

## **ANOTACE**

Disertační práce je zaměřena na problematiku možnosti zlepšení kontaktních poměrů mezi kolem a kolejnicí při průjezdu železničních vozidel oblouky malých poloměrů (300 m a méně), kde z důvodu nevhodných kontaktních poměrů mezi kolem a kolejnicí dochází k intenzivnímu opotřebovávání vnější kolejnice a tvorbě skluzových vln na hlavě vnitřní kolejnice. Jedním z možných řešení ke zlepšení kontaktních poměrů mezi kolem a kolejnicí je návrh speciálních příčných profilů hlav kolejnic, který je cílem této práce.

*Klíčová slova: opotřebení, vlnovitost, kolej, speciální příčné profily hlav kolejnic*

## **TITLE**

Contact conditions between wheelset and track at vehicle running through curves of small radii

## **ANNOTATION**

Thesis deals with the possibilities of improvement of the wheel-rail contact conditions while the vehicle is running through the track curve with small radii (300 m and less). Due to unsuitable contact conditions between wheel and rail there is a place of slip-wave creation at the head of the inner rail and intensive side wear of the outer rail. Design of the special railhead profiles, which is the aim of this work, could be one of the possible solutions for improvement of these contact conditions.

*Keywords: wear, corrugation, track, asymmetric railhead profile*

**O B S A H**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>                                    | <b>4</b>  |
| <b>SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN.....</b>                                     | <b>5</b>  |
| <b>1. ÚVOD.....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>2. ŘEŠENÁ PROBLEMATIKA .....</b>                                      | <b>8</b>  |
| 2.1. Druhy a příčiny vad pojezděné plochy .....                          | 9         |
| 2.2. Tvarové vady hlav kolejnic [41], [44] .....                         | 9         |
| 2.2.1. <i>Periodické vady</i> .....                                      | 9         |
| 2.2.2. <i>Neperiodické vady kolejnic</i> .....                           | 10        |
| 2.3. Materiálové vady hlav kolejnic.....                                 | 10        |
| 2.4. Působení vad na stav koleje .....                                   | 12        |
| 2.5. Působení vad na stav vozidel.....                                   | 12        |
| <b>3. CÍLE PRÁCE .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>4. SOUČASNÝ STAV VÝVOJE VOZIDEL A DOPRAVNÍ CESTY .....</b>            | <b>14</b> |
| 4.1. Kolej .....   | 14        |
| 4.2. Vozidla .....   | 15        |
| <b>5. PROBLEMATIKA PRŮJEZDU VOZIDLA OBLOUKEM.....</b>                    | <b>17</b> |
| 5.1. Charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí-kolej .....            | 17        |
| 5.2. Postavení vozidla v oblouku koleje .....                            | 18        |
| 5.2.1. <i>Příčný skluz</i> .....   | 20        |
| 5.2.2. <i>Podélný skluz</i> .....  | 21        |
| <b>6. PROSTŘEDKY A NÁSTROJE POUŽITÉ PŘI ŘEŠENÍ PRÁCE .....</b>           | <b>23</b> |
| 6.1. Simulační výpočty jízdy kolejových vozidel .....                    | 23        |
| 6.1.1. <i>Struktura a filozofie systému SJKV</i> .....                   | 24        |
| 6.1.2. <i>Stručný popis modelu jednotlivých částí systému SJKV</i> ..... | 24        |
| 6.2. Měřicí technika .....   | 25        |
| 6.2.1. <i>Vstupní údaje o koleji</i> .....                               | 25        |
| 6.2.2. <i>Vstupní údaje o vozidle</i> .....                              | 26        |
| <b>7. VSTUPNÍ DATA POUŽITÁ V SIMULAČNÍCH VÝPOČTECH .....</b>             | <b>27</b> |
| 7.1. Kolej .....   | 27        |
| 7.1.1. <i>Trasování</i> .....  | 27        |
| 7.1.2. <i>Příčné profily hlav kolejnic a rozchod koleje</i> .....        | 27        |
| 7.2. Vozidla .....   | 28        |
| 7.2.1. <i>Konstrukce pojezdové části osobních vozů</i> .....             | 28        |
| 7.2.2. <i>Konstrukce pojezdové části nákladních vozů</i> .....           | 29        |
| 7.2.3. <i>Hmotnostní a rozměrové parametry vozidel</i> .....             | 30        |
| 7.2.4. <i>Parametry dvojkolí</i> .....                                   | 30        |
| <b>8. TEORETICKÝ NÁVRH SPECIÁLNÍCH PŘÍČNÝCH PROFILŮ HLAV KOLEJNIC .</b>  | <b>32</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| 8.1. Nabíhající dvojkolí .....  | 32        |
| 8.2. Nenabíhající dvojkolí .....  | 33        |
| 8.3. Princip funkce speciálních příčných profilů hlav kolejnic .....  | 33        |
| 8.3.1. Funkce $\Delta r$ .....  | 33        |
| 8.3.2. Dvoubodový kontakt .....   | 34        |
| 8.4. Návrh .....  | 34        |
| 8.5. Veličiny hodnocené při návrhu speciálních příčných profilů hlav kolejnic.....                                    | 34        |
| 8.5.1. Úhel náběhu $\alpha$ .....   | 35        |
| 8.5.2. Vodicí síly $Y$ , suma vodicích sil $\Sigma Y$ .....   | 36        |
| 8.5.3. Poměr $Y/Q$ .....  | 36        |
| 8.5.4. Součinitelé adheze $\mu_x, \mu_y, \mu$ .....   | 36        |
| 8.5.5. Skluzové síly $T_x, T_y$ .....   | 37        |
| 8.5.6. Výkon třecích sil $P_{ts}$ .....   | 37        |
| 8.5.7. Ostatní veličiny .....   | 37        |
| 8.6. Provedené varianty simulačních výpočtů .....   | 37        |
| 8.7. Vlastnosti navržených speciálních příčných profilů hlav kolejnic.....  | 40        |
| 8.7.1. Charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí-kolej.....  | 40        |
| 8.7.2. Úhel náběhu .....  | 40        |
| 8.7.3. Simulační výpočty jízdy kolejových vozidel pro návrh tvaru speciálních<br>příčných profilů hlav kolejnic ..... | 43        |
| <b>9. MĚŘENÍ A HODNOCENÍ ZMĚN SLEDOVANÝCH VELIČIN VE VYBRANÝCH<br/>OBLOUCÍCH MALÝCH POLOMĚRŮ.....</b>                 | <b>46</b> |
| 9.1. Popis zkušebního úseku Brno-Adamov .....   | 46        |
| 9.2. Příčný profil hlav kolejnic.....   | 48        |
| 9.2.1. Opotřebením příčných profilů hlav kolejnic.....  | 48        |
| 9.2.2. Změny tvaru příčných profilů hlav kolejnic a funkce $\Delta r$ .....   | 49        |
| 9.3. Podélný profil hlavy vnitřní kolejnice (vlnkovitost) .....   | 51        |
| 9.3.1. Data z měřicího vozu.....  | 51        |
| 9.3.2. Data z kontaktního měření .....  | 53        |
| 9.4. Geometrické parametry koleje .....   | 54        |
| 9.5. Dynamické účinky v interakci vozidlo-kolej.....  | 55        |
| <b>10. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PRŮJEZD VOZIDEL OBLOUKEM .....</b>   | <b>57</b> |
| 10.1. Brzdění vozidel .....   | 57        |
| 10.2. Reálné geometrické parametry koleje .....   | 58        |
| 10.3. Součinitel tření .....  | 60        |
| 10.4. Vlnkovitost .....   | 62        |
| <b>11. ZÁVĚREČNÉ SHRUTÍ VÝSLEDKŮ.....</b>   | <b>66</b> |
| 11.1. Přínos práce pro praxi .....  | 66        |
| 11.2. Přínos práce pro rozvoj vědní disciplíny .....  | 68        |
| 11.3. Další vývoj .....   | 68        |
| <b>LITERATURA.....</b>  | <b>69</b> |
| <b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>   | <b>72</b> |

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK**

|                                       |       |  |
|---------------------------------------|-------|--|
| ABK                                   | ..... | tvar navržených speciálních příčných profilů hlav kolejnic   |
| CMS                                   | ..... | systém měření vlnkovitosti na měřicím voze TÚDC              |
| ČD                                    | ..... | České dráhy, a.s.  |
| JO                                    | ..... | jízdní obrys kola  |
| KŽV                                   | ..... | Komerční železniční výzkum, s.r.o                            |
| M                                     | ..... | střed otáčení  |
| PP                                    | ..... | příčný profil hlavy kolejnice                                |
| PPL, PPP                              | ..... | opotřebený průměrovaný tvar vnější a vnitřní kolejnice       |
| PZI30, POREN, POREO                   | ..... | tvar opotřebených jízdních obrysů kol                        |
| $S_o$                                 | ..... | střed oblouku  |
| SDO                                   | ..... | směrodatná odchylka svislé nerovnosti                        |
| SJKV                                  | ..... | programový systém simulace jízdy kolejového vozidla          |
| SŽDC                                  | ..... | Správa železniční dopravní cesty, s.o.                       |
| TK                                    | ..... | traťová kolej  |
| TÚDC                                  | ..... | Technická ústředna dopravní cesty, organizační jednotka SŽDC |
| UIC60 lots136, 60E2, UIC60, R65, 49E1 | ..... | tvar příčných profilů hlav kolejnic                          |
| x                                     | ..... | souřadnice v podélném směru                                  |
| y                                     | ..... | souřadnice v příčném směru                                   |
| z                                     | ..... | souřadnice ve svislém směru                                  |
| ZI-3, ZI-4, ORE S1002                 | ..... | tvar jízdních obrysů kol                                     |

**SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN**

- $a_n$  ..... nevyrovnané zrychlení  
 $H$  ..... rámová síla  
 $l$  ..... nedostatek převýšení  
 $P_{ts\ celk}$  ..... celkový výkon třecích sil celého vozidla  
 $Q$  ..... kolová síla  
 $Q_0$  ..... jmenovitá kolová síla  
 $qR$  ..... strmost okolku  
 $r$  ..... jmenovitý poloměr kol dvojkolí  
 $r_1, r_2$  ..... okamžitý poloměr kol dvojkolí  
 $R$  ..... poloměr oblouku  
 $2s$  ..... vzdálenost styčných kružnic  
 $Sd$  ..... šířka okolku  
 $Sh$  ..... výška okolku  
 $tany$  ..... funkce  $tany$   
 $T_{ij}$  ..... skluzové síly v kontaktu kolo-kolejnice (i-té dvojkolí, j-té kolo)  
 $T_{xij}, T_{yij}$  ..... skluzové síly v kontaktu kolo-kolejnice (i-té dvojkolí, j-té kolo) v podélném a příčném směru  
 $v$  ..... rychlost vozidla  
 $v_{skl}$  ..... skluzová rychlost  
 $v_x, v_y$  ..... skluzová rychlost v podélném a příčném směru  
 $v_{x1}, v_{x2}$  ..... rychlost v podélném směru v kontaktu kolo-kolejnice vyplývající z pohybu dvojkolí po kruhové dráze oblouku (rozdílný poloměr)  
 $v_{xskl1}, v_{xskl2}$  .. skluzová rychlost v podélném směru v kontaktu kolo-kolejnice  
 $y_d$  ..... příčné posunutí dvojkolí v koleji  
 $y_o$  ..... amplituda příčného pohybu dvojkolí v koleji  
 $Y_{ij}$  ..... vodící síly (i-té dvojkolí, j-té kolo)  
 $y_{..ij}$  ..... příčné zrychlení na ložiskové skříni vozidla (i-té dvojkolí, j-té kolo)  
 $z_{..ij}$  ..... svislé zrychlení na ložiskové skříni vozidla (i-té dvojkolí, j-té kolo)
- $\alpha$  ..... úhel náběhu dvojkolí  
 $\alpha_{max}$  ..... maximální úhel náběhu dvojkolí  
 $\beta$  ..... úhel sklonu dotykové roviny na okolku  
 $\gamma_o$  ..... úhel sklonu dotykové roviny v kontaktu kolo-kolejnice v centrované poloze dvojkolí v koleji

- $\gamma, \gamma_1, \gamma_2$  ..... okamžitý úhel sklonu dotykové roviny v kontaktu kolo-kolejnice
- $\Delta r$  ..... funkce  $\Delta r$
- $\Delta r_1, \Delta r_2$  ..... odchylky okamžitého průměru kol od jmenovitého průměru při příčném posunutí dvojkolí v koleji
- $\Delta t$  ..... časový krok simulace
- $\Delta W_{ts}$  ..... měrná elementární práce třecích sil
- $\vartheta_x, \vartheta_y$  ..... relativní skluz v kontaktu kolo-kolejnice v podélném a příčném směru
- $\lambda_{ekv}$  ..... ekvivalentní konicita dvojkolí-kolej
- $\mu$  ..... součinitel adheze
- $\mu_x, \mu_y$  ..... součinitel adheze v podélném a příčném směru
- $2\sigma$  ..... šířka volného kanálu koleje
- $\Sigma Y_i$  ..... suma vodicích sil (i-té dvojkolí)
- $\omega_{DVOJ}$  ..... úhlová rychlost rotace dvojkolí
- $\omega_M$  ..... úhlová rychlost rotace vozidla kolem středu otáčení
- $\omega_R$  ..... úhlová rychlost rotace vozidla kolem středu oblouku

## 1. ÚVOD

Provozovatelé železniční dopravy z důvodu zvýšení konkurenceschopnosti železnice vyvíjejí velký tlak na výrobce kolejových vozidel. Jejich požadavky v oblasti nákladní dopravy směřují především ke stavbě hnacích vozidel s velkým instalovaným výkonem, maximálním koeficientem využití adhezní tíhy a ke stavbě nákladních vozů s maximální dovolenou hmotností na nápravu až 25 t. V osobní dopravě je tendence k rozložení trakčního výkonu na více náprav, minimalizace vlastní hmotnosti vozidel, poskytnutí maximálního komfortu cestujícím, včetně vysoké cestovní rychlosti. To vše samozřejmě při maximální bezpečnosti přepravy a trvalém snižování provozních a údržbových nákladů. Podobná kritéria, směřující ke splnění výše popsaných cílů, jsou kladena i na dopravní cestu, neboť ta tvoří s vozidlem neoddelitelnou dvojici, vzájemně se ovlivňující.

Základním úkolem koleje jako dopravní cesty spočívá v železniční dopravě ve vedení a nesení kolejových vozidel po ní se pohybujících a v umožnění přenosu brzdných a tažných sil při maximálním využívání adheze mezi kolem a kolejnicí. Dokonalé poznání vlastností dopravní cesty a jejich změn během provozu je při konstruování kolejových vozidel mnohdy opomíjeno. Přitom je zřejmé, že dosažení výše uvedených cílů je možné pouze na koleji, která splňuje a zaručuje určité parametry po celou dobu provozu.

## 2. ŘEŠENÁ PROBLEMATIKA

Pomineme-li minimální provozní opotřebení kolejnic v přímé koleji, jsou důležitým ukazatelem stavu a kvality koleje také vady kolejnic, které se nejčastěji projevují při extrémních podmínkách v interakci vozidla a koleje (oblouky malých poloměrů, výhybky). Z nich je v této práci soustředěna pozornost na vady tvaru hlav kolejnic v obloucích malých poloměrů (300 m a méně), kterými jsou intenzivní opotřebovávání vnější kolejnice (viz *Obr. 1*) a vlnkovitost na hlavě vnitřní kolejnice (viz *Obr. 2*), na zjištění vlivu těchto vad na změnu kontaktních poměrů dvojkolí-kolej a vodicích vlastností vozidel a na možnosti realizace vhodných opatření k minimalizaci jejich tvorby.

Intenzivní opotřebovávání vnější kolejnice je problém, který je dnes velmi aktuální nejen v podmínkách železniční, ale také tramvajové dopravy a má přímou souvislost se změnami tvaru kolejnice i změnami v konstrukci vozidel.



**Obr. 1** Boční opotřebení vnějšího kolejnicového pásu

Sklužové vlny jsou typickou, provozem vznikající vadou tvaru hlavy kolejnice, nikoliv vadou materiálovou, i když materiál zde sehrává také určitou roli. Sklužové vlny jsou zdrojem hluku a vibrací, přispívají k degradaci součástí železničního svršku i geometrických parametrů koleje, degradaci součástí železničních vozidel. V současnosti se k odstraňování následků procesu tvorby sklužových vln v provozu používá broušení hlav kolejnic, které je však nákladné a nezabraňuje další tvorbě vln [4].



## 2.1. Druhy a příčiny vad pojezděné plochy

Vzájemné silové působení kola a kolejnice má, podle podmínek v kontaktní ploše, vliv na změny tvaru jízdního obrysu kola i příčného profilu hlavy kolejnice. Pokud je toto působení velmi nepříznivé (velké měrné tlaky v kontaktní ploše, tvrzené povrchy, velké hodnoty skluzů), dochází k porušování povrchu kol i kolejnic. To se po určité době projeví jako vady materiálu nebo tvaru, které mají vliv na komfort jízdy, opotřebení, spolehlivost a na bezpečnost provozu.

## 2.2. Tvarové vady hlav kolejnic [41], [44]

Vady tvaru podélného nebo příčného profilu hlav kolejnic je možné odhalit vizuální kontrolou a proto nejsou tak nebezpečné, jako skryté vady materiálové. Mají vliv především na jízdní komfort, vodící vlastnosti vozidel a částečně také na bezpečnost jízdy. Podle charakteru opakování stejného jevu, lze dělit tyto vady na periodické a neperiodické.

### 2.2.1. Periodické vady

**Vlnky** se vyznačují pravidelně za sebou následujícími lesklými (martenzitickými) vyvýšeninami a tmavými prohlubněmi vln (rozteč vyvýšenin 3÷8 cm). Výskyt vlnek je hlavně v přímých úsecích koleje, ale i v obloucích o velkých poloměrech. Jejich vznik není dodnes přesně vysvětlen. Vliv na tvorbu vlnek má materiál kolejnice, způsob zpracování oceli a vlakový provoz.

**Krátké vlny** (viz Obr. 2) jsou vlnovité nerovnosti na pojezděné části temene hlavy kolejnice o rozteči vyvýšenin 8÷30 cm a hloubce až 1.2 mm. Tyto vady kolejnic se vyskytují hlavně na vnitřním kolejnicovém pásu v obloucích o poloměrech pod 600 m. Jednou z příčin vzniku těchto vln je rozdílnost v ujeté dráze jednotlivých kol dvojkolí po vnější a vnitřní kolejnici, která se projevuje prokluzy většinou odlehčeného kola na vnitřní kolejnici (nazývají se skluzovými vlnami). Tento problém je významný především kolejnic s větší odolností materiálu proti opotřebení, neboť u kolejnic normální kvality je průběžné svislé opotřebení temene hlavy kolejnice větší než rychlost růstu vznikajících skluzových vln.



**Obr. 2** Podélný profil vlnovitosti na hlavě kolejnice (trať Brno - Adamov)

Lze je nalézt také na přímých úsecích, kde vznikají v místech náhlé změny svislé tuhosti jízdní dráhy (přechod z kolejového svršku se šterkovým ložem na pevnou jízdní dráhu, most, přejezd či výhybku, v místech spojení kolejnic výrazně odlišných tvarů či na špatně udržovaných izolovaných stycích).

**Dlouhé vlny** mají vlnovou délku mezi 0.6÷2.3 m a hloubku 0.5÷4 mm. Jedná se o vady vzniklé při výrobě, především rovnání kolejnic nekrouhlými rovnacími válečky. Tyto vady se v současné době díky používání moderních technologií daří eliminovat již ve výrobě. Mohou být způsobeny také pojižděním vozidel s jednotnými znaky jako je vypružení, vzdálenost náprav a otočných čepů, průměry kol a rychlost jízdy.

### **2.2.2. Neperiodické vady kolejnic**

K těmto vadám na povrchu hlavy kolejnice patří smyková místa a povrchové trhliny, které mohou vést k odlupování nebo zhmoždění materiálu kolejnic, dále pak vyjeté sváry a válcovací šupinky.

### **2.3. Materiálové vady hlav kolejnic**

Vady materiálu hlavy kolejnice jsou velmi nebezpečné, jednak z důvodu obtížnosti jejich zjištění v provozu, jednak kvůli charakteru průběhu jejich vývoje. Neodhalená vada, například ve formě trhliny, se v kolejnici nekontrolovaně šíří. Při působení více negativních faktorů se po určité době může vada materiálu projevit ve formě lomu kolejnice.

**Shelling** (viz Obr. 3) je povrchová vada, způsobující lasturovitě odlupování materiálu z pojížděné hrany kolejnice. Příčinou jsou podélné trhliny v hloubce 4÷6 mm pod povrchem pojížděné hrany kolejnice, vznikající v důsledku kontaktních a skluzových sil, zejména při jízdě obloukem. K iniciaci vady dochází zpravidla v místech netvárných vměstků v kolejnicové oceli. Prvním příznakem existence vnitřních trhlin jsou tmavé podélné skvrny na zaoblení hrany hlavy pojížděné kolejnice v nepravidelných vzdálenostech, které se po určitém čase působení dynamického zatěžování projeví na povrchu jako převalek, trhlina na boční ploše hlavy kolejnice. Nakonec dojde k oddělení materiálu od pojížděné plochy.



**Obr. 3 Shelling**

V současné době problematika vzniku shellingu díky čistotě, zvýšené pevnosti kolejnicových ocelí a také používání povrchově vytvrzovaných hlav kolejnic v obloucích, ustupuje do pozadí vadě označované jako head checking.

**Head checking** (viz Obr. 4) je povrchová vada, projevující se jako šikmá trhlina pojížděné hrany hlavy kolejnice. Příčinou vzniku je vysoký kontaktní tlak ve styku kolo-kolejnice. Projevuje se velkým množstvím rovnoběžných trhlinek ve vzdálenosti zpravidla 1÷5 mm od sebe na pojížděné ploše, resp. pojížděné hraně hlavy kolejnice. Trhlinky zasahují do hloubky cca 2 mm. Po delší době provozu (v závislosti na zatížení trati) může dojít k vylamování materiálu mezi jednotlivými trhlinkami a vylámaná místa se mohou spojovat v delší prohlubně. Vada se tak může rozvinout v příčnou trhlinu a v kombinaci s shellingem může urychlit rozvoj příčné trhliny vedoucí až k lomu kolejnice.



**Obr. 4 Head checking**

## 2.4. Působení vad na stav koleje

Zvýšené dynamické namáhání ve svislém směru, které je v závislosti na hloubce pojížděné nerovnosti progresivně rostoucí, vede ke snížení únavové pevnosti kolejnic. Odstraněním skluzových vln broušením lze podstatně zvýšit přepravenou kumulativní zátěž a tím prodloužit dobu použití kolejnic. Viditelný je vliv vibrací na uvolňování šroubových spojů a celkové opotřebení prvků upevnění kolejnic.

Dalším negativním důsledkem je vyšší zatížení kolejového lože od přídavných dynamických sil, s čímž souvisí i vyšší intenzita sedání koleje (především pod vnitřní kolejnicí), tj. větší rozdíly výškové polohy koleje v závislosti na přepravené zátěži (viz *Kap. 9.4*), které tak krátí cyklus opravných prací nutných k výškové úpravě koleje. Dokonce se mohou tyto síly při nepříznivých podmínkách (malá pružnost koleje, znečištěné nebo zmrzlé lože) projevit až ve zvýšeném namáhání železničního spodku.

## 2.5. Působení vad na stav vozidel

Při pojíždění vlnkovitých nerovností železničními vozidly je možné v systému vozidla a koleje měřit svislá zrychlení, která dosahují na neodpružených částech kolejového vozidla (dvojkolí, převodovka, tlapový motor) značných hodnot (viz *Kap. 9.5*). Únavová pevnost takto dynamicky zatěžovaných částí je dosažena dříve a opotřebení jednotlivých konstrukčních celků je vyšší než by bylo při klidné jízdě železničního vozidla. Při přejezdu svislých nerovností navíc dochází ke značným změnám kolových sil, což při jízdě na mezi adheze u moderních hnacích vozidel znamená častější zásahy do regulace trakčního či brzdného výkonu, s následným negativním ovlivněním podélné dynamiky vlaku.

### 3. CÍLE PRÁCE

Na základě teoretického rozboru průjezdu vybraných kolejových vozidel oblouky malých poloměrů navrhnout speciální tvar příčných profilů hlav kolejnic za účelem snížení rychlosti rozvoje tvarových vad kolejnic.

- Teoretická část
  - Na základě výsledků simulačních výpočtů jízdy vozidel (osobní, nákladní) v oblouku malého poloměru s běžnými typy podvozků, s různými jízdními obrysy kol, jedoucími různými rychlostmi, na koleji s různou hodnotou převýšení a rozchodem koleje, provést návrh tvaru speciálních příčných profilů hlav kolejnic s cílem snížení negativních účinků vozidel při průjezdu oblouky.
  - Modelování naměřené vlnkovitosti hlavy vnitřního kolejnicového pásu jako vstupního parametru do simulačních výpočtů.
  - Vyšetřování kontaktních poměrů mezi kolem a vlnkovitou kolejnicí.
  - Modifikace výpočtu velikosti dotykové plochy mezi kolem a kolejnicí podle Hertzovy teorie v simulačních výpočtech.
  - Hodnocení vlivu navržené změny příčných profilů hlav kolejnic na opotřebením jízdnic obrysů kol železničních vozidel provozovaných v obloucích malých poloměrů prostřednictvím simulačních výpočtů (změny velikosti práce třecích sil při změnách kontaktních poměrů mezi kolem a kolejnicí).

Shromáždit informace o vývoji důležitých parametrů koleje, které ovlivňují interakci vozidlo-kolej.

- Experimentální část
  - Výzkum ovlivňování vývoje příčného a podélného profilu hlav kolejnic a geometrických parametrů koleje měnícími se (opotřebením v provozu či aplikací speciálních příčných profilů hlav kolejnic) kontaktními poměry mezi kolem a kolejnicí ve vybraných obloucích malých poloměrů.
  - Měření a analýza vývoje dynamických účinků (svislých zrychlení na ložiskových skříních) při průjezdu vybraných železničních vozidel oblouky malých poloměrů, ve kterých se rozvíjí vlnkovitost na vnitřní kolejnici.

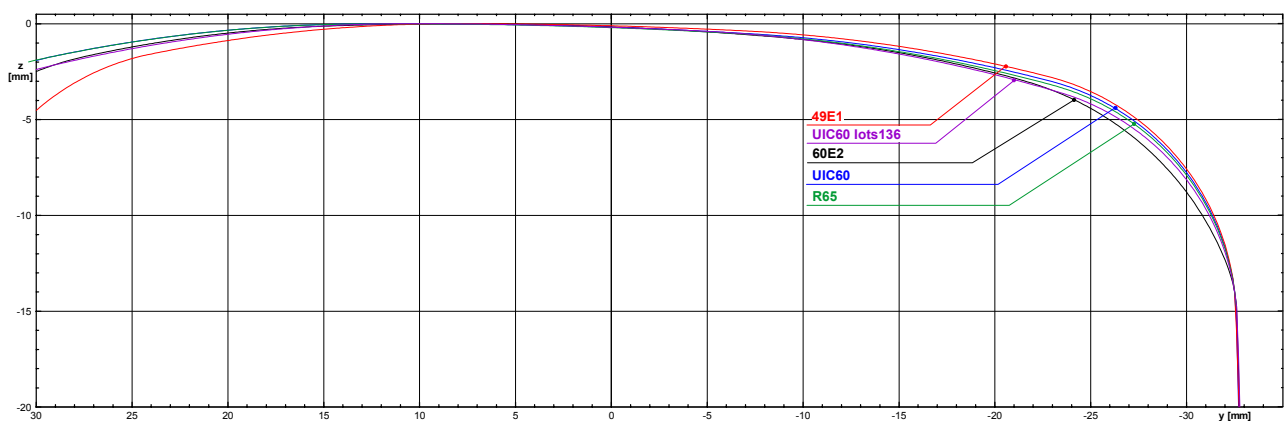
## 4. SOUČASNÝ STAV VÝVOJE VOZIDEL A DOPRAVNÍ CESTY

### 4.1. Kolej

Geometrické parametry koleje jsou v současné době určeny normou EN 736360 [39], [40], která určuje jak stavební tak i provozní a mezní hodnoty důležitých parametrů koleje. Kromě těchto parametrů je pro výslednou interakci mezi vozidlem a kolejí důležitý tvar příčných profilů hlav kolejnic.

