



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB

INSTITUTE OF RAILWAY STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

**BEZSTYKOVÁ KOLEJ V OBLOUCÍCH MALÝCH
POLOMĚRŮ**

CONTINUOUS WELDED RAIL IN TIGHT CURVES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kateřina Peřinová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. OTTO PLÁŠEK, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav železničních konstrukcí a staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Kateřina Peřinová
Název	Bezстыková kolej v obloucích malých poloměrů
Vedoucí práce	doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ESVELD, C., Modern Railway Track. Second Edition. Delft, MRT – Production, 2001, 2nd ed. 654 p. ISBN 90-800324-3-3

LICHTBERGER, B. Handbuch gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. Hamburg: Tetzlaff, 2003. ISBN 38-781-4803-8

UIC Code 720R Laying and Maintenance of CWR Track

PLÁŠEK, O., ZVĚŘINA, P., SVOBODA, R., MOCKOVČIAK, M.: Železniční stavby. Železniční spodek a svršek. 1. vyd., Brno: CERM, 2004. 291 str. ISBN 80-214-2621-7

Předpis SŽDC S3 Železniční svršek

Předpis SŽDC S3/2 Bezстыková kolej

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem práce bude prozkoumat vliv poloměru oblouku na stabilitu bezстыkové koleje, a to zejména pro ve směrových obloucích s poloměry menšími než 300 m.

Diplomová práce bude zaměřena na:

- sestavení přehledu současného stavu poznání v oblasti stability bezстыkové koleje
- popis, sestavení a řešení stability bezстыkové koleje pomocí matematických a příp. numerických modelů
- souhrn výsledků a doporučení vyplývajících ze statických analýz

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Vedoucí práce	doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
Autor práce	Bc. Kateřina Peřinová
Škola	Vysoké učení technické v Brně
Fakulta	Stavební
Ústav	Ústav železničních konstrukcí a staveb
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Název práce	Bezстыková kolej v obloucích malých poloměrů
Název práce v anglickém jazyce	Continuous welded rail in tight curves
Typ práce	Diplomová práce
Přidělovaný titul	Ing.
Jazyk práce	Čeština
Datový formát elektronické verze	PDF

Abstrakt práce	Diplomová práce se zabývá vlivem poloměru směrového oblouku na stabilitu bezстыkové koleje. Je sestaven přehled současného stavu poznání v oblasti bezстыkové koleje. V praktické části je vytvořen model traťového úseku, ve kterém se hodnotí vliv některých parametrů na ztrátu stability bezстыkové koleje a je porovnáván s analytickým výpočtem.
Abstrakt práce v anglickém jazyce	The diploma thesis deals with the curve radius influence on lateral stability of continuous welded rail. It is presented the overview of present state of knowledge in the field of stability of continuous welded rail. In practical part is created the model of a track section. The influence of some parameters on loss of stability of CWR was studied. The results it are compare with the analytic analysis.
Klíčová slova	Bezстыková kolej, oblouky malých poloměrů, vybočení koleje, zatížení koleje teplotou, model železniční trati, imperfekce, příčný odpor.
Klíčová slova v anglickém jazyce	Continuous welded rail, tight curves, buckling of the track, loading of the track with temperature, model of railway track, deviation of the track, lateral track resistance.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem poloměru směrového oblouku na stabilitu bezстыkové koleje. Je sestaven přehled současného stavu poznání v oblasti bezстыkové koleje. V praktické části je vytvořen model traťového úseku, ve kterém se hodnotí vliv některých parametrů na ztrátu stability bezстыkové koleje a je porovnáván s analytickým výpočtem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezстыková kolej, oblouky malých poloměrů, vybočení koleje, zatížení koleje teplotou, model železniční trati, imperfekce, příčný odpor.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the curve radius influence on lateral stability of continuous welded rail. It is presented the overview of present state of knowledge in the field of stability of continuous welded rail. In practical part is created the model of a track section. The influence of some parameters on loss of stability of CWR was studied. The results it are compare with the analytic analysis.

KEYWORDS

Continuous welded rail, tight curves, buckling of the track, loading of the track with temperature, model of railway track, deviation of the track, lateral track resistance.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Kateřina Peřinová *Bezstyková kolej v obloucích malých poloměřů*. Brno, 2018. 51 s., 23 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2018

Bc. Kateřina Peřinová

autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 12. 1. 2018

Bc. Kateřina Peřinová

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala doc. Ing. Ottu Pláškoví, Ph.D. za jeho cenné rady a čas, který mi věnoval při vedení diplomové práce. Poděkování patří také doc. Ing. Ivanu Němcovi CSc. za konzultaci při tvorbě numerického modelu.

V Brně dne 12. 1. 2018

Bc. Kateřina Peřinová

autor práce

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Současné poznatky.....	10
2.1	Úvod.....	10
2.1.1	Příčný odpor kolejového lože	12
2.2	Metody řešení stabilitního problému BK v přímé.....	13
2.2.1	Klasické Eulerovo řešení	13
2.2.2	Energetické řešení.....	18
2.3	Dýchání koleje v oblouku	20
2.4	Pozorování chování bezstykové koleje v obloucích malých poloměrů	20
3	Cíle práce	22
4	Numerický model	23
4.1	Sestavení modelu	23
4.2	Zatížení.....	26
4.3	Globální parametry modelu koleje.....	27
5	Zpracování výsledků.....	27
5.1	Úvod.....	27
5.2	Ztráta stability	27
5.2.1	Stabilitní analýza pomocí vestavěných algoritmů výpočtového programu.....	28
5.2.2	Ztráta stability při konkrétní hodnotě příčného posunu.....	29
5.2.3	Ztráta stability při překročení rychlosti posunu nebo rychlosti nárůstu osově síly v závislosti na teplotním přírůstku.....	30
5.3	Směrové oblouky bez počátečních imperfekcí	30
5.4	Směrové oblouky s počáteční imperfekcí	33
6	Závěr	47
	Literatura.....	48
	Seznam použitých symbolů, veličin a zkratk.....	49
	Seznam příloh	51

1 Úvod

Zřizování bezстыkové koleje je v dnešní době standard. Oproti stykované koleji zvyšuje cestovní komfort, snižuje emise a snižuje náklady na údržbu.

U projektování nových tratí a při rozsáhlejších rekonstrukcích je snaha o navržení co největších poloměrů směrových oblouků. V mnoha případech, zejména v zástavbě nebo v místech se složitými topografickými poměry, se však bez oblouků malých poloměrů neobejdeme. Také samozřejmě chceme bezстыkovou kolej zřizovat na dříve vybudovaných regionálních tratích, kde se poloměry směrových oblouků nezděravka blíží k mezní nebo minimální hodnotě.

Z toho vyplývá důležitost zaměřit se na téma stability směrových oblouků malého poloměru v bezстыkové koleji. V teplých letních měsících totiž hrozí ztráta stability, která se projeví vybočením koleje. V současné době jsou v praxi učiněna běžná opatření jako je nadvyšování a rozšiřování kolejového lože nebo užívání pražcových kotev. Nově vyvinutou a do koleje vkládanou konstrukcí, která zvyšuje příčnou stabilitu koleje, jsou Y-pražce.

Příčinou většiny vybočení je dynamické zatížení. Statická analýza však dokáže mechanismus vybočení ukázat názorněji [1].

Za účelem pochopení chování železniční trati v oblouku byl v programu, který je založen na bázi metody konečných prvků, sestaven numerický model. Ten byl zatěžován kladným teplotním přírůstkem, při kterém se zkoumal vliv některých parametrů na stabilitu koleje. Mezi pozorované parametry v první řadě patří poloměr směrového oblouku, dále profil použitých kolejnic, různý průběh příčného odporu kolejového lože a počáteční imperfekce směrové geometrie.

Výstupem práce jsou přehledné grafy, z nichž vyplývají závislosti na jednotlivých složkách. Závěrem práce je doporučení pro další pokračování v tomto tématu. Jedná se zejména o námět na rozvoj modelu, čímž by se jeho chování mělo více přiblížit realitě.

2 Současné poznatky

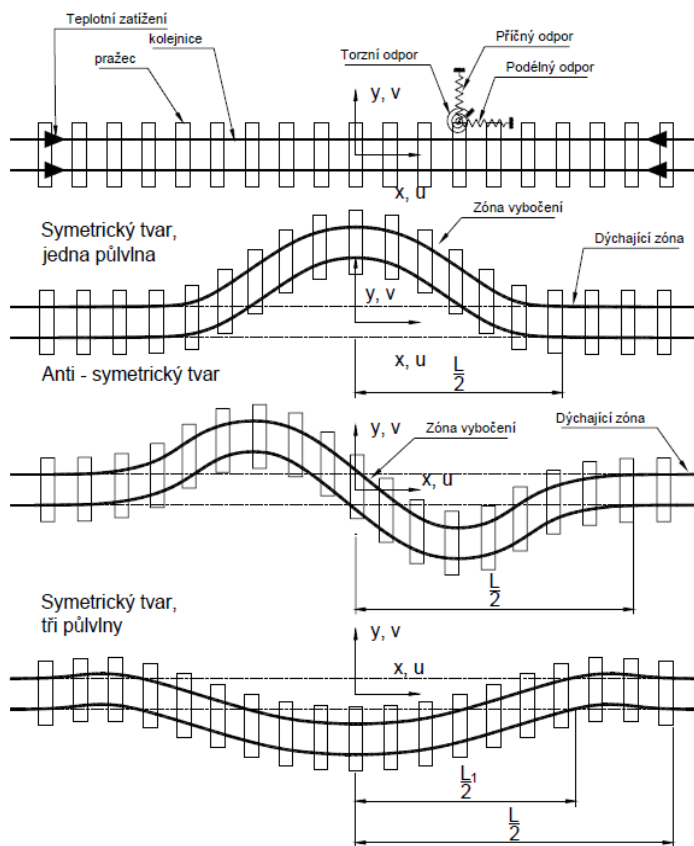
2.1 Úvod

Odstraněním kolejnicového styku a zřízením bezстыkové koleje dojde ke snížení hluku a dynamického namáhání. Dále se sníží náklady na údržbu až o 40 % a zvýší se životnost železničního svršku.

Bezстыková kolej se řídí v ČR *Předpisem S3/2: Bezстыková kolej*. Z hlediska namáhání koleje teplotou rozlišujeme dvě poruchy, a to lom kolejnic, ke kterému dochází v zimním období, a vybočení koleje, které hrozí v létě.

Neutrální teplota se při zřízení bezстыkové koleje rovná upínací teplotě. Vlivem podbíjení, odstraňování závad koleje nebo špatného stavu upevnění, který může mít za následek putování kolejnic v podélném směru, se však neutrální teplota mění. K mírnému posunutí koleje v podélném směru může také dojít při různé teplotě z průběhu délky koleje, která bývá způsobena nerovnoměrným osluněním trati.

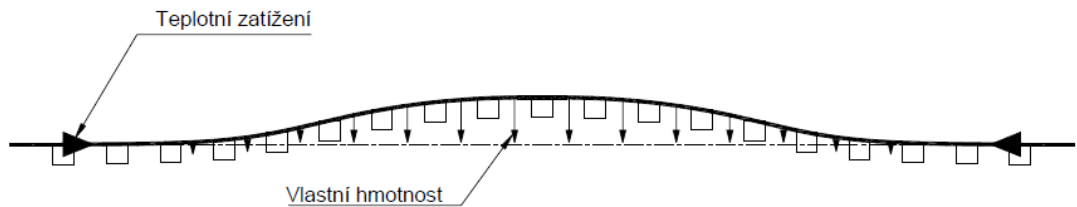
Při zvyšování teplotního zatížení dochází k nárůstu velikosti tlakových sil v kolejnicích, díky kterým je kolejový rošt namáhán na vzpěr. Po dosažení kritického teplotního přírůstku dojde ke ztrátě stability a vzápětí k vybočení koleje. Typické tvary tohoto jevu jsou znázorněny na obrázku 2.1. Jak je vidět, může dojít k různým průběhům, vlna deformace dokonce ani nemusí být symetrická kolem středového bodu. Výsledný tvar křivky vybočení se odvíjí zejména v závislosti na počátečních imperfekcích geometrické polohy koleje.



Obr. 2.1 Vybočení koleje ve vodorovné rovině [1]

Velikost výsledné boční výchylky se pohybuje v rozmezí 0,5-0,75 m a její délka bývá 8-20 m. Tato porucha je pro projíždějící vlak velmi nebezpečná, v drtivé většině případů končí vykolejením.

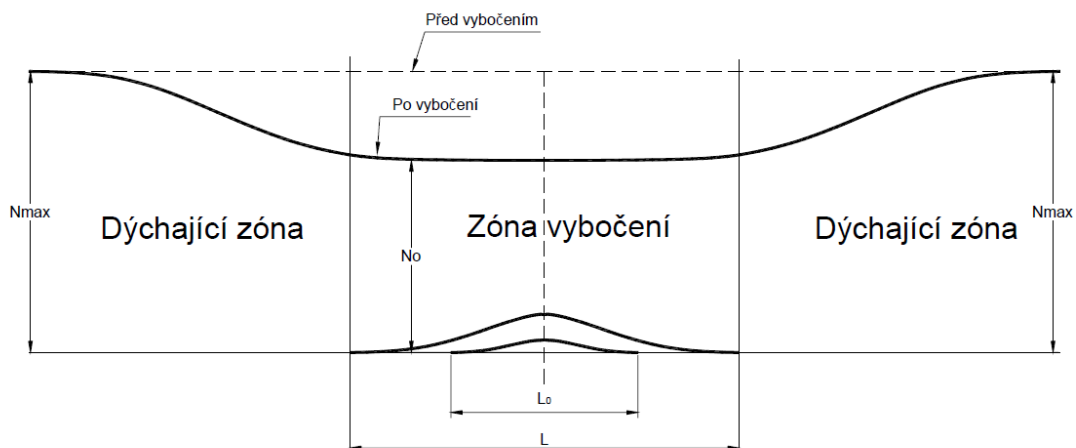
Vybočení ve svislé rovině nebývá časté, a to z důvodu tíhy koleje a také odporu proti vytažení koleje z kolejového lože. Pokud už k tomuto jevu nastane, kolej vybočí i ve vodorovné rovině.



Obr. 2.2 Vybočení koleje ve svislé rovině [1]

Významný vliv na vybočení koleje mají počáteční imperfekce. Experimenty i měření dokazují, že při dosažení kritické teploty T_{CR} dojde k náhlému a výraznému nárůstu boční výchylky až do doby, kdy je dosaženo nového rovnovážného stavu. Další přitěžování teplotou způsobuje znovu pouze postupný nárůst výchylek.

Při vybočení dojde v zóně vybočení k náhlému poklesu osových sil. Okolní zóny mají chování podobné jako u dýchajících konců. Situaci znázorňuje obrázek 2.3. [1]



Obr. 2.3 Průběh osových sil v koleji po vybočení [1]

2.1.1 Příčný odpor kolejového lože

Při nárůstu osových sil v kolejnicích brání vybočení příčný odpor pražců v kolejovém loži a vzpěrná a ohybová tuhost koleje.

Příčný odpor zajišťuje šterkové lože. Pomocí měření v terénu se ukázalo, že příčný odpor působí svou plnou hodnotou až při dosažení určitého posunu pražce. V některých výpočtech může být zahrnutý tzv. neproměnný odpor, který dosahuje hodnoty zhruba dvou třetin plného odporu. Pro odpor pražce jsou rozhodující vlastnosti kolejového lože, tedy druh šterkového lože, jeho stáří, tloušťka, profil a stupeň znečištění. Důležitá je i hmotnost pražce.

Odpor jednoho pražce v příčném směru k ose koleje lze vypočítat podle základního vzorce 2.1:

$$q = f * N_{SV} + K + S, \quad (2.1)$$

kde f ... koeficient tření, který závisí na velikosti posunu a svislém zatížení, včetně hmotnosti pražce

N_{SV} ... svislá síla uvažovaná na ložné ploše pražce

K ... odpor kolejového lože proti posunu čela pražce

S ... odpor z tření pražce o kolejové lože.

Při detailnější znalosti parametrů kolejového lože a pražců můžeme pro výpočet příčného odporu pražce použít vzorec 2.2 podle Broekmana:

$$q = N_{SV} * tg \varphi + \frac{l}{2} * \gamma * h^2 * \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2(\varphi + \varphi_1)} \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \varphi_1) * \sin \varphi}{\cos \varphi_1}} \right]^2, \quad (2.2)$$

kde φ ... úhel vnitřního tření kolejového lože

φ_1 ... úhel tření mezi pražcem a kolejovým ložem

l ... délka pražce

h ... výška pražce

γ ... objemová hmotnost kolejového lože.

Dále se příčný odpor betonového pražce může procentuálně rozdělit zhruba následovně:

45 % ... tření ložné plochy pražce o štěrk

35 % ... tření bočních stran pražce o štěrk

20 % ... odpor šterku, který je uložený za hlavami pražců [2].

Přičemž průměrná hodnota příčného odporu betonového pražce je 4,2 kN, to při rozdělení „u“ odpovídá příčnému odporu 7 kN na metr délky koleje. Pro dřevěný pražec je tato průměrná hodnota 3 kN, pro metr délky koleje je to pak 5 kN. Osazením pražcové kotvy se navíc zvýší příčný odpor pražce o nejméně 10 kN.

Podélné odpory dosahují v provozované koleji hodnoty nejméně 10 kN na 1 metr koleje, pro rozdělení „u“ je to 6,2 kN na pražec. Hodnoty svislých odporů proti nadzdvížení kolejového roštu se v literatuře neuvádějí. [3]

2.2 Metody řešení stabilitního problému BK v přímé

Pro výpočet kritického zatížení modelu konstrukce budou popsány dvě možnosti. První z nich je *Eulerovo řešení* a druhé *energetické řešení*.

2.2.1 Klasické Eulerovo řešení

V tomto případě jsou určována vlastní čísla diferenciální rovnice. Jde o nalezení takových čísel α , pro která existuje netriviální řešení homogenní diferenciální rovnice s homogenními okrajovými podmínkami.

Předpokládejme oboustranně vetknutý prut a průhyb v rovině xy. Kvůli čtyřem okrajovým podmínkám použijeme pro výpočet kritického zatížení diferenciální rovnici 4. řádu:

$$EI_z \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + N_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0, \quad (2.3)$$

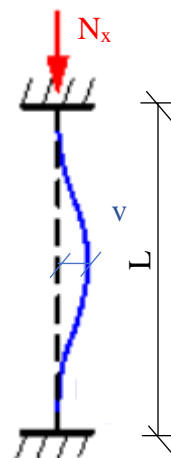
kde E ... Youngův modul pružnosti

I_z ... moment setrvačnosti k ose z

v ... boční výchylka

x ... souřadnice po délce prutu

N_x ... osová tlaková síla.



Obr. 2.4
Okrajové podmínky
pro BK [4]

Zavedeme substituci:

$$\frac{N_x}{EI_z} = \alpha^2 \quad (2.4)$$

a dosazením do rovnice 2.3 získáme:

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \alpha \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0. \quad (2.5)$$

Obecné řešení rovnice 4. řádu:

$$v(x) = C_1 + C_2 x + C_3 \cos \alpha x + C_4 \sin \alpha x, \quad (2.6)$$

kde C_1, C_2, C_3 a $C_4 \dots$ integrační konstanty.

