obr. 61: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – White No. 9 – řez 10,76m



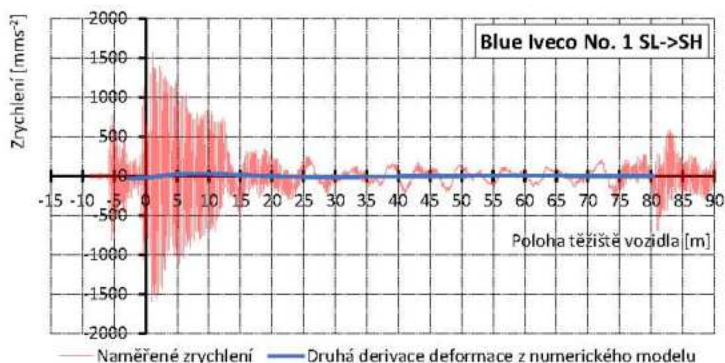
Obr. 62: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – White No. 9 – řez 10,76m



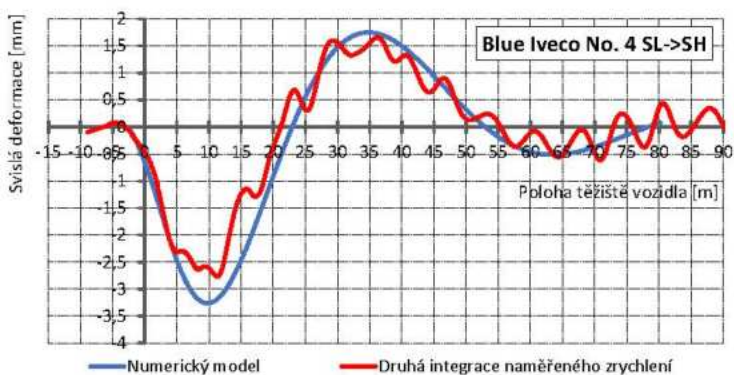
Obr. 63: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – Blue Iveco No. 1 – řez 10,76m



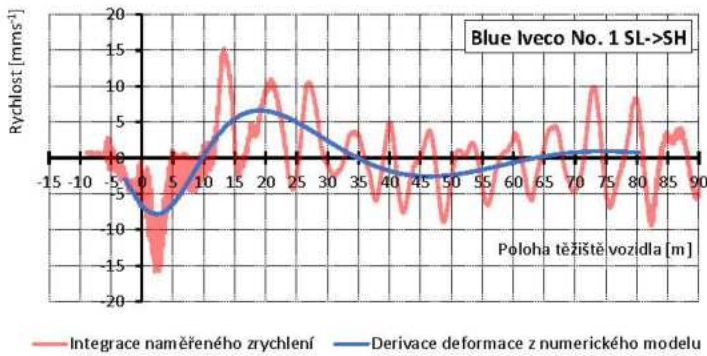
Obr. 64: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Iveco No. 1 – řez 10,76m



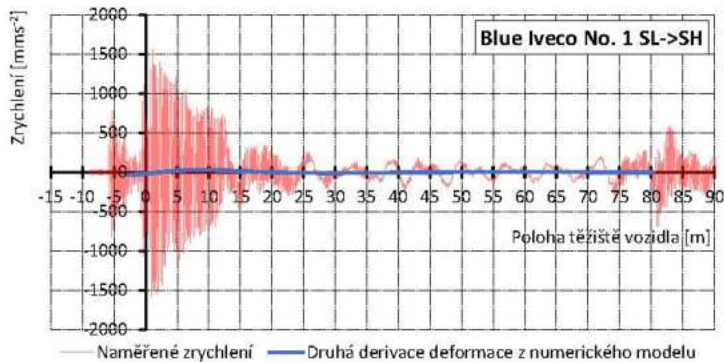
Obr. 65: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Iveco No. 1 – řez 10,76m



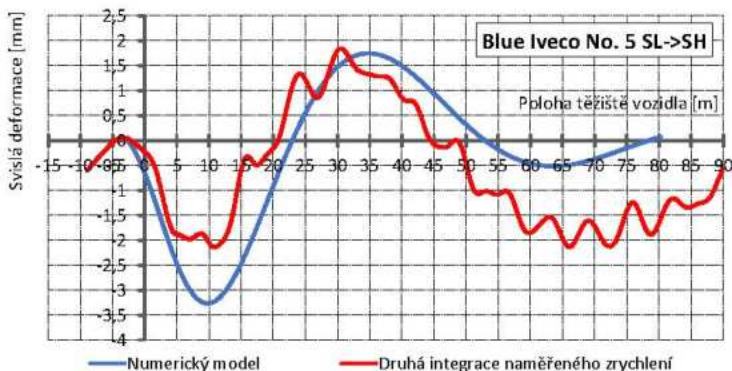
Obr. 66: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – Blue Iveco No. 4 – řez 10,76m



