



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB**

INSTITUTE OF RAILWAY STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

**ROZVOJ SKLUZOVÝCH VLN V OBLoucÍCH  
MALÝCH POLOMĚRŮ**

DEVELOPMENT OF LONG-PITCH CORRUGATION IN CURVES OF SMALL RADII

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ing. Jan Valehrach

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. OTTO PLÁŠEK, Ph.D.

**BRNO 2021**

Disertační práce – Ing. Jan Valehrach

Rozvoj skluzových vln v obloucích malých poloměru

---

---

## ABSTRAKT

Vlivem provozu dochází k opotřebování a poškození kolejnic. Se zvyšující se rychlostí kolejových vozidel, s vyšším zatížením tratí, a především v okolí spádových center s vyšší frekvencí spojů se do popředí zájmů správců tratí dostávají vady, které se dříve nevyskytovaly v takové hojné míře nebo nebyly brány jako významné. Nejsou-li tyto vady přímo omezující pro provozuschopnost, jsou v každém případě zdrojem hluku a vibrací. Jednou z vad, vyskytující se na železniční dopravní cestě, jsou vady mikrogeometrie pojížděné plochy hlavy kolejnice. Ve směrových obloucích s poloměrem menším než 600 m, případně 700 m, se na vnitřním kolejnicovém pásu vyskytují vady označované jako skluzové vlny. V obloucích o poloměrech 300 m a méně jsou tyto vlny natolik výrazné, že jsou významným zdrojem hluku a vibrací. Především vibrace mají vliv nejen na okolí tratí, ale i na samotnou trať, neboť jsou příčinou dalších vad v konstrukci koleje.

Tato disertační práce se věnuje tématu skluzových vln se zaměřením na sledování vzniku a rozvoje vln v čase. Ověření možnosti sledování rozvoje skluzových vln v čase je základem pro případné budoucí modely predikující rozvoj vad.

V rámci řešení dané problematiky byla uskutečněna četná měření geometrických parametrů koleje a mikrogeometrie hlav kolejnic, konkrétně skluzových vln. Pomocí metod RMS a peak-to-peak byla hodnocena rychlost rozvoje vad v čase a vztah k dalším parametrům koleje. Na základě získaných křivek rozvoje byly odhadnuty intervaly pro další opravné zásahy.

Část práce se věnuje nedostatku, resp. přebytku převýšení v souvislosti s rozvojem skluzových vln.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Skluzové vlny, mikrogeometrie kolejnice, železniční svršek, kolej, kolejnice, pražec, upevnění kolejnic na pražci, rychlost vlaku, převýšení koleje, nedostatek převýšení, přebytek převýšení, dvojkolí, broušení kolejnic.

---

## **ABSTRACT**

Throughout the operation, the rails are worn and deteriorate. With the increasing speed of rolling stock, along with higher track loads and especially in the vicinity of major traffic hubs with a higher frequency of trains, defects that did not occur to such an extent before or were not considered to be significant, are brought to the forefront of the concerns of track infrastructure managers. Even though these defects are not directly restrictive to traffic operation, they are, in any case, a source of noise and vibration. One of these defects on the railway track is the micro-geometry defect of the running surface of the railhead. In directional curves with radii of less than 600 m or 700 m, defects known as long-pitch corrugation occur on the inner rail. In curves with 300 m or smaller radii, these waves are so distinct that they are a significant source of noise and vibration. In particular, vibrations affect the track surroundings and the track itself, as they cause other defects in the track structure.

This dissertation deals with long-pitch corrugation, focusing on the monitoring of wave generation and development over time. The verification of the possibility to track the development of slip waves over time is the basis for possible future models predicting the development of defects.

Numerous measurements of geometric parameters of the track and microgeometry of the railheads, specifically slip waves, have been carried out in the framework of the problem. Using RMS and peak-to-peak methods, the rate of development of defects over time and the relationship with other track parameters were evaluated. Based on the obtained development curves, intervals for further maintenance interventions were estimated.

A part of the thesis focuses on the deficiency or excess of cant concerning the development of long-pitch corrugation.

## **KEYWORDS**

Long-pitch corrugation, rail microgeometry, permanent way, track, rail, sleeper, rail fastening, train speed, cant, cant excess, cant deficiency, wheelset, rail grinding.

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Ing. Jan Valehrach *Rozvoj skluzových vln v obloucích malých poloměrů*. Brno, 2021. 122 s., 37 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.

---

Disertační práce – Ing. Jan Valehrach

Rozvoj skluzových vln v obloucích malých poloměru

---

---

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Rozvoj skluzových vln v obloucích malých poloměrů zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2021

---

Ing. Jan Valehrach

autor práce

---

Disertační práce – Ing. Jan Valehrach

Rozvoj skluzových vln v obloucích malých poloměru

---

---



## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především doc. Ing. Ottu Pláškovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady a věnovaný čas. Také bych rád poděkoval Dr.-Ing. Ulfu Gerberovi za pomoc při pochopení základů řešené problematiky.

Na vzniku této práce mi pomohla velká řada osob, a protože bych nerad na někoho zapomněl, děkuji tímto všem kolegyním, kolegům a studentům nejen z Ústavu. Bez jejich spolupráce by nebylo možné čtená měření uskutečnit.

Taktéž děkuji zaměstnancům Správy železnic za poskytnutá data, možnosti měření a cenné rady.

V neposlední řadě bych rád poděkoval svoji rodině a kamarádům za podporu, trpělivost a naději.

