

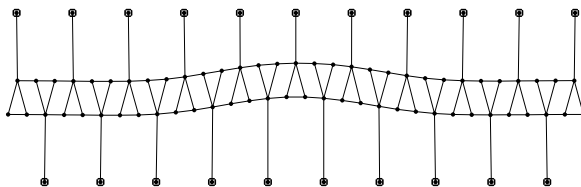
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ



INFRAM a.s., Česká republika

VÝZKUMNÁ ZPRÁVA

STABILITA VYBRANÝCH KONFIGURACÍ KOLEJOVÉHO SVRŠKU



Řešitel

Ing. **Petr Frantík**, Ph.D.

Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební,
Vysoké učení technické v Brně

Objednatel

Ing. **Aleš Suchánek**, provozně-výrobní ředitel
INFRAM, a.s., Česká republika

Datum

listopad 2009

OBSAH

Specifikace zadání	3
Předpoklady výpočtu	3
Kolejnice	3
Pražce	3
Systém upevnění	4
Tuhost distanční vazby	5
Štěrkové lože	5
Metoda řešení	7
Model	7
Výsledky výpočtu	9
Diskuze výsledků	11
Reference	12
Příloha	12

Specifikace zadání

Cílem bylo získat hodnoty kritického zatížení a tvar ztráty stability tří konfigurací kolejového svršku s bezстыkovými kolejnicemi včetně šterkového lože. Zatížením se zde myslí velikost oteplení kolejnice a velikost impulzu síly nutného pro vybočení koleje v horizontálním směru (kolmo na osu koleje). Svršek je s ohledem na úlohu tvořen (vertikálně řazeno): dvojicí kolejnic 49 E 1 (S49) v osově vzdálenosti 1500 mm, systémem upevnění se svěrkou Skl 14, pražci a šterkovým ložem. Pražce tvoří tři různé konfigurace:

- 1) příčné betonové pražce po 600 mm (vzdálenost uzlů upevnění 600 mm),
- 2) ocelové Y-pražce (profil IB 100 S-1) po 600 mm (teoretická vzdálenost uzlů upevnění 830 mm),
- 3) ocelové Y-pražce (profil IB 100 S-1) po 650 mm (teoretická vzdálenost uzlů upevnění 880 mm).

Předpoklady výpočtu

Jedná se o určení kritického zatížení dokonale symetrického svršku bezстыkové koleje v přímé trati bez implicitního určení jeho délky a okrajových podmínek. Modelovaná délka svršku musí být zvolena dostatečná natolik, aby významně neovlivňovala výsledky výpočtu. Přesněji řečeno: výsledné hodnoty mají být zhruba nezávislé na této délce. Pro řešení je zvolena délka svršku přibližně 100 metrů.

Kolejnice

Kolejnice 49 E 1 (S49) jsou uvažovány jako dokonale přímé pružné pruty s parametry:

objemová hmotnost 7850 kg/m^3 ,
modul pružnosti $E = 210 \text{ GPa}$,
plocha průřezu $A = 6.297 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$,
moment setrvačnosti $I = 3.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$,
koeficient teplotní roztažnosti $\alpha_t = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Pražce

Pražce plní ve smyslu stability roli distančních vazeb. Tyto distanční vazby jsou uplatněny na dvojici kolejnic prostřednictvím pružného systému upevnění se svěrkou Skl 14, který tuhost distanční vazby podstatně snižuje, viz dále. Poznamenejme, že pražce spolu se systémem upevnění přenášejí smykové síly v koleji.

Betonový pražec je uvažován s parametry:

objemová hmotnost 2500 kg/m^3 ,
modul pružnosti $E = 20 \text{ GPa}$,
plocha průřezu $A = 48.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

Jeden profil IB 100 S-1 ocelového Y-pražce je uvažován s parametry:

objemová hmotnost 7850 kg/m^3 ,
 modul pružnosti $E = 210 \text{ GPa}$,
 plocha průřezu $A = 2.64 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

