

Jiří Šlapák<sup>1</sup>, Tomáš Michálek<sup>2</sup>, Petr Špalek<sup>3</sup>, Miroslav Hora<sup>4</sup>

## **Rozbor švýcarské metodiky pro hodnocení poškozujících účinků jízdy kolejového vozidla na kolej**

**Klíčová slova:** *poškození koleje, opotřebení, dynamické účinky, poplatky za použití dopravní cesty, správce infrastruktury, simulace, lokomotiva*

### **Anotace**

Tento příspěvek se zabývá aktuální švýcarskou metodikou hodnocení poškozujících účinků jízdy vozidla na kolej. Uvedená metodika slouží ke kvantifikaci těchto účinků v rámci systému zpoplatnění železniční dopravní cesty, k čemuž využívá jednotlivé koeficienty poškození. Tyto koeficienty jsou v článku blíže popsány a následně jsou vyčísleny pro několik referenčních výpočtových modelů čtyřnápravových elektrických lokomotiv za účelem posouzení vlivu vybraných konstrukčních parametrů vozidla na dosahované hodnoty těchto koeficientů poškození. V závěru je uvedeno porovnání odpovídající výše poplatků za použití dopravní cesty vyšetřovaných vozidel ve dvou vybraných traťových úsecích s několika existujícími typy elektrických lokomotiv.

### **Annotation**

This paper is focused on the current Swiss methodology for assessment of damaging effects of railway vehicles on the track. This methodology is used for a quantification of the damaging effects in framework of the track access charge system; it is based on relevant damage coefficients. These coefficients are described in paper in detail and their values are calculated for several virtual prototypes of four-axle electric locomotives in order to assess the influence of selected design parameters of the vehicle on the individual damage coefficients. Finally, there is shown a comparison of the relevant track access charges of the investigated vehicle models on two selected railway lines with several existing types of electric locomotives.

---

<sup>1</sup> Ing. Jiří Šlapák; doktorand na Oddělení kolejových vozidel Katedry dopravních prostředků a diagnostiky Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice; adresa: Dopravní fakulta Jana Pernera, Studentská 95, 532 10 Pardubice; e-mail: jiri.slapak@upce.cz.

<sup>2</sup> Ing. Tomáš Michálek, Ph.D.; odborný asistent na Oddělení kolejových vozidel Katedry dopravních prostředků a diagnostiky Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice; adresa: Dislokované pracoviště DFJP, Nádražní 547, 560 02 Česká Třebová; e-mail: tomas.michalek@upce.cz.

<sup>3</sup> Ing. Petr Špalek; hlavní inženýr železničních kolejových vozidel; ŠKODA TRANSPORTATION a.s.; adresa: Emila Škody 2922/1, 30 100 Plzeň; e-mail: petr.spalek@skoda.cz.

<sup>4</sup> Ing. Miroslav Hora; projektant specialista (multi-body simulace); ŠKODA TRANSPORTATION a.s.; adresa: Emila Škody 2922/1, 30 100 Plzeň; e-mail: miroslav.hora@skoda.cz.

## Úvod

Rozdělením železničního systému na subsystém infrastruktura (udržovaný správcem železniční infrastruktury) a subsystém kolejová vozidla (v jehož rámci působí na dané infrastruktuře různí železniční dopravci) došlo k formálnímu oddělení těchto oblastí. Ovšem při jízdě vozidla po koleji dochází vlivem odvalování kol po kolejnicích k vzájemnému silovému působení mezi kolem a kolejnicí. Důsledkem této silové interakce je poškozování kol a kolejnic. Z hlediska infrastruktury se může jednat o poškozování ve smyslu opotřebení (úbytku materiálu) a vznik kontaktně-únavových vad na hlavách kolejnic, degradaci geometrické polohy koleje a šterkového lože, poškozování konstrukčních částí výhybek atd. Velikost těchto poškozujících účinků má vliv na náročnost a četnost údržbových zásahů, a tedy i na výši nákladů potřebných na udržení koleje v požadovaném technickém stavu. Z toho je zřejmé, že subsystémy infrastruktury a vozidla z hlediska fyzikálních jevů oddělit nelze. Železnici je potřeba vnímat jako jeden systém, jehož subsystémy se vzájemně ovlivňují.

Optimalizací údržbových zásahů a technologií lze náklady na údržbu snižovat. Takový přístup však řeší pouze opravu již vzniklého poškození. Další cestou je snaha o minimalizaci samotných poškozujících účinků jízdy vozidla na kolej, a tedy i minimalizace vznikajícího poškození kolejnic. Z tohoto hlediska se jedná o snahu nalézt takové podmínky pro subsystém železniční infrastruktury a subsystém kolejového vozidla, aby výsledkem byla co nejnižší intenzita poškozujících účinků jízdy vozidla na kolej. Tímto řešením by došlo k snížení rozsahu opotřebení či poškození kol a kolejnic, a tedy i ke snížení nákladů na údržbu.

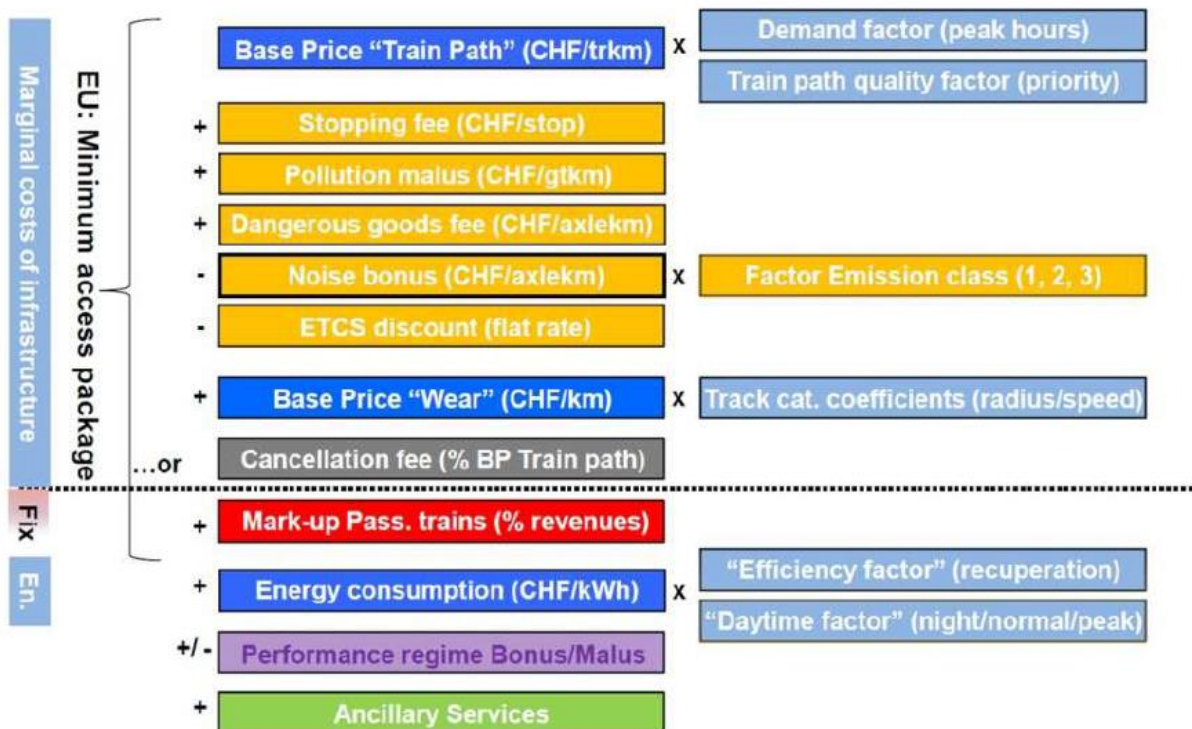
Z uvedeného vyplývá, že vztah mezi správcem infrastruktury a železničními dopravci by měl být takový, aby respektoval tyto skutečnosti. Nástrojem, jak toho dosáhnout, mohou být poplatky za použití dopravní cesty, které jsou určovány právě s ohledem na poškozující účinky daného vozidla na danou trať. Takový systém již používají někteří správci infrastruktury, např. ve Velké Británii, Rakousku či ve Švýcarsku (viz též např. [1]). Tento příspěvek se zabývá rozбором švýcarské metodiky hodnocení poškozujících účinků jízdy vozidla na kolej, která se v tomto ohledu jeví jako nejpropracovanější, a následně ukázkou vyhodnocení poškozujících účinků dle této metodiky pro vybrané modely lokomotiv s odlišnými parametry.