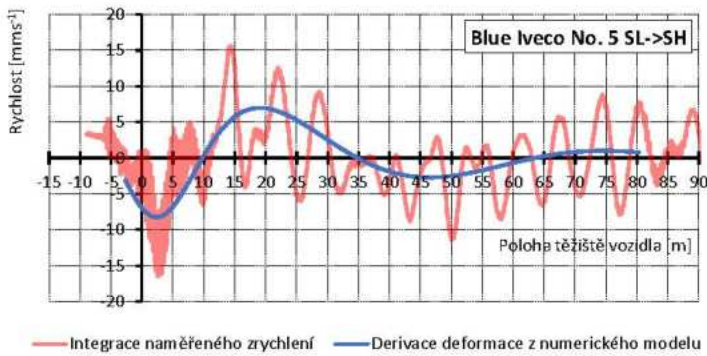
Obr. 67: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Iveco No. 4 – řez 10,76m



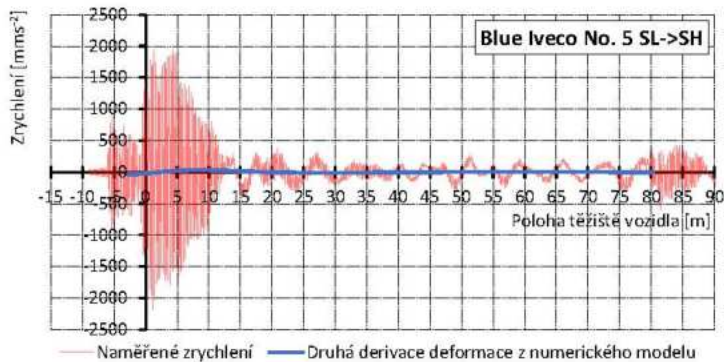
Obr. 68: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Iveco No. 4 – řez 10,76m



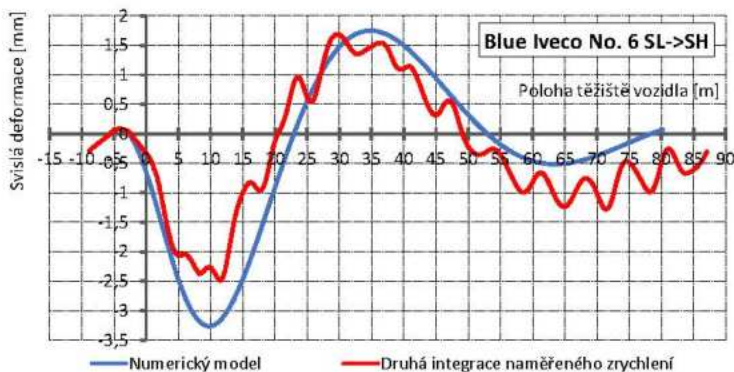
Obr. 69: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – Blue Iveco No. 5 – řez 10,76m



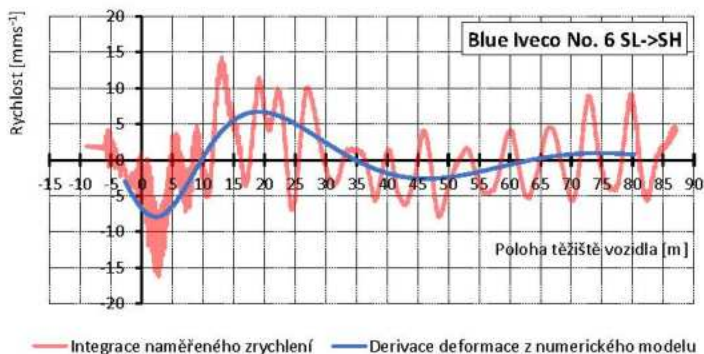
Obr. 70: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Iveco No. 5 – řez 10,76m



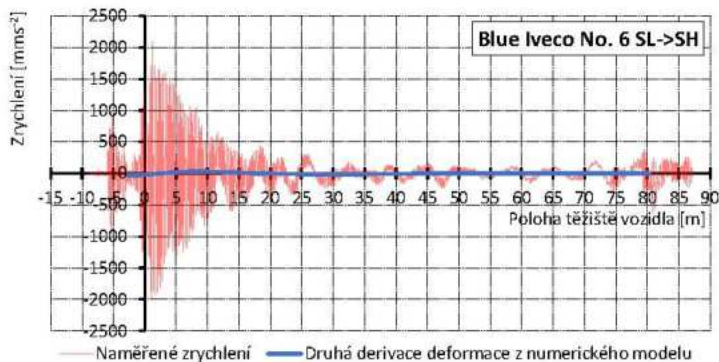
Obr. 71: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Iveco No. 5 – řez 10,76m



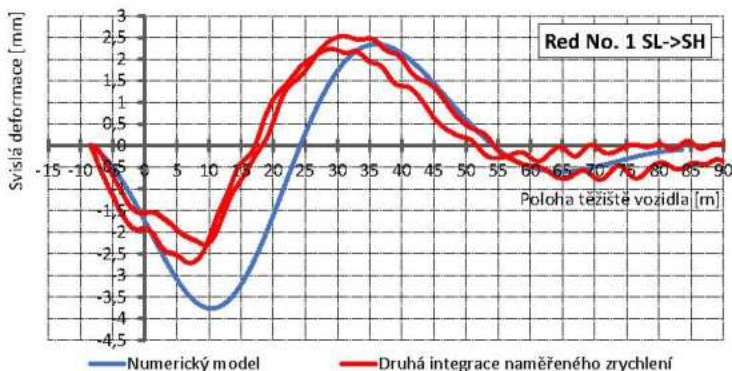
Obr. 72: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – Blue Iveco No. 6 – řez 10,76m