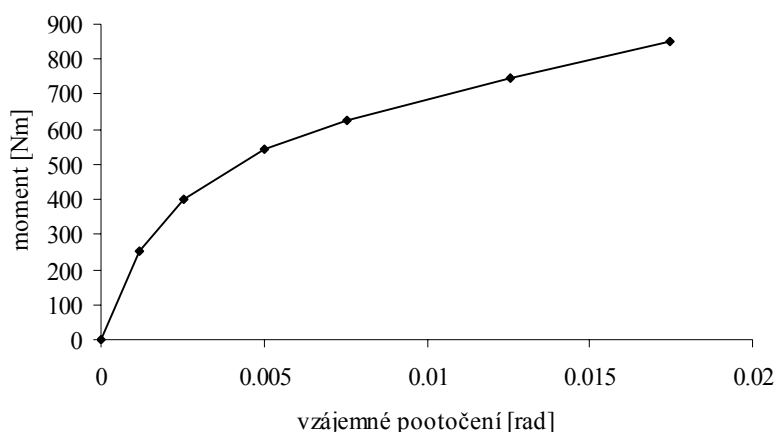
Těmto pražcům pak pro srovnání přibližně odpovídá normálová tuhost $k_{lp} \approx EA/L$, kde L je osová vzdálenost upevnění na profil pražce:

betonový pražec $k_{lp} = 3.7 \cdot 10^8 \text{ N/m}$,
 ocelový pražec $k_{lp} = 6.3 \cdot 10^8 \text{ N/m}$.

Uvedme, že tyto hodnoty jsou pouze orientační. Není zde uvažován ohyb pražců, excentrické připojení pražců, vyklopení pružné svěrky, stlačení vodící vložky ani tuhost vedlejších připojovacích prostředků (šroub respektive vrut, hmoždina).

Systém upevnění

Systém upevnění je stejný pro všechny tři konfigurace. Tvoří tzv. uzel upevnění a plní roli pružné fixace kolejnic k pražcům a zajišťuje také smykovou tuhost mezi oběma kolejnicemi prostřednictvím kroutící tuhosti ve spojení pražec-kolejnice. Uzel upevnění se svěrkou Skl 14, viz [1], je dán tuhostí v kroucení, tj. odporem k vzájemnému natočení pražce a kolejnice (viz obr. 1) a dále příčnou tuhostí, tj. odporem k vzájemnému posunutí pražce a kolejnice kolmo na osu kolejnice (viz obr. 2). Vliv podélné tuhosti, tj. odporu k vzájemnému posunutí pražce a kolejnice rovnoběžně s osou kolejnice, se vzhledem k příčnému vybočení koleje a geometrii Y-pražce neuvažuje (samotný Y-pražec tvoří trojúhelníkové ztužidlo).

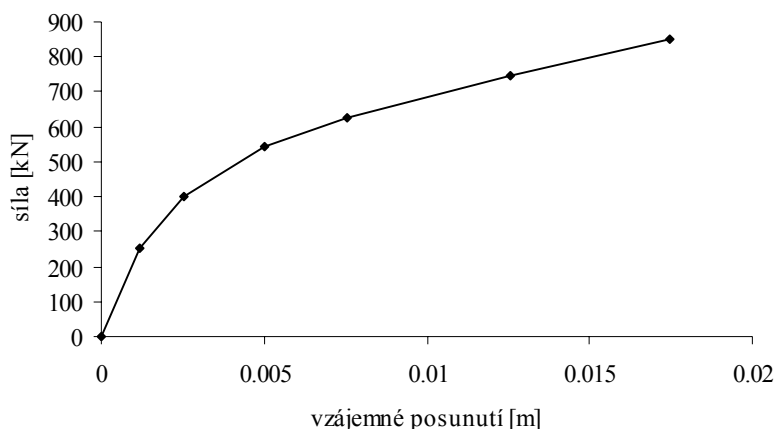


Obr. 1 Závislost momentu na pootočení ve spoji kolejnice s pražcem pro otáčení kolem vertikální osy (odpor k vzájemnému natočení pražce a kolejnice v horizontální rovině); převzato z [1]

Příčná tuhost uzlu upevnění k_{ls} je zde odhadnuta na základě tuhosti v kroucení k_f . Tento odhad dává horní mez tuhosti, jelikož nezohledňuje zejména vliv vyklopení kolejnice kolem osy kolejnice při pružné deformaci svěrky. Tuhost je odhadnuta ze vztahu (předpoklad rovnoměrného rozdělení napětí v obdélníkovém kontaktu pata kolejnice-vodící vložka):

$$k_{ls} = \frac{A_{eq}}{I_{eq}} k_f = \frac{12}{h^2} k_f, \quad (1)$$

kde k_f je kroutící tuhost a $h = 110$ mm je délka uložení kolejnice ve systému upevnění (délka vodící vložky).