---

Disertační práce – Ing. Jan Valehrach

Rozvoj skluzových vln v obloucích malých poloměru

---

---

## OBSAH

OBSAH.....	1
SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A SYMBOLŮ.....	3
SEZNAM ZKRATEK.....	5
ÚVOD.....	6
1 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ.....	8
1.1 Vady kolejnic.....	8
1.1.1 <i>Obecně</i> .....	8
1.1.2 <i>Zatřídění vady a názvosloví</i> .....	8
1.1.3 <i>Popis vlnovitých deformací</i> .....	9
1.1.4 <i>Další související vady</i> .....	13
1.1.5 <i>Negativní důsledky výskytu skluzových vln na okolí tratě</i> .....	14
1.2 Teoretický základ popisující vznik skluzových vln.....	15
1.2.1 <i>Konstrukce železničních vozidel</i> .....	15
1.2.2 <i>Jízda vozidla</i> .....	16
1.2.3 <i>Teorie vzniku skluzových vln</i> .....	19
1.2.4 <i>Kontakt kolo-kolejnice</i> .....	22
1.2.5 <i>Parametry tratí</i> .....	26
1.3 Stávající způsoby sběru, zpracování a vyhodnocování dat.....	30
1.3.1 <i>Sběr dat</i> .....	30
1.3.2 <i>Diagnostické prostředky</i> .....	31
1.3.3 <i>Zpracování dat</i> .....	34
1.3.4 <i>Výstup dat</i> .....	35
1.3.5 <i>Rozhodovací proces</i> .....	35
1.4 Stávající způsoby odstraňování a potlačování skluzových vln.....	38
1.4.1 <i>Fyzické odstranění</i> .....	38
1.4.2 <i>Preventivní opatření</i> .....	41
2 CÍLE PRÁCE.....	45
3 METODIKA VÝZKUMNÉ ČINNOSTI.....	46
3.1 Metodika sledování vlnovitých deformací.....	46
3.1.1 <i>Teoretický úvod</i> .....	46
3.2 Sledované úseky.....	47
3.2.1 <i>Výběr úseků</i> .....	47
3.2.2 <i>Popis úseků</i> .....	48
3.3 Měření.....	52
3.3.1 <i>Měření vlnovitých deformací pojezděné plochy hlavy kolejnice</i> .....	54
3.3.2 <i>Evidenční úseky</i> .....	58
3.3.3 <i>Měření souvisejících geometrických parametrů koleje</i> .....	58

3.3.4	<i>Měření související parametrů dopravy</i> .....	61
3.3.5	<i>Další parametry</i> .....	62
3.4	Zpracování dat.....	63
3.4.1	<i>Úvod</i> .....	63
3.4.2	<i>Vlnovité deformace</i> .....	65
3.4.3	<i>Sledování souvisejících geometrických parametrů koleje a provozních parametrů</i> .....	67
3.4.4	<i>Výpočet váženého nedostatku a přebytku převýšení</i> .....	69
3.5	Vyhodnocení .....	69
3.5.1	<i>Sledovatelnost parametrů</i> .....	69
3.5.2	<i>Sledování rychlosti rozvoje skluzových vln</i> .....	73
3.5.3	<i>Nedostatek/přebytek převýšení koleje</i> .....	87
3.5.4	<i>Simulace změny převýšení/změny rychlosti v daném úseku</i> .....	98
4	PŘEHLED A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ .....	101
4.1	Predikce rozvoje .....	101
4.1.1	<i>Podle přechozího rozvoje vady</i> .....	101
4.1.2	<i>Podle stanovených mezí</i> .....	104
4.2	Porovnání rychlosti rozvoje s nedostatky převýšení ve sledovaných úsecích	105
4.3	Návrh nových rychlostí ve sledovaných úsecích .....	105
5	ZÁVĚR.....	107
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	109
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	117
	SEZNAM TABULEK.....	121

## SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A SYMBOLŮ

$a_i$	amplitudy mikro-výšek [ $\mu\text{m}$ ]
$2a$	vůle mezi rozchodem koleje a rozchodem okolků, tzv. „volný pás“ [mm]
$2a_p$	odlehlost posledního dvojkolí [mm]
$d$	rozvor vozu nebo podvozku [m]
$D$	převýšení koleje [mm]
$D_{EQ}$	teoretické převýšení [mm]
$D_{N1}$	doporučené převýšení [mm]
$D_{váž}$	převýšení koleje vypočítané z váženého nedostatku převýšení koleje [mm]
$E$	přebytek převýšení koleje [mm]
$E_{hl}$	přebytek převýšení koleje při jízdě vlaku hlavními kolejemi [mm]
$E_{př}$	přebytek převýšení koleje při jízdě vlaku předjízdnyými kolejemi [mm]
$E_{váž}$	vážený přebytek převýšení koleje [mm]
$F_t$	třecí síla na kontaktu kolo-kolejnice [kN]
$G$	modul pružnosti ve smyku [Pa]
$I$	nedostatek převýšení koleje [mm]
$I_{hl}$	nedostatek převýšení koleje při jízdě vlaku hlavními kolejemi [mm]
$I_p$	polární moment setrvačnosti [ $\text{m}^4$ ]
$I_{př}$	nedostatek převýšení koleje při jízdě vlaku předjízdnyými kolejemi [mm]
$I_{váž}$	vážený nedostatek převýšení koleje [mm]
$k$	směrnice lineární regrese [-]
$L$	délka vypočetního okénka [m]
$L_{e,p}$	délka zobrazení hodnot RMS a P2P [m]
$L_k$	délka sinusové vlny pro pohyb dvojkolí v přímé [m]
$L_m$	změřená délka měřicího místa [m]
$m$	hmotnost vlaku [t]
$M$	moment namáhající nápravu dvojkolí [kN.m]
$o$	vzdálenost prvního dvojkolí od středu otáčení [m]
$o_v$	vzdálenost prvního dvojkolí od středu otáčení při vzpříčené poloze [m]
$P$	řídící síla [kN]
$Q$	jmenovitá kolová síla [kN]
$R$	poloměr oblouku [m]
$R^2$	koeficient determinace [-]
$R_{krit}$	kritický poloměr oblouku [m]
$r$	jmenovitý poloměr kol dvojkolí [mm]
$r_e$	okamžitý poloměr vnějšího kola dvojkolí [mm]
$r_i$	okamžitý poloměr vnitřního kola dvojkolí [mm]

---

$\Delta r$ .....	rozdíl okamžitých poloměrů valení kol dvojkolí [mm]
$S$ .....	střed otáčení, střed směrového oblouku [-]
$s$ .....	vzdálenost styčných kružnic (1500 mm) [mm]
$t$ .....	čas [den]
$T$ .....	třecí síla [kN]
$u$ .....	rozchod koleje [mm]
$v, V$ .....	rychlost [m.s <sup>-1</sup> , km.h <sup>-1</sup> ]
$V_{hl}, V_{př}$ .....	rychlost v hlavních kolejích, resp. v předjízdných kolejích [km.h <sup>-1</sup> ]
$V_{váž}$ .....	rychlost vypočítaná z váženého nedostatku převýšení koleje [km.h <sup>-1</sup> ]
$V_n$ .....	nově navržená rychlost [km.h <sup>-1</sup> ]
$V_{NP}$ .....	rychlost z Nákrešného přehledu železničního svršku [km.h <sup>-1</sup> ]
$v_y$ .....	skluzová rychlost [m.s <sup>-1</sup> ]
$x$ .....	vzdálenost od počátku, obecně x-ová souřadnice [m]
$x_e$ .....	vzdálenost uražená vnitřním kolem při pootočení o úhel $\varphi_e$ [m]
$x_i$ .....	vzdálenost uražená vnitřním kolem při pootočení o úhel $\varphi_i$ [m]
$y$ .....	příčné posunutí dvojkolí v koleji [mm], obecně y-ová souřadnice [m]
$y_i$ .....	vzorek signálu [ $\mu\text{m}$ ]
$y(x)$ .....	hodnoty odečtené snímači měřícího zařízení [ $\mu\text{m}$ ]
$\Delta y_{\max}$ .....	maximální příčné posunutí dvojkolí v koleji [mm]
$Y$ .....	vodící síla [kN]
$\lambda$ .....	délka vlny [mm]
$\lambda_p$ .....	délky nejdelší vlny daného pásma [mm]
$\alpha$ .....	úhel náběhu dvojkolí [grad]
$\alpha_1$ .....	úhel náběhu odpovídající těživové poloze [grad]
$\alpha_2$ .....	úhel mezi těživovou a statickou polohou [grad]
$\gamma$ .....	kuželovitost obrysu [-]
$\varepsilon_x$ .....	podélný skluz [-]
$\varepsilon_y$ .....	příčný skluz [-]
$\mu$ .....	koeficient tření [-]
$\varphi_e$ .....	úhel pootočení vnějšího kola [grad]
$\varphi_i$ .....	úhel pootočení vnitřního kola [grad]
$\Delta\varphi$ .....	rozdíl úhlů $\varphi_e$ a $\varphi_i$ [grad]
$\Psi$ .....	středový úhel při délce vlny $\lambda$ [grad]
$\omega$ .....	úhlová rychlost [rad·s <sup>-1</sup> ]