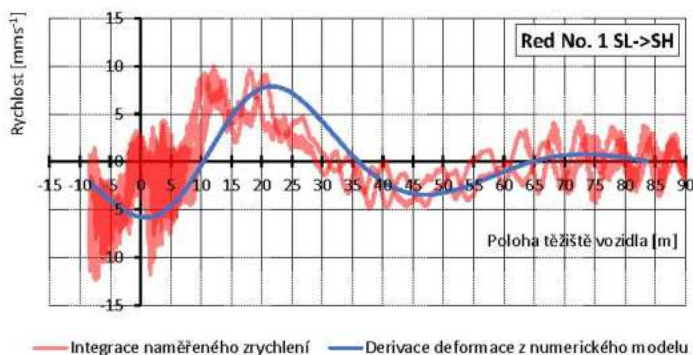
Obr. 73: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Iveco No. 6 – řez 10,76m



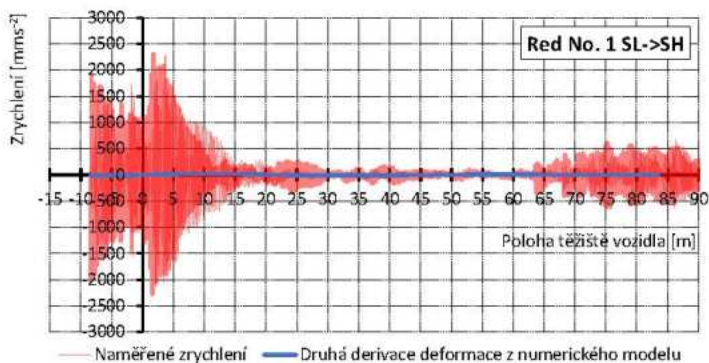
Obr. 74: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Blue Iveco No. 6 – řez 10,76m



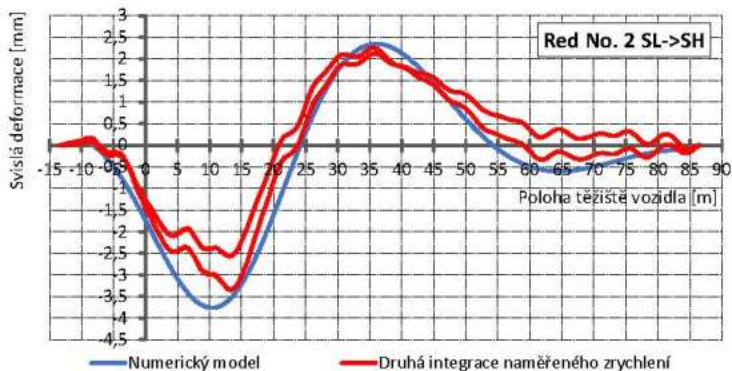
Obr. 75: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – Red No. 1 – řez 10,76m



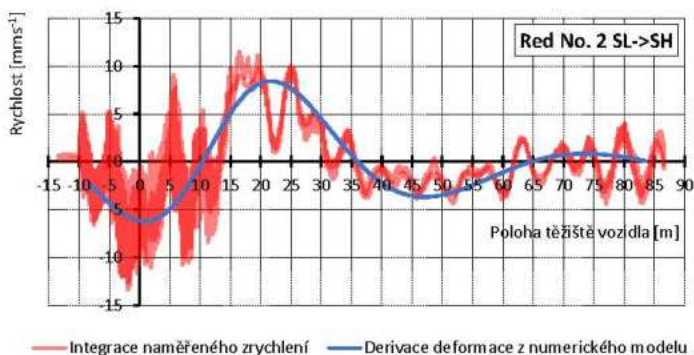
Obr. 76: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Red No. 1 – řez 10,76m



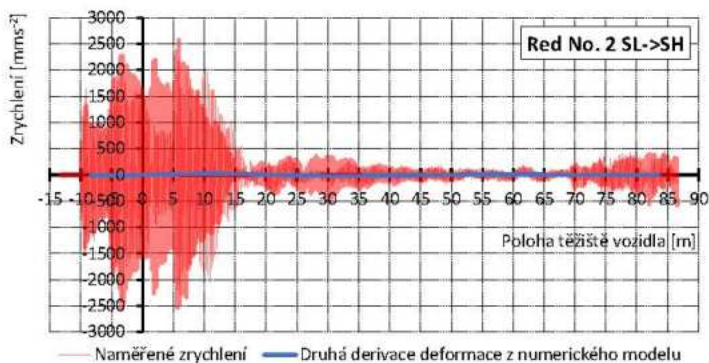
Obr. 77: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Red No. 1 – řez 10,76m



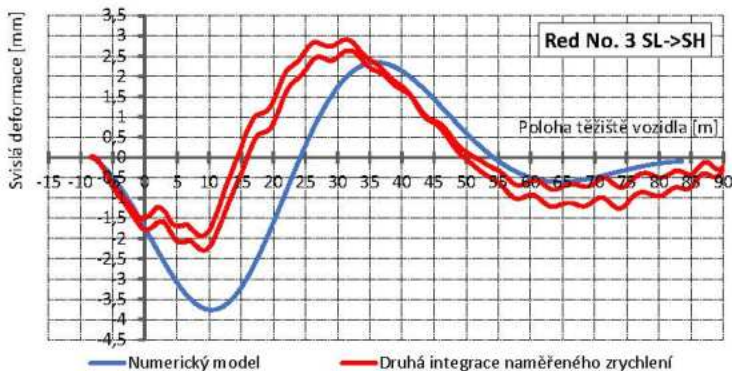
Obr. 78: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – Red No. 2 – řez 10,76m