Obr. 2 Závislost síly na posunutí ve spoji kolejnice s pražcem pro posun kolmo k ose kolejnice (odpor k vzájemnému posunutí pražce a kolejnice v horizontální rovině); zjednodušeně přepočteno dle výrazu (1)

Podle grafu na obr. 1 a 2 se systém upevnění – v daném rozsahu – chová výrazně nelineárně. Tato nelinearita je uvažována jako pružná. Tj. nezáleží na směru ani způsobu zatěžování. Počáteční tuhosti jsou následující:

kroutící tuhost $k_f = 2.2 \cdot 10^5$ Nm/rad,
příčná tuhost jedné svěrky $k_{ts} = 2.2 \cdot 10^8$ N/m.

Tuhost distanční vazby

Počáteční tuhost distanční vazby k_l tvořené pražcem a dvojicí uzlů upevnění lze stanovit ze vztahu:

$$\frac{1}{k_l} = \frac{2}{k_{ts}} + \frac{1}{k_{lp}}. \quad (2)$$

Což dává následující horní odhady hodnot počátečních tuhostí:

betonový pražec $k_l = 9.3 \cdot 10^7$ N/m,
ocelový pražec $k_l = 8.4 \cdot 10^7$ N/m.

Jako dolní odhad hodnoty počáteční tuhosti se použije:

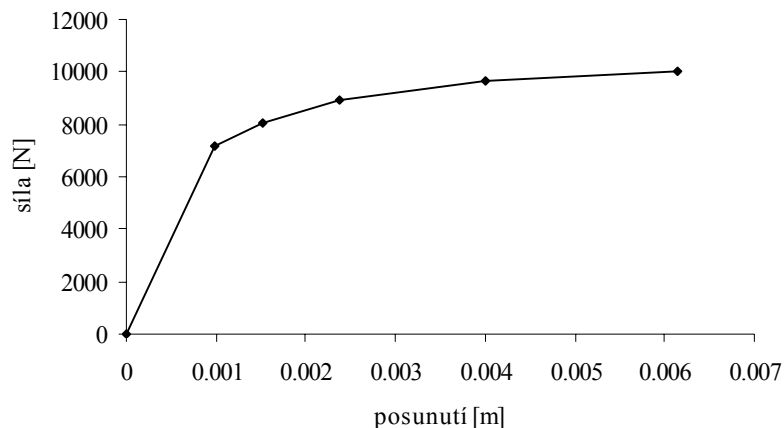
$$k_l = 2 \cdot 10^7 \text{ N/m.}$$

Štěrkové lože

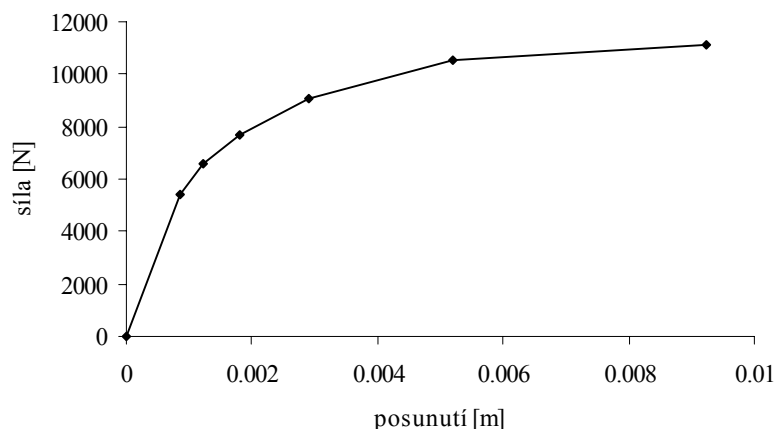
Štěrkové lože je ve svršku hlavní stabilizační prvek proti příčnému vybočení koleje. Jeho chování je – vzhledem k realitě – značně zjednodušeně vzato jako nelineární pružné, což je dáno zejména neznalostí historie zatěžování. V modelu se pro jednoduchost uvažuje působení štěrkového lože pouze v příčném směru. Na obr. 3 až 5 jsou vidět závislosti odporu k posunutí

jednoho pražce, uvolněného ze systému upevnění, kolmo na osu koleje (dle typu pražce), který klade tzv. stabilizované šterkové lože, viz [1].