Kolejnice prošla dlouhým vývojem, během níž se měnily hmotnostní a tvarové parametry hlavy, stojiny a paty podle potřeb a nejnovějších poznatků z provozu [36]. Souběžně docházelo také ke změnám materiálu kolejnice, které znamenalo zvýšení pevnosti a odolnosti materiálu proti opotřebením. Kromě změn materiálových vlastností v celém objemu se na velmi zatížených tratích prosazují také kolejnice s povrchově tvrzenými hlavami kolejnic.

Postupný vývoj tvaru příčných profilů hlav kolejnic používaných na hlavních tratích je na *Obr. 5*. Trend zvyšování rychlosti a tedy nutnosti zajištění stabilního chodu v příčném směru v přímé koleji pro všechny typy vozidel pak vede k návrhům a používání různých speciálních tvarů příčných profilů hlav kolejnic [28], které umožňují snížení hodnot ekvivalentní konicity dvojkolí-kolej (viz *Kap. 5.1*) zvýšením hodnoty rozchodu koleje pomocí broušení kolejnic. V obloucích jsou zase použitelné tzv. anti-head-checks příčné profily hlav kolejnic z důvodu nutného omezení maximálních hodnoty napětí zvětšením dotykové plochy mezi kolem a kolejnicí, kterého se dosáhne zvětšením poloměru zaoblení pojížděné hrany hlavy vnější kolejnice.



**Obr. 5** Tvary používaných příčných profilů hlav kolejnic

Opotřebením hlav kolejnic v obloucích malých poloměrů je trvalý problém, který se postupně zhoršuje jednak konstrukcí vozidel s pevnou vazbou dvojkolí v koleji, jednak také zhoršováním kontaktních podmínek mezi dvojkolím a kolejí (viz *Kap. 9.2*) používáním nevhodných tvarů příčných profilů hlav kolejnic a jízdních obrysů kol.



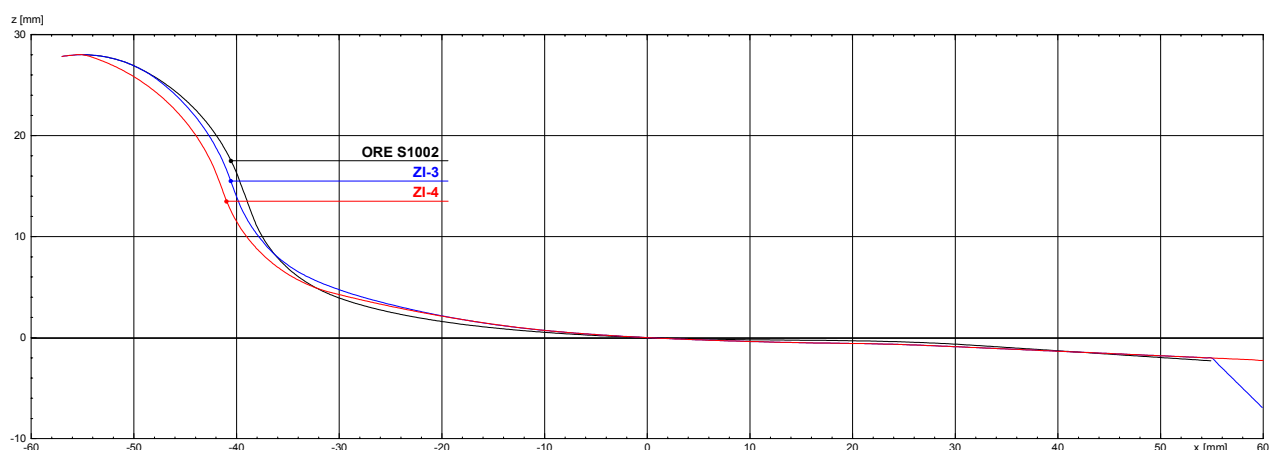
Z toho důvodu se již delší dobu v Evropě (Rakousko, Švýcarsko, Švédsko, Norsko) zkoumá možnost využití upravených příčných profilů hlav kolejnic právě do oblouků malých poloměrů [28], [42]. Výsledné tvary speciálních příčných profilů hlav kolejnic nejsou ovšem žádným způsobem sjednoceny, normalizovány či standardizovány. Jejich návrh, aplikace a zkušenosti s nimi jsou proto vázány na příslušného správce dopravní cesty. V podmínkách České republiky se v současné době používají pouze standardní kolejnice s normalizovaným tvarem hlav kolejnic [36], [29]. Problematika návrhu speciálních příčných profilů hlav kolejnic pro podmínky oblouků malých poloměrů je proto náplní této práce (viz *Kap.8*).

Vzájemná poloha kontaktu hlavy kolejnice a jízdního obrysu kola dvojkolí je kromě tvaru hlav kolejnic určována ještě úklonem kolejnic, rozchodem koleje, konstrukcí a parametry upevnění kolejnic [23].

## 4.2. Vozidla

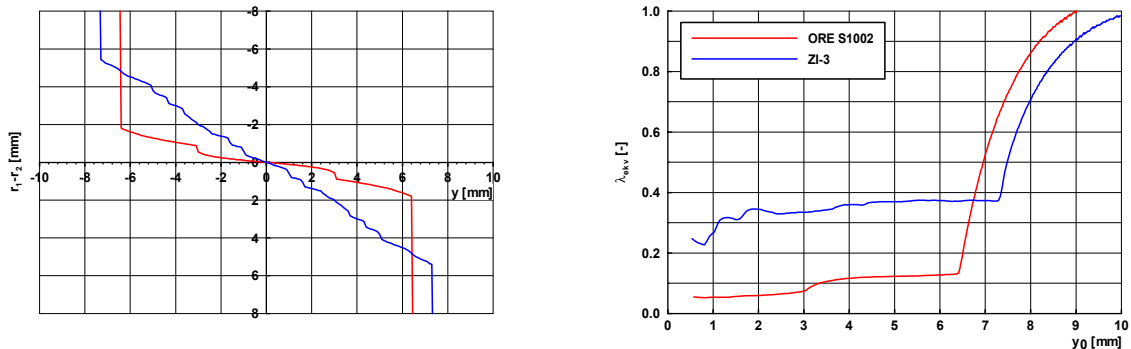
Na železniční síti je provozováno velké množství vozidel různých typů a konstrukcí pojezdové části [5], [7], která má rozhodující vliv na vodící vlastnosti celého vozidla. Podrobnější popis nepoužívanějších typů pojezdů vozidel je v *Kap. 6.2.2*.

Podobně jako je u dopravní cesty důležitý příčný profil hlavy kolejnice a rozchod koleje, je u vozidel klíčovým parametrem z hlediska kontaktních poměrů dvojkolí-kolej tvar jízdního obrysu kola, poloměry kol a hodnoty rozkolí. Tvary jízdních obrysů kol prošly vývojem a to od válcových přes kuželové až po dnes používané typy křivkové, které nejčastěji vychází z provozně opotřebených tvarů jízdních obrysů kol [19]. Srovnání jízdních obrysů kol, které jsou používány v České republice [45] je na *Obr. 6*.



**Obr. 6** Tvary používaných teoretických jízdních obrysů kol

Zlepšení kontaktních poměrů dvojkolí-kolej zavedením upravených tvarů jízdních obrysů kol (např. jízdní obrys ZI-3 [33]) pro oblasti provozu vozidel s velkým výskytem obloukovitých úseků je také možné a používá se [17], je však v případě jízdního obrysu ZI-3 omezeno na typy vozidel s pevným vedením dvojkolí a nižší maximální rychlosti z důvodu možnosti výskytu nestabilního chodu v přímé koleji (Kombinace tvaru běžných příčných profilů hlav kolejnic s jízdním obrysem ZI-3 vykazují vyšší hodnotu ekvivalentní konicity dvojkolí-kolej, viz Obr. 7).



**Obr. 7** Změny funkce  $\Delta r$  a  $\lambda_{ekv}$  pro kombinace 60E2 - ORE S1002 a 60E2 - ZI-3



## 5. PROBLEMATIKA PRŮJEZDU VOZIDLA OBLOUKEM

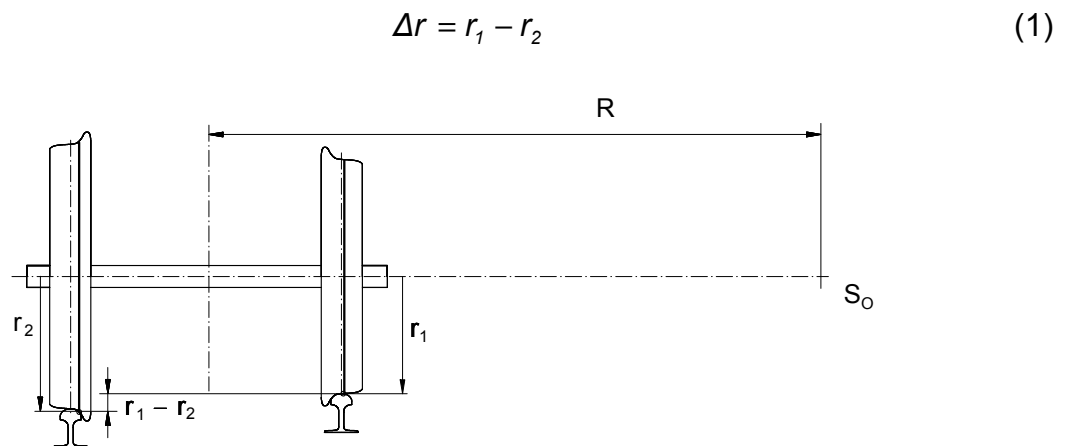
### 5.1. Charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí-kolej

Pokud se v rámci zjednodušení uvažuje:

- dvojkolí i kolej jako tuhá tělesa [31],
- kolej bez směrových a výškových odchylek polohy,
- neexistence skluzů v kontaktu kola s kolejnicí,

Ize pohyb volného dvojkolí v přímé koleji popsat charakteristikami kontaktní geometrie dvojkolí-kolej. Charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí-kolej jsou [8], [32]:

- Funkce  $\Delta r$  - vyjadřuje závislost velikosti rozdílu poloměrů okamžitých valivých kružnic levého a pravého kola (poloměry jsou dány polohou bodů dotyku na jízdním obrysu kol) na příčném posunutí dvojkolí ve volném kanálu koleje (viz Obr. 8).

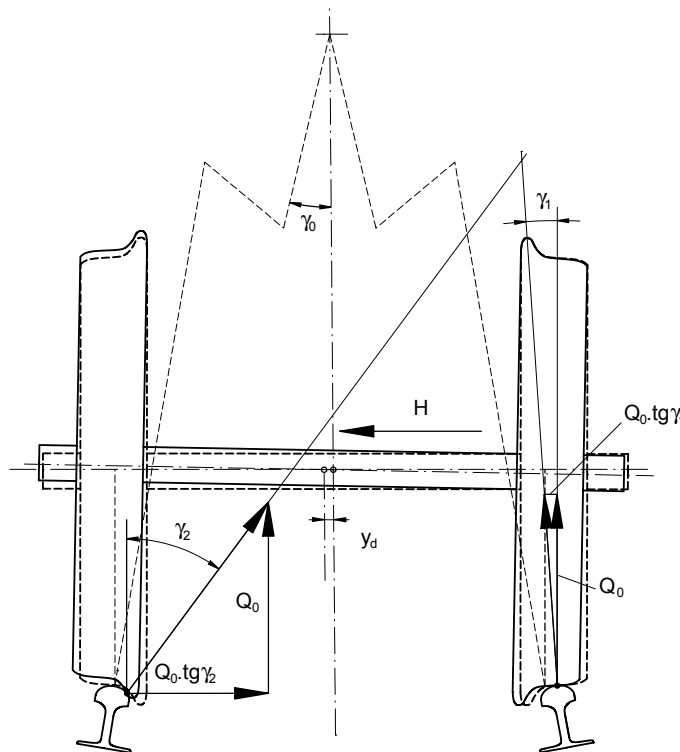


**Obr. 8** Poloměry valivých kružnic jednotlivých kol při příčném posunutí dvojkolí ve volném kanálu koleje v oblouku

- Funkce  $\tan \gamma$  - vyjadřuje intenzitu příčné silové vazby dvojkolí ke koleji pomocí rozdílu úhlů dotykových rovin v kontaktu kola a kolejnice (viz Obr. 9). Tato vazba tvoří pružnou vazbu dvojkolí ke koleji v příčném směru. Při jízdě obloukem vytváří takové vodící účinky, že kolo nevyčerpá zcela vůli dvojkolí ve volném kanálu koleje a úhel dotykové roviny s hlavou kolejnice nemá hodnotu úhlu maximálního sklonu okolku. Následkem toho reaguje dvojkolí na směrové odchylky vnějšího kolejnicového pásu podstatně menšími dynamickými silami. Tento příznivý účinek je při průjezdu dvojkolí obloukem ještě zesilován tím, že nabíhající kolo, u něhož je sklon dotykové plochy podstatně větší než je tomu u druhého kola téže nápravy (především u křivkového jízdního obrysu kola), je přitěžováno jednak účinkem klopného momentu od rámové síly  $H$ , jednak zvětšením svého valivého poloměru, které způsobí přitížení kola vlivem

deformace vypružení. Výsledkem je větší hodnota příčné složky normálové síly než vyplývá ze jmenovité kolové síly.

$$\tan \gamma = \operatorname{tg} \gamma_1 - \operatorname{tg} \gamma_2 \quad (2)$$



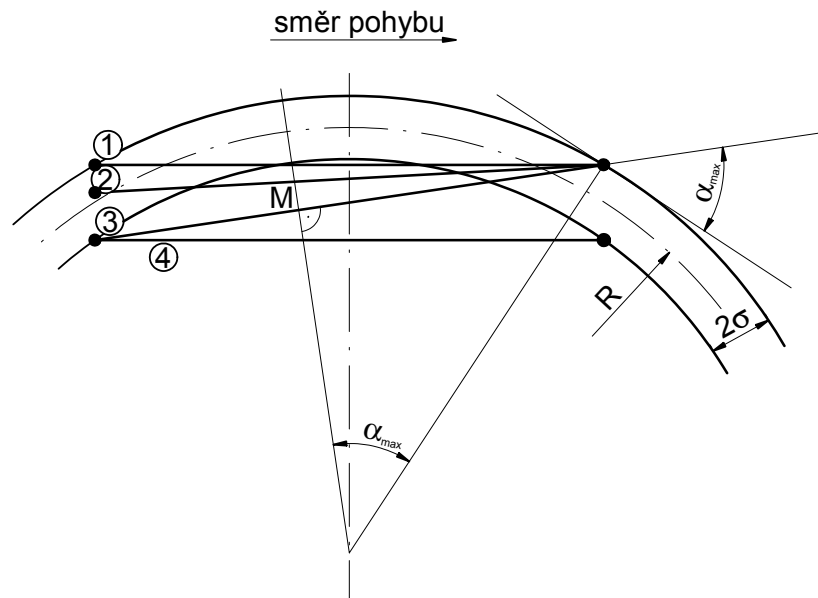
**Obr. 9** Úhly dotykových rovin kol s kolejnicí při příčném posunutí dvojkolí ve volném kanálu koleje v oblouku

- Ekvivalentní konicita ( $\lambda_{ekv}$ ) - veličina charakterizující periodický vlnivý pohyb volného dvojkolí s křivkovým jízdním obrysem v přímé koleji. Je funkcí amplitudy příčného pohybu dvojkolí v koleji. Veličina je důležitá při zkoušení vozidel s ohledem na stabilitu pohybu při vyšších rychlostech [37].

## 5.2. Postavení vozidla v oblouku koleje

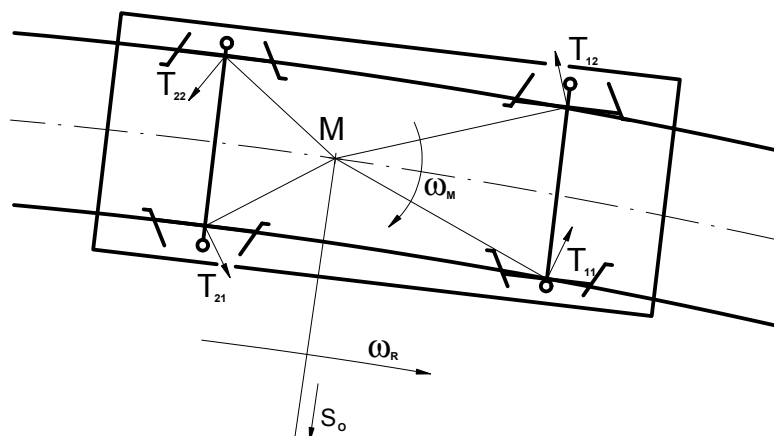
Při jízdě vozidla obloukem musí vozidlo vykonávat dva současně pohyby, jimiž si zachovává vzhledem k oblouku kvazistatickou polohu [1], [27]. Jsou to:

- postupný pohyb vozidla jako celku po kruhové dráze oblouku,
- rotační pohyb kolem středu otáčení vozidla. Střed otáčení  $M$  leží na patě kolmice spuštěné ze středu oblouku na podélnou osu vozidla. Na Obr. 10 představuje kolej v oblouku pás o šířce  $2\sigma$ , jehož šířka je rovna velikosti volného kanálu koleje. Vozidlo představuje úsečka ukončená dvěma body, které znázorňují dvojkolí.



**Obr. 10** Postavení dvounápravového vozidla v oblouku koleje

Vlivem rotačního pohybu vozidla kolem středu otáčení  $M$  vznikají v místech dotyku kol s hlavami kolejnic skluzové síly (třecí síly, viz Obr. 11), jejichž velikosti jsou úměrné relativním skluzům kol po kolejnicích. Tyto relativní skluzy jsou definovány pro podélný a příčný směr (vzhledem k ose dvojkolí) jako poměr skluzové rychlosti kola v příslušném směru a výsledné rychlosti dvojkolí (ve směru jízdy). Zmíněné třecí síly spolu s normálovými reakcemi kolejnice na kola v bodech vzájemného dotyku a vnějšími silami působícími na vozidlo (nevyrovnaná odstředivá síla, boční tlak větru, momenty a síly od sousedních vozidel) vytvářejí v rovině koleje kvazistatickou rovnováhu.



**Obr. 11** Působení skluzových sil na kola při průjezdu vozidla obloukem

Při jízdě obloukem dochází většinou na prvním dvojkolí vozidla ve směru jízdy k nalehnutí okolků vnějšího kola na vnější kolejnicový pás. Druhé dvojkolí vozidla potom zaujímá buď polohu mezi oběma kolejnicovými pásy – poloha vozidla statická (poloha 2)

nebo nabíhá na vnitřní kolejnicový pás - poloha vozidla vzpříčená (poloha 3) případně na vnější kolejnicový pás - poloha vozidla těživová (poloha 1).

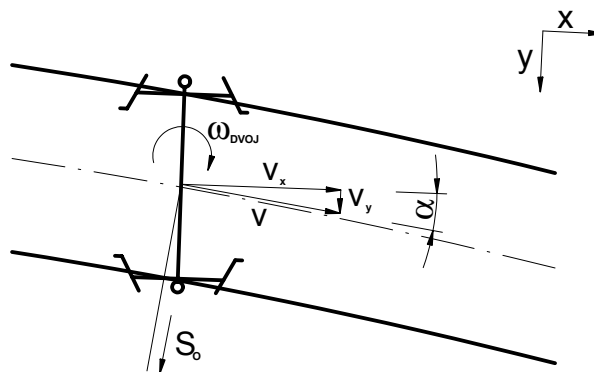
### 5.2.1. Příčný skluz

Příčný skluz mezi kolem a kolejnicí je v oblouku dán především úhlem náběhu dvojkolí  $\alpha$  (odchylka směru pohybu dvojkolí od tečny k vnější kolejnici v místě kontaktu, viz Obr. 12).

Velikost skluzové rychlosti a relativního skluzu v příčném směru jsou zjednodušeně vyjádřeny následovně:

$$\text{skluzová rychlost:} \quad v_y = v \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

$$\text{relativní skluz:} \quad \vartheta_y = \frac{v_y}{v} = \sin \alpha \quad (4)$$



**Obr. 12** Skluzová rychlost v příčném směru

Snížení úhlu náběhu lze částečně řešit tzv. rejdovnými dvojkolími [25], [21], jimiž je umožněna radiální stavitelnost ( $\alpha \rightarrow 0^\circ$ ) v oblouku konstrukcí vedení dvojkolí (podélně měkké vedení nebo vedení s vůlemi) a primárního vypružení (pojezd UIC517, podvozky DB65, LEILA). Využitelné skluzové síly u těchto typů pojezdů, které natáčejí dvojkolí do požadované radiální polohy, jsou určeny parametry kontaktu kola a kolejnice (jízdními obrysy kol dvojkolí, příčnými profily hlav kolejnic) a jejich výsledná velikost je dána tuhostmi ve vedení dvojkolí a rozměrovými parametry vozidla.

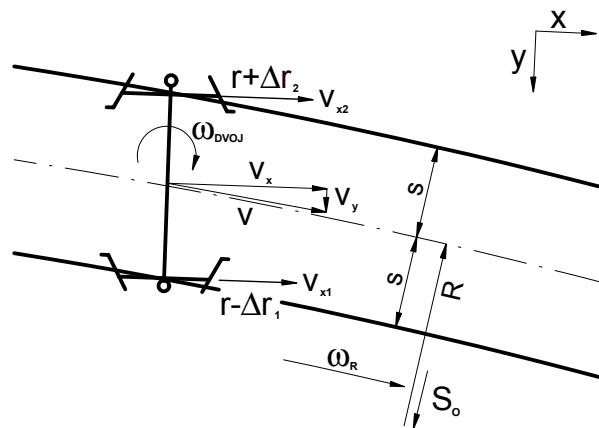
Výrazné změny vlastností vedení dvojkolí (především tuhost vedení dvojkolí v podélném směru) u již provozovaných osobních a nákladních vozů, které jsou z převážné většiny vybaveny dvounápravovými podvozky (v České republice jsou zastoupeny typy 26-2.8, Y25, Görlitz V, GP200, SGP300), za účelem sníženého silového působení při průjezdu oblouky malých poloměrů nejsou prakticky možné (velký počet vozidel, požadavek unifikace pojezdů nákladních vozů). Navíc při požadavku na stabilitu jízdy těchto vozidel při vyšších rychlostech na přímých úsecích tratí, kdy je nutná poměrně tuhá vazba dvojkolí k rámu podvozku v podélném směru, je zřejmé, že vázaná dvojkolí

v podvozku vždy zaujmou v oblouku koleje určitou polohu, která je odlišná od ideální polohy radiální, což vede k problémům v obloucích malých poloměrů.

Důležitou roli, kromě parametrů vedení dvojkolí, hraje také vazba podvozku ke skříni vozu. U uložení skříně na flexicoil pružinách je většinou již tak nevyhovující postavení prvního podvozku (resp. podvozkem pevně vedeného dvojkolí) navíc podporováno momentem odporu proti natáčení, kterým tyto pružiny neustále nutí podvozek k zaujímání vzpříčené polohy a tedy ke zvětšování úhlu náběhu.

### 5.2.2. Podélný skluz

Podélný skluz v dotykové ploše mezi kolem a kolejnicí je důsledkem nesplnění podmínky čistého odvalování kola po kolejnici, kterou lze vyjádřit rovností obvodové rychlosti na povrchu kola otáčejícího se dvojkolí a rychlosti jednotlivých kol, které vyplývají z postupného pohybu vozidla jako celku po kruhové dráze oblouku se středem  $S_0$  (viz (5), (6)).



Obr. 13 Skluzová rychlost v podélném směru

$$(R_0 + s) \cdot \omega_R = r_2 \cdot \omega_{DVOJ} \quad (5)$$

$$(R_0 - s) \cdot \omega_R = r_1 \cdot \omega_{DVOJ} \quad (6)$$

Velikosti skluzových rychlostí a relativních skluzů v podélném směru jsou pro jednotlivá kola zjednodušeně vyjádřeny následovně:

$$\text{skluzová rychlost kola 1: } v_{xskl1} = v_{x1} - r_1 \cdot \omega_{DVOJ} = v \cdot \left[ -\frac{s}{R} + \frac{\Delta r_1}{r} \right] \quad (7)$$

$$\text{skluzová rychlost kola 2: } v_{xskl2} = v_{x2} - r_2 \cdot \omega_{DVOJ} = v \cdot \left[ \frac{s}{R} - \frac{\Delta r_2}{r} \right] \quad (8)$$

$$\text{relativní skluz kola 1: } \vartheta_{x1} = \frac{v_{xskl1}}{v} = -\frac{s}{R} + \frac{\Delta r_1}{r} \quad (9)$$

$$\text{relativní skluz kola 2: } \vartheta_{x2} = \frac{v_{xskl2}}{v} = \frac{s}{R} - \frac{\Delta r_2}{r} \quad (10)$$

Úhlová rychlost otáčení kol dvojkolí  $\omega_{DVOJ}$  je u klasického dvojkolí s dvěma koly pevně spojenými torzně tuhou nápravou shodná pro obě kola.

Podmínka, kterou je nutné splnit pro dosažení čistého odvalování dvojkolí v oblouku koleje, je vyjádřena vztahem

$$[(R_0 + s) - (R_0 - s)] \cdot \omega_R = (r_2 - r_1) \cdot \omega_{DVOJ} \quad (11)$$

Rozdíl poloměrů kruhových drah oblouku (levá strana rovnice (11)) je dán především geometrií koleje, rozchodem koleje a jeho mezními úchylkami, a po výstavbě trati je minimálně ovlivnitelný. Naopak potřebného rozdílu poloměrů okamžitých valivých kružnic (pravá strana rovnice (11)) lze do jisté míry dosáhnout příčným posuvem dvojkolí ve volném kanálu koleje spolu s vhodně zvoleným jízdním obrysem kola a příčnými profily hlav kolejnic, které určí průběh funkce  $\Delta r$ . Tuto optimalizaci vodících vlastností vozidel v oblouku koleje změnou kontaktních poměrů mezi kolem a kolejnicí je ale nutné řešit s ohledem na silové působení mezi vozidlem a kolejí (Prud'homovo kritérium) a s ohledem na jízdni vlastnosti vozidla v přímé koleji, zejména pak na již zmiňovanou stabilitu chodu vozidla [9], [11], [26], [37].

## 6. PROSTŘEDKY A NÁSTROJE POUŽITÉ PŘI ŘEŠENÍ PRÁCE

Práce je řešena jak v rovině teoretické (návrh speciálních příčných profilů hlav kolejnic), tak v rovině experimentální (sběr dat pro simulační výpočty, sledování vývoje vybraných parametrů koleje ve zkušebním úseku). Pro její řešení bylo proto nutné použití následujících prostředků.