Okrajové podmínky pro oboustranné vetknutí jsou pak následující:

$$v(0) = 0; \quad v(L) = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial x}(0) = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial x}(L) = 0 \quad (2.7)$$

a dosazením do rovnice 2.6 získáme soustavu rovnic:

$$v(0) = C_1 + C_3 = 0 \quad (2.8a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x}(0) = C_2 + \alpha C_4 = 0 \quad (2.8b)$$

$$v(L) = C_1 + C_2 L + C_3 \cos \alpha L + C_4 \sin \alpha L = 0 \quad (2.8c)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x}(L) = C_2 - \alpha C_3 \sin \alpha L + \alpha C_4 \cos \alpha L = 0 \quad (2.8d)$$

a jejich řešení:

$$C_1 = -C_3 \quad (2.9a)$$

$$C_2 = -\alpha C_4 \quad (2.9b)$$

$$C_3(\cos \alpha L - 1) + C_4(\sin \alpha L - \alpha L) = 0 \quad (2.9c)$$

$$-C_3(\alpha + \sin \alpha L) + C_4(\alpha \cos \alpha L - \alpha) = 0 \quad (2.9d)$$

$$\begin{vmatrix} \cos \alpha L - 1 & \sin \alpha L - \alpha L \\ -\alpha \sin \alpha L & \alpha(\cos \alpha L - 1) \end{vmatrix} = 0 \quad (2.10)$$

$$\alpha(\cos \alpha L - 1)^2 + \alpha(\sin \alpha L)(\sin \alpha L - \alpha L) = 0$$

$$2(1 - \cos \alpha L) - \alpha L \sin \alpha L = 0, \text{ resp.}$$

$$2 \sin^2 \frac{\alpha L}{2} - \alpha L \sin \frac{\alpha L}{2} \cos \frac{\alpha L}{2} = 0. \quad (2.11)$$

Podmínky stability jsou tedy:

$$\sin \frac{\alpha L}{2} = 0 \quad (2.12a)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha L}{2} = \frac{\alpha L}{2}. \quad (2.12b)$$

Podmínka 2.12a je splněna pro $\frac{\alpha L}{2} = n\pi$. Dosadíme zpět do rovnice 2.4 a pro jednu vlnu vybočení volíme $n = 1$. Z toho dostaneme následující kritickou sílu P_{cr} :

$$P_{cr,1} = 4EI_z \frac{\pi^2}{L^2}. \quad (2.13a)$$

Z podmínky 2.12b vychází nejmenší kořen $\frac{\alpha L}{2} = 4,49$, z čehož plyne kritická síla P_{cr} :

$$P_{cr,2} = 4EI_z \frac{\pi^2}{(0,7L)^2}. \quad (2.13b)$$

Z uvedených vztahů v rovnicích 2.13 rozhoduje ta kritická síla, která je menší, tedy podle vztahu 2.13a. [5]

Stabilita prutu v pružném sevření

V tomto případě použijeme jako základ rovnici 2.3. Na tuto situaci však navíc aplikujeme pružné winklerovské prostředí, kterým bude prut sevřený. Model odporu je definován jako:

$$q = k_y * v, \quad (2.14)$$

kde k_y je koeficient příčného odporu. Tímto získáme rovnici:

$$\frac{\delta^4 v}{\delta x^4} + \frac{N_x}{EI_z} * \frac{\delta^2 v}{\delta x^2} + \frac{k_y}{EI_z} * v = 0 \quad (2.15)$$

a po zavedení následujících substitucí

$$\frac{N_x}{EI_z} = \alpha^2 \quad (2.16a)$$

$$\frac{k_y}{EI_z} = 4\beta^4 \quad (2.16b)$$

dostaneme

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \alpha^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + 4\beta^4 v = 0. \quad (2.17)$$

Následně dosadíme

$$v = e^{\lambda x}; \quad \frac{\delta^2 v}{\delta x^2} = \lambda^2 e^{\lambda x}; \quad \frac{\delta^4 v}{\delta x^4} = \lambda^4 e^{\lambda x} \quad (2.18)$$

a získáme charakteristickou rovnici

$$\lambda^4 + \alpha^2 \lambda^2 + 4\beta^4 = 0. \quad (2.19)$$

Zavedeme substituci $\mu = \lambda^2$ a dostaneme následující

$$\mu^2 + \alpha^2 \mu + 4\beta^4 = 0, \quad (2.20)$$

řešením je

$$\mu_{1,2} = -\frac{\alpha^2}{2} \pm \sqrt{\frac{\alpha^4}{4} - 4\beta^4} \quad (2.21a)$$

$$\lambda_{1,2,3,4} = \pm \sqrt{-\frac{\alpha^2}{2} \pm \sqrt{\frac{\alpha^4}{4} - 4\beta^4}}. \quad (2.21b)$$

Zavedeme předpoklad 2.22a a imaginární jednotku ve 2.23a

$$\frac{\alpha^4}{4} - 4\beta^4 > 0 \quad (2.22a)$$

$$-\frac{\alpha^2}{2} \pm \sqrt{\frac{\alpha^4}{4} - 4\beta^4} < 0 \quad (2.22b)$$

$$\lambda_{1,2} = \pm i\gamma; \quad \lambda_{3,4} = \pm i\delta \quad (2.23a)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\alpha^2}{2} + \sqrt{\frac{\alpha^4}{4} - 4\beta^4}} \quad \delta = \sqrt{\frac{\alpha^2}{2} - \sqrt{\frac{\alpha^4}{4} - 4\beta^4}}, \quad (2.23b)$$

rovnici 2.15 pak splňuje funkce

$$v(x) = K_1 e^{i\gamma x} + K_2 e^{i\delta x} + K_3 e^{-i\gamma x} + K_4 e^{-i\delta x} \quad (2.24)$$

$$e^{it} = \cos t + i \sin t \quad e^{-it} = \cos t - i \sin t.$$

Dostaneme funkci ohybové čáry

$$v(x) = C_1 \cos \gamma x + C_2 \sin \gamma x + C_3 \cos \delta x + C_4 \sin \delta x. \quad (2.25)$$

Okrajové podmínky pro vetknutí

$$v(0) = 0; \quad v(L) = 0; \quad \frac{\delta^2 v}{\delta x^2}(0) = 0; \quad \frac{\delta^2 v}{\delta x^2}(L) = 0. \quad (2.26)$$

Druhou derivací rovnice 2.25 získáme

$$v''(x) = -C_1 \gamma^2 \cos \gamma x - C_2 \gamma^2 \sin \gamma x - C_3 \delta^2 \cos \delta x - C_4 \delta^2 \sin \delta x. \quad (2.27)$$

Dosazením okrajových podmínek:

$$C_1 + C_3 = 0; \quad -C_1 \gamma^2 + C_3 \delta^2 = 0, \quad (2.28)$$

vzhledem k tomu, že $\gamma \neq \delta$, jsou konstanty C_1 a C_3 rovny nule. Ze zbylých dvou podmínek:

$$C_2 \sin \gamma L + C_4 \sin \delta L = 0$$

$$-C_2 \gamma^2 \sin \gamma L - C_4 \delta^2 \sin \delta L = 0$$

$$\begin{vmatrix} \sin \gamma L & \sin \delta L \\ -\gamma^2 \sin \gamma L & -\delta^2 \sin \delta L \end{vmatrix} = (\gamma^2 - \delta^2) (\sin \gamma L) (\sin \delta L) = 0. \quad (2.29)$$

Za předpokladu platnosti nerovnosti 2.22a, bude rozdíl $\gamma^2 - \delta^2$ nenulový, pro splnění předchozího determinantu musí platit

$$\begin{aligned} \sin \gamma L = 0, \quad \text{tj. } \gamma L = n\pi \quad \text{nebo} \\ \sin \delta L = 0, \quad \text{tj. } \delta L = n\pi, \end{aligned} \quad (2.30)$$

tedy platí

$$\begin{aligned} \frac{\alpha^2}{2} \pm \sqrt{\frac{\alpha^4}{4} - 4\beta^4} &= n^2 \frac{\pi^2}{L^2} \\ \frac{\alpha^4}{4} - 4\beta^4 &= n^4 \frac{\pi^4}{L^4} - 2n^2 \frac{\pi^2 \alpha^2}{L^2} + \frac{\alpha^4}{4} \\ P_{cr} &= EI_Z n^2 \frac{\pi^2}{L^2} + k_z \frac{L^2}{n^2 \pi^2}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Na výsledné rovnici 2.31 si můžeme všimnout, že oproti rovnici 2.13a, má navíc pouze poslední člen, který vyjadřuje vliv pružného sevření. [5]

Stabilita dle [6]

V železničním prostředí jsou kritické hodnoty na mezi ztráty stability často počítány podle následujících vzorců:

$$\Delta T_{cr} = -\frac{8I}{\alpha_s A R v} + \sqrt{\left(\frac{8I}{\alpha_s A R v}\right)^2 + \frac{16Iq}{\alpha_s^2 A^2 d E v}} \quad (2.32)$$

$$P_{cr} = \alpha_s \Delta T_{cr} E A \quad (2.33)$$

$$L_{cr} = 2\pi \sqrt{\frac{2EI}{P_{cr}}}, \quad (2.34)$$

kde ΔT_{cr} ... kritický teplotní přírůstek

α_s ... teplotní roztažnost oceli ($1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

A ... plocha obou kolejnic

R ... poloměr oblouku

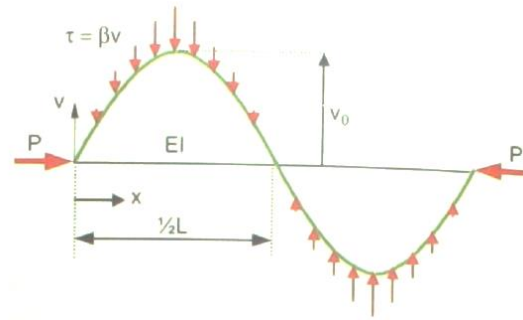
d ... rozdělení pražců

L_{cr} ... kritická délka počáteční imperfekce. [6]

2.2.2 Energetické řešení

Pro analýzu stability koleje se zpravidla využívá model přímého prutu. Prut je zatížený osovými tlakovými silami a je pružně podepřený příčně rozneseným odporem, který je úměrný příčné výchylce:

$$\tau = \beta_r v, \quad (2.35)$$



Obr 2.5 Vybočení prutu [7]

kde β_r je konstanta vyjadřující příčný odpor koleje proti posunutí. Předpokládaný tvar vybočení je sinusový. Hodnotu výchylky v konkrétním bodě lze spočítat jako:

$$v(x) = v_0 \sin \frac{2\pi x}{L} \quad (2.36)$$

K řešení tohoto problému je výhodné použít *energetickou metodu*, protože neposkytuje pouze rovnici rovnováhy, ale také určí, zda je konstrukce stabilní nebo labilní. Celková energie se skládá ze tří částí:

1. Ohybová energie prutu:

$$U_{beam} = \frac{1}{2} \int_0^L EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} dx \quad (2.37)$$

2. Deformační energie příčným tlakem:

$$U_{press} = \frac{1}{2} \int_0^L \beta_r v^2 dx \quad (2.38)$$

3. Práce vykonaná tlakovými silami:

$$W_P = \frac{1}{2} \int_0^L P \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 dx, \quad (2.39)$$

kde tlaková síla P je uvažovaná jako konstanta a osová deformace je zde zanedbaná. Celková energie je tedy:

$$U_{tot} = U_{beam} + U_{press} - W_P \quad (2.40)$$

Celkovou energii pro vlnovou délku dostaneme po dosazení rovnice (2.36) do rovnic (2.37), (2.38) a (2.39). Tyto tři rovnice následně shrneme do vztahu (2.40) a po drobných úpravách dostaneme:

$$U_{tot} = \frac{v_0^2 L}{4} \left[EI \left(\frac{2\pi}{L} \right)^4 + \beta_r - P \left(\frac{2\pi}{L} \right)^2 \right] \quad (2.41)$$

Poté položíme parciální derivaci $\frac{\partial U_{tot}}{\partial v_0}$ rovnu nule a získáme:

$$P = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} + \frac{\beta L^2}{4\pi^2} \quad (2.42)$$

Stabilita je zajištěná v případě, že $\frac{\partial^2 U_{tot}}{\partial v_0^2} > 0$, tedy:

$$P < \frac{4\pi^2 EI}{L^2} + \frac{\beta L^2}{4\pi^2} \quad (2.43)$$

Z podmínky $\frac{\partial P}{\partial L} = 0$ vyplývá kritická hodnota osová síla P_{cr} a kritická délka vlny L_{cr} :

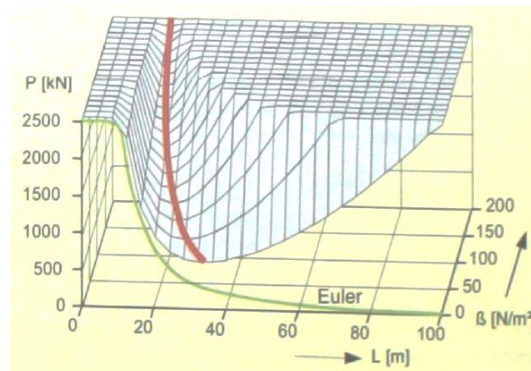
$$L_{cr}^2 = 4\pi^2 \sqrt{\frac{EI}{\beta}} \quad (2.44)$$

$$P_{cr} = 2\sqrt{\beta EI} \quad (2.45)$$

Pokud by v modelu nebyl příčný odpor ($\beta = 0$), tak bychom mohli (2.42) zredukovat na známý výraz pro Eulerovu kritickou sílu přímého prutu:

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \quad (2.12)$$

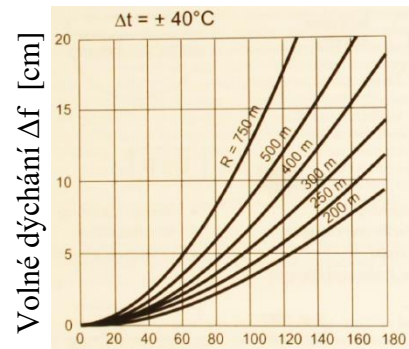
Na obrázku 2.6 je znázorněn příklad závislosti vzpěrné síly P na délce vlny L pro $EI = 8000 \text{ kN/m}^3$ při různých hodnotách β . Každý bod, ležící na povrchu plochy je stabilitně indiferentní. Vztah mezi L_{cr} , P_{cr} a β je zvýrazněn červenou čarou. Zelená čára pak reprezentuje případ s absencí příčného odporu. Síla P je zde do hodnoty 2500 kN, což u trati s kolejnicemi 60 E2 odpovídá přírůstku teploty zhruba 65 °C [7]. Ten je za běžných podmínek nedosažitelný, v této práci se však bude mluvit i o několikanásobně větších teplotách, a to zejména při větším příčném odporu kolejového lože.



Obr 2.6 Diagram vzpěrné síly [7]

2.3 Dýchání koleje v oblouku

Jednou ze základních vlastností bezстыkové koleje je nulový posun v podélném směru, proto se při zatěžování teplotou v kolejnicích tvoří napětí. K jeho odstranění ve směrovém oblouku může sloužit tzv. dýchání koleje, tj. opakované příčné posunutí koleje, které je v praxi sledováno ve velikosti 1-2 cm. Na obrázku 2.7 můžeme vidět závislosti mezi poloměrem směrového oblouku R , středovým úhlem φ a velikostí volného dýchání Δf . [6]



Středový úhel φ [°]

Obr 2.7 Dýchání koleje [6]

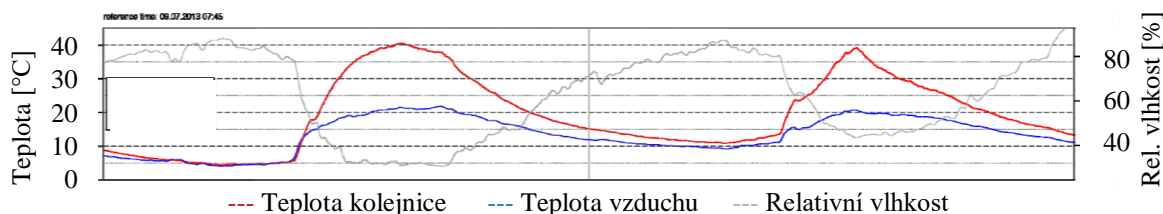
2.4 Pozorování chování bezстыkové koleje v obloucích malých poloměrů

V letech 2011-2013 byl ve Švýcarsku prováděn výzkum chování bezстыkové koleje pro oblouky malých poloměrů na úzkorozchodné trati. Cílem bylo vyhodnotit chování koleje během dlouhého časového období. Došlo k monitorování všech parametrů příčné stability koleje, které se při dlouhodobém pozorování dají změřit.

Pozorována byla 4 místa. Dvě s betonovými a dvě s ocelovými pražci. Jednalo se o oblouky o poloměru přibližně 100 m na trati s rozchodem 1000 mm.

Sbírání dat spočívalo v měření příčného posunu tratě, teploty kolejnic, teploty vzduchu a nepřímo i změny napětí v kolejnicích. Hodnoty byly zaznamenávány každou minutu po dobu jednoho roku. Data byla na každém měřicím místě odebrána v patnácti bodech podél trati. K měřicím přístrojům byly navíc instalovány senzory pro detekci průjezdu vlaku.

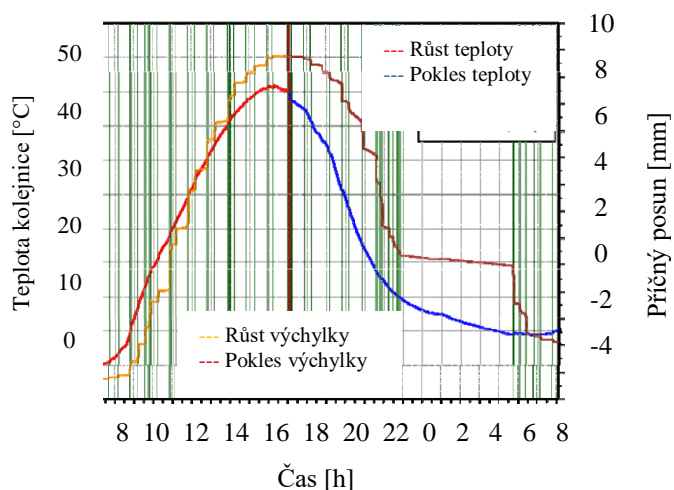
Na obrázku 2.8 je znázorněný průběh teploty kolejnice, teploty vzduchu a relativní vlhkosti v průběhu dvou dnů.



Obr. 2.8 Průběh teploty kolejniice, teploty vzduchu a relativní vlhkosti v průběhu dvou denních cyklů [8]

Za celý rok byla nejvyšší naměřená teplota kolejniice 56 °C. Místa s ocelovými pražci vykazovala významně větší posuny než místa s pražci betonovými. Příčné posuny měly lineární závislost na poloměru. Zajímavé na všech měřicích místech byly rozdíly posunů mezi sousedními měřenými body. Příčný posun koleje se nerozvíjí průběžně po celé délce oblouku, ale v malých vlnách.

Obrázek 2.9 ukazuje, že příčný posun závisí na teplotě kolejniice, ale s časovým zpožděním. K významným posunům dochází při průjezdu vlaků, ty jsou na grafech znázorněny svislými čarami. Důvodem pro tento jev je dočasně snížený příčný odpor koleje způsobený nadzvednutím



Obr. 2.9 Časový průběh teploty a příčného posunu [8]

pražce v kombinaci s vibracemi způsobenými průjezdem vlaku a napětím v kolejniici od vzrůstající teploty. Na grafu je také vidět, že žádný vlak od 22:30 do 4:30 úsekem neprojel a po celý tento čas je poloha koleje prakticky stejná. První vlak v brzkých ranních hodinách pak způsobil největší posun ve směru dovnitř oblouku.

V závěru bylo apelováno na zvýšení pozornosti některým problémům. Předně je třeba dbát na rovnoměrný příčný odpor po celé délce traťového úseku, čímž se předejde vzniku silných či slabých míst. Pečlivost si také zaslouží přesnost směrové polohy koleje při jejím zřízení. V poslední řadě bylo doporučeno provádět podbíjení při neutrální teplotě. [8]

3 Cíle práce

Cílem této práce bylo prozkoumat vliv poloměru oblouku na stabilitu bezстыkové koleje, a to zejména ve směrových obloucích s poloměry menšími než 300 m.

V práci je řešeno několik dílčích cílů. V první části bylo třeba vytvořit fungující numerický model, na kterém probíhalo testování vlivu několika parametrů v různých kombinacích. Na třech reprezentativních poloměrech oblouku je rozebíráno chování oblouků, které nejsou zatíženy počáteční imperfekcí od ideální směrové polohy koleje. V dalším kroku je zkoumán právě vliv imperfekcí. Nejdříve je rozebrán tvar a velikost výsledného vybočení, následně dojde k popsání rozvoje maximálního příčného posunu a kritické osově síly při vzrůstajícím teplotním zatížení.

Jedním z dílčích cílů práce je stanovení kritické délky imperfekce, při které dojde ke ztrátě stability při nejnižším teplotním přírůstku a nejnižší kritické osově síle. S touto počáteční výchylkou jsou vytvořeny modely s poloměry směrového oblouku od 190 m do 300 m.

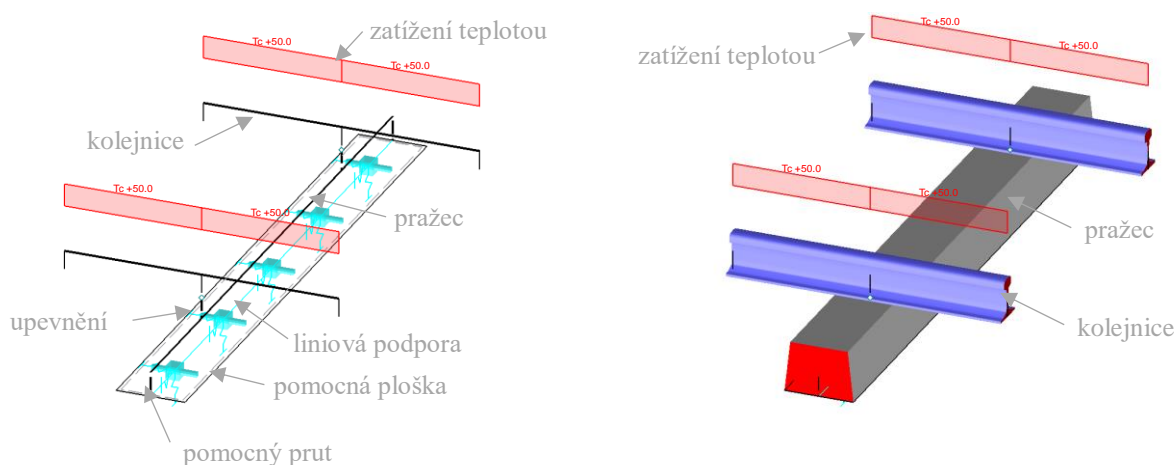
Zanedbáno nebude ani pozorování svislého posunu nebo stanovení přírůstku napětí a osových sil v kolejnicích při teplotním přírůstku 1 °C.

Všechny tyto dílčí cíle ve výsledků napomohly k vytvoření závěrečných grafů, na kterých lze ukázat závislosti kritické osově síly a velikosti posunu na kritickém teplotním přírůstku. Na základě těchto grafů jsou učiněné závěry, které porovnávají stabilitu bezстыkové koleje v obloucích malých poloměru pro různé parametry. Mezi ně patří poloměr směrového oblouku, profil kolejnice a velikost počáteční imperfekce.

4 Numerický model

4.1 Sestavení modelu

Pro analýzu chování bezстыkové koleje v obloucích malých poloměrů bylo nejdříve potřeba vytvořit prutový model části tratě. K tomu byly využity dva programy – Microsoft Excel 2016 a Dlubal RFEM 5.08. První část tvorby modelu byla provedena v Excelu, kde byly spočítány 3D souřadnice polohy všech částí modelu (kolejnic, uzlů upevnění, pražců). Zde je možné měnit několik parametrů: poloměr směrového oblouku, převýšení koleje, rozměry pražců a rozdělení pražců. Navíc v modelech, které jsou zatížené počáteční imperfekcí, lze zvolit její hodnotu boční výchylky a délku vlny této výchylky, průběh je popsán v kapitole 5.4. Ve druhé části se potom všechna tato data importují do prostředí programu RFEMu a tím je model připravený k analýze. Model se kromě kolejnic, pražců a upevňovadel skládá také z pomocných plošek, pomocných prutů a kloubů na některých koncích prutů. Kolejové lože je nahrazeno liniovými podporami na spodních plochách pražců a pokračování trati na koncích modelu suplují bodové podpory. Model je v ose vždy dlouhý 201 m, jeho část je znázorněna na obrázku 4.1.



Obr. 4.1 Prvky modelu v drátěném a vizualizovaném pohledu

Model kolejnice

Kolejnice je modelována jako prut. Kolejnice jsou definované pomocí uzlů, které se nacházejí nad osou každého pražce, a to z důvodu připojení kolejnice k pražci. Geometricky jsou body na koncích prutů vypočítány pomocí poloměru kolejnicových pásů a úhlu, který svírají jednotlivé pražce. Kolejnice jsou uloženy excentricky.