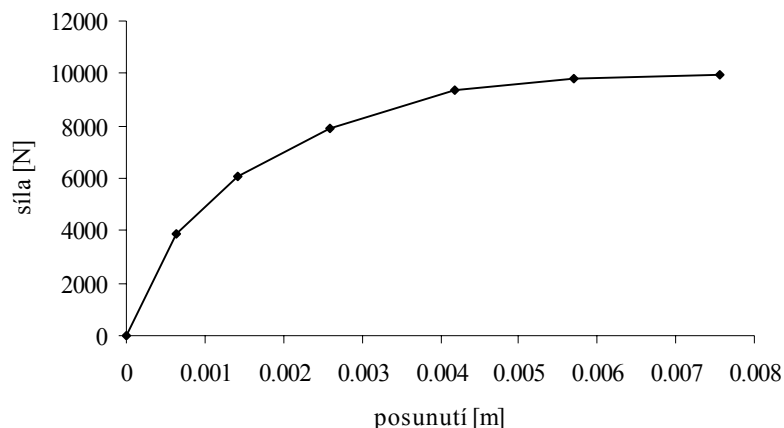
Grafy na obrázcích 3 až 5 jsou v modelu přizpůsobeny tak, že v záporných hodnotách posunutí mají analogický průběh (symetrický podle počátku souřadnic). V oblasti větších posunutí, než je v grafech uvedeno, se uvažuje konstantní hodnota síly daná posledním zaznamenaným bodem (bodem s největším posunutím).



Obr. 3 Závislost síly na posunutí uvolněného betonového pražce kladeného po 600 mm ve šterkovém loži pro směr kolmo k ose kolejnice; převzato z [1]



Obr. 4 Závislost síly na posunutí uvolněného ocelového Y-pražce kladeného po 600 mm ve šterkovém loži pro směr kolmo k ose kolejnice; převzato z [1]



Obr. 4 Závislost síly na posunutí uvolněného ocelového Y-pražce kladeného po 650 mm ve šterkovém loži pro směr kolmo k ose kolejnice; převzato z [1]

Metoda řešení

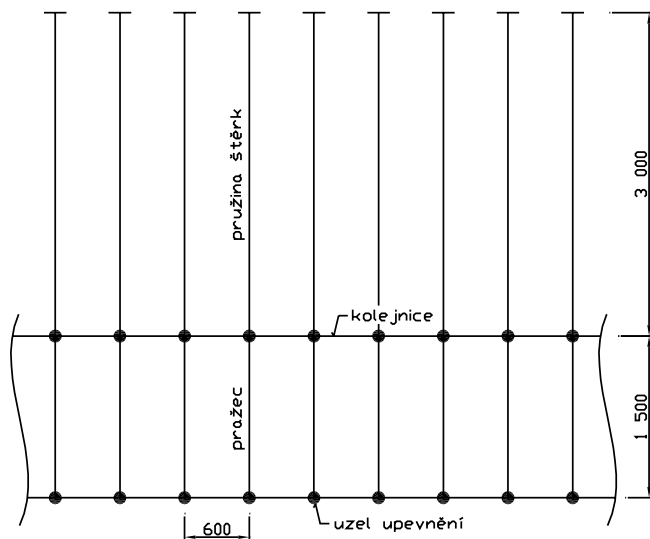
Pro nalezení kritického zatížení byla využita numerická metoda založená na řešení pohybových rovnic nelineárních dynamických systémů sestávajících z interagujících hmotných bodů. Hmotné body a interakce mezi nimi jsou získány pomocí tzv. fyzikální diskretizace. Tato výpočetní metoda byla vyvinuta a ověřena v typických stabilitních úlohách stavební mechaniky, viz např. [2]. K dispozici je rovněž podrobný popis metody [3].

Metoda je schopna plně zachytit geometricky nelineární charakter ztráty stability a díky dynamickému řešení tak činí zcela přirozeně.