### 6.1. Simulační výpočty jízdy kolejových vozidel

Vyšetřování jízdních vlastností vozidel je založeno na použití simulačních výpočtů modelujících jízdu vozidla při libovolné kombinaci vstupních veličin. Umožňují tedy, s určitým vědomím zjednodušení reálných podmínek, odhadnout chování vozidla ještě před uvedením do provozu. V posledních desetiletích dochází s rozvojem techniky k velkému rozmachu výpočtových metod, které jsou levnější než následné zkoušky. Je zřejmé, že bez jakékoliv validace modelu zkouškou, jsou získané závěry bezcenné. Nutnost přiblížení se reálným podmínkám proto vede k situaci, kdy jsou jako vstupy do simulačních výpočtů používány kromě teoretických dat především data měřená, která se mnohdy výrazně odlišují od dat teoretických a podstatným způsobem mohou ovlivnit získané závěry (viz *Kap. 7*).

V současné době je na trhu mnoho komerčních produktů různých výrobců, které umožňují simulaci jízdy kolejových vozidel (SIMPACT, ADAMS/Rail, Vampire, MEDYNA). Komerční software nabízí díky jeho filozofii dokoupení velkého počtu balíčků, pomocí nichž je možné řešit i související problémy (pevnostní analýzy, frekvenční analýza, řízení, LCC). Jistou nevýhodou je ale nemožnost důkladné kontroly procesu výpočtu, což je při odlaďování programu velmi důležité.

Na dislokovaném pracovišti Dopravní fakulty Jana Pernera je dlouhodobě vyvíjen systém simulace jízdy kolejového vozidla (dále jen SJKV), který je řešen v programovacím jazyku Delphi. Porovnání výsledků s komerčními produkty bylo provedeno např. v [24], porovnání s výsledky měření např. v [20]. K řešení této práce bylo použito výhradně systému SJKV. Pro výpočty byly použity již existující modely vozidel, u nichž byly příslušné části programu patřičně upraveny podle potřeb jednotlivých cílů práce (např. výpočet velikosti dotykové plochy, výpočet charakteristik kontaktní geometrie dvojkolí-kolej se zohledněním podélné křivosti kolejnice, možnost modelování proměnlivých kontaktních podmínek během simulace, modelování procesu brzdění a mazání hlav kolejnic).

### 6.1.1. Struktura a filozofie systému SJKV

Systém SJKV je možné rozdělit podle funkce na následující části:

- Vstupní data. Část, ve které jsou definovány:
  - Rychlost jízdy vozidla.
  - Popis vozidla (hmotnostní a rozměrové parametry, data charakteristik pružných a tlumicích vazeb).
  - Trasování koleje a geometrické parametry koleje (odchyly od teoretického trasování).
  - Charakteristiky kontaktu kolo-kolejnice, resp. dvojkolí-kolej.
- Vlastní program, který je složen ze základních jednotek (podprogramů):
  - Kontakt kolo-kolejnice.
  - Relativní skluzy.
  - Adheze.
  - Deformace vazeb.
  - Síly ve vazbách.
  - Vodicí síly.
  - Kolové síly.
  - Zrychlení.
  - Řešení diferenciálních rovnic (metoda konečných diferencí).
  - Výstupní fronta vozu.
- Programy pro další zpracování dat (filtrace, statistika, grafické výstupy).

### 6.1.2. Stručný popis modelu jednotlivých částí systému SJKV

Dynamický model systému vozidlo-kolej je tvořen následovně:

- Kolej tvoří redukovaná hmotnost kolejnice a pražce pod každý kolem svisle i příčně odpružená lineární vazbou s lineárním viskózním tlumením. Jmenovitá poloha jednotlivých prvků je určena teoretickým trasováním koleje, měřenými svislými a příčnými odchylkami polohy (nerovnostmi, které se superponují na teoretickou polohu koleje) a dynamickými odchylkami, vznikajícími účinkem sil  $Y$  a  $Q$  během simulace. Parametry modelu byly převzaty ze zahraničí.
- Vozidlo je modelováno jako soustava tuhých těles vzájemně vázaných pružnými nebo kinematickými vazbami, jejichž charakteristiky jsou většinou získány měřením.



- Dvojkolí-kolej. Geometrická vazba obou těchto prvků je při simulaci určena předem vypočteným souborem hodnot funkcí  $\Delta r$  a  $\tan \gamma$  a vypočtenými polohami bodů dotyku kolo-kolejnice v závislosti na příčném posunutí dvojkolí ve volném kanálu koleje, zadaném tvaru příčných profilů hlav kolejnic a tvaru jízdních obrysů kol. Adhezní vazba je modelována skluzovými součiniteli v podélném a příčném směru na základě okamžitých hodnot relativních skluzů v podélném a příčném směru a spinu při okamžité hodnotě kolové síly a daném maximálně dosažitelném součiniteli adheze (V zahraničí uváděn jako model doc. Polácha [21]). Velikost dotykové plochy je určována podle Hertzovy teorie.

## 6.2. Měřicí technika

### 6.2.1. Vstupní údaje o koleji

K podrobnému popisu stavu koleje v simulačních výpočtech je třeba získat údaje o:

- geometrických parametrech koleje (rozchod, převýšení a zborcení koleje, odchylky směru a výšky jednotlivých kolejnicových pásů a osy koleje),
- mikrogeometrii hlavy kolejnice v podélném směru,
- údaje o stavu tvaru příčných profilů hlav kolejnic.

Potřebná data byla získána z měřicího vozu TÚDC i vlastním měřením.

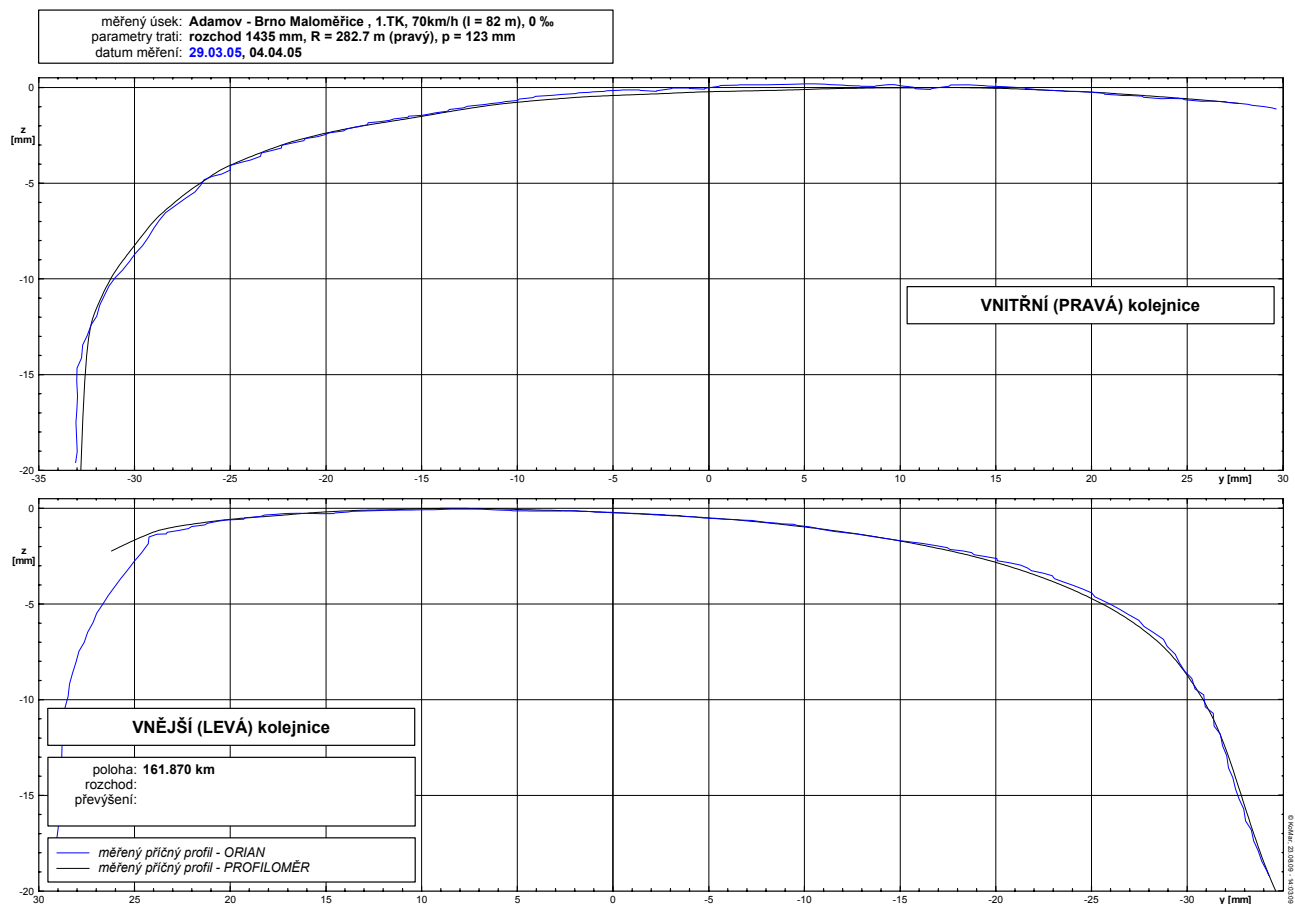
Data o geometrických parametrech koleje jsou získávána z měřicího vozu TÚDC. Data ve formě měřených signálů jsou filtrována s dolní vlnovou délkou 1 metr. Horní mez filtru (typ pásmová propust) je stanovena odlišně pro každou měřenou veličinu [43].

Průběh vlnkovitosti (vlnová délka 3÷30 cm) není možné získat z měřicího vozu TÚDC ve formě měřeného signálu, neboť data jsou ukládána pouze jako hodnoty směrodatných odchylek měnící se svislé polohy kontaktu příslušného kola s temenem vlnkovité kolejnice na ujeté dráze 20 metrů (viz *Kap. 9.4*). Pro simulaci vlnkovitosti proto byla provedena měření kontaktním měřicím systémem KOLOBĚŽKA fy KŽV Praha, který umožňuje záznam průběhu vlnkovitosti ve vlnové délce 1÷30 cm.

K měření tvaru příčných profilů hlav kolejnic je na měřicím voze TÚDC používán optický systém ORIAN. Přesnost měření tvaru hlavy kolejnice je 0.25÷0.30 mm. Systém ORIAN sice umožňuje sběr velkého množství dat za jízdy (krok snímání tvaru kolejnice je 5 m), pro výzkumné účely jsou však data z důvodu dosažitelné přesnosti měření a problémů při bezkontaktním snímání kolejnic obtížně použitelné [16].

Pro dostatečně přesné stanovení tvaru příčných profilů hlav kolejnic i jízdních obrysů kol bylo využito měření kontaktním způsobem zařízením PROFILOMĚR fy KŽV s.r.o. Praha, který umožňuje dosáhnout přesnosti měření  $\pm 0.05$  mm. Metodika měření a vyhodnocení vývoje opotřebení příčných profilů hlav kolejnic ve sledovaných obloucích

kontaktním měřícím systémem PROFILOMĚR byla také konfrontována s bezkontaktním měřením tvaru kolejnic systémem ORIAN umístěným na měřícím voze (viz Obr. 14).



**Obr. 14** Porovnání naměřených dat ze systému PROFILOMĚR a ORIAN

### 6.2.2. Vstupní údaje o vozidle

U vozidel není možné jednoduchým způsobem získat potřebná data o geometrii či o parametrech pružicích či tlumicích prvků. Pro simulace proto byla data převzata z dřívějších výzkumů. Měřena byla ovšem dvojkolí vybraných vozidel, u kterých byl zjišťován průměr kol, rozkolí a tvar jízdních obrysů kol. Tato měření byla prováděna kontaktním snímáním přístrojem PROFILOMĚR a tyčovým měřidlem rozkolí.

## 7. VSTUPNÍ DATA POUŽITÁ V SIMULAČNÍCH VÝPOČTECH

Vzhledem k rozsahu možných kombinací stavu koleje a vozidel, které mohou v železničním provozu nastat, bylo rozhodnuto použít jen ty kombinace, které jsou běžné ve sledovaném úseku trati Brno-Adamov (experimentální část práce).

Teoretická část práce, kterou je především analýza vodících vlastností vozidel při návrhu speciálních příčných profilů hlav kolejnic, byla provedena v podmínkách kvazistatického průjezdu vozidel teoretickým obloukem (bez svislých a příčných nerovností koleje) malého poloměru.

Experimentální část práce, která je ale úzce propojena s teoretickou částí, byla zaměřena na sběr dat o stavu prvků ovlivňujících charakteristiku kontaktní geometrie dvojkolí-kolej při návrhu i po provedeném broušení speciálních příčných profilů hlav kolejnic ve sledovaném úseku.

### 7.1. Kolej

#### 7.1.1. Trasování

Kolej je definována v simulačních výpočtech teoretickým trasováním koleje, směrovými odchylkami od teoretické polohy (výsledky měření geometrických parametrů koleje) a příčnými profily hlav kolejnic.

Minimální poloměr oblouku ve sledovaném traťovém úseku je 260.5 m. Vzhledem ke skutečnosti, že jsou jízdní zkoušky vozidel prováděny až do minimálního poloměru oblouku 250 m, byl v simulačních výpočtech používán právě poloměr 250 m. Z důvodu možnosti snadného porovnávání všech výsledků simulačních výpočtů byla pokud možno dodržena shodná orientace oblouku (pravý oblouk).

Teoretické trasování koleje je následující:

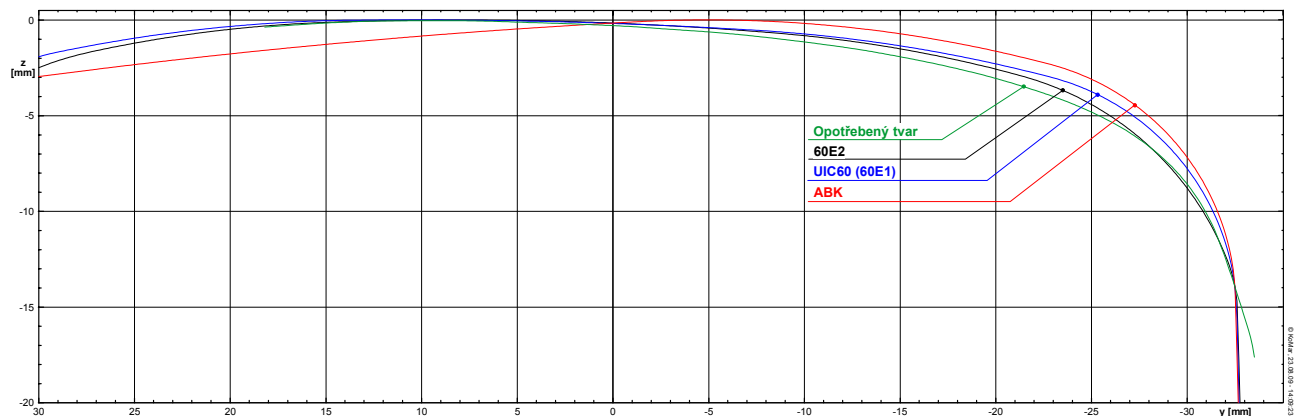
- Délka plného oblouku byla zvolena s ohledem na kvazistatické vyšetřování vodících vlastností jednotlivých vozidel při návrhu speciálních příčných profilů hlav kolejnic na 100 m.
- Převýšení bylo zvoleno 133 mm. Požadavku velikosti nedostatku převýšení byla přizpůsobena rychlost průjezdu vozidel obloukem (viz *Kap. 8.6*).

Pro simulační výpočty jízdy s nerovnostmi koleje (viz *Kap. 10.2*) byla použita data z měřicího vozu TÚDC z příslušné měřicí jízdy v 2.TK v úseku Brno-Adamov.

#### 7.1.2. Příčné profily hlav kolejnic a rozchod koleje

Nejdůležitějším vstupem byly informace o tvaru příčných profilů hlav kolejnic a rozchodu koleje. Použitý teoretický příčný profil 60E2 (v práci se používá také dřívější označení UIC60E2 lots136 12.99) je běžně používaným tvarem kolejnice [36], [29] a byl

použit se jmenovitým rozchodem koleje 1435 mm. Pro simulaci vodících vlastností za podmínek rozšířeného rozchodu koleje 1450 mm (v obloucích malých poloměrů je tato hodnota z důvodu intenzivního opotřebování vnější kolejnice běžná (viz *Kap. 9.4*), ale ještě umožňuje přebroušení [40] do původního tvaru příčných profilů hlav kolejnic) byl vytvořen průměrovaný opotřebovaný příčný profil hlavy vnější (označován jako PPL) a vnitřní (označován jako PPP) kolejnice z velkého počtu měření provedených v obloucích různých poloměrů, s různými tvary hlav kolejnic, na hlavních i vedlejších tratích (viz *Přílohu 2.3, List 7*). Porovnání všech příčných profilů hlav kolejnic zmiňovaných v práci je na *Obr. 15*.



**Obr. 15** Porovnání tvaru příčných profilů hlav kolejnic

Z obrázku je zřejmé, že navržený speciální příčný profil hlavy vnější kolejnice (označován jako ABK) je výrazně vypuklý v oblasti pojížděné hrany kolejnice, což koresponduje s filozofií speciálních příčných profilů hlav kolejnic (viz *Kap. 8.3*), u nichž je poloha možného kontaktu kola s vnější kolejnicí až do postupného opotřebování držena co nejblíže osy koleje.

## 7.2. Vozidla

Vozidla použitá v simulačních výpočtech (viz *Tab. 1, str. 30*) lze rozdělit na nákladní vozy a osobní vozy. Další členění je především podle konstrukce pojezdové části. Rozměrové a hmotnostní parametry, jakož i charakteristiky vazeb vychází z prací řešených v minulosti na dislokovaném pracovišti ([9], [10], [11], [35]).

### 7.2.1. Konstrukce pojezdové části osobních vozů

- GP200. Skříň vozu je uložena na odpruženém příčniku (kolébka) na kluznicích. Kolébka se opírá o pružiny sekundárního vypružení tvořeného šroubovitými válcovými pružinami, které jsou uloženy na nosiči vypružení. Nosič vypružení tvoří pod rámem podvozku uzavřený rám, který je na vlastním rámu podvozku zavěšen prostřednictvím dlouhých šikmo orientovaných závěsů. Kolébka, do níž zasahuje ze skříňe vozu svislý otočný čep, je spojena s rámem podvozku v podélném směru dvojicí podélných ojnic s pryží odpruženými klouby. Prvotní vypružení tvoří šroubovitě válcové pružiny.

Vedení dvojkolí zajišťují jednoduché široké pásy ze sklolaminátu. Toto vedení se vyznačuje velmi vysokou podélnou i příčnou tuhostí vazby dvojkolí k rámu podvozku. K tlumení svislého prvotního i druhotného vypružení a příčného vypružení je použito hydraulických tlumičů. Vozidlo umožňuje jízdu až do nedostatku převýšení 130 mm.

- SGP300. Skříň vozu je uložena na příčniku prostřednictvím kluznic. Tento příčník se opírá o sekundární vypružení tvořené šroubovitými válcovými pružinami, které plní kromě funkce svislého vypružení i funkci příčného vypružení svou příčnou poddajností (flexicoil). Sekundární vypružení je uloženo přímo na konzolách rámu podvozku. Přenos podélných sil mezi podvozkem a skříň se uskutečňuje přes otočný čep skříně vozu zasahujícího do výše zmíněného příčniku a přes čtyři podélné ojnice umístěné po stranách rámu podvozku. Prvotní svislé vypružení tvoří šroubovitě válcové pružiny uložené z obou stran ložiskové skříně. Vedení dvojkolí zajišťují svislé vodící čepy vedené kluzně v pouzdrech umístěných uprostřed pružin v konzolách ložiskové skříně přes válcová pryžová pouzdra. Pryžová pouzdra svým tvarem vytvářejí rozdílnou vazbu dvojkolí ve směru podélném a příčném tak, že v podélném směru je tato vazba podstatně tužší. V obou stupních vypružení jsou použity hydraulické tlumiče. Mezi rámem podvozku a odpruženým příčníkem jsou umístěny příčné vodorovné hydraulické tlumiče. Pohyb odpruženého příčniku vůči rámu podvozku je po vyčerpání vůle 25 mm v příčném směru omezen pružnou nárazkou. Vozidlo umožňuje jízdu až do nedostatku převýšení 130 mm.
- 680. Skříň vozu je pevně spojena s nosičem naklápěcího zařízení. Nosič je pak pomocí dlouhých šikmých závěsů, umožňujících využití hydraulického systému naklápění vozidlové skříně, zavěšen na kolébku podvozku. Kolébka je uložena na hlavní rám pomocí čtyř skupin flexicoil šroubovitých válcových pružin. Vedení dvojkolí je pomocí dvojice ojnicek uspořádaných do antiparalelogramu, což zajišťuje poměrně tuhé podélné vedení dvojkolí. Primární vypružení je tvořeno dvojicemi šroubovitých válcových pružin. Primární i sekundární vypružení je doplněno hydraulickými tlumiči. Pneumatické příčné vypružení je kombinované s funkcí středění vozidlové skříně při naklápění. Vozidlo je vybaveno podélnými tlumiči vrtivých pohybů KONI. Vozidlo umožňuje jízdu až do nedostatku převýšení 270 mm.

### 7.2.2. Konstrukce pojezdové části nákladních vozů

- Y25. Podvozek tvoří dva podélníky, příčník a čelníky, které slouží k uchycení zdržové brzdy. Primární vypružení je tvořeno na každé ložiskové skříni dvojicí duplexních pružin s lomenou charakteristikou ve svislém směru. Pružiny tvoří zároveň také příčné vypružení. Tlumení je třecí (systém Lenoir) a jeho

charakteristika je závislá na svislém zatížení poloviny primárního vypružení. Třecí tlumič je společný pro příčný i svislý směr. V podélném směru je možnost pohybu dvojkolí po překonání sil vyvozených třecím tlumičem 4 mm a to pouze v jednom směru. V příčném směru je vůle 10 mm.

- DB65. Podvozek je tvořen dvěma mohutnými podélníky, které jsou v oblasti kol zdvojené, a středním příčným skříňového průřezu. Vedení dvojkolí je rozsochové s podélnými vůlemi  $\pm 6$  mm a příčnou vůlí 23 mm. Tyto vůle ve vedení dvojkolí spolu s nízkou podélnou tuhostí umožňují zcela eliminovat úhel náběhu dvojkolí a v příčném směru omezit nárazy ložiskové skříně na rozsochu. Primární vypružení tvoří čtyři parabolické pružnice s lomenou charakteristikou a nízkou, provozně stálou hysterezí. Pružicí i tlumicí parametry vazby dvojkolí k rámu podvozku ovlivňují také dlouhé hraníkové závěsy uložené v sedlech hraníků. Výsledná tuhost svislé a podélné vazby dvojkolí k rámu podvozku je závislá na zatížení vozu (ovlivněno natáčením hraníkových závěsů).
- UIC517. Vedení dvojkolí u tohoto typu pojezdu pro dvounápravové nákladní vozy je rozsochové s podélnými i příčnými vůlemi  $\pm 20$  mm. Charakteristika příčné tuhosti je lomená v závislosti na příčném pohybu ložiskové skříně. Výsledná tuhost svislé a podélné vazby dvojkolí ke skříně vozu je závislá na zatížení vozu (ovlivněno natáčením závěsek). Vypružení tvoří trapézové (použité při simulaci) nebo parabolické pružnice. Charakteristiky třecího tlumení jsou závislé na typu pružnice.

### 7.2.3. Hmotnostní a rozměrové parametry vozidel

Základní hmotnostní a rozměrové parametry vozidel používaných v simulačních výpočtech jsou shrnuty v *Tab. 1*.

**Tab. 1** Základní parametry vozidel použitých v simulačních výpočtech

|                                | 680    | GP200  | SGP300 | Y25    | DB65   | UIC517 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Poloměr kol [m]                | 0.445  | 0.46   | 0.46   | 0.46   | 0.46   | 0.46   |
| Rozvor podvozku [m]            | 2.7    | 2.6    | 2.5    | 1.8    | 1.8    | -      |
| Vzdálenost otočných čepů [m]   | 19.0   | 19.0   | 19.0   | 14.2   | 14.2   | 8.0    |
| Celková hmotnost – prázdný [t] | 60 328 | 40 578 | 51 158 | 26 700 | 26 246 | 10 745 |
| Celková hmotnost – ložený [t]  | -      | -      | -      | 90 000 | 89 996 | 42 948 |

### 7.2.4. Parametry dvojkolí

Nejdůležitějšími údaji z pohledu vodicích vlastností vozidel jsou informace o tvaru jízdnicích obrysů kol a o velikosti rozkolí. Použité teoretické jízdnicí obrysy kol, včetně provozních tolerancí, jsou definovány v předpisech ČD [45].

Aby bylo možné provést výpočty také pro opotřebené jízdní obrysy kol, byla provedena měření rozkolí, průměrů kol a jízdních obrysů kol osobních vozů s jízdním obrysem ZI-3 (podvozek GP200), ORE S1002 (vložené vozy jednotky 680, měřicí vůz s podvozkem GP200) a nákladních vozů s jízdním obrysem ORE S1002 (různé typy nákladních vozů, většinou však s podvozkem Y25). Výsledky měření jsou v *Příloze 1*, kde je uvedeno porovnání opotřebení jednotlivých měřených jízdních obrysů kol a porovnání změn tvaru vzhledem k teoretickému jízdnímu obrysu.

Z analýzy výsledků naměřených jízdních obrysů kol je z hlediska opotřebení možné konstatovat:

- Opotřebený jízdní obrys ORE S1002 (označován jako POREN) u různých typů měřených nákladních vozů s různými typy podvozků (většinou čtyřnápravové vozy s podvozkem Y25) vykazuje poměrně rovnoměrné opotřebení v oblasti jízdní plochy do vzdálenosti cca 25 mm vně od styčné kružnice. Dále od tohoto místa (místo přechodu křivkové části jízdního obrysu kola do tvaru kužele 1:15) je pak již opotřebení minimální. V oblasti okolku je opotřebení téměř trojnásobné. Je tedy zřejmé, že proces opotřebování jízdních obrysů kol je dominantní právě v obloucích a je třeba jej minimalizovat. Sklon okolku se snížil na hodnotu cca 68°. Změna tvaru jízdního obrysu kola vzhledem k teoretickému tvaru je nejvýraznější v oblasti okolku.
- Opotřebený jízdní obrys ORE S1002 (označován jako POREO) u různých typů měřených osobních vozů s různými typy podvozků (GP200, 680) vykazuje nejmenší opotřebení v oblasti přechodové části z okolku do jízdní plochy, což poukazuje na charakter provozu na tratích s minimálním zastoupením oblouků. Nepatrně větší opotřebení je v oblasti vně od styčné kružnice, což je dáno tvarem teoretického jízdního obrysu kola. Opotřebení okolku není tak výrazné jako u nákladních vozů, sklon okolku 70° zůstal zachován. Změna tvaru jízdního obrysu kola vzhledem k teoretickému tvaru je znatelná pouze v oblasti okolku.
- Opotřebený jízdní obrys ZI-3 (označován jako PZI3O) u měřených osobních vozů s podvozkem GP200 vykazuje rovnoměrné opotřebení v celé šíři jízdního obrysu. Změna tvaru jízdního obrysu kola vzhledem k teoretickému tvaru je znatelná pouze v oblasti okolku.

Hodnocení změn tvaru a opotřebení jednotlivých jízdních obrysů kol není možné posuzovat absolutně, neboť chybí informace o kilometrickém proběhu vozů. Naměřená data náhodně vybraných vozů však slouží k vytvoření představy o rozdílnosti vstupních dat teoretických a reálných. Z dřívějšího výzkumu je navíc zřejmé, že k zásadní změně tvaru jízdních obrysů kol může dojít po relativně krátké době [12]. Další vývoj změny tvaru je pozvolný, omezený většinou pouze dosažením mezní hodnoty výšky či šířky okolku.

