

# NUMERICKÁ ANALÝZA VZPĚRNÉ ÚNOSNOSTI BEZSTYKOVÉ KOLEJE

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

Důležitou součástí návrhu železničních mostů je ověření interakce bezстыkové koleje na mostě s konstrukcí mostu. Vlivem deformace konstrukce dochází k přidavnému namáhání kolejnic, které může vést až k jejich porušení nebo ztrátě stability. Tato analýza vzniká z důvodu ověření vlivu nových prvků koleje ovlivňující její odpor.

Prohloubením znalostí týkajících se funkce podpražcových podložek, případně pražcových kotev a jejich vhodné zohlednění při výpočtu interakce bezстыkové koleje s mostem může vést ke zefektivnění návrhu konstrukce železničních mostů.

Cílem příspěvku je ověření vlivu zlepšování parametrů příčného odporu jako jsou pražcové kotvy nebo podpražcové podložky na únosnost koleje při zatížení vzpěrným tlakem. Účelem analýzy je stanovení směru pro budoucího postup výzkumu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Podpražcové podložky, pražcové kotvy, kolej, příčný odpor koleje, stabilita koleje

## ABSTRACT

An important part of the design of railway bridges is the verification of the interaction of the continuous welded rail on the bridge with the bridge structure. The deformation of the structure causes additional stresses on the rails, which can lead to their failure or loss of stability. This analysis arises in order to verify the influence of new track elements affecting its resistance.

Increasing the knowledge of the function of under sleeper pads or sleeper anchors and their appropriate consideration in the calculation of the interaction of the continuous welded rail with the bridge can lead to a more efficient design of railway bridge structures.

The aim of this paper is to verify the effect of improving the transverse resistance parameters such as sleeper anchors or under sleeper pads on the bearing capacity of the track under buckling load. The purpose of the analysis is to establish a direction for future research progress.

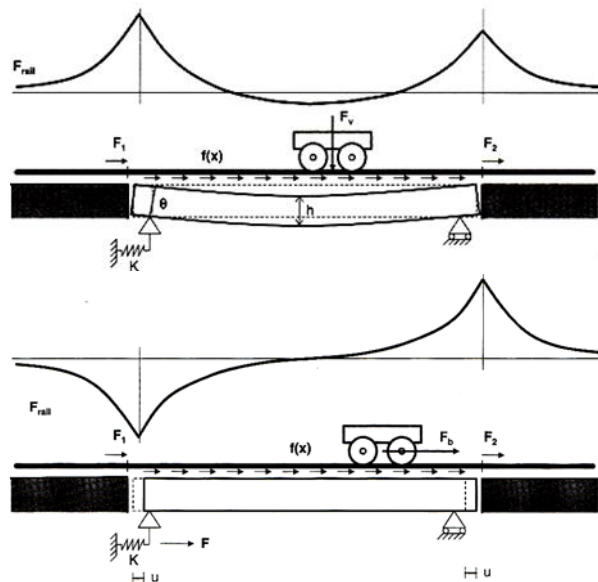
## KEYWORDS

Under sleeper pads, sleeper anchors, track, transverse track resistance, track stability

## 1. ÚVOD

Předmětem numerické studie je podrobněji popsat vliv příčného odporu koleje na vzpěrnou únosnost koleje. K vzniku napětí v bezстыkové koleji (kolejnicích) dochází vlivem zabráněné deformace. Tento fenomén je v širé trati dobře znám a železniční inženýři s ním při návrhu bezстыkové koleje dlouho pracují. Problematickým místem na tomto poli se jeví mostní konstrukce, zejména pak dlouhé konstrukce osazené závěry a ložisky.

Vlivem pohybu kolejového vozidla po koleji vedoucí přes most dochází k deformaci nosné konstrukce, která se v konečném důsledku projevuje jako vynucená deformace koleje. K této deformaci dochází vlivem svislého průhybu od tíhy kolejového vozidla, ale také například vlivem působení brzdících a rozjezdových sil (viz obrázek níže).



Obrázek 1: Přidavná napětí při interakci kolej-most [2].

Společně se zatížením od teploty pak tyto vlivy generují dodatečná zatížení koleje. Tento dodatečný vliv může mít charakter tahové nebo tlakové síly (napětí). Vlivem tahových namáhání

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

dochází v extrémních případech k přerušení (lomu) koleje. Důsledkem nadměrných tlakových účinků může být ztráta stability koleje a její vybočení.

Kolejnicové pásy jsou vyráběny z homogenního izotropního materiálu – oceli. Vlastnosti materiálu jsou tedy v tlaku i tahu stejné. Při zahrnutí dalších namáhání, kterým je kolejnice vystavena je možné při posouzení interakce kolej-most vyčlenit 92 MPa na tahové účinky namáhání a se zohledněním vlivu vzpěru pak pouze 72 MPa na účinky tlakové. Cílem numerické studie je prověřit, zda při zvýšení příčné tuhosti koleje lze využít více než předpisových 72 MPa.