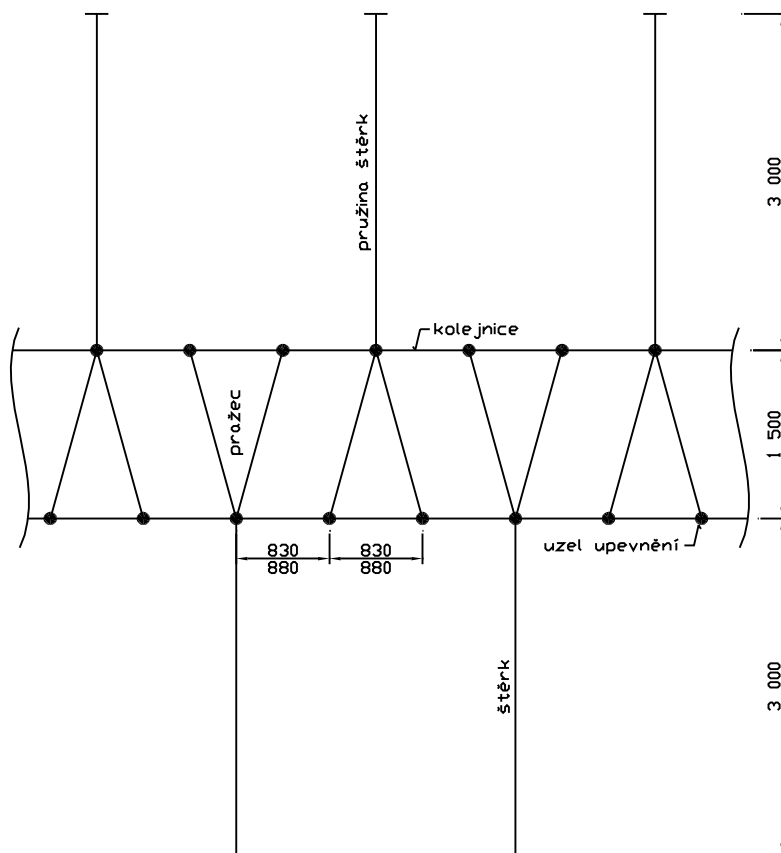
Model

Modelován je přímý úsek tratě délky přibližně 100 metrů. Konkrétně 100.2 metrů u betonových pražců, 100.845 metrů u ocelových Y-pražců po 600 mm a 100.76 metrů u ocelových Y-pražců po 650 mm. Kolej je uvažována jako na koncích nepohyblivá (vetknutá). Kolejnice vzdálené 1.5 m jsou diskretizovány po úsecích, jejichž délka odpovídá vzdálenosti uzlů upevnění. Tj. 600 mm u betonových pražců, 830 mm u ocelových Y-pražců po 600 mm a 880 mm u ocelových Y-pražců po 650 mm. Pražce včetně systémů upevnění jsou uvažovány pouze jako pružné distanční spoje s geometrií odpovídající tvaru a upevnění pražců. Šterkové lože je do výpočtu zahrnuto pomocí příčných pružin délky 3 metry, viz obr. 5 a 6.

Zatížení oteplením je provedeno po celé délce koleje u obou kolejnic hodnotou $\Delta t = 60$ °C. Impuls síly I_F proměnlivé hodnoty je nanesen na obecně jeden libovolný uzel upevnění ve směru kolmo na kolej, prakticky přibližně uprostřed úseku koleje.



Obr. 5 Schéma diskrétního modelu koleje s betonovými pražci po 600 mm



Obr. 6 Schéma diskrétního modelu koleje s ocelovými Y-pražci po 600 mm respektive 650 mm (vzdálenost uzlů upevnění 830 mm resp. 880 mm)

Výsledky výpočtu

Výsledky výpočtu jsou vypsány v následujících třech tabulkách 1 až 3. V tab. 1 jsou uvedeny minimální impulzy pro vybočení koleje při oteplení kolejnic o 60 °C. Tyto impulzy jsou teoretická zatížení, nalezená výpočtem, nutná pro vybočení koleje. Slouží pouze jako porovnávací hodnoty mezi jednotlivými konfiguracemi svršku. V tab. 2 jsou odpovídající hodnoty vybočení koleje včetně měřené délky vybočení. Měřenou délkou vybočení je zde myšlena vzdálenost druhých nulových bodů průhybové funkce (počítáno od maximálního vybočení), viz obr. 7 až 9.

Tab. 3 vypisuje výsledky s největší vypovídací hodnotou – kritické oteplení kolejnic Δt_{cr} . Kritickým oteplením je myšleno nejmenší možné oteplení, pro které kolej ztratí stabilitu přímého tvaru.

