



**26. MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA
„SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOLAJOVÝCH
VOZIDLÁCH - PRORAIL 2023“
20. – 22. septembra 2023, Žilina, Slovensko**

<https://doi.org/10.26552/spkv.Z.2023.1.14>

**VZÁJEMNÝ VZTAH DVOJKOLÍ – KOLEJ V OBLOUČÍCH VELMI
MALÉHO POLOMĚRU**

WHEELSET–TRACK INTERACTION IN VERY SMALL RADIUS CURVES

Aleš HÁBA^{*)}, Zdeněk JAROLÍN

1 ÚVOD

Tramvajový provoz je na rozdíl od železnice typický mimo jiné i oblouky velmi malých poloměrů (18÷20 m), které se vyskytují zejména na tramvajových křižovatkách v centrech měst, v obratištích (smyčkách) a vozovkách. Zatímco oblouky velmi malých poloměrů na tramvajových křižovatkách jsou často z principu realizovány kolejí s mělkými žlábkami, v obratištích se mimo výhybky využívají výhradně žlábků hlubokých.

Velikost poloměru oblouku významně ovlivňuje postavení dvojkolí v koleji a spolu s rozvorem podvozku či pojezdu pak určuje úhel náběhu. V extrémním případě pak může nastat i situace, kdy vozidlo s velkým rozvorem podvozku či pojezdu není schopné bezpečného průjezdu v oblouku velmi malého poloměru. Taková situace se však netýká tramvají běžně provozovaných za účelem zajištění základní dopravní obslužnosti. Tyto tramvaje mají totiž výhradně podvozky s krátkým rozvorem (do 1900 mm). Problém však může nastat v případě bočně neopotřebených kolejnic s úzkým žlábkem v kombinaci s historickými dvounápravovými tramvajemi, které jsou, ať už pravidelně či příležitostně, provozovány za účelem atrakce. Tyto typy tramvají se totiž vyznačují jediným dvounápravovým pojezdem o velkém rozvoru (až 3600 mm). Situaci pak může ještě zhoršovat i velký poloměr kol.

Výše uvedené skutečnosti byly analyzovány v rámci tramvajového provozu Dopravního podniku města Brna, a.s. (DPMB) pro dva vybrané typy žlábkových kolejnic a 4 typy tramvají (1 typ historické dvounápravové tramvaje a 3 typy běžně provozovaných tramvají).

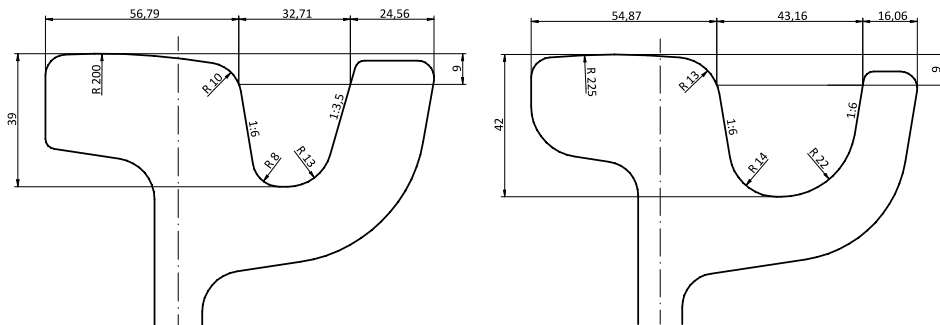
2 PARAMETRY KOLEJE

Analýza byla provedena pro oblouky o poloměru 20 m (standardně se vyskytující nejmenší hodnota poloměru oblouku na tramvajových tratích DPMB) a 18 m (výjimečně se vyskytující nejmenší hodnota poloměru oblouku ve vozovkách). Pro oba zadané poloměry oblouku se uvažuje se dvěma různými typy žlábkových kolejnic, a to typ NT_{1R10} a typ NT3 (viz **obr. 1**). Základním rozdílem mezi oběma typy kolejnic je velikost žlábků, kdy kolejnice typu NT_{1R10} se vyznačuje oproti kolejnici typu NT3 užším žlábkem, a navíc širší přírubou.

^{*)} **Ing. Aleš HÁBA, Ph.D.**, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Dislokované pracoviště DFJP, Pražského 547, 560 02 Česká Třebová. Tel.: +420 466 037 428, e-mail: ales.haba@upce.cz, odborný asistent, zabývá se interakcí dvojkolí–kolej ve výhybkách.