## 2. POSTUP VÝPOČTU

### 2.1. Porušení koleje vybočením

Bezстыková kolej ze své definice obsahuje tzv. dýchající konce, na kterých dochází k vyrovnání vnesených napětí vlivem zabráněné deformace a oblast mezi dýchajícími konci, kde redukce vnesených napětí není možná. V této střední oblasti může vlivem nadměrných hodnot dojít k vybočení koleje (zóna vybočení). Napětí vyplývající z přítomnosti mostní konstrukce se v této oblasti může projevit fatálně.

Modelový příklad pro numerickou analýzu vychází z předpokladu splnění definice bezстыkové koleje (nacházíme se mimo dýchající konce), kde je vyšetřován vliv přídavné síly (např. vlivem deformace mostu), která se projeví jako dodatečné napětí v kolejnici. Jako kritický stav je považován vzpěr, modelovaná kolej tedy bude vystavena tlakovým účinkům.

Hledaným stavem v rámci jednotlivých výpočtů je okamžik, kdy dochází k vybočení koleje = ztrátě stability. Tento stav se ve výpočetním modelu může projevit náhlou změnou geometrie, nadměrným nárůstem deformace oproti působící osově síle nebo poklesem hodnoty tlakové síly v koleji. S ohledem na nahodilost procesu vybočení je hledám první vlastní tvar, při kterém dojde ke ztrátě stability.

Pro účely tohoto výpočtu byla použita tabulka 8 normy ČSN 73 6360-2 [10], která definuje mez bezodkladného zásahu (při

překročení uvedených výchylek je nutná okamžitá náprava). V této tabulce byl sledován sloupec SK – směr koleje v geometrické ose koleje (vodorovný), kdy limitní hodnota je rovna 18 mm. Splnění dané hodnoty je požadováno v případě měření s rozsahem vlnové délky 25-70m.

Na základě analytického řešení dle [11], případně při ověření dle [3] a [4] byla prokázána menší vzpěrná délka. Níže jsou uvedeny vztahy, které citované zdroje uvádí k výpočtu vzpěrné únosnosti, resp. k výpočtu vzpěrné délky.

$$P = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \left( m^2 + \frac{\beta l^4}{m^2 \pi^4 EI} \right) \quad [11]$$

$$\frac{l}{m} = \pi^4 \sqrt{\frac{EI}{\beta}} \quad [11]$$

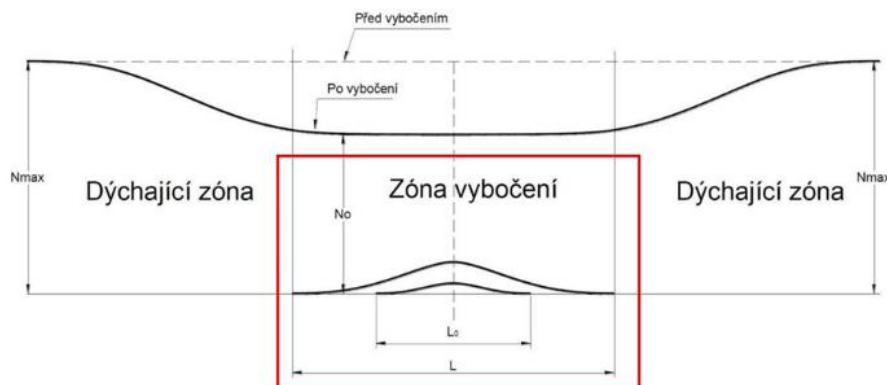
$$L_{crit}^2 = 4\pi^2 \sqrt{\frac{EI}{\beta}} \quad [4]$$

$$L = 3 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot EI}{F_0}} \quad [3]$$

Pro předběžné výpočty v rámci numerické analýzy bude použita normová výchylka 18 mm, výchylka upravená dle délky koleje ve výpočtu (když 25 m=18 mm, pak 10 m => 7,2mm). V rámci provedené analýzy není vyšetřován vliv zakřivení koleje vyplývající z trasování.

### 2.2. Výběr výpočetního programu

Pro numerická řešení vzpěru koleje bylo naší pracovní skupinou v minulosti zkoušeno několik běžných komerčně dostupných programů. Výstupy běžných výpočetních programů se pro daný účel ukázaly jako nedostatečné. Na základě předložených požadavků byl po konzultaci s kolegy z katedry mechaniky Fakulty stavební ČVUT doporučen program oofem.org. Jedná se o výpočetní software vyvíjený katedrou mechaniky Fakulty stavební ČVUT jako open source program, který umožňuje provádění pokročilých numerických úloh.