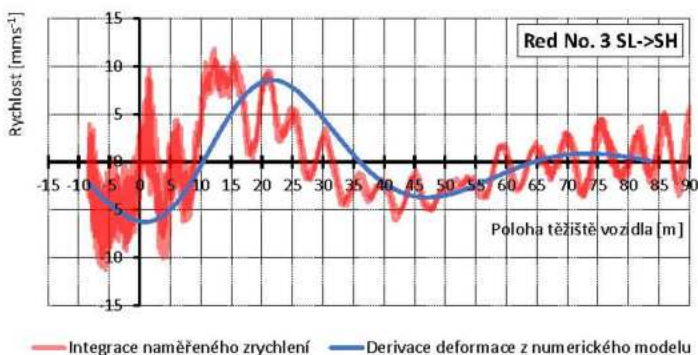
Obr. 79: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Red No. 2 – řez 10,76m



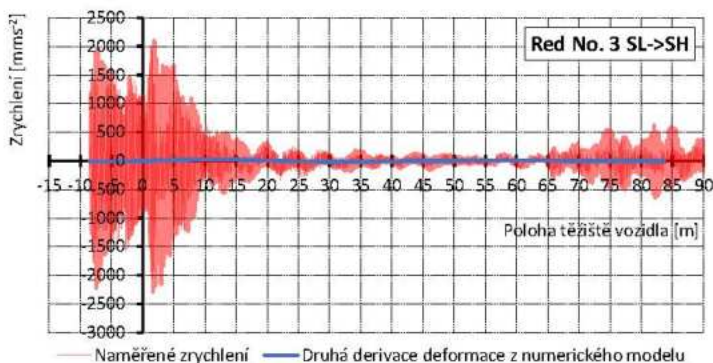
Obr. 80: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Red No. 2 – řez 10,76m



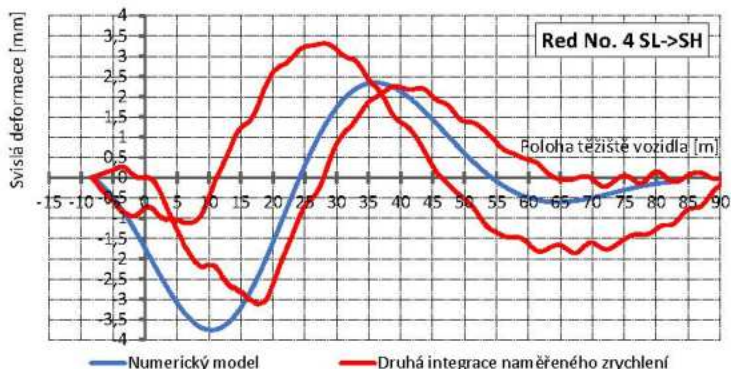
Obr. 81: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – Red No. 3 – řez 10,76m



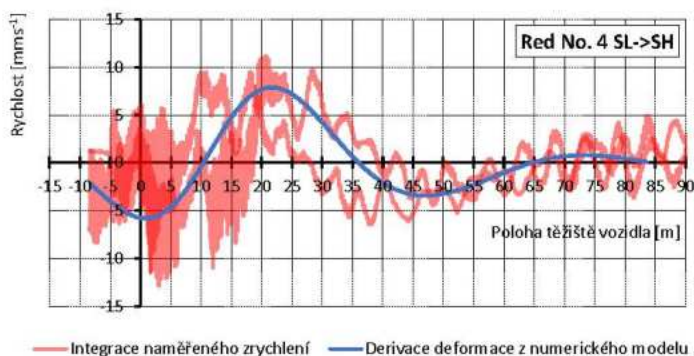
Obr. 82: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Red No. 3 – řez 10,76m



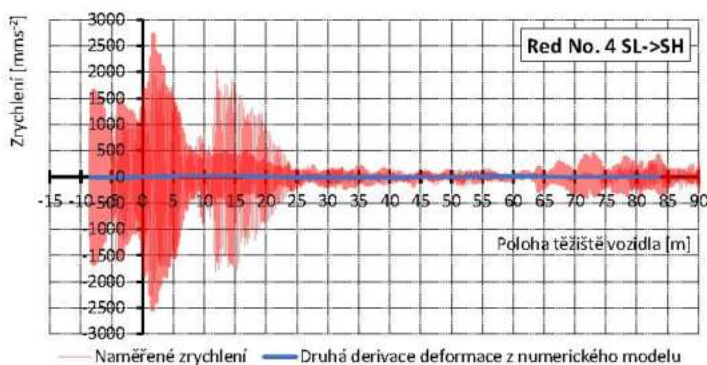
Obr. 83: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Red No. 3 – řez 10,76m