Jako materiál byla uvažována v ČR nejběžnější kolejnicová ocel R260. Kolejnice jsou ve tvaru 49 E1 a 60 E2, neojeté průřezy.

Vlastnosti kolejnic použitých do výpočtu:

- Plocha průřezu	$A_{49\ E1} = 6292\ \text{mm}^2$ $A_{60\ E2} = 7650\ \text{mm}^2$
- Číselné označení oceli	1.0623
- Objemová tíha	$\gamma = 78,34\ \text{kg/m}^3$
- Mez pevnosti	$R_m = 880\ \text{MPa}$
- Mez kluzu	$\sigma_y = 528\ \text{MPa}$
- Modul pružnosti	$E = 210\ \text{GPa}$
- Tažnost	min. 10 %
- Poissonův součinitel	$\nu = 0,3$
- Součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 1,2 * 10^{-5}\ \text{°C}^{-1}$

Model pražce

Pražec je modelován jako prut. Každý pražec je kvůli připojení ke kolejnici po délce definovaný čtyřmi body. Dva jsou umístěné na jeho začátku a konci a dva leží na ose kolejnic. Souřadnice bodů jsou vypočítány pomocí souřadnic bodů kolejnice, znalosti rozměrů pražce a úhlu, který mezi sebou jednotlivé pražce svírají. Snahou bylo přiblížit se co nejvíce pražci B 91 S/1, respektive B 91 S/2, průřez byl však značně zjednodušen na lichoběžníkový tvar. Šířka spodní strany ($B = 300\ \text{mm}$) a délka ($L = 2,6\ \text{m}$) zůstaly zachovány. Byla použita i stejná třída betonu, tedy C45/55, pouze byla upravena její objemová hmotnost na hodnotu $\gamma = 19,32\ \text{kg/m}^3$ z důvodu zachování celkové hmotnosti pražce odpovídající pražci B 91S, a to 304 kg. Celková hmotnost pražce je podstatná pro stanovení příčného odporu.

Model upevnění kolejnic na pražci

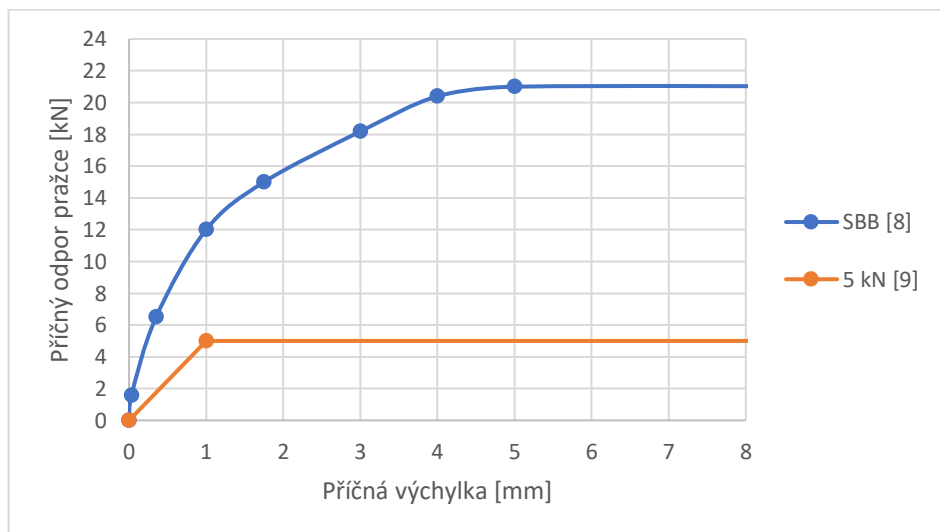
Upevnění je v programu RFEMu vymodelované jako tuhý prut spojující bod na kolejnici a bod na pražci. Na svém konci blíže ke kolejnici má umístěný kloub, který simuluje pružné upevnění. Kvůli zadávání tuhosti v podélném směru koleje bylo třeba natočit lokální souřadný systém tuhého prutu tak, aby jedna osa byla totožná s osou prutu, druhá směřovala do středu směrového oblouku a třetí sledovala podélný směr

koleje. Základní hodnota pro svislou tuhost v uzlu upevnění byla zvolena 200 kN/mm, v podélném směru byla tuhost definována nelineárně pomocí bilineárního diagramu. Zde byla použita hodnota 10 kN, které je dosaženo při posunutí kolejnice o 1 mm.

Model příčného a podélného odporu koleje

Každému pražci přísluší jedna liniová podpora a vede středem jeho ložné plochy. Pomocí liniových podpor je definovaná tuhost kolejového lože, příčný odpor pražce a podélný odpor pražce. Obyčejné podloží prutu totiž neumožňuje zadat nelinearity, které jsou důležité právě pro zadávání příčného a podélného odporu pražců. Při dosazování konkrétních číselných hodnot je třeba si uvědomit rozdíl mezi příčným či podélným odporem kolejového lože na metr délky koleje a odporem, který simuluje liniová podpora. Z první zmíněné hodnoty musíme nejdříve spočítat odpor na jeden pražec a ten následně podělit délkou pražce, tak získáme programem požadovanou hodnotu.

V citlivostní analýze byly použity následující dva diagramy příčných odporů:



Obr. 4.2 Průběh použitých příčných odporů

První, vyšší odpor je převzat z měření [8] podle Stuttgarter Straßenbahnen pro nezatíženou kolej a dosahuje hodnoty až 21 kN/pražec při posunu 5 mm. Druhý diagram [9] je inspirován měřením na zkušebním standu v areálu Fakulty stavební VUT v Brně, je bilineární a své maximální hodnoty 5 kN/pražec dosahuje při zatlačení o 1 mm.

Podélný odpor je ve všech modelech stejný – dosahuje hodnot 20 kN/m při podélném posunutí 2 mm. Tuto veličinu nemá velký smysl měnit, při zkušebních výpočtech byly dosazovány různé hodnoty a ukázalo se, že v porovnání s vlivem velikosti příčného odporu, je závislost chování bezстыkové koleje zanedbatelná. Porovnání kritického

teplotního přírůstku ΔT_{cr} a kritické osově síly P_{cr} pro dva různé podélné odpory je uvedeno v kapitole 5.4.

Spojité svíslé tuhost kolejové jízdní dráhy je uvažovaná jako $k_z = 25 \text{ MN/m}^2$, což odpovídá standardní kvalitě kolejového lože [1].

Pomocné plošky

Jak bylo popsáno výše, liniové podpory jsou nenahraditelnou součástí modelu. To s sebou však přináší drobný zádrhel. Aby proběhl výpočet modelu, musí být každá liniová podpora přiřazena ploše, což by byl v čistě prutovém modelu problém. Proto byly těsně pod každý pražec vymodelované pomocné plošky o šířce a délce odpovídající ložné ploše pražce a tloušťce 0,01 mm. V modelu mají pouze pomocnou funkci, a protože je jejich hmotnost velmi malá, výsledky nijak negativně neovlivňují.

Pomocné pruty

Dalšími pomocnými prvky jsou pruty, které propojují model do jednoho celku. Jsou použity mezi pražci a pomocnými ploškami, a to vždy na začátku a konci každého pražce.

Bodové podpory

Kontinuitu modelu zajišťují celkem čtyři bodové podpory. Jsou umístěné na koncích kolejnic a suplují pokračující trať. Aby byl zachován předpoklad bezstykové koleje, je v podporách vyloučen pohyb v podélném směru. Rotace je zde povolena pouze kolem svíslé osy.

4.2 Zatížení

Model je zatížený pouze staticky, a to vlastní tíhou a teplotou, která působí rovnoměrně po celé kolejnici. V praxi však dosažení tohoto předpokladu na delším traťovém úseku není reálné, zejména kvůli částečnému zastínění mraky, stromy, zástavbou či tunely. Teplotní přírůstek ΔT je postupně zvyšována, přičemž se sleduje nárůst napětí σ_x , osových sil N_x a posunu u .

4.3 Globální parametry modelu koleje

Vymodelovaná trať má normální rozchod. Pro poloměry $R < 275$ m je zřízeno rozšíření rozchodu dle [10] následovně:

Tab. 4.1: Rozšíření rozchodu koleje

Poloměr R [m]	255 - 270	235 - 250	215 - 230	190 - 210
Rozšíření rozchodu Δu [mm]	2,5	5	7,5	10

Dále je v obloucích modelováno doporučené převýšení [10] pro uvažovanou rychlost 40 km/h, tedy podle vzorce $D_N = \frac{7,1V^2}{R}$, viz tabulka 4.2.

Tab. 4.2: Převýšení koleje pro jednotlivé poloměry

R [m]	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
D [mm]	60	57	55	52	50	48	46	44	43	41	40	38

5 Zpracování výsledků

5.1 Úvod

Pro účely této práce bylo vygenerováno množství modelů s rozdílnými parametry. Nejprve byly sledovány oblouky bez počátečních výchylek s různými poloměry a různými příčnými odpory. V druhé, rozsáhlejší části, jsem se zaměřila na oblouky s imperfekcí, konkrétně na vliv délky a amplitudy imperfekce na kritickou sílu P_{cr} a kritický teplotní přírůstek ΔT_{cr} .

Výpočty jsou prováděny podle teorie II. řádu za použití Picardovy iterační metody. Na modelech byl sledován lokální příčný posun pražce, měřený v jeho středu a osová síla v obou kolejnicích. Z naměřených hodnot byly pro větší přehlednost vytvořeny grafy, tabulky s konkrétními číselnými hodnotami jsou v Příloze A.

5.2 Ztráta stability

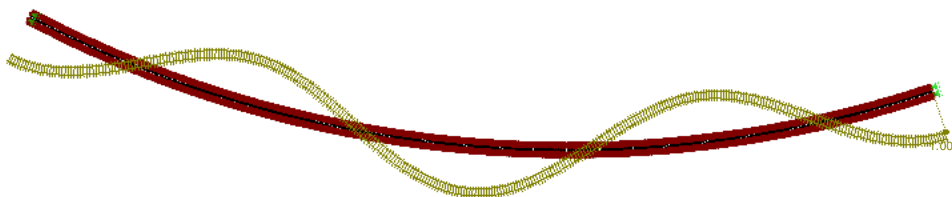
Pro vyhodnocení chování bezstykové koleje při rostoucím zatěžování teplotou je stěžejní co nejpřesněji určit okamžik, kdy dojde k vybočení koleje. Přístupů k této problematice může být několik. Jako první se nabízí stabilitní analýza pomocí

vestavěných algoritmů výpočtového programu. Dalším způsobem určení kritického okamžiku může být zvolená konkrétní číselná hodnota příčného posunu u . Jako třetí lze použít kritérium rychlosti nárůstu osově síly nebo příčného posunu v závislosti na teplotním přírůstku. Vždy se sleduje hodnota kritické síly P_{cr} , které odpovídá teplotní přírůstek ΔT_{cr} podle vzorce 2.33.

5.2.1 Stabilitní analýza pomocí vestavěných algoritmů výpočtového programu

V programu R-FEMu je k dispozici přídatný modul RF-STABILITY, který dokáže vypočítat stabilitní analýzu podle dvou metod. První metoda je *Analýza vlastních čísel*. Zde se bohužel stabilitní tvary určují čistě lineárně. Vlastnosti nelineárně působících prvků jako například příčný odpor zadaný pomocí diagramu se v tomto případě nezohledňují [11].

Na obrázku 5.1 můžeme vidět ztrátu stability pomocí vlastních tvarů. U této metody navíc vidím jako problematický fakt, že program prohlásí stav za kritický, pokud dojde k posunu koleje právě o jeden metr. Ale vzhledem k tomu, že se jedná o lineární analýzu, nějaké kritérium být stanovené pochopitelně musí. U uvedeného příkladu se konkrétně jedná o oblouk s poloměrem 250 m bez počátečních imperfekcí, kolejnice 49 E1. Příčný odpor je zadán konstantně a jeho velikost je 10 kN/m. Stejně tak je zadán i podélný odpor, ale s velikostí 20 kN/m. Ke zobrazenému stavu by došlo při teplotním přírůstku 1077 °C. Po celé délce modelu se vytvoří dvě vlny, každá o délce zhruba 100 m. Součet kritických osových sil v kolejnicích je v tomto případě 7240 kN. Pro lepší znázornění je tvar vybočení 10x zvětšený.

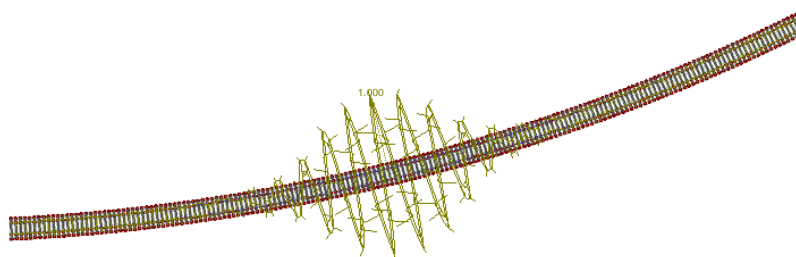


Obr. 5.1 Vybočení koleje bez počáteční imperfekce podle Analýzy vlastních čísel

Naproti tomu obrázek 5.2 ukazuje vybočení koleje podle analýzy vlastních čísel oblouku s počáteční imperfekcí. Můžeme zde vidět ztrátu stability oblouku s počáteční

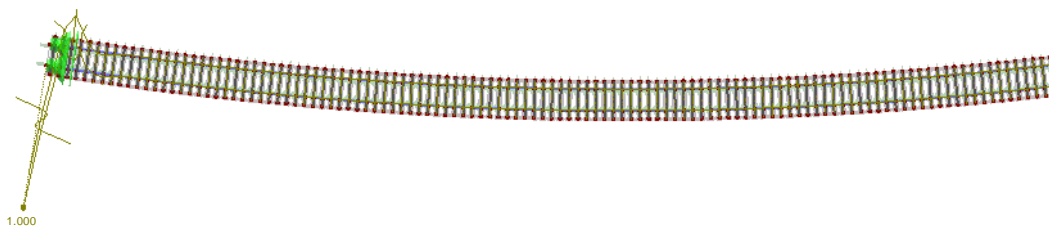
imperfekcí velikosti 20 mm a délky 17 m, ostatní parametry jsou stejné jako na obrázku 5.1.

Ani zde se však výsledek nejeví reálně. K vyobrazenému stavu by došlo při teplotě 1237 °C a délka zvlněného úseku by byla 47,6 m.



Obr. 5.2 Vybočení koleje s počáteční imperfekcí podle Analýzy vlastních čísel

RFEM také nabízí metodu *Přítěžování do kolapsu konstrukce*. Tato volba umožňuje při výpočtu vlastních čísel zohlednit veškeré nelinearity, takto však lze spolehlivě určit pouze nejnižší vlastní číslo [11]. To je u našeho modelu problém, podle *Analýzy vlastních čísel* se totiž první a druhé vlastní číslo tvoří na koncích vymodelovaného úseku, tato metoda je tedy také nepoužitelná, viz obrázek 5.3.



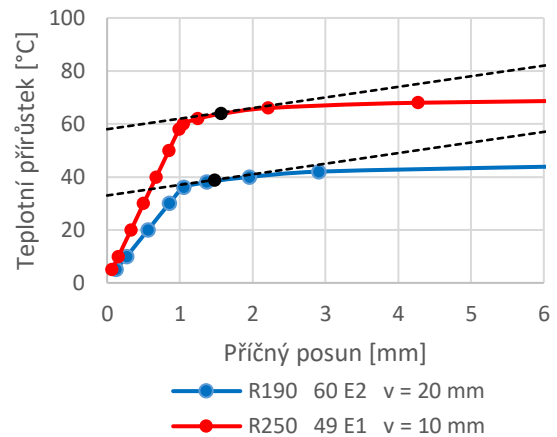
Obr. 5.3 První vlastní tvar při ztrátě stability

5.2.2 Ztráta stability při konkrétní hodnotě příčného posunu

Druhá metoda pro určení okamžiku ztráty stability je zvolit si konkrétní číselnou hodnotu příčného posunu u , kterou už budeme považovat za kritickou. Tento způsob však není příliš vhodný, nelze totiž mít stejné číselné kritérium pro různé poloměry směrových oblouků.

5.2.3 Ztráta stability při překročení rychlosti posunu nebo rychlosti nárůstu osově síly v závislosti na teplotním přírůstku

Třetí, dle mého názoru i nejlepší metoda. Lze pozorovat například to, kdy osová síla bude se vzrůstající teplotou narůstat nižší rychlostí než na začátku přitěžování, nebo okamžik, kdy dosáhne své maximální hodnoty. V této práci jsem si jako kritickou mez zvolila chvíli, ve které je nárůst příčného posunu pražce 0,025 mm při přitížení o 0,1 °C, tedy $\frac{\partial u}{\partial \Delta T} = 0,25$. Tato hodnota byla zvolena na základě několika názorných grafů, jeden z nich můžeme vidět na obrázku 5.4 i s černě vyznačenou kritickou mezí.



Obr. 5.4. Způsob určení kritické teploty

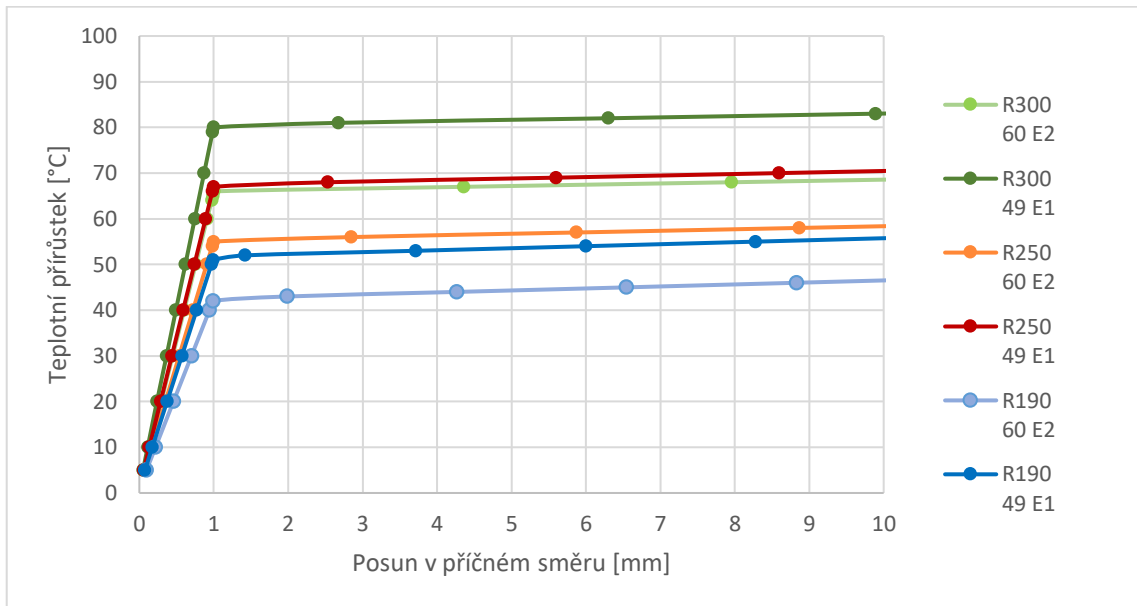
5.3 Směrové oblouky bez počátečních imperfekcí

Směrové oblouky bez počátečních výchylek budou popsány pouze krátce, jejich chování totiž nevystihuje realitu. Kolej v terénu nikdy nemá dokonalou geometrii, vždy se vyskytnou alespoň drobné odchylky.

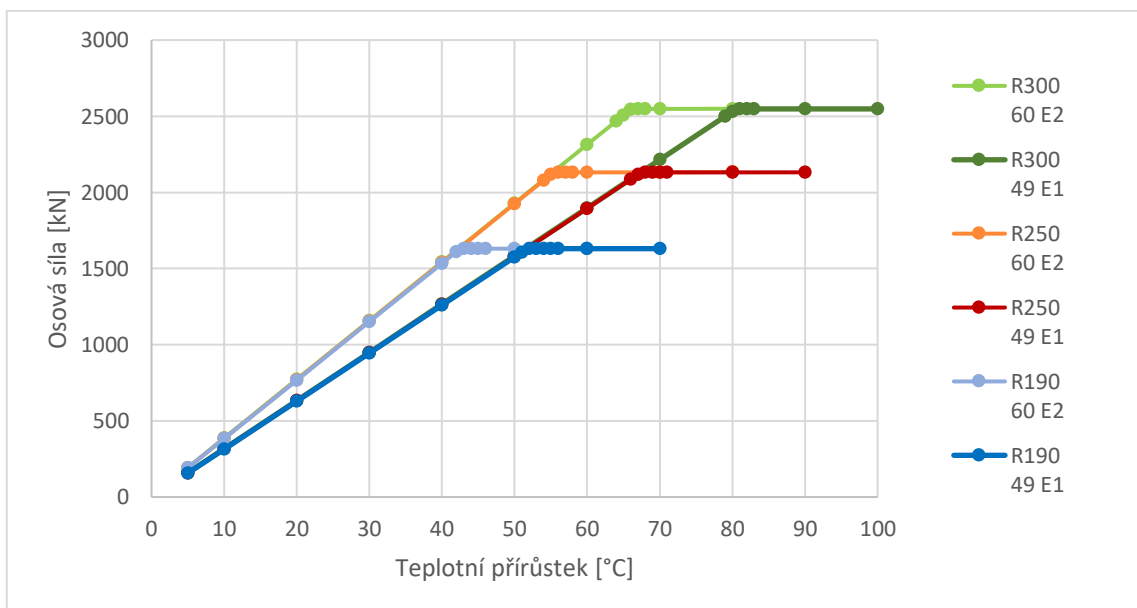
Při zatěžování tohoto modelu teplotním přírůstkem dochází k posunu celého oblouku rovnoměrně, po celé délce je tedy stejný příčný posun i stejné osově síly v kolejnicích. V reálných podmínkách by si však kolej našla slabé místo, ve které by došlo k vytvoření vlny vybočení.