Ing. Zdeněk JAROLÍN, Dopravní podnik města Brna, a.s., p.p. 46, Hlinky 64/151, 656 46 Brno-Pisárky, tel. +420 543 171 314, e-mail: zjarolin@dpmb.cz, zástupce Technicko-provozního ředitele Technika.

Z toho pak vyplývá i rozdílné dovolené maximální boční opotřebení příruby, které u kolejnice typu NT1_{R10} činí 17 mm, zatímco u kolejnice typu NT3 pouze 12 mm (maximální dovolené boční opotřebení hlavy je u obou typů kolejnic stejné a činí 20 mm).



Obr. 1 Jmenovitý tvar příčného profilu kolejnice NT1_{R10} (vlevo) a NT3 (vpravo)

Fig. 1 Nominal rail profiles of rail type NT1_{R10} (left) and NT3 (right)

Ve všech případech se uvažuje jako výchozí hodnota rozchodu koleje jmenovitá hodnota 1435 mm měřená 9 mm pod TK.

Kolejnice typu NT3 jsou v síti DPMB běžně používány v přímých úsecích a v obloucích větších poloměrů, zatímco v obloucích menších poloměrů, v kříženích a výhybkách je snahou využívat spíše kolejnice typu NT1_{R10} u nichž je dlouhodobě v provozu dosahováno delší životnosti. Aktuálně však úzký žlábek neopotřebovaných kolejnic typu NT1_{R10} činí značné problémy při průjezdu historických dvounápravových tramvají v obloucích malých poloměrů.

2 PARAMETRY VOZIDEL

Pro dvojkolí všech analyzovaných typů tramvají (viz **TAB. 1**) je uvažován jako výchozí jmenovitý tvar jízdního obrysu DPMB-004 s hodnotou rozkolí 1380 ± 1 mm. Jízdní obrys DPMB-004 se v současnosti používá pro všechny tramvaje DPMB včetně tramvají historických.

3 POSTAVENÍ VOZIDLA V OBLOUKU

3.1 Postavení dvojkolí v oblouku – úhel náběhu

Jak již bylo uvedeno v úvodu tohoto příspěvku, jedním ze základních posuzovaných parametrů ovlivňující vzájemný vztah dvojkolí – kolej je úhel náběhu a. V **TAB. 1** jsou uvedeny hodnoty tohoto úhlu pro jednotlivé analyzované typy tramvají a poloměr oblouku 18 a 20 m. Tyto hodnoty byly stanoveny výpočtem na základě geometrického postavení podvozku či pojezdu v oblouku bez uvažování jakýchkoliv vůlí. Skutečný úhel náběhu může být mírně odlišný v souvislosti s vyčerpáním volného jízdního kanálu u jednotlivých dvojkolí pojezdu či podvozku. Při tzv. vzpříčené poloze (vyčerpání vůlí u jednotlivých dvojkolí ve vzájemně opačných smyslech) vzniká pak úhel náběhu nejvyšší. Pro podvozky, u kterých mají dvojkolí schopnost se alespoň částečně radiálně stavět (např. v rámci deformace primárního vypružení v podélném směru) je pak možné uvažovat i nižší hodnoty úhlu náběhu.

TAB. 1  hel n b hu v oblouku o polom ru 18 a 20 m pro uva ovan e typy tramvaj 
TABLE 1 Yaw angle in a curve of radius 18 and 20 m for the considered tram types

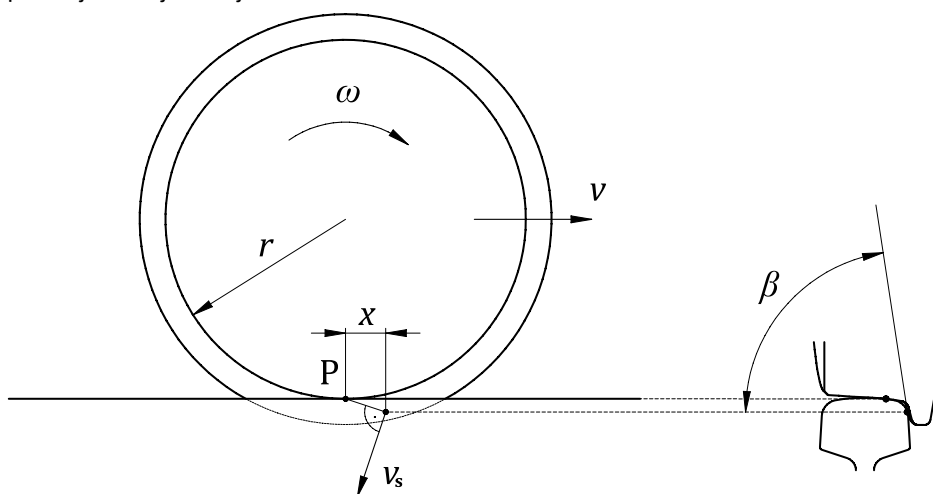
Typ tramvaje	Rozvor	Průměr kola	úhel náběhu α	
			R18	R20
Historick�a	3600	710	5,7�	5,2�
13T	1880	610	3,0�	2,7�
Varion	1900	700	3,0�	2,7�
EVO2	1780	630	2,8�	2,6�

2.1 Dvoubodov y dotyk kola s kolejnic 

Proj zd li-li nab haj c  dvojkol  (v azan  v r amu pojezdu  i podvozku) obloukem, tedy s odpov daj c m  hlem n b hu, pak nejen v d sledku setrva n e odstrediv e s ly je p r chn  vych leno sm rem vn  oblouku. Z hlediska polohy dotykov ch bod  mohou za t chto podm nek nastat zejména v oblouc ch mal ho polom ru n sleduj c  dva obvykl e p pady:

1. Ob  dvojkol  se dot kaj  sv mi j zdn mi plochami temen hlav p slu n ch kolejnic, p r em  vn j  dvojkol  se dot k  vn j  stranou sv ho okolku vod c  hrany vn j  kolejnice (viz konkr tn  p klad na **obr. 3**). Tento p pad se ozna uje jako **veden  dvojkol  po j zdn  hranou kolejnice**.
2. Ob  dvojkol  se dot kaj  sv mi j zdn mi plochami temen hlav p slu n ch kolejnic, p r em  vnit n  dvojkol  se dot k  vnit n  stranou sv ho okolku p r by vnit n  kolejnice (viz konkr tn  p klad na **obr. 4**). Tento p pad se ozna uje jako **veden  dvojkol  p r bou**.

Jak je patrn  z re z  v p dorysn ch pohledech pro oba p pady (viz **obr. 3** a **obr. 4**), dotyk okolku (ať u  s po j zdn  hranou vn j  kolejnice nebo s p r bou vnit n  kolejnice) je v p edstihu p ed dotykem j zdn  plochy t ho  kola s temenem hlavy odpov daj c  kolejnice o jistou vzd lenost x .



Obr. 2 P edstih x dotykov ho bodu okolku p ed dotykov m bodem j zdn  plochy

Fig. 2 Distance x between the wheel flange contact point and the wheel tread contact point

V znam a d sledek tohoto p edstihu lze vysv tlit na bokorysn m pohledu (viz **obr. 2**), kter  plat  v principu pro oba zm n n  p pady. Uva ujeme-li odvalov n  kola

bez prokluzů jako obecný pohyb v rovině o 1° volnosti, pak dotkový bod jízdní plochy kola s temenem kolejnice P je pólem tohoto pohybu. Ze základního rozkladu pohybu přímo v bodu P pak vyplývá, že výsledná úhlová rychlost ω je rovna úhlové rychlosti relativního druhotného rotačního pohybu. Skluzovou rychlost v_s v dotkovém bodu okolku s vodící hranou kolejnice či s přírubou lze pak vyjádřit následujícím přibližným vztahem (r je poloměr kola a v je rychlost přímočarého pohybu středu kola):