## 8. TEORETICKÝ NÁVRH SPECIÁLNÍCH PŘÍČNÝCH PROFILŮ HLAV KOLEJNIC

V přímých úsecích trati se u vozidel podařilo zavedením „opotřebovaných“ jízdních obrysů kol, tlumičů vrtivých pohybů podvozek-skříň a naladěním podélné a příčné tuhosti ve vedení dvojkolí dosáhnout výborných jízdních vlastností vozidel i při vysokých rychlostech jízdy.

V obloucích malých poloměrů ovšem podélně tuhé vedení dvojkolí v rámu podvozku spolu s nízkou hodnotou ekvivalentní konicity dvojkolí-kolej (dané malou strmostí funkce  $\Delta r$ ) pro kombinaci běžně používaných jízdních obrysů kol (ORE S1002) a příčných profilů hlav kolejnic (60E2) vede k intenzivnímu opotřebování vnitřní hrany hlavy vnějšího kolejnicového pásu (způsobeno kombinací vyčerpání volného kanálu koleje, úhlu náběhu a předstihu dotykového bodu na okolku) a tvorbě vlnovitosti na vnitřním kolejnicovém pásu. Některé evropské železnice (Rakousko, Norsko) se proto pomocí speciálních příčných profilů hlav kolejnic (v literatuře označovaných někdy jako tzv. asymetrické) pokouší o změnu kontaktních podmínek mezi dvojkolím a kolejí úpravou tvaru příčných profilů hlav kolejnic za účelem zlepšení vodících vlastností vozidel. Výsledkem zlepšení průjezdu vozidla obloukem by tak mělo být především snížení úhlu náběhu (v případě, že to dovoluje konstrukce pojezdu) a snížení vodících sil plynoucích z interakce vozidla a koleje [42], což by mělo vést ke snížení opotřebování kolejnic.

V obloucích malých poloměrů (250÷300 m) je pro prosté odvalování volného dvojkolí nutné dosažení hodnoty funkce  $\Delta r$  2.3÷2.8 mm.

### 8.1. Nabíhající dvojkolí

U nabíhajících dvojkolí (vázaných v rámu podvozku či pojezdu) je ale nutné pro zaujmutí radiální polohy nebo alespoň snížení úhlu náběhu pomocí působení podélných skluzových sil v kontaktu kolo-kolejnice v závislosti na tuhosti vedení dvojkolí větší potřebný rozdíl poloměrů valivých kružnic. Potřebný rozdíl poloměrů je možný pouze při dostatečné strmosti funkce  $\Delta r$  a odpovídajícím příčným posunutí nabíhajících dvojkolí ve volném kanálu koleje. Pokud je ovšem vedení dvojkolí v rámu podvozku v podélném směru velmi tuhé, není možné pomocí skluzových sil téměř vůbec ovlivnit změnu úhlu náběhu dvojkolí a podélné skluzové síly pouze zvyšují opotřebování jízdních obrysů nabíhajících kol i příčných profilů hlav kolejnic.

Pro rychlost a velikost opotřebování nabíhajících kol a hlavy vnější kolejnice je důležitá také velikost předstihu bodu dotyku na okolku při většinou nevyhnutelném dvoubodovém kontaktu kola s vnější kolejnicí, která kromě úhlu náběhu závisí právě na tvarech jízdních obrysů kol i příčných profilů hlav kolejnic (viz *Kap. 8.7.2*).



## 8.2. Nenabíhající dvojkolí

Jiná situace je u nenabíhajících dvojkolí, která většinou zaujmají v koleji statickou polohu s malým příčným posunem dvojkolí ve volném kanálu koleje a s malým úhlem náběhu. Problémem u těchto dvojkolí je ale nedostatečná hodnota funkce  $\Delta r$  právě z důvodu malého příčného posunutí ve volném kanálu koleje, která je poté příčinou dosažení vysokých hodnot podélných skluzových sil. I zde je možné pomocí vhodného tvaru jízdnicích obrysů kol a příčných profilů hlav kolejnic zlepšit průběh funkce  $\Delta r$  (nenulová hodnota funkce  $\Delta r$  již při nulovém příčném posunutí dvojkolí v koleji), což může vést ke snížení podélných skluzových sil a tedy i rychlosti nárůstu vlnkovitosti.

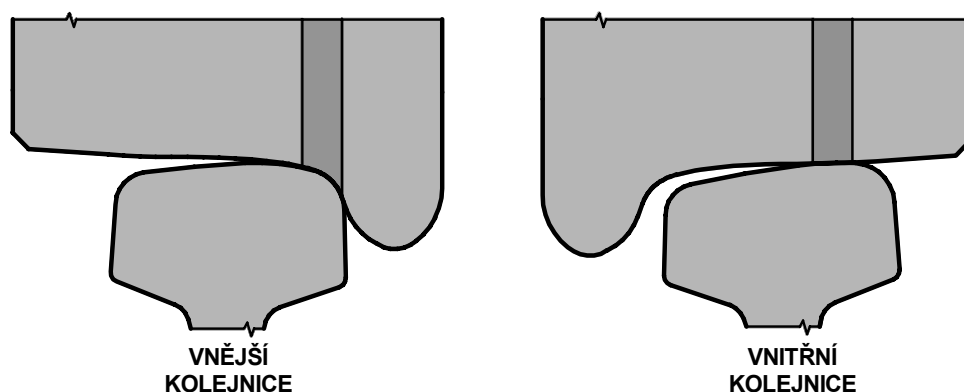
## 8.3. Princip funkce speciálních příčných profilů hlav kolejnic

Vhodnou úpravou charakteristik kontaktní geometrie dvojkolí-kolej lze teoreticky dosáhnout příznivějšího průjezdu vozidla obloukem [15].

### 8.3.1. Funkce $\Delta r$

Dostatečný rozdíl poloměrů valivých kružnic, požadovaný na nabíhajících i na nenabíhajících dvojkolích, však nelze vytvořit pouhým příčným posuvem dvojkolí ve volném kanálu koleje v oblouku z důvodu nevhodné charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí-kolej pro běžně používanou kombinaci jízdnicích obrysů kol (ORE S1002) a příčných profilů hlav kolejnic (60E2). Změna jízdnicího obrysu kola je z důvodu zachování dobrých jízdnicích vlastností vozidla v přímé koleji také vyloučena. Jedinou, a z důvodu pouze lokálního účinku i vhodnější možností ovlivnění vazby dvojkolí-kolej, je tedy změna příčného profilu hlavy kolejnice ve vybraných obloucích malých poloměrů ( $R < 350$  m).

Pro dosažení většího rozdílu poloměrů okamžitých valivých kružnic je nutné přesunout polohu kontaktu kola a vnější kolejnice co nejbližší okolku (přechodová oblast jízdnicí plochy do okolku), v případě kola a vnitřní kolejnice naopak co nejdále, vně hlavy kolejnice (viz *Obr. 16*). Z těchto důvodů musí být při broušení (jediná možná operace pro takovou změnu standardního tvaru hlav kolejnic) speciálních příčných profilů hlav kolejnic v oblouku materiál kolejnice odebrán z míst, kde není kontakt kola a kolejnice žádoucí.



**Obr. 16** Speciální tvar příčných profilů hlav kolejnic

### 8.3.2. Dvoubodový kontakt

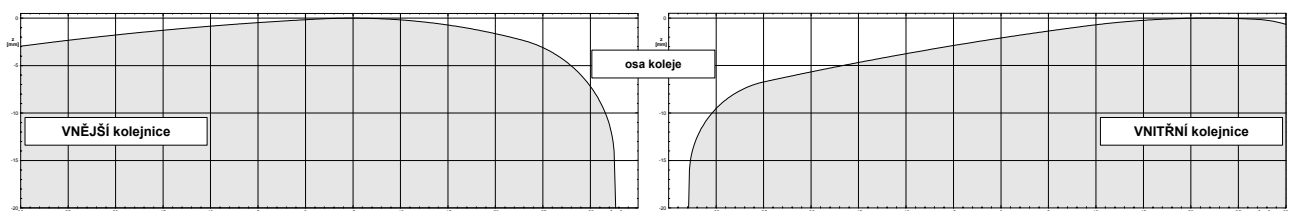
Pro zamezení možnosti výskytu nepříznivějšího dvoubodového dotyku kola s hlavou kolejnice je navíc nutné, aby přechodová část jízdni plochy kola do okolku, která je většinou složena z částí kružnic, měla poloměr větší než poloměr zaoblení profilu hlavy kolejnice. S rostoucím úhlem náběhu dvojkolí musí být tento rozdíl patřičně větší. Pokud nastane případ dvoubodového dotyku kola a kolejnice je z hlediska nadměrného opotřebení boku hlavy kolejnice i okolku kola dvojkolí rozhodující tzv. předsunutí dotykového bodu na okolku v podélném směru. Velikost předsunutí je závislá na úhlu náběhu dvojkolí, úhlu sklonu dotykové roviny v kontaktu kolo-kolejnice a na průměru kola [6], [7] (viz *Kap. 8.5.1*).

Příčný profil hlavy kolejnice pro asymetrické broušení musí být navíc pro používané jízdni obrysy kol různých typů vozidel navržen tak, aby:

- nebyla snížena bezpečnost proti vykolejení,
- nedošlo ke zvýšení vodících sil na nabíhajících kolech.
- v kontaktu kola s kolejnicí nedocházelo k překročení přípustného namáhání materiálu (dostatečná šířka pojížděné plochy).

### 8.4. Návrh

Teoretický návrh vychází z podrobné analýzy charakteristik kontaktní geometrie dvojkolí-kolej pro různé tvary běžně používaných příčných profilů hlav kolejnic a jízdni obrysů kol s ohledem na možnosti zlepšení vodících vlastností dvojkolí v oblouku koleje (viz *Přílohu 3*). Výsledný tvar navržených speciálních příčných profilů hlav kolejnic (v práci používány také pod zkratkou ABK) je na *Obr. 17*.



**Obr. 17** Tvar speciálních příčných profilů hlav kolejnic

### 8.5. Veličiny hodnocené při návrhu speciálních příčných profilů hlav kolejnic

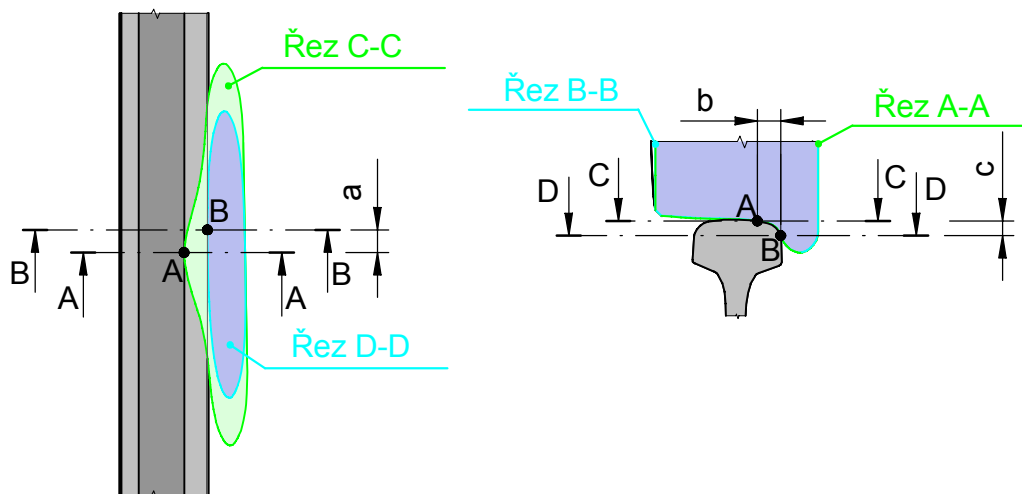
Pro návrh speciálních příčných profilů hlav kolejnic bylo využito simulačních výpočtů jízdy kolejových vozidel. Vzhledem k tomu, že zásahem do tvaru jednoho z prvků vazby kolo-kolejnice dojde k ovlivnění vodících vlastností vozidel v oblouku, bylo nutné vybrat důležité veličiny, které charakterizují pohyb vozidla obloukem a zároveň ukáží využití vlastností navrženého tvaru speciálních příčných profilů hlav kolejnic.

### 8.5.1. Úhel náběhu $\alpha$

Tato veličina podstatným způsobem ovlivňuje opotřebení okolku nabíhajícího kola a pojížděné hrany vnější kolejnice. Dvojkolí je v pojezdu nebo podvozku vozidla vázáno v podélném a příčném směru. Právě tuhosti, příp. vůle ve vedení dvojkolí, spolu s charakteristikami kontaktní geometrie dvojkolí-kolej (viz *Kap. 5.1*) rozhodují o možnostech výsledného natočení dvojkolí kolem svislé osy. Ve většině případů první dvojkolí zaujímá v oblouku největší úhel náběhu.

Při jízdě obloukem dochází k příčnému posunutí nabíhajícího dvojkolí, které je spojeno s vyčerpáním volného kanálu koleje a nalehnutím přechodové části jízdniho obrysu (z okolku do jízdni plochy) na vnitřní hranu vnější kolejnice. Při existenci úhlu náběhu dojde při takovém postavení vnějšího kola a vnější kolejnice většinou ke dvoubodovému kontaktu, který je charakterizován vzdáleností bodů dotyku na okolku a jízdni ploše kola v podélném směru (tzv. předstih, viz *Obr. 18* - hodnota  $a$ ). Nejnepříznivější situace pro velikost předstihu dotykového bodu je pro maximální úhel náběhu, kterého je dosaženo při vzpříčené poloze podvozku ve volném kanálu koleje. Velikost předstihu dotykového bodu na okolku určuje velikost skluzové rychlosti v tomto bodě (12).

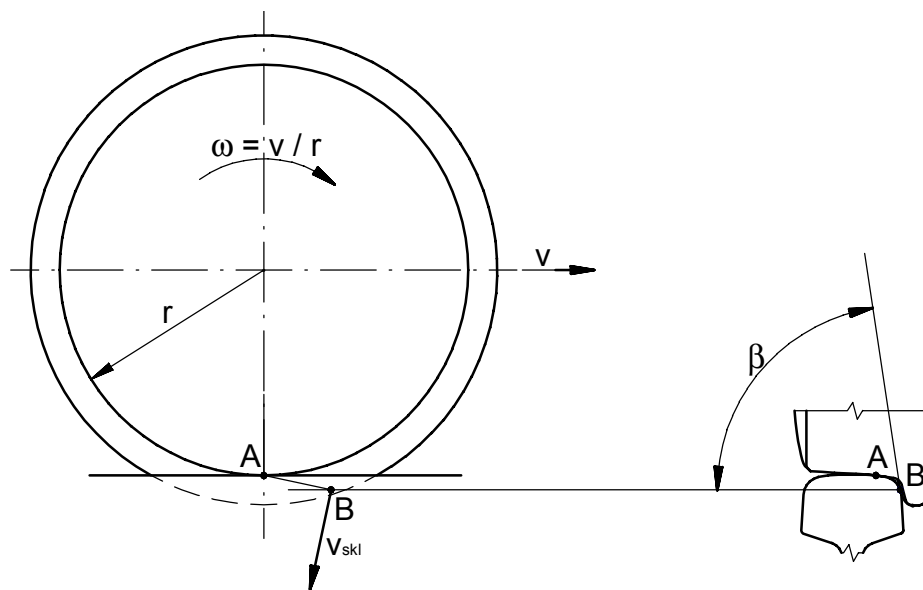
V případě pevných těles je možné při dvoubodovém kontaktu zjistit vzdálenosti těchto dvou bodů ve všech směrech (viz *Obr. 18*).



**Obr. 18** Schématické znázornění dvoubodového kontaktu nabíhajícího kola a kolejnice

Ze znalosti velikosti předstihu dotykového bodu na okolku (bod B) od bodu kontaktu kola v oblasti temene kolejnice (bod A), který závisí na úhlu náběhu  $\alpha$  a sklonu dotykové roviny  $\beta$  na okolku, je možné určit velikost skluzové rychlosti  $v_{skl}$  v tomto bodě (12), která je mírou opotřebovávání okolku i pojížděné hrany vnější kolejnice [13]. Při návrhu je proto kladen důraz na snížení úhlu náběhu nabíhajícího dvojkolí.

$$v_{skl} \approx r \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \omega_{DVOJ} \quad (12)$$



Obr. 19 Znárodnění kontaktních a skluzových poměrů nabíhajícího kola a kolejnice

### 8.5.2. Vodicí síly $Y$ , suma vodicích sil $\Sigma Y$

Při zkouškách jízdních a vodicích vlastností vozidel je z pohledu namáhání koleje kladen důraz na zjištění velikosti kvazistatického hodnoty vodicí síly na nabíhající kole a výsledné sumy vodicích sil [37]. Navržený tvar příčného profilu hlavy kolejnice by proto neměl vést ke zhoršení silového působení mezi dvojkolími a kolejí v příčném směru.

### 8.5.3. Poměr $Y/Q$

Bezpečnost provozu vozidel v obloucích je určována poměrem mezi okamžitou vodicí a kolovou silou, který je sledovaný v oblouku a především v části sestupnice při jízdě prázdného vozu malou rychlostí. Simulační výpočty umožňují z důvodu numerické stability řešení diferenciálních rovnic provádění výpočtů do rychlosti vozidla přibližně  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Při simulačních výpočtech byla proto zvolena minimální rychlost průjezdu vozidla obloukem  $15 \text{ km/h}$ .

Při zřizování speciálních příčných profilů hlav kolejnic se předpokládá zhotovení přechodového úseku mezi speciálním tvarem hlav kolejnic a standardním tvarem ještě v oblasti přechodnice. V systému SJKV byly prozatím pouze u dvounápravového vozu provedeny a vyzkoušeny úpravy umožňující plynulou změnu kontaktních podmínek (zde především příčných profilů hlav kolejnice) v libovolném místě dráhy simulace. U ostatních vozidel byl ponechán speciální tvar příčných profilů hlav kolejnic během celé simulace jízdy. Z hlediska hodnocení bezpečnosti proti vykolejení je to nepříznivější situace, neboť na stávajících tvarech příčných profilů hlav kolejnic jsou vozidla schvalována.

### 8.5.4. Součinitelé adheze $\mu_x, \mu_y, \mu$

Součinitelé adheze vypovídají o využití adheze v jednotlivých směrech [2].

### 8.5.5. Skluzové síly $T_x$ , $T_y$

Formování a rozvoj vlnovitosti jakož i účinek pasivního stavění dvojkolí do radiální polohy souvisí s velikostí skluzových sil (13), (14).

$$T_x = \frac{Q \cdot \mu_x}{\cos\gamma + \mu_y \cdot \sin\gamma} \quad (13)$$

$$T_y = \frac{Q \cdot \mu_y}{\cos\gamma + \mu_y \cdot \sin\gamma} \quad (14)$$

### 8.5.6. Výkon třecích sil $P_{ts}$

Celkový účinek vozidla z hlediska opotřebení kol i kolejnic je možné charakterizovat hodnotou výkonu či práce třecích sil v bodech dotyku kol s kolejnicí (viz *Kap. 10.2*) nebo celkovým výkonem třecích sil celého vozidla  $P_{ts\ celk}$ . Na základě znalosti třecích výkonů a polohy kontaktních bodů lze přejít až k simulaci opotřebení jízdních obrysů kol a příčných profilů hlav kolejnic.

Práci třecích sil je možné určit na základě znalosti velikosti třecích sil v bodě dotyku, velikosti dotykové elipsy a poloze bodu dotyku na jízdním obrysu kola.

Měrná elementární práce třecích sil  $\Delta W_{ts}$  na jednotku plochy dotykové elipsy  $S_{el}$  je definována

$$\Delta W_{ts} = \frac{T_x \cdot v_{xskl} + T_y \cdot v_{yskl}}{S_{el}} \cdot \Delta t \quad (15)$$

Jízdní obrys kola je příčně rozdělen na 0.5 mm elementy (dotyková elipsa je také rozdělena na proužky šířky 0.5 mm), do kterých je v každém časovém kroku délky  $\Delta t$  podle plochy příslušného proužku přičítána poměrná část měrné práce třecích sil.

Aby bylo možné snadno provést porovnání míry třecích poměrů libovolných simulačních výpočtů, je výsledná suma práce třecích sil vztažena na jednotku ujeté dráhy.

### 8.5.7. Ostatní veličiny

Veličiny jako je funkce  $\Delta r$  jednotlivých dvojkolí či příčný posun dvojkolí  $y_d$  ve volném kanálu koleje vypovídají o využití kinematické vazby dvojkolí-kolej dané charakteristikami kontaktní geometrie pro volné dvojkolí.

## 8.6. Provedené varianty simulačních výpočtů

Problematika průjezdu vozidel obloukem je dosti rozsáhlá z důvodu množství faktorů, které mají vliv na výsledné silové působení mezi vozidlem a kolejí. Návrh tvaru speciálních příčných profilů hlav kolejnic byl proto v této práci založen na postupné iteraci ke kompromisnímu řešení tvaru pro dané vstupní údaje. Na základě mnoha provedených simulačních výpočtů byly stanoveny hlavní faktory, které ovlivňují vodicí vlastnosti vozidel v oblouku.

Mezi zjištěné faktory patří:

- poloměr oblouku (vliv na úhel náběhu),
- rychlost vozidla a převýšení koleje (vliv nevyrovnaného příčného zrychlení),
- podélný profil trati (vliv tažných a brzdných sil – viz *Kap. 10.1*),
- klimatické podmínky (vliv na velikost součinitele adheze – viz *Kap. 10.3*),
- parametry koleje (tvar příčných profilů hlav kolejnic, geometrické parametry koleje – viz *Kap. 9*),
- parametry vozidel (vedení dvojkolí, moment odporu proti natáčení podvozku vůči skříni, rozkolí a tvar jízdnicích obrysů kol).

Simulační výpočty pro konečný návrh tvaru speciálních příčných profilů hlav kolejnic byly provedeny za těchto podmínek:

- kolej bez svislých a příčných nerovností (kvazistatický průjezd),
- poloměr oblouku 250 m, oblouk je pravý,
- rychlosti a hodnoty převýšení koleje (viz *Tab. 2*) byly zvoleny tak, aby bylo dosaženo příslušného nedostatku převýšení.
- hodnota maximálního součinitele adheze 0.4,
- nákladní vozy v prázdném i loženém stavu.
- Kombinace rozchodů koleje, jízdnicích obrysů kol i příčných profilů hlav kolejnic použitých v simulaci jsou uvedeny v *Tab. 3* a *Tab. 4*. Vzhledem ke snaze zlepšit vodící vlastnosti vozidel v obloucích malých poloměrů i při rozšířeném rozchodu koleje z důvodu opotřebení příčných profilů hlav kolejnic, byla uvažována varianta rozchodu koleje 1450 mm s teoretickými speciálními příčnými profily hlav kolejnic. Tato kombinace navíc odpovídá situaci při experimentu (viz *Kap. 9*).

**Tab. 2** Kombinace rychlosti a převýšení koleje použité v simulačních výpočtech

| v [km/h] | l [mm] | $a_n$ [m.s <sup>-2</sup> ] | Simulace byly provedeny pro                             |
|----------|--------|----------------------------|---|
| 15       | -122.4 | -0.80                      | všechna vozidla mimo 680 (nefunguje naklápací zařízení) |
| 60       | 36.9   | 0.24                       |   |
| 70       | 98.3   | 0.64                       | všechna vozidla   |
| 75       | 132.5  | 0.87                       | pouze osobní vozy                                       |
| 90       | 249.3  | 1.63                       | pouze 680   |

**Tab. 3** Kombinace jízdních obrysů kol a příčných profilů hlav kolejnic v simulačních výpočtech (rozchod koleje 1435 mm)

| Označení kombinace ve výpočtu | Rozchod koleje [mm] | Příčné profily hlav kolejnic | Rozkolí [mm] | Jízdní obrysy kol                 |
|-------------------------------|---------------------|------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| 60E2ORE35                     | 1435                | 60E2 (teoretický)            | 1360         | ORE S1002 (teoretický)            |
| 60E2ZI335                     |                     |                              |              | ZI-3 (teoretický)                 |
| 60E2POREN35                   |                     |                              |              | POREN (opotřebený, nákladní vozy) |
| 60E2POREO35                   |                     |                              |              | POREO (opotřebený, osobní vozy)   |
| 60E2PZI3O35                   |                     |                              |              | PZI3O (opotřebený, osobní vozy)   |
| ADORE35                       |                     | ABK (teoretický)             |              | ORE S1002 (teoretický)            |
| ADZI335                       |                     |                              |              | ZI-3 (teoretický)                 |
| ADPOREN35                     |                     |                              |              | POREN (opotřebený, nákladní vozy) |
| ADPOREO35                     |                     |                              |              | POREO (opotřebený, osobní vozy)   |
| ADPZI3O35                     |                     |                              |              | PZI3O (opotřebený, osobní vozy)   |

**Tab. 4** Kombinace jízdních obrysů kol a příčných profilů hlav kolejnic v simulačních výpočtech (rozchod koleje 1450 mm)

| Označení kombinace ve výpočtu | Rozchod koleje [mm] | Příčné profily hlav kolejnic | Rozkolí [mm] | Jízdní obrysy kol                 |
|-------------------------------|---------------------|------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| PPPORE50                      | 1450                | 60E2 (opotřebený)            | 1360         | ORE S1002 (teoretický)            |
| PPPZI350                      |                     |                              |              | ZI-3 (teoretický)                 |
| PPPPOREN50                    |                     |                              |              | POREN (opotřebený, nákladní vozy) |
| PPPPOREO50                    |                     |                              |              | POREO (opotřebený, osobní vozy)   |
| PPPPZI3O50                    |                     |                              |              | PZI3O (opotřebený, osobní vozy)   |
| ADORE50                       |                     | ABK (teoretický)             |              | ORE S1002 (teoretický)            |
| ADZI350                       |                     |                              |              | ZI-3 (teoretický)                 |
| ADPOREN50                     |                     |                              |              | POREN (opotřebený, nákladní vozy) |
| ADPOREO50                     |                     |                              |              | POREO (opotřebený, osobní vozy)   |
| ADPZI3O50                     |                     |                              |              | PZI3O (opotřebený, osobní vozy)   |

## 8.7. Vlastnosti navržených speciálních příčných profilů hlav kolejnic

Při návrhu tvaru speciálních příčných profilů hlav kolejnic byly provedeny analýzy vodicích vlastností vozidel, které vedly k výslednému navrženému tvaru (viz Obr. 17). Porovnání vlastností se stávajícími tvary příčných profilů hlav kolejnic je provedeno v následujících bodech.

### 8.7.1. Charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí-kolej

Na základě posouzení charakteristik kontaktní geometrie dvojkolí-kolej běžně používaných příčných profilů hlav kolejnic a nově navržených speciálních profilů hlav kolejnic (viz Přílohu 3) v kombinaci s používanými tvary jízdních obrysů kol je možné konstatovat následující:

- Při rozchodu koleje 1435 mm je zřejmé, že kolejnice s tvarem příčných profilů hlav kolejnic 60E2 nevytváří při kombinaci s teoretickým nebo opotřebeným jízdním obrysem kola tvaru ORE S1002 ve srovnání se speciálními příčnými profily dostatečně strmou funkci  $\Delta r$  v celém rozsahu příčného posunutí dvojkolí v koleji. Tato vlastnost negativně ovlivňuje možnost radiálního stavění dvojkolí u pojezdů, které to umožňují (UIC517, DB65), a možnost snížení podélných skluzových sil na kolech nenabíhajících dvojkolí u všech typů podvozků. Nižší hodnoty funkce  $\tan\gamma$  v závislosti na příčném posunutí dvojkolí spolu s náhlým nárůstem hodnoty funkce  $\tan\gamma$  v oblasti kontaktu jízdního obrysu s vodicí hranou vnější kolejnice zároveň negativně ovlivňuje průběh tuhosti pružné vazby dvojkolí-kolej v příčném směru, což se projeví při dynamickém chování vozidla především na trati s horšími geometrickými parametry koleje (viz Kap. 10.2).
- Při rozchodu koleje 1450 mm je strmost funkce  $\Delta r$  i  $\tan\gamma$  ještě menší, což následky uvedené v předchozím odstavci zvýší.
- Kombinace tvarů navržených speciálních příčných profilů hlav kolejnic s běžně používanými jízdními obrysy kol vede k vhodnějšímu průběhu funkce  $\Delta r$ . Tato funkce je tak strmější, i při nulovém příčném posunutí dvojkolí v koleji má nenulovou hodnotu, a její nárůst až do okamžiku kontaktu kolejnice s okolkem je plynulý.