Pro analýzu byly vybrány tři reprezentativní poloměry směrového oblouku – 190 m, 250 m a 300 m. Dále byl v každém modelu postupně použit příčný odpor 5 kN/pražec a odpor dle SBB v kombinaci s kolejnicemi 49 E1 nebo 60 E2. Na každé modelové situaci byla pozorována závislost příčného posunu u a kritické síly ΔT_{cr} na teplotním přírůstku. Zatěžování teplotním přírůstkem začínalo na 5 °C, dále se od 10 °C zvyšovalo po 10 °C. Navíc v místě, kde došlo k výraznému nárůstu rychlosti posunu, bylo přitěžování teplotou navyšováno po 1 °C. Výsledné grafy můžeme vidět na obrázcích 5.5

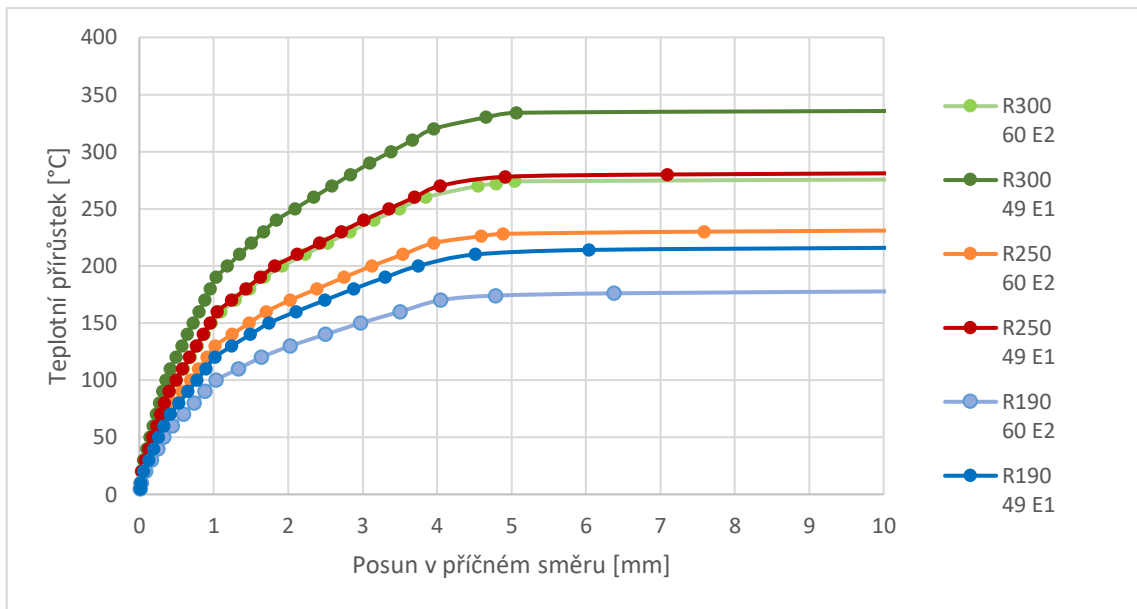
a 5.6 pro příčný odpor 5 kN/pražec a na 5.7 a 5.8 pro příčný odpor dle SBB. Konkrétní číselné hodnoty jsou v Příloze A.1.



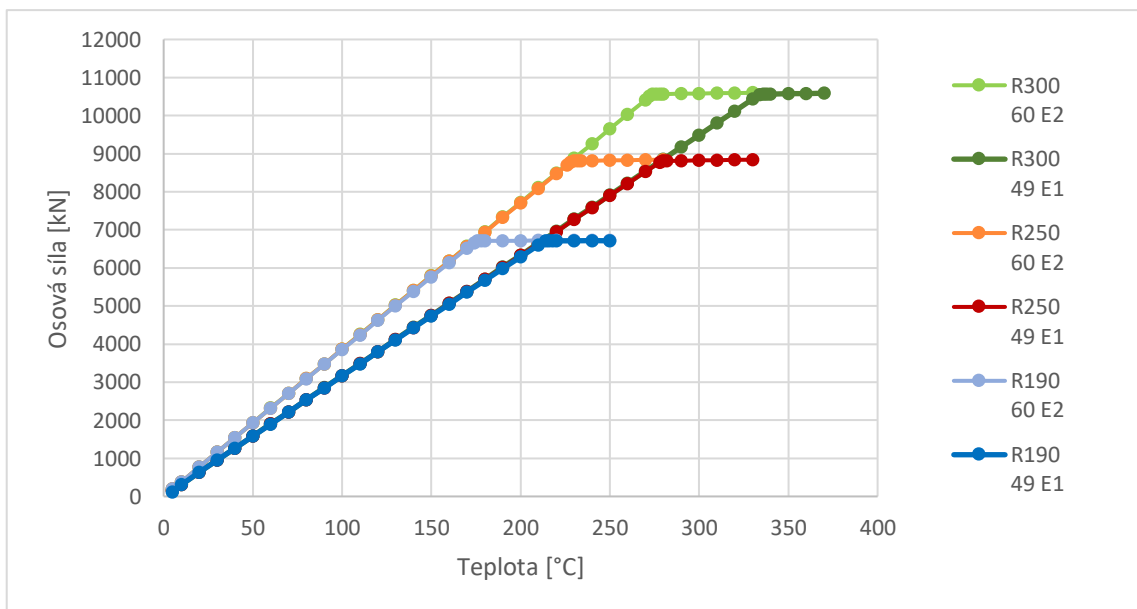
Obr. 5.5 Závislost teplotního přírůstku na příčném posunu pro oblouky bez imperfekce s použitím příčného odporu 5 kN/pražec



Obr. 5.6 Závislost osově síly na teplotním přírůstku pro oblouky bez imperfekce s použitím příčného odporu 5 kN/pražec



Obr. 5.7 Závislost teplotního přírůstku na příčném posunu pro oblouky bez imperfekce s použitím příčného odporu dle SBB



Obr. 5.8 Závislost osové síly na teplotním přírůstku pro oblouky bez imperfekce s použitím příčného odporu dle SBB

To, že k vybočení dojde při menším teplotním přírůstu v oblouku menšího poloměru a při menší hodnotě příčného odporu kolejového lože, není nijak překvapivé. Můžeme si však všimnout, že v obloucích bez počátečních imperfekcí průběh grafů na obrázcích 5.5 a 5.7 dokonale kopíruje tvar průběhu příčného odporu.

Dále je patrné, že v koleji s kolejnicemi s větší plochou by došlo k vybočení koleje dřív. Pro případ s příčným odporem 5 kN/pražec je to konkrétně o 9 °C pro poloměr 190 m, 12 °C pro 250 m a 16 °C pro 300 m. U příčného odporu dle SBB jsou tyto rozdíly větší, tedy 35 °C pro poloměr 190 m, 50 °C pro 250 m a 60 °C pro 300 m. Pokud se v grafech zaměříme na dosahovaný teplotní přírůstek, již na obrázku 5.5 si všimneme těžko dosažitelných hodnot. Na obrázku 5.7 jsou tyto hodnoty již extrémní a kolej s tímto příčným odporem můžeme považovat za abnormálně bezpečnou.

Na obrázcích 5.6 a 5.8 můžeme pozorovat bilineární průběh osových sil v závislosti na rostoucím teplotním přírůstkem. Je patrné, že v první fázi grafu v kolejnicích stejného typu narůstá osová síla bez ohledu na poloměr směřového oblouku. Konkrétně je to asi 31,5 kN/°C pro dvě kolejnice 49 E1 a 38,5 kN/°C pro dvě kolejnice 60 E2. Napětí je samozřejmě v obou případech stejné, a to 5 MPa/°C.

Naproti tomu hodnoty svislého posunu jsou velmi malé a v podstatě zanedbatelné. Na několika modelech však byly zjišťovány a zaznamenány do tabulky 5.1. Můžeme zde například zjistit, že při stejném teplotním zatížení dojde k většímu svislému posunu u směřového oblouku s menším poloměrem.

Tabulka 5.1: Svislé posuny koleje

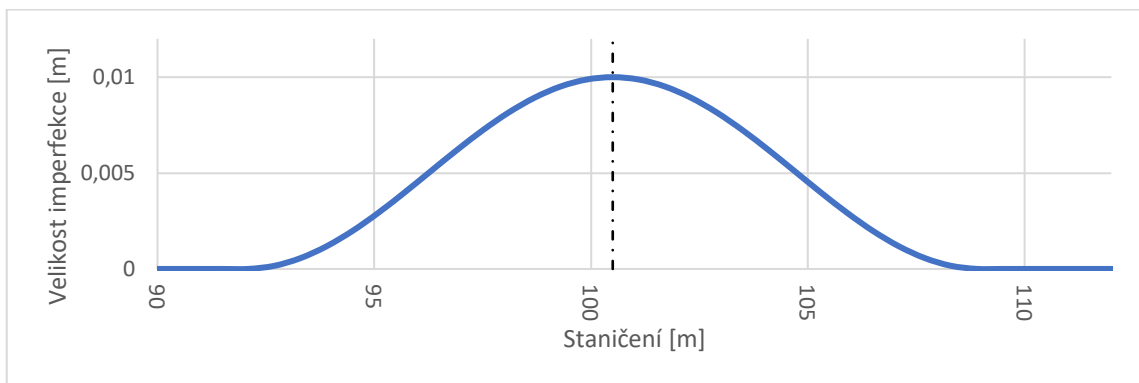
Svislý posun [mm] kolejnice 49 E1		R = 190 m		R = 250 m		R = 300 m	
		5 kN	SSB	5 kN	SSB	5 kN	SSB
Kraj pražce	5 °C	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146
	55 °C	0,153	0,154	0,150	0,150	0,149	0,149
Střed pražce	5 °C	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166
	55 °C	0,174	0,175	0,171	0,171	0,169	0,169

5.4 Směřové oblouky s počáteční imperfekcí

Jak jsme již zjistili v kapitole 5.3, zatěžování modelů bez počáteční imperfekce nedává reálné výsledky, proto se v této kapitole budeme věnovat zatěžování oblouků s výchylkou. Výchylka je nezbytná i pro spočítání kritické teploty podle vzorce 2.32 z kapitoly 2, pokud by totiž byla nulová, vyšla by nám ve jmenovateli nula.

Tvar počáteční výchylky

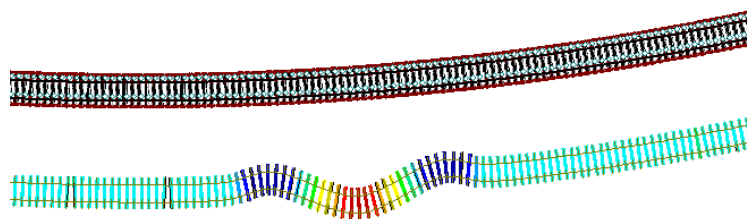
Výchylka má tvar sinu, který je posunutý o amplitudu. V prostředí programu Excelu lze zvolit velikost a délku imperfekce, vybočení je následně aplikováno na směrový oblouk doprostřed délky modelu. V této práci jsou použité dvě velikosti imperfekce, a to 10 mm a 20 mm, přičemž druhá hodnota odpovídá výchylce na mezi bezodkladného zásahu (IAL) pro rychlosti menší než 60 km/h [12]. Tvar je graficky znázorněn na obrázku 5.9.



Obr. 5.9 Tvar počáteční imperfekce (velikost 10 mm a délka 17 m)

Tvar vybočení

Při kladném teplotním zatížení se na oblouku s počáteční imperfekcí vytvoří tvar dvojitého es, znázorněný na obrázku 5.10.



Obr. 5.10 Tvar vybočení koleje s počáteční výchylkou při kladném teplotním zatížení

Na obrázku 5.11 můžeme vidět průběh posunu po délce koleje. Na horní části je umístěno staničení oblouku, konkrétní parametry pak znamenají:

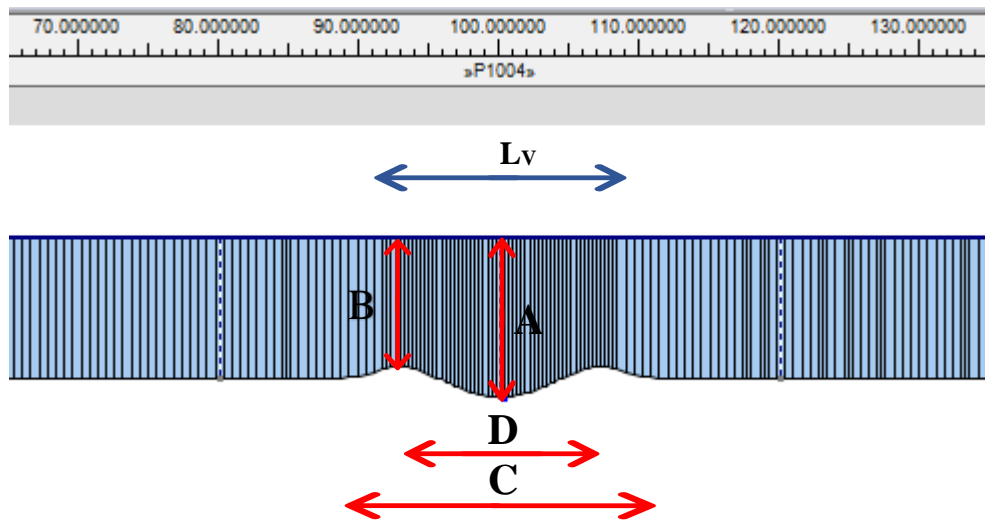
L_V ... délka počáteční výchylky

A ... maximální příčný posun

B ... minimální příčný posun

C ... vnější vlnová délka

D ... vnitřní vlnová délka



Obr. 5.11 Průběh příčného posunu po délce koleje

Na několika modelech bylo zjištěno, že při zvyšování teploty se délka vytvořené vlny, tedy parametry C a D , nemění. Parametry A a B pochopitelně rostou. Byla vytvořena tabulka 5.2, ve které si můžeme všimnout několika věcí. Zaprvé, čím větší je počáteční imperfekce, tím menší jsou parametry A a B . Zadruhé, s rostoucím poloměrem parametry A a B klesají. Zatřetí, parametry C a D se samozřejmě odvíjí od délky počáteční imperfekce L_v , přičemž C je vždy o několik metrů delší než L_v a naopak D o pár metrů kratší. Co se týče parametrů C a D , můžeme si také povšimnout, že s rostoucím poloměrem tyto hodnoty vzrůstají.

Tab. 5.2: Parametry vybočení pro zatížení teplotou 40 °C

		A [mm]	B [mm]	C [m]	D [m]
R = 190 m	L = 10 m	1.050	0.644	15.239	8.015
	L = 17 m	0.945	0.677	22.428	14.375
	L = 24 m	0.905	0.702	29.857	20.714
R = 250 m	L = 10 m	0.961	0.376	16.857	8.429
	L = 17 m	0.761	0.471	23.857	14.714
	L = 24 m	0.685	0.518	30.429	20.286
R = 300 m	L = 10 m	0.448	0.274	19.364	8.780
	L = 17 m	0.664	0.373	26.714	15.286
	L = 24 m	0.548	0.442	33.326	20.937

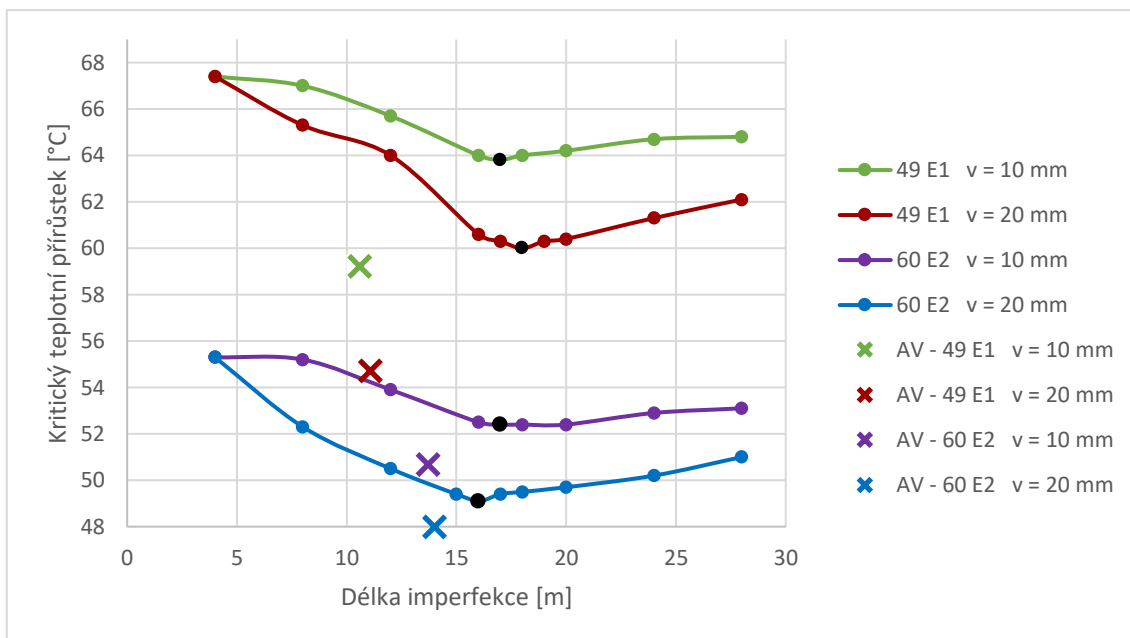
Kritické teplotní přírůstky a kritické osově síly

Velikost kritického teplotního přírůstku a kritické osově síly závisí mimo jiné na délce počáteční imperfekce. S rostoucí délkou obě kritické veličiny nejprve klesají, po dosažení lokálního minima opět rostou. Úkolem této části práce bylo zjistit, při jaké délce imperfekce je dosaženo této minimální hodnoty. Na následujících grafech jsou hledané body znázorněny černě. Hodnoty byly následně porovnány s analytickým výpočtem (AV) podle vzorců 2.32 – 2.34 z kapitoly 2, v grafech jsou vyznačeny křížkem v barvě odpovídající parametrům modelu. Konkrétní čísla jsou uvedena v tabulkách v Příloze A.2.

V první fázi byl analýze podroben oblouk s poloměrem 250 m. Na obrázcích 5.12 a 5.13 je případ s příčným odporem 5 kN/pražec a na obrázcích 5.14 a 5.15 je případ s příčným odporem dle SBB. V obou skupinách jsou zastoupeny modely s kolejnicemi 49 E1 a 60 E2 v kombinaci s imperfekcí o velikosti 10 a 20 mm. V obou případech bylo vygenerováno několik modelů s délkou imperfekce v rozestupu čtyřech metrů. Navíc v místě, kde bylo očekávané minimum, došlo k navýšení počtu modelů tak, aby bylo možné zjistit délku imperfekce, při které dojde ke ztrátě stability při nejmenším teplotním přírůstku a nejmenší osově síle, s přesností na jeden metr (pro variantu s příčným odporem 5 kN/pražec), resp. s přesností na půl metru (pro variantu s příčným odporem dle SBB).

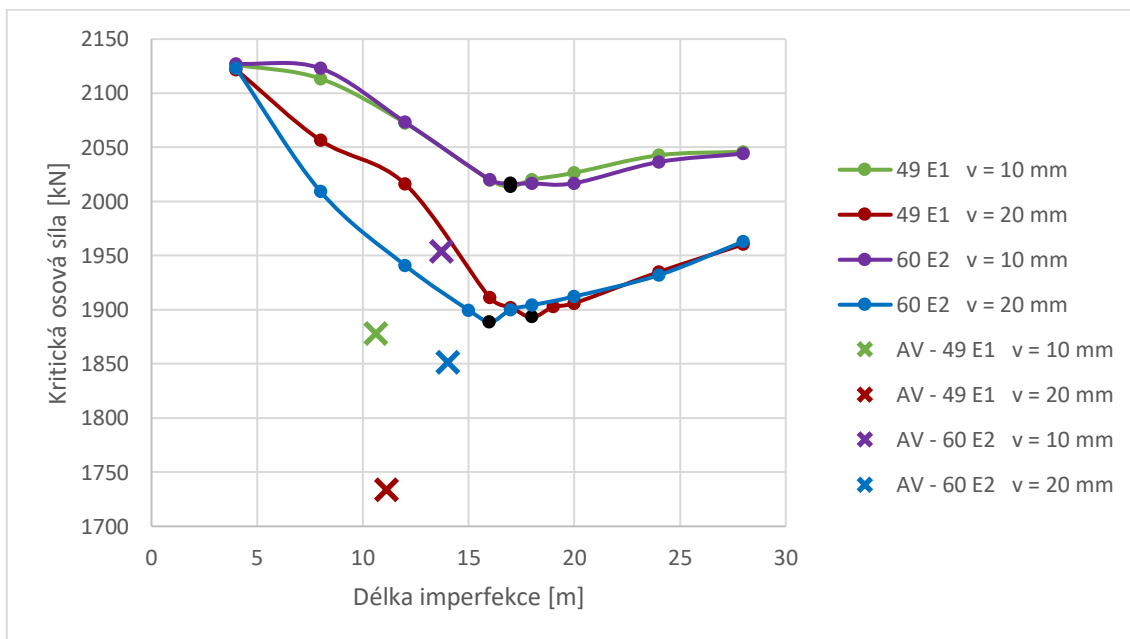
Hodnota podélného odporu nebyla zvyšována, protože její velikost nemá velký vliv na výsledky. Uvedeme-li si příklad, pro poloměr 250 m za použití kolejnic S49 a při počáteční imperfekci o velikosti 20 mm a délce 17 m, kritický teplotní přírůstek vyjde 60,3 °C pro podélný odpor při plném působení 20 kN/m, kritická osová síla dosáhne hodnoty 1902,17 kN. Při dvojnásobné hodnotě podélného odporu je kritický teplotní přírůstek 62,2 °C a kritická osová síla 1960,94 kN.

Nejdříve si rozebereme variantu s nižším příčným odporem. K vybočení koleje s kolejnicemi 60 E2 dojde při teplotě o zhruba 11 °C dříve než u koleje s kolejnicemi 49 E1. Při porovnávání situací se stejnými kolejnicemi, ale rozdílnou velikostí počáteční imperfekce, dojde k vybočení koleje s výchylkou 20 mm o necelé 4 °C dříve, než u koleje s výchylkou 10 mm. V porovnání s analytickým výpočtem jsou trendy podobné, s výjimkou délky imperfekce, která je na rozdíl od modelu s kolejnicemi 49 E1 menší než s kolejnicemi 60 E2.