Obrázek 2: Bezстыková kolej, zóna a charakter vybočení [7].

```

Príkazový řádek
oofem
Copyright (C) 1994-2024 Borek Patzak

Options:
-v prints oofem version
-f (string) input file name
-r (int) restarts analysis from given step
-ar (int) restarts adaptive analysis from given step
-l (int) sets threshold for log messages (Errors=0, Warnings=1,
Relevant=2, Info=3, Debug=4)
-rn turns on renumbering
-go (string) redirects the standard output stream to given file
-qe (string) redirects the standard error stream to given file
-c creates context file for each solution step

Copyright (C) 1994-2024 Borek Patzak
This is free software; see the source for copying conditions. There is NO
warranty; not even for MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

```

Obrázek 3: Rozhraní programu oofem.org.

### 2.3. Nastavení výpočtu

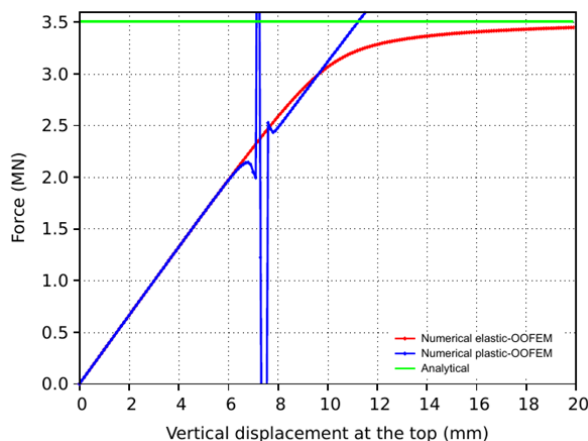
Byla použita formulace výpočtu dle teorie Updated Lagrange namísto základního nastavení konečných deformací, které při výpočtu generovaly řadu problémů. Nastavení výpočtu „StaticStructural“ v programu oofem.org, která podle úpravy teorií Updated Lagrange umožňuje velké posuny a malé rotace. Zatížení modelovaného prvku je řešeno formou předepsané deformace narůstající v jednotlivých krocích (počet a velikost zatěžovacího kroku je volen s ohledem na tuhost pruzin modelu).

Při nastavení výpočtu bylo uvažováno se vzorkem koleje o délce 9.6 m. Stabilizační účinky pražců byly uvažovány formou příčné působících pruzin ve vzdálenosti  $u=0,6m$  o hodnotě příčného odporu  $7kN/m$ . Sinová půlvlna kritického tvaru (před vybočením) má dle analytického řešení délku 3,47 m. Pro další postup byla délka koleje zaokrouhlena na hodnotu 10,0m.

V rámci použitého výpočtu v programu oofem.org byly pruziny s tuhostí  $K$  reprezentovány formou prvků „Truss“ (1D prvek přenášející pouze osovou sílu) s příslušnými parametry  $EA/L$ . Použité parametry (Plocha  $A$ , modul pružnosti  $E$  a délka prvku  $L$ ) byly voleny tak, aby bylo dosaženo požadovaného průběhu a hodnot příčného odporu koleje. Průběh tuhosti pruzin je předložen v kapitole 2.5.

Na základě níže uvedených průběhů příčného odporu pražce (bilinéární průběh s plastickou deformací), bylo třeba omezit i příčnou tuhost kolejnice. Plastický průběh příčného odporu je v programu oofem.org modelováno pomocí Misesova plastického materiálu.

V níže uvedeném grafu je srovnání analytického a numerického řešení (elastický a plastický charakter pruzin). Analytické řešení [11] je reprezentováno zelenou limitou. Elastické řešení bez omezení tuhosti pruziny reprezentuje červená křivka. Průběh plastického řešení je uveden modrou křivkou. Na základě grafu jsou patrné nedostatky řešení pomocí analytického a elastického řešení. Z průběhu plastického řešení vyplývá, použitelnost tohoto řešení okolo hodnoty 2,15 MN (tlakové síly v koleji), další průběh je zatížen ztrátou konvergence výpočtu (stav ztráty stability).



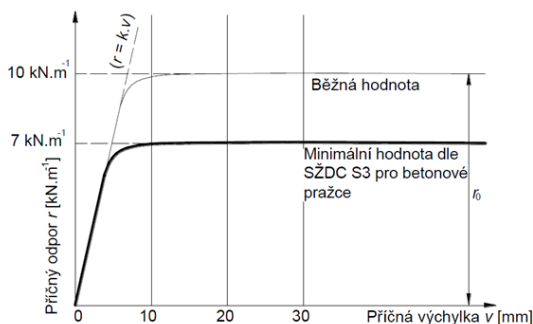
Obrázek 4: Porovnání výpočetních přístupů

Výstupy výše uvedených výpočtů jsou porovnány za účelem popsání hlavních trendů. Na základě tohoto postupu je možné obhájit či vyvrátit prvotní myšlenku, pracovní hypotézu větší vzpěrné odolnosti proti vzpěru při zvětšení příčného odporu koleje.

Dle výsledků této analýzy je možné definovat další požadavky na experimentální program. V případě, že budou získané výsledky a z nich plynoucí trendy dostatečně prokazatelné, je možné stanovit případné úlevy v rozsahu limitních hodnot napětí v koleji při interakci kolejí-most.