### 8.7.2. Úhel náběhu

Při porovnání výsledků analýzy možných poloh dvojkolí resp. nabíhajícího kola vůči vnější kolejnici (viz Tab. 5) je zřejmé, že nově navržený příčný profil hlav kolejnic snižuje vzdálenost předstihu bodu dotyku při dvoubodovém dotyku, což by mělo vést k nižšímu opotřebení pojižděné hlavy vnější kolejnice i okolku z hlediska geometrické vazby.



Tab. 5 Hodnoty úhlů náběhu a předstihu bodu dotyku (statická poloha)

|                                   | Rozchod koleje [mm] | Rozchod dvojkolí [mm] | Rozvor podvozku [m] | Úhel náběhu [°] | Příčný profil kolejnice | Jízdní obrys kola | a [mm] (podélně) | b [mm] (příčně) | c [mm] (svisle) | $v_{skl} / v$ [-] |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| statická poloha podvozku v koleji | 1435                | 1420                  | 1.80                | 0.477           | 60E2                    | POREN             | 10.6             | 9.3             | 8.6             | 0.025             |
|                                   |                     |                       | 2.50                | 0.481           |                         | POREO             | 9.2              | 10.0            | 9.4             | 0.021             |
|                                   |                     |                       | 2.50                | 0.481           |                         | PZI3O             | 9.2              | 9.4             | 9.1             | 0.021             |
|                                   | 1435                | 1420                  | 1.80                | 0.477           | ABK                     | POREN             | 6.5              | 5.6             | 5.8             | 0.015             |
|                                   |                     |                       | 2.50                | 0.481           |                         | POREO             | 6.7              | 5.9             | 6.4             | 0.015             |
|                                   |                     |                       | 2.50                | 0.481           |                         | PZI3O             | 8.1              | 6.2             | 6.5             | 0.019             |
|                                   | 1450                | 1420                  | 1.80                | 0.716           | PPL                     | POREN             | 11.5             | plošný kontakt  |                 | 0.026             |
|                                   |                     |                       | 2.50                | 0.653           |                         | POREO             | 11.7             |                 |                 | 0.027             |
|                                   |                     |                       | 2.50                | 0.653           |                         | PZI3O             | 12.2             |                 |                 | 0.028             |
|                                   | 1450                | 1420                  | 1.80                | 0.716           | ABK                     | POREN             | 9.8              | 6.4             | 6.2             | 0.023             |
|                                   |                     |                       | 2.50                | 0.653           |                         | POREO             | 9.8              | 5.9             | 6.3             | 0.023             |
|                                   |                     |                       | 2.50                | 0.653           |                         | PZI3O             | 11.1             | 6.3             | 6.6             | 0.026             |

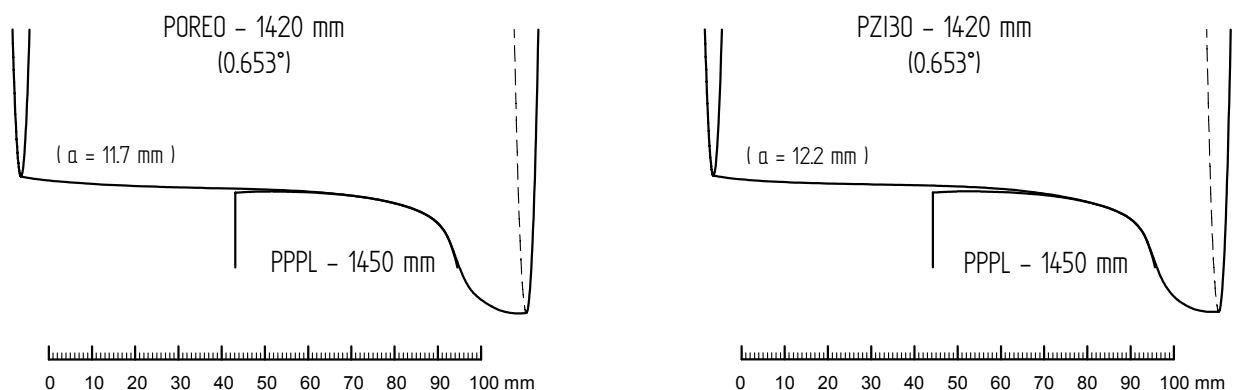
Analýza velikosti předstihu bodu dotyku na okolku byla provedena pouze pro opotřebené jízdní obrysy kol (viz *Kap. 7.2*), neboť takové tvary jízdních obrysů kol zaujímají větší procento výskytu oproti nově soustruženým. Vzhledem k množství kombinací, které mohou nastat v provozu, i s ohledem na výsledky provedených simulačních výpočtů, byla pozornost soustředěna na mezní polohu podvozku ve volném kanálu koleje (poloha vzpříčená) a polohu statickou, kdy se druhé dvojkolí v podvozku nalézá uprostřed volného kanálu koleje. Obě varianty byly provedeny jak pro teoretickou kolej (teoretické příčné profily hlav kolejnic a rozchod koleje 1435 mm), tak pro opotřebené příčné profily hlav kolejnic a rozchod koleje 1450 mm. Vzhledem k tomu, že speciální příčné profily hlav kolejnic mohou být broušeny i na opotřebené hlavy kolejnic a je nutné je v provozu udržovat (obnovovat), je v *Tab. 5* i *Tab. 6* uvedena také varianta teoretických speciálních příčných profilů hlav kolejnic při rozchodu koleje 1450 mm.

V *Tab. 5* a *Tab. 6* je uvedena také varianta kombinace rozšířeného rozchodu koleje 1450 mm a tvaru příčných profilů hlav kolejnic 60E2, které je možné dosáhnout návrhem rozšíření rozchodu koleje v obloucích malých poloměrů nebo obnovou tvaru hlavy opotřebené vnější kolejnice v provozu (broušením).

Tab. 6 Hodnoty úhlů náběhu a předstihu bodu dotyku (vzpříčená poloha)

|                                    | Rozchod koleje [mm] | Rozchod dvojkolí [mm] | Rozvor podvozku [m] | Úhel náběhu [°] | Příčný profil kolejnice | Jízdní obrys kola | a [mm] (podélně) | b [mm] (příčně) | c [mm] (svisle) | $v_{skl} / v$ [-] |
|------------------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| vzpříčená poloha podvozku v koleji | 1435                | 1420                  | 1.80                | 0.747           | 60E2                    | POREN             | 12.7             | 9.1             | 8.8             | 0.029             |
|                                    |                     |                       | 2.50                | 0.676           |                         | POREO             | 13.0             | 9.1             | 8.9             | 0.030             |
|                                    |                     |                       | 2.50                | 0.676           |                         | PZI30             | 13.0             | 9.4             | 9.2             | 0.030             |
|                                    | 1435                | 1420                  | 1.80                | 0.747           | ABK                     | POREN             | 10.4             | 6.1             | 6.2             | 0.024             |
|                                    |                     |                       | 2.50                | 0.676           |                         | POREO             | 10.6             | 6.1             | 6.6             | 0.025             |
|                                    |                     |                       | 2.50                | 0.676           |                         | PZI30             | 11.5             | 6.2             | 6.6             | 0.027             |
|                                    | 1450                | 1420                  | 1.80                | 1.225           | 60E2                    | POREN             | 21.2             | 9.1             | 8.3             | 0.049             |
|                                    |                     |                       | 2.50                | 1.020           |                         | POREO             | 21.1             | 9.9             | 9.1             | 0.049             |
|                                    |                     |                       | 2.50                | 1.020           |                         | PZI30             | 19.8             | 9.7             | 9.2             | 0.046             |
|                                    | 1450                | 1420                  | 1.80                | 1.225           | PPL                     | POREN             | 23.9             | plošný kontakt  |                 | 0.053             |
|                                    |                     |                       | 2.50                | 1.020           |                         | POREO             | 22.6             |                 |                 | 0.050             |
|                                    |                     |                       | 2.50                | 1.020           |                         | PZI30             | 22.9             |                 |                 | 0.051             |
|                                    | 1450                | 1420                  | 1.80                | 1.225           | ABK                     | POREN             | 17.7             | 6.1             | 6.2             | 0.041             |
|                                    |                     |                       | 2.50                | 1.020           |                         | POREO             | 17.6             | 6.4             | 7.1             | 0.041             |
|                                    |                     |                       | 2.50                | 1.020           |                         | PZI30             | 18.2             | 6.6             | 7.1             | 0.042             |

V případě kontaktu opotřeбенé kolejnice a opotřeбенých jízdních obrysů kol vykazovala kontaktní dvojice plošný kontakt v oblasti bodu A (viz Obr. 20) pojižděné hrany hlavy vnější kolejnice.

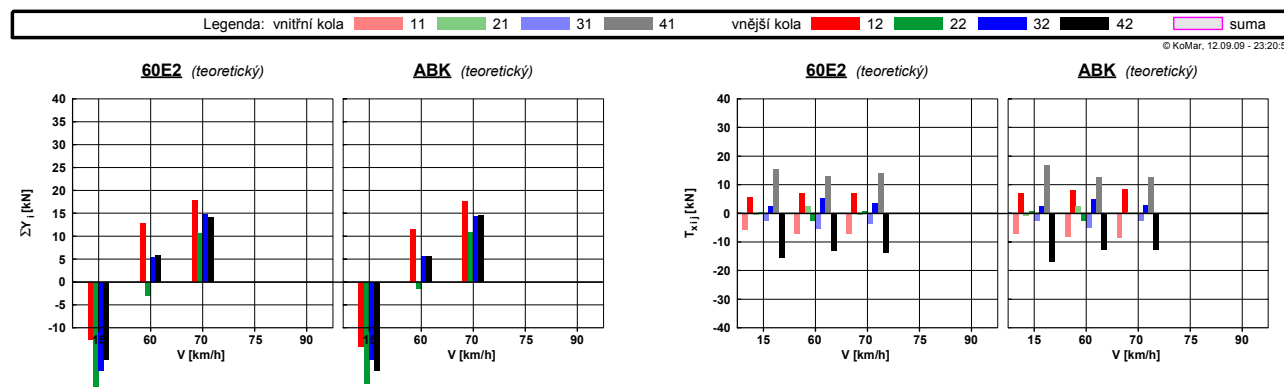


Obr. 20 Plošný kontakt u kombinace opotřeбенého kola i kolejnice (úhel náběhu dvojkolí 0.653°)

Kromě vzdálenosti bodů dotyku je z hlediska výsledného opotřebení důležitá také velikost dotykové plochy, neboť s její rostoucí velikostí roste vliv spinu na výsledný skluz. Předstih bodu dotyku na okolku kola je mírou velikosti skluzové rychlosti v tomto bodě. Při porovnání je zřejmé, že navrhovaný tvar speciálních příčných profilů hlav kolejnic vychází jako vhodnější pro obě hodnoty rozchodu koleje (1435 mm i 1450 mm) i obě polohy podvozku ve volném kanálu koleje (poloha vzpříčená i statická).

### 8.7.3. Simulační výpočty jízdy kolejových vozidel pro návrh tvaru speciálních příčných profilů hlav kolejnic

V Příloze 4 jsou uvedeny výsledky simulačních výpočtů pro návrh speciálních příčných profilů hlav kolejnic, které jsou vzhledem k velkému počtu provedených simulačních výpočtů zpracovány do podoby sloupcových grafů. Hodnoty sledovaných veličin představují aritmetický průměr hodnot příslušné veličiny vypočítaný na dráze 100 m v plném oblouku koleje. Vozidla jsou různých typů a proto nebylo ve výpočtech provedeno celkové srovnání výsledků simulačních výpočtů z pohledu vodících vlastností podvozků, ale byly naznačeny trendy při změnách vstupních podmínek. Každý list je navíc vytvořen tak, aby bylo možné porovnávat původní variantu příčných profilů hlav kolejnic s nově navrženými profily, a to při různých variantách charakteristik kontaktní geometrie dvojkolí-kolej, rychlosti vozidla a při různé konstrukci pojezdové části vozidla (viz Obr. 21).



Obr. 21 Příklad vyhodnocení nákladního vozu

Jak vyplývá z výsledků průjezdu vozidla obloukem (kolej bez nerovností) různou, ale konstantní rychlostí (kvazistatický průjezd), uvedených v Příloze 4, při nižších rychlostech jízdy vozidla je obecně dosahováno většího úhlu náběhu dvojkolí. Rozdíl je výraznější u pojezdů s možností radiálního stavění dvojkolí (DB65, UIC517). Absolutní velikost úhlu náběhu je obecně větší u rozchodu koleje 1435 mm, neboť není plně využita funkce  $\Delta r$  z hlediska využití podélných skluzových sil. U vozidel s pevnou vazbou dvojkolí v podélném směru (všechny osobní vozy) je hodnota úhlu náběhu téměř shodná a navíc při celkovém srovnání větší než úhel náběhu u nákladních vozů.

Na základě rozboru výsledků je možné konstatovat následující závěry k simulačním výpočtům nákladních vozů:

- Byl zjištěn výrazný rozdíl mezi chováním vozu při kombinaci teoretických příčných profilů hlav kolejnic s teoretickými a opotřebenými jízdními obrysy kol, což koresponduje s výsledky charakteristik kontaktní geometrie dvojkolí-kolej (viz Kap. 8.7.1). Vzhledem k tomu, že po soustružení jízdních obrysů kol dojde poměrně rychle ke změně jejich tvaru [12], byl při vyhodnocení simulačních výpočtů kladen důraz na kombinaci příčných profilů hlav kolejnic a opotřebených jízdních obrysů kol, byť jsou výsledky kombinace příčných profilů hlav kolejnic a teoretických jízdních obrysů kol obecně lepší (při porovnání jsou výraznější rozdíly mezi sledovanými veličinami ve prospěch speciálních příčných profilů hlav kolejnic).
- U prázdných nákladních vozů v plném oblouku při rozchodu koleje 1435 mm je dosaženo srovnatelných výsledků všech sledovaných veličin na obou tvarech příčných profilů hlav kolejnic. Výraznějšího snížení poměru  $Y/Q$  (důležitý parametr z hlediska bezpečnosti proti vykolejení) je dosaženo při rozchodu koleje 1450 mm a příslušné kombinaci jízdních obrysů kol a speciálních příčných profilů hlav kolejnic, kdy u podvozku DB65 a pojezdu UIC517 navíc dochází k výraznému snížení úhlu náběhu, k výraznému příčnému posunutí dvojkolí v koleji i ke snížení celkového využití adheze, což svědčí o využití vodicích schopností pojezdů s vůlemi při vhodné strmosti funkce  $\Delta r$ . Snížení hodnot sledovaných veličin je patrné při rozchodu koleje 1450 mm a speciálním tvarem příčných profilů hlav kolejnic také u podvozku Y25.
- U ložených nákladních vozů při rozchodu koleje 1435 mm a opotřebených jízdních obrysech kol dosahuje obecně nižších hodnot úhlu náběhu podvozek DB65 a pojezd UIC517. Při použití speciálních příčných profilů hlav kolejnic je z výsledků zřejmé určité zlepšení vodicích vlastností u všech typů pojezdů, které je výraznější při rozchodu koleje 1450 mm. Toto zlepšení se projevuje snížením vodicích sil, úhlu náběhu i snížením celkového třecího výkonu.
- Při hodnotě rozchodu koleje 1450 mm a opotřebených příčných profilech hlav kolejnic tvaru 60E2 se ve výpočtech více projevuje nevhodná plochá charakteristika funkce  $\Delta r$  na všech dvojkolích. U nabíhajících dvojkolí je nutné navíc počítat s výraznějším opotřebením okolku a pojížděné hrany hlavy vnější kolejnice z důvodu většího předstihu bodu kontaktu na okolku (viz Kap. 8.5.1).

Na základě rozboru výsledků je možné konstatovat následující závěry k simulačním výpočtům osobních vozů:

- Podobně jako u nákladních vozů je významný rozdíl ve vodících vlastnostech osobních vozů s teoretickými a opotřebenými jízdními obrysy kol. V tomto případě ovšem osobní vozy s teoretickými jízdními obrysy kol na speciálních příčných profilech hlav kolejnic vykazují z důvodu větších skluzových sil vyšší třecí výkony (SPG300, 680) nebo vyšší úhel náběhu (GP200) v porovnání s tvarem 60E2. Ostatní veličiny se však odlišují minimálně.
- V případě použití opotřebených jízdních obrysů kol a speciálních příčných profilů hlav kolejnic již dochází k mírnému snižování vodících sil na nabíhajících kolech u všech typů podvozků a kromě podvozku SGP300 i ke snižování celkového třecího výkonu.
- Při hodnotě rozchodu koleje 1450 mm a speciálních profilech hlav kolejnic dochází u všech vozů k výraznějšímu snižování vodících sil na nabíhajících kolech a snižování celkových třecích výkonů .
- Kvazistatická analýza vodících vlastností osobních vozů poukazuje mimo jiné na fakt, že v současné době není běžně v provozu moderní osobní podvozek s volnou vazbou dvojkolí v podélném směru, který by umožňoval využití vlastností charakteristik kontaktní geometrie dvojkolí-kolej k eliminaci úhlu náběhu, podobně jako u nákladních vozů podvozek DB65 či pojezd UIC517.

Dynamické chování vozů lze očekávat lepší u speciálních příčných profilů hlav kolejnic z důvodu měkčí kinematické vazby dvojkolí-kolej v příčném směru (viz *Kap. 10.2*).

## 9. MĚŘENÍ A HODNOCENÍ ZMĚN SLEDOVANÝCH VELIČIN VE VYBRANÝCH OBLOUCÍCH MALÝCH POLOMĚRŮ

Nově navržený tvar speciálních příčných profilů hlav kolejnic se podařilo nabrousit v provozních podmínkách ve směrově náročném traťovém úseku Brno-Adamov.

### 9.1. Popis zkušebního úseku Brno-Adamov

Úsek se nachází na dvoukolejně trati Brno – Česká Třebová, která prošla v letech 1996÷2000 celkovou rekonstrukcí. Při rekonstrukci bylo použito standardního svršku s betonovými pražci s pružným upevnění Vossloh. Rychlost ve zmiňovaném úseku je z důvodu velmi náročných směrových poměrů (poloměry oblouků pod 300 m) i po rekonstrukci pouze 70÷80 km/h pro klasické soupravy a 90 km/h pro naklápěcí soupravy.

Aby bylo možné provést určité srovnání vybraných parametrů trati, bylo broušení speciálních příčných profilů hlav kolejnic provedeno vždy v jednom složeném oblouku (oblouk složen ze dvou a více poloměrů) v každé traťové koleji. Kromě sledování vývoje v těchto obloucích byl sledován vývoj také v obloucích obdobných parametrů, ovšem s jinými tvary příčných profilů hlav kolejnic. Parametry všech oblouků jsou uvedeny v Tab. 7. Traťová rychlost v těchto obloucích je 70 km/h pro vozidla normální stavby, 75 km/h pro vozidla umožňující jízdu s nedostatkem převýšení 130 mm a 80 km/h pro vozidla s naklápěcími skříněmi.

**Tab. 7** Parametry sledovaných složených oblouků

| Kolej                   | Začátek oblouku [km] | Konec oblouku [km] | Poloměr oblouku [m] | Sklon trati ve směru jízdy [‰] | Označení v textu (příčný profil kolejnice) |
|-------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------|--|
| 1.TK<br>(Adamov - Brno) | 161.780              | 161.976            | 283                 | 0                              | km 162<br>(60E2)                           |
|                         | 161.976              | 162.232            | 300                 | -2.1                           |  |
|                         | 162.740              | 163.036            | 261                 | -2.9                           | km 163<br>(ABK)                            |
|                         | 163.036              | 163.138            | 297                 | -2.1                           |  |
|                         | 166.729              | 166.835            | 275                 | -1.6                           | km 167<br>(UIC60)                          |
|                         | 166.835              | 167.039            | 302                 | -2.4                           |  |
| 2.TK<br>(Brno - Adamov) | 161.773              | 161.983            | 288                 | 0                              | km 162<br>(60E2)                           |
|                         | 161.983              | 162.241            | 304                 | +2.1                           |  |
|                         | 162.744              | 163.054            | 265                 | +2.9                           | km 163<br>(ABK)                            |
|                         | 163.054              | 163.153            | 307                 | +2.1                           |  |
|                         | 166.742              | 166.846            | 271                 | +1.6                           | km 167<br>(UIC60)                          |
|                         | 166.846              | 167.047            | 298                 | +2.4                           |  |

Shrnutí odlišností 1. a 2. traťové koleje, které jsou důležité z hlediska sledování a následného hodnocení velmi rozdílného vývoje opotřebení a kontaktních poměrů ve vybraných obloucích malých poloměrů ve stejné kilometrické poloze, je uvedeno v následujících odstavcích.

- 1.TK je ve směru jízdy v klesání. Z hlediska technologie vlakové dopravy a závislosti postavení vozidla ve volném kanálu koleje na režimu jízdy (viz *Kap.10.1*) je nutné zmínit fakt, že před vjezdem do oblouku se speciálními příčnými profily hlav kolejnic (ABK, km 163) je umístěna předvěst vjezdového návěstidla. Vjezdové návěstidlo je pak umístěno před obloukem s příčným profilem hlav kolejnic 60E2 (km 162). V tomto oblouku musí navíc všechny vlaky nákladní dopravy snižovat rychlost z důvodu vjezdu do odbočné větve výhybky. Naměřená data z obou těchto oblouků jsou tedy více či méně ovlivněna procesem brzdění vlaků (především v km 162 u všech nákladních vlaků).
- 2.TK je ve směru jízdy ve stoupání, což u vozů nezhoršuje postavení v koleji. Obecně tedy nejsou procesy opotřebování vnější i vnitřní kolejnice tak intenzivní jako v 1.TK. První ze sledovaných oblouků (km 162, 60E2) je na rozdíl od ostatních oblouků pojížděn sníženou rychlostí z důvodu existence trakčního dělení v polovině oblouku (pokles rychlosti se týká všech vlaků) a navíc nákladní vlaky do tohoto oblouku vjíždějí sníženou rychlostí z důvodu jízdy odbočnou větví výhybky před začátkem oblouku. Tento oblouk je tak pojížděn nižší než traťovou rychlostí u všech typů vlaků.

Po provedení broušení hlav kolejnic v březnu 2005 došlo ve sledovaném úseku (km 161.9÷163.6) k úpravě geometrických parametrů koleje v dubnu 2005. Během doby sledování nedošlo k úpravám geometrických parametrů koleje.

Na podzim roku 2007 došlo v 1.TK v oblouku v km 162 (60E2) při dosažení mezní hodnoty rozchodu koleje z důvodu enormního opotřebení vnějšího kolejnice k její výměně. Touto výměnou byla samozřejmě pozitivně ovlivněna hodnota funkce  $\Delta r$  i ostatní charakteristiky dvojkolí-kolej, což dále ovlivnilo rychlost růstu tvarových vad hlav kolejnic (viz *Přílohu 5*).

Z měření geometrických parametrů koleje a vlnkovitosti (viz *Přílohu 5*) a dynamických účinků na vozidlo (viz *Přílohu 7*) z prosince 2004 je zřejmé, že vybrané oblouky jsou nejproblematictější z celého úseku Brno-Adamov. Před provedením broušení navržených příčných profilů byly veličiny ovlivňující vodící vlastnosti projíždějících vozidel (hodnota rozchodu koleje a stav příčných profilů hlav kolejnic v podélném a příčném směru) již velmi odlišné od teoretických.

## 9.2. Příčný profil hlav kolejnic

Výchozí stav příčných profilů hlav kolejnic byl upraven broušením obloučích v km 162 (60E2) a 163 (ABK) při kampani v březnu 2005. Sledovaný oblouk v km 167 (UIC60) nebyl přebroušován. V každém ze sledovaných oblouků bylo prováděno sledování vývoje příčných profilů hlav kolejnic obou kolejnicových pásů v přechodnici i plném oblouku v několika řezech z důvodu vyloučení možných extrémních případů opotřebení. V *Příloze 2* je uvedeno grafické vyhodnocení vývoje příčných profilů hlav kolejnic.

Vzhledem k faktu, že technologický režim dopravy zůstává ve sledovaném úseku stejný a provezená zátěž v jednotlivých obloučích v příslušných traťových kolejích je stejná, je porovnání vhodnosti a přínosu navrženého speciálního příčného profilu hlav kolejnic zaměřeno na rychlost úbytku materiálu v závislosti na změně tvaru příčných profilů hlav kolejnic (ovlivnění geometrických poměrů vazby dvojkolí-kolej).

### 9.2.1. Opotřebení příčných profilů hlav kolejnic

Při posouzení vývoje tvaru příčných profilů hlav kolejnic v 2.TK je možné konstatovat následující:

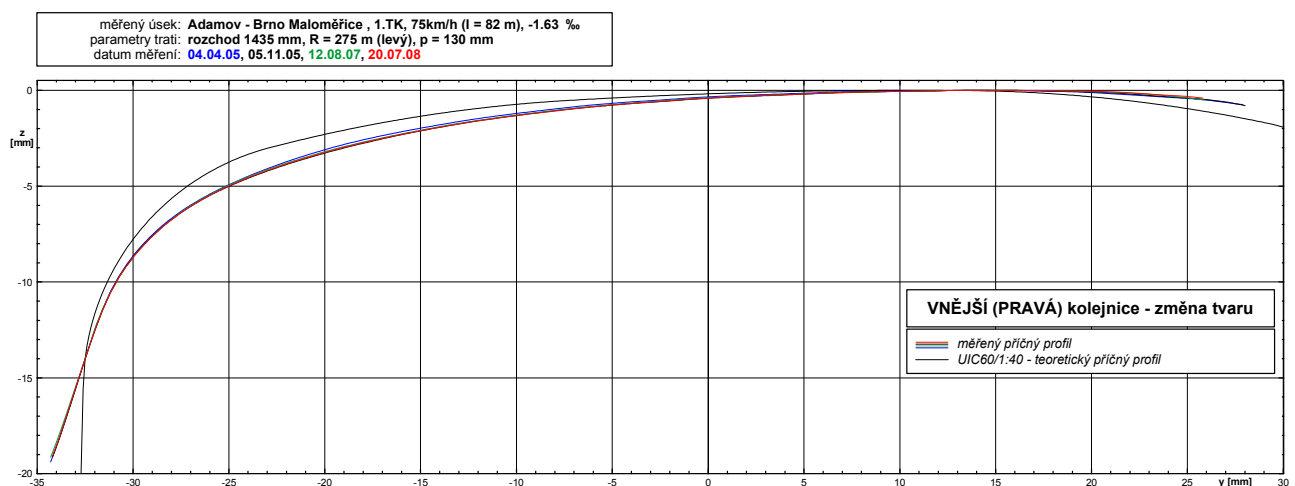
- Oblouky, které byly přebroušeny do teoretických příčných profilů (km 162 – 60E2, km 163 – ABK) za sledované období vykazují shodně minimální opotřebení vnější kolejnice. Důvodem jsou sklonové poměry a technologie dopravy. Navíc je vidět vliv skutečné rychlosti vozidel na opotřebení příčných profilů hlav kolejnic v km 162 (60E2). Vlivem malé odstředivé síly nedochází k intenzivnímu nalehnutí nabíhajícího kola na vnější kolejnici, s čímž je spojeno nižší silové působení na nabíhajícím kole nebo možnost vzniku dvoubodového kontaktu.
- Nepřebroušený oblouk v km 167 (UIC60), kde došlo na konci roku 2005 k tvarovému přizpůsobení hlavy vnější kolejnice tvaru opotřebených jízdnic obrysů kol (viz *Přílohu 2.3*), je rychlost opotřebení v úrovni měření rozchodu koleje přibližně 1.25 mm/rok, což odpovídá vývoji ve stejném oblouku v druhé koleji (1.TK).