Obr. 5.12 Závislost kritického teplotního přírůstku na délce imperfekce pro poloměr 250 m s použitím příčného odporu 5 kN/pražec

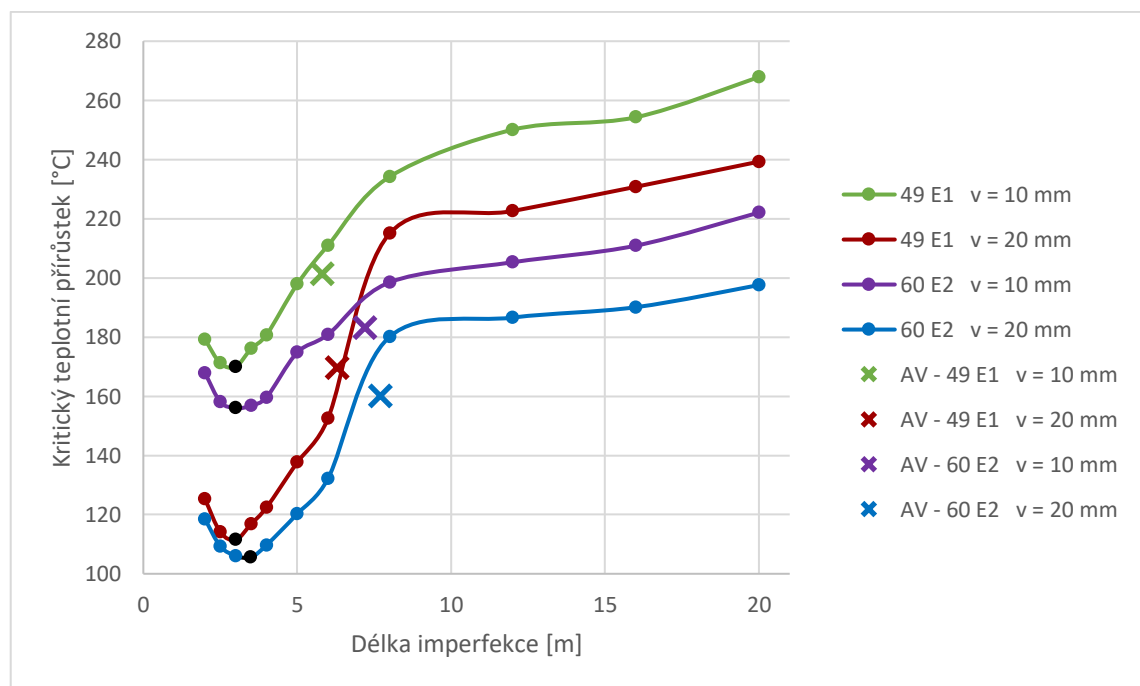
Při pohledu na obrázek 5.13 zjistíme, že ve většině modelů vychází kritická osová síla srovnatelná pro případ s kolejnicemi 49 E1 a 60 E2. V tomto případě se modelové situace liší od analytických výpočtů, kde vznikají větší kritické síly v kolejnicích 60 E2.



Obr. 5.13 Závislost kritické osové síly na délce imperfekce pro poloměr 250 m s použitím příčného odporu 5 kN/pražec

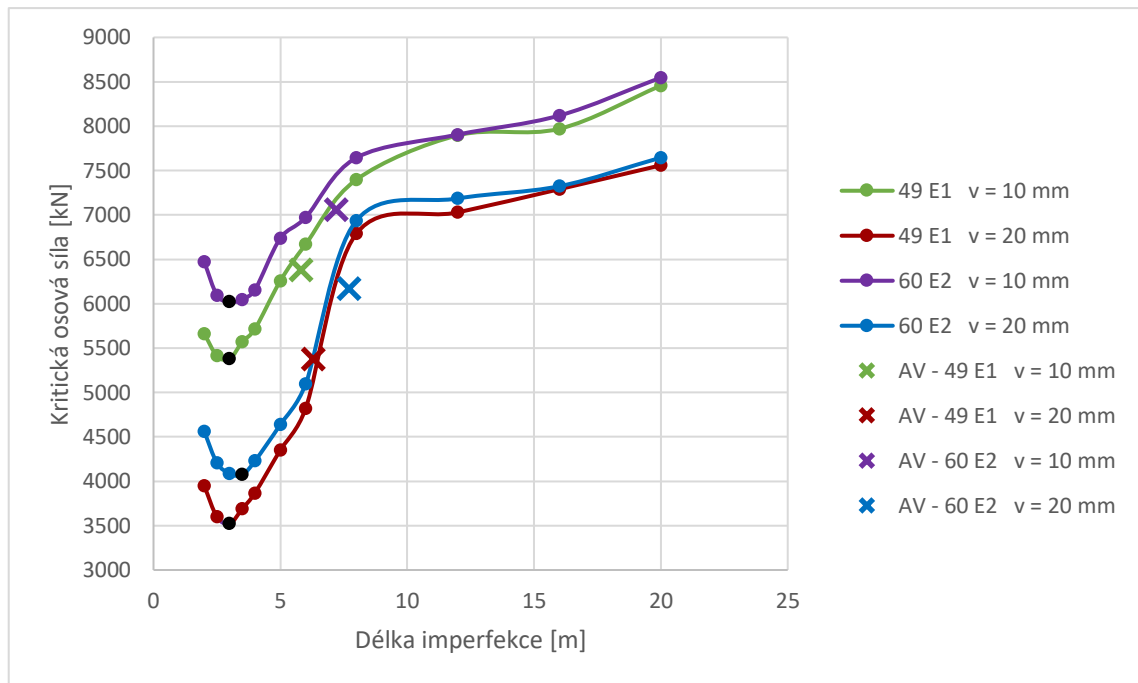
Obrázky 5.14 a 5.15 ukazují variantu s příčným odporem dle SBB. Zde můžeme vidět velký rozdíl oproti předchozímu případu. V první řadě se jedná o kritickou délku imperfekce. Zatímco u varianty s menším příčným odporem se pohybuje kolem 17 m, zde je to pouze kolem 3 m. Tuto tendenci naznačuje i analytický výpočet, avšak v menší míře. Druhý značný rozdíl je, stejně jako u oblouků bez imperfekcí, v dosažených teplotních přírůstcích.

Pokud se v obou případech zaměříme na závislost kritického teplotního přírůstku na délce imperfekce, zjistíme, že jeden typ kolejnice, tedy zelená a červená křivka svírá v obou případech podobný obrazec jako fialová a modrá.



Obr. 5.14 Závislost kritického teplotního přírůstku na délce imperfekce pro poloměr 250 m s použitím příčného odporu dle SBB

Jak už bylo zmíněno dříve, i v případě grafu na obrázku 5.15 vychází kritická osová síla pro modely s počáteční výchylkou 20 mm menší než pro výchylku 10 mm. Dále si zde můžeme všimnout, že kritické hodnoty dle analytických výpočtů vycházejí velmi blízko křivkám příslušejícím modelům se stejnými parametry, ale nenacházejí se v jejich minimu. Výpočty zřejmě neuvažují s prudkým poklesem osové síly při délce imperfekce v rozmezí dva až osm metrů.



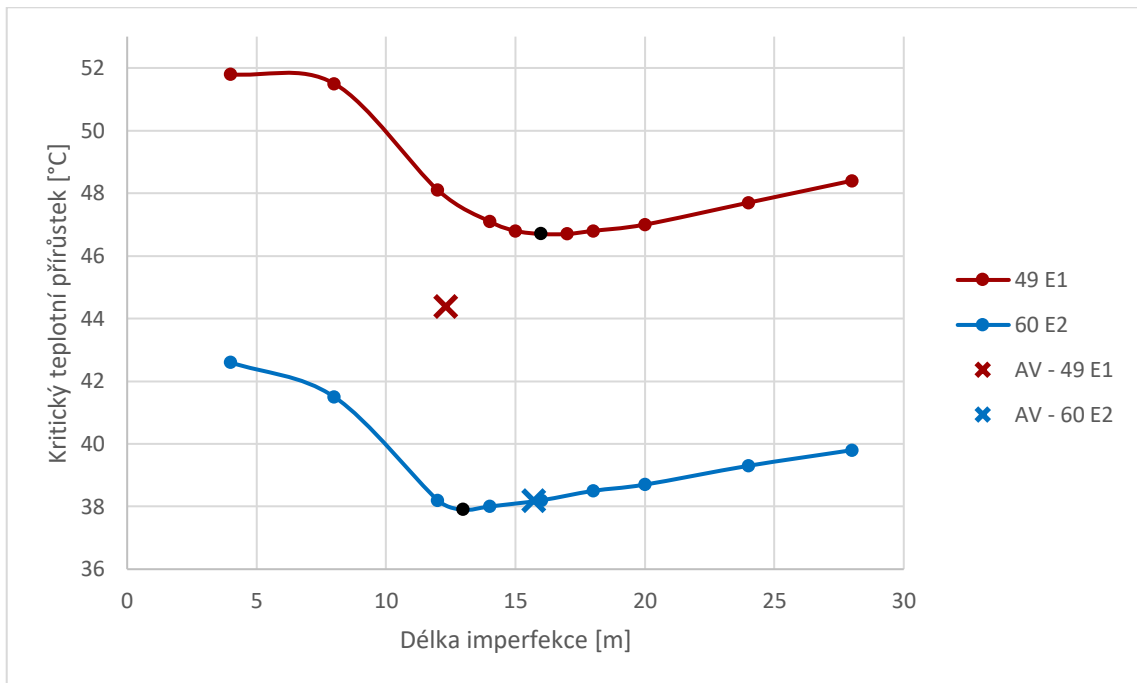
Obr. 5.15 Závislost kritické osové síly na délce imperfekce pro poloměr 250 m s použitím příčného odporu dle SBB

Cílem výše popsaných čtyř grafů bylo zjistit délku imperfekce, při které je kritická osová síla a kritický teplotní přírůstek nejmenší. Pro poloměr 250 m vyšla v průměru 17 m. Dále bylo potřeba zjistit chování minimálního a maximálního poloměru směřového oblouku, pro které bude prováděna výsledná analýza závislosti kritické osové síly na poloměru oblouku s konkrétní velikostí a délkou imperfekce. V těchto případech je však zredukován počet modelů. Na grafech 5.16 – 5.19 můžeme vidět pouze průběhy křivek pro imperfekci o velikosti 20 mm s použitím příčného odporu 5 kN/pražec.

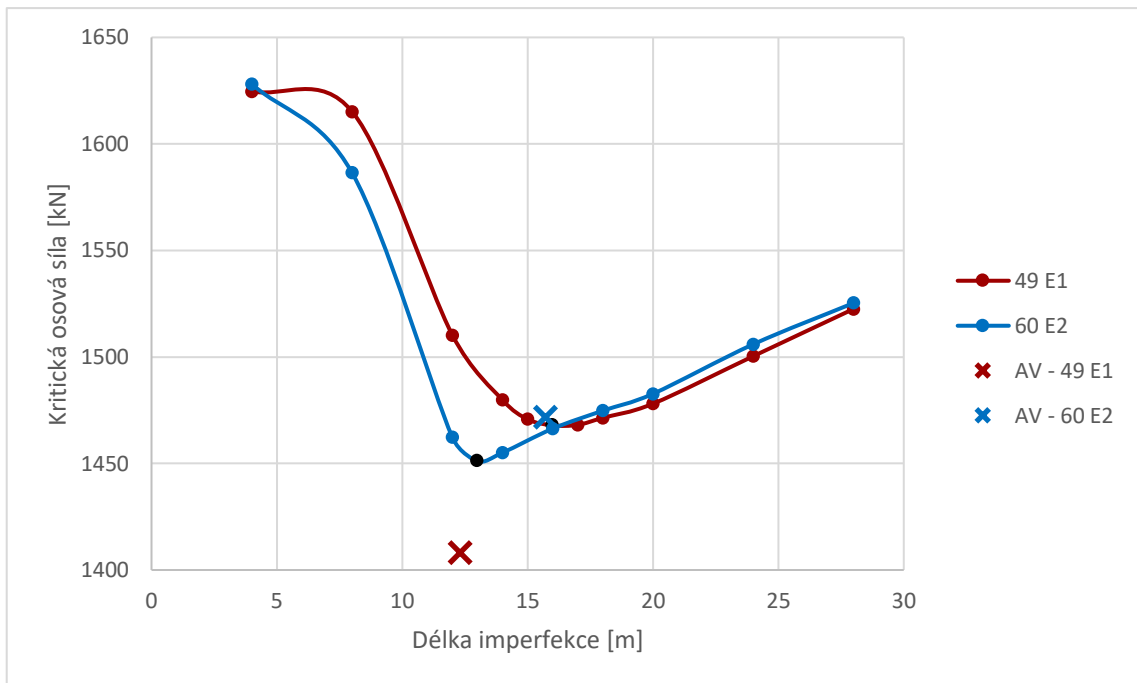
Grafy pro oblouk s poloměrem 190 m jsou znázorněny na obrázcích 5.16 a 5.17. Kritická délka imperfekce pro kolej s kolejnicemi 49 E1 je 16 m, pro kolej s kolejnicemi 60 E2 13 m. Na obrázcích 5.18 a 5.19 jsou pak grafy vystihující směřový oblouk s poloměrem 300 m. Zde je kritické vlnové délky dosaženo při 20 m u kolejnic 49 E1 a při 17 m pro kolejnice 60 E2. Celkově z toho můžeme usuzovat, že pro kolej s kolejnicemi 49 E1 je kritická vlnová délka větší než pro kolej s kolejnicemi 60 E2. Pro výsledný graf na obrázku 5.23 a 5.24 je ale nutné podrobit analýze modely se stejnou imperfekcí, proto byla pro příčný odpor 5 kN/pražec zvolena střední hodnota 17 m.

Samozřejmě, ke ztrátě stability dojde v obloucích menšího poloměru při nižším teplotním přírůstku než u oblouku s větším poloměrem. Další věci, která stojí za zmínku,

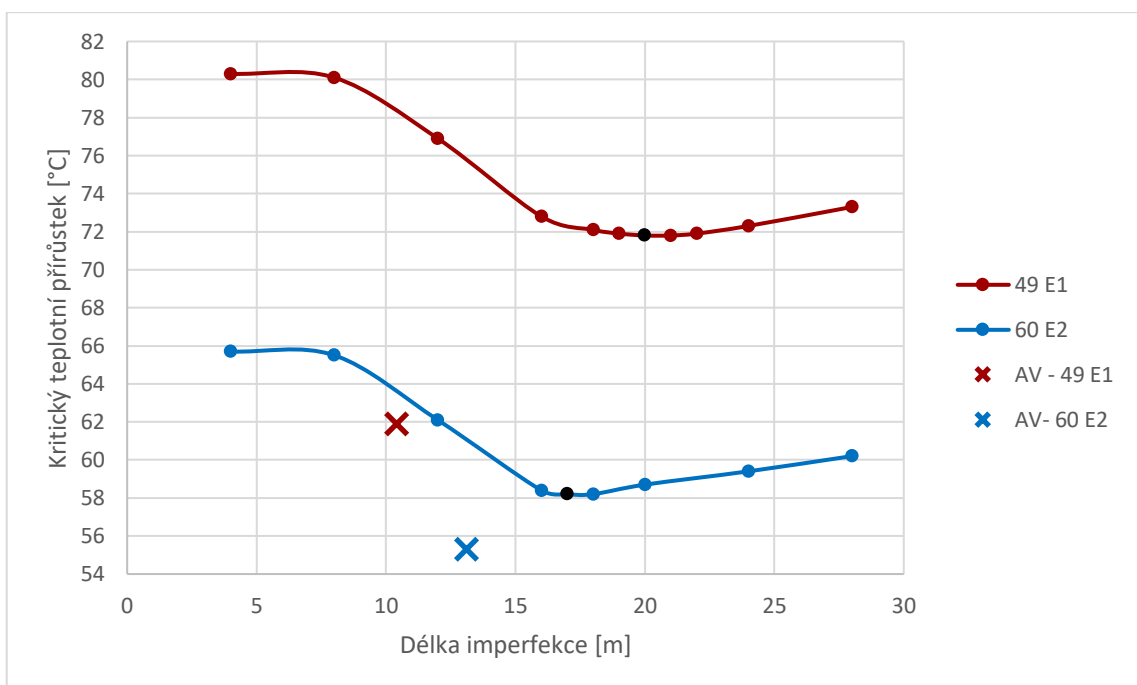
je fakt, že čím větší je poloměr směřového oblouku, tím se ztrácí stability v závislosti na délce imperfekce, pohybuje ve větším teplotním rozsahu, tj. v modelu se stejnými parametry, pouze s rozdílnou délkou imperfekce, se rozdíl mezi minimálním a maximálním teplotním přírůstkem při poloměru 190 m pohybuje kolem 5 °C, zatímco u poloměru 300 m se jedná o 8 °C.



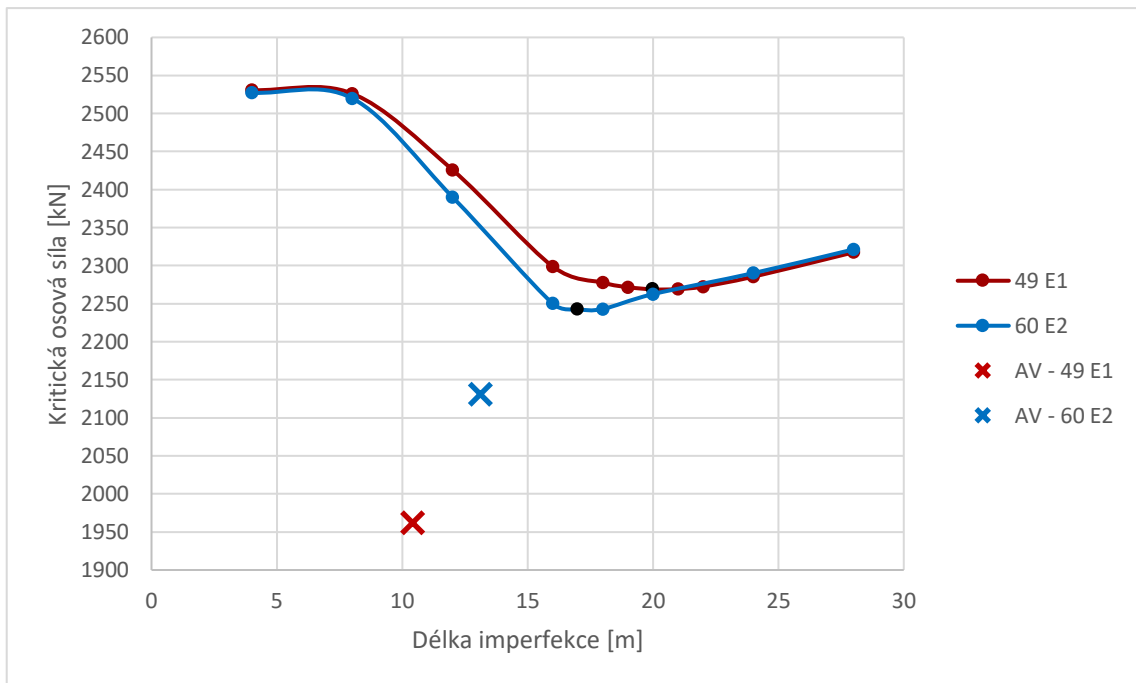
Obr. 5.16 Závislost kritického teplotního přírůstku na délce imperfekce pro poloměr 190 m s použitím příčného odporu 5 kN/pražec, velikost imperfekce 20 mm



Obr. 5.17 Závislost kritické osové síly na délce imperfekce pro poloměr 190 m s použitím příčného odporu 5 kN/pražec, velikost imperfekce 20 mm



Obr. 5.18 Závislost kritického teplotního přírůstku na délce imperfekce pro poloměr 300 m s použitím příčného odporu 5 kN/pražec, velikost imperfekce 20 mm



Obr. 5.19 Závislost kritické osové síly na délce imperfekce pro poloměr 300 m s použitím příčného odporu 5 kN/pražec, velikost imperfekce 20 mm

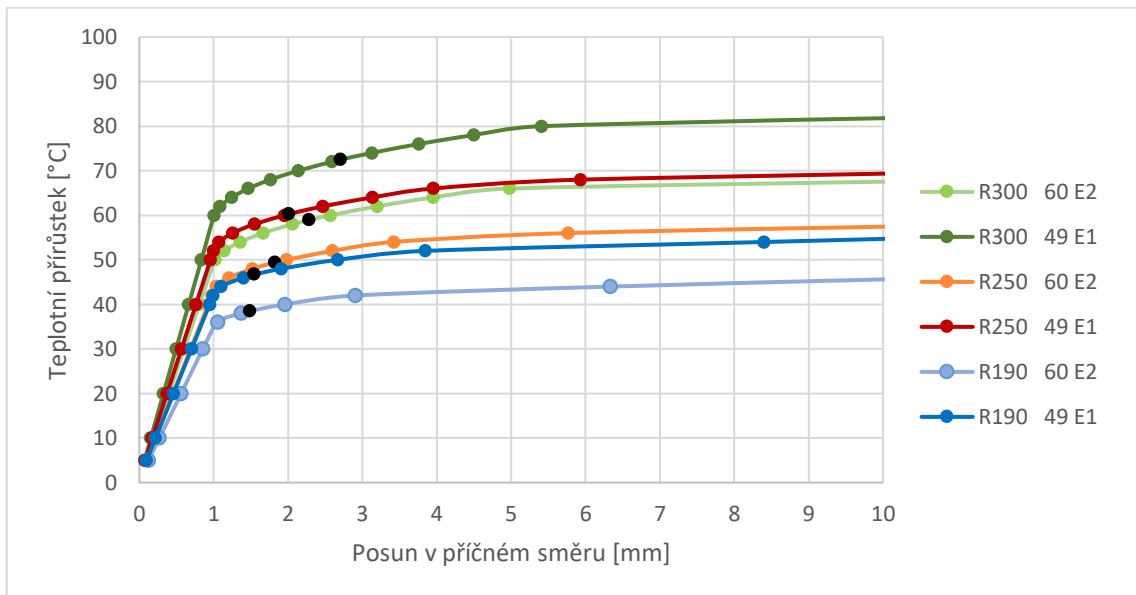
Oblouky s imperfekcí délky 17 m

Stejně jako pro směrové oblouky bez počáteční imperfekce byly nejprve vybrány tři poloměry, pro které byla provedena analýza. Jedná se o poloměry 190, 250 a 300 m. Byl pozorován vliv výchytky velikosti 10 a 20 mm na modely s kolejnicemi 49 E1 a kolejnicemi 60 E2 při příčném odporu 5 kN/pražec. Konkrétní číselné hodnoty všech grafů v této kategorii jsou zaznamenány v tabulkách v Příloze A.3.