---

## SEZNAM ZKRATEK

AVV.....	Automatické vedení vlaku
ČSN.....	Česká technická norma
CTD.....	Centrum telematiky a diagnostiky, dříve TÚDC
D1.....	vlnové pásmo 10–30 mm
D2.....	vlnové pásmo 30–100 mm
D3.....	vlnové pásmo 100–300 mm
D4.....	vlnové pásmo 300–1000 mm
DB AG.....	Německé dráhy (Deutsche Bahn AG)
DSD.....	datový sklad diagnostiky
EN.....	Evropská norma
ETCS.....	vlakový zabezpečovací systém (European Train Control System)
FFT.....	rychlá Fourierova transformace
GPK.....	geometrické parametry koleje
HC.....	head-check
IRS.....	normy a dokumenty UIC (International Railway Solution)
NAD.....	náhradní autobusová doprava
ÖBB.....	Rakouské spolkové dráhy (Österreichische Bundesbahnen)
OJ_LB.....	boční ojetí levého kolejnicového pásu
OJ_PB.....	boční ojetí pravého kolejnicového pásu
P2P.....	„špička-špička“ tj. rozdíly po sobě jdoucích vrcholů amplitud („peak-to-peak“)
P2Pm.....	„peak-to-peak“ z měřicího vozu pro železniční svršek (modifikované)
P2Pms.....	suma „peak-to-peak“ modifikovaných
PK.....	převýšení koleje
RCMS.....	měřicí systém mikrogeometrie hlavy kolejnic
RK.....	celkový rozhod koleje
RMS.....	root mean square, zde směrodatná odchylka
SŽ.....	Správa železnic, státní organizace, dříve SŽDC
SŽDC.....	Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, dnes SŽ
TÚDC.....	Technická ústředna dopravní cesty, dnes CTD
UIC.....	Mezinárodní železniční unie (Union Internationale des Chemins de fer)

## ÚVOD

Vlivem provozu dochází k opotřebování a poškozování kolejnic [1]. Dále se zvyšující se rychlostí kolejových vozidel, s vyšším zatížením tratí, a především v okolí spádových center (měst) s vyšší frekvencí spojů se do popředí zájmů správců tratí dostávají vady, které se dříve nevyskytovaly v takové hojné míře nebo nebyly brány jako významné z pohledu omezení provozuschopností tratí. Správce infrastruktury bude logicky větší pozornost věnovat vadám a poruchám, které snižují bezpečnost provozu (např. vybočení koleje) nebo vadám a poruchám, jež nejsou-li včas odstraněny, mohou se časem projevit mnohem závažněji (např. z vady typu head-check se může vyvinout lom kolejnice). Postupem času jsou však na správce tratí kladeny i další požadavky. Jedná se především o eliminaci nebo redukci negativních vlivů tratě na svoje okolí. Tyto vlivy se nejčastěji projevují zvýšenou hlučností nebo přenosem vibrací při průjezdu drážních vozidel.

Jedním ze zdrojů hluku na železniční dopravní cestě jsou vlnovité deformace pojížděné plochy hlavy kolejnice. Konkrétně v obloucích malých poloměrů (300 m a méně) se vyskytují vady označované jako skluzové vlny.

Skluzové vlny, patřící do skupiny krátkých vln, jsou vlnovité nerovnosti na pojížděné ploše, jejichž vyvýšeniny mají rozteč mezi 8 a 30 cm. Jejich hloubka se pohybuje mezi 0,1 a 1,2 mm. Vyvýšeniny i prohlubně vypadají stejnoměrně světle. Vyskytují se především na vnitřním kolejnicovém pásu směrových oblouků s poloměrem menším než 600 m, případně 700 m [2, 3].



*Obr. 1 Skluzové vlny v Babicích nad Svitavou*



Tratě se skluzovými vlnami nebo vlnkovitostí vyžadují častější a nákladnější údržbu (broušení, výměnu kolejnic atd.). Výluky spojené s pracemi na tratích jsou negativně vnímány nejen cestující veřejností, ale i dopravci, kdy na rozdíl od silniční dopravy jsou opatření spojená s výlukovou činností mnohem složitější, neboť není vždy možné zajistit objízdné trasy.

Skluzové vlny se objevují nejen na železničních tratích včetně metra, ale i na tratích tramvajových.

Z výše uvedených důvodů je velice důležitá nejen prevence vzniku a rychlého rozvoje vad, ale i možnost dlouhodobého plánování (výluky, údržba, finance) na základě předpovědi chování vad. Aby bylo možné předpovědět chování určité vady či zhoršování stavu tratě, je nutné znát, jakým způsobem a jak rychle se daná vada rozvíjí či stav zhoršuje. Tato práce si klade za cíl nalezení parametrů vhodných ke sledování rychlosti rozvoje skluzových vln a popsání rychlosti rozvoje.

Zpracování řešené problematiky probíhalo několik let, proto v daném období došlo k několika změnám – změna názvu SŽDC na SŽ, změna přístupu správce infrastruktury k dané problematice apod. Některá konstatování jsou být vztažena k stavu v době zpracování.

# 1 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

## 1.1 VADY KOLEJNIC

### 1.1.1 Obecně

Nejen z důvodu statistických, ale převážně z technických a praktických důvodů je nutné vady kolejnic jednotně a jednoznačně zatřídit.