## 1 Švýcarská metodika hodnocení poškozujících účinků

Ze struktury poplatků za použití dopravní cesty podle švýcarské metodiky (viz obr. 1) je zřejmé, že jednou ze složek určujících výši poplatků je tzv. základní cena za opotřebení (*Base Price „Wear“*, resp. *Basispreis Verschleiß*). Určení této základní ceny za opotřebení je založené na hodnocení poškozujících účinků jízdy vozidla na trať. Tato metodika má tedy motivovat jednotlivé dopravce, aby používali vozidla, která jsou konstruována tak, aby minimalizovala poškozující účinky na kolej, tzv. „track-friendly“ vozidla. Na rozdíl od rakouského systému zpoplatnění železniční dopravní cesty, který zavádí tzv. *Triebfahrzeugfaktor* (viz např. článek [1]), sloužící pro kvantifikaci poškozujících účinků pouze hnacích vozidel, jsou ve švýcarském systému zpoplatnění zohledněny poškozující účinky všech kategorií železničních kolejových vozidel (tzn. lokomotiv, vozidel pro přepravu osob i nákladních vozů).

Na velikost poškozujících účinků jízdy vozidla na kolej přitom mají vliv hmotnostní a rozměrové parametry vozidla společně s parametry pružících a tlumících prvků, resp. vazeb v pojezdu vozidla. Provozní určení jednotlivých vozidel však může být

odlišné. Z tohoto hlediska mohou být jednotlivá vozidla vhodná např. pro rychlou jízdu v přímé koleji, nebo naopak pro pomalejší jízdu po obloukovitých tratích. Nelze tedy jednoznačně určit, zda je vozidlo obecně „track-friendly“ pouze na základě jeho parametrů, ale je třeba posoudit, nakolik je vhodné pro dané provozní účely.



Obr. 1 Sktruktura poplatků za použití dopravní cesty definovaná švýcarskou metodikou. [2]

Zohlednění parametrů vozidla v souvislosti s parametry daného traťového úseku, na kterém má být vozidlo provozováno, nabízí právě švýcarská metodika pro určení základní ceny za opotřebení [3]. Tato metodika zavádí tzv. faktor opotřebení jízdní dráhy (*Verschleißfaktor Fahrbahn*), který vyjadřuje hodnocení poškozujících účinků jízdy daného vozidla na danou trať a následný přepočítání na finanční vyjádření.

Ve švýcarské metodice [3] je definován vztah pro výpočet tzv. referenčních nákladů vozidla, který má obecně tvar:

$$KS = k_1 \cdot F_{RQ} \cdot Q_{dyn}^3 + k_2 \cdot Q_{dyn}^{1,2} + k_3 \cdot T_{pv} + k_4 \cdot F_{RW_b} \cdot W_b + k_5 \cdot \sqrt{0,5 \cdot Q_{185}^2 + 0,5 \cdot Y_{185}^2}. \quad (1)$$

Uvedený vztah lze rozdělit na jednotlivé členy:

- První člen ( $k_1 \cdot F_{RQ} \cdot Q_{dyn}^3$ ) představuje poškozování geometrické polohy koleje a štěrkového lože. Dynamická kolová síla  $Q_{dyn}$  je stanovena na základě velikosti nevypružených hmot a referenční rychlosti v daném traťovém úseku. Faktor  $F_{RQ}$  zohledňuje vliv poloměru oblouku.
- Druhý člen v uvedeném vztahu ( $k_2 \cdot Q_{dyn}^{1,2}$ ) zohledňuje možnost inicializace a rozvoje kontaktně-únavových vad při odvalování kol po kolejnicích.

- Třetí člen ( $k_3 \cdot T_{pv}$ ) pak zohledňuje trakční výkon vozidla. Tento parametr (tzv. *Traction Power Value*) je stanoven pomocí trakčního výkonu na jedno kolo  $P_{rad}$  vztaženého na jmenovitou velikost dotykové plochy mezi kolem a kolejnicí  $A_{rad}$  a charakterizuje možnost vzniku kontaktně-únavových vad při přenosu tažných sil v kontaktu kolo–kolejnice.
- Čtvrtý člen ( $k_4 \cdot F_{RW_b} \cdot W_b$ ) charakterizuje intenzitu opotřebení hlav kolejnic ve smyslu úbytku materiálu a možnost vzniku kontaktně-únavových vad při jízdě vozidla obloukem. Tento poškozující účinek je kvantifikován pomocí (měrné) třecí práce v kontaktu kol a kolejnice, která je zde reprezentována tzv. číslem opotřebení – *Wear Number*  $W_b$ . Metodika předpokládá, že při velmi nízkých hodnotách  $W_b$  nedochází k poškozování kolejnic vůbec. S rostoucí hodnotou  $W_b$  (a tedy se zmenšujícím se poloměrem oblouku) ale roste pravděpodobnost inicializace a rozvoje kontaktně-únavových vad kolejnic a dále se pak začíná zvyšovat též intenzita opotřebení kolejnic ve smyslu úbytku materiálu. Zatímco při nižších hodnotách  $W_b$  (tzn. v obloucích o větších poloměrech) převažuje právě kontaktně-únavové poškozování kolejnic, tak při překročení jisté meze má již opotřebení kolejnic takovou intenzitu, že dochází k odstraňování jejich povrchové vrstvy, ve které by jinak docházelo k rozvoji kontaktně-únavových vad. Tento člen se pochopitelně neuvažuje při jízdě vozidla v přímé koleji.
- Pátý člen ( $k_5 \cdot \sqrt{0,5 \cdot Q_{185}^2 + 0,5 \cdot Y_{185}^2}$ ) kvantifikuje silové působení vozidla na odbočné větve výhybek. Figuruje zde dynamická svislá kolová síla  $Q_{185}$  při referenční rychlosti jízdy 40 km/h a maximální hodnota vodící síly  $Y_{185}$  na nabíhajícím kole prvního dvojkolí vozidla při průjezdu odbočnou větví výhybky s poloměrem oblouku 185 m.

Z rozboru vyplývá, že pro kvantifikaci dílčích poškozujících účinků pomocí uvedené metodiky je nutné provést simulační výpočty jízdy vozidla za definovaných podmínek. Konkrétně se jedná o simulace průjezdu oblouky různých poloměrů pro vyhodnocení čtvrtého členu rovnice, tedy pro získání příslušných průběhů parametru  $W_b$ , a dále o simulaci průjezdu vozidla výhybkou pro vyhodnocení pátého členu, tedy pro získání maximální hodnoty vodící síly  $Y_{185}$ . Podmínky pro realizaci simulačních výpočtů jsou jednoznačně definovány metodikou [3]; jde především o jmenovité trasování koleje v referenčních úsecích, nerovnosti koleje, rychlost jízdy (resp. nedostatek převýšení), tvar jízdnic obrysů kol dvojkolí (S1002/e32,5) a příčných profilů hlav kolejnic (60E1/1:40) nebo součinitel tření v kontaktu kolo–kolejnice (0,3). Tyto podmínky jsou pro všechna vozidla stejné; jen uvažovaná rychlost jízdy obloukem (hodnota nedostatku převýšení) souvisí s provozním režimem vozidla (tzv. *Zugreihe*). Za účelem „ocenění vozidla“ se pak použít výpočtový model a příslušné výsledky dokládají zprávou.