$$v_s = \omega \cdot x = \frac{v}{r} \cdot x \quad (1)$$

Konkrétní příklad uvedený na **obr. 3** (vedení dvojkolí pojížděnou hranou kolejnice) reprezentuje kombinaci kolejnic NT1 a dvojkolí s úhlem náběhu $2,72^\circ$ a jmenovitou hodnotou rozkolí 1380 mm. Konkrétní příklad uvedený na **obr. 4** (vedení dvojkolí přírubou) reprezentuje stejnou kombinaci, ale pro případ dvojkolí s minimální možnou hodnotou rozkolí 1379 mm. Lze tedy konstatovat, že i při kombinaci neopotřebovaných kolejnic typu NT1_{R10} a neopotřebovaných kol dvojkolí není vždy dvojkolí vedeno výhradně pojížděnou hranou kolejnice. V provozu pak dochází přirozeně k tomu, že vlivem rozdílných tvarů různé opotřebovaných kol všech vozidel se rovnoměrně opotřebovává pojížděná hrana hlavy vnější kolejnice a příruba vnitřní kolejnice. V případě kolejnic typu NT3 (které mají širší žlábek) pak logicky dochází nejdříve k intenzivnímu opotřebování pojížděné hrany hlavy vnější kolejnice (dvojkolí je vedeno výhradně vodící hranou kolejnice) až do okamžiku, kdy dvojkolí s výrazně opotřebovaným jízdním obrysem do okolku a nízkou hodnotou rozkolí začne být vedeno přírubou vnitřní kolejnice právě vlivem opotřebování pojížděné hrany hlavy vnější kolejnice. Následně se stejně jako u kolejnic typu NT1_{R10} rovnoměrně opotřebovává pojížděná hrana hlavy vnější kolejnice a příruba vnitřní kolejnice.

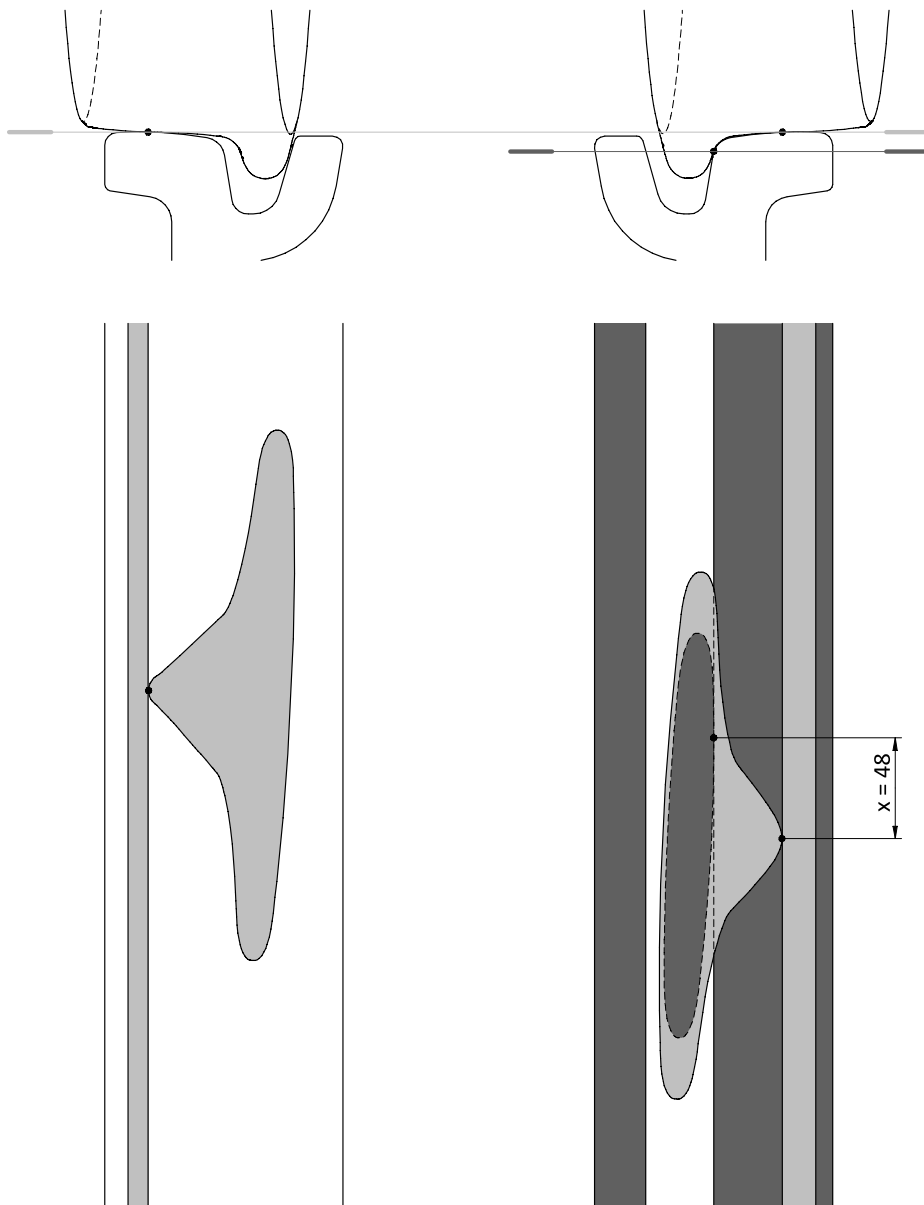
V rámci prováděné analýzy nebyl zjištěn významný rozdíl ve velikosti předstihu x (při způsobu vedení dvojkolí pojížděnou hranou kolejnice) mezi kolejnicemi typu NT1_{R10} a NT3. Přestože předstih dotkového bodu v případě vedení dvojkolí přírubou je vždy přibližně o 20 % vyšší než při vedení dvojkolí pojížděnou hranou kolejnice, z provozních zkušeností DPMB vyplývá, že kolejnice typu NT1_{R10} vykazují i tak v obloucích malých poloměrů delší životnost. Konkrétní zjištěné hodnoty předstihu v oblouku o poloměru 20 m pro uvažované typy běžně provozovaných tramvají jsou uvedeny v **TAB. 2**.

TAB. 2 Konkrétní hodnoty předstihu x dotkového bodu okolku před dotkovým bodem jízdní plochy v oblouku o poloměru 20 m pro uvažované typy běžně provozovaných tramvají

TABLE 2 Specific values of the distance x between the wheel flange contact point and the wheel tread contact point in a curve of radius 20 m for the considered tram types of a common operation

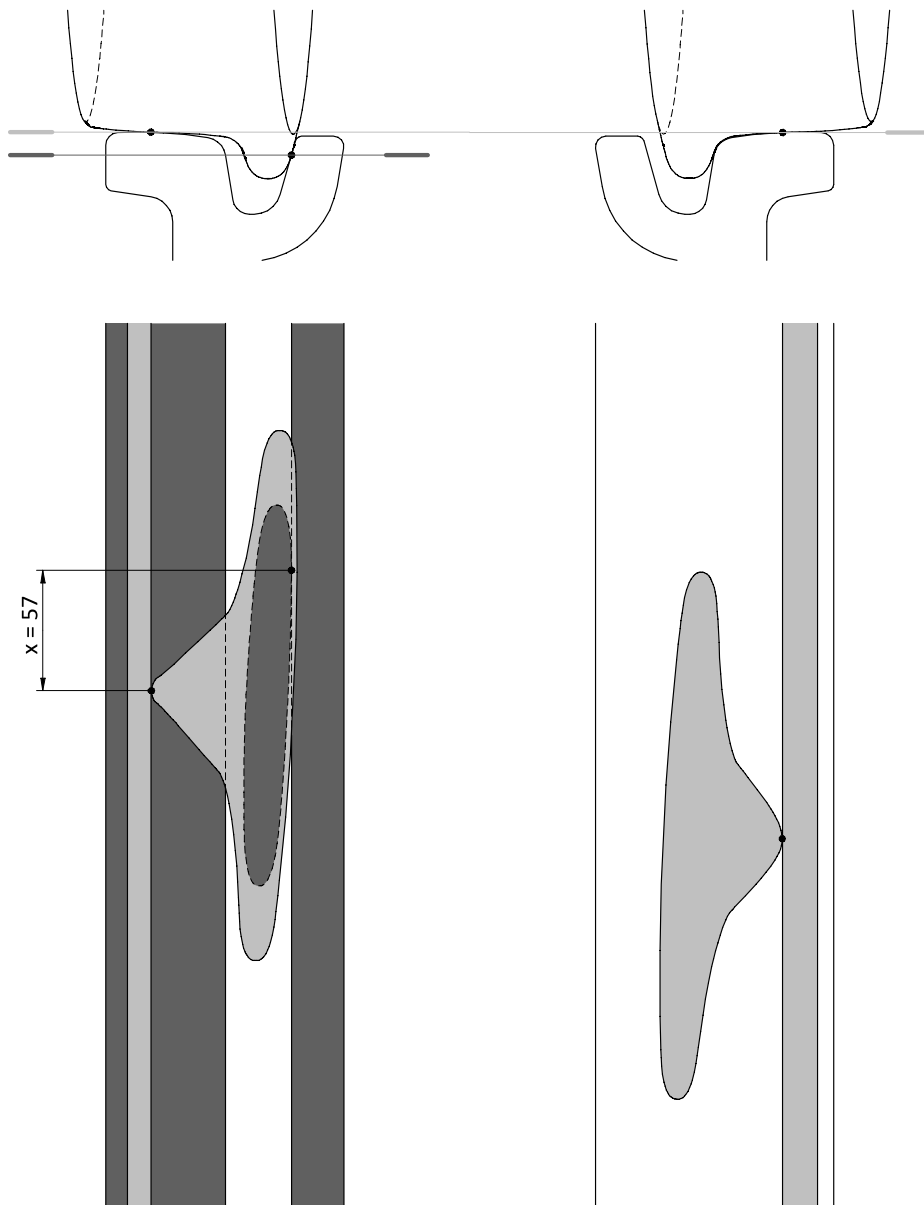
Typ tramvaje	Úhel náběhu	Předstih dotkového bodu x		
		NT1 _{R10} (pojížděná hrana)	NT1 _{R10} (příruba)	NT3
Vario	$2,72^\circ$	48	57	46
13T	$2,69^\circ$	41	49	40
EVO2	$2,55^\circ$	39	48	39