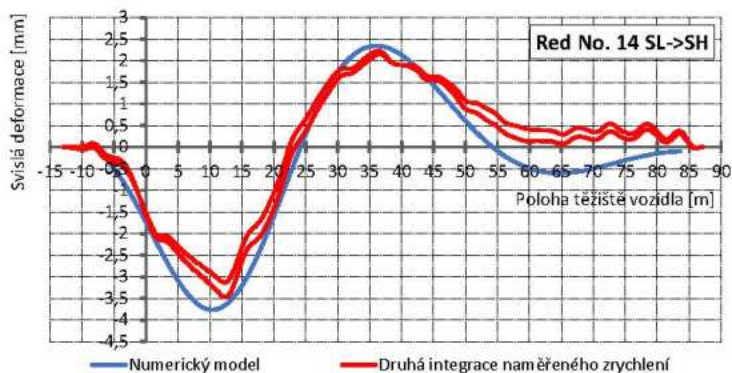
Obr. 84: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – Red No. 4 – řez 10,76m



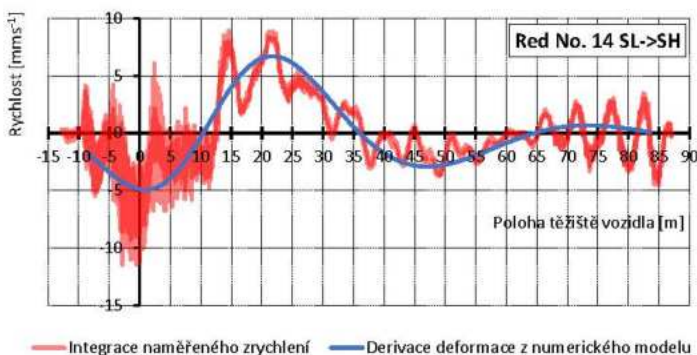
Obr. 85: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Red No. 4 – řez 10,76m



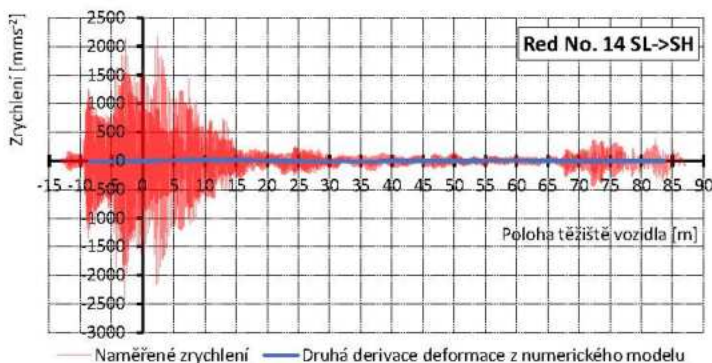
Obr. 86: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Red No. 4 – řez 10,76m



Obr. 87: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost deformace na pojezdu vozidla – Red No. 14 – řez 10,76m



Obr. 88: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost rychlosti deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Red No. 14 – řez 10,76m

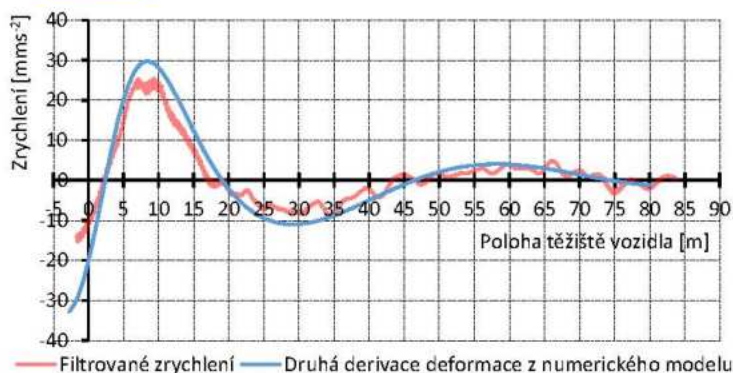


Obr. 89: Porovnání reálného měření a numerické simulace – závislost zrychlení deformace (průhybu) na pojezdu vozidla – Red No. 14 – řez 10,76m

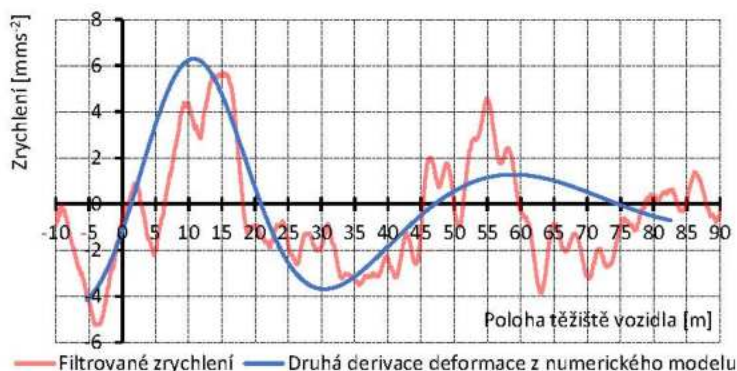
4.4. Některé úvahy o využitelnosti měření na základě matematického modelu mostní konstrukce