## 2 Koeficienty poškození

Na základě vztahu (1), vyjadřujícího míru poškozujících účinků jízdy vozidla na kolej, jsou ve švýcarské metodice definovány tzv. koeficienty poškození, jež jsou označeny jako D1 až D5. Tyto koeficienty odpovídají jednotlivým členům uvedené rovnice, a charakterizují tak jednotlivé dílčí poškozující účinky.

### 2.1 Koeficient poškození D1

Koeficient poškození D1 představuje intenzitu poškozování geometrické polohy koleje a šterkového lože v závislosti na rychlosti jízdy vozidla. Je definován vztahem:

$$D1(V) = n_{RS} \cdot Q_{dyn}^3(V), \quad (2)$$

kde  $n_{RS}$  je počet dvojkolí vozidla a  $Q_{dyn}$  je dynamická svislá kolová síla (jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole), definovaná pomocí britské normy GM/TT0088 [4] jako síla  $P_2$  a udávaná v [kN], tedy:

$$Q_{dyn}(V) = P_2(V) = Q_0 + 0,0437445 \cdot m_u \cdot \frac{\sqrt{m_u + 245} - 5,52591}{m_u + 245} \cdot V, \quad (3)$$

kde  $Q_0$  je statická svislá kolová síla v [kN],  $m_u$  je hmotnost nevypružených hmot na jedno kolo v [kg] a  $V$  je rychlost jízdy vozidla v [km/h].

K poškozování geometrické polohy koleje a šterkového lože dochází jak při jízdě v přímé koleji, tak při jízdě obloukem. Z toho vyplývá, že se tento koeficient uplatňuje při hodnocení poškozujících účinků jízdy vozidla v přímé koleji i v obloucích. Z výpočtových vztahů také vyplývá, že tento typ poškození je pro dané vozidlo závislý především na rychlosti jízdy.

## 2.2 Koeficient poškození D2

Koeficient poškození D2 zohledňuje vznik kontaktně-únavových vad při jízdě v přímé koleji. Tento koeficient je definován v závislosti na dynamické svislé kolové síle, a tudíž závisí i na rychlosti jízdy  $V$ :

$$D2(V) = n_{RS} \cdot Q_{dyn}^{1,2}(V). \quad (4)$$

Veličiny obsažené v tomto vztahu jsou, vč. jednotek, popsány výše. Tento koeficient se uplatňuje pouze při hodnocení poškozujících účinků jízdy vozidla v přímé koleji.

## 2.3 Koeficient poškození D3

Tento koeficient poškození odpovídá třetímu členu vztahu (1), resp. parametru  $T_{pv}$  (*Traction Power Value*), který je definován vztahem:

$$D3 = T_{pv} = \frac{P_{rad}}{A_{rad}}, \quad (5)$$

kde  $P_{rad}$  je hodnota trakčního výkonu vztážená na jedno kolo a udávaná v [kW] a  $A_{rad}$  je efektivní velikost kontaktní plochy mezi kolem a kolejnicí, která je počítána pomocí Hertzovy teorie, udávaná v [mm<sup>2</sup>].

## 2.4 Koeficient poškození D4

Tento koeficient zohledňuje dva jevy, k nimž dochází při průjezdu vozidla obloukem. První dílčí koeficient D4.1 charakterizuje možnost vzniku kontaktně-únavových vad na hlavách kolejnic (tzv. *head-checking*). Druhý dílčí koeficient D4.2 pak vyjadřuje opotřebenění hlav kolejnic ve smyslu úbytku materiálu. Hodnoty obou těchto dílčích koeficientů jsou vyhodnoceny na základě tzv. čísla opotřebenění (*Wear Number*)  $W_b$ , které je definováno jako:

$$W_b = |T_x \cdot s_x| + |T_y \cdot s_y|, \quad (6)$$

kde  $T_x$  a  $T_y$  jsou tangenciální skluzové síly působící v kontaktu kolo–kolejnice v podélném a v příčném směru, udávané v [N], a  $s_x$  a  $s_y$  jsou bezrozměrné (relativní) skluzy v odpovídajících směrech. Jednotkou  $W_b$  tak je [N], resp. [J/m].

Obě části koeficientu poškození D4 jsou uvažovány v závislosti na poloměru oblouku a vyhodnocují se pro čtyři referenční poloměry, které představují jednotlivé kategorie poloměrů oblouku:

- oblouky velmi malých poloměrů –  $R = 270$  m,
- oblouky malých poloměrů –  $R = 343$  m,
- oblouky středních poloměrů –  $R = 480$  m,
- oblouky velkých poloměrů –  $R = 800$  m.

Rychlost jízdy (konvenčního) vozidla při průjezdu těmito oblouky je dopočítávána vzhledem ke konstantní uvažované hodnotě nedostatku převýšení 130 mm.

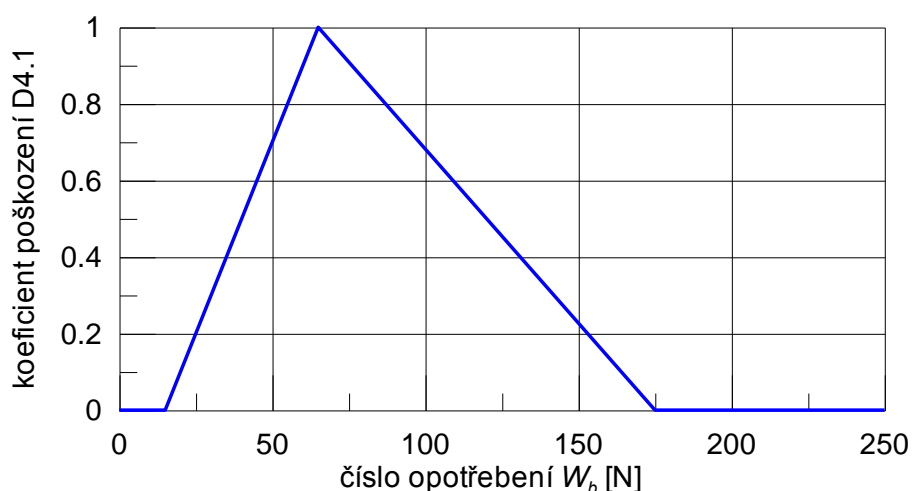
### Koeficient D4.1

V závislosti na hodnotách čísla opotřebení  $W_b$  lze pro daný materiál kolejnic určit hodnotu koeficientu poškození D4.1, který vyjadřuje možnost vzniku kontaktně-únavových vad. Tato závislost (odpovídající standardnímu materiálu kolejnic R260) je zobrazena na obr. 2.

Pro jednotlivé intervaly uvedené charakteristiky na obr. 2 lze koeficient D4.1 určit následujícím způsobem:

- $W_b \in (0; 15 \text{ N})$ :  $D4.1 = 0$ ;
- $W_b \in (15 \text{ N}; 65 \text{ N})$ :  $D4.1 = n_{FW} \cdot (0,02 \cdot W_b - 0,3)$ ;
- $W_b \in (65 \text{ N}; 175 \text{ N})$ :  $D4.1 = n_{FW} \cdot (-W_b + 175)/110$ ;
- $W_b \geq 175$ :  $D4.1 = 0$ .

V uvedených vztazích pro koeficient D4.1 vyjadřuje parametr  $n_{FW}$  počet podvozků. Příslušná hodnota  $W_b$  je stanovena s využitím výsledků simulačních výpočtů.



Obr. 2 Uvažovaná závislost koeficientu poškození D4.1 na číslu opotřebení  $W_b$  pro počet podvozků  $n_{FW} = 1$ .

Z grafu na obr. 2 je zřejmé, že koeficient poškození D4.1 nabývá pro jeden podvozek maximálně hodnoty 1, a to při  $W_b = 65$  N. Ze vztahů uvedených nad grafem vyplývá, že s rostoucím počtem podvozků přímo úměrně roste i hodnota koeficientu D4.1.

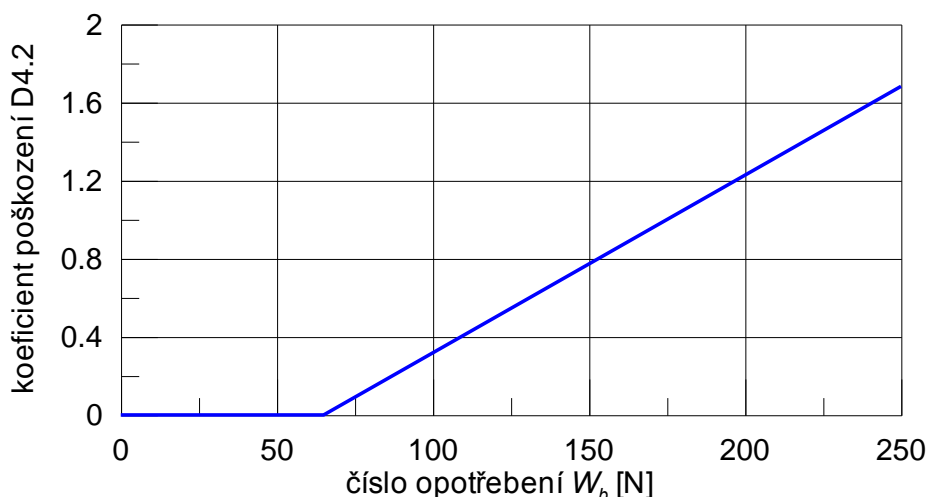
### Koeficient D4.2

Tento dílčí koeficient vyjadřuje přímo opotřebení kol a kolejnic v důsledku vykonané měrné třecí práce, která je zde opět vyjádřena pomocí čísla opotřebení  $W_b$ . Zde platí, že při  $W_b \geq 65$  N je koeficient D4.2 vyjádřen vztahem:

$$D4.2 = n_{FW} \cdot (W_b - 65)/110, \quad (7)$$

zatímco při nižších hodnotách  $W_b$  je hodnota koeficientu D4.2 nulová (viz obr. 3). Parametr  $n_{FW}$  opět vyjadřuje počet podvozků vozidla a hodnota  $W_b$ , udávaná v [N], je stanovena s využitím výsledků simulačních výpočtů.

Na obr. 3 je zobrazena závislost koeficientu poškození D4.2 na hodnotách čísla opotřebení  $W_b$  pro počet podvozků  $n_{FW} = 1$  a za předpokladu použití standardního materiálu kolejnic R260. Ze vztahu (7) vyplývá, že hodnota koeficientu D4.2 je přímo úměrná počtu podvozků  $n_{FW}$ .



Obr. 3 Uvažovaná závislost koeficientu poškození D4.2 na číslu opotřebení  $W_b$  pro počet podvozků  $n_{FW} = 1$ .

### 2.5 Koeficient poškození D5

Poslední koeficient D5 vyjadřuje intenzitu poškozování konstrukčních částí výhybek a odpovídá poslední části vztahu (1), uvedeného v předchozí kapitole, tedy:

$$D5 = n_{FW} \cdot \sqrt{0,5 \cdot Q_{185}^2 + 0,5 \cdot Y_{185}^2}, \quad (8)$$

kde  $Q_{185}$  je dynamická svislá kolová síla při rychlosti jízdy 40 km/h, jejíž (referenční) hodnota je vypočtena jako síla  $P_2$  dle normy [4] a  $Y_{185}$  je maximální hodnota vodící síly působící v kontaktu nabíhajícího kola a vnější kolejnice při průjezdu vozidla dvěma protisměrnými oblouky o poloměru 185 m s krátkou mezipřímou délky 6 m referenční rychlostí 40 km/h. Referenční hodnoty sil  $Q_{185}$  a  $Y_{185}$  ve vztahu (4) jsou uváděny v [kN]. Uvažované trasování koleje v podmínkách protisměrných oblouků, reprezentujících průjezd vozidla odbočnou větví výhybky, resp. kolejovou spojkou, je

uvedeno v lit. [3]. Hodnota vodící síly  $Y_{185}$  je stanovena pomocí simulačních výpočtů jízdy vozidla, které jsou realizovány a vyhodnocovány za definovaných podmínek (filtrace klouzavou střední hodnotou s délkou okna 2 m a s krokem 0,5 m).

### 3 Parametry vyšetřovaných vozidel

Velikost jednotlivých koeficientů pro určení poškozujících účinků, které jsou popsány v předchozí kapitole, a tedy i pro stanovení referenčních nákladů vozidla (viz vztah (1)), je bezpochyby závislá na konkrétních parametrech vyšetřovaného vozidla. Avšak změna určitého parametru vozidla může mít pouze minimální vliv na změnu daného koeficientu poškození, a naopak změna jiného parametru může mít vliv velký. Cílem optimalizace těchto parametrů vozidla by však mělo být snížení celkové úrovně poškozujících účinků jízdy vozidla na uvažovanou trať. K určení vlivu změny konkrétního konstrukčního parametru vozidla je proto potřeba zabývat se jednotlivými koeficienty, které popisují jednotlivé dílčí poškozující účinky, odděleně.

Pro posouzení intenzity jednotlivých dílčích poškozujících účinků jízdy vozidla na kolej byly vytvořeny čtyři multi-body modely (tzv. virtuální prototypy) čtyřnápravových elektrických lokomotiv (označené jako Typ A až Typ D) v programu MSC.ADAMS + VI-Rail. Jedním z předpokladů při tvorbě těchto modelů bylo použití co největšího podílu konstrukčních řešení z portfolia společnosti ŠKODA TRANSPORTATION a.s. S těmito výpočtovými modely byly následně provedeny simulace jízdy vozidla, jejichž výstupem byly příslušné veličiny, potřebné jako vstupy pro určení hodnot jednotlivých dílčích koeficientů poškození. U dynamických modelů lokomotiv bylo snahou snižovat hmotnost nevypružených hmot, ale i celkovou hmotnost vozidla, a to v prvním kroku zmenšením průměru nových kol z hodnoty 1250 mm na 1100 mm a v druhé kroku nahrazením kotoučové brzdy brzdou špalíkovou, což vede k odstranění brzdových kotoučů. V posledním kroku došlo ke snížení rozvoru podvozku z hodnoty 2,8 m na 2,6 m. Parametry lokomotiv, jež byly při jednotlivých simulačních výpočtech měněny, jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Parametry vyšetřovaných modelů lokomotiv.

Lokomotiva	Konstrukce brzdy	Průměr kola	Rozvor podvozku	Celková hmotnost lokomotivy	Nevypružené hmoty na dvojkolí
Typ A	Kotoučová	1250 mm	2,8 m	88,5 t	3240 kg
Typ B	Kotoučová	1100 mm	2,8 m	87,3 t	2940 kg
Typ C	Špalíková	1100 mm	2,8 m	86,0 t	2610 kg
Typ D	Špalíková	1100 mm	2,6 m	86,0 t	2610 kg

Bližší popis virtuálních multi-body modelů lokomotiv a výsledky simulačních výpočtů jsou uvedeny v lit. [5].

### 4 Porovnání vyšetřovaných vozidel na základě hodnot koeficientů poškození

Hodnocení uvedených vozidel (lokomotiv), jejichž proměnné parametry jsou uvedeny v předchozí kapitole, bylo provedeno se zaměřením na jednotlivé koeficienty dílčích poškozujících účinků. Cílem přitom byla kvantifikace vlivu změny jednotlivých parametrů, které jsou uvedeny v tab. 1. Vypovídající porovnání, které ukazuje vliv

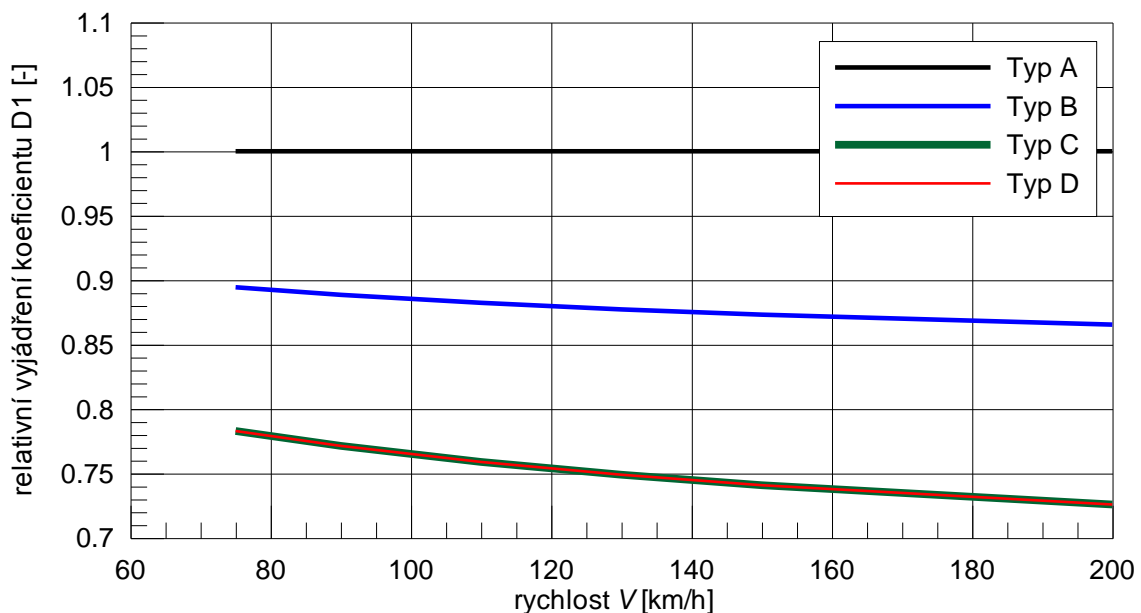


změny parametrů vozidla na změnu hodnotících koeficientů poškození, je provedeno přepočtem na relativní vyjádření. V tomto vyjádření je uvažována první lokomotiva (Typ A) jako referenční a koeficientům poškození pro tuto lokomotivu je přidělena hodnota 1; s ní jsou pak porovnávány ostatní typy lokomotiv. V případě, že hodnoty pro ostatní lokomotivy nabývají hodnot nižších než 1, tak se jedná o snížení úrovně dynamických, resp. poškozujících účinků jízdy vozidla na kolej, a tedy i snížení vlivu, jež vyjadřuje daný koeficient poškození.

#### 4.1 Koeficient poškození D1

V grafu na obr. 4 jsou pro jednotlivé uvažované typy lokomotiv uvedeny relativní hodnoty koeficientu D1 v závislosti na rychlosti jízdy. Z grafu je zřejmé, že při zmenšení průměru kol, a tedy při snížení hmotnosti nevypružených hmot (téměř o 10 %), dojde k nezanedbatelnému snížení hodnot koeficientu D1 (viz dosahované hodnoty pro Typ B). Při dalším snižování hmotnosti nevypružených hmot v důsledku nahrazení diskové brzdy brzdou špalíkovou (viz Typ C a Typ D) dochází k dalšímu snížení hodnot koeficientu D1. Taková redukce hmotnosti nevypružených hmot (v porovnání s referenčním typem A téměř o 20 %), ale také celkové hmotnosti vozidla, v konečném důsledku vyvodí při rychlosti jízdy 160 km/h snížení koeficientu D1 přibližně o 26 %.

Změna rozvoru podvozku nemá vliv na velikost koeficientu poškození D1, což vyplývá ze vztahů (2) a (3), a proto jsou křivky pro lokomotivu typu C a typu D na obr. 4 totožné.

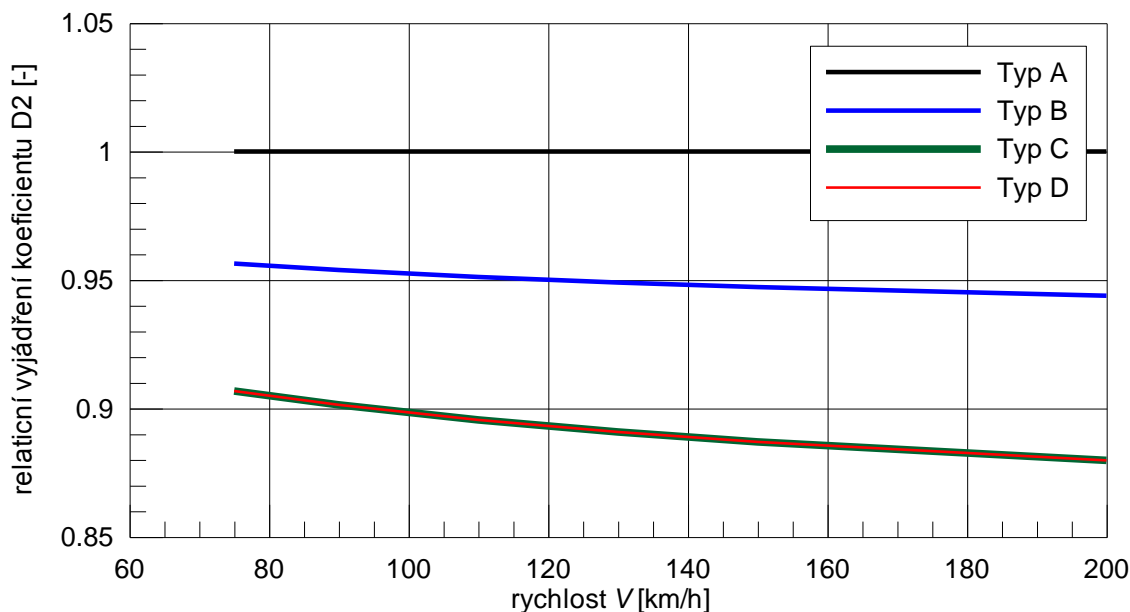


Obr. 4 Relativní vyjádření koeficientu poškození D1 v závislosti na rychlosti jízdy pro vyšetřované typy lokomotiv.

#### 4.2 Koeficient poškození D2

Pro koeficient poškození D2 je situace obdobná. Rozdíl ve výpočtu se nachází pouze v hodnotě exponentu u dynamické svislé kolové síly. Proto lze očekávat při výpočtu koeficientu D2 obdobné trendy, jaké má koeficient D1. Na obr. 5 je uvedena závislost relativního vyjádření koeficientu poškození D2 na rychlosti jízdy pro uvažované typy lokomotiv. Z grafu vyplývá, že při snížení hmotnosti nevypružených hmot, a tedy i celkové hmotnosti vozidla dochází ke snížení hodnot koeficientu D2. Změna rozvoru

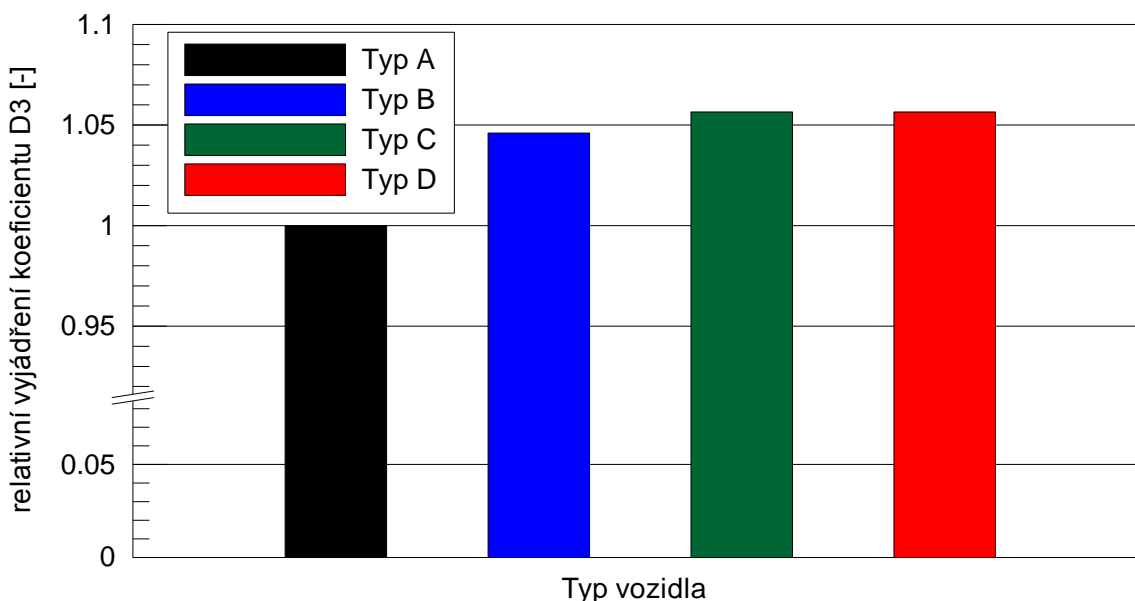
podvozku nemá vliv na velikost koeficientu D2. Při rychlosti jízdy 160 km/h tak dojde u typů C a D ke snížení hodnoty koeficientu poškození D2 přibližně o 12 % v porovnání s typem A.



Obr. 5 Relativní vyjádření koeficientu poškození D2 v závislosti na rychlosti pro vyšetřované typy lokomotiv.

### 4.3 Koeficient poškození D3

Na obr. 6 jsou vyjádřeny relativní hodnoty koeficientu poškození D3 pro jednotlivé uvažované typy lokomotiv. První lokomotivě (Typ A) je opět přidělena hodnota 1. Snížení hmotnosti nevypružených hmot, a tedy i celkové hmotnosti lokomotivy, má při nezměněném trakčním výkonu lokomotivy za následek zvyšování koeficientu D3, který vyjadřuje podmínky pro přenos tažných (ale také brzdných) sil v kontaktu kolo–kolejnice. Snížením celkové hmotnosti lokomotivy totiž dochází ke zmenšení velikosti dotykové plochy mezi kolem a kolejnicí (počítané podle Hertze), na které je třeba přenášet tažnou sílu, resp. kde se realizuje trakční výkon. Obdobný účinek přitom má i zmenšování jmenovitého průměru kol hnacích dvojkolí. Z grafu je zřejmé, že se za definovaných podmínek jedná u typů C a D o zvýšení koeficientu poškození D3 přibližně o 6 % v porovnání s typem A.

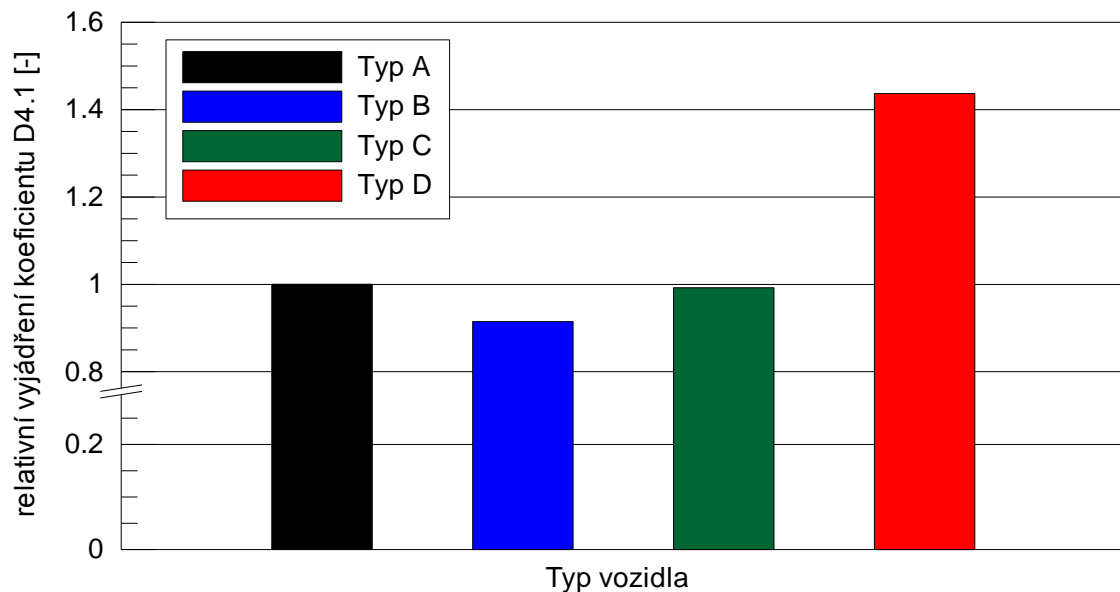


Obr. 6 Relativní vyjádření koeficientu poškození D3 pro uvažované typy lokomotiv.

#### 4.4 Koeficient poškození D4

Koeficienty poškození D4.1 a D4.2 jsou určovány v závislosti na poloměru oblouku. Je nutné připomenout, že pro potřeby vyhodnocení intenzity poškozujících účinků vyšetřovaných vozidel dle švýcarské metodiky musely být provedeny simulace jízdy vozidla pouze čtyřmi oblouky, a to o poloměrech 270, 343, 480 a 800 m. Koeficient poškození D4.1, který charakterizuje možnost vzniku a následného šíření kontaktně-únavových vad kolejnic, nabývá v případě vyšetřovaných modelů vozidel kladných hodnot jen při jízdě vozidla poloměrem oblouku  $R = 800$  m, jinak jsou jeho hodnoty nulové. Proto je v grafu na obr. 7 zobrazeno porovnání hodnot tohoto koeficientu pro jednotlivé uvažované varianty lokomotiv pouze pro uvedený poloměr oblouku. Fakt, že při jízdě vyšetřovaných modelů lokomotiv oblouky o menších poloměrech nabývá koeficient D4.1 nulových hodnot, vyplývá z vysokých hodnot (měrné) třecí práce v kontaktu kolo–kolejnice a souvisí s konkrétními parametry těchto vozidel. Použitá metodika hodnocení poškozujících účinků v takovém případě předpokládá již tak intenzivní opotřebávání hlav kolejnic (ve smyslu úbytku materiálu), že k odstranění povrchových vrstev kolejnic (ale i kol) dojde dříve, než vůbec může dojít k rozvoji kontaktně-únavových vad (což je charakterizováno hodnotou koeficientu poškození D4.2). V případě vozidel jiné koncepce a rozdílných parametrů (jednotky, osobní a nákladní vozy) se hranice mezi převažujícím opotřebením a převažujícím rozvojem kontaktně-únavových vad kolejnic může pochopitelně nacházet v jiných pásmech poloměrů oblouku.

Z grafu na obr. 7 vyplývá, že počátečním zmenšením průměru kol (Typ B) dochází ke snížení hodnoty koeficientu D4.1 oproti typu A přibližně o 10 %. Dále pak v důsledku výměny brzdy kotoučové za brzdou špalíkovou, a z ní vyplývajícího dalšího snížení celkové hmotnosti vozidla dojde k tomu, že hodnota koeficientu D4.1 dosahuje u typu C téměř výchozí hodnoty (viz Typ A). Poslední úpravou, tedy zmenšením hodnoty rozvoru podvozku z 2,8 m na 2,6 m (Typ D) dojde k nárůstu hodnoty koeficientu D4.1, a to o více než 40 % oproti původní variantě (Typ A). Nutno však připomenout, že tento graf odpovídá pouze situaci při průjezdu vozidla obloukem o poloměru  $R = 800$  m a vztahuje se jen k dílčímu poškozujícímu účinku vyjádřenému koeficientem poškození D4.1.

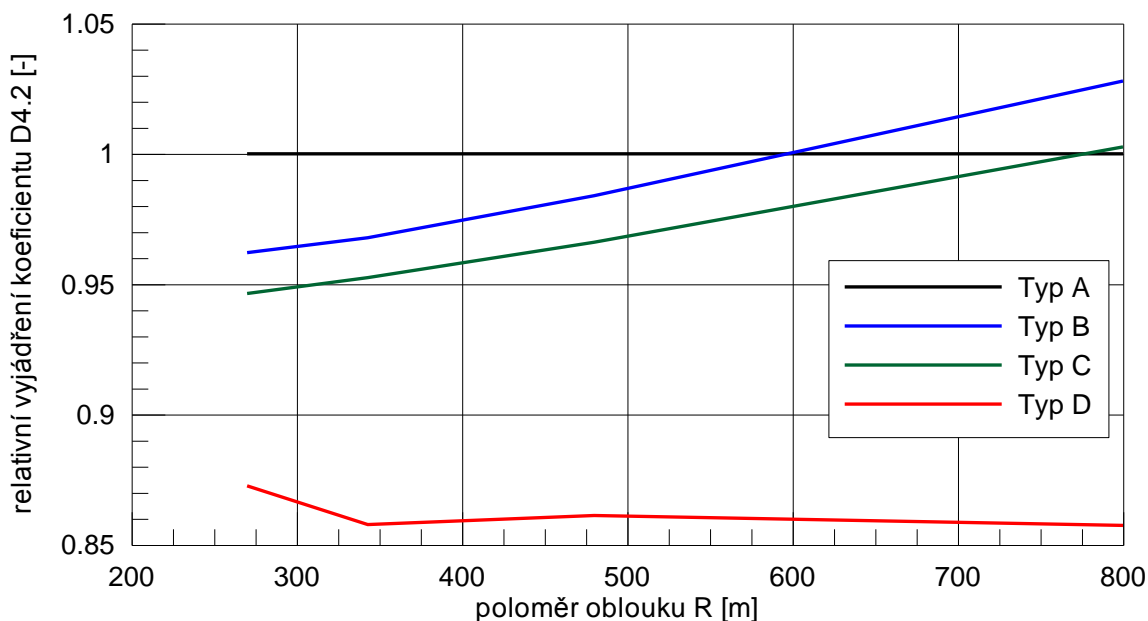


Obr. 7 Relativní vyjádření koeficientu poškození D4.1 pro vyšetřované typy lokomotiv v oblouku o poloměru  $R = 800$  m.

Koeficient poškození D4.2 vyjadřuje takové opotřebenění kol a kolejnic při jízdě vozidla obloukem, které se projevuje úbytkem materiálu (otěrem). Z grafu na obr. 8 vyplývá, že při snížení hmotnosti nevypružených hmot a zároveň celkové hmotnosti vozidla, dosaženém zmenšením průměru kol lokomotivy (Typ B), dojde při jízdě oblouky malých poloměrů ke zmenšení hodnoty koeficientu D4.2, a lze tedy předpokládat i snížení intenzity opotřebenění kolejnic (a také kol). Avšak při jízdě oblouky velkých poloměrů ( $R = 600 \div 800$  m) se koeficient poškození D4.2 proti jeho hodnotě pro referenční lokomotivu (Typ A) naopak zvýší. Toto kolísání hodnoty koeficientu D4.2 se nachází v rozmezí  $\pm 4$  %.

Dalším snížením hmotnosti vozidla a hmotnosti nevypružených hmot v důsledku nahrazení kotoučové brzdy brzdou špalíkovou při nezměněném průměru kola (Typ C) dojde k poklesu popsané křivky, a to přibližně o 2 až 3 % oproti lokomotivě typu B. V porovnání s původní referenční lokomotivou (Typ A) dochází k mírnému snížení hodnoty koeficientu poškození D4.2 pro poloměry oblouků  $R < 780$  m. Pro oblouky o poloměru  $R \geq 780$  m dochází naopak k mírnému nárůstu hodnoty koeficientu poškození D4.2. Při jízdě oblouky velmi malých poloměrů je hodnota koeficientu D4.2 snížena oproti referenční lokomotivě (Typ A) přibližně o 5 %.

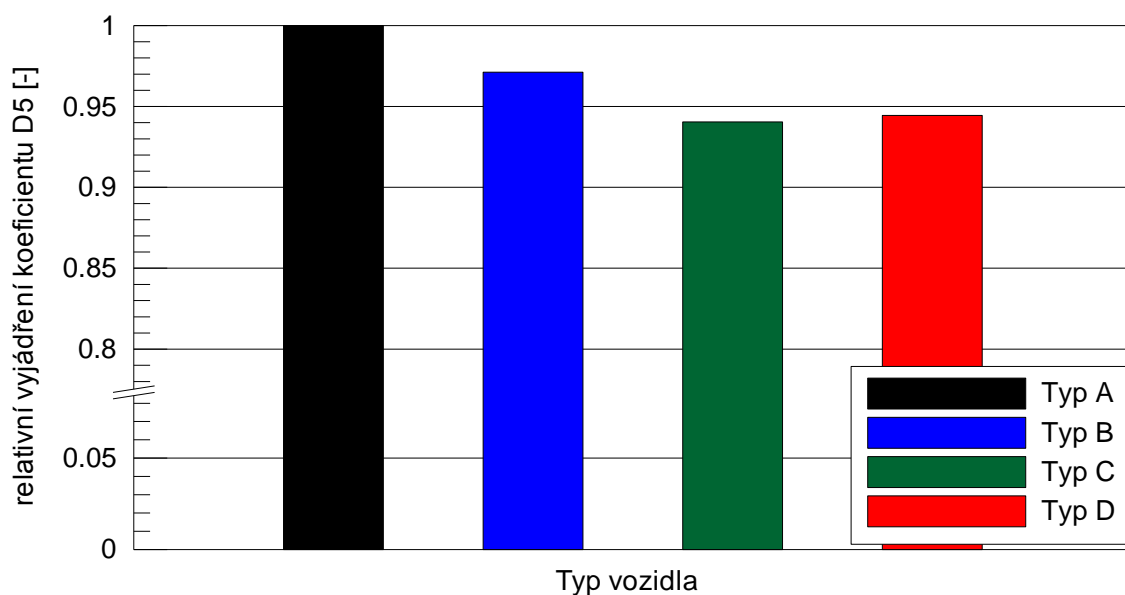
Poslední úpravou lokomotivy, tedy zmenšením rozvoru podvozku (Typ D), pak dojde k výraznému snížení hodnoty koeficientu poškození D4.2. V porovnání s modely lokomotiv typů B a C je účinek zmenšení rozvoru podvozku nejmenší pro oblouky velmi malých poloměrů, a naopak největší redukce koeficientu poškození D4.2 vykazuje lokomotiva typu D pro oblouky velkých poloměrů. V porovnání s referenční lokomotivou (Typ A) dojde ke snížení hodnoty koeficientu poškození D4.2 přibližně o 12,5 % pro oblouky velmi malých poloměrů a ke snížení hodnoty tohoto koeficientu přibližně o 14 % pro ostatní uvažované kategorie oblouků.



Obr. 8 Závislost relativního vyjádření koeficientu poškození D4.2 na poloměru oblouku pro vyšetřované typy lokomotiv.

#### 4.5 Koeficient poškození D5

K zohlednění poškozujících účinků jízdy vozidla na součásti výhybek slouží koeficient poškození D5. Relativní vyjádření hodnot koeficientu D5 pro uvažované lokomotivy je zobrazeno na obr. 9, kde je opět výchozí lokomotivě (Typ A) přiřazena hodnota 1. Z grafu vyplývá, že největšího snížení hodnoty koeficientu D5 dosahuje lokomotiva s menším průměrem kol a špalíkovou brzdou (tj. s nejnižší hmotností nevypružených hmot a zároveň s nejnižší hmotností na nápravu) a s větším rozvorem podvozku (Typ C), a to přibližně o 6 % vůči referenční lokomotivě (Typ A). Zmenšením rozvoru podvozku (Typ D) se hodnota koeficientu D5 oproti výsledkům pro lokomotivu typu C opět zvýší, ovšem jen nepatrně (přibližně o 0,5 %).



Obr. 9 Relativní vyjádření koeficientu poškození D5 pro vyšetřované typy lokomotiv.

## Závěr

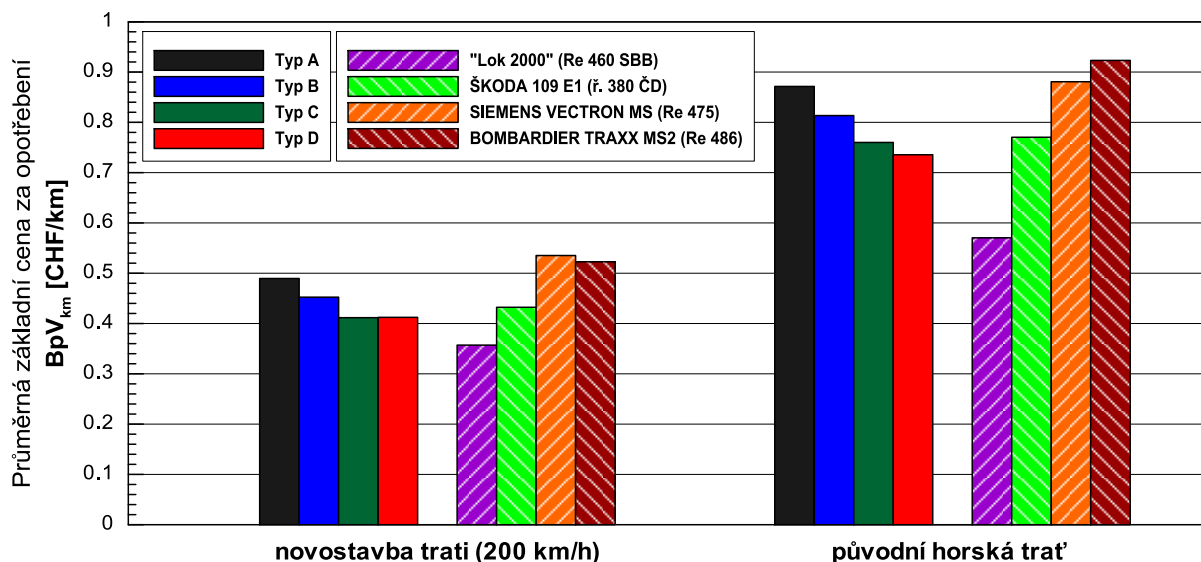
Švýcarská metodika pro hodnocení poškozujících účinků jízdy vozidla na trať hodnotí interakci vozidlo–kolej tak, že sleduje jednotlivé projevy této interakce. Vzhledem k těmto projevům, resp. uvažovaným druhům poškození stanovuje jednotlivé koeficienty poškození a definuje způsob jejich výpočtu. Pomocí vyhodnocení těchto koeficientů poškození lze porovnávat různá vozidla s různými konstrukčními parametry, a to superpozičně se zaměřením na určitý druh poškození dopravní cesty. Díky tomuto přístupu lze posuzovat vhodnost vozidla pro provoz na tratích s různými parametry z hlediska traťové rychlosti a směrových poměrů.

Z výsledků rozboru, provedeného dle této metodiky pro modely lokomotiv s různými hodnotami vybraných parametrů, jasně vyplývá, že prvotní a správnou cestou ke snížení poškozujících účinků jízdy vozidla na trať je snižování hmotnosti nevypružených hmot vozidla, a zároveň i celkové hmotnosti vozidla, resp. hmotnosti na nápravu. Snížení hmotnosti nevypružených hmot může být dosaženo např. pomocí zmenšení průměru kol či použitím brzdy špalíkové namísto brzdy kotoučové. Záměna brzdy však může být problematická například z hlediska hlukových kritérií, jež ovšem nejsou předmětem tohoto hodnocení. Snížením hmotnosti nevypružených hmot lze dosáhnout snížení:

- intenzity poškozování geometrické polohy koleje,
- intenzity degradace šterkového lože,
- možnosti inicializace kontaktně-únavových vad kolejnic,
- opotřebení kolejnic při průjezdu obloukem,
- intenzity poškozování konstrukčních částí výhybek.

Důsledkem redukce opotřebení hlav kolejnic při průjezdu obloukem však zároveň může být zvýšená možnost inicializace a rozvoje kontaktně-únavových trhlin, které jsou v opačném případě odstraňované právě opotřebováváním kolejnic. Vlivem snížení hmotnosti vozidla dochází při zachování trakčního výkonu lokomotivy ke zvýšení koeficientu poškození D3, který zohledňuje přenos tažných sil v kontaktu kolo–kolejnice, a to především z důvodu zmenšení velikosti dotykové plochy.

Poslední sledovanou úpravou bylo zmenšení rozvoru podvozku lokomotivy. Tato konstrukční úprava nemá vliv na poškozující koeficienty hodnotící svislou dynamiku při jízdě v přímé koleji. Hlavní vliv této úpravy se projeví při jízdě oblouky, kdy dochází ke snížení intenzity opotřebení hlav kolejnic ve smyslu úběru materiálu, a to pro všechny kategorie křivosti oblouků. Ovšem tato redukce opotřebení má důsledek ve zvýšené pravděpodobnosti vzniku kontaktně-únavových vad v obloucích velkých poloměrů. Pro oblouk o poloměru  $R = 800$  m dokonce vzroste v uvažovaném případě intenzita tohoto poškozujícího účinku, vyjádřená hodnotou koeficientu D4.1, o 44 % vůči referenční lokomotivě. Pro oblouky menších poloměrů je však podle švýcarské metodiky pro dané vozidlo uvažovaná intenzita tohoto poškozujícího účinku nulová. Z pohledu účinků na výhybku má uvažované zkrácení rozvoru podvozku sice negativní, ale velmi malý vliv.



Obr. 10 Průměrné jednotkové ceny za opotřebení ve dvou vybraných traťových úsecích SBB, stanovené vždy pro lokomotivní vlak tvořený jednou vyšetřovanou lokomotivou (a porovnání s vybranými existujícími typy elektrických lokomotiv).

Závěrem je nutné připomenout, že diskutovaná švýcarská metodika hodnocení poškozujících účinků jízdy vozidla na trať primárně slouží k zohlednění těchto účinků ve výši poplatků za použití dopravní cesty, přičemž je cílem zvýhodnit provoz „track-friendly“ vozidel (a kompenzovat tak případné vyšší pořizovací náklady). Přímé dopady výše analyzovaných principů zohlednění jednotlivých dílčích poškozujících účinků jízdy vozidla na kolej jsou demonstrovány v grafu na obr. 10 na výsledných hodnotách jednotkové ceny za opotřebení vyšetřovaných typů vozidel ve dvou traťových úsecích v síti SBB. Jde jednak o novostavbu trati Bern–Olten, navrženou pro rychlost až 200 km/h, a jednak o starou gotthardskou trať v úseku Göschenen–Erstfeld, kde jsou ve velké míře zastoupeny oblouky o velmi malých poloměrech. Vyšetřované modely lokomotiv jsou zde porovnány nejen vzájemně mezi sebou, ale také s vybranými existujícími typy vozidel. Ve všech případech je uvažována jízda lokomotivního vlaku, tvořeného jedním vozidlem daného typu, a maximální rychlost vlaku 160 km/h (s výjimkou lokomotivy Re 486, u níž je respektována její maximální provozní rychlost, tedy 140 km/h). Pro vozidla, která jsou schválena pro provoz ve Švýcarsku, je přitom možné tyto výsledky ověřit v on-line cenovém kalkulátoru SBB [6], odkud jsou příslušné výsledky také převzaty (data z roku 2019). Je zřejmé, že mezi sledovanými lokomotivami vykazuje suverénně nejlepší výsledky původní typ Re 460, jehož konstrukce jednak klade důraz na minimalizaci nevypružených hmot v pojezdu a jednak respektuje švýcarské traťové poměry zejména tím, že je pojezd lokomotivy vybaven systémem pasivního radiálního stavění dvojkolí. Prezentované výsledky také jasně ukazují na celkově vyšší úroveň poplatků za použití dopravní cesty na obloukovitých tratích, kde dochází k výrazně vyšší intenzitě opotřebení koleje, oproti tratím s příznivějšími směrovými poměry.

## Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci řešení a za podpory projektu SGS\_2020\_009 „Vybrané výzkumné problémy z oblasti dopravních prostředků a infrastruktury“ Univerzity Pardubice.