### 2.4. Vstupní hodnoty

V této kapitole jsou uvedeny zdroje pro výběr vstupních hodnot jednotlivých výpočtů. Protože dosud nejsou dostupné konkrétní výsledky experimentálního projektu byly pro prvotní výpočty použity hodnoty v historii prezentovaných výzkumných zpráv a předpisů SŽ.

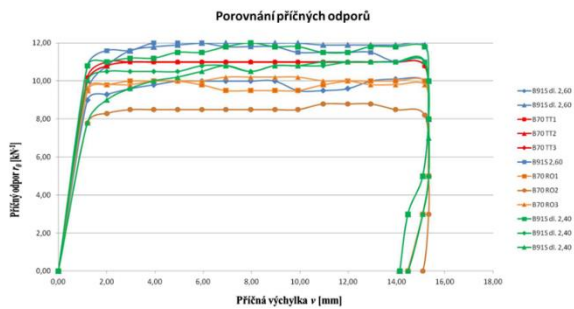


Obrázek 5: Průběh příčného odporu dle deformace [7] a [5].

Volba vstupních hodnot pro sestavení referenčního výpočtu vycházela z předpisů Správy železnic S3 a S3/2. Ilustrační obrázky shrnující poznatky těchto předpisů byly přejaty z práce Ing. Miroslavy Hružíkové, Ph.D. z VUT (Bezстыková kolej – Teorie a zřizování ze dne 7.1.2015).

Pro výpočty vedoucí k nastavení řešiče použitého programu byly (na základě výše uvedeného obrázku a předpisu SŽ S3) použity následující hodnoty:

- Minimální hodnota příčného odporu – 7 kN/m
- Deformace při přechodu na „plastickou“ větev – 5 až 7 mm



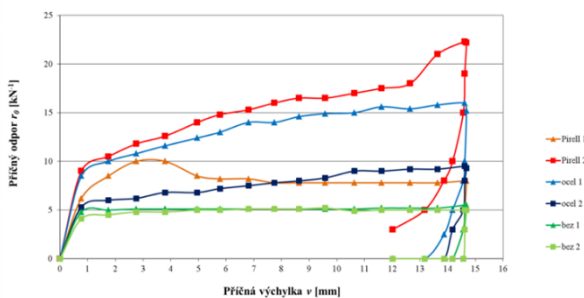
Obrázek 6: Průběh příčného odporu dle výzkumné zprávy VUT [8].

Hodnoty pro předběžné výpočty vycházejí ze zprávy „Měření a porovnávání příčných odporů pražců“ zpracované Fakultou stavební VUT, ze dne 28.6.2023.

Prezentované hodnoty výše uvedené zprávy shrnuje obrázek 6. Pro předběžné výpočty byly použity následující hodnoty.

- Průměrná hodnota příčného odporu – 10 kN-1
- Rozsah naměřených hodnot - cca  $\pm 20\%$
- Deformace při přechodu na „plastickou“ větev - 1 až 2 mm

Porovnání příčných odporů pražců s kotvou Pirell, standardní ocelovou kotvou a bez kotvy



Obrázek 7: Průběh příčného odporu s pražcovými podložkami dle výzkumné zprávy VUT [9].

Dalším podkladem pro vstupní hodnoty předběžných výpočtů je výzkumná zpráva „Měření příčného odporu pražců s novými pražcovými kotvami na zkušebním stěně“ zpracovaná Fakultou stavební VUT ze dne 15.12. 2017.

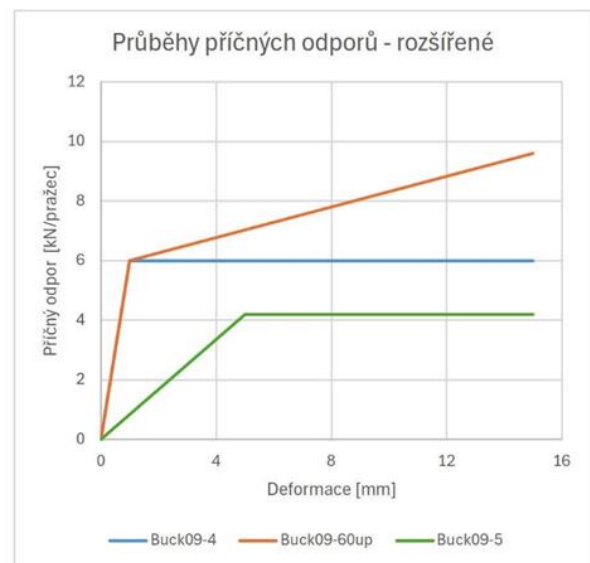
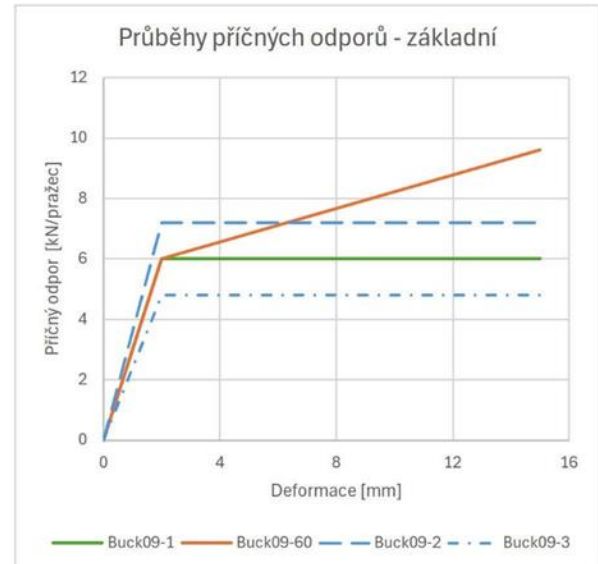
Pro naladění výpočtů reprezentující vliv pražcových kotev byly použity následující hodnoty:

- Hodnota příčného odporu na konci „elastické“ větve – cca 10 kN-1
- Konečná hodnota příčného odporu – cca 15 kN-1
- Deformace na konci „elastické“ větve – 1 až 2 mm
- Maximální měřená deformace – cca 15 mm

## 2.5. Shrnutí vstupních hodnot

Níže uvedená tabulka shrnuje vstupní hodnoty jednotlivých výpočtů, které byly dosud provedeny v rámci numerické analýzy. Zvolené kombinace parametrů odpovídají snahám o popsání fenoménů vyjmenovaných v předchozí kapitole. Tabulka dále shrnuje hodnoty kritické síly (síla při ztrátě stability koleje) pro jednotlivé konfigurace.

Grafické znázornění průběhu příčného odporu pro vybrané varianty výpočtu je uvedeno na následujících obrázcích. Zelené a modré křivky představují průběh příčného odporu pro běžnou kolej (průměrná hodnota, odchylky, rozdílná tuhost). Oranžové křivky reprezentují příčný odpor s použitím pražcových kotev.



Obrázek 8: Průběh příčných odporů.

Tabulka 1: *Shrnutí vstupních parametrů.*

VÝPOČET KRITICKÉ SÍLY - DLE PŘEDBĚŽNÝCH HODNOT							
Model	Imperf.*	Deform.**	Příčný odpor		Tuhost	Ncrit	okolej
	[mm]	[mm]	[kN/m]	[kN]	[MN*m-2]	[MN]	[MPa]
Buckling09-1	18.0	2.0	10.0	6.0	3.000	<b>2.883</b>	188.0
Buckling09-2	18.0	2.0	12.0	7.2	3.600	<b>3.277</b>	213.6
Buckling09-3	18.0	2.0	8.0	4.8	2.400	<b>2.485</b>	162.0
Buckling09-4	18.0	1.0	10.0	6.0	6.000	<b>3.027</b>	197.3
Buckling09-5	18.0	5.0	7.0	4.2	0.840	<b>2.149</b>	140.1

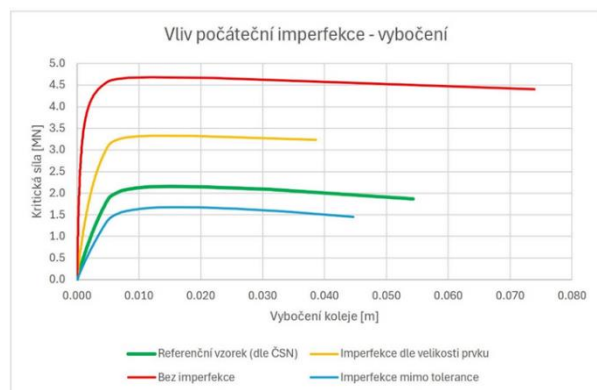
VÝPOČET KRITICKÉ SÍLY - VLIV PRAŽCOVÝCH KOTEV							
Model	Imperf.*	Deform.**	Příčný odpor		Tuhost	Ncrit	okolej
	[mm]	[mm]	[kN/m]	[kN]	[MN*m-2]	[MN]	[MPa]
Buckling09-60	18.0	2.0	10.0	6.0	2.723	<b>3.211</b>	209.3
		15.0	16.0	9.6	0.277		
Buckling09-60up	18.0	1.0	10.0	6.0	5.743	<b>3.323</b>	216.6
		15.0	16.0	9.6	0.257		
Buckling09p-60	18.0	2.0	17.8	10.7	4.811	<b>3.342</b>	217.9
		15.0	29.5	17.7	0.538		
Buckling09p-60up	18.0	1.0	17.8	10.7	10.200	<b>3.443</b>	224.4
		15.0	29.5	17.7	0.500		

### 3. VÝSLEDKY

#### 3.1. Vliv počáteční imperfekce

Prvním krokem bylo ověření vlivu počáteční imperfekce – geometrické přesnosti koleje, pro naladění výpočtu dle použité referenční hodnoty.