Za účelem ověření výpočtu zrychlení (protože z předchozích grafů není možné porovnat), byla pro 2 případy provedena zjednodušená filtrace původních dat zrychlení z akcelerometrů. Filtrace byla provedena obvyklou metodou konvoluce původních dat s konvolučním jádrem typu dolní propust založeném na Gaussově funkci $g = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$. Pro jednoduchost nebylo konvoluční jádro odvozeno dle frekvenčních charakteristik, ale jeho velikost byla zjednodušeně stanovena jako počet n započítaných hodnot původních dat (n vždy liché, $x = 0$ uvažováno uprostřed prostředního pole jádra). S hodnotou n bylo experimentováno s cílem získat vizuálně dobré výsledky. Hodnota σ pak byla vždy uvažována jako $\sigma = \frac{n}{4}$. Hodnoty dílčích polí takto daného konvolučního jádra byly dopočítány pomocí numerické integrace dané Gaussovou funkcí a jádro bylo posléze znormováno. Následně byla

provedena konvoluce s původními daty. Výsledné $n = 301$. Výsledky pro kamiony Blue Scania a Blue Iveco jsou na Obr. 90 a 91.



Obr. 90: Závislost zrychlení svislé deformace na poloze těžiště vozidla; vozidlo Blue Iveco No.1



Obr. 91: Závislost zrychlení svislé deformace na poloze těžiště vozidla; vozidlo Blue Scania No.1

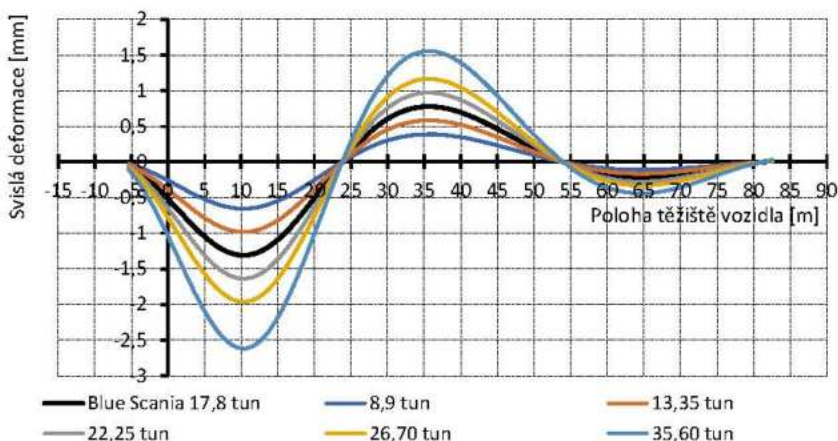
4.5. Některé úvahy o využitelnosti měření na základě matematického modelu mostní konstrukce

Je zřejmé, že na základě matematického modelu a měření in situ lze identifikovat řadu závislostí, které mohou při vhodně zvoleném modelu a jeho souladu s reálným chováním mostní konstrukce umožnit popis chování konstrukce v čase a identifikovat – na základě změny chování konstrukce – její aktuální stav.

V tomto odstavci bude uvedeno několik ukázek.

Na Obr. 92 je zakreslen průhyb v řezu I pro různé tíhy vozidla se stejným geometrickým rozložením náprav jako má vozidlo Blue Scania, ale s různou výslednou hmotností v závislosti na poloze vozidla

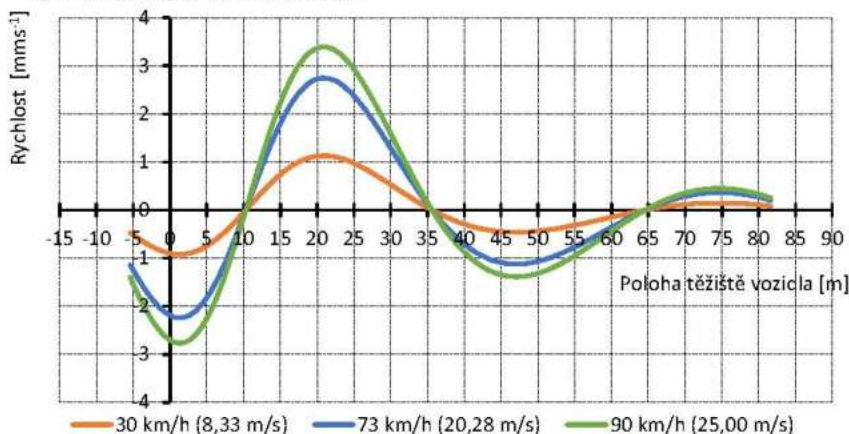
definovaná polohou těžiště na mostě; přitom poměr zatížení mezi jednotlivými nápravami je zachován stejný jako má skutečné vozidlo.



Obr. 92: Závislost svislé deformace prvního pole v řezu I na poloze těžiště vozidla; různá tíha vozidla se zachováním shodného rozložení zatížení na jednotlivé nápravy

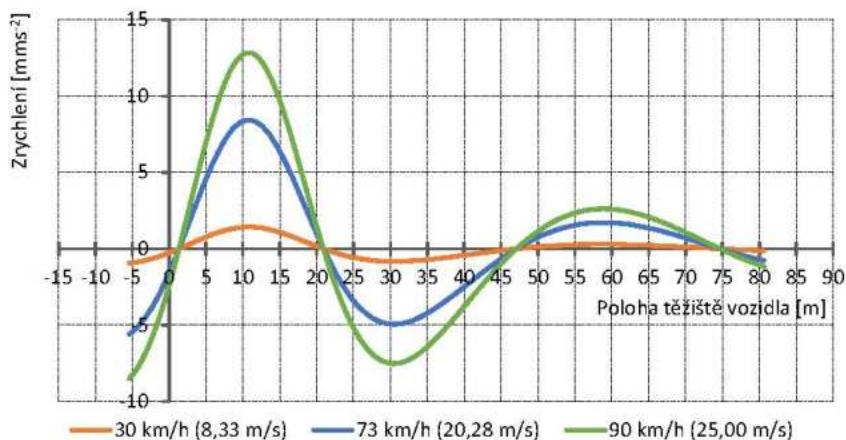
Pro vozidlo Blue Scania pohybující se různou rychlostí je na

- Obr. 93 znázorněna rychlost průhybu⁴ v řezu I,
- Obr. 94 zakresleno zrychlení v řezu I.



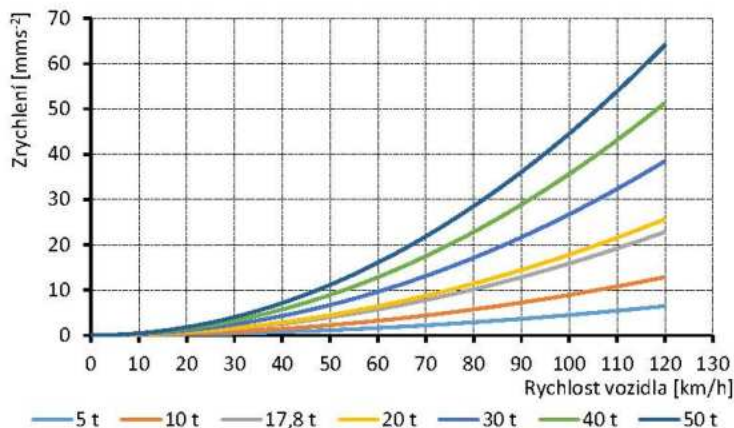
Obr. 93: Závislost rychlosti deformace (průhybu) prvního pole v řezu I na poloze těžiště vozidla; vozidlo Blue Scania (různá rychlost pojezdu vozidla)

⁴ Derivace průhybu v daném místě dle času



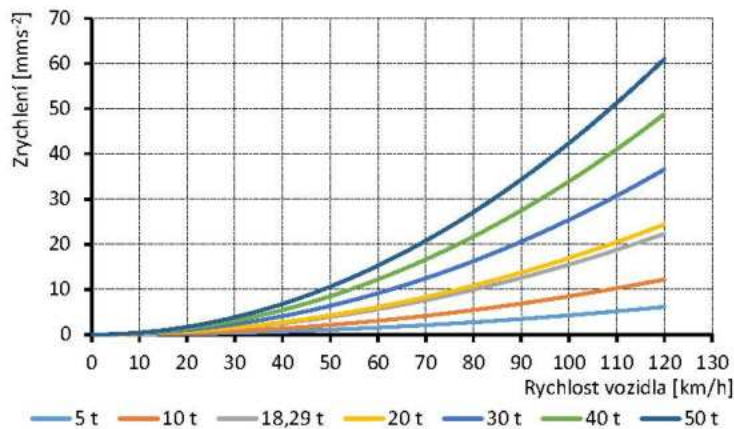
Obr. 94: Závislost zrychlení⁵ prvního pole v řezu I na poloze těžiště vozidla; vozidlo Blue Scania (různá rychlost pojezdu vozidla)

Pro vozidla Blue Scania, White, Red a Blue Iveco jsou na Obr. 95 až Obr. 98 znázorněny závislosti zrychlení v řezu I v závislosti na jejich rychlosti a hmotnosti. Přitom se předpokládá, že u daného typu vozidla je zachována geometrie náprav a nápravové tlaky jsou ve stejném poměru jako na skutečném vozidle.

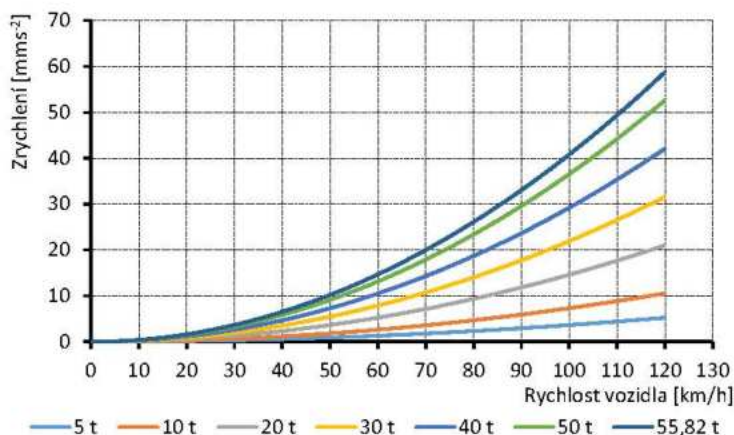


Obr. 95: Závislost zrychlení na rychlosti pojezdu vozidla pro různé hmotnosti (rozložení nápravových tlaků odvozena z Blue Scania; vzdálenost náprav stejná jako u Blue Scania); řez I