Tuhost distanční vazby Odpor šterkového lože	spodní odhad		horní odhad	
	50%	100%	50%	100%
Typ pražce				
Příčné betonové pražce po 600 mm	0.8 kNs	1.5 kNs	0.9 kNs	1.6 kNs
Ocelové Y-pražce po 600 mm	1.2 kNs	1.7 kNs	nevybočí	nevybočí
Ocelové Y-pražce po 650 mm	1.0 kNs	1.4 kNs	nevybočí	nevybočí

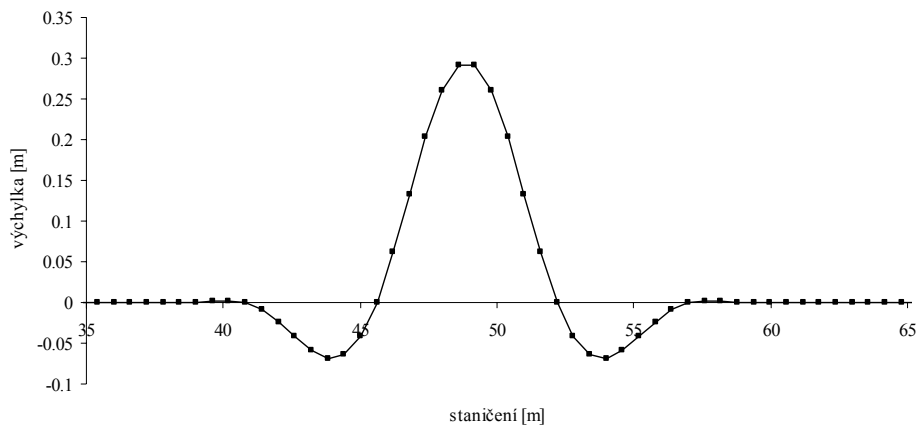
Tab. 1 Výsledné hodnoty kritických impulsů

Tuhost distanční vazby Odpor šterkového lože	spodní odhad		horní odhad	
	50%	100%	50%	100%
Typ pražce				
Příčné betonové pražce po 600 mm	0.49 (18.0) m	0.38 (15.6) m	0.48 (20.4) m	0.36 (16.2) m
Ocelové Y-pražce po 600 mm	0.42 (22.4) m	0.29 (18.2) m	nevybočí	nevybočí
Ocelové Y-pražce po 650 mm	0.43 (22.8) m	0.33 (18.5) m	nevybočí	nevybočí

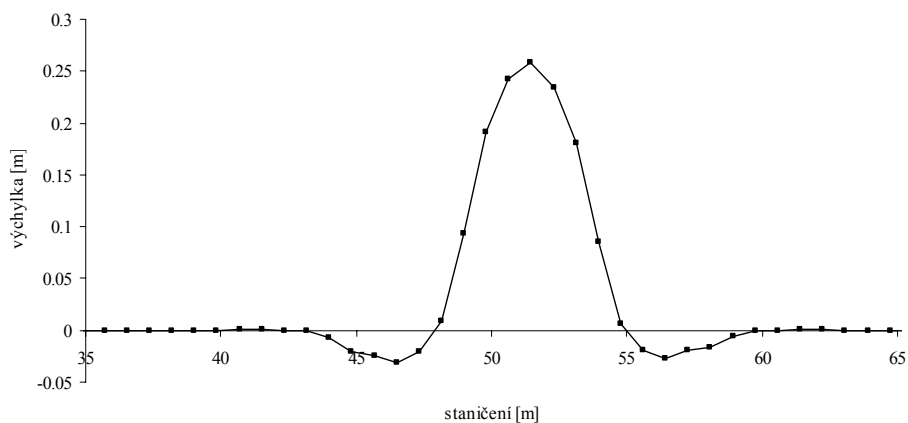
Tab. 2 Výsledné hodnoty vybočení koleje a odpovídající měřená délka vybočení v závorce

Tuhost distanční vazby Odpor šterkového lože	spodní odhad		horní odhad	
	50%	100%	50%	100%
Typ pražce				
Příčné betonové pražce po 600 mm	39 °C	51 °C	39 °C	51 °C
Ocelové Y-pražce po 600 mm	52 °C	59 °C	84 °C	100 °C
Ocelové Y-pražce po 650 mm	50 °C	57 °C	77 °C	85 °C