Vývoj tvaru hlav příčných profilů v 1.TK (v obloučích v km 162 (60E2) a km 163 (ABK)) je ovšem oproti 2.TK i přes minimální rozdíly v poloměrech oblouků značný. Vysvětlení je možné nalézt v provedených simulačních výpočtech v *kap. 10.1* a faktu, že 1.TK je v klesání.



Při posouzení vývoje tvaru příčných profilů hlav kolejnic v 1.TK je možné konstatovat následující:

- Tvar příčných profilů hlav kolejnic 60E2 (km 162) vykazoval stálou hodnotu opotřebení cca 2 mm/rok. Rychlost opotřebení vnější kolejnice vedla až k výměně kolejnice (podzim 2007) z důvodu překročení mezní hodnoty rozchodu koleje. Ve všech sledovaných případech již kolejnice měla tvar průměrovaného opotřebeného příčného profilu (PPL).
- Speciální příčný profil hlav kolejnic (ABK, km 163) byl v prvním roce a půl opotřebováván s rychlostí 1 mm/rok. Po této době byl příčný profil hlav kolejnic již tvarově podobný kolejnicím v ostatních obloucích, jak z hlediska tvaru, tak možné polohy kontaktu kola s temenem hlavy kolejnice a vývoj pokračoval s opotřebením 2 mm/rok.
- Sledovaný oblouk, v němž nedošlo v roce 2005 k přebroušení kolejnic (km 167, UIC60) z důvodu lepších směrových, sklonových poměrů i dopravních důvodů vykazuje nižší hodnotu absolutního opotřebení hlavy kolejnice 1.25 mm/rok. Rychlost opotřebení však vzhledem k prakticky neměnnému tvaru příčných profilů hlav kolejnic (viz Obr. 22) zůstává stejná v celém sledovaném období.

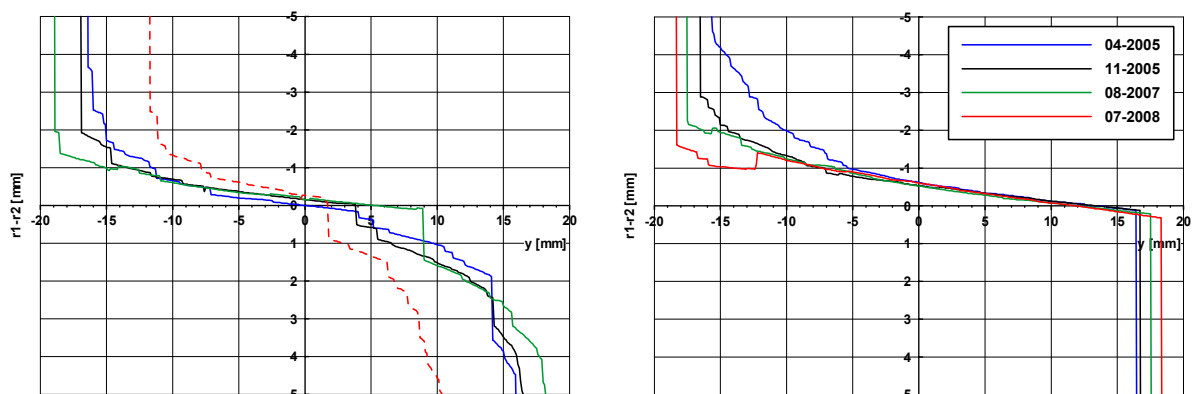


Obr. 22 Porovnání změn tvaru příčných profilů hlav kolejnic v km 167 (UIC60), 1.TK

### 9.2.2. Změny tvaru příčných profilů hlav kolejnic a funkce $\Delta r$

Kromě absolutní velikosti opotřebení hlav kolejnic je důležité sledovat vliv změny tvaru příčného profilu hlav kolejnic na změnu charakteristik kontaktní geometrie (viz Přílohu 3.3) a tedy ovlivnění vodicích vlastností vozidla v oblouku, neboť změna tvaru má vliv na změnu rychlosti vývoje opotřebení. Obecně vlivem opotřebovávání dochází ke snižování strmosti funkce  $\Delta r$ . Rozdílnost rychlostí změn funkce  $\Delta r$  je zřejmá.

- 1.TK. Vývoj příčných profilů v oblouku s výchozím tvarem příčných profilů hlav kolejnic 60E2 (km 162) ukazuje na nedostatečnou strmost funkce  $\Delta r$  již po provedeném broušení v roce 2005, což je ovlivněno i tvarem vnitřní kolejnice. Nízká strmost je ovšem téměř neměnná. Příčný profil UIC60 v km 167 je na tom obdobně, neboť nedošlo k jeho broušení. U speciálních příčných profilů hlav kolejnic (ABK) v km 163 je prokazatelný pokles strmosti funkce  $\Delta r$  již po velmi krátké době provozu (viz Obr. 23), což svědčí o intenzitě opotřebování příčných profilů hlav kolejnic. Další vývoj je závislý především na dalším opotřebování vnější kolejnice. Speciální tvar příčných profilů hlav kolejnic, kdy je kontakt na vnitřní kolejnici vysunutý co nejdále vně koleje, totiž spolu s opotřebenou vnější kolejnicí vytváří při neprovedení opravného broušení paradoxně horší situaci, kdy je strmost funkce  $\Delta r$  zanedbatelná (křivka je velmi plochá, navíc absolutní hodnota je nižší než u kombinace s opotřebenými příčnými profily 60E2). Nabíhající dvojkolí jsou velmi špatně vedena. Intenzivní příčné skluzy pak způsobují na vnější kolejnici tvorbu skluzových vln v délkách odpovídajícím změnám příčné tuhosti vnější kolejnice (viz Obr. 24), kdy je již dvojkolí vráceno opět ke středu koleje.



**Obr. 23** Změny průběhu funkce  $\Delta r$  v 1.TK (60E2-POREN a ABK-POREN)

- 2.TK. Tvar i strmost funkce  $\Delta r$  se mění v obloucích, kde došlo k přebroušení v roce 2005 (km 162 (60E2) a 163 (ABK)) minimálně. Proces změn v km 167, kde je původní tvar kolejnice UIC60, se výrazněji začíná měnit na konci roku 2005, kdy se kolejnice již zcela přizpůsobila tvaru opotřebených jízdních obrysů kol.



**Obr. 24** Důsledek nevhodného vývoje funkce  $\Delta r$

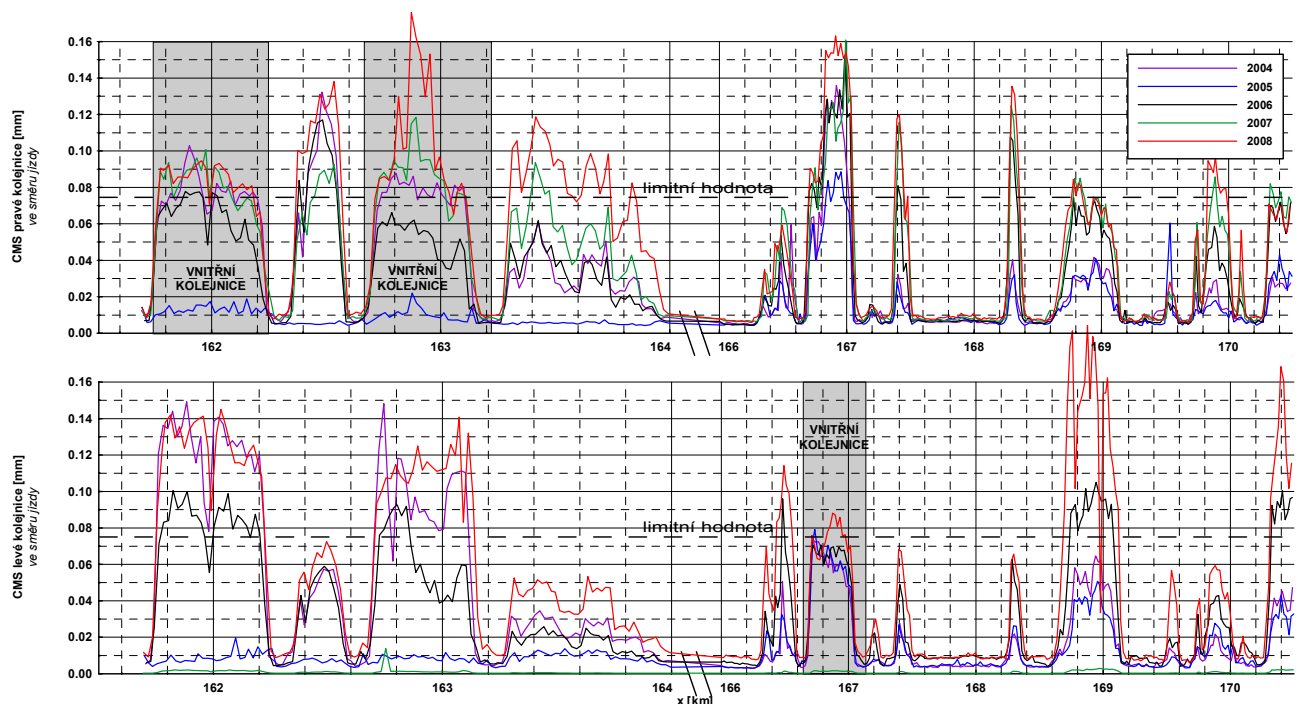
### 9.3. Podélný profil hlavy vnitřní kolejnice (vlnkovitost)

#### 9.3.1. Data z měřicího vozu

Podélný profil hlavy kolejnice byl posuzován na základě výstupů z měřicího vozu, který je jediným nástrojem pro posouzení nutnosti provedení opravného broušení. Celý systém měření (označení CMS) a vyhodnocení snímané veličiny – zrychlení na ložiskové skříně – byl však naladěn za určitých podmínek, čemuž odpovídá i přenosová funkce. Vozidlo i kolej se chová jako soustava pružných těles s nelineárními vazbami. Výsledek kinematického buzení celé soustavy kolo-kolejnice při průjezdu vozidla přes vlnkovitou nerovnost je ovlivněn kromě aktuální hloubky a vlnové délky nerovnosti na hlavě vnitřní kolejnice také frekvenčním naladěním celé soustavy. Změny pružících a tlumících charakteristik koleje lze během provozu očekávat, není ovšem jednoduché je běžnými prostředky a metodami měřit. Rovněž poloha bodu dotyku na vnitřním kole kolejnici a vazba na druhé kolo prostřednictvím nápravy ovlivňuje naměřené výsledky (viz *Kap. 9.5*).

Na základě analýzy naměřených dat z měřicího vozu (viz Přílohu 5) lze konstatovat:

- 1.TK (viz Obr. 25). Vlnkovitost v km 167 (UIC60) se téměř nemění. V oblouku v km 162 (60E2) oproti km 163 (ABK) lze pozorovat první rok větší nárůst hloubky vlnkovitosti. V km 162 (60E2) dosahuje hloubka nerovností v roce 2007 stavu v roce 2004. V roce 2008 nedošlo k výraznému růstu, což je ovlivněno také výměnou vnější kolejnice. V km 163 (ABK) je nárůst vlnkovitosti urychlen po roce a půl od provedení broušení, kdy již tvar vnější kolejnice odpovídá kolejnici opotřebované. Další vývoj je odrazem vývoje funkce  $\Delta r$  (viz Kap. 9.2).

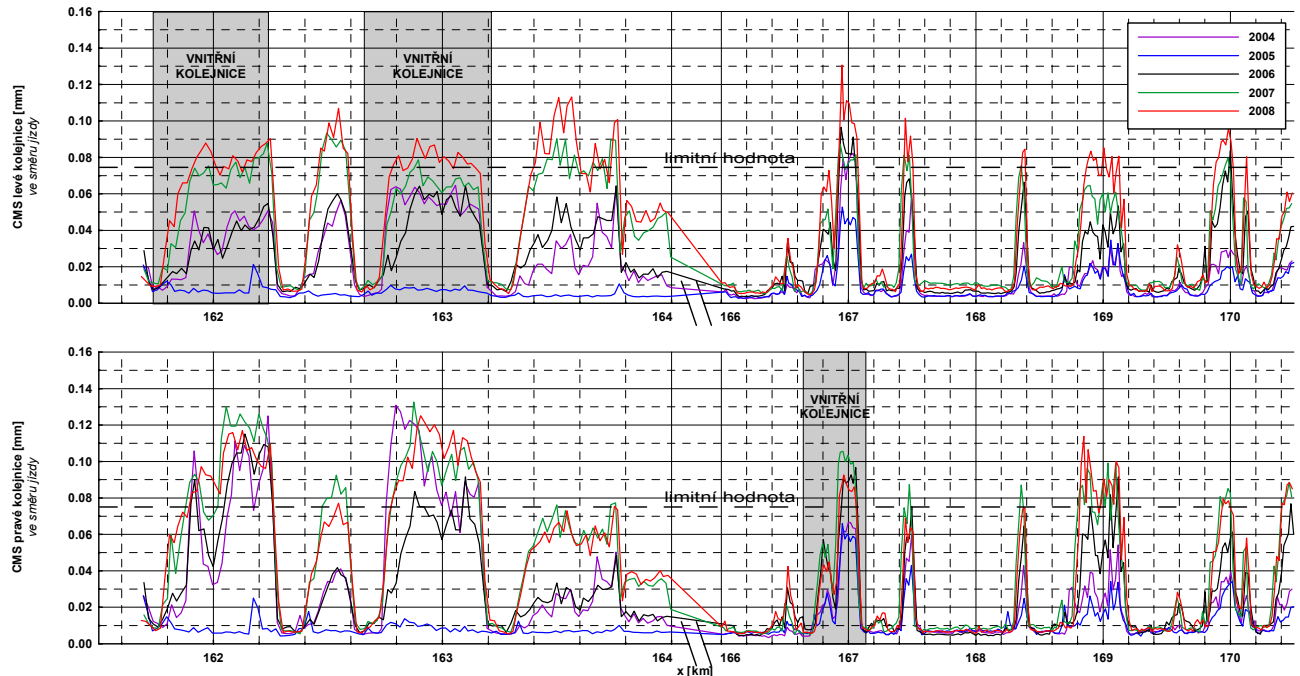


**Obr. 25** Vývoj vlnkovitosti v 1.TK (šedé podbarvení značí sledované oblouky)

- 2.TK (viz Obr. 26). V oblouku v km 162 (60E2) i v km 163 (ABK) je dosaženo původní hodnoty vlnkovitosti z roku 2004 po roce od broušení hlav kolejnic, velikost vlnkovitosti v prvním oblouku je ovšem nižší z důvodu průjezdu vlaků nižší než projektovanou rychlostí. I přesto již po dvou letech dosahuje vlnkovitost v obou obloucích stejných hodnot a další vývoj je stejný. Vlnkovitost v oblouku se speciálními příčnými profily hlav kolejnic se tedy vyvíjí relativně pomaleji, než by odpovídalo vývoji vlnkovitosti v prvním oblouku při průjezdu vozidel plnou rychlostí. V km 167 (UIC60) je rovnoměrný růst vlnkovitosti. Důležité zjištění pro další výzkum vlnkovitosti v obloucích malých poloměrů je, že vývoj vlnkovitosti ve složeném oblouku v km 167 probíhá odlišně, než by se dalo očekávat podle velikosti poloměrů jednotlivých oblouků (viz Tab. 7). V první části tohoto oblouku je použito měkčí upevnění kolejnic k pražcům (výzkum SŽDC). Potvrzuje se tak fakt, že tuhost upevnění kolejnice



k pražci má vliv na rychlost vývoje vlnkovitosti i na jeho vlnovou délku (viz Přílohu 6.2).



**Obr. 26** Vývoj vlnkovitosti v 2.TK (šedé podbarvení značí sledované oblouky)

### 9.3.2. Data z kontaktního měření

Paralelně se sběrem dat z měřicího vozu bylo prováděno sledování vývoje podélné nerovnosti kontaktním způsobem jak z důvodu přesnějšího sledování vývoje vlnkovitosti (opakovatelnost a reprodukovatelnost měřených dat při srovnání s výsledky z měřicího vozu) ve sledovaných obloucích, tak za účelem získání vstupních dat do simulačních výpočtů (viz *Kap. 10.4*). Z důvodu finanční náročnosti bylo sledování tímto způsobem v roce 2006 ukončeno.

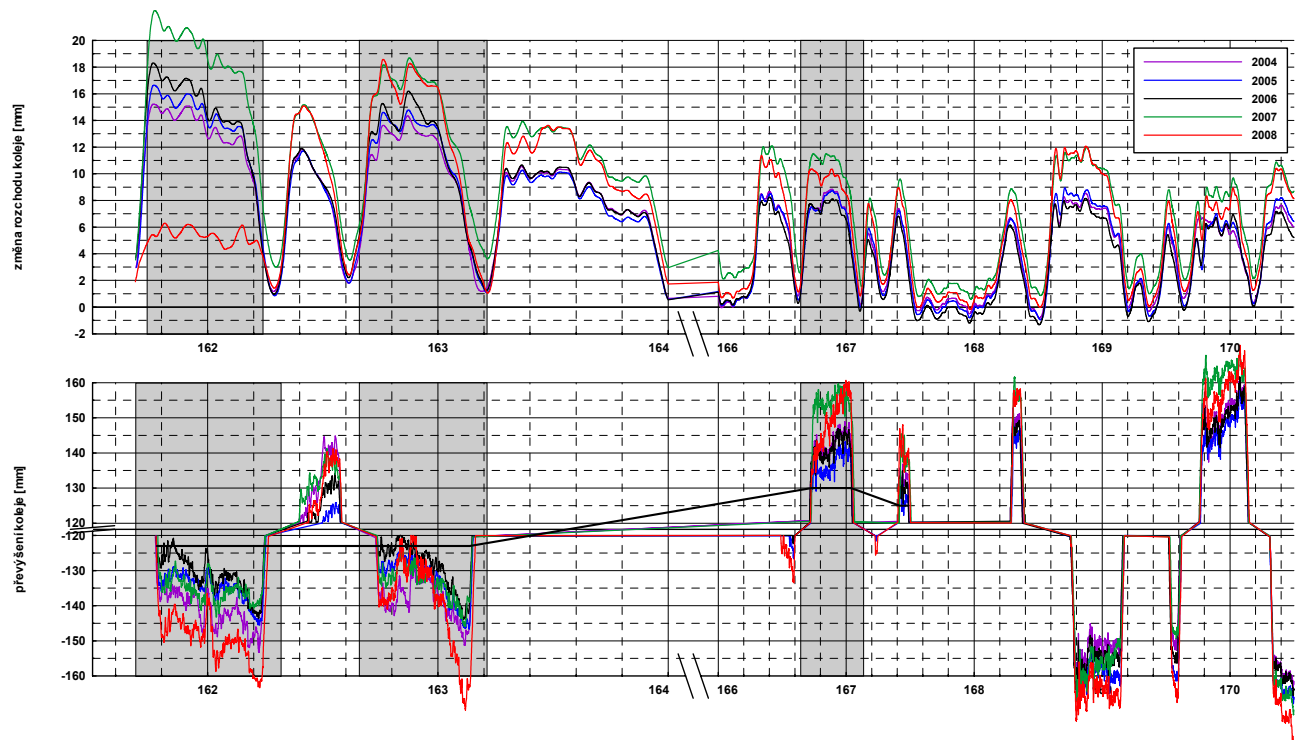
Z analýzy naměřených dat (viz *Přílohu 6*) je možné konstatovat pouze následující:

- Vývoj vlnkovitosti závisí na poloze měřeného 20metrového úseku v oblouku.
- Vlnová délka svislých nerovností závisí na tuhosti upevnění kolejnic k pražci.
- Naměřená data nelze porovnat s výstupy z měřicího vozu, což souvisí s metodou měření a s výpočtem vlnkovitosti na základě integrace signálu zrychlení (viz *Kap. 9.5*).

## 9.4. Geometrické parametry koleje

Na základě zpracování dat poskytnutých TÚDC Jaroměř za roky 2005÷2008 je možné k vývoji sledovaných parametrů koleje říci následující [14]:

- Vývoj v 1.TK (viz Obr. 27)
  - Oblouk v km 162 (60E2) vykazuje rovnoměrné zvětšování hodnoty rozchodu koleje 2 mm/rok z důvodu opotřebování vnější kolejníc. V roce 2006 je již příčný profil hlavy kolejnice natolik opotřeben, že se celý proces opotřebování zrychlí na 4 mm/rok a následně dojde k výměně vnější kolejnice. Zvětšování rozchodu koleje v oblouku v km 163 (ABK) je pozvolnější, následné zrychlení vývoje je možné dát do souvislosti s opotřebením hlavy vnější kolejnice (změna tvaru speciálního příčného profilu hlavy vnější kolejnice do běžného tvaru opotřebené vnější kolejnice - PPL - způsobí zhoršení kontaktních poměrů mezi kolem a kolejníc). Hodnocení těchto změn bylo již provedeno v *Kap. 9.2*, určité rozdíly v naměřených hodnotách jsou dány dynamickým měření rozchodu koleje pod zatížením měřicím vozem a kalibrací měřicího řetězce před měřením.

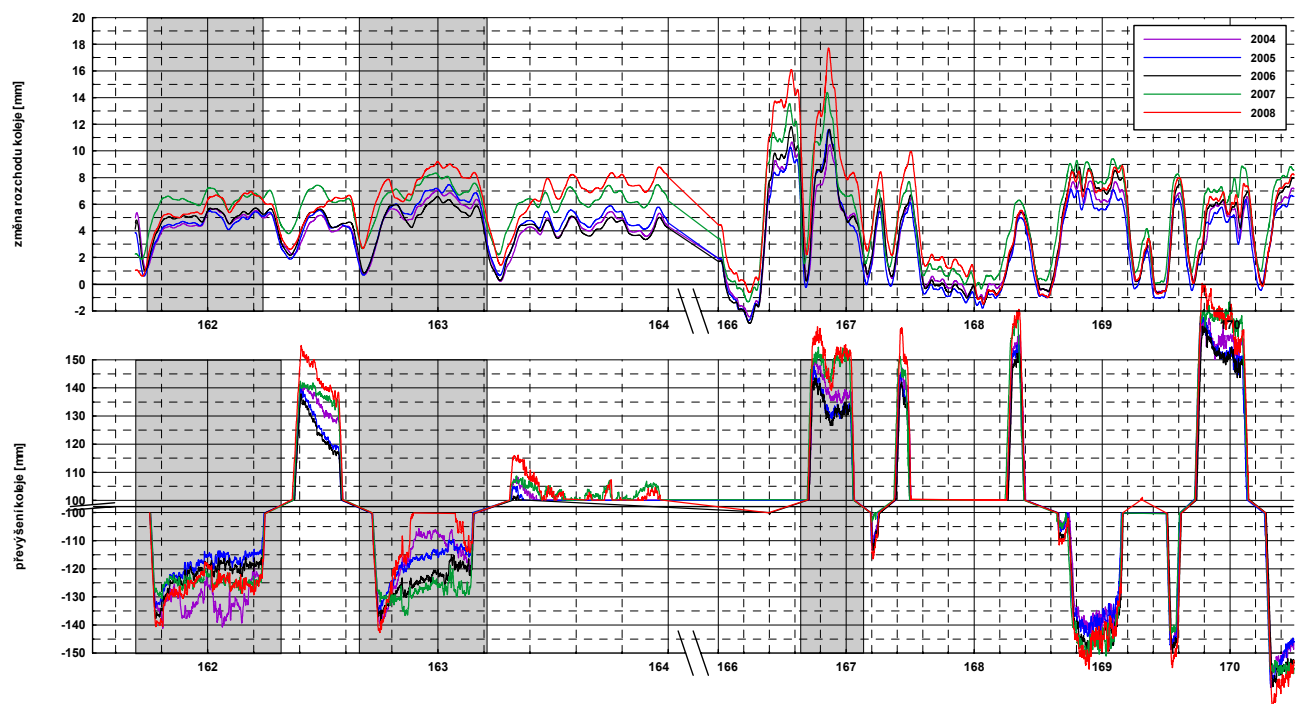


**Obr. 27** Změny geometrických parametrů koleje (1.TK)

- Převýšení koleje souvisí se zatížením jednotlivých kolejnicových pásů (rozložení kolových sil) a má rostoucí tendenci. Pokles vykazuje pouze na konci sledovaného období v oblouku v km 163 (ABK), kdy se rozvinula

vlnkovitost i na vnějším kolejnicovém pásu a došlo tak ke zvětšení svislých dynamických účinků i na vnějších kolech.

- Vývoj v 2.TK (viz Obr. 28)
  - Oblouk v km 162 (60E2) vykazuje s ohledem na průjezd vlaků nižší než projektovanou rychlostí menší opotřebení vnější kolejnice, s nimž souvisí pozvolnější zvětšování rozchodu koleje než je tomu u ostatních sledovaných oblouků.
  - Převýšení koleje má rostoucí tendenci.



Obr. 28 Změny geometrických parametrů koleje (2.TK)

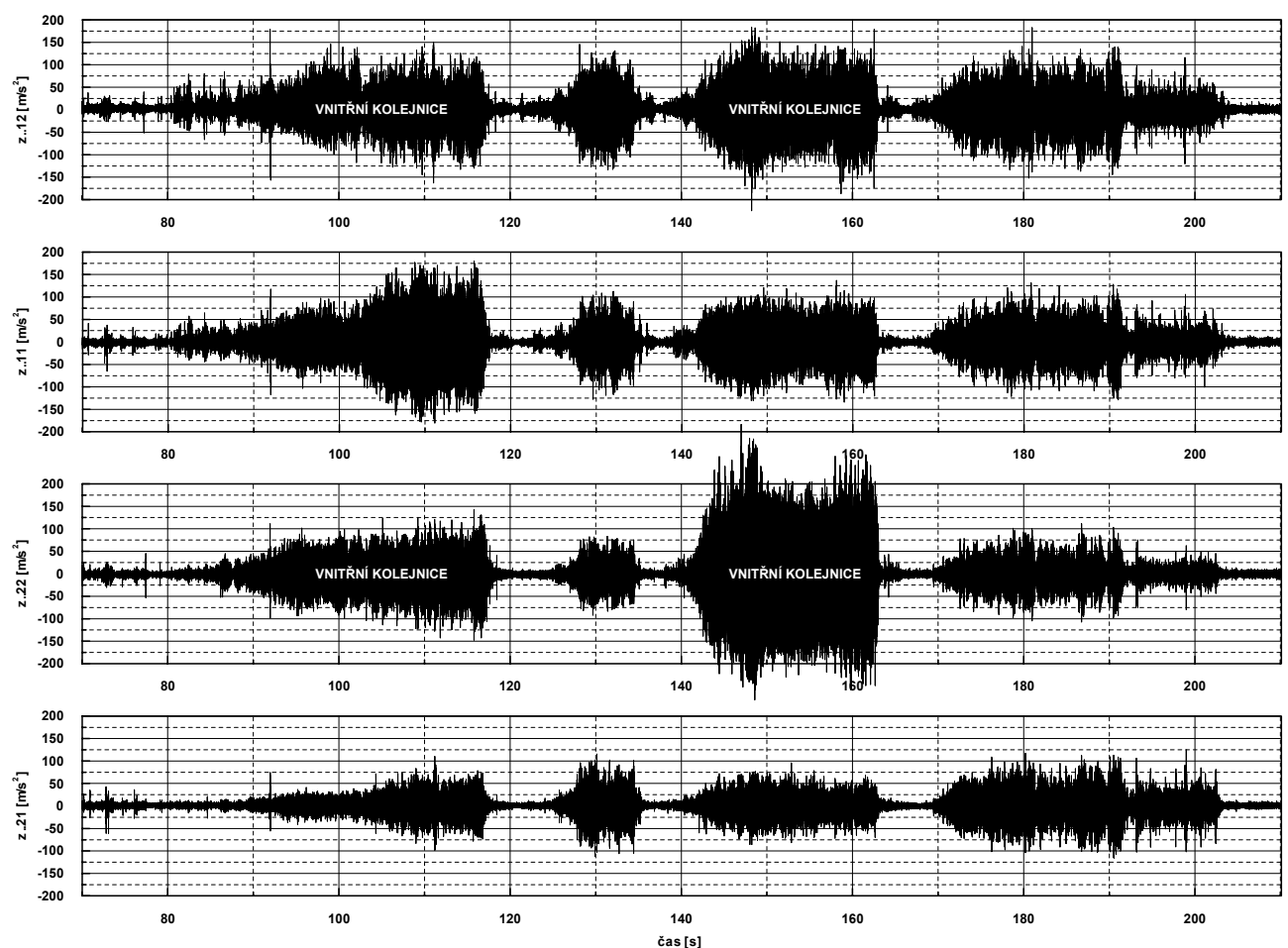
## 9.5. Dynamické účinky v interakci vozidlo-kolej

Z uskutečněných simulačních výpočtů jízdy vozidel je zřejmé, že každé vozidlo, resp. dvojkolí, zaujímá v oblouku různou polohu. První dvojkolí v podvozku většinou nabíhají na vnější kolejnici, druhá dvojkolí v podvozku pak zaujímají statickou polohu.