Názvosloví vad kolejnic je uvedeno v předpisech SŽDC S 67 [4], IRS 70712 Rail defects [5] a knize Broušení kolejnic [3]. Všechny tyto zdroje bývají běžně citovány, proto je důležité se názvosloví podle těchto zdrojů věnovat a více rozebrat. Názvosloví nebývá v mnoha případech dodržováno, a tak se lze setkat s používáním označení vlnkovitost jak pro vlnovité deformace s délkou vlny do 8, resp. 10 cm, tak i pro deformace nad tuto hranici, a v některých případech pro obě vady zároveň. V některých případech může být složité v koleji rozlišit, o kterou vadu se jedná (viz popisy jednotlivých vad v kap. 1.1.3).

V případě zahraniční literatury je možno skluzové vlny najít pod celou řadou výrazů, někdy i s jiným prvotním významem, např. roughness, rail corrugation [6] či jen samotné corrugation v [7], při čemž např. [8] skluzové vlny označuje jako short pitch corrugation.

### 1.1.2 Zatřídění vady a názvosloví

#### *Zatřídění vady dle standardů*

K tomuto účelu slouží v České republice předpis SŽDC S 67 Vady a lomy kolejnic [4], kde je pod číselným kódem 2201 D uvedena vada „vlnkovitost kolejnice“ (délka vlnek 3 až 10 cm) spolu se „skluzovými vlnami“ (délka vln 10 až 30 cm) [4].

#### **Číselné kódy vlnkovitost dle předpisu S 67:**

2201	D	Vlnkovitost kolejnice a skluzové vlny
2202	D (C)	Vlnovitá deformace (dlouhé vlny)

Funke v [3] (v českém překladu) popisuje obě vady zvlášť, přičemž vlnkovitost nazývá vlnky a skluzové vlny krátkými vlnami. Zároveň jako hraniční vlnovou délku uvádí shodně jako Esveld [2] 8 cm. Tohoto dělení se drží i dokument Mezinárodní železniční unie IRS 70712 Rail defects [5], který shodně s předchůdcem UIC 712 Rail defects [9] rozděluje vadu 2201 (dle [4]) na „short-pitch corrugation“ (délka vlnek 3 až 8 cm, zatřídění vady 2201) a na „long-pitch corrugation“ (délka vln 8 až 30 cm, zatřídění vady 2202).

#### **Číselné kódy vlnkovitost dle předpisu IRS 70712:**

2201	Short-pitch corrugation
2202	Long-pitch corrugation

Předpis Mezinárodní železniční unie IRS 70712 Rail defects [5] současně dále nemá kategorii Vlnovitou deformaci (dlouhé vlny) z [4]. Pro potřeby této práce jsou proto jako „vlnovité deformace“ v případě potřeby souhrnně označovány všechny výše uvedené vady.

### ***Zatřídění dle příčin vzniku***

#### **Vlnkovitost (vlnky)**

Vlnkovitost vyvolávají zejména počáteční nerovnosti z výroby kolejnic, konstrukce železničního svršku, charakter provozu, brzdné a rozjezdové síly a další.

#### **Skluzové vlny (krátké vlny)**

Pro známou příčinu vzniku (prokluzu kol dvojkolí při jízdě vozidla obloukem) se nazývají skluzovými vlnami. [3]

#### **Dlouhé vlny**

Příčina vady je ve výrobním procesu, zvláště v rovnání kolejnic neokrouhlými rovnacími válečky. [3]

### ***Zatřídění dle ČSN EN 13231-3 Železniční aplikace - Kolej - Přejímka prací - Část 3: Přejímka reprofilace kolejnic v koleji***

Třetí možností je dělení dle vlnové délky vln, tak jak je zaznamenává a dle normy ČSN EN 13231-3 [10] vyhodnocuje např. Centrum telematiky a diagnostiky (dále jen CTD):

- 10–30 mm: povrchové vady, kolejnicové styky;
- 30–100 mm: povrchové vady, kolejnicové styky, opotřebení kolejnic bržděním;
- 100–300 mm: skluzové vlny (vlnkovitost zejména na vnitřních kolejnicích v obloucích);
- 300–1000 mm: zpravidla vady kolejnic z výroby či rovnání.

Pásma bývají označována jako D1 (10–30 mm), D2 (30–100 mm), D3 (100–300 mm) a D4 (300–1000 mm).

### **1.1.3 Popis vlnovitých deformací**

#### ***Vlnkovitost (vlnky)***

Vlnky se vyznačují téměř pravidelnými, za sebou následujícími lesklými vlnovitými vyvýšeninami a tmavými vlnovými prohlubněmi na pojížděné ploše. Vzdálenost vyvýšenin je asi 3 až 8 cm [3], dle jiných publikací [11] 2,5 až 8 cm, hloubka vlnek je 0,1 až 1,2 mm.

Vlnky nacházíme převážně v přímých úsecích a obloucích velkých poloměrů. Vznikají prakticky na všech druzích železničních tratí, např. se smíšeným nebo jen nákladním provozem, na tratích s jednotnou skladbou vozů (městské, příměstské, metro) i na tramvajových tratích.

Příčiny vzniku a mechanismus jejich rozvoje stále nejsou zcela známy, většina hypotéz ale vychází z předpokladů vibrační rezonance a plastických rázů, z nichž vznikají kontaktní rezonanční vibrace. Frekvence vibrací odpovídají délcům vln. Prozatím lze pouze konstatovat, že preventivní broušení rozvoj vlněk zpomaluje. [3]

**Tab. 1** Faktory vyvolávající a brzdící vlnkovitost [3]

<b>Vlnkovitost</b>	
<b>Vyvolávají</b>	<b>Brzdí</b>
<b>Faktory vozidel</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• vlnkovitost obručí kol</li> <li>• homogenní doprava vozidly stejných vlastností a rychlostí, například na rudných tratích, příměstských tratích</li> <li>• velké rozdíly poměru protilehlých kol</li> <li>• spřažený pohon</li> <li>• elektrická trakce</li> <li>• brzděné a rozjezdové síly</li> <li>• použití výkonnějších trakčních vozidel</li> <li>• rozjezd plným výkonem motoru u prázdných motorových vlaků</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bezvadné obruče</li> <li>• smíšená doprava s vozidly různých vlastností a rychlostí</li> <li>• přesné seřízení dvojkolí</li> <li>• použití profilů podléhajících opotřebení u příměstské dopravy</li> <li>• použití stejných pružnostních charakteristik u motorových jednotek</li> <li>• pečlivé vyrovnání hmotností na kolo</li> </ul>
<b>Faktory jízdní dráhy</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• počáteční nerovnosti a válcovací okuje na pojížděné ploše kolejnice</li> <li>• vlhká jízdní dráha a koroze</li> <li>• nestejná pružnost koleje</li> <li>• špatný, málo únosný spodek</li> <li>• vysoká vnitřní pnutí při výrobě kolejnic</li> <li>• vnitřní pnutí například při nadměrném rovnání ve válečkových rovnačkách</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• suchá jízdní dráha, například v tunelech a pod mosty</li> <li>• konstantní pružnost koleje</li> <li>• poloměr oblouku pod 600 – 700 m</li> <li>• beznapět'ové žihání</li> <li>• kolejnicová ocel se speciálním legováním Mg nebo Cr až do 90 miliónů tun brzdí vlnkovitost</li> <li>• objemově kalené kolejnice</li> </ul>



**Obr. 2** Vlnky na tramvajové trati

### ***Skluzové vlny (krátké vlny)***

Krátké vlny jsou vlnovité nerovnosti na pojížděné ploše, jejichž vyvýšeniny mají rozteč 8 až 30 cm [3], dle jiných publikací [12, 13] 3 až 30 cm. Jejich hloubka se pohybuje mezi 0,1 a 1,2 mm. Vyvýšeniny i prohlubně vypadají stejnoměrně světle.

Vyskytují se hlavně na vnitřním kolejnicovém pásu směrových oblouků s poloměrem menším než 600, případně 700 m.

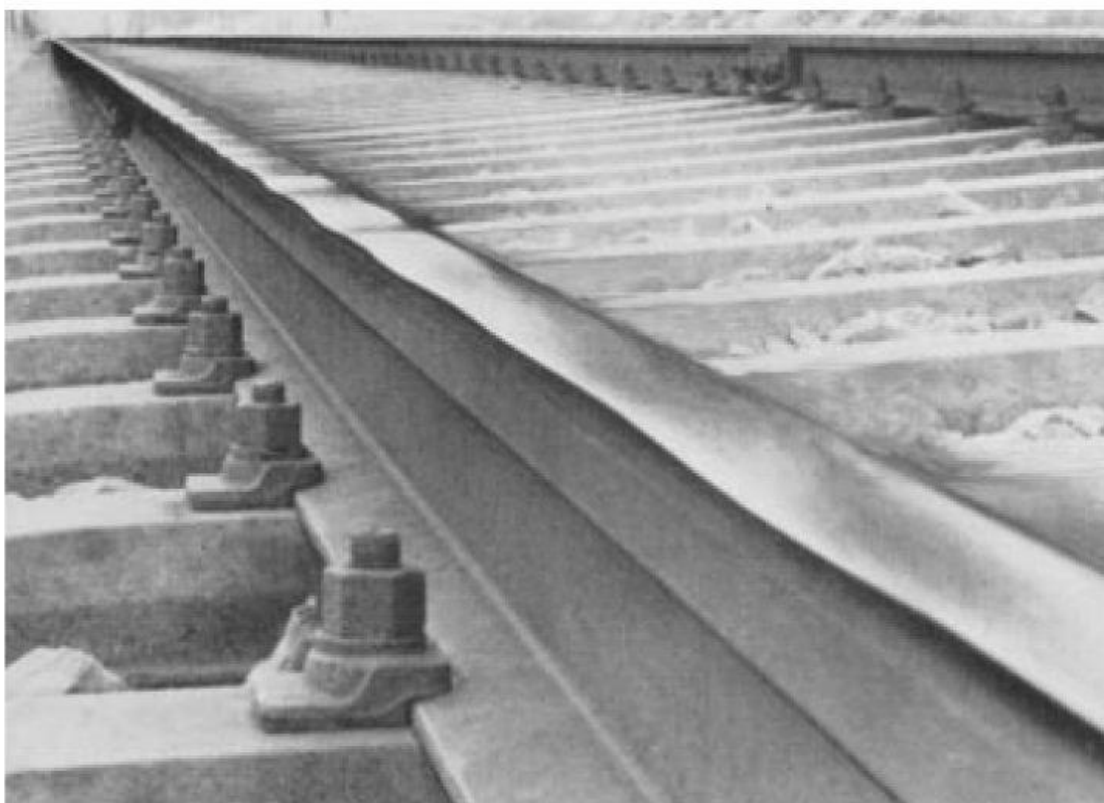
Pro známou příčinu vzniku (prokluzu kol dvojkolí při jízdě vozidla obloukem) se nazývají skluzovými vlnami. [3]



**Obr. 3** Skluzové vlny na trati č. 326 Brno – Česká Třebová

### ***Dlouhé vlny***

Dlouhé vlny jsou pravidelné vertikální vlny s vlnovou délkou 150 až 300 cm [4], dle [3] 60 až 230 cm a dle [14] pouze 25 až 150 cm. Jejich hloubka se pohybuje mezi 0,5 a 4 mm. Původ vady je ve výrobním procesu, zvláště v rovnání kolejnic neokrouhlými rovnacími válečky. [3, 4]



**Obr. 4** Dlouhé vlny [4]

#### **1.1.4 Další související vady**

Ve většině případů je výskyt skluzových vln provázen dalšími vadami. Tyto vady můžeme rozdělit do dvou skupin:

- vady podporující rozvoj skluzových vln (počáteční nerovnosti pojíždění plochy hlavy kolejnice);
- vady jako důsledek výskytu skluzových vln (prasklé svěrky či pražce).

Není-li zdokumentován celý proces rozvoje skluzových vln, je v mnoha případech velice obtížné rozhodnout, do které z výše uvedených kategorií příslušnou vadu zařadit.

Mezi vady provázející skluzové vlny patří:

- poškozené podkladnice a podložky pod patu kolejnice;
- pražce s příčnými trhlinami;
- chybějící části upevnění;
- prasklé svěrky a vrtule;
- obroušené kamenivo za hlavami pražců atd.



*Obr. 5 Vlevo obroušené kamenivo, vpravo chybějící upevnění a ulomená svěrka, foto doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.*

Dále jsou vlny zdrojem přidavného dynamického zatížení koleje a negativního vlivu na okolí tratí.

Vezmeme-li v úvahu vlivy, které uvádí Funke [3], jedná se především o:

- svislá zrychlení vibrací;
- přidavné dynamické síly působící na součásti konstrukce koleje;
- vlivy působící na interakci mezi jízdni dráhou a vozidlem;
- překračování únavové pevnosti kolejnic;
- vliv na výškovou polohu koleje;
- drážebnost a opotřebení upevnění kolejnic;
- železniční spodek a klenuté mosty;
- kolejové vozidlo, vliv na spotřebu energie;
- šíření vibrací a hluku do okolí a na cestující.

### **1.1.5 Negativní důsledky výskytu skluzových vln na okolí tratě**

Valí-li se kolo po kolejnici s vlnovitými deformacemi pojížděné plochy hlavy, dochází k přenosu vibrací do okolí. Problematice kontaktu kolo-kolejnice jakožto zdroje negativních externalit pro okolí tratě se věnuje velké množství prací, např. [15–18], i když většina se zabývá primárně vlnovými pásmy do 80 mm. Takové kolejnice jsou pak nazývány jako „roaring rail“ [19], tedy „řvoucí kolejnice“.

Nejvýraznějšími externalitami pro laickou veřejnost jsou hluk a vibrace. Jejich přenos snižuje např. kvalitu bydlení. [20, 21] Železnice je tak vnímána negativně a obavy z hluku přispívají k větší aktivitě obyvatel „bojovat“ proti novostavbám.

Problematikou ochrany zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací se zabývá několik legislativních dokumentů, např. [22 a 23].

Při budování či modernizování tratí je tak nutné vkládat nemalé finanční prostředky do protihlukových a antivibračních opatření, kdy např. protihlukové stěny s ohledem na estetické aspekty k pozitivnějšímu vnímání železniční trati příliš nepřispívají.



## 1.2 TEORETICKÝ ZÁKLAD POPISUJÍCÍ VZNIK SKLUZOVÝCH VLN

Teoretické práce zabývající se skluzovými vlnami popisují řešení kontaktu kola a kolejnice, tedy vzájemnou interakci vozidla a infrastruktury.

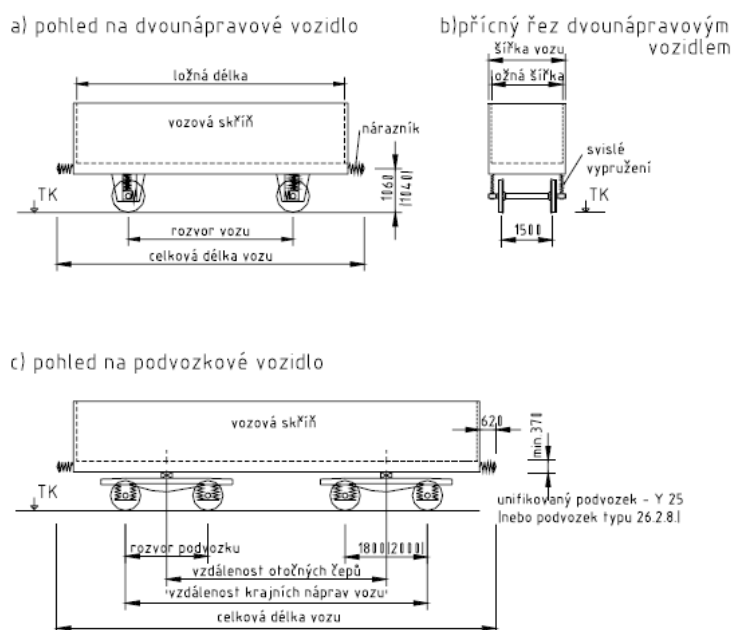
Tvary hlav kolejnic a jízdní obrysy kol vozidel prošly během historie vývojem, který směřoval především k ideálním jízdním vlastnostem vozidel při jízdě v přímé koleji. Při jízdě vozidla v oblouku klademe na tvary kolejnic a jízdní obrysy kol odlišné nároky. V případě uzavřených tramvajových systémů byly navrženy speciální obrysy kol, jež vyhovují jednotlivým dopravním podnikům [24]. V případě železničních drah je situace poněkud složitější, neboť v rámci jednotné evropské železniční sítě se na vybraných úsecích, resp. v obloucích mohou vyskytovat vozidla rozdílných konstrukcí, pojezdů, jízdních obrysů kol apod.

Tato skutečnost poněkud komplikuje řešenou problematiku, kdy vady vyvolané jedním kolem (charakterizovaným jeho poloměrem a jízdním obrysem) na konkrétní kolejnici mohou být potlačeny jiným kolem na dané kolejnici.

### 1.2.1 Konstrukce železničních vozidel

#### *Pojezd kolejových vozidel*

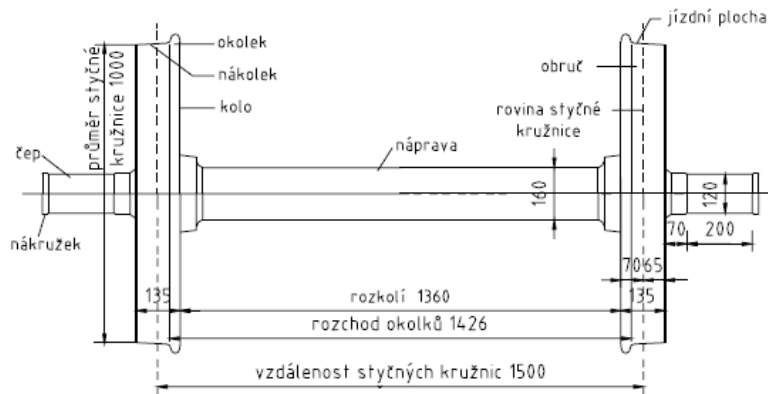
Základním konstrukčním prvkem pojezdu vozidla je dvojkolí. Je-li dvojkolí upevněno přímo k rámu vozu (vozové skříni), jedná se o rámový pojezd neboli o bezpodvozkový pojezd. Pokud je dvojkolí upevněno na samostatný rám, uloženým pod vozovou skříní, jde o podvozkové uspořádání pojezdu. Způsob upevnění dvojkolí, jakožto i jeho vypružení či vedení, má vliv na chodové vlastnosti vozidla. Nezanedbatelná je také skutečnost, zda je dvojkolí součástí hnacího či hnaného vozidla.



**Obr. 6** Hlavní technické parametry nákladních vozů [25]

## Dvojkolí

„Dvojkolí, které nese a vede železniční vozidlo v koleji, se skládá z nápravy a dvou kol. Vzdálenost styčných kružnic je definována jako vzdálenost obvodů kol, které se dotýkají při valení po temeni kolejnice, pro normální rozchod 1 500 mm. Průměr styčné kružnice se označuje jako průměr kola. Mezinárodně jsou unifikovány průměry v hodnotách 1 000 mm pro dvounápravové vozy a 920 mm pro podvozkové vozy.“ [25]

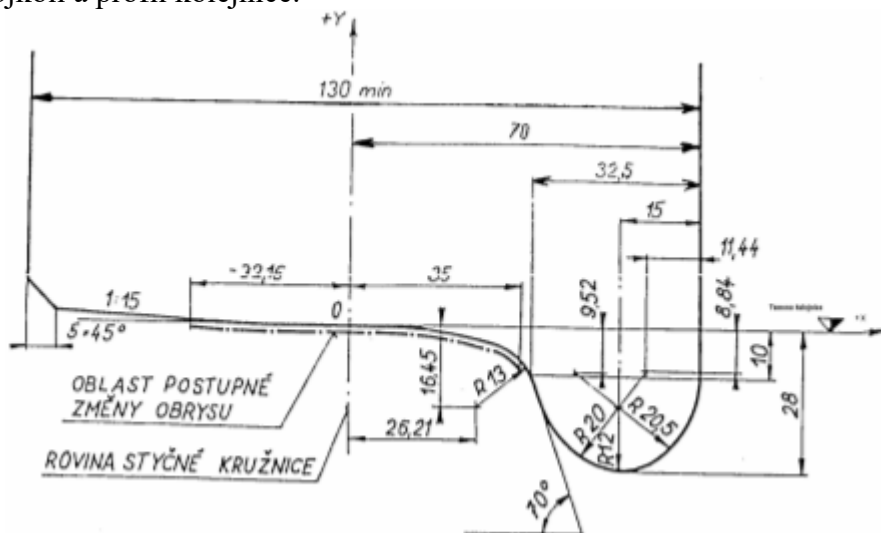


Obr. 7 Dvojkolí [25]

### 1.2.2 Jízda vozidla

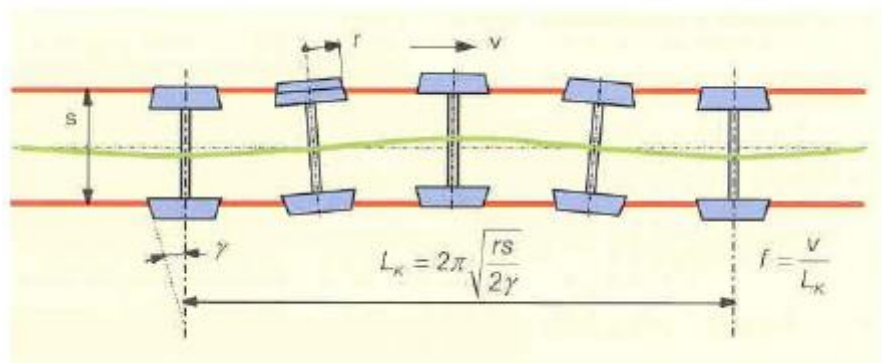
#### Jízda v přímé

Při jízdě vozidla v přímé koleji se díky kuželovitosti jízdní plochy a uložení kolejnic v úklonu 1:20 nebo 1:40 vozidlo dostředňuje do osy koleje, přičemž je důležitý jízdní obrys dvojkolí a profil kolejnice.



Obr. 8 Jízdní obrys UIC-ORE S1002 [26]

Dostředující pohyb dvojkolí v koleji je možné vyjádřit pomocí pohybu dvojitého kuželu po dvou břitech.



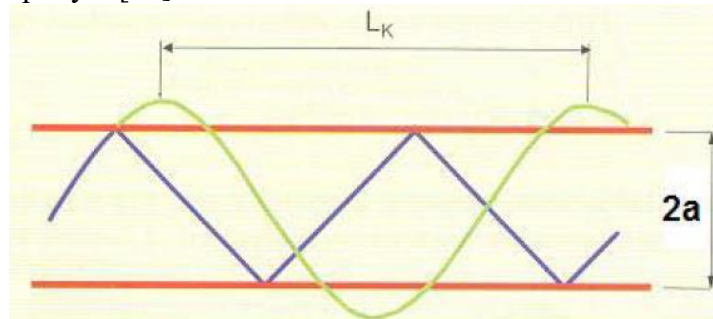
**Obr. 9** Sinusový pohyb dvojkolí v přímé koleji [2]

Délku sinusové vlny ( $L_k$ ) lze pro dvounápravové vozidlo odhadnout podle vzorce

$$L_k = 2\pi \sqrt{\frac{rs}{2\gamma}} \quad (1)$$

kde  $r$  je jmenovitý poloměr kol dvojkolí,  $s$  vzdálenost styčných kružnic a  $\gamma$  kuželovitost obrysu kola.

V případě, že dvojkolí není schopné dostředění vlivem kuželovitosti jízdního obrysu, začne dvojkolí najíždět okolky na pojížděnou plochu kolejnice. V důsledku toho se významně zvýší konicita na kontaktu kolo-kolejnici a dvojkolí náhle změní směr jízdy směrem k druhé kolejnici. Tento pohyb se cyklicky opakuje a vede k extrémnímu namáhání kolejového roštu příčnými silami. Pro tento typ jízdy dvojkolí v koleji je užíván termín „cik-cak“ pohyb. [25]

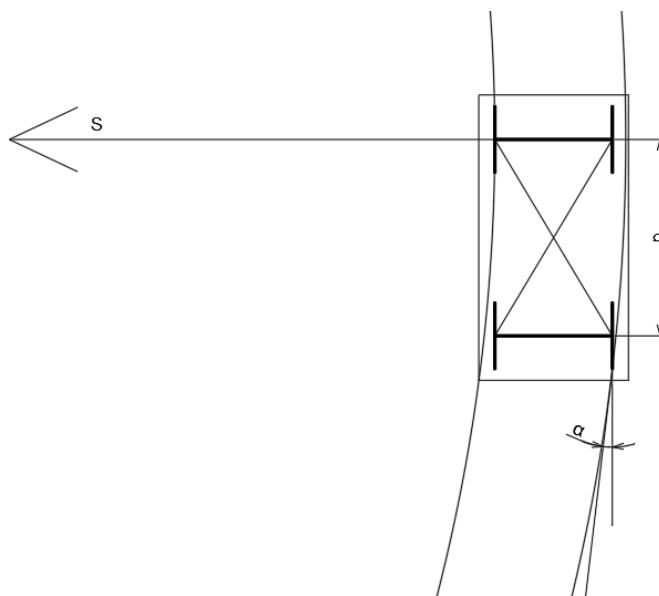


**Obr. 10** „Cik-cak“ pohyb dvojkolí v koleji (z [25] podle [2])

### Jízda v oblouku

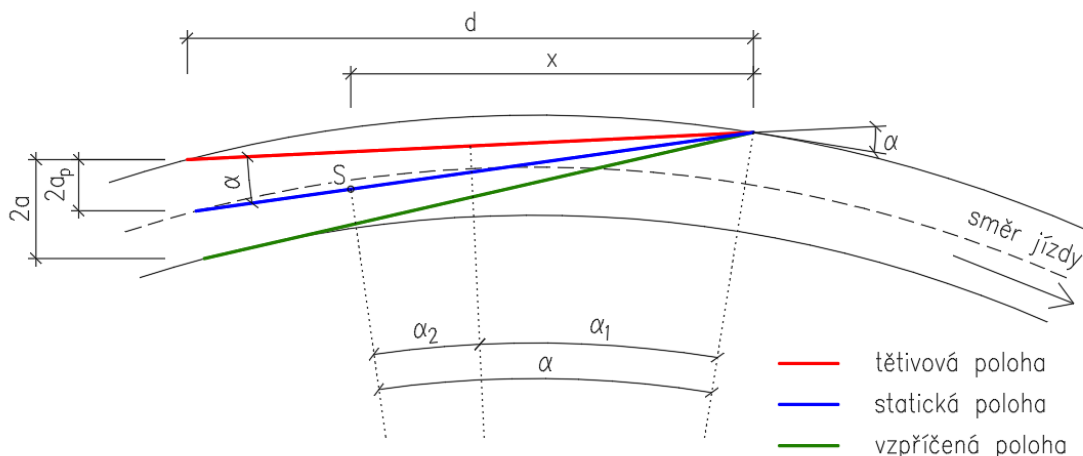
Při jízdě obloukem se vozidlo pohybuje po kružnici a koná současně pohyb translační a rotační.

„Dvounápravové vozidlo s pevným rozvorem a podvozek podvozkového vozu se při jízdě ve směrovém oblouku koleje staví tak, že osa zadního nevodícího dvojkolí směřuje přibližně do středu oblouku. Styčná kružnice vnějšího kola předního vodícího dvojkolí svírá s tečnou v bodě dotyku této kružnice s kolejnicí úhel  $\alpha$ , který se nazývá úhel náběhu.“ [25]



**Obr. 11** Ideální postavení vozidla nebo podvozku v oblouku

Dle Vogelovy metody může podvozek zaujmout v koleji v rámci volného pásu  $2a$ , což je rozdíl mezi rozchodem koleje a vzdáleností okolků, tři stabilní polohy: těživovou, statickou a vzpříčenou. Při statické poloze poslední dvojkolí nenabíhá na vnitřní ani na vnější kolejnici.



**Obr. 12** Vyšetření polohy podvozku v koleji Vogelovou metodou [27]

Dle [25] při řešení podle Vogelovy metody je rozchod okolků zredukován na nulu a podvozek, kde  $d$  je rozvor podvozku, je zobrazen pouze jako přímka. Z úhlu náběhu  $\alpha$  a jemu úměrné vzdálenosti  $o$  prvního dvojkolí od středu otáčení  $S$  se určí odlehlost posledního dvojkolí  $2a_p$  nutná k zaujetí statické polohy dvojkolí v koleji. Zjednodušeně lze napsat

$$\alpha = \frac{o}{R} \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \frac{d}{2R} \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \frac{2a_p}{d} \quad (4)$$

a po dosazení

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (5)$$

$$\frac{o}{R} = \frac{2a_p}{d} + \frac{d}{2R} \quad (6)$$

$$2a_p = \frac{od}{R} + \frac{d^2}{2R} \quad (7)$$

Při  $2a_p \leq 0$  zaujímá podvozek polohu těživovou.

Při  $2a_p > 0 \wedge 2a_p < 2a$  zaujímá podvozek polohu statickou.

Při  $2a_p \geq 2a$  zaujímá podvozek polohu vzpříčenou, kdy je možno odvodit vztah pro výpočet nové vzdálenosti  $o_v$ :

$$o_v = \frac{2aR}{d} + \frac{d}{2} \quad (8)$$

Ve vzpříčené poloze je podvozek natáčen dvojicí sil: řídicí silou a v místě prvního dvojkolí a napravo řídicí silou v místě posledního dvojkolí. [25]

### 1.2.3 Teorie vzniku skluzových vln

#### *Definice*

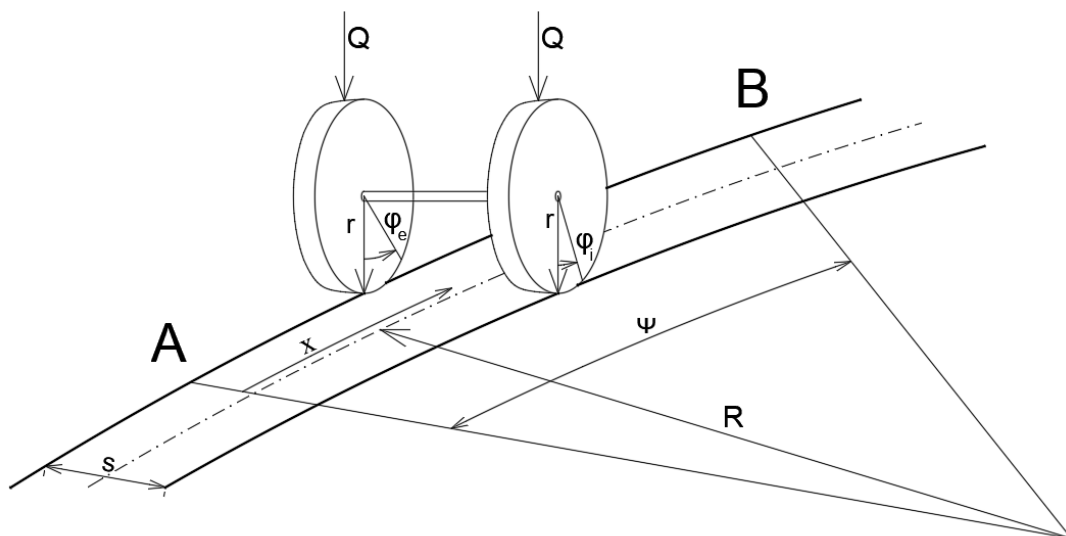
Pojmem skluz je pro potřeby této práce chápán jako rozdíl mezi obvodovou rychlostí kola a vlastní rychlostí vozidla.

Skluz je možno zjednodušeně dále rozdělit na prokluz a smyk. V případě prokluzu je obvodová rychlost kola větší než vlastní rychlost vozidla a v případě smyku je obvodová rychlost nižší než rychlost vozidla.

#### *Ujetá dráha*

Pro zjednodušení je dále uvažováno pouze s dvojkolím bez vazby na podvozek či celé vozidlo.

Při jízdě obloukem z profilu A do profilu B (Obr. 13) musí urazit vnitřní a vnější kolo nápravy rozdílnou vzdálenost.



**Obr. 13** Geometrie pohybu dvojkolí podle [12]

Tyto rozdílné vzdálenosti ( $x_e, x_i$ ) odpovídají rozdílným úhlům pootočení kol  $\varphi_e$  a  $\varphi_i$ .

$$x_e = r\varphi_e \quad (9)$$

$$x_i = r\varphi_i \quad (10)$$

$$\varphi_e - \varphi_i = \Delta\varphi \quad (11)$$

Vzdálenosti ujeté koly můžeme získat i ze středového úhlu a poloměru oblouku:

