

## VYBRANÉ PROBLÉMY INTERAKCE VOZIDLA A KOLEJE V OBLoucÍCH MALÝCH POLOMĚŘŮ

### SELECTED PROBLEMS OF VEHICLE-TRACK INTERACTION IN SMALL-RADIUS CURVES

Tomáš MICHÁLEK<sup>1</sup>, Jiří ŠLAPÁK<sup>2</sup>, Vojtěch SALABA<sup>3</sup>, Dominik HEŘT<sup>4</sup>

e-ISBN: 978-80-7560-564-1  
DOI: 10.46585/spkv20252675

ISSN: 3029-8342



#### Abstrakt

Tento příspěvek je věnován vybraným problémům interakce železničního vozidla a koleje v obloucích malých poloměrů, které jsou na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice aktuálně řešeny v rámci závěrečných prací studentů. V první části je pozornost věnována účinkům různých koncepcí pojezdu šestinápravové lokomotivy na kolej, a to s ohledem na příčné silové působení a opotřebení; analyzována je v této souvislosti i švýcarská metodika kvantifikace poškozujících účinků jízdy vozidla na kolej. Ve své druhé části se pak tento příspěvek zabývá zejména dovoleným převýšením a strmostí vzestupnic v obloucích malých poloměrů. Pozornost je věnována omezujícím faktorům a jejich vlivům na dosažitelnou traťovou rychlost.

#### Klíčová slova

interakce vozidlo–kolej, bezpečnost proti vykolejení, vodící síla, třecí práce, opotřebení, vzestupnice, traťová rychlost

#### Abstract

*This paper is focused on selected problems of the vehicle-track interaction in small radius curves, which are currently solved at the Faculty of Transport Engineering of the University of Pardubice as part of students' theses. In the first part, attention is paid to the effects of different design concepts of running gear of a six-axle locomotive on the track, with regard to lateral force effects and wear; the Swiss methodology of quantifying the damaging effects of vehicle running on the track is analysed in this context. In the second part, this paper deals especially with the permissible cant of track and steepness of transition curves in the small radius curves. Attention is paid to the limiting factors and their consequences in terms of achievable track speed.*

#### Keywords

*vehicle-track interaction, safety against derailment, guiding force, frictional work, wear, transition curve, track speed*

<sup>1</sup> doc. Ing. Tomáš Michálek, Ph.D.,  0000-0001-7776-6627. University of Pardubice, Faculty of Transport Engineering / Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Dislokované pracoviště DFJP, Nádražní 547, 560 02 Česká Třebová, Česká republika, tel.: +420 466 037 415, e-mail: tomas.michalek@upce.cz

<sup>2</sup> Ing. Jiří Šlapák, Ph.D.,  0000-0001-9316-9320. University of Pardubice, Faculty of Transport Engineering / Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika, tel.: +420 466 036 443, e-mail: jiri.slapak@upce.cz

<sup>3</sup> Bc. Vojtěch Salaba. Dtto, e-mail: vojtech.salaba@student.upce.cz

<sup>4</sup> Bc. Dominik Heřt. Dtto, e-mail: dominik.hert@student.upce.cz

## 1 ÚVOD

Oblouk je jedním ze základních prvků trasování koleje, díky kterému je možné docílit požadovaného směrového vedení trati. Kromě poloměru oblouku jsou důležitými parametry převýšení koleje v oblouku, délka a strmost vzestupnic a případně i rozšíření rozchodu koleje. Jízda vozidla obloukem koleje je přitom v určitých ohledech limitující z hlediska výkonnosti železničního systému. Důvodem je především omezení traťové rychlosti v obloucích o malých poloměrech, resp. dovolená hodnota nedostatku převýšení (tedy parametr vozidla), ale také silové působení mezi vozidlem a kolejí (které s rychlostí jízdy úzce souvisí). Z pohledu interakce vozidla a koleje musí být při průjezdu kolejového vozidla obloukem jednak dodržena kritéria bezpečnosti jízdy (bezpečnost proti vykolejení, příčné silové působení vozidla na kolej), ale také je žádoucí, aby nedocházelo k nadměrnému opotřebením kol a kolejnic.

Intenzita silového působení při jízdě vozidla obloukem je mj. ovlivněna konstrukcí kolejového vozidla, zejména pak jeho pojezdu. V podmínkách české železniční sítě jsou tradičně do kategorie vozidel, které vykazují vysokou úroveň příčných silových účinků na kolej, řazeny lokomotivy s třínápravovými podvozky. Většina vozidel této konstrukční kategorie je zařazena do skupiny příčné přechodnosti 3, přičemž příslušný metodický pokyn (viz [1]) definuje kategorizaci vozidel na základě dosahovaných hodnot kvazistatických vodících sil. Se skupinou příčné přechodnosti 3 také byla až do 15. 9. 2024 (viz též [2]) spjata povinnost strojvedoucích upravit v relevantních úsecích rychlost jízdy dotčených vlaků rychlostníkům 3 (tzv. *kulaté rychlostníky*). Problematikou příčných silových účinků šestnápravových lokomotiv se proto zabývá kap. 2, která shrnuje východiska pro řešení navazující diplomové práce.