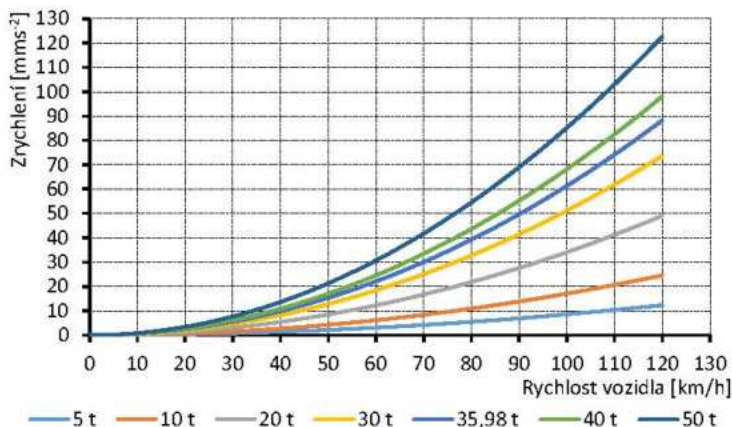
⁵ Druhá derivace průhybu v daném místě podle času.



Obr. 96: Závislost zrychlení na rychlosti pojezdu vozidla pro různé hmotnosti (rozložení nápravových tlaků dle White, vzdálenost náprav stejná jako u White); řez I



Obr. 97: Závislost zrychlení na rychlosti pojezdu vozidla pro různé hmotnosti (rozložení nápravových tlaků dle Red, vzdálenost náprav dle Red); řez I



Obr. 98: Závislost zrychlení na rychlosti pojezdu vozidla pro různé hmotnosti (rozložení nápravových tlaků dle Blue Iveco, vzdálenost náprav dle Blue Iveco); žez I

5. Závěr

Jak prokázala výše popsaná numerická studie statického chování konkrétní mostní konstrukce při zatížení definovaným vozidlem (rychlost jízdy, rozložení nápravových tlaků) a její porovnání s naměřenými daty na mostní konstrukci lze

- nalézt korelaci mezi měřeními průhybu, přetvoření a zrychlení mostní konstrukce a působícím zatížením jak na úrovni matematického modelu, tak i u naměřených hodnot a jejich následného zpracování,
- při vhodné volbě rozsahu měření akcelerometrů a výpočetních metod pro odstranění „šumů“, je stanovení odezvy mostní konstrukce pomocí měření akcelerometry možné,
- jako vhodné pro identifikaci odezvy konstrukce na působící zatížení se jeví kombinace měření rychlosti, nápravových tlaků a deformačních charakteristik mostní konstrukce (průhyby, přetvoření a zrychlení).

Z grafů v odst. 4.5 je zřejmé, že průhyb, rychlost změny průhybu a zrychlení mostní konstrukce v daném bodě je závislé na hmotnosti vozidla (a jejím rozložení na jednotlivé nápravy) a jeho rychlosti. Lze očekávat, že s rostoucí rychlostí pojezdu vozidla se ve vyšší míře uplatní případné dynamické efekty; tyto skutečnosti zatím nebyly na modelech studovány/sledovány.

Pro praktické aplikace je vhodné a důležité

- vytvořit adekvátní a výstižný matematický model mostní konstrukce⁶ a na něm identifikovat vhodná měřicí místa, definovat způsob měření a vhodné rozsahy měřících zařízení,

⁶ Modely mohou být statické či dynamické, fyzikálně lineární či nelineární – volba vhodného modelu závisí na typu mostní konstrukce a zatížení, které na ni působí. Této problematice by měla být při dalším rozvoji metody věnována pozornost.

- identifikovat s dostatečnou přesností působící pohyblivé zatížení od dopravy ve všech jízdních pruzích pojižděné mostní konstrukce (rychlost vozidel, nápravové tlaky, rozestupy mezi vozidly a.j.),
- prověřit vliv dynamických efektů průjezdu vozidel po konstrukci vyvolaných např. nerovnostmi vozovky na naměřené hodnoty (jak na úrovni matematického modelu, tak i při reálných situacích),

Hlavním problémem měřicí metody v případě užití akcelerometrů je akumulace integrační chyby a nízká úroveň užitečného signálu v porovnání s vlastním šumem akcelerometru a vibracemi generovanými samotným průjezdem vozidla. Hodnota rozlišení snímače (akcelerometru) by měla být alespoň o řád nižší, než je předpokládané zrychlení prvku. Pro vyhodnocení měření je třeba používat vhodné filtrační a kompenzační metody.

Z hlediska možného sledování degradace a změny spolehlivosti mostní konstrukce v čase lze konstatovat, že změny v naměřených hodnotách průhybu, přetvoření (a z něj odvozeného napětí v daném materiálu) a frekvence kmitání mostní konstrukce v daném místě při „stejném“ zatížení mohou být spolehlivým ukazatelem aktuálního stavu mostní konstrukce. V zahraničí jsou na významných mostních konstrukcích osazena podobná měření, která slouží jako podklad pro prediktivní údržbu a prohlídky konstrukcí. Zdokonalení modelů a vývoj metod pro sestavení vhodného modelu zatížení mostu si pro reálný provoz na mostě ještě vyžádá další teoretické práce.