Na obrázcích 5.20 a 5.22 je názorně vidět, jak dochází ke ztrátě stability. Posun v příčném směru roste lineárně až do doby, kdy dojde k aktivaci příčného odporu v plné hodnotě, v tomto případě se jedná o posun 1 mm. V tuto chvíli kolej neztratí stabilitu jenom díky okolním pražcům, které ještě nedosáhly plné aktivace příčného odporu. Postupně však i jejich příčný odpor dosáhne maxima, což se při zvyšování teploty projeví rychlejším nárůstem posunu. Ten je navíc rychlejší pro oblouky s menší počáteční výchytkou. V koncové části grafů narůstá posun v příčném směru stejnou rychlostí pro oblouky s jakýmkoliv poloměrem, libovolnými kolejnicemi a také různými velikostmi počáteční imperfekce.

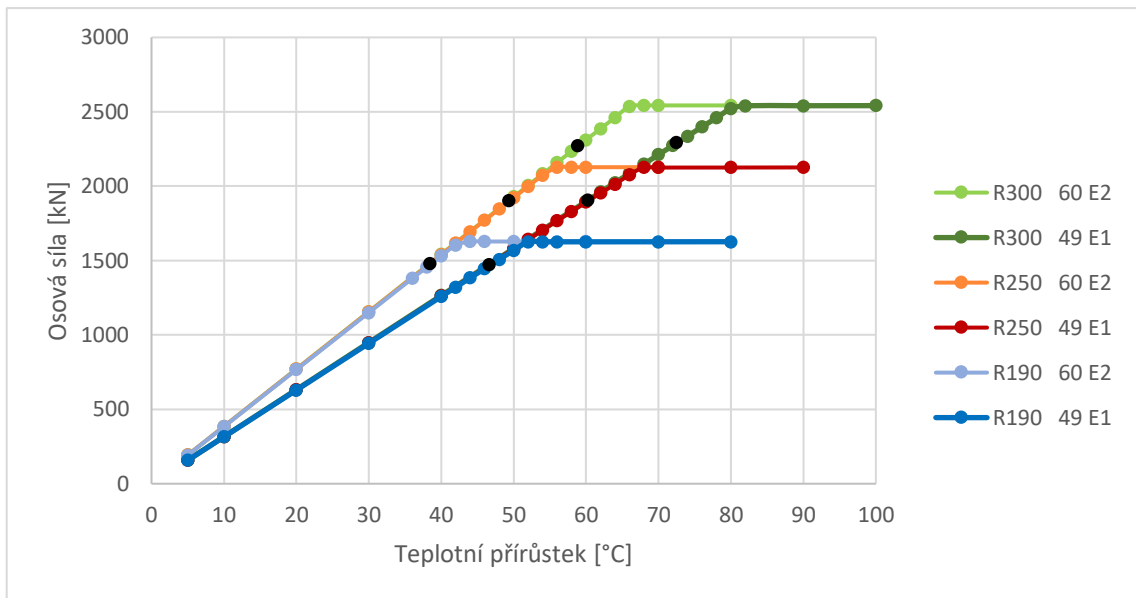
Obrázky 5.21 a 5.23 reprezentují závislost velikosti osové síly na teplotním přírůstku. Na první pohled je mezi nimi patrný rozdíl pouze v poloze kritického bodu. U oblouků s větší počáteční imperfekcí kritický stav nastává při nižších teplotách.

Nárůst osových sil v první fázi grafu je totožný s oblouky bez imperfekcí. Je to asi 31,5 kN/°C pro dvě kolejnice 49 E1 a 38,5 kN/°C pro dvě kolejnice 60 E2. Napětí je samozřejmě v obou případech stejné, a to 5 MPa/°C, pro jednu kolejnici tedy nárůst napětí vychází na 2,5 MPa/1 °C. Osová síla, na které se ustálí vybočená kolej, závisí téměř výhradně na poloměru, velikost výchylky ani profil kolejnice, nemají znatelný vliv.

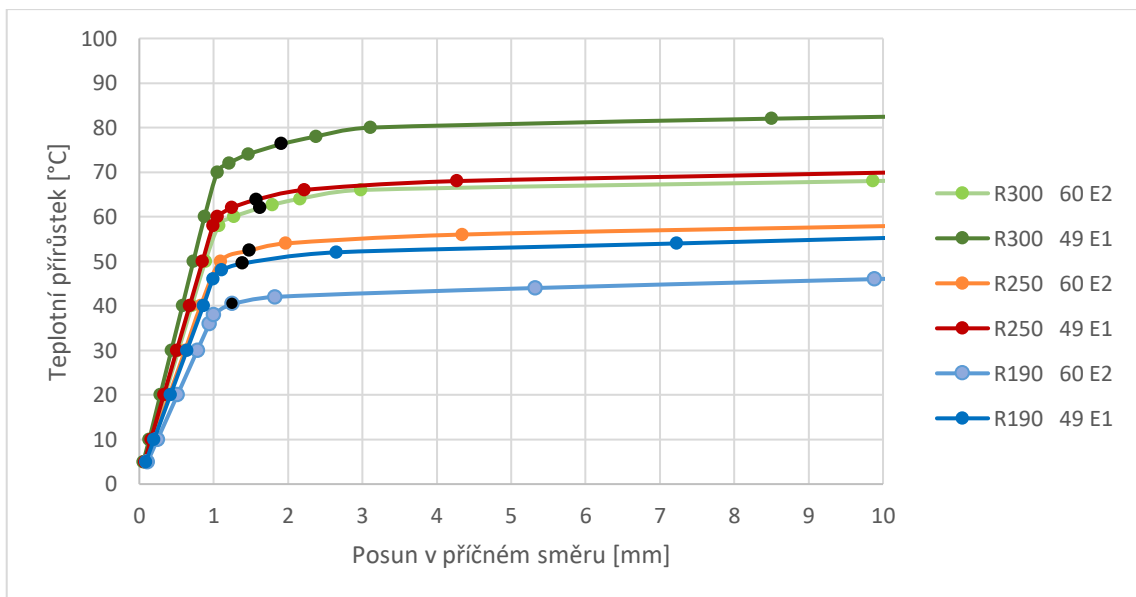


Obr. 5.20 Závislost teplotního přírůstku na příčném posunu pro oblouky s imperfekcí velikosti 20 mm a délky 17 m s použitím příčného odporu 5 kN/pražec

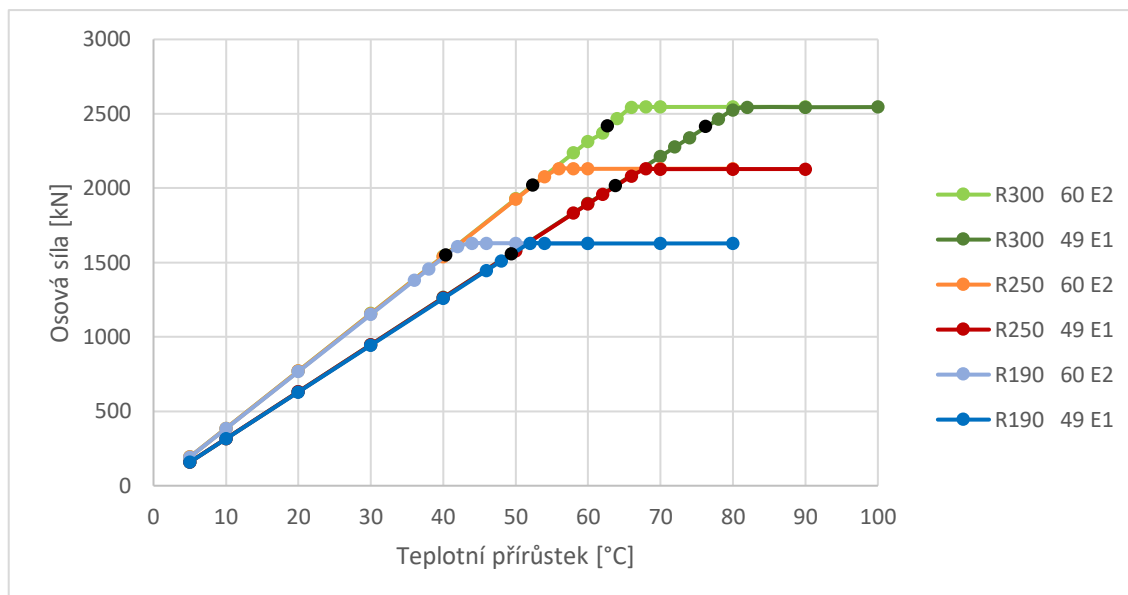
Na obrázku 5.20 si také můžeme všimnout, že pro poloměr 190 m a za použití kolejnic 60 E2 dojde ke ztrátě stability již při teplotním přírůstku 38,4 °C. Při neutrální teplotě 20 °C by byla v tomto okamžiku teplota kolejnice 58,4 °C. Bezстыková kolej se však uvažuje do teploty 60 °C, tato situace tedy není bezpečná. Nutno však podotknout, že v praxi by na oblouk byly nainstalovány pražcové kotvy, a tím by ke ztrátě stability došlo až při větším teplotním přírůstku.



Obr. 5.21 Závislost osové síly na teplotním přírůstku pro oblouky s imperfekcí velikosti 20 mm a délky 17 m s použitím příčného odporu 5 kN/pražec



Obr. 5.22 Závislost teplotního přírůstku na příčném posunu pro oblouky s imperfekcí velikosti 10 mm a délky 17 m s použitím příčného odporu 5 kN/pražec



Obr. 5.23 Závislost osová síly na teplotním přírůstku pro oblouky s imperfekcí velikosti 20 mm a délky 17 m s použitím příčného odporu 5 kN/pražec

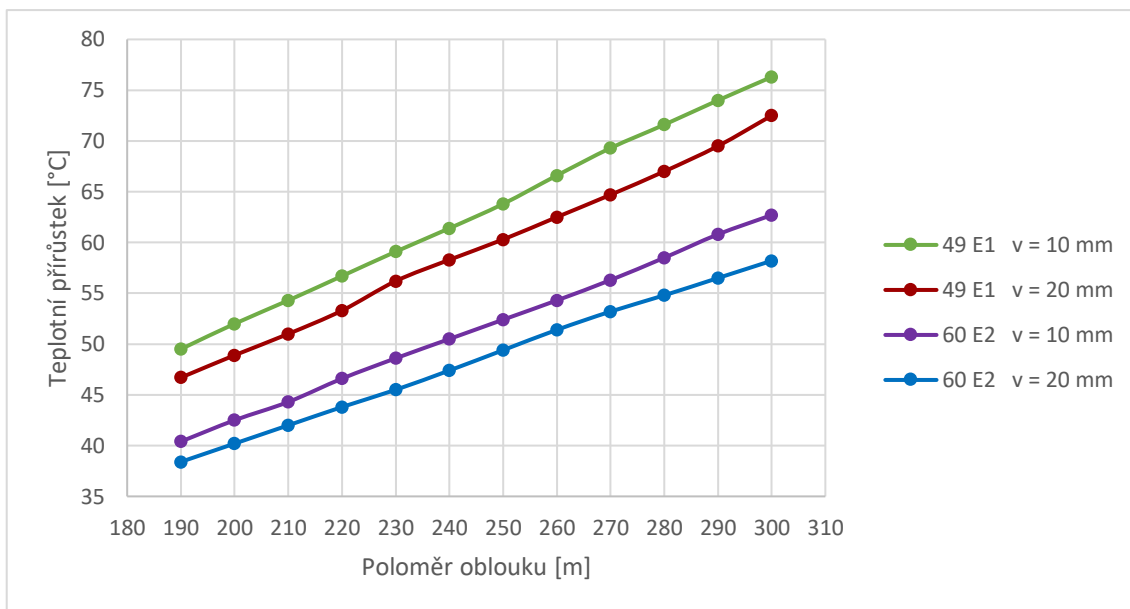
Stabilita koleje v závislosti na poloměru směrového oblouku

Tato problematika byla zkoumána na modelech s poloměry 190 m až 300 m s rozestupy po 10 m. Příčný odpor kolejového lože je 5 kN/pražec a délka počáteční imperfekce se rovná kritické délce zjištěné v předchozím odstavci, tedy 17 m. V každém modelu s konkrétním poloměrem byly postupně použity kolejnice 49 E1 a 60 E2 v kombinaci s počáteční imperfekcí o velikosti 10 a 20 mm. Konkrétní číselné hodnoty jsou uspořádané do tabulek v Příloze A.4.

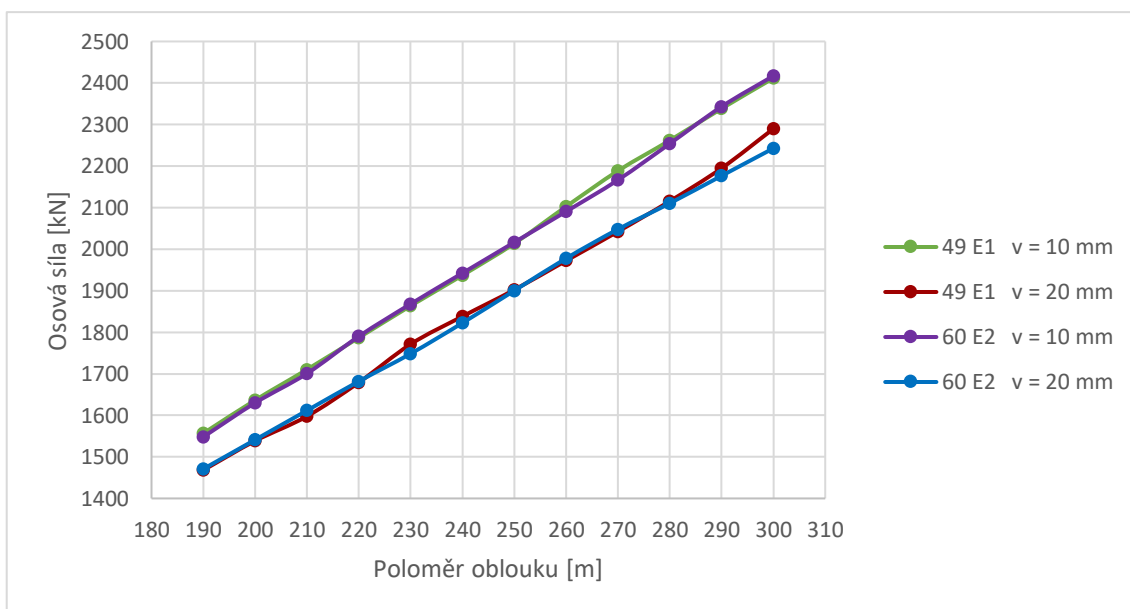
Na obrázcích 5.24 a 5.25 můžeme vidět lineární závislost kritického teplotního přírůstku na poloměru směrového oblouku.

Na získaných výsledcích můžeme shrnout několik obecných závěrů, které byli zmíněny již dříve:

- S rostoucím poloměrem roste i kritický teplotní přírůstek a kritická osová síla
- Kritický teplotní přírůstek je větší pro kolejnice menších profilů
- Kritický teplotní přírůstek a kritická osová síla jsou tím větší, čím menší je velikost počáteční imperfekce
- Kritická osová síla je pro různé profily, při stejných ostatních parametrech, velmi podobná



Obr. 5.24 Závislost kritického teplotního přírůstku na poloměru oblouku s imperfekcí o velikosti 20 mm a délce 17 m s použitím příčného odporu 5 kN/pražec



Obr. 5.25 Závislost kritické osově síly na poloměru oblouku s imperfekcí o velikosti 20 mm a délce 17 m s použitím příčného odporu 5 kN/pražec

Svislý posun

Svislý posun je i v případě oblouků s počáteční imperfekcí málo zajímavý. Číselné hodnoty u sledovaných modelů jsou naprosto stejné jako v tabulce 5.1.

6 Závěr

Tato práce řeší vliv poloměru směřového oblouku na stabilitu bezстыkové koleje při teplotním zatížení. Bylo stanoveno kritérium ztráty stability a byl vytvořen numerický model koleje, zahrnující nelineární průběh příčného odporu koleje.

Při analýze oblouků bez počáteční imperfekce bylo zjištěno, že model se nechová realisticky. Nedošlo k vytvoření vlny vybočení a celý oblouk se posouval rovnoměrně.

Proto byly zkoumány oblouky s počáteční imperfekcí různých velikostí a délek. Byl popsán tvar vlny vybočení a jeho závislost na poloměru oblouku. Dále byla zjišťována délka imperfekce, při níž je kritická osová síla a kritický teplotní přírůstek nejmenší. V modelu se přitom měnily parametry typu kolejnice, velikosti příčného odporu a velikosti počáteční výchylky. Kritická délka počáteční směřové výchylky byla stanovena na 17 m.

Také se ukázalo, že v případě koleje s kolejnicemi 49 E1 dojde ke ztrátě stability při vyšším teplotním přírůstku než v koleji s kolejnicemi 60 E2, ale za vzniku zhruba stejně velkých kritických osových sil. Na kritický teplotní přírůstek má také vliv velikost počáteční imperfekce – čím je větší, tím je kritický přírůstek teploty menší. Co se týče velikosti osových sil, ve fázi před vybočením narůstají o 31,5 kN/°C při použití kolejnic 49 E1 a o 38,5 kN/°C při použití 60 E2, napětí je tedy pro oba případy asi 5 MPa pro dvě kolejnice dohromady, pro jednu pak 2,5 MPa.

V poslední části práce byly porovnávány kritické teplotní přírůstky a kritické osově síly v závislosti na poloměru směřového oblouku v rozmezí 190 až 300 m s imperfekcí délky 17 m, ale různou velikostí a dvěma různými typy kolejnic. Tvar křivek vyšel lineární. Výsledek je tedy takový, že s rostoucím poloměrem roste i kritická osová síla a kritické teplotní zatížení. Teplota při ztrátě stability je větší pro trať s kolejnicemi o menší ploše průřezu nebo při menší velikosti počáteční výchylky.

V této práci by bylo vhodné pokračovat. Podstatné pro další rozvoj je zavedení celého cyklu oteplování a ochlazování koleje a tím také fenoménu tzv. dýchání koleje. Tím by jistě došlo k výraznému přiblížení realitě. Dále by bylo možné aplikovat pražcové kotvy nebo zkusit zvolit jiné kritérium pro určení okamžiku ztráty stability.

Literatura

- [1] PLÁŠEK, Otto, Pavel ZVĚŘINA, Richard SVOBODA a Milan MOCKOVČIAK. *Železniční stavby: Železniční spodek a svršek*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2621-7.
- [2] ZVĚŘINA, Pavel. *Železniční stavby: Návody do cvičení II*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1989.
- [3] SŽDC s.o.: *Předpis S3/2 Bezstyková kolej*. Schváleno generálním ředitelem SŽDC dne 24.5.2013 pod č.j.: S11167/2013-OTH, účinnost od 1. září 2013
- [4] *Vzpěr přímých prutů: Uložení prutu* [online]. [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: <http://www.mitcalc.com/doc/buckling/help/cz/bucklingtxt.htm>
- [5] SERVÍT, Radim, Eva DOLEŽALOVÁ a Miloslav CRHA. *Teorie pružnosti a plasticity I*. Praha: SNTL, 1981
- [6] LICHTBERGER, Bernhard. *Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*. 3., komplett überarb. Neuaufl. Hamburg.: Eurailpress, 2010. ISBN 978-3-7771-0400-3.
- [7] ESVELD, Coenraad. *Modern railway track*. 2nd ed. Zaltbommel: MRT-Productions, c2001. ISBN 90-800-3243-3.
- [8] SCHNEIDER, Philippe. UIC Projekt "USP in track": WP 2: Lateral Track Stability. SBB CFF FFS. 2011, 2011(06), 24.
- [9] SVOBODA, Richard. Měření příčného odporu pražců s novými pražcovými kotvami na zkušebním stendu. Výzkumná zpráva č. SR12757199. 2017, 2017(12), 11.
- [10] ČSN 73 6360-1 *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha: Část 1: Projektování*. říjen 2008. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [11] DLUBAL SOFTWARE. *RF-STABILITY: Popis programu*. Praha, 2014, 50.
- [12] ČSN 73 6360-2 *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha - Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba*. srpen 1997. Praha: Český normalizační institut, 1997.