V případě „téměř“ přímé koleje je únosnost cca dvojnásobná oproti koleji s maximální vodorovnou odchylkou přípustnou dle ČSN 73 6360-2 (v případě délky výchylky 10 m). Naopak extrémní výchylka (1,5x větší hodnota) přináší snížení o 22 % oproti maximálnímu stavu dle ČSN. Dle předpokladu dochází při zvýšení počáteční výchylky ke snížení vzpěrné únosnosti prvku. Hodnoty výsledků pro níže uvedený graf viz tabulka 2.



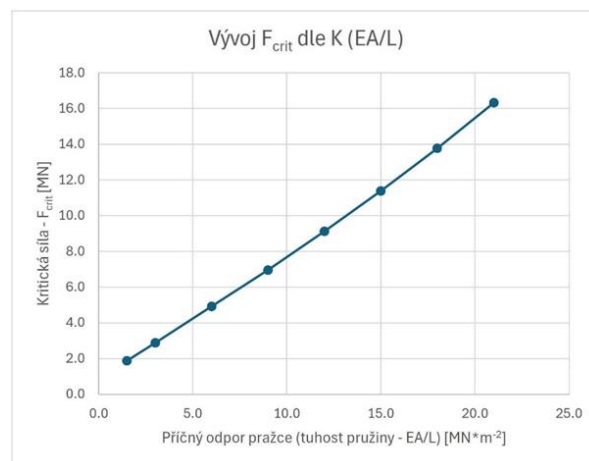
Obrázek 9: *Porovnání výpočetních přístupů*

#### 3.2. Vliv příčného odporu

Hlavním zkoumaným parametrem této analýzy je vliv příčného odporu, respektive příčná tuhost koleje. Níže přiložený obrázek reprezentuje vývoj kritické síly v n-násobcích referenční tuhosti koleje (n=0,5;1;2;3;4;5;6). Referenční tuhost odpovídá odporu 10kN/m při deformaci 2 mm.

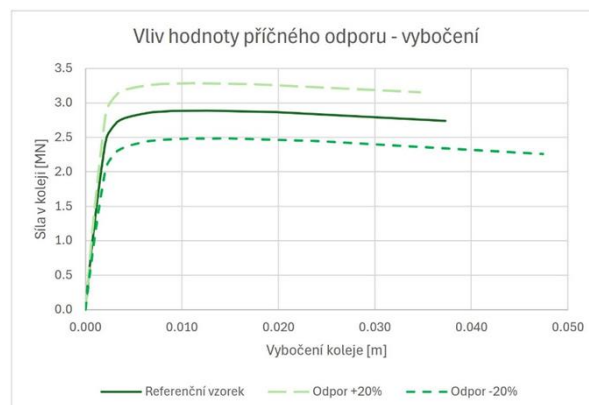
Se zvyšující se příčnou tuhostí koleje dochází ke zvýšení příslušné kritické síly. Průběh je téměř lineární. Se zdvojnásobe-

ním tuhosti dochází k nárůstu kritické síly cca o 70 % (při zvýšení příčného odporu koleje z 10 na 20kN/m dojde ke zvýšení únosnosti o 70 %).



Obrázek 10: *Vývoj kritické síly v závislosti na příčné tuhosti*

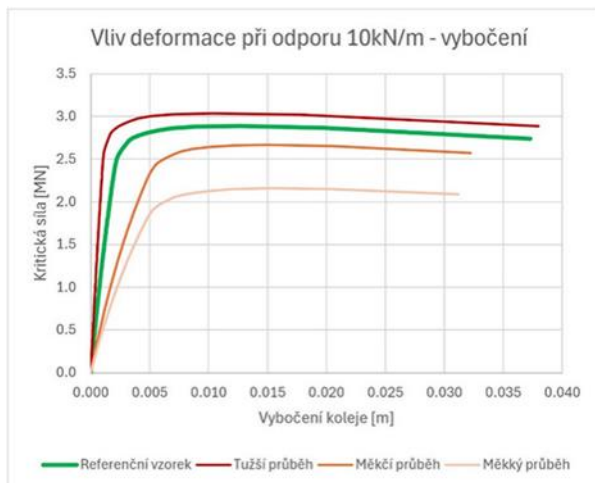
V dalším kroku byly stanoveny konkrétní hodnoty kritické síly odpovídající jednotlivým konfiguracím příčných odporů koleje. První sada výsledků ukazuje vliv odchylky příčného odporu koleje o +/-20%, z níž vyplývá změna kritické síly o cca 14%. Hodnoty viz tabulka 3.



Obrázek 11: *Vliv hodnoty příčného odporu*

Druhý krok porovnává vliv hodnoty deformace, při které dochází k maximální hodnotě příčného odporu (konec „elastické“ větve). Referenčními výpočty jsou modely s příčným odporem dosaženým při deformaci 2,0mm.