Za účelem zvýšení traťové rychlosti se v obloucích realizuje převýšení koleje. Při průjezdu vozidla převýšeným obloukem dochází působením tíhové síly k (částečné) kompenzaci příčných silových účinků rovnoběžných s rovinou temene hlav kolejnic, resp. s podlahou vozidla. Pro zajištění plynulého přechodu mezi přímou (neprevýšenou) kolejí a převýšenou kolejí v oblouku se projektují vzestupnice. Postupná změna převýšení koleje ve vzestupnici přitom představuje zborcení koleje, které má vliv na bezpečnost jízdy vozidla (viz např. [3]). Proto musí být maximální hodnota strmosti vzestupnice (resp. sestupnice) omezena. Toto omezení spolu s omezenou délkou vzestupnice však ve stísněných směrových poměrech limituje dosažitelné převýšení koleje, a při daném nedostatku převýšení tedy i traťovou rychlost. Otázkou limitujících faktorů pro projektování převýšení koleje a strmosti vzestupnic se zabývá kap. 3.

## 2 PŘÍČNÉ SILOVÉ ÚČINKY ŠESTINÁPRAVOVÝCH LOKOMOTIV NA KOLEJ

Jednou z možností, jak v případě potřeby docílit vysokých tažných sil (a vysokého trakčního výkonu), které jsou nezbytné pro dopravu těžkých nákladních vlaků do vyšších hodnot sklonů vyššími rychlostmi, je využití šestnápravových lokomotiv. Pojezd těchto lokomotiv přitom může být řešen různým způsobem; v zásadě se v minulosti prosadily dvě koncepce:  $C_0'C_0'$  (tzn. dva třínápravové podvozky), nebo  $B_0'B_0'B_0'$  (tzn. tři dvounápravové podvozky). Ze současných strojů jsou třínápravovými podvozky vybaveny např. elektrické (příp. dvouzdrojové) lokomotivy typu Stadler EURO9000/EURODUAL nebo Newag Dragon 2; využití koncepce tří dvounápravových podvozků je potom z minulosti známé např. z elektrických lokomotiv Re 620 SBB (SLM/BBC/SAAS), ŠKODA 93E (česká řada 184.5) nebo Class 9000 (Brush Traction/ABB) pro Eurotunnel. Otázkou tak je, která z uvedených koncepcí je z hlediska příčných silových účinků jízdy vozidla na kolej výhodnější. Tato otázka je zde nahlížena ze dvou pohledů:

- ocenění poškozujících účinků jízdy vozidla na kolej s využitím švýcarské metodiky pro stanovení výše poplatků za použití dopravní cesty (viz též [4, 5]);
- teoretické porovnání silových poměrů ve vodorovné rovině pro dvounápravový a třínápravový podvozek, založené na zjednodušujících předpokladech Heumannovy metody (viz též např. [3]).

### 2.1 Kvantifikace poškozujících účinků různých koncepcí šestnápravových lokomotiv

Účinným nástrojem podpory vývoje, pořizování a provozování železničních vozidel vykazujících nižší úroveň poškozujících účinků jízdy vozidla na kolej je vhodně nastavený systém zpoplatnění dopravní cesty. Za tímto účelem je od roku 2017 ve Švýcarsku zaveden systém poplatků, jenž prostřednictvím jedné

své složky (tzv. „*Basispreis Verschleiß*“, resp. „*Base Price Wear*“) zohledňuje právě tyto poškozující účinky. Zavedený vztah pro výpočet referenčních nákladů (viz též [4, 5]) přitom zahrnuje:

- dynamické svislé kolové síly (se zohledněním vlivu rychlosti jízdy), které umožňují kvantifikovat intenzitu poškozování geometrické polohy koleje, šterkového lože a vzniku kontaktně-únavových vad kolejnic;
- trakční výkon na obvodu kol hnacího vozidla, umožňující kvantifikovat možnost vzniku vad kolejnic v důsledku přenosu tažných sil;
- měrný třecí výkon v kontaktu kol a kolejnic, který umožňuje kvantifikovat poškozující účinky jízdy vozidla na kolej v obloucích (intenzita bočního opotřebení kolejnic, vznik kontaktně-únavových vad kolejnic);
- referenční silový účinek v odbočné větvi výhybky, kvantifikující míru poškozování konstrukčních částí výhybek.

Výše uvedená metodika [4] následně pracuje s referenčními hodnotami sledovaných veličin takovým způsobem, že:

- při hodnocení svislých účinků násobí (analyticky stanovenou) referenční hodnotu dynamické svislé kolové síly počtem dvojkolí;
- v případě poškozujících účinků jízdy vozidla v obloucích násobí příslušnou referenční hodnotu sledované veličiny – v případě oblouků tedy hodnotu měrného třecího výkonu, získanou s využitím multi-body simulací – počtem podvozků stejného typu;
- v případě hodnocení poškozujících účinků ve výhybkách opět zohledňuje (s využitím simulačních výpočtů stanovenou) referenční hodnotu sledované veličiny a počet podvozků stejného typu.

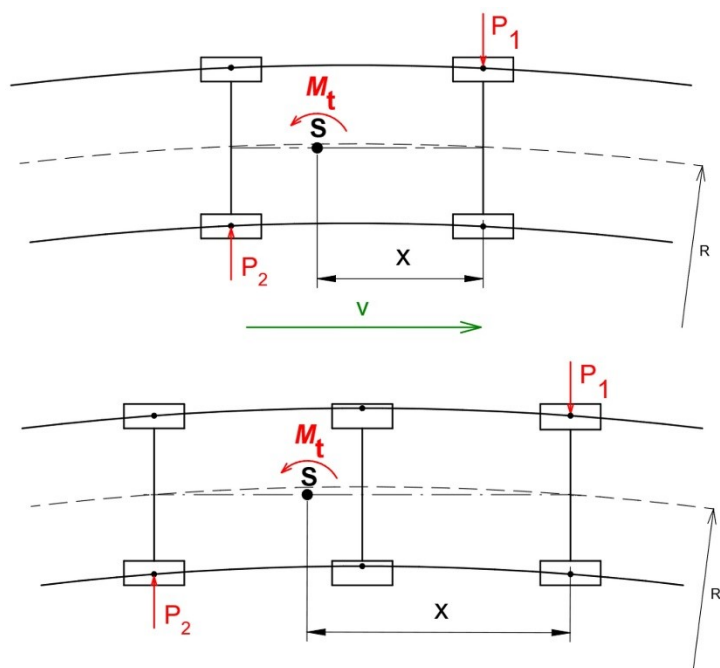
Ve vztahu k výsledkům je významnou skutečností to, že z důvodu zachování jednoduchosti výpočtu jsou v případě podvozků stejného typu uvažovány referenční hodnoty příslušných veličin (typicky měrného třecího výkonu v kontaktu kolo–kolejnice), které byly stanoveny pro první (vodící) dvojkolí vozidla, přičemž se tato hodnota aplikuje právě i na dalších podvozcích stejného typu, kde však reálně mohou při průjezdu vozidla obloukem panovat (např. v důsledku existence vazby skříňe a podvozku) odlišné poměry. Z tohoto důvodu se tak nabízí otázka, nakolik je tento zjednodušený přístup při porovnávání koncepcí pojezdu  $C_0'C_0'$  vs.  $B_0'B_0'B_0'$  (ne)přesný. Nebo ještě také jinými slovy – nakolik je oprávněný předpoklad, že celkový poškozující účinek při jízdě šestnápravové lokomotivy obloukem koleje lze kvantifikovat tak, že referenční hodnota sledované veličiny je stanovena:

- pro lokomotivu s uspořádáním pojezdu  $C_0'C_0'$  jako dvojnásobek hodnoty měrné třecí práce získané simulačním výpočtem na nabíhajícím kole prvního dvojkolí
- a pro lokomotivu s uspořádáním pojezdu  $B_0'B_0'B_0'$  jako trojnásobek hodnoty měrné třecí práce získané simulačním výpočtem na nabíhajícím kole prvního dvojkolí,

resp. nakolik jsou takto kvantifikované poškozující účinky pro jednotlivé uvažované koncepce blízké, nebo naopak vzdálené případu, kdy by byly při vyšetřování zohledněny skutečné silové poměry na všech kolech příslušného vozidla dané koncepce.

## 2.2 Porovnání silových poměrů na zjednodušeném modelu dvounápravového a třinápravového podvozku

Aplikace výše zmíněné švýcarské metodiky pro kvantifikaci poškozujících účinků jízdy vozidla na kolej vyžaduje realizaci simulačních výpočtů jízdy vozidla. Před započítáním tvorby simulačních modelů však lze získat základní představu o výše nastíněné problematice s využitím Heumannovy metody. Podstata této zjednodušené metody je pro dvounápravový a třinápravový podvozek znázorněna na obr. 1 a spočívá v nalezení středu otáčení podvozku (S) a určení velikosti řídicích sil ( $P_i$ ), jež působí na podvozek v příčném směru při průjezdu obloukem konstantní rychlostí ( $v$ ). Ačkoliv Heumannova metoda vychází z celé řady zjednodušujících předpokladů (např. tuhé vedení dvojkolí v rámu podvozku, válcové jízdní obrysy kol atd.), prvotní představu pro porovnání uvažovaných koncepcí pojezdu šestnápravové lokomotivy z hlediska příčných silových účinků vozidla na kolej a třecí práce v kontaktu kol a kolejnic poskytnout může.