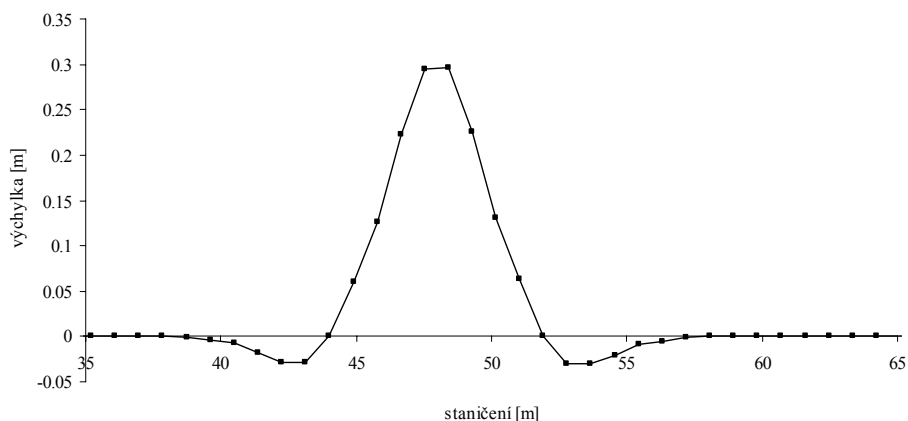
Tab. 3 Výsledné hodnoty kritického oteplení



Obr. 7 Typický graf výchylky koleje s betonovými pražci po 600 mm (zde konkrétně pro horní odhad příčné tuhosti a 100% odpor šterkového lože)



Obr. 8 Typický graf výchylky koleje s ocelovými Y-pražci po 600 mm (zde konkrétně pro spodní odhad příčné tuhosti a 100% odpor šterkového lože)



Obr. 9 Typický graf výchylky koleje s ocelovými Y-pražci po 650 mm (zde konkrétně pro spodní odhad příčné tuhosti a 100% odpor šterkového lože)

Diskuze výsledků

Z uvedených hodnot kritických oteplení vyplývá – pro uvažovaný rozsah příčných tuhostí distanční vazby (tvořené pražcem a upevňovacími prostředky) – vyšší efektivnost ve stabilitní únosnosti Y-pražců bez šterkového lože oproti betonovým pražcům s kolmým příčným uspořádáním. Tuto efektivnost je obtížné kvantifikovat bez znalosti funkce pravděpodobnosti oteplení. I bez této znalosti je ovšem zřejmé, že v extrémních hodnotách oteplení, které se zřejmě vyskytují zřídka, mají koleje s Y-pražci přibližně o deset stupňů celsia vyšší kritické oteplení než koleje s pražci betonovými. Zároveň kolej s Y-pražci vyžaduje vyšší hodnotu impulzu než kolej s pražci betonovými (při spodním odhadu příčné tuhosti průměrně o 7% v maximum o 20%). Tyto rozdíly mohou činit řádově menší pravděpodobnost ztráty stability.

U příčných pražců hraje, vzhledem ke kritickému zatížení, hlavní roli torzní tuhost v systému upevnění. Bez této tuhosti takto uspořádaná kolej nevyužívá výhody složeného prutu.

Efektivnost Y-pražců je hlavně v jejich uspořádání – tvoří trojúhelníkové výztuhy. Tuhost těchto výztuh je ovlivněna příčnou tuhostí uzlu upevnění, která není přesně známa. Poznamenejme, že tyto výztuhy při vybočení zkrucují a smýkají profil kolejnice. Účinnost dosažených výsledků je významně ovlivněna odhadem příčné tuhosti systému upevnění a schopností Y-pražců tvořit trojúhelníkové výztuhy.

Za povšimnutí stojí podobné výsledky tvaru vybočení u takto odlišných uspořádání pražců (obr. 7 až 9). Zřejmě se jedná o typický stav, do jisté míry nezávislý právě na uspořádání pražců.

Šterkové lože bylo navzdory realitě řešeno jako nelineárně pružné. Zdůvodnění je dvojí. Není známé přesné zatížení, kterým by vybočení bylo vyvoláváno a zadruhé by se úloha stala díky nepružnému charakteru šterkového lože nepřehlednou. Do výpočtu z podobného důvodu nebyl započítán odpor šterkového lože proti podélnému posunutí. Tento odpor má zřejmě význam při větších délkách koleje, čímž se eliminuje přenos napětí na velké vzdálenosti (nebylo ověřováno).

Řešena byla kolej v přímé trati. Důvodem je fakt, že se jedná o symetrický problém, který lépe vypovídá o stabilitě než systém s imperfekcí. Na trať v oblouku lze z hlediska stability totiž pohlížet jako na imperfektovaný systém, jehož příčná výchylka se (zjednodušeně řečeno) při ztrátě stability skládá ze dvou složek: ohybu od imperfekce a ohybu od vybočení vlivem destabilizace. Je pravděpodobné, že při malé imperfekci (malém vzepětí oblouku) bude existovat možnost měřitelného vybočení koleje vlivem ztráty stability. V tomto smyslu lze předpokládat obdobné chování jako u koleje v přímé trati.