Seznam použitých symbolů, veličin a zkratek

A	Plocha obou kolejnic
AV	Analytický výpočet
C_1, C_2, C_3 a C_4	Integrační konstanty
d	Rozdělení pražců
D	Převýšení
D_N	Doporučené převýšení
E	Youngův modul pružnosti
f	Koeficient tření, který závisí na velikosti posunu a svislém zatížení
Δf	Velikost volného dýchání
h	Výška pražce
I_z	Moment setrvačnosti k ose z
K	Odpor kolejového lože proti posunu čela pražce
k_y	Koeficient příčného odporu
k_z	Spojité svislá tuhost
L	Délka prutu
L_{cr}	Kritická délka počáteční imperfekce
L_v	Délka počáteční výchylky
l	Délka pražce
N_{sv}	Svislá síla uvažovaná na ložné ploše pražce
N_x, P	Osová tlaková síla
n	Číslo přirozené řady
P_{cr}	Kritická osová síla
R	Poloměr oblouku
q	Příčný odpor pražce
S	Odpor z tření pražce o kolejové lože

ΔT_{cr}	Kritický teplotní přírůstek
u	Posun
Δu	Rozšíření rozchodu
U_{beam}	Ohybová energie prutu
U_{press}	Deformační energie příčným tlakem
U_{tot}	Celková energie
v	Boční výchylka
V	Rychlost
W_P	Práce vykonaná tlakovými silami
x	Souřadnice po délce prutu
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	Pomocné proměnné
α_s	Teplotní roztažnost oceli
β_r	Konstanta vyjadřující příčný odpor
γ	Objemová hmotnost kolejového lože
μ	Substituční pomocná hodnota
σ_x	Osové napětí v kolejnicích
τ	Příčně roznesený odpor
φ	Úhel vnitřního tření kolejového lože
φ_1	Úhel vnitřního tření kolejového lože

Seznam příloh

Příloha A.1 Tabulky oblouků bez imperfekce

Příloha A.2 Tabulky oblouků s imperfekcí

Příloha A.3 Tabulky oblouků s kritickou délkou vlny imperfekce

Příloha A.4 Tabulky oblouků s kritickou délkou vlny imperfekce a různými poloměry

Přílohy

Příloha A.1 Tabulky oblouků bez imperfekce

Tab. A.1.1:

Poloměr	R = 190 m			
Převýšení	D = 60 mm			
Typ kolejnice	49 E1			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Imperfekce	Není			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,075	157,61	78,823	78,783
10	0,174	314,91	157,462	157,450
20	0,372	629,51	314,739	314,773
30	0,571	944,11	472,015	472,097
40	0,769	1258,71	629,289	629,422
50	0,968	1573,31	786,743	786,563
51	0,988	1604,77	802,481	802,290
52	1,422	1630,15	815,101	815,052
53	3,715	1630,30	815,212	815,088
54	5,996	1630,31	815,167	815,144
55	8,277	1630,32	815,232	815,083
56	10,566	1630,36	815,315	815,040
60	19,674	1630,46	815,623	814,841
70	42,480	1630,58	816,297	814,284

Tab. A.1.2

Poloměr	R = 250 m			
Převýšení	D = 46 mm			
Typ kolejnice	49 E1			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Imperfekce	Není			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,058	158,07	79,057	79,008
10	0,133	315,95	158,001	157,945
20	0,285	631,71	315,889	315,819
30	0,436	947,47	473,777	473,694
40	0,587	1263,23	631,666	631,568
50	0,739	1579,00	789,555	789,441
60	0,890	1894,76	947,444	947,315
66	0,981	2084,22	1042,180	1042,040
67	0,996	2115,80	1057,970	1057,830
68	2,528	2131,34	1065,760	1065,580
69	5,598	2130,60	1065,440	1065,160
70	8,596	2130,64	1065,510	1065,130
71	11,595	2130,42	1065,330	1065,090
80	38,559	2131,40	1066,250	1065,150
90	68,547	2131,66	1066,860	1064,800

Tab. A.1.3

Poloměr	R = 300 m			
Převýšení	D = 38 mm			
Typ kolejnice	49 E1			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Imperfekce	Není			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,049	158,25	79,146	79,106
10	0,112	317,38	159,212	158,166
20	0,236	632,63	316,343	316,287
30	0,365	948,88	474,473	474,407
40	0,491	1265,13	632,604	632,528
50	0,618	1581,38	790,735	790,648
60	0,744	1897,64	948,867	948,768
70	0,870	2213,89	1107,000	1106,890
79	0,984	2498,52	1249,320	1249,200
80	0,997	2530,14	1265,130	1265,010
81	2,677	2547,06	1273,610	1273,450
82	6,299	2546,88	1273,560	1273,320
83	9,892	2546,95	1273,640	1273,310
90	35,044	2547,44	1274,160	1273,280
100	70,962	2548,15	1274,650	1273,500

Tab. A.1.4

Poloměr	R = 190 m			
Převýšení	D = 60 mm			
Typ kolejnice	60 E2			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Imperfekce	Není			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,096	192,02	96,036	95,987
10	0,217	383,65	191,836	191,813
20	0,458	766,81	383,441	383,367
30	0,700	1150,07	575,043	575,022
40	0,942	1533,42	766,643	766,779
42	0,990	1610,07	805,110	804,964
43	1,983	1632,17	816,112	816,054
44	4,265	1631,95	815,966	815,983
45	6,546	1631,96	816,058	815,901
46	8,827	1631,97	816,130	815,839
50	17,949	1632,04	816,471	815,571
60	40,755	1632,20	817,322	814,878

Tab. A.1.5

Poloměr	R = 250 m			
Převýšení	D = 46 mm			
Typ kolejnice	60 E2			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Imperfekce	Není			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,074	192,72	96,394	96,330
10	0,166	385,22	192,644	192,572
20	0,351	770,20	385,145	385,055
30	0,535	1155,18	577,646	577,538
40	0,720	1540,17	770,148	770,020
50	0,905	1925,15	962,649	962,503
54	0,979	2079,15	1039,650	1039,500
55	0,997	2117,64	1058,900	1058,740
56	2,847	2132,50	1066,360	1066,140
57	5,868	2132,24	1066,290	1065,950
58	8,867	2132,27	1066,140	1066,130
60	14,866	2132,09	1066,280	1065,810
70	44,831	2132,68	1067,160	1065,520
80	74,794	2133,50	1068,040	1065,460

Tab. A.1.6

Poloměr	R = 300 m			
Převýšení	D = 38 mm			
Typ kolejnice	60 E2			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Imperfekce	Není			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,062	193,02	96,534	96,482
10	0,140	385,87	192,965	192,906
20	0,294	771,38	385,627	385,755
30	0,448	1157,29	578,689	578,604
40	0,602	1543,00	771,551	771,453
50	0,756	1928,72	964,413	964,302
60	0,910	2314,43	1157,280	1157,150
64	0,972	2468,71	1234,420	1234,290
65	0,987	2507,28	1253,710	1253,570
66	1,003	2545,85	1272,990	1272,860
67	4,358	2548,49	1274,360	1274,130
68	7,956	2548,53	1274,430	1274,100
70	15,145	2548,40	1274,330	1274,070
80	51,105	2549,14	1275,090	1274,050

Tab. A.1.7

Poloměr	R = 190 m			
Převýšení	D = 60 mm			
Typ kolejnice	49 E1			
Odpor kolejového lože ve směru x	Dle SBB			
Imperfekce	Není			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,012	108,55	79,284	29,266
10	0,023	317,10	158,538	158,559
20	0,058	634,00	316,950	317,054
30	0,126	950,47	475,141	475,325
40	0,193	1266,93	633,332	633,597
50	0,260	1583,39	791,521	791,870
60	0,328	1899,85	949,709	950,144
70	0,414	2216,06	1107,760	1108,300
80	0,534	2531,78	1265,580	1266,200
90	0,655	2847,51	1423,400	1424,110
100	0,775	3163,24	1581,220	1582,020
110	0,896	3478,97	1739,040	1739,930
120	1,016	3794,70	1896,850	1897,850
130	1,243	4108,95	2053,920	2055,030
140	1,494	4422,87	2210,830	2212,040
150	1,745	4736,80	2367,750	2369,050
160	2,105	5049,21	2523,900	2525,310
170	2,495	5361,19	2679,840	2681,350

180	2,885	5673,17	2835,780	2837,390
190	3,305	5984,74	2991,510	2993,230
200	3,751	6295,96	3147,070	3148,890
210	4,518	6602,74	3300,390	3302,350
214	6,042	6708,59	3353,280	3355,310
216	10,558	6709,24	3353,730	3355,510
218	15,061	6710,08	3354,270	3355,810
220	19,588	6710,59	3354,650	3355,940
230	42,171	6713,85	3356,910	3356,940
240	64,671	6718,26	3359,740	3358,520
250	87,512	6718,02	3360,230	3357,790

Tab. A.1.8

Poloměr	R = 250 m			
Převýšení	D = 46 mm			
Typ kolejnice	49 E1			
Odpor kolejového lože ve směru x	Dle SBB			
Imperfekce	Není			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,010	158,61	79,328	79,279
10	0,018	317,18	158,597	158,579
20	0,035	634,42	317,172	317,250
30	0,080	951,23	475,597	475,629
40	0,131	1268,03	633,987	634,044
50	0,182	1584,84	792,376	792,460
60	0,234	1901,64	950,765	950,875
70	0,285	2218,72	1109,430	1109,290
80	0,336	2535,55	1267,850	1267,700
90	0,400	2852,28	1425,860	1426,420
100	0,492	3168,70	1584,440	1584,260
110	0,584	3485,11	1742,650	1742,460
120	0,676	3801,53	1900,870	1900,660
130	0,768	4117,95	2059,090	2058,860
140	0,860	4434,36	2217,300	2217,060
150	0,952	4750,78	2375,520	2375,260
160	1,049	5067,16	2533,720	2533,440
170	1,240	5382,53	2691,410	2691,120

180	1,432	5697,89	2849,100	2848,790
190	1,624	6013,25	3006,790	3006,460
200	1,824	6328,55	3164,450	3164,100
210	2,123	6642,79	3321,580	3321,210
220	2,422	6957,02	3478,710	3478,310
230	2,720	7271,26	3635,840	3635,420
240	3,019	7585,50	3792,970	3792,530
250	3,355	7899,35	3949,910	3949,440
260	3,697	8213,13	4106,810	4106,320
270	4,040	8526,90	4263,710	4263,190
278	4,920	8771,51	4386,040	4385,470
280	7,099	8812,05	4404,850	4407,200
282	13,122	8811,83	4404,830	4407,000
290	36,651	8816,94	4407,750	4409,190
300	66,089	8823,03	4411,260	4411,770
310	95,491	8829,48	4414,960	4414,520
320	125,008	8834,76	4418,050	4416,710
330	154,395	8841,37	4421,820	4419,550

Tab. A.1.9

Poloměr	R = 300 m			
Převýšení	D = 38 mm			
Typ kolejnice	49 E1			
Odpor kolejového lože ve směru x	dle SBB			
Imperfekce	Není			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,009	158,63	79,320	79,310
10	0,016	317,26	158,621	158,638
20	0,030	634,52	317,224	317,294
30	0,055	951,68	475,773	475,903
40	0,098	1268,68	634,247	634,434
50	0,141	1585,69	792,720	792,965
60	0,184	1902,69	951,192	951,497
70	0,227	2219,69	1109,660	1110,030
80	0,270	2536,70	1268,140	1268,560
90	0,313	2853,71	1426,610	1427,100
100	0,356	3170,71	1585,080	1585,630
110	0,419	3487,53	1743,450	1744,080
120	0,496	3804,24	1901,770	1902,470
130	0,572	4120,95	2060,090	2060,860
140	0,649	4437,66	2218,410	2219,250
150	0,726	4754,37	2376,730	2377,640
160	0,803	5071,07	2535,040	2536,030
170	0,880	5387,78	2693,360	2694,420

180	0,957	5704,49	2851,680	2852,810
190	1,034	6021,20	3009,990	3011,210
200	1,186	6337,25	3167,970	3169,280
210	1,346	6653,22	3325,910	3327,310
220	1,507	6969,20	3483,860	3485,340
230	1,667	7285,17	3641,800	3643,370
240	1,840	7601,04	3799,680	3801,360
250	2,090	7916,23	3957,230	3959,000
260	2,341	8231,42	4114,780	4116,640
270	2,591	8546,60	4272,320	4274,280
280	2,841	8861,79	4429,870	4431,920
290	3,095	9176,95	4587,390	4589,560
300	3,381	9491,81	4744,770	4747,040
310	3,668	9806,68	4902,150	4904,530
320	3,955	10121,55	5059,530	5062,020
330	4,656	10432,77	5215,070	5217,700
334	5,068	10556,10	5276,710	5279,390
336	11,520	10562,79	5280,090	5282,700
338	18,529	10564,49	5281,010	5283,480
340	25,531	10566,27	5281,960	5284,310
350	60,644	10574,25	5286,350	5287,900
360	95,609	10583,53	5291,360	5292,170
370	131,009	10588,87	5294,410	5294,460

Tab. A.1.10

Poloměr		R = 190 m		
Převýšení		D = 60 mm		
Typ kolejnice		60 E2		
Odpor kolejového lože ve směru x		dle SBB		
Imperfekce		Není		
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,014	193,49	96,758	96,729
10	0,027	386,97	193,476	193,493
20	0,086	773,37	386,627	386,743
30	0,168	1159,40	579,592	579,803
40	0,249	1545,42	772,557	772,864
50	0,330	1931,45	965,520	965,925
60	0,447	2316,88	1158,180	1158,700
70	0,593	2701,81	1350,600	1351,210
80	0,739	3086,74	1543,010	1543,730
90	0,884	3471,68	1735,430	1736,250
100	1,032	3856,59	1927,820	1928,770
110	1,336	4238,85	2118,900	2119,950
120	1,640	4621,09	2309,970	2311,120
130	2,031	5001,87	2500,300	2501,570
140	2,504	5381,26	2689,950	2691,310
150	2,976	5760,65	2879,590	2881,060
160	3,507	6139,05	3068,740	3070,310
170	4,048	6517,29	3257,810	3259,480

174	4,789	6659,67	3328,990	3330,680
176	6,381	6710,24	3354,250	3355,990
178	10,905	6710,91	3354,740	3356,170
180	15,425	6711,65	3355,260	3356,390
190	38,059	6714,77	3357,600	3357,170
200	60,757	6716,75	3359,350	3357,400
210	83,355	6723,51	3364,970	3358,540
220	106,174	6720,41	3362,710	3357,700
230	128,459	6729,58	3368,010	3361,570
240	151,610	6723,73	3365,900	3357,830
250	174,549	6721,63	3365,630	3356,000

Tab. A.1.11

Poloměr	R = 250 m			
Převýšení	D = 46 mm			
Typ kolejnice	60 E2			
Odpor kolejového lože ve směru x	dle SBB			
Imperfekce	Není			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,012	193,57	96,796	96,775
10	0,022	387,14	193,562	193,578
20	0,050	774,17	387,129	387,043
30	0,112	1160,77	580,434	580,331
40	0,174	1547,36	773,739	773,619
50	0,236	1933,95	967,044	966,907
60	0,298	2320,54	1160,350	1160,190
70	0,360	2707,14	1353,660	1353,480
80	0,465	3093,18	1546,690	1546,490
90	0,576	3479,14	1739,680	1739,460
100	0,687	3865,10	1932,660	1932,440
110	0,798	4251,07	2125,660	2125,410
120	0,910	4637,01	2318,640	2318,370
130	1,021	5022,97	2511,630	2511,340
140	1,244	5407,51	2703,910	2703,600
150	1,476	5791,90	2896,120	2895,780
160	1,709	6176,30	3088,330	3087,970
170	2,027	6559,59	3279,990	3279,600

180	2,390	6942,31	3471,360	3470,950
190	2,753	7325,03	3662,740	3662,290
200	3,126	7707,62	3854,050	3853,570
210	3,541	8089,66	4045,080	4044,580
220	3,956	8471,70	4236,120	4235,580
226	4,592	8695,94	4346,990	4348,950
228	4,888	8774,60	4388,830	4385,770
230	7,588	8812,30	4405,160	4407,140
232	13,495	8813,54	4405,890	4407,650
234	19,390	8814,92	4406,690	4408,230
240	37,140	8818,29	4408,710	4409,580
250	66,770	8823,21	4411,760	4411,450
260	96,508	8826,81	4414,140	4412,670
270	125,688	8837,55	4420,050	4417,500
280	155,595	8839,02	4421,330	4417,690

Tab. A.1.12

Poloměr	R = 300 m			
Převýšení	D = 38 mm			
Typ kolejnice	60 E2			
Odpor kolejového lože ve směru x	dle SBB			
Imperfekce	Není			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,011	193,61	96,811	96,795
10	0,019	387,21	193,598	193,614
20	0,035	774,42	387,171	387,251
30	0,082	1161,31	580,577	580,729
40	0,134	1548,14	773,958	774,179
50	0,186	1934,97	967,339	967,630
60	0,237	2321,80	1160,720	1161,080
70	0,289	2708,63	1354,100	1354,530
80	0,341	3095,46	1547,480	1547,980
90	0,412	3482,09	1740,750	1741,340
100	0,505	3868,48	1933,910	1934,571
110	0,598	4254,86	2127,060	2127,800
120	0,691	4641,26	2320,220	2321,040
130	0,784	5027,64	2513,370	2514,270
140	0,877	5414,04	2706,530	2707,510
150	0,970	5800,43	2899,680	2900,750
160	1,098	6186,45	3092,640	3093,810
170	1,292	6571,75	3285,250	3286,500

180	1,486	6957,05	3477,850	3479,200
190	1,681	7342,35	3670,460	3671,890
200	1,923	7727,14	3862,800	3864,340
210	2,227	8111,27	4054,820	4056,450
220	2,530	8495,40	4246,840	4248,560
230	2,834	8879,53	4438,860	4440,670
240	3,151	9263,51	4630,800	4632,710
250	3,499	9647,17	4822,580	4824,590
260	3,846	10030,83	5014,360	5016,470
270	4,551	10410,65	5204,210	5206,440
272	4,797	10505,45	5241,620	5263,830
274	5,048	10560,26	5278,980	5281,280
276	11,855	10564,56	5281,210	5283,350
278	18,897	10566,29	5282,170	5284,120
280	25,940	10568,03	5283,110	5284,920
290	61,104	10577,15	5288,150	5289,000
300	96,576	10582,92	5291,520	5291,400
310	131,979	10589,61	5295,330	5294,280
320	167,224	10597,86	5299,910	5297,950
330	203,054	10599,69	5301,330	5298,360

Příloha A.2 Tabulky oblouků s imperfekcí

Tab. A.2.1

Poloměr		R = 250 m			
Převýšení		D = 46 mm			
Typ kolejnice		49 E1			
Odpor kolejového lože ve směru x		5 kN/pražec			
Velikost imperfekce		v = 20 mm			
Délka vlny [m]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
			Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
4	67,4	4,173	2121,85	1041,610	1080,240
8	65,3	3,952	2056,43	1011,570	1044,860
12	64,0	3,558	2016,08	993,570	1022,510
16	60,6	2,228	1911,24	948,295	962,944
17	60,3	2,015	1902,17	944,910	957,262
18	60,0	1,808	1893,10	941,475	951,624
19	60,3	1,739	1902,69	946,708	955,980
20	60,4	1,634	1906,04	948,983	957,056
24	61,3	1,394	1934,89	964,848	970,044
28	62,1	1,228	1960,47	978,625	981,844
Kritické hodnoty dle analytického výpočtu					
11,1	54,7	-	1733,84	-	-

Tab. A.2.2

Poloměr		R = 250 m			
Převýšení		D = 46 mm			
Typ kolejnice		60 E2			
Odpor kolejového lože ve směru x		5 kN/pražec			
Velikost imperfekce		v = 20 mm			
Délka vlny [m]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
			Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
4	55,3	3,625	2123,19	1043,240	1079,950
8	52,3	3,168	2009,10	990,066	1019,030
12	50,5	2,651	1940,90	959,066	981,831
15	49,4	2,067	1899,69	942,259	957,435
16	49,1	1,850	1888,55	937,888	950,659
17	49,4	1,826	1900,17	944,115	956,058
18	49,5	1,731	1904,21	946,779	957,435
20	49,7	1,555	1912,28	951,981	960,294
24	50,2	1,297	1932,06	963,594	968,468
28	51,0	1,196	1963,06	979,875	983,189
Kritické hodnoty dle analytického výpočtu					
14,0	48,0	-	1851,47	-	-

Tab. A.2.3

Poloměr	R = 250 m				
Převýšení	D = 46 mm				
Typ kolejnice	49 E1				
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec				
Velikost imperfekce	v = 10 mm				
Délka vlny [m]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
			Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
4	67,4	2,598	2126,29	1053,450	1072,840
8	67,0	2,665	2113,38	1046,970	1066,410
12	65,7	2,332	2072,5	1028,750	1043,750
16	64,0	1,695	2019,82	1005,850	1013,970
17	63,8	1,573	2013,71	1003,440	1010,270
18	64,0	1,548	2020,04	1006,800	1013,240
20	64,2	1,453	2026,49	1010,600	1015,890
24	64,7	1,255	2042,68	1019,790	1022,890
28	64,8	1,154	2045,97	1022,020	1023,950
Kritické hodnoty dle analytického výpočtu					
10,6	59,2	-	1878,26	-	-

Tab. A.2.4

Poloměr	R = 250 m				
Převýšení	D = 46 mm				
Typ kolejnice	60 E2				
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec				
Velikost imperfekce	v = 10 mm				
Délka vlny [m]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
			Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
4	55,3	2,321	2127,24	1054,430	1072,810
8	55,2	2,452	2122,98	1051,790	1071,190
12	53,9	2,117	2073,21	1029,310	1043,900
16	52,5	1,571	2020,26	1006,200	1014,060
17	52,4	1,484	2016,57	1004,910	1011,660
18	52,4	1,423	2016,68	1005,360	1011,320
20	52,4	1,303	2016,90	1006,240	1010,660
24	52,9	1,162	2036,47	1016,960	1019,510
28	53,1	1,107	2044,20	1021,250	1022,950
Kritické hodnoty dle analytického výpočtu					
13,7	50,7	-	1954,18	-	-

Tab. A.2.5

Poloměr	R = 250 m				
Převýšení	D = 46 mm				
Typ kolejnice	49 E1				
Odpor kolejového lože ve směru x	dle SBB				
Velikost imperfekce	v = 20 mm				
Délka vlny [m]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
			Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
2	125,3	7,872	3948,16	1959,010	1989,150
2,5	114,1	6,154	3599,22	1784,480	1814,740
3	111,5	5,042	3520,98	1744,740	1776,240
3,5	116,8	5,112	3689,74	1828,140	1861,600
4	122,4	5,023	3867,81	1915,840	1951,970
5	137,7	5,129	4352,95	2154,160	2198,790
6	152,5	5,450	4822,01	2386,430	2435,580
8	215,0	8,249	6790,84	3358,640	3432,200
12	222,6	8,847	7029,03	3475,940	3553,090
16	230,8	6,798	7290,22	3620,730	3669,490
20	239,3	5,741	7559,35	3763,300	3796,050
Kritické hodnoty dle analytického výpočtu					
6,3	169,7	-	5382,22	-	-

Tab. A.2.6

Poloměr	R = 250 m				
Převýšení	D = 46 mm				
Typ kolejnice	60 E2				
Odpor kolejového lože ve směru x	dle SBB				
Velikost imperfekce	v = 20 mm				
Délka vlny [m]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
			Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
2	118,5	7,067	4559,85	2264,230	2295,620
2,5	109,3	6,392	4207,14	2088,190	2118,950
3	106,1	5,681	4086,55	2027,220	2059,330
3,5	105,6	5,015	4070,12	2017,800	2052,320
4	109,7	5,118	4228,84	2095,490	2133,350
5	120,3	4,973	4639,63	2296,360	2343,270
6	132,2	5,586	5098,69	2523,460	2575,230
8	180,1	7,590	6937,52	3431,710	3505,810
12	186,6	8,244	7185,42	3553,290	3632,130
16	190,1	6,092	7323,57	3638,340	3685,230
20	197,6	5,523	7645,98	3822,990	3822,990
Kritické hodnoty dle analytického výpočtu					
7,7	160,1	-	6172,72	-	-

Tab. A.2.7

Poloměr	R = 250 m				
Převýšení	D = 46 mm				
Typ kolejnice	49 E1				
Odpor kolejového lože ve směru x	dle SBB				
Velikost imperfekce	v = 10 mm				
Délka vlny [m]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
			Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
2	179,2	7,393	5663,07	2816,790	2846,280
2,5	171,2	6,27	5412,74	2691,220	2721,520
3	170,0	5,183	5376,94	2672,590	2704,350
3,5	176,1	5,218	5569,85	2768,070	2801,780
4	180,7	4,955	5715,55	2839,550	2876,000
5	197,9	5,949	6257,49	3106,560	3150,930
6	211,0	6,04	6670,10	3311,500	3358,600
8	234,2	7,398	7398,41	3670,430	3727,980
12	250,1	7,818	7896,94	3921,440	3975,500
16	254,3	6,368	7970,54	3938,080	4032,460
20	267,9	5,796	8457,13	4205,120	4252,010
Kritické hodnoty dle analytického výpočtu					
5,8	201,3	-	6382,24	-	-

Tab. A.2.8

Poloměr	R = 250 m				
Převýšení	D = 46 mm				
Typ kolejnice	60 E2				
Odpor kolejového lože ve směru x	dle SBB				
Velikost imperfekce	v = 10 mm				
Délka vlny [m]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
			Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
2	167,9	6,445	6471,69	3220,120	3251,570
2,5	158,1	5,800	6096,54	3032,740	3063,800
3	156,0	5,407	6016,78	2992,140	3024,640
3,5	156,8	5,061	6048,43	3006,760	3041,670
4	159,6	5,006	6156,41	3059,140	3097,270
5	174,8	6,130	6738,42	3345,270	3393,150
6	180,9	5,784	6972,94	3462,430	3510,510
8	198,5	7,225	7645,28	3792,620	3852,660
12	205,3	6,639	7905,81	3929,570	3976,240
16	210,9	6,267	8120,05	4041,640	4078,410
20	222,1	5,697	8547,65	4246,770	4300,880
Kritické hodnoty dle analytického výpočtu					
7,2	183,2	-	7062,89	-	-

Tab. A.2.9

Poloměr	R = 190 m				
Převýšení	D = 60 mm				
Typ kolejnice	49 E1				
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec				
Velikost imperfekce	v = 20 mm				
Délka vlny [m]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
			Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
4	51,8	3,334	1624,68	798,154	826,528
8	51,5	3,460	1615,18	793,238	821,946
12	48,1	2,432	1510,24	746,601	763,638
14	47,1	1,975	1479,77	733,870	745,904
15	46,8	1,790	1470,75	730,370	740,378
16	46,7	1,655	1467,90	729,703	738,195
17	46,7	1,547	1468,13	730,438	737,694
18	46,8	1,469	1471,45	732,561	738,884
20	47,0	1,326	1478,05	736,696	741,351
24	47,7	1,183	1500,38	748,785	751,594
28	48,4	1,116	1522,54	760,346	762,196
Kritické hodnoty dle analytického výpočtu					
12,3	44,4	-	1408,14	-	-

Tab. A.2.10

Poloměr	R = 190 m				
Převýšení	D = 60 mm				
Typ kolejnice	60 E2				
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec				
Velikost imperfekce	v = 20 mm				
Délka vlny [m]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
			Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
4	42,6	2,959	1628,08	800,410	827,670
8	41,5	2,886	1586,41	780,309	806,103
12	38,2	1,882	1462,22	724,526	737,693
13	37,9	1,719	1451,10	720,012	731,086
14	38,0	1,649	1455,07	722,525	732,544
16	38,2	1,578	1466,36	728,809	737,546
18	38,5	1,401	1474,79	734,194	740,591
20	38,7	1,291	1482,71	738,924	743,790
24	39,3	1,178	1505,97	751,424	754,550
28	39,8	1,104	1525,32	761,675	763,643
Kritické hodnoty dle analytického výpočtu					
15,7	38,2	-	1471,95	-	-

Tab. A.2.11

Poloměr	R = 300 m				
Převýšení	D = 38 mm				
Typ kolejnice	49 E1				
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec				
Velikost imperfekce	v = 20 mm				
Délka vlny [m]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
			Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
4	80,3	5,095	2530,65	1242,210	1288,440
8	80,1	5,252	2526,23	1238,400	1287,830
12	76,9	4,474	2426,06	1193,710	1232,350
16	72,8	2,951	2298,95	1138,460	1160,490
18	72,1	2,443	2277,67	1130,550	1147,120
19	71,9	2,228	2271,72	1128,720	1143,000
20	71,8	2,041	2268,87	1128,290	1140,580
21	71,8	1,886	2269,15	1129,270	1139,880
22	71,9	1,760	2272,53	1131,640	1140,890
24	72,3	1,578	2285,48	1139,130	1146,350
28	73,3	1,352	2317,49	1156,440	1161,050
Kritické hodnoty dle analytického výpočtu					
10,4	61,9	-	1962,63	-	-

Tab. A.2.12

Poloměr	R = 300 m				
Převýšení	D = 38 mm				
Typ kolejnice	60 E2				
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec				
Velikost imperfekce	v = 20 mm				
Délka vlny [m]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
			Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
4	65,7	4,188	2527,31	1241,330	1285,980
8	65,5	4,527	2520,02	1236,350	1283,670
12	62,1	3,657	2390,32	1177,760	1212,560
16	58,4	2,295	2250,18	1116,110	1134,070
17	58,2	2,107	2242,79	1113,610	1129,180
18	58,2	1,968	2243,04	1114,640	1128,400
20	58,7	1,818	2262,57	1137,080	1125,490
24	59,4	1,501	2290,17	1141,390	1148,780
28	60,2	1,306	2321,39	1158,310	1163,080
Kritické hodnoty dle analytického výpočtu					
13,1	55,3	-	2131,3	-	-

Příloha A.3 Tabulky oblouků s kritickou délkou vlny imperfekce

Tab. A.3.1

Poloměr	R = 190 m			
Převýšení	D = 60 mm			
Typ kolejnice	49 E1			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Délka vlny imperfekce	L = 17 m			
Velikost imperfekce	v = 10 mm			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,087	157,60	78,760	78,838
10	0,197	314,88	157,336	157,548
20	0,418	629,45	314,486	314,967
30	0,639	944,02	471,636	472,388
40	0,860	1258,59	628,784	629,810
46	0,992	1447,34	723,073	724,264
48	1,103	1510,13	754,063	756,069
49,5	1,388	1556,70	776,012	780,684
52	2,644	1628,39	807,558	820,833
54	7,222	1628,22	807,594	820,623
60	20,908	1628,30	808,003	820,292
70	43,711	1628,49	808,727	819,759
80	66,509	1628,76	809,492	819,268

Tab. A.3.2

Poloměr	R = 250 m			
Převýšení	D = 46 mm			
Typ kolejnice	49 E1			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Délka vlny imperfekce	L = 17 m			
Velikost imperfekce	v = 10 mm			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,069	158,05	78,980	79,073
10	0,155	315,92	157,846	158,077
20	0,329	631,66	315,578	316,084
30	0,502	947,40	473,308	474,092
40	0,676	1263,14	631,038	632,102
50	0,850	1578,88	788,766	790,112
58	0,989	1831,47	914,948	916,522
60	1,045	1894,59	946,357	948,236
62	1,244	1957,48	980,610	976,867
63,8	1,573	2013,71	1003,440	1010,270
66	2,215	2081,72	1034,580	1047,140
68	4,271	2128,89	1055,110	1073,780
70	10,353	2128,03	1054,800	1073,230
80	40,328	2128,50	1055,490	1073,010
90	70,319	2128,75	1056,090	1072,660

Tab. A.3.3

Poloměr	R = 300 m			
Převýšení	D = 38 mm			
Typ kolejnice	49 E1			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Délka vlny imperfekce	L = 17 m			
Velikost imperfekce	v = 10 mm			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,051	158,24	79,070	79,172
10	0,133	316,36	158,059	158,298
20	0,281	632,59	316,036	316,552
30	0,430	948,82	474,012	474,807
40	0,579	1265,05	631,986	633,063
50	0,727	1581,28	789,959	791,320
60	0,877	1897,51	947,931	949,578
70	1,050	2213,71	1105,740	1107,970
72	1,204	2276,80	1136,560	1140,240
74	1,463	2339,69	1166,780	1172,910
76,3	1,914	2411,65	1200,670	1210,980
78	2,378	2464,51	1225,030	1239,480
80	3,107	2526,16	1252,760	1273,400
82	8,497	2544,29	1260,430	1283,860
90	37,322	2544,23	1260,690	1283,540
100	73,238	2545,11	1261,510	1283,600

Tab. A.3.4

Poloměr	R = 190 m			
Převýšení	D = 60 mm			
Typ kolejnice	60 E2			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Délka vlny imperfekce	L = 17 m			
Velikost imperfekce	v = 10 mm			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,110	192,06	95,949	96,114
10	0,244	383,62	191,664	191,952
20	0,512	766,84	383,092	383,744
30	0,780	1150,06	574,519	575,537
36	0,941	1379,99	689,374	690,615
38	0,995	1456,63	727,659	728,974
40,4	1,255	1548,12	772,135	775,984
42	1,821	1607,62	798,979	808,644
44	5,322	1630,01	808,484	821,527
46	9,886	1630,02	808,636	821,387
50	19,011	1630,05	808,958	821,096
60	41,818	1630,24	809,816	820,421

Tab. A.3.5

Poloměr	R = 250 m			
Převýšení	D = 46 mm			
Typ kolejnice	60 E2			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Délka vlny imperfekce	L = 17 m			
Velikost imperfekce	v = 10 mm			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,087	192,71	96,290	96,419
10	0,192	385,19	192,436	192,751
20	0,403	770,14	384,727	385,415
30	0,614	1155,10	577,015	578,081
40	0,825	1540,05	769,302	770,749
50	1,091	1924,92	961,184	963,738
52,4	1,484	2016,57	1004,910	1011,660
54	1,965	2076,95	1032,610	1044,340
56	4,339	2130,21	1055,880	1074,330
58	10,367	2129,89	1055,840	1074,050
60	16,364	2129,99	1056,000	1073,990
70	46,344	2130,48	1056,810	1073,670
80	76,318	2131,04	1057,660	1073,380

Tab. A.3.6

Poloměr	R = 300 m			
Převýšení	D = 38 mm			
Typ kolejnice	60 E2			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Délka vlny imperfekce	L = 17 m			
Velikost imperfekce	v = 10 mm			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,066	193,00	96,432	96,571
10	0,164	385,85	192,760	193,086
20	0,345	771,53	385,414	386,117
30	0,525	1157,22	578,066	579,149
40	0,706	1542,90	770,716	772,183
50	0,887	1928,58	963,364	965,220
58	1,070	2237,08	1117,200	1119,880
60	1,273	2313,95	1154,550	1159,400
62	1,627	2370,47	1170,910	1199,558
62,7	1,788	2417,14	1203,400	1213,740
64	2,158	2466,48	1226,160	1240,320
66	2,980	2541,51	1259,700	1281,810
68	9,864	2545,76	1261,370	1284,390
70	17,062	2545,83	1261,490	1284,340
80	53,025	2546,39	1262,240	1284,150
90	88,981	2547,00	1263,020	1283,980

Tab. A.3.7

Poloměr	R = 190 m			
Převýšení	D = 60 mm			
Typ kolejnice	49 E1			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Délka vlny imperfekce	L = 17 m			
Velikost imperfekce	v = 20 mm			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,097	157,59	78,692	78,896
10	0,218	315,04	157,179	157,864
20	0,460	629,37	314,172	315,201
30	0,702	943,90	471,162	472,740
40	0,945	1258,43	628,150	630,281
42	0,993	1321,34	659,547	661,789
44	1,097	1384,15	690,573	693,573
46	1,396	1446,47	720,319	726,149
46,7	1,547	1468,13	730,438	737,694
48	1,911	1508,05	748,706	759,343
50	2,669	1568,63	775,606	793,028
52	3,842	1625,99	799,741	826,252
54	8,401	1625,95	799,836	826,109
56	12,962	1626,03	800,031	826,003
60	22,090	1626,05	800,280	825,766
70	44,894	1626,27	801,016	825,257
80	67,690	1626,59	801,797	824,789

Tab. A.3.8

Poloměr	R = 250 m			
Převýšení	D = 46 mm			
Typ kolejnice	49 E1			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Délka vlny imperfekce	L = 17 m			
Velikost imperfekce	v = 20 mm			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,079	158,04	78,902	79,133
10	0,176	315,89	157,691	158,196
20	0,371	631,59	315,267	316,324
30	0,566	947,29	472,841	474,453
40	0,761	1263,00	630,412	632,585
50	0,957	1578,70	787,981	790,719
54	1,070	1704,93	850,775	854,159
56	1,254	1768,10	881,620	886,477
58	1,547	1830,49	911,280	919,206
60	1,949	1892,84	940,553	952,283
60,3	2,015	1902,17	944,910	957,262
62	2,468	1954,83	969,147	985,685
64	3,132	2012,35	996,931	1015,420
66	3,951	2077,33	1023,870	1053,460
68	5,931	2126,31	1044,600	1081,710
70	12,038	2125,24	1044,180	1081,060
80	42,045	2125,39	1044,710	1080,680
90	72,003	2126,02	1045,490	1080,530

Tab. A.3.9

Poloměr	R = 300 m			
Převýšení	D = 38 mm			
Typ kolejnice	49 E1			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Délka vlny imperfekce	L = 17 m			
Velikost imperfekce	v = 20 mm			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,069	158,23	78,994	79,232
10	0,154	316,33	157,906	158,419
20	0,324	632,52	315,728	316,795
30	0,494	948,72	473,547	475,172
40	0,664	1264,92	631,365	633,552
50	0,835	1581,11	789,179	791,934
60	1,006	1897,31	946,991	950,318
62	1,084	1960,50	978,269	982,230
64	1,241	2023,57	1009,060	1014,510
66	1,466	2086,51	1039,440	1047,070
68	1,763	2149,27	1069,390	1079,880
70	2,137	2211,87	1098,910	1112,960
72,5	2,709	2289,85	1135,230	1154,620
74	3,129	2336,42	1156,610	1179,810
76	3,760	2398,33	1184,740	1213,590
78	4,499	2459,90	1212,310	1247,590
80	5,406	2520,96	1239,040	1281,920
90	39,450	2540,79	1247,350	1293,440
100	75,461	2541,28	1247,950	1293,330

Tab. A.3.10

Poloměr	R = 190 m			
Převýšení	D = 60 mm			
Typ kolejnice	60 E2			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Délka vlny imperfekce	L = 17 m			
Velikost imperfekce	v = 20 mm			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,122	191,98	95,843	96,136
10	0,269	383,56	191,452	192,112
20	0,562	766,73	382,667	384,066
30	0,855	1149,90	573,878	576,023
36	1,057	1379,75	688,405	691,349
38	1,370	1455,72	724,727	730,995
38,5	1,487	1474,58	733,523	741,052
40	1,958	1530,64	759,047	771,588
42	2,907	1603,76	790,833	812,923
44	6,337	1627,97	800,872	827,096
46	10,899	1628,00	801,041	826,957
50	20,028	1628,02	801,345	826,671
60	42,835	1628,21	802,208	826,005

Tab. A.3.11

Poloměr	R = 250 m			
Převýšení	D = 46 mm			
Typ kolejnice	60 E2			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Délka vlny imperfekce	L = 17 m			
Velikost imperfekce	v = 20 mm			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,099	192,69	96,186	96,501
10	0,217	385,14	192,227	192,915
20	0,453	770,05	384,306	385,745
30	0,689	1154,96	576,381	578,578
40	0,926	1539,87	768,452	771,415
42	0,974	1616,85	806,866	809,983
44	1,030	1693,82	845,211	848,607
46	1,206	1770,57	882,678	887,891
48	1,521	1846,96	919,160	927,801
49,4	1,826	1900,17	944,115	956,058
50	1,979	1922,91	954,663	968,242
52	2,600	1998,28	989,089	1009,190
54	3,421	2072,87	1022,230	1050,640
56	5,771	2127,76	1045,490	1082,270
58	11,804	2127,36	1045,430	1081,930
60	17,795	2127,47	1045,610	1081,860
70	47,785	2127,94	1046,380	1081,560

Tab. A.3.12

Poloměr	R = 300 m			
Převýšení	D = 38 mm			
Typ kolejnice	60 E2			
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec			
Délka vlny imperfekce	L = 17 m			
Velikost imperfekce	v = 20 mm			
Teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Osová síla [kN]		
		Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
5	0,087	192,98	96,328	96,654
10	0,189	385,80	192,552	193,252
20	0,395	771,45	384,996	386,450
30	0,601	1157,09	577,436	579,652
40	0,807	1542,73	769,872	772,857
50	1,018	1928,37	962,274	966,091
52	1,140	2005,38	1000,180	1005,200
54	1,355	2082,21	1037,420	1044,790
56	1,662	2158,81	1074,030	1084,780
58	2,062	2235,17	1110,040	1125,130
58,9	2,283	2269,40	1125,970	1143,430
60	2,571	2311,20	1145,340	1165,860
62	3,198	2386,88	1179,920	1206,960
64	3,955	2462,11	1213,710	1248,400
66	4,978	2536,37	1245,970	1290,400
68	11,703	2542,69	1248,350	1294,340
70	18,893	2542,82	1248,520	1294,300
80	54,904	2542,92	1249,020	1293,900

Příloha A.4 Tabulky oblouků s kritickou délkou vlny imperfekce a různými poloměry

Tab. A.4.1

Poloměry		190 - 300 m				
Převýšení		Doporučené pro V = 40 km/h				
Typ kolejnice		49 E1				
Odpor kolejového lože ve směru x		5 kN/pražec				
Délka vlny imperfekce		L = 17 m				
Velikost imperfekce		v = 20 mm				
Poloměr [m]	Převýšení [mm]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
				Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
190	60	46,7	1,547	1468,13	730,438	737,694
200	57	48,9	1,603	1538,54	765,319	773,222
210	55	51,0	1,634	1597,80	790,744	807,057
220	52	53,3	1,725	1679,16	834,940	844,218
230	50	56,2	1,951	1771,31	879,987	891,318
240	48	58,3	1,992	1838,22	913,102	925,120
250	46	60,3	2,015	1902,17	944,910	957,262
260	44	62,5	2,091	1972,28	979,555	992,728
270	43	64,7	2,165	2042,38	1014,200	1028,180
280	41	67,0	2,276	2115,52	1050,200	1065,320
290	40	69,5	2,429	2194,91	1089,120	1105,790
300	38	72,5	2,709	2289,85	1135,230	1154,620

Tab. A.4.2

Poloměry		190 - 300 m				
Převýšení		Doporučené pro V = 40 km/h				
Typ kolejnice		60 E2				
Odpor kolejového lože ve směru x		5 kN/pražec				
Délka vlny imperfekce		L = 17 m				
Velikost imperfekce		v = 20 mm				
Poloměr [m]	Převýšení [mm]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
				Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
190	60	38,4	1,464	1471,00	731,963	739,041
200	57	40,2	1,507	1541,29	766,704	774,583
210	55	42,0	1,552	1611,69	801,597	810,093
220	52	43,8	1,608	1681,99	836,382	845,604
230	50	45,5	1,637	1748,46	869,400	879,058
240	48	47,4	1,719	1822,43	905,883	916,550
250	46	49,4	1,826	1900,17	944,115	956,058
260	44	51,4	1,934	1977,88	982,327	995,555
270	43	53,2	1,992	2047,98	1017,000	1030,980
280	41	54,8	2,013	2110,42	1048,050	1062,370
290	40	56,5	2,054	2176,63	1080,870	1095,760
300	38	58,2	2,107	2242,79	1113,610	1129,180

Tab. A.4.3

Poloměry	190 - 300 m					
Převýšení	Doporučené pro V = 40 km/h					
Typ kolejnice	49 E1					
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec					
Délka vlny imperfekce	L = 17 m					
Velikost imperfekce	v = 10 mm					
Poloměr [m]	Převýšení [mm]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
				Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
190	60	49,5	1,388	1556,70	776,012	780,684
200	57	52,0	1,442	1636,62	815,684	820,937
210	55	54,3	1,445	1710,31	852,476	857,833
220	52	56,7	1,482	1787,00	890,618	896,385
230	50	59,1	1,517	1863,66	928,744	934,911
240	48	61,4	1,531	1937,15	965,393	971,759
250	46	63,8	1,573	2013,71	1003,440	1010,270
260	44	66,6	1,714	2102,66	1047,240	1055,420
270	43	69,3	1,821	2188,52	1089,640	1098,880
280	41	71,6	1,844	2261,88	1126,180	1135,700
290	40	74,0	1,886	2338,35	1164,190	1174,160
300	38	76,3	1,914	2411,65	1200,670	1210,980

Tab. A.4.4

Poloměry	190 - 300 m					
Převýšení	Doporučené pro V = 40 km/h					
Typ kolejnice	60 E2					
Odpor kolejového lože ve směru x	5 kN/pražec					
Délka vlny imperfekce	L = 17 m					
Velikost imperfekce	v = 10 mm					
Poloměr [m]	Převýšení [mm]	Kritický teplotní přírůstek [°C]	Příčný posun [mm]	Kritická osová síla [kN]		
				Celkem	Vnější kolejnice	Vnitřní kolejnice
190	60	40,4	1,255	1548,119	772,135	775,984
200	57	42,5	1,317	1630,119	812,769	817,350
210	55	44,3	1,300	1700,746	848,125	852,621
220	52	46,6	1,415	1790,173	892,194	897,979
230	50	48,6	1,451	1868,224	930,985	937,239
240	48	50,5	1,466	1942,426	967,969	974,457
250	46	52,4	1,484	2016,57	1004,910	1011,660
260	44	54,3	1,505	2090,66	1041,800	1048,860
270	43	56,3	1,547	2166,52	1080,470	1086,050
280	41	58,5	1,646	2253,94	1122,620	1131,320
290	40	60,8	1,761	2343,18	1166,600	1176,580
300	38	62,7	1,788	2417,14	1203,400	1213,740