**Obr. 1** Dvounápravový (nahore) a třínápravový (dole) podvozek při průjezdu obloukem  
 ( $M_t$  – moment třecích sil,  $P_1$  – pravá řídicí síla,  $P_2$  – nepravá řídicí síla,  $R$  – poloměr oblouku,  
 $v$  – rychlost jízdy,  $x$  – vzdálenost středu otáčení  $S$  od 1. nápravy)

Pro tento úvodní (orientační) výpočet byly zvoleny vstupní parametry, uvedené v tab. 1. Pokud jde o poloměr oblouku, jsou uvažovány hodnoty 600 m, 400 m a 200 m. Tyto hodnoty byly voleny s ohledem na předchozí výpočet kritických poloměrů, kdy se uvažované podvozky dostávají pro dané parametry do vzpříčené polohy. Z hlediska polohy podvozků ve volném kanálu koleje tak nastávají následující situace:

- oba podvozky v poloze obecné ( $R = 600$  m);
- dvounápravový podvozek v poloze obecné, třínápravový v poloze vzpříčené ( $R = 400$  m);
- oba podvozky v poloze vzpříčené ( $R = 200$  m).

**Tab. 1** Vybrané vstupní parametry pro Heumannovu metodu

| Veličina                    | Označení  | Jednotka | Dvounápravový podvozek | Třínápravový podvozek |
|-----------------------------|-----------|----------|------------------------|-----------------------|
| Rozvor podvozku             | $2a$      | mm       | <b>2 800</b>           | <b>2 × 1 800</b>      |
| Nápravové zatížení          | $m_n$     | t/n      | 22,5                   |                       |
| Součinitel tření v kontaktu | $f$       | -        | 0,3                    |                       |
| Šířka volného kanálu koleje | $2\sigma$ | mm       | 12                     |                       |

Za účelem porovnání výsledků získaných Heumannovou metodou pro dvounápravový a třínápravový podvozek byl sledován především odpor z jízdy obloukem. Ten lze obecně vyjádřit z podmínky rovnováhy momentů řídicích sil ke středu oblouku, tedy:

$$O_R = \frac{P_1 \cdot x + P_2 \cdot (2a - x)}{R}, \quad (1)$$

kde  $P_1$  je řídicí síla (viz obr. 1),  $P_2$  je nepravá řídicí síla (působící na vnitřní kolo zadního dvojkolí pouze při vzpříčené poloze podvozku ve volném kanálu koleje),  $x$  je poloha středu otáčení,  $2a$  je rozvor podvozku a  $R$  je poloměru oblouku. Nenachází-li se podvozek ve vzpříčené poloze (tedy  $P_2 = 0$  N), pak vztah (1) přechází v součin řídicí síly  $P_1$  a úhlu náběhu  $\alpha$ . Získané výsledky jsou (pro případ zanedbání vlivu odstředivé síly) shrnuty v tab. 2. Kromě uvedených veličin byl pro dané vstupy (rozvor podvozků, volný kanál koleje) sledován i nejmenší poloměr oblouku, kde ještě podvozek nezaujímá vzpříčenou polohu – ten má hodnotu 385 m v případě podvozku dvounápravového a 510 m u podvozku třínápravového.

Tab. 2 Výsledky získané pro dvounápravový a třínápravový podvozek Heumannovou metodou

| Poloměr oblouku           | 600 m    |          | 400 m    |          | 200 m     |           |
|---------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Podvozek                  | 2nápr.   | 3nápr.   | 2nápr.   | 3nápr.   | 2nápr.    | 3nápr.    |
| Řídicí síla $P_1$         | 85,4 kN  | 117,2 kN | 85,4 kN  | 114,9 kN | 82,8 kN   | 107,3 kN  |
| Nepravá řídicí síla $P_2$ | 0 kN     | 0 kN     | 0 kN     | 27,8 kN  | 58,8 kN   | 55,2 kN   |
| Úhel náběhu $\alpha$      | 5,1 mrad | 5,8 mrad | 7,6 mrad | 7,8 mrad | 11,3 mrad | 12,3 mrad |
| Odpor z oblouku $O_R$     | 435 N    | 680 N    | 649 N    | 930 N    | 1094 N    | 1634 N    |
| $O_{R,3n}/O_{R,2n}$       | 1,56     |          | 1,43     |          | 1,49      |           |

Na základě výsledků provedených výpočtů lze konstatovat, že uvažovaný třínápravový podvozek vykazuje vyšší hodnoty odporu z jízdy obloukem než uvažovaný podvozek dvounápravový, s čímž úzce souvisí i vyšší práce třecích sil v kontaktu kol a kolejnic, a tedy i poškozující potenciál. Uvažujeme-li případ, kdy silové poměry nejsou ovlivněny vzpříčenou polohou podvozku ve volném kanálu koleje ( $R = 600$  m), pak vychází odpor z oblouku třínápravového podvozku o 56 % vyšší oproti podvozku dvounápravovému. Jinými slovy – tři dvounápravové podvozky vykazují v tomto případě v součtu nižší odpor z jízdy obloukem než dva podvozky třínápravové. Je-li však pozorována vzpříčená poloha obou podvozků ( $R = 200$  m), vychází poměr hodnot odporu téměř přesně 1,5. Podrobněji a s využitím přesnějšího simulačního modelu však budou obě koncepce pojezdu lokomotivy zkoumány v rámci řešení navazující diplomové práce.