Poznámka

Objednatel této zprávy je řešitelem výzkumného úkolu a příjemcem účelové podpory formou dotace projektu 1F82A/050/91 *Výzkum lehké konstrukce železničního svršku a spodku pro regionální tratě*.

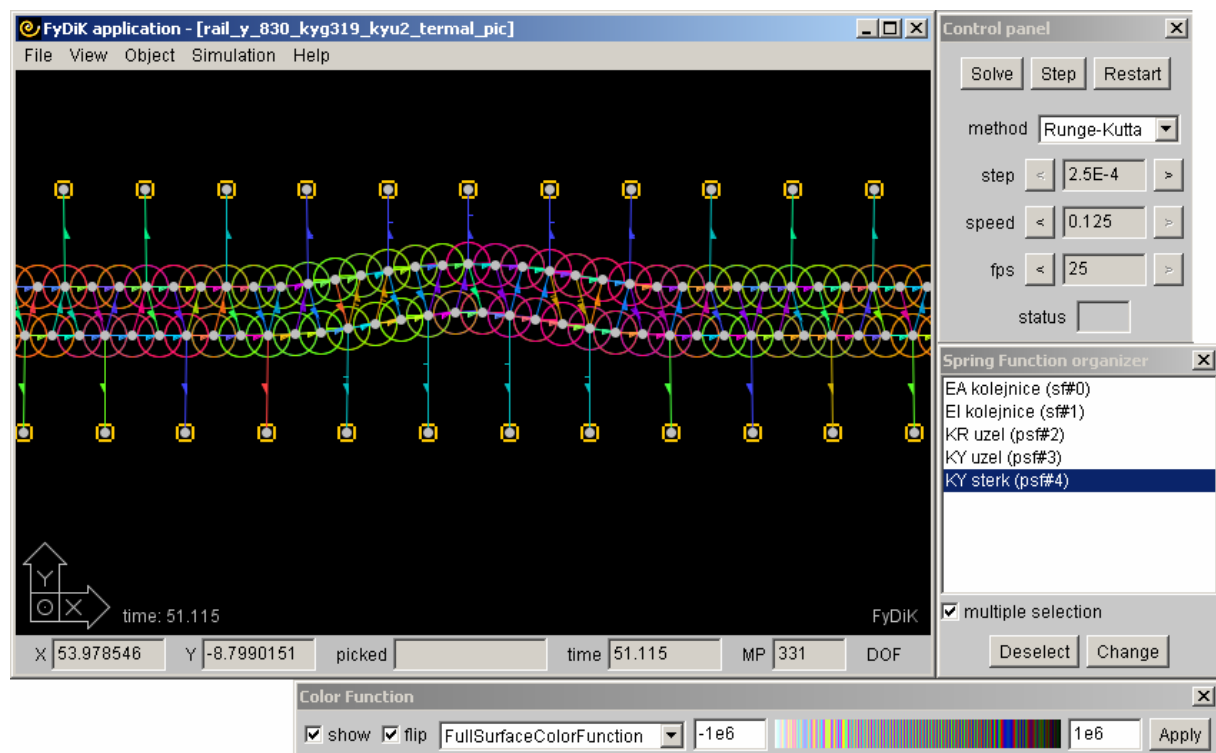
Reference

- [1] podklady získané od firmy INFRAM, a.s., Česká republika
- [2] Frantík P., Simulation of the stability loss of the von Mises truss in an unsymmetrical stress state, journal Engineering Mechanics, Vol. 14, No. 3, 2007, p. 155-162
- [3] Frantík P., Diskrétní model FyDiK2D, mezinárodní konference Modelování v mechanice 2009, VŠB-TU Ostrava, Česká republika, 2009, 10 stran

Příloha

Zde uvedená metoda výpočtu je implementována v Java aplikaci FyDiK2D, která je volně dostupná na internetové adrese <http://fydik.kitnarf.cz>. Modely použité pro vytvoření této zprávy lze stáhnout z adresy:

<http://fydik.kitnarf.cz/references/continuousweldedrail/model.zip>.



Obr. 10 Grafické uživatelské rozhraní Java aplikace FyDiK2D