Velikost vlnkovitosti je na měřicím voze určována dvojitou integrací signálu měřených zrychlení na ložiskových skříních, která jsou závislá na zatížení příslušného kola (dané nevyrovnáním zrychlením, které je v obloucích malých poloměrů citlivé na změny převýšení), na poloze bodu dotyku na hlavě vnitřní kolejnice vzhledem ke středu vlnkovitosti (souvisí s opotřebením okolků), na hodnotě rozkolí a rozchodu koleje a na naladění celého systému vozidlo-dopravní cesta. Všechny tyto parametry určují velikost dynamické odezvy mezi kolem a kolejnicí. Náprava, jejíž zrychlení se měří, a kolo, které je v kontaktu s vnitřní kolejnicí, je navíc ovlivňováno vazbou k druhému kolu stejného dvojkolí

a vibracemi kolejnice od sousedních kol (viz Obr. 29). Tato vzájemná vazba, která způsobuje v určitých případech výrazné vzájemné ovlivňování kol, je zřejmá z naměřených hodnot zrychlení nad vnějším a vnitřním kolem (viz Přílohu 5 a Přílohu 7). Výsledky měřených zrychlení na ložiskových skříních při průjezdu vozidel přes vlnkovitou nerovnost [30][29] slouží proto jen k posouzení velikosti dynamického působení ve svislém směru na neodpružené části vozidel a na kolejnici.

Rozdíly mezi dosaženými výsledky zjištěné směrodatné odchylky svislé nerovnosti (vlnkovitost) při kontaktním měření a při měření zrychlení měřicím vozem jsou v některých případech značné. Samotné sledování vývoje formování vlnkovitosti v obou traťových kolejích pomocí systému CMS měřicího vozu (viz Obr. 25 a Obr. 26) ukazuje na méně spolehlivou interpretaci vývoje měřené nerovnosti, byť je dnes jediným používaným nástrojem pro zjištění stavu vlnkovitosti vnitřní kolejnice v České republice. Měření dynamických účinků na vozidle tento fakt pouze potvrdil.



**Obr. 29** Vzájemná vazba kol dvojkolí při průjezdu vozidla oblouky s vlnkovitostí (svislá zrychlení měřená na ložiskové skříně osobního vozu)



## 10. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PRŮJEZD VOZIDEL OBLOUKEM

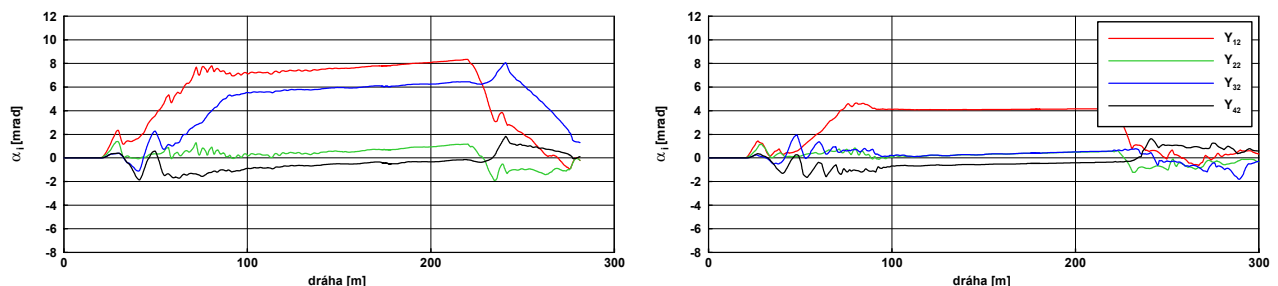
### 10.1. Brzdění vozidel

Při jízdě zkoušce vozidel [37] je zkoušené vozidlo taženo ustálenou rychlostí. V provozních podmínkách jsou ovšem vyvozovány mezi vozidlem a kolejí tažné a brzdě síly, na vozidlo působí ve vlaku dynamicky také sousední vozidla. S ohledem na výrazně odlišné chování vývoje opotřebení kolejnic v obloucích v 1.TK oproti 2.TK byl zjišťován vliv brzdě síly na postavení vozidla v oblouku koleje. Do modelu vozidel byl zapracován brzdě moment vyvozený na nápravě. Vliv sousedních vozidel ve vlaku na postavení vozidla nebo dvojkolí v oblouku koleje nebyl řešen.

Jak vyplývá z výsledků kvazistatického průjezdu vozidla obloukem různou, ale konstantní rychlostí, uvedených v *Příloze 4*, při nižších rychlostech jízdy vozidla je obecně větší úhel náběhu dvojkolí. Tato závislost je výraznější u vozidel s možností radiálního stavění dvojkolí z důvodu nedostatečné velikosti podélných skluzových sil při nízké rychlosti jízdy. U vozidel s pevnou vazbou dvojkolí v podélném směru (všechny osobní vozy) je úhel náběhu téměř shodný a je větší než úhel náběhu u nákladních vozů.

Z výsledků provedených simulačních výpočtů při rychlosti ve středu projížděného oblouku cca 70 km/h a aplikaci brzdě účinku se zpomalením  $0.38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  (viz *Přílohu 8*) je možné navíc konstatovat, že zvětšování úhlu náběhu s poklesem rychlosti je nejzřetelnější u podvozku Y25 a GP200, které jsou u vlaků ve sledovaném traťovém úseku nejvíce zastoupeny. U podvozků s možností radiálního stavění dvojkolí není změna patrná. Navíc úhel náběhu při brzdě je obecně větší než v případě jízdy stejnou rychlostí bez použití brzdě síly.

Přídavné podélné skluzové síly od brzdě momentu na dvojkolí způsobí navíc změnu rozložení sil na nabíhajících kolech tak, že sníží výslednou podélnou skluzovou sílu na nabíhající kole. S touto změnou je spojen nárůst příčné skluzové síly a pokles vodící síly. Nárůst příčné skluzové síly na nabíhající kolech a zvětšení úhlu náběhu při brzdě vozů je faktorem, který zapříčinil odlišný vývoj opotřebení hlavy vnější kolejnice v obou traťových kolejích.



**Obr. 30** Ukázka zvyšování úhlu náběhu při brzdě vozidel (Y25 a DB65, 60E2 - POREN)

## 10.2. Reálné geometrické parametry koleje

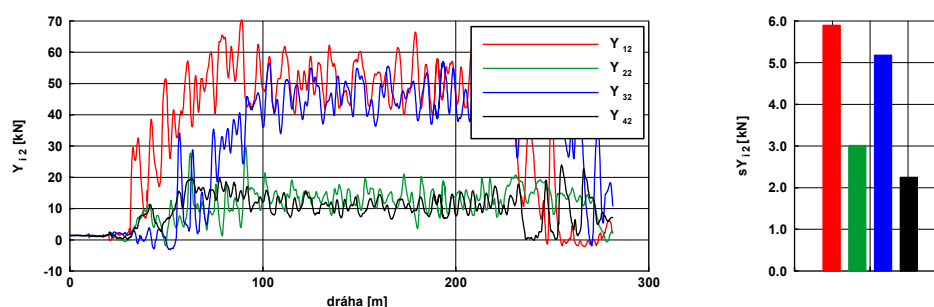
Posouzení vlastností speciálních příčných profilů hlav kolejnic i za podmínek, které lépe popisují reálnou trať, byly simulační výpočty provedeny i na koleji se dvěma různými stavy geometrických parametrů koleje (viz Přílohu 9). Při zadávání parametrů koleje (teoretické trasování, geometrické parametry koleje z měřených dat, příčné profily hlav kolejnic) bylo snahou přiblížit se skutečným poměrům, které panují v obloucích malých poloměrů v úseku Brno-Adamov.

Simulace byla proto provedena pro případ:

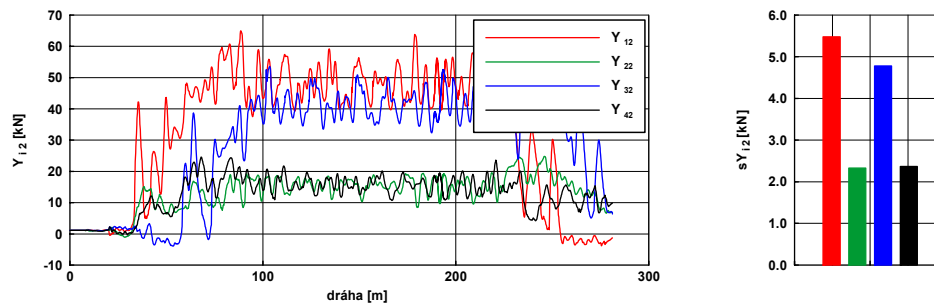
- Kolejnice bez opotřebení (teoretické příčné profily 60E2 i ABK), rozšířený rozchod koleje se střední hodnotou 1439 mm a ostatní geometrické parametry koleje změřené krátce po provedení úprav geometrických parametrů podbíjením koleje (měřeno dne 26.07.05 v 2.TK).
- Opotřebená kolejnice a teoretický speciální tvar příčného profilu hlavy kolejnice, střední hodnota rozchodu koleje 1450 mm a ostatní geometrické parametry koleje změřené po necelých dvou letech od posledního provedení podbíjení koleje (měřeno dne 27.03.07 v 2.TK).

Z výsledků simulačních výpočtů pro hodnocení vhodnosti speciálních příčných profilů hlav kolejnic v provozních podmínkách vyplývá:

- U nákladních vozů s pojezdy s možností radiálního stavění (UIC517, DB65) je možné výrazněji snížit hodnotu úhlu náběhu i vodicích sil, především pak při rozšířeném rozchodu koleje. U podvozku Y25 se přínos speciálních příčných profilů hlav kolejnic projeví na poklesu vodicích sil výrazněji při rozšířeném rozchodu koleje.
- Osobní vozy s velmi tuhým podélným vedením dvojkolí neumožňují ovlivnění velikosti úhlu náběhu. Přesto je možné sledovat snížení vodicích sil a celkových třecích výkonů při jízdě po koleji se speciálním tvarem příčných profilů hlav kolejnic.



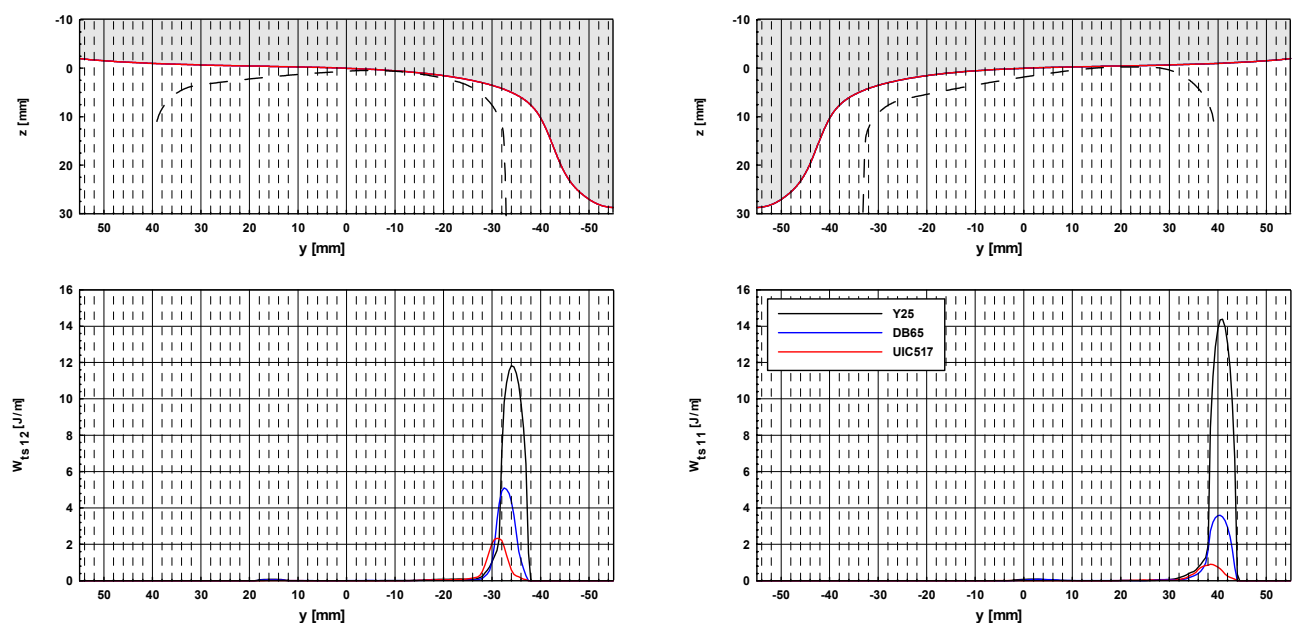
Obr. 31 Vodicí síly (podvozek Y25 – kombinace PPP-POREN, 1450 mm)



**Obr. 32** Vodící síly (podvozek Y25 – kombinace ABK-POREN, 1450 mm)

Navržené speciální příčné profily hlav kolejnic navíc umožňují díky vhodnějšímu průběhu funkce  $\Delta r$  a  $\tan \gamma$  měkčí příčnou vazbu dvojkolí v koleji, což se více projeví na koleji s horšími geometrickými parametry a rozchodem 1450 mm, kdy je u opotřebovaných příčných profilů strmost těchto funkcí velmi malá (viz Obr. 31 a Obr. 32).

Při jízdě po reálné koleji dochází ke změnám polohy a velikosti dotykové plochy. Před provedením výpočtů byl systém SJKV modifikován a doplněn tak, aby umožňoval vykreslit polohu kontaktu na hlavě kolejnice a jízdním obrysu kola (viz Obr. 33), výpočet modifikované velikosti dotykové plochy na základě aktuální kolové síly s omezením maximální hodnoty normálového napětí a výpočet vykonané měrné práce třecích sil v bodě dotyku za dobu trvání simulace [29], což dává představu o procesu opotřebovávání jednotlivých částí kontaktní dvojice (viz Přílohu 9.1.2 a Přílohu 9.2.2) i pro odhad vlivu speciálních příčných profilů hlav kolejnic na opotřebování jízdních obrysů kol provozovaných vozidel.

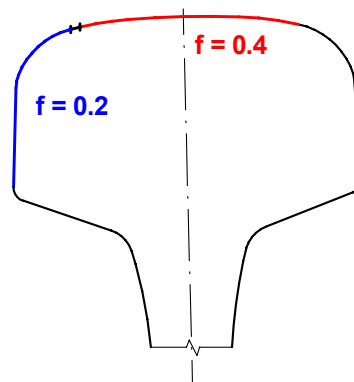


**Obr. 33** Rozložení práce třecích sil na jízdní ploše kola (ABK – POREN, 1439 mm) při průjezdu vozidla obloukem

Z grafů vyplývá, že se na nabíhajících kolech poloha kontaktu s kolejnicí neliší od současného stavu kontaktních poměrů, na vnitřních kolech je poloha oblasti dotyku vysunutá do části jízdního obrysu kola, která není běžně v provozu v kontaktu. Opotřebovávání jízdních obrysů kol by tedy nemělo mít výraznější vliv na změnu jízdních vlastností vozidel v obloucích větších poloměrů a přímé koleji. Naopak opotřebováváním této části se snižuje pravděpodobnost výskytu žlábků na jízdním obrysu kola.

### 10.3. Součinitel tření

Z důvodu intenzivního opotřebovávání vnější kolejnice v obloucích malých poloměrů způsobeného kontaktem kolejnice s okolcem kola, nabíhajícího pod určitým úhlem náběhu, byla provedena analýza možnosti využití modifikace součinitele tření na pojížděné hraně vnější kolejnice pomocí traťového mazacího zařízení [18], [38] k eliminaci opotřebení vnější kolejnice. Poloha mazané části pojížděné hrany hlavy vnější kolejnice je na Obr. 34.



**Obr. 34** Poloha oblastí s rozdílným součinitelem tření

Po úpravě příslušné části systému SJKV byly provedeny výpočty pro kvazistatický průjezd vozidla obloukem bez nerovností s aplikací mazání hrany vnější kolejnice. Výsledky (viz Přílohu 10) jsou ve formě sloupcových grafů a umožňují srovnání vodicích vlastností vozidel na kolejnicích s tvarem příčných profilů 60E2 a ABK, obojí ve variantě s mazáním i bez mazání.

Na základě rozboru výsledků simulačních výpočtů nákladních vozů je možné konstatovat:

- Porovnání vhodnosti mazání vnější kolejnice tvaru 60E2. Podvozek Y25 s pevnou vazbou vykazuje znatelné snížení celkového třecího výkonu, byť se zvyšují vodicí síly nabíhajících kol a úhel náběhu. U podvozku DB65 a pojezdu UIC517 z důvodu omezení možnosti pasivního stavění dvojkolí působením podélných skluzových sil dochází k výraznému nárůstu úhlu náběhu i vodicích sil na první nápravě, což vede k růstu příčné skluzové síly na vnitřním kole 1. nápravy a celkového třecího výkonu vozidla.

- Porovnání vhodnosti mazání vnější kolejnice se speciálním příčným profilem hlav kolejnic. Situace je podobná jako u kolejnice 60E2. Poněvadž však speciální příčný tvar hlav kolejnic umožňoval větší využití schopností pojezdů (především s radiálně stavitelnými dvojkolými - UIC517, DB65) a mazáním pojížděné hrany hlavy vnější kolejnice je tato schopnost na nabíhajících dvojkolích minimalizována (vede ke snížení podélných skluzových sil), je zvýšení úhlu náběhu, vodících sil, příčných skluzových sil na vnitřním kole 1. nápravy i celkového třecího výkonu v porovnání s variantou bez mazání kolejnice větší než v případě mazání pojížděné hrany vnější kolejnice 60E2.
- Porovnání tvaru 60E2 s tvarem ABK s mazáním vnější kolejnice. Z hlediska porovnání vodících vlastností ( $\Sigma Y$ ,  $Y$ ,  $\alpha$ ) jsou při použití mazání pojížděné hrany vnější kolejnice potlačeny výhody speciálních tvarů příčných profilů především v kombinaci s pojezdy UIC517 a DB65 a u většiny sledovaných veličin proto dochází k nárůstu. Z hlediska hodnocení opotřebení kolejnic i kol však dochází ke snížení celkových třecích výkonů (třecí výkon na okolku při dvoubodovém kontaktu není zohledněn).

Na základě rozboru výsledků je možné konstatovat následující závěry k simulačním výpočtům jízdy osobních vozů s aplikací mazání pojížděné hrany vnější kolejnice:

- Porovnání vhodnosti mazání vnější kolejnice tvaru 60E2. Všechny podvozky se chovají obdobně. Mazáním dojde k nepatrnému nárůstu úhlu náběhu a vodící síly na nabíhajících kolech, ale celkové třecí výkony se sníží.
- Porovnání vhodnosti mazání vnější kolejnice se speciálním příčným profilem hlav kolejnic. Situace je podobná jako u tvaru 60E2.
- Porovnání tvaru 60E2 s tvarem ABK s mazáním vnější kolejnice. Z hlediska porovnání vodících vlastností ( $\Sigma Y$ ,  $Y$ ,  $\alpha$ ) jsou vodící vlastnosti osobních podvozků, z důvodu pevné vazby dvojkolí v podélném směru, použitím speciálních tvarů příčných profilů málo ovlivněny. V případě aplikace mazání pojížděné hrany hlavy vnější kolejnice dochází k poklesu sumy vodících sil. Z hlediska opotřebení kolejnic i kol dochází ke snížení celkových třecích výkonů.

Z výsledků lze vyčíst, že úspěšnost ovlivnění opotřebení kolejnic a silového působení mezi vozidlem a kolejí při kombinaci speciálního tvaru příčných profilů hlav kolejnic a mazání vnější kolejnice je značně závislé na typu pojezdu vozidla a jeho zastoupení v provozu v daném traťovém úseku. Celkové hodnocení však ukazuje spíše na přínos kombinace obou opatření, neboť i přes určitý nárůst vodící síly na nabíhajících kolech a úhlu náběhu v závislosti na tuhosti vedení dvojkolí, je použitím speciálních příčných profilů hlav kolejnic snížen předstih dotykového bodu na okolku a mazáním jsou sníženy podélné a příčné (vhodné potlačit při brzdění vozidel) skluzové síly na

nabíhajících kolech, suma vodicích sil i celkový třecí výkon na vozidle. Aplikací mazání u speciálních příčných profilů hlav kolejnic navíc není negativně ovlivněna výhoda dostatečného rozdílu poloměrů valivých kružnic u nenabíhajících kol a z nich vyplývajících podélných skluzových sil, což snižuje rychlost růstu hloubky vlnkovitých nerovností na hlavě vnitřní kolejnice.

#### 10.4. Vlnkovitost

Během jízdy vozidla po koleji s nerovnostmi na hlavě vnitřní kolejnice v podélném směru (vlnkovitost) dochází vlivem změn kolových sil ke změnám velikosti dotykové plochy (v případě SJKV, podobně jako u některých jiných simulačních programů, se jedná o eliptickou dotykovou plochu počítanou podle Hertzovy teorie), což se v závislosti na velikosti normálové síly projeví ve velikosti normálového napětí a velikosti okamžitého součinitele adheze [3]. Jedním z předpokladů platnosti Hertzovy teorie je kontakt v oblasti pružných deformací. V extrémních případech kontaktu kola s kolejnicí (průjezd vozidel srdcovkovou částí výhybky či oblouky malých poloměrů s vysokou hodnotou nedostatku převýšení) není tento předpoklad mnohdy splněn, což vede k větším odchylkám od skutečnosti. Na základě dostupných experimentálních [34] i teoretických prací [22] bylo proto omezeno střední normálové napětí v dotykové ploše na 1000 MPa. Při jeho překročení dojde ve výpočtu ke zvětšení dotykové elipsy. Před samotným modelováním vlnkovitosti proto byly provedeny úpravy částí systému SJKV, které souvisí s výpočtem velikosti dotykové plochy a součinitele adheze podle velikosti aktuální kolové síly.

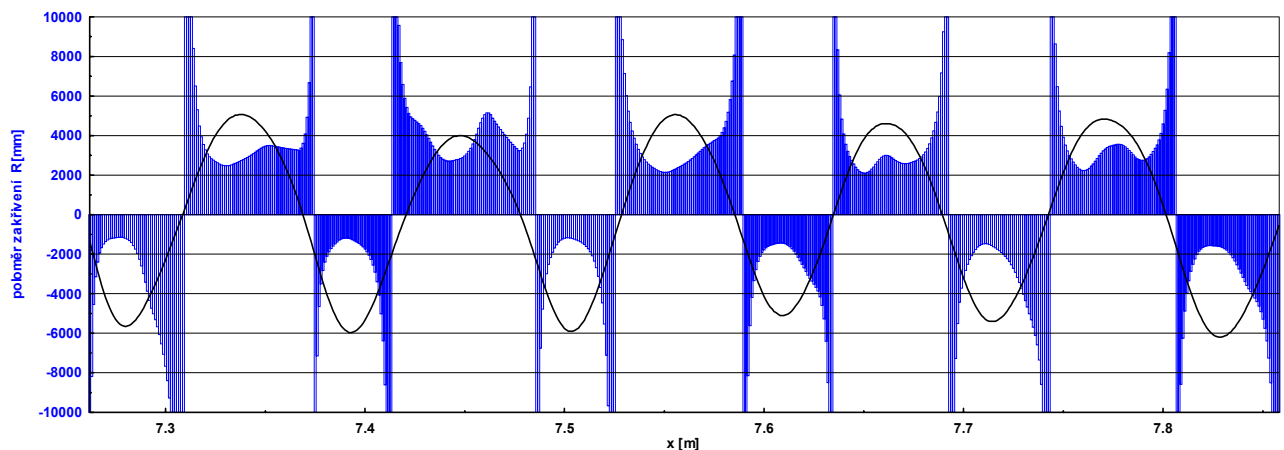
Modelování vlnkovitosti (viz *Přílohu 11*) lze rozdělit na dvě části a to

- Změna příčného a podélného profilu hlavy kolejnice. V systému SJKV došlo na základě změřených tvarů příčných profilů hlavy kolejnice (viz *Obr. 35*) a podélného tvaru vlnkovitosti (viz *Kap. 9.3*) ke změně ve výpočtu velikosti dotykové plochy za účelem zohlednění zakřivení podélné trajektorie vlnkovité kolejnice (viz *Obr. 36*). Zároveň bylo nutné provést změnu systému SJKV, která by umožnila simulaci jízdy vozidla po koleji s proměnlivým tvarem příčných profilů hlav kolejnic. K tomuto účelu byla ve výpočtech použita metoda bilineární interpolace mezi jednotlivými příčnými řezy v závislosti na aktuální ujeté dráze a příčné poloze dvojkolí v koleji.