### 3 PŘEVÝŠENÍ KOLEJE V OBLoucÍCH MALÝCH POLOMĚRŮ

Převýšení koleje v oblouku se realizuje z důvodu snížení příčných silových účinků vozidla na kolej. Tyto silové účinky jsou výsledkem působení odstředivé (setrvačné) síly, která je závislá na poloměru oblouku a rychlosti jízdy. Nakloněním roviny koleje je možné v důsledku působení tíhové síly výsledné silové působení na vozidlo v příčném směru (částečně) kompenzovat, resp. zvýšit rychlost jízdy obloukem při zachování úrovně příčného silového působení. Změna převýšení, kterou je nutné realizovat při navázání přímé koleje a oblouku, je běžně řešena změnou výškové polohy vnějšího kolejnicového pásu, tj. *vzestupnicí*. Délka vzestupnice přitom obvykle odpovídá délce *přechodnice*, kterou je realizována postupná změna křivosti osy koleje při přechodu z přímé koleje do oblouku a naopak. Základní podmínkou pro konstrukci vzestupnice je spojitost v celé její délce. Obvykle se používají dva tvary vzestupnic – lineární vzestupnice a nelineární vzestupnice podle Blossa. Blossova vzestupnice přitom vychází delší než vzestupnice lineární. Tato kapitola se zabývá specifiky prostorového uspořádání koleje v obloucích malých poloměrů, které jsou typické zejména pro regionální tratě.

#### 3.1 Požadavky na převýšení koleje v obloucích malých poloměrů

Projektováním drah, resp. konstrukčním a geometrickým uspořádáním koleje, se zabývá norma ČSN 73 6360-1 [6]. Maximální dovolená hodnota převýšení koleje ve šterkovém loži dle [6] je  $D_{\max} = 160$  mm a teoretické převýšení  $D_{EQ}$ , při kterém dojde k úplné kompenzaci příčné složky odstředivé síly, je dáno:

$$D_{EQ} = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R}, \quad (2)$$

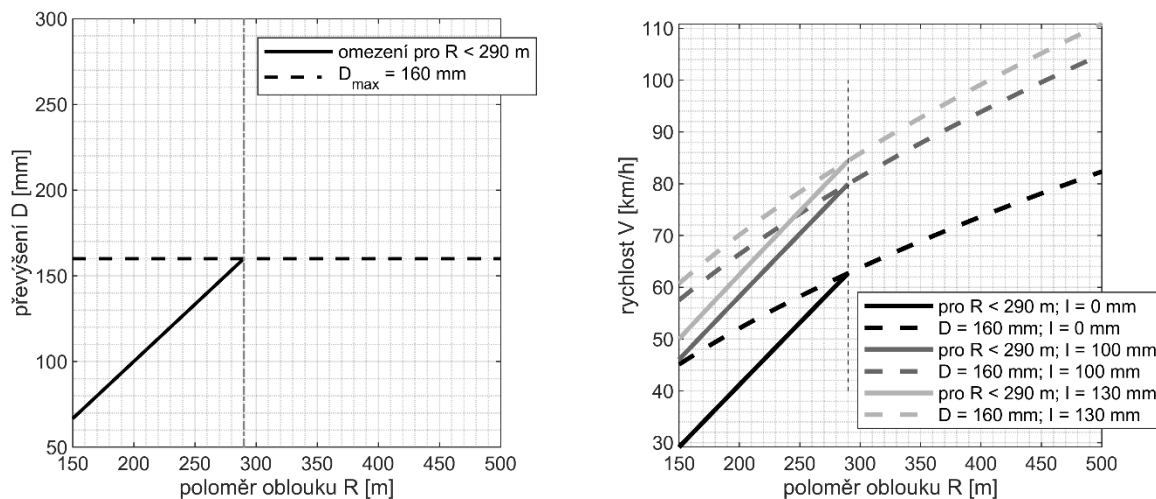
kde rychlost  $V$  se dosazuje v [km/h],  $R$  je poloměr oblouku v [m] a výsledná hodnota  $D_{EQ}$  vychází v [mm].