Z hlediska minimalizace nákladů na provoz běžných tramvají se tedy v obloucích velmi malého poloměru jeví používání kolejnic typu NT1_{R10} jako výhodnější oproti kolejnicím typu NT3.



Obr. 3 Postaven  dvojkol  v koleji p i zp sobu veden  dvojkol  po jzdenou hranou vn j  i kolejnice (kolejnice typu NT1_{R10}, rozchod koleje 1435 mm,  hel n b hu dvojkol  2,72 , rozkol  1380 mm, j zdn  obrys DPMB-004)

Fig. 3 Position of a wheelset in a track in the course of the wheelset guidance by the running edge of the outer rail (rail profile type NT1_{R10}, track gauge 1435 mm, wheelset yaw angle 2.72 , wheelset back-to-back distance 1380 mm, wheel profile DPMB-004)



Obr. 4 Postavení dvojkolí v koleji při způsobu vedení dvojkolí přerubou vnitřní kolejnice (kolejnice typu NT1_{R10}, rozchod koleje 1435 mm, úhel náběhu dvojkolí 2,72°, rozkolí 1379 mm, jízdní obrys DPMB-004)

Fig. 4 Position of a wheelset in a track in the course of the wheelset guidance by the grooved head of the inner rail (rail profile type NT1_{R10}, track gauge 1435 mm, wheelset yaw angle 2.72°, wheelset back-to-back distance 1380 mm, wheel profile DPMB-004)

2.3 Nevyhovuj cı postaven ı dvojkol ı v koleji

Extr emn ı zp sob postaven ı dvojkol ı v koleji je teoreticky dosa en v pr ıpad e vysok eho  hlu n b ehu dvojkol ı, co  je typick e pro vozidla s veľk ym rozvorem pojezdu (historick e dvoun pravov e tramvaje) v oblouc ıch velmi mal eho polom eru s kolejnicemi typu NT1_{R10}. Takto vysok ı  hel n b ehu toti z zpusob ı,  e dvojkol ı se nach az ı j ı za mezi vzp r ıcen ı ve voln m j zdn m kan lu a nen ı tedy schopn e se dot kat kolejnic j zdn mi plochami sv ych kol (viz **obr. 5**). P ı takov m postaven ı dvojkol ı v koleji by doch azelo k velmi ne adouc ım silov m  ınc k m v kontaktu kol s kolejnicemi, a proto tento stav nelze považovat za p ıijateln ı. Jedn a se v ak pouze o teoretick e postaven ı dvojkol ı v koleji, kdy kolej i dvojkol ı uva ujeme jako tuh a t lesa. Ve skutečnosti vlivem pr ave ne adouc ıch silov ych  ınc k  m ıe doch zet u vozidla i koleje k deformac ım, kter e tento typ postaven ı nedovol ı, nicm n e takov e deformace jsou rovn e ne adouc ı, jeliko  mohou b ıt p ı ıinou po kozenn ı jak koleje, tak i vozidel samotn ych.



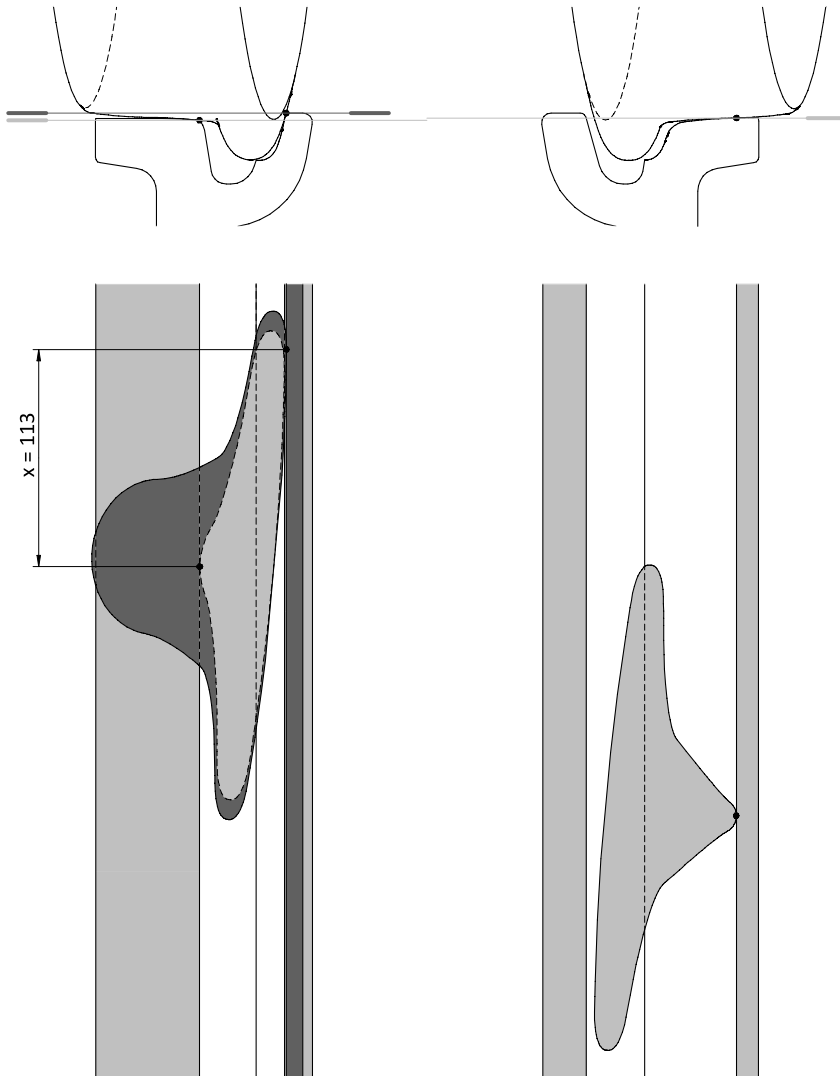
Obr. 5 Nep ıijateln e postaven ı dvojkol ı v koleji za mezi vzp r ıcen ı dvojkol ı ve voln m j zdn m kan lu (kolejnice typu NT1_{R10}, rozchod koleje 1435 mm,  hel n b ehu dvojkol ı 5,16 , rozkol ı 1380 mm, j zdn ı obrys DPMB-004)

Fig. 5 Unacceptable position of a wheelset in a track out of the wheelset diagonal position limit in a gauge play (rail profile type NT1_{R10}, track gauge 1435 mm, wheelset yaw angle 5.16 , wheelset back-to-back distance 1380 mm, wheel profile DPMB-004)

3 Z V ER

Na z klad e uveden eho rozboru se provoz historick ych dvoun pravov ych tramvaj ı m ıe jevit  ist e jen z hlediska minimalizace n klad u na zaji ten ı z kladn ı dopravn ı obslu nost ı jako dlouhodob e neudr iteln ı. N kter e  seky tramvajov ych trat ı (oblouky mal ych polom er u, v yhybky a k ı en ı) nelze toti z z tohoto pohledu optimalizovat, maj ı-li se p ıizp sobit provozu vozidel s v razn e odli n ymi parametry. Provozov n ı historick ych vozidel m a v ak t e  sv e kulturn ı hledisko ve form e unik tn ıho zachov v n ı historick eho d edictv ı. Nav ıc tato atrakce rovn e p ıisp v a ke zvy sov n ı cestovn ıho ruchu, jeho  p ınosp y se projevuj ı t e  v jin ych lokalit ach dan eho m esta  ı regionu. Je tedy nepochybn e  adouc ı hledat j st e kompromisy. Je mo n e nap ı. v cel e tramvajov e s ıti stanovit trat e, kde provoz dvoun pravov ych historick ych tramvaj ı mo n ı bude i za cenu m ırn e zvy šen ych celkov ych n klad u. Dal ı mo nost, jak alespo n na j st e obdob ı roz ır ıt z hlediska n klad u p ıijateln ı provoz historick ych dvoun pravov ych tramvaj ı, spo ıv a v dokonal e znalosti stavu opot eben ı kolejnic v cel e tramvajov e s ıti. V r amci prov ad en e anal zy bylo toti z zji teno,  e v nejm en e p ıızniv m p ıpad e (polom er oblouku 18 m) lze zajistit bezpe n e postaven ı dvojkol ı v koleji p ı asi 40% opot eben ı p ıruby (viz obr. 6). Je v ak zapot řeb ı dopln ıt informaci,  e v p ıpad e veden ı dvojkol ı p ırubou, je vlivem vysok eho  hlu n b ehu p ıedstih x p ıbli n e 3x v   ı ne ı u b e n e provozovan ych tramvaj ı (viz obr. 6). Lze toti z p ıedpokladat,  e p ıruba vnit rn ı kolejnice se bude opot ebovat do tvaru odpov ıdaj ıc ıho vnit rn ı stran e okolku dvojkol ı s  hlem n b ehu 2,5 3 , kter ı p ıslu ı provozu b e n ych typ u tramvaj ı. Pak okolek kola dvojkol ı s v razn e v    m  hlem n b ehu 5 6  se bude svoj ı vnit rn ı stranou dot kat p ıruba