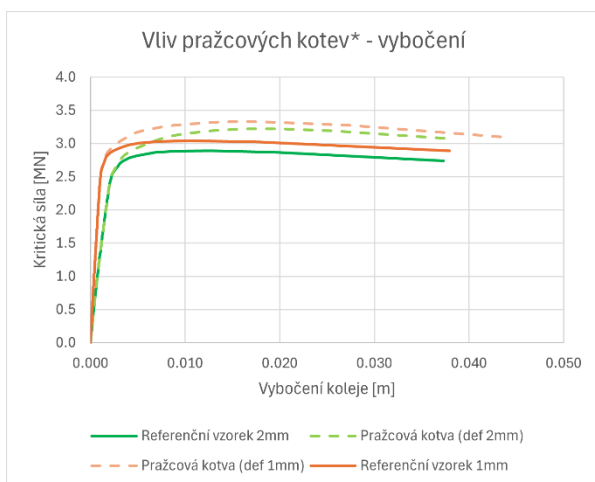
Při dosažení finálního odporu při deformaci 1,0 mm dochází ke zvýšení kritické síly o cca 5 %. Při dosažení finální hodnoty příčného odporu při 5 mm naopak dochází ke snížení kritické síly o cca 25 %. Při pozvolnějším nebo naopak strmějším nárůstu příčného odporu koleje o 1 mm dochází ke změně únosnosti cca 5 %. Obdobně jako v předchozím kroku je tato změna patrnější u koleje s menší absolutní hodnotou příčného odporu. Hodnoty viz tabulka 4.



Obrázek 12: Vliv deformace při konstantním odporu

### 3.3. Vliv pražcových kotev

Posledním krokem předběžných výsledků numerické analýzy je popis vlivu pražcových kotev na chování bezстыkové koleje vystavené účinkům vzpěru. V následující grafice jsou představeny stavy koleje bez a s pražcovými kotvami. Hodnoty příčných odporů byly prověřovány při deformaci 1 a 2 mm. Bilineární průběh se zpevněním u pražcových kotev byl zvolen za základě výzkumné zprávy „Měření příčného odporu pražců s novými pražcovými kotvami na zkušebním stendu“.



Obrázek 12: Vliv pražcových kotev

Aplikací pražcové kotvy dochází na základě vytlačovacích zkoušek k nárůstu příčného odporu o cca 60 %, zatímco na kritické síle se přítomnost pražcové kotvy projeví cca 10 %. V porovnání s počátkem této kapitoly se jedná o významný pokles případného přínosu. Důsledek tohoto fenoménu je v tuto chvíli přisuzován ztráty stability před vyčerpáním příčného odporu – tomuto poznatku bude v dalším postupu věnována bližší pozornost. Hodnoty viz tabulka 5.

### 3.4. Vliv podpražcových podložek

Hodnoty vlivu podpražcových podložek na příčný (případně podélný) odpor koleje jsou aktuálně v procesu vyhodnocování experimentálního programu a jejich výsledky budou zohledněny po jeho dokončení. Aktuální příspěvek předpokládá vliv podpražcových podložek na příčný odpor v rozmezí  $\pm 20\%$  hodnoty příčného odporu běžné koleje.

## 4. SHRNUTÍ

V rámci numerické analýzy byl proveden srovnávací výpočet, jehož výsledky popisují základní fenomény odezvy bezстыkové koleje na účinky vzpěru. Hodnota počáteční imperfekce byla volena dle příslušné ČSN [10]. Hodnoty příčných odporů koleje byly přečteny z platných předpisů SŽ [5] [6], závěrů výzkumných zpráv [8] [9] a hodnot uvedených v tomto příspěvku (kapitola 2.4). Dílčí výsledky a příslušné závěry jsou uvedeny v kapitolách výše. V následujících odrážkách je uvedeno heslovité shrnutí klíčových poznatků.

- o Hodnota počáteční imperfekce koleje se významně podílí na vzpěrné únosnosti
- o Hodnota příčného odporu přímo ovlivňuje hodnotu kritické síly
- o Dvojnásobný odpor = nárůst kritické síly o 70%
- o Změna hodnoty příčného odporu se u „měkčích“ kolejí projeví více
- o Při stejné absolutní hodnotě příčného odporu má vliv při jaké deformaci k danému odporu dochází (tuhost pružiny)
- o Vliv pražcových kotev je podle aktuálních výsledků příznivý, leč procentuálně malý

## 5. ZÁVĚR

S ohledem na aktuální úroveň rozpracovanosti, je nutné na výsledky pohlížet jako na předběžné výsledky poukazující na charakter odezvy a představení trendů.

Numerická analýza bude dopracována po vyhodnocení dat z experimentálního měření, které probíhalo v uplynulých měsících na dočasném zkušebním úseku v Praze Bubnech.

Na základě aktuálních výsledků lze prezentovat následující pracovní závěry:

- o Zvýšení příčného odporu koleje o 20 % vede k nárůstu kritické síly o 13,8 %.
- o Aplikace pražcových kotev má potenciál zvýšit kritickou sílu o 12 %, ve stavu těsně před ztrátou stability, avšak před jejím vybočením dochází k významným deformacím.
- o Postup výpočtu zohledňující vliv pražcových kotev bude nutno dále podrobit bližší analýze případně kontrole vstupů a použitých nástrojů pro ověření získaných výsledků.