Specifikem oblouků (velmi) malých poloměrů je však omezení maximální hodnoty převýšení koleje v obloucích s poloměrem  $R < 290$  m dle normy ČSN 73 6360-1 [6], a to podle vztahu:

$$D_{R,\max} = \frac{R - 50}{1,5}, \quad (3)$$

kde  $R$  je poloměr oblouku v [m] a výsledná hodnota  $D_{R,\max}$  vychází v [mm]. Dle technických specifikací pro interoperabilitu subsystému infrastruktura (TSI INF) [7] je tento vztah aplikován již pro oblouky o poloměru

$R < 305$  m a vztahuje se na oblouky s vzestupnicemi strmějšími než 1:1000 na tratích se smíšenou osobní a nákladní dopravou. Z toho lze usuzovat, že důvodem zavedení této omezující podmínky je zřejmě téma bezpečnosti proti vykolejení při postavení vozidla na zborčené koleji v podmínkách oblouků velmi malých poloměrů. Na obr. 2 vlevo je omezení převýšení dle vztahu (3) dle ČSN 73 6360-1 [6] zobrazeno ve vztahu k maximální hodnotě převýšení  $D_{\max}$  v závislosti na poloměru oblouku.



**Obr. 2** Závislost maximálního převýšení koleje (vlevo) a rychlosti jízdy pro různé hodnoty nedostatku převýšení (vpravo) na poloměru oblouku včetně vlivu omezení pro poloměry oblouku menší než 290 m podle vztahu (3)

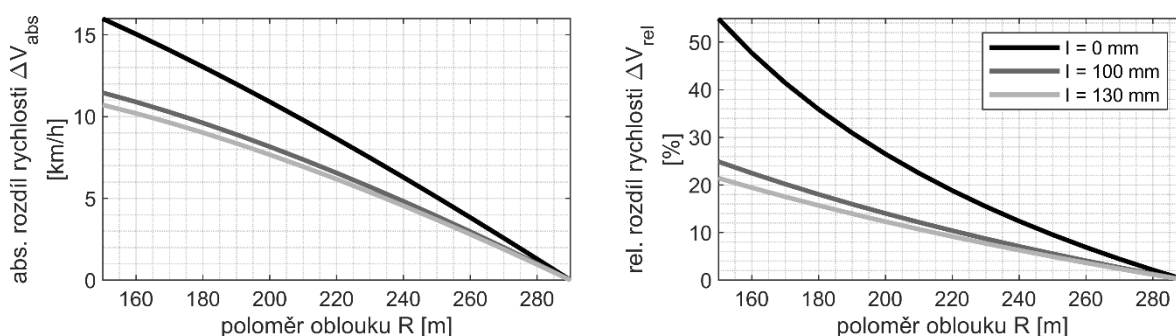
Nepříjemnou skutečností, jež z omezení převýšení koleje  $D$  dle vztahu (3) vyplývá, je omezení traťové rychlosti v obloucích o (velmi) malých poloměrech. Pro danou hodnotu nedostatku převýšení  $I$  je možné rychlost jízdy  $V$  obloukem o poloměru  $R$  stanovit pomocí vztahu:

$$V = \sqrt{\frac{D + I}{11,8} \cdot R}. \quad (4)$$

Vliv tohoto omezení v podobě závislosti maximální rychlosti jízdy na poloměru oblouku pro hodnoty nedostatku převýšení 0 mm, 100 mm a 130 mm je zobrazen na obr. 2 vpravo. Pro lepší názornost vlivu omezení dovolené hodnoty převýšení koleje na rychlost jízdy lze vypočítat absolutní  $\Delta V_{\text{abs}}$  a relativní  $\Delta V_{\text{rel}}$  rozdíl mezi teoretickou rychlostí počítanou pro maximální hodnotu převýšení  $D_{\max} = 160$  mm ( $V_{D_{\max}}$ ) a pro omezení převýšení pro malé poloměry oblouků dle vztahu (3) ( $V_{D_{R,\text{lim}}}$ ) jako:

$$\Delta V_{\text{abs}} = V_{D_{\max}} - V_{D_{R,\text{lim}}}; \quad \Delta V_{\text{rel}} = \frac{\Delta V_{\text{abs}}}{V_{D_{R,\text{lim}}}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Graficky jsou rozdíly pro uvažované hodnoty nedostatku převýšení zobrazeny na obr. 3. Z uvedených závislostí je patrné, že vliv omezení převýšení, narůstá se snižujícím se poloměrem oblouku; rozdíly jsou přitom větší při nižších hodnotách nedostatku převýšení. Tyto grafy tedy poukazují na potenciál navýšení traťové rychlosti v obloucích, pokud by omezující podmínka (3) nemusela být respektována.



**Obr. 3** Absolutní (vlevo) a relativní (vpravo) rozdíl rychlosti jízdy v závislosti na poloměru oblouku dle vztahů (5)

### 3.2 Požadavky na vzestupnice v obloucích malých poloměrů

Základním parametrem vzestupnice je její strmost, která se vyjadřuje jako poměr 1:  $n$ , přičemž její maximální hodnota činí 1:400. Minimální součinitel sklonu vzestupnice  $n$  tedy je  $n_{\min} = 400$ . To odpovídá zborcení koleje 2,5 ‰, což má z podstaty problému vliv na bezpečnost jízdy vozidla, resp. bezpečnost proti vykolejení. Kritickou situací přitom je pomalý výjezd vozidla z oblouku (vjezd na sestupnici), kdy je vlivem přebytku převýšení odlehčováno nabíhající kolo, na němž pak k odlehčení navíc přispívá i zborcení koleje dané strmostí vzestupnice (resp. sestupnice).

Lineární vzestupnice, která je nejběžnějším tvarem vzestupnice, se vyznačuje konstantní změnou převýšení vnějšího kolejnicového pásu po její délce (viz obr. 4 vlevo). Pro zmírnění hodnoty ryvu úhlového pohybu (naklápění) dvojkolí se na začátku a na konci vzestupnice zřizují parabolické přechody (viz obr. 4 uprostřed). Strmost vzestupnice lze pak vyjádřit jako poměr převýšení lineární části ku její délce  $D_{\text{lin}}/L_{\text{lin}}$ , a naopak součinitel strmosti jako poměr  $L_{\text{lin}}/D_{\text{lin}}$ .

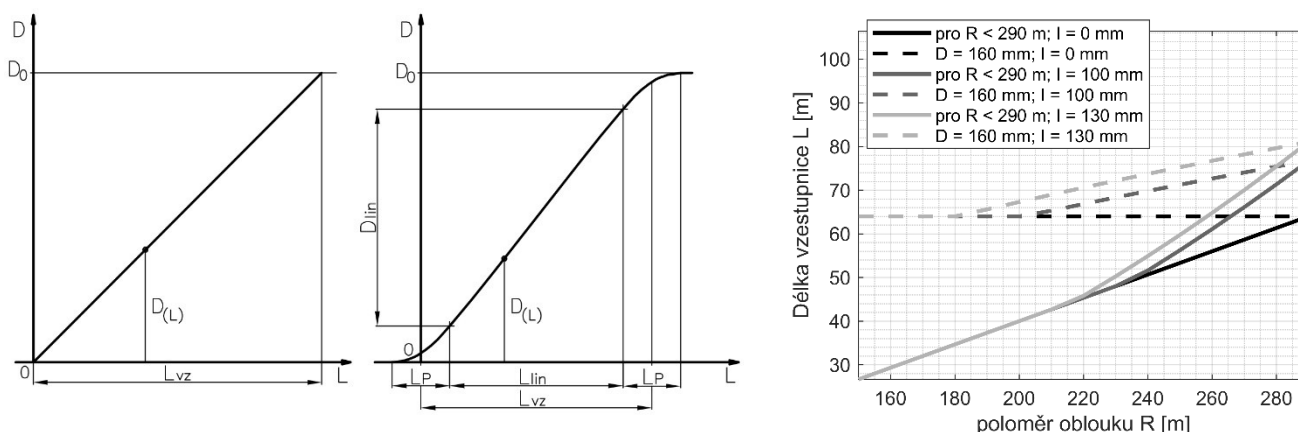
Specifikem regionálních tratí s (velmi) malými poloměry oblouků jsou právě stísněné poměry, které nemusí vždy poskytovat dostatečný prostor na zřízení dostatečně dlouhých vzestupnic, obzvláště tehdy, pokud má být dosaženo vyšších hodnot převýšení koleje. Při snaze o projektování co nejkratší vzestupnice je možné dle normy [6] využít vztah pro výpočet minimálního součinitele strmosti vzestupnice:

$$n_{\min} = 6 \cdot V, \quad (6)$$

kde  $V$  je rychlost jízdy v [km/h], přičemž výsledná hodnota součinitele sklonu vzestupnice nesmí být menší než 400. Minimální délku lineární vzestupnice  $L_{\min}$  [m] pak lze spočítat jako:

$$L_{\min} = \frac{n_{\min} \cdot D}{1000} = \frac{6 \cdot V \cdot D}{1000}. \quad (7)$$

Pro uvažované hodnoty převýšení koleje (tj. při teoretickém využití maximální hodnoty  $D_{\max} = 160$  mm nebo při zohlednění omezující podmínky dle vztahu (3)) a nedostatku převýšení dle obr. 2 jsou odpovídající závislosti minimální délky lineární vzestupnice na poloměru oblouku vyobrazeny v grafu na obr. 4 vpravo. V případě, kdy se jednotlivé křivky grafu překrývají, je dosaženo maximální strmosti vzestupnice 1:400. Z tohoto grafu je zřejmé, že omezení převýšení koleje pro oblouky s poloměrem  $R < 290$  m umožňuje konstruovat vzestupnice kratší délky a naopak při potenciálním využití maximálního převýšení 160 mm musí být vzestupnice (výrazně) delší, což může být problematické právě vzhledem k trasování koleje.



**Obr. 4** Lineární vzestupnice bez přechodů (vlevo) a s parabolickými přechody (uprostřed) a závislost délky vzestupnice na poloměru oblouku pro jednotlivé uvažované případy převýšení a jeho nedostatku (vpravo)

## 4 ZÁVĚR

Téma poškozujících účinků jízdy šestinápravových lokomotiv na kolej se stalo v poslední době do jisté míry aktuálním v souvislosti se zrušením rychlostníků 3 na české železniční síti ve druhé polovině roku 2024. Porovnání vlivu různých koncepcí pojezdu těchto lokomotiv proto může přinést zajímavé poznatky. Orientačním zjednodušeným propočtem dle Heumannovy metody se koncepce šestinápravové lokomotivy

$B_0'B_0'B_0'$  jeví jako mírně výhodnější oproti provedení  $C_0'C_0'$ . Tuto informaci je však třeba brát s rezervou, jedná se pouze o první vhléd do problematiky. Navazující diplomová práce jednoho z autorů proto se bude touto problematikou zabývat ve větší míře detailu, s využitím simulačních výpočtů jízdy vozidla. Získané výsledky by také měly poskytnout odpověď na otázku, nakolik je přístup, kdy jsou poškozující účinky jízdy vozidla na kolej charakterizovány silovými poměry pouze na prvním dvojkolí vozidla relevantní ve vztahu k porovnání uvedených dvou koncepcí pojezdu šestinápravové lokomotivy.

Analýza požadavků normy ČSN 73 6360-1 [6], resp. TSI INF [7], poukazuje na vztah, který omezuje maximální dovolené převýšení koleje v obloucích o velmi malých poloměrech. Důsledkem aplikace tohoto limitu je omezení traťové rychlosti, kterou by bylo možné takovými oblouky projíždět, pokud by mohly být využívány běžně přípustné hodnoty převýšení koleje. Navazující práce se proto bude zabývat analýzou podmínek, za kterých by bylo možné uvedené omezení odstranit. Zvýšení traťové rychlosti v obloucích, které může být s ohledem na absolutní hodnoty traťové rychlosti na příslušných tratích poměrně velké, by totiž mohlo přispět k nezanedbatelnému zkrácení jízdních dob vlaků.

Otázka využití vyšších hodnot převýšení koleje v obloucích o velmi malých poloměrech však znamená řešení otázky zvýšení strmosti vzestupnic. Toto téma souvisí jednak s bezpečností jízdy vozidla a jednak s praktickou realizovatelností takových opatření v konkrétních traťových úsecích s ohledem na trasování koleje. Podrobnější rozbor této problematiky s rozšířením o simulační výpočty jízdy vozidla proto bude součástí připravované diplomové práce jednoho z autorů.

Tento příspěvek vznikl za podpory interního projektu Univerzity Pardubice ev. č. SGS\_2025\_008 „Aktuální aspekty z oblasti dopravních prostředků a infrastruktury řešené na DFJP“.



### Literatura

- [1] SPRÁVA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY, s.o. *Metodický pokyn pro stanovení skupiny příčné přechodnosti vozidel*. Č.j. S14107/11-OTH, 11. 4. 2011.
- [2] SPRÁVA ŽELEZNIC, s.o. *Ukončení platnosti rychlostníků 3 pro vozidla s příčnou přechodností 3*. Zn. 56854/2024-SŽ-GR-O11, 11. 9. 2024.
- [3] ZELENKA, J., MICHÁLEK, T. *Teorie vozidel*. Studijní opora, 1. vyd., 78 s. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013. ISBN 978-80-7395-652-3.
- [4] FEDERAL OFFICE OF TRANSPORT. *Base Price Wear in the train-path pricing system – Instructions for determining vehicle prices*, 14. 3. 2022.
- [5] ŠLAPÁK, J., MICHÁLEK, T., ŠPALEK, P., HORA, M. Rozbor švýcarské metodiky pro hodnocení poškozujících účinků jízdy kolejového vozidla na kolej. *Vědeckotechnický sborník Správy železnic*. Roč. 2020, č. 2. ISSN 2694-9172.
- [6] ČSN 73 6360-1:2020. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 1: Projektování*.
- [7] Nařízení Komise (EU) č. 1299/2014 ze dne 18. listopadu 2014 o technických specifikacích pro interoperabilitu subsystému infrastruktura železničního systému v Evropské unii. In: *Úřední věstník Evropské unie*. L 356, 12. 12. 2014.

Zasláno / received: 20. 06. 2025, přijato / accepted: 09. 07. 2025, publikováno / published: 17. 09. 2025.

Příspěvek recenzovali / The paper was reviewed by: prof. Dr. Ing. Juraj Gerlici (Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta), Ing. Petr Vnenk, Ph.D. (Správa železnic, státní organizace).