blízko jejího vrcholu. Tato skutečnost způsobí výrazný nárůst předstihu x . Při občasném provozu těchto historických tramvají by to však nemělo znamenat významné snížení životnosti kolejnic. Je však zapotřebí si uvědomit, že se jedná o řešení doplňující a nemůže být přijato jako jediné.



Obr. 6 Postavení dvojkolí s vysokým úhlem náběhu v koleji s opotřebenými kolejnicemi (kolejnice typu $NT1_{R10}$ v teoreticky opotřebeném stavu, rozchod koleje 1435 mm, úhel náběhu dvojkolí $5,16^\circ$, rozkolí 1380 mm, jízdní obrys DPMB-004)

Fig. 6 Unacceptable position of a wheelset in a track out of the wheelset diagonal position limit in a gauge play (rail profile type $NT1_{R10}$ in a theoretically worn state, track gauge 1435 mm, wheelset yaw angle 5.16° , wheelset back-to-back distance 1380 mm, wheel profile DPMB-004)

Literat ura

[1] H aba, A.: Posouzen ı vz ajemn eho vztahu dvojkol ı-kolej v oblouc ıch tramvajov ych trat ı. Souhrnn a v yzkumn a zpr ava DP-06-22, Univerzita Pardubice, 2022. [2]  SN 73 6360-2: Geometrick e uspoř ad anı koleje tramvajov ych trat ı,  rad pro technickou normalizaci, metrologii a st atn ı zkušebnictv ı, Praha, 2017.



Resum e

Pr ısp ev ek je zam eřen na probl emy vyskytuj ıcı se p ı pr ıjezdu historick ych dvoun aprovov ych tramvaj ı obloukem velmi mal eho polom eru (18÷20 m) v podm ınk ach brn ensk eho tramvajov eho provozu. V  vodn ı části je pops ano postaven ı dvojkol ı i cel eho podvozku  ı pojezdu v oblouku mal eho polom eru a s t ım spojen e d ısledky t ykaj ıcı se opotřeben ı koleje. Hlavn ı část p ısp ev ku se zam eřuje na rozbor vz ajemn eho vztahu dvojkol ı – kolej, kter ı je prezentov an formou p ır ıchn ych a pod eln ych řez ı kontaktn ı rovinou, a to jak pro historick e dvoun aprovov e tramvaje, tak i pro aktu aln e b eřn e provozovan e tramvaje. Uvařov any jsou p ıt om dva r ızn e jmenovit e tvary p ır ıchn ych profil ı hlav kolejnic (NT1_{R10} a NT3). V z av eře n e části je pak provedena diskuze nad mořn ym řešen ım analyzov anych probl em ı souvisej ıc ıch s provozem historick ych dvoun aprovov ych tramvaj ı.

Summary

The paper is focused on the problems occurring in the course of the 2-axle historical tram types passing through very small radius curves (18÷20 m) in a condition of the Brno's tram traffic. In the introduction a position of a wheelset or even a bogie or a running gear in a small radius curve is described in connection with results related to rail wear. The main part of the paper is concerned to the wheelset – track interaction analysis which is presented in a form of lateral and longitudinal cross-sections through the contact plane for the 2-axle historical tram types as well as the presently operated trams. The two different nominal rail profiles (NT1 and NT3) are considered in this case. In the conclusion a discussion about the solution of the analyzed problems connected with the 2-axle historical tram types operation is carried out.