Tabulka 2: *Vliv počáteční deformace.*

Popis	parametr	Fcrit	okolej	% F	u(t)	u (y)	D def y	model
	imp. y [mm]	[MN]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	
Referenční vzorek (dle ČSN)	18.00	<b>2.161</b>	140.8	-	7.00	15.22	-	<i>Buckling09-new</i>
Imperfekce dle velikosti prvku	7.20	<b>3.330</b>	217.1	54.1%	10.50	12.25	-2.97	<i>Buckling09-imp</i>
Bez imperfekce	1.00	<b>4.686</b>	305.5	116.9%	14.70	11.95	-3.27	<i>Buckling09-imp0</i>
Imperfekce mimo tolerance	27.00	<b>1.678</b>	109.4	-22.4%	5.60	16.15	0.93	<i>Buckling09-max</i>

Tabulka 3: *Vliv hodnoty příčného odporu.*

Popis	parametr	Fcrit	okolej	% F	ux	uy	model
	R [kN]	[MN]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	
Referenční vzorek	6.0	2.890	188.4	-	9.40	37.28	<i>Buckling09-1</i>
Odpor +20%	7.2	3.288	214.3	13.76%	10.60	34.65	<i>Buckling09-2</i>
Odpor -20%	4.8	2.486	162.1	-13.98%	8.20	47.41	<i>Buckling09-3</i>

Tabulka 4: *Vliv deformace při konstantním odporu.*

Popis	parametr	Fcrit	okolej	% F	ux	uy	model
	u [mm]	[MN]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	
Referenční vzorek	2.0	2.890	188.4	-	9.20	12.67	<i>Buckling09-1</i>
Tužší průběh	1.0	3.040	198.1	5.17%	9.60	10.34	<i>Buckling09-4</i>
Měkčí průběh	5.0	2.669	174.0	-7.66%	8.60	14.88	<i>Buckling09-5</i>
Měkký průběh	7.0	2.161	140.8	-25.25%	7.00	15.22	<i>Buckling09-new</i>

Tabulka 5: *Vliv pražcových kotev.*

Popis	parametr	Fcrit	okolej	% F	ux	uy	model
	R [mm]	[MN]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	
Referenční vzorek 2mm	2	2.890	188.4	-	9.20	12.67	<i>Buckling09-1</i>
Pražcová kotva (def 2mm)	2 (PK)	3.222	210.0	11.47%	10.40	16.76	<i>Buckling09-60</i>
Referenční vzorek 1mm	1	3.040	198.1	-	9.60	10.34	<i>Buckling09-4</i>
Pražcová kotva (def 1mm)	1 (PK)	3.330	217.1	9.54%	10.70	16.09	<i>Buckling09-60up</i>

## ACKNOWLEDGEMENTS

Tento příspěvek vznikl za podpory grantu č. SGS25/037/OHK1/1T/11 a výzkumného úkolu Správy Železnic č. E616-S-5359/2023

## References

- [1] Foglar, Vrba, Bláha, Bezstyková kolej na mostech vysokorychlostních a konvenčních tratí, Komplexní řešení - část A, výzkumná činnost pro Správu železnic obj. č. 22/801130003, Praha 2023
- [2] CALÇADA Rui, DELGADO Raimundo & MATOS António Campos e, GOICOLEA José & GABALDÓN Filipe. Track-bridge interaction on high-speed railways. London: CRC Press, 2009. ISBN 978-0-415-45774-3
- [3] LICHTBERGER, Bernhard. Track compendium: track system, substructure, maintenance, economics. 2nd edition, completely revised. Hamburg: DVV Media Group GmbH Eurailpress, 2011. ISBN 978-3-7771-0421-8.
- [4] ESVELD, Coenraad. Modern railway track. 2nd ed. Zaltbommel: MRT-Productions, c2001. ISBN 90-800324-3-3.
- [5] SŽDC S3 Železniční svršek, Praha, SŽ, 2020
- [6] SŽDC S3/2 Bezstyková kolej, Praha, SŽ, 2013
- [7] Hruzíková, Bezstyková kolej – Teorie a zřizování, Věda pro život, život pro vědu, projekt OPVK č. CZ.107/2.3.00/45.0029, Brno 2015
- [8] Svoboda, Valehrach, Horák, Měření a porovnávání příčných odporů pražců, výzkumná zpráva pro Správu železnic obj. č. 59501/10-KNPERs, Brno, 2023
- [9] Svoboda, Hruzíková, Dušek, Měření příčného odporu pražců s novými pražcovými kotvami na zkušebním stendu, výzkumná zpráva pro Pirell s.r.o. č. SR12757199, Brno, 2017
- [10] ČSN 73 6360-2 Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha - Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba, Praha, 2009
- [11] TIMOSHENKO, Stephen P a GERE, James M. Theory of elastic stability. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Co., 1961.