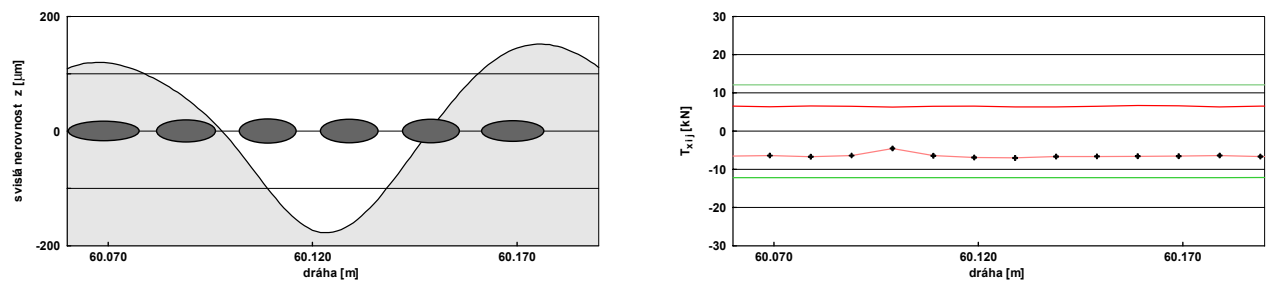
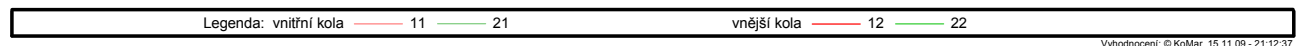


**Obr. 35** Sledování změn příčného profilu hlavy vnitřní kolejnice (1.TK, 20.07.08)

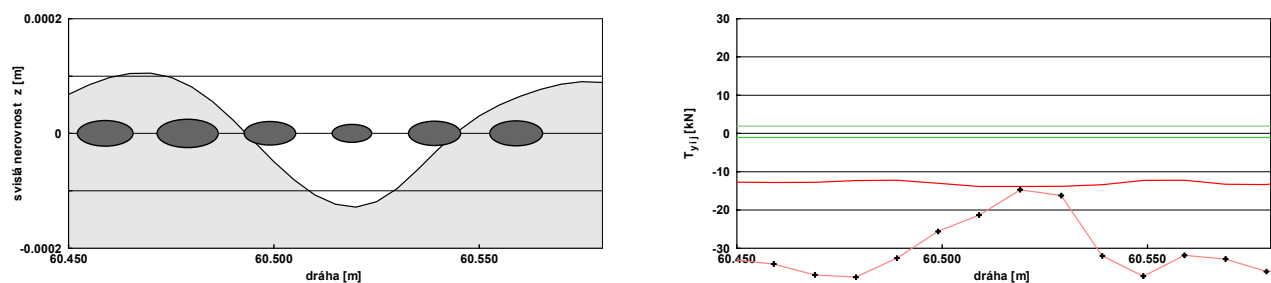


**Obr. 36** Průběh poloměrů zakřivení vypočítaných z měřené podélné trajektorie

- Změna podélného profilu hlavy kolejnice. Změřený podélný tvar vlnkovitosti (viz *Kap. 9.3*) byl po zpracování měřených dat modelován na koleji bez geometrických nerovností koleje jako svislá nerovnost.



**Obr. 37** Změny velikosti dotykové elipsy a podélných skluzových sil na vnitřním kole při změnách příčných profilů hlav kolejnic se zohledněním zakřivení kolejnice v podélném směru při výpočtu dotykové plochy (bez modelování svislé vlnkovité nerovnosti)

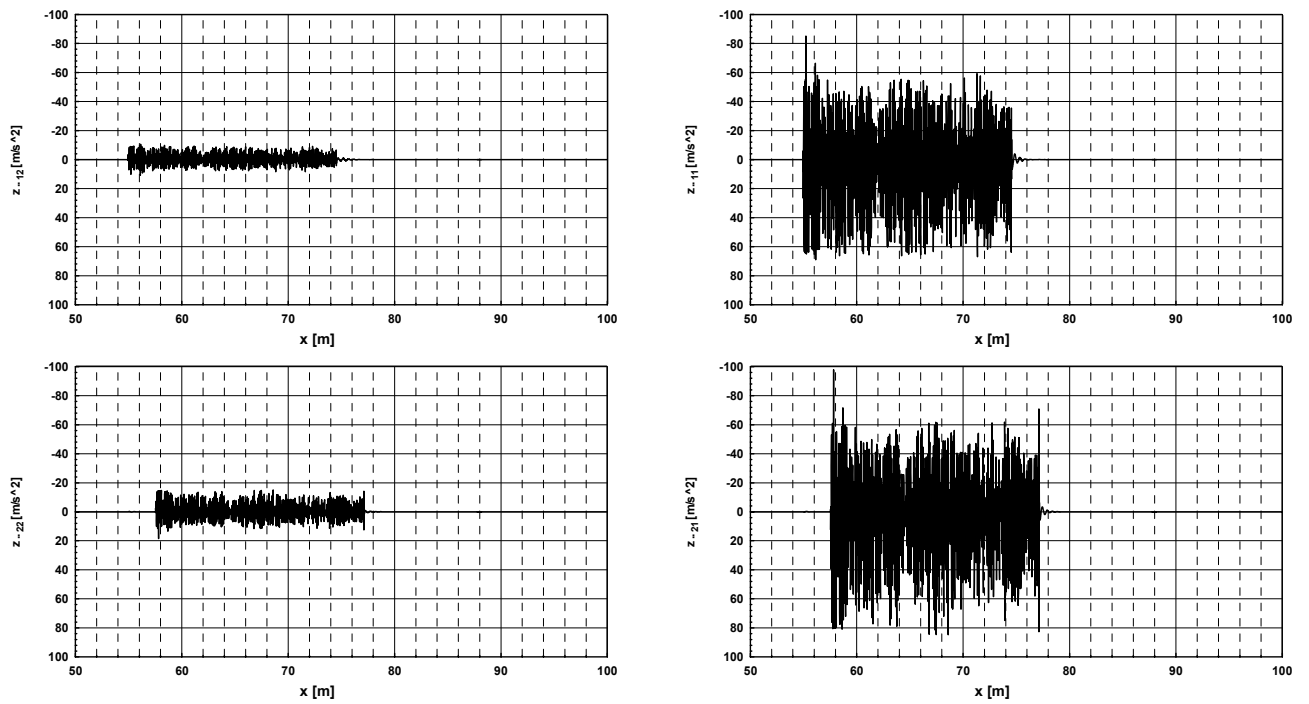


**Obr. 38** Změny velikosti dotykové elipsy a podélných skluzových sil na vnitřním kole při modelování pouze svislé nerovnosti (bez zohlednění zakřivení kolejnice v podélném směru a změn příčných profilů hlav kolejnic při výpočtu velikosti dotykové plochy)

Z porovnání výsledků simulačních výpočtů jednoznačně vyplývá, že změny velikostí dotykové elipsy jakož i podélných a příčných skluzových sil při zohlednění pouze změn poloměrů zakřivení podélné trajektorie a příčných profilů hlav kolejnic (viz Obr. 37 a Přílohu 11.1) jsou v porovnání se změnami dosaženými při modelování podélného profilu (vlnkovitosti) pouze jako svislé nerovnosti (viz Obr. 38, Přílohu 11.2 a Přílohu 11.3) zanedbatelné. Změny kolových sil, které mohou dosahovat i nulové hodnoty, tak mají dominantní vliv na využití adheze. Kromě šíření hluku a vibrací z koleje do okolí je to také důvod, proč je žádoucí snížení rychlosti vývoje skluzových vln na vnitřní kolejnici.

I přes snahu maximálního popisu tvarových změn hlavy vnitřní kolejnice, které jsou způsobeny opotřebčováním vnitřního kolejnicového pásu do tvaru skluzových vln, není možné porovnat výsledky simulace (viz Obr. 39) s výsledky měření zrychlení na ložiskové skříni (viz Přílohu 7). Je to způsobené především tím, že kolo i kolejnice jsou modelovány jako tuhá tělesa a model koleje (svršek i spodek) je pouze jednostupňový, bez frekvenční závislosti velikosti svislé tuhosti a tlumení (Reálné charakteristiky jednotlivých částí kolejového svršku a spodku jsou navíc velmi obtížně zjistitelné).





Obr. 39 Zrychlení na ložiskových skříních 1. podvozku měřicího vozu (výsledek simulace)

## 11. ZÁVĚREČNÉ SHRNUÍ VÝSLEDKŮ

Postupný vývoj příčných profilů hlav kolejnic jakož i vývoj jízdnic obrysů kol je orientovaný především na zajištění stability pohybu vozidel v přímé koleji při vyšších rychlostech jízdy. V přímé koleji je dnes možné sledovat minimální opotřebení takových tvarů hlavy kolejnice. I přes rozsáhlou modernizaci a optimalizaci koridorových tratí je ovšem v některých případech stále zachováno původní nevhodné trasování koleje s mnoha oblouky. V obloucích dochází navíc postupně také ke zvyšování rychlostí pro nová vozidla, která umožňují provoz s nedostatkem převýšení 130 mm, nebo jsou na velmi problematických obloukovitých tratích provozovány soupravy s naklápěcími skříněmi. Kromě zvyšování rychlosti je zvyšována také hmotnost na nápravu v osobní i nákladní dopravě, což vede k vyššímu celkovému zatěžování koleje v příčném směru. Důsledkem je intenzivnější opotřebování vnější i vnitřní kolejnice v obloucích malých poloměrů, které je daní za nevhodné trasování koleje a kombinaci tvarů používaných příčných profilů hlav kolejnic a jízdnic obrysů kol navržených především pro přímou kolej. Tento problém se bude rozšiřovat v nejbližší letech i na vedlejší tratě, které přebírají znaky dopravy z tratí hlavních (nové konstrukce a parametry vozidel i trati), a vyznačují se navíc větším počtem obloukovitých úseků.

### 11.1. Přínos práce pro praxi

Práce je zaměřena na hledání možností ke snížení velikosti opotřebení vnější kolejnice a zpomalení růstu vlnkovitosti na vnitřní kolejnici prostřednictvím ovlivnění kontaktní geometrie dvojkolí-kolej, neboť v současné době není tento nepříznivý stav nijak systémově řešen. Vzhledem k nutnosti zachování jízdnic vlastností vozidel v přímé koleji byl pro řešení problému zvolen návrh speciálních příčných profilů hlav kolejnic s následným ověřením teoretických předpokladů v provozních podmínkách.

Výsledný navržený tvar speciálních příčných profilů hlav kolejnic ve srovnání s běžně používanou kolejnicí tvaru 60E2 při kombinaci s jediným používaným tvarem jízdnic obrysů kol ORE S1002 (jízdnic obrys ZI-3 je používán na malém procentu vozů a hnacích vozidel, jejichž provoz je navíc povolen pouze na území České republiky) vytváří v obloucích malých poloměrů:

- vhodnější geometrické kontaktní poměry pro nabíhající kolo a vnější kolejnici. Při dvoubodovém dotyku snížením předstihu bodu dotyku na okolku nabíhajícího kola dojde k výraznému snížení skluzové rychlosti na okolku a tím i opotřebení okolku a hlavy vnější kolejnice.
- Strmější průběh funkce  $\Delta r$ . U nabíhajících dvojkolí tento průběh způsobí nárůst podélných skluzových sil, což se projeví příznivě především u vozů s vůlemi ve vedení dvojkolí nebo podélně měkčím vedením dvojkolí snížením úhlu náběhu a vodicích sil na nabíhajících kolech. Na nenabíhajících

dvojkolích, která zaujmají obecně statickou polohu v koleji, je strmější průběh funkce  $\Delta r$  naopak využít ke snížení podélných skluzových sil, které se podílí na rozvoji vlnkovitosti vnitřní kolejnice.

Na základě teoretické analýzy i výsledků měření je ovšem důležité zmínit, že:

- efektivnost vynaloženého úsilí i finanční výhodnost používání speciálních příčných profilů hlav kolejnic je závislá na konkrétní situaci (trasování koleje, technologii dopravy, typech provozovaných vozidel).
- Správná funkce použitých speciálních příčných profilů hlav kolejnic musí být spojena s jejich pravidelnou údržbou broušením, které je vhodné provádět v časovém intervalu nezbytném pro odstranění vlnkovitosti vnitřní kolejnice. Tím bude zaručeno, že nedojde ke zvyšování nákladů za broušení.

Porovnání výsledků simulačních výpočtů jízdy vozidel oblouky malých poloměrů a analýza výsledků měření provedených v rámci této práce prokázala vhodnost speciálních příčných profilů hlav kolejnic v případě oblouků malých poloměrů.

Výsledkem této práce je nalezení a potvrzení úzké vazby mezi změnou (postupnou, při opotřebování kolejnic, nebo řízenou, při broušení kolejnic) kontaktních podmínek dvojkolí-kolej a mezi ostatními parametry koleje (rychlostí změn geometrických parametrů koleje, nárůstem vlnkovitosti, opotřebením), což svědčí o nutnosti plánování údržbových zásahů na základě podrobné analýzy dostupných naměřených dat. Toto zjištění je velmi důležité také z hlediska projektování a strategického rozhodování o případných změnách v konstrukci koleje.

Pokud by se měla porovnat ekonomická výhodnost a efektivnost broušení speciálních příčných profilů hlav kolejnic, což nebylo cílem této práce, bylo by nutné vyčíslit všechny náklady, které vznikají na straně dopravní cesty (broušení kolejnic, výměna intenzivněji opotřebovaných kolejnic, poškozených upevňovadel či pružných podložek, prasknutých pražců a rozdrčeného štěrku, provádění podbíjení, zajištění výlukové činnosti, lidské práce) i na straně vozidel (soustružení a výměna do okolů opotřebených kol, opravy poškozených částí upevněných na neodpružených částech vozidla).

## 11.2. Přínos práce pro rozvoj vědní disciplíny

Při řešení disertační práce byla provedena rozsáhlá teoretická analýza vodicích vlastností běžně používaných podvozků v obloucích malých poloměrů pomocí simulačních výpočtů jízdy vozidla při variaci vybraných vstupních parametrů koleje i vozidel. Při řešení této práce byly provedeny následující nezbytné související kroky:

- Shromážděny údaje o vývoji tvaru opotřebených jízdních obrysů kol vozidel a příčných profilů hlav kolejnic v provozu, což jsou nezbytné informace pro jakékoliv teoretické analýzy jízdních i vodicích vlastností vozidel.
- Vytvořeny, doplněny, přepracovány a odladěny příslušné části systému SJKV tak, aby bylo možné modelovat libovolné změny kontaktní geometrie dvojkolí-kolej v průběhu jízdy vozidla, což se uplatní při modelování problematických míst jako je průjezd vozidla přechodnicí či výhybkou. Plynulé změny kontaktní geometrie dvojkolí-kolej v závislosti na ujeté dráze byly provedeny metodou bilineární interpolace v závislosti na podélné a příčné poloze jednotlivých dvojkolí v koleji během simulace.
- Vzhledem k extrémním kontaktním podmínkám mezi kolem a kolejnicí v obloucích malých poloměrů byla provedena algoritmicizace, vytvoření, úprava a odladění příslušné části systému SJKV pro výpočet:
  - velikosti dotykové plochy se zohledněním omezení maximálního napětí v dotykové ploše a přepočtem velikosti dotykové plochy podle aktuální kolové síly,
  - charakteristik kontaktní geometrie dvojkolí-kolej se zohledněním zakřivení hlavy kolejnice v podélném směru při výpočtu dotykové elipsy, včetně úpravy dat z kontaktního měření vlnkovitosti,
  - práce třecích sil v kontaktní ploše.

Práce tak přispěla k rozvoji a rozšíření možností využití systému SJKV v oblastech výzkumu změn kontaktní geometrie dvojkolí-kolej a zjišťování vodicích vlastností vozidel v obloucích malých poloměrů.

## 11.3. Další vývoj

V roce 2008 byl na základě žádosti SŽDC o spolupráci navržen a nabroušen modifikovaný tvar příčných profilů hlav kolejnic, který je nyní ve zkušebním provozu na trati Havlíčkův Brod-Kolín. Díky tomuto kroku pokračují teoretické i experimentální práce směrem ke snížení rychlosti opotřebovávání vnější i vnitřní kolejnice v obloucích malých poloměrů.

## LITERATURA

- [1] BUßMANN, C. : *Die Praxis der Bogenlaufberechnung im Wandel der Zeiten*. ZEVrail Glasers Analen 8/2004, s. 308-315.
- [2] ČÁP, J.: *Teoretický rozbor tečných a interaktivních sil ve styku kolo kolejnice*. Scientific Papers of the University of Pardubice, Series B, s. 29-47, Pardubice, 1999, ISBN 80-7194-283-9.
- [3] ČÁP, J. *Proměnná nápravová síla a tendence deformací adhezních charakteristik*. Scientific Papers of the University of Pardubice, Series B, s. 101-110, Pardubice, 1998, ISSN 1211-6610.
- [4] FUNKE, H.: *Broušení kolejnic*. ELKA PRESS, Praha, 1992.
- [5] HANNEFORTH, W., FISHER, W.: *Laufwerke*. Skripta. Transpress, VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin, 1986, ISBN 3-344-00037-3.
- [6] HORNÍK, J., RADAKOVIČ, A., POHL, R., ZELENKA, J.: *Geometrické poměry styku kola a kolejnice v oblouku*. Zborník prednášok z 5. celoštátnej konferencie „Súčasný problémy v koľajových vozidlách“, ČSVTS Žilina, 1981.
- [7] IZER, J., JANDA, J., MARUNA, Z., ZDRŮBEK, S.: *Kolejové vozy*. Skripta, ALFA, Bratislava, 1986.
- [8] IZER, J., ZELENKA, J.: *Charakteristiky kontaktní geometrie*. Scientific Papers of the University of Pardubice, Series B, s. 39-62, Pardubice, 1996, ISSN 1211-6610.
- [9] IZER, J., ZELENKA, J., LATA, M., CHALOUPECKÝ, T.: *Interakce koleje a vozidel s naklápací skříň při různém provozním stavu*. Zpráva DP 02/01, objednatel České dráhy s.o., Česká Třebová, prosinec 2001.
- [10] IZER, J., ZELENKA, J., LATA, M., MUSIL, M.: *Vozidlo a kolej na modernizovaných železničních tratích*. Závěrečná zpráva DP 01/00, objednatel Ministerstvo dopravy ČR, Česká Třebová, březen 2000.
- [11] IZER, J., ZELENKA, J., LATA, M., CHALOUPECKÝ, T., SKOŘEPA, P.: *Výzkum vodících vlastností podvozků*. Zpráva č. SP 03/01, objednatel České dráhy s.o., Česká Třebová, prosinec 2001.
- [12] IZER, J., ZELENKA, J.: *Výzkum bezpečnosti jízdy kolejového vozidla. Výzkum vedení vozidla kolejí*. Zpráva. Žilina, 1992.
- [13] IZER, J., ZELENKA, J.: *Návrh profilu tramvajového kola pro podmínky DP města Brna*. Zpráva. Objednatel Dopravní podnik města Brna, Česká Třebová, 1994.
- [14] KOHOUT, M., ZELENKA, J.: *Monitoring of track parameter changes in relation to running behavior of railway vehicles*. Reliability, safety and diagnostics of transport structures and means 2008. s. 154-160, Pardubice, 2008, ISBN 978-80-7395-096-5.
- [15] KOHOUT, M., ZELENKA, J., HÁBA, A. *Studies of wheel-rail contact conditions in curves of small radius*. Proceedings of 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, s. 631-637, AB Editore, Firenze, 2009, ISBN 978-88-904370-0-7.

- [16] KOHOUT, M., ZELENKA, J.: *Measuring of Railhead Profiles*. 2<sup>nd</sup> international PhD Conference on Mechanical Engineering - PhD 2004, s. 59-61, ZČU Plzeň, 2004, ISBN 80-7043-330-2.
- [17] KOTRBA, A., ZELENKA, J.: *Provoz lokomotiv s jízdním obrysem ZI-3 v DKV Brno*. 16. mezinárodní konference Súčasný problémy v kolejových vozidlách – PRORAIL 2003. s. 341-347, EDIS, Žilina, 2003, ISBN 80-968823-6-8.
- [18] MARKUS, G., FEINLE, P.: *Verschleißreduzierung an Rädern und Schienen durch Spurkranzschmierstoffe und angepasste Werkstoffpaarungen*. EI-Eisenbahningenieur 4/2001, s. 48-57.
- [19] MARUNA, Z.: *Základy pohybu po koleji*. Scientific Papers of the University of Pardubice, Series B, s. 23-28, Pardubice, 1996, ISSN 1211-6610.
- [20] MORAVČÍK, M.: *Dynamická odozva jízdy vozidla po koľaji*. Disertační práce. Univerzita Pardubice, DFJP, 2005.
- [21] POLÁCH, O.: *Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit*. s. 992-1000, Wear Nr. 258, Elsevier, 2005, ISSN 0043-1648.
- [22] TELLISKIVI, T., OLOFSSON, U.: *Contact mechanics analysis of measured wheel-rail profiles using the finite element method*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, Journal of Rail and Rapid Transit, 2001, Vol. 215, pp. 65-72.
- [23] TUREK, J., GIRSA, P.: *Vliv vodících sil na deformaci systému upevnění-kolejnice*. Technická zpráva v rámci projektu „Vozidlo a kolej na modernizovaných železničních tratích“. KŽV Praha, 1996.
- [24] SÁLA, P.: *Inovace programového systému pro simulační výpočty jízdy vozidel*. Disertační práce. Univerzita Pardubice, DFJP, Pardubice, 2004.
- [25] SCHEFFEL, H., SMIT., P. H., R. E. von GERICKE: *Shear Stiffener Linkages For Radial Bogies*. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Railway Bogies and Running Gears, s. 85-93, Technical University of Budapest, Budapest, 1998, ISBN 963-420-608-5.
- [26] STICHEL, S., JENDEL, T.: *Running Behavior of Freight Wagons with Three Different Types of Running Gear – Simulations and Tests*. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Railway Bogies and Running Gears, s. 143-152, Technical University of Budapest, Budapest, 1998, ISBN 963-420-608-5.
- [27] ŠVEJNOCH, V. a kol.: *Teorie kolejových vozidel*. Skripta, ČVUT, Praha, 1991, ISBN 80-01-00622-0
- [28] SCHÖCH, W.: *Achieving multiple advantages through special grinding*. International Conference & Interactive Forum: Achieving Best Practice in Wheel/Rail Interface Management, Amsterdam, 2002.
- [29] ZELENKA, J.: *Problematika vytváření opotřebovaného jízdního obrysu kol lokomotivy*. XIII. Mezinárodní konference Súčasný problémy v kolejových vozidlech. Sborník přednášek, s. 281-292, Univerzita Pardubice, Pardubice, 1997, ISBN 80-7194-105-0.

- [30] ZELENKA, J., KOHOUT, M., HÁBA, A.: *Posouzení provozních změn parametrů kolejových vozidel na dynamické působení vozidla a na cestujícího*. Zpráva VCKV, C2-01/2006, Pardubice, 2006.
- [31] ZELENKA, J.: *Řešení neeliptického kontaktu kolo-kolejnice z hlediska přenosu podélných sil mezi kolem a kolejnicí*. Zborník prednášok z celoštátneho seminára ŽELSEM 1991 „Železničné vozidlá v koľaji“, VŠDS Žilina, 1991, ISBN 80-7100-067-1.
- [32] ZELENKA, J., IZER, J.: *Geometrické vztahy systému dvojkolí-kolej*. Strojnický časopis č. 6/1990, s. 661-675, ISSN 0039-2472.
- [33] ZELENKA, J., IZER, J.: *Nový jízdní obrys železničního kola a jeho zkušební provoz*. Vědeckotechnický sborník ČD, s. 61-78, Praha, 2000, ISSN 1211-2321.
- [34] ZELENKA, J.: *Silové a třecí poměry železničního kola vedeného kolejnicí*. Disertační práce, VŠDS ŽILINA, 1989.
- [35] VOLTR, P.: *Rekonstrukce dvounápravového nákladního vozu*. Diplomová práce. Pardubice, 2009.
- [36] ČSN EN 13674-1+A1: *Železniční aplikace – Kolej – Kolejnice – Část:1: Vignolovy železniční kolejnice o hmotnosti 46 kg/m a větší*. Český normalizační institut, 2008.
- [37] ČSN EN 14363: *Železniční aplikace – Přejímací zkoušky jízdních charakteristik železničních vozidel – Zkoušení jízdních vlastností a stacionární zkoušky*. Český normalizační institut, 2006.
- [38] ČSN EN 15427: *Železniční aplikace - Řízení procesu tření ve vztahu kolo/kolejnice - Mazání okolků*. Český normalizační institut, 2009.
- [39] ČSN EN 736360-1: *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha - Část 1: Projektování*. Český normalizační institut, 2008.
- [40] ČSN EN 736360-2: *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha - Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba*. Český normalizační institut, 2007.
- [41] *Rolling Contact Fatigue in Rails; A Guide To Current Understanding And Practice*. Heron Press, Birmingham, 2001.
- [42] ORE 172/RP 1: *Verbesserung der Fahrt in Gleisbögen*. Utrecht, April 1990.
- [43] SR103/4 (S): *Využívání měřicích vozů pro železniční svršek s kontinuálním měřením tratě pod zatížením*. Předpis, České dráhy s.o., Praha, 2007.
- [44] S67: *Vady a lomy kolejnic*. Předpis, České dráhy s.o., DDC, o.z., 1997.
- [45] V25, příloha č. 9.: *Předpis pro organizaci údržby elektrických a motorových hnacích vozidel, osobních, vložených, přípojných a řídicích vozů*. Předpis, České dráhy s.o., Praha, 2000.

## SEZNAM PŘÍLOH

### **Příloha 1 Jízdní obrysy kol (výsledky měření)**

### **Příloha 2 Příčné profily hlav kolejnic v obloucích (výsledky měření)**

Příloha 2.1 1.TK (opotřebení kolejnic)

Příloha 2.2 2.TK (opotřebení kolejnic)

Příloha 2.3 1.TK a 2.TK (změna tvaru hlav kolejnic, průměrovaný opotřeбенý tvar)

### **Příloha 3 Charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí-kolej (výsledky výpočtů)**

Příloha 3.1 Charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí-kolej (teoretické příčné profily hlav kolejnic a teoretické jízdní obrysy kol, rozchod koleje 1450 mm)

Příloha 3.2 Charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí-kolej (teoretické příčné profily hlav kolejnic a opotřeбенé jízdní obrysy kol, rozchod koleje 1435 mm)

Příloha 3.3 Charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí-kolej (příčné profily hlav kolejnic a opotřeбенé jízdní obrysy kol, rozchod koleje 1450 mm)

Příloha 3.4 Funkce  $\Delta r$  (shrnutí výsledků *Přílohy 3.1* a *Přílohy 3.2*)

### **Příloha 4 Simulační výpočty jízdy kolejových vozidel (výsledky výpočtů pro návrh speciálních příčných profilů hlav kolejnic)**

Příloha 4.1 Nákladní vozy – prázdné

Příloha 4.2 Nákladní vozy – ložené

Příloha 4.3 Osobní vozy

### **Příloha 5 Geometrické parametry koleje (výsledky měření)**

### **Příloha 6 Podélný profil hlavy vnitřní kolejnice (výsledky měření)**

Příloha 6.1 1.TK (výsledky měření podélného profilu hlavy vnitřní kolejnice)

Příloha 6.2 2.TK (výsledky měření podélného profilu hlavy vnitřní kolejnice)

### **Příloha 7 Interakce vozidla a koleje v obloucích (výsledky měření)**

Příloha 7.1 Měřicí vůz (výsledky měření dynamických účinků)

Příloha 7.2 Lokomotiva 263 (výsledky měření dynamických účinků)



**Příloha 8 Simulační výpočty jízdy kolejových vozidel (výsledky výpočtů se zohledněním brzdné síly)**

Příloha 8.1 Nákladní vozy – ložené

Příloha 8.2 Osobní vozy

**Příloha 9 Simulační výpočty jízdy kolejových vozidel (výsledky výpočtů se zohledněním reálných geometrických parametrů koleje)**

Příloha 9.1 Nákladní vozy – ložené

Příloha 9.2 Osobní vozy

**Příloha 10 Simulační výpočty jízdy kolejových vozidel (výsledky výpočtů se sníženým součinitelem tření na pojižděné hraně hlavy vnější kolejnice)**

Příloha 10.1 Nákladní vozy - ložené

Příloha 10.2 Osobní vozy

**Příloha 11 Simulační výpočty jízdy kolejových vozidel (výsledky výpočtů se zohledněním podélného profilu hlavy vnitřní kolejnice)**

Příloha 11.1 Nákladní vůz s pojezdem UIC517 (výsledky výpočtů se zohledněním pouze kontaktní geometrie podélného profilu hlavy vnitřní kolejnice)

Příloha 11.2 Nákladní vůz s pojezdem UIC517 (výsledky výpočtů se zohledněním pouze svislé nerovnosti podélného profilu hlavy vnitřní kolejnice)

Příloha 11.3 Měřicí vůz s podvozkem GP200 (výsledky výpočtů se zohledněním pouze svislé nerovnosti podélného profilu hlavy vnitřní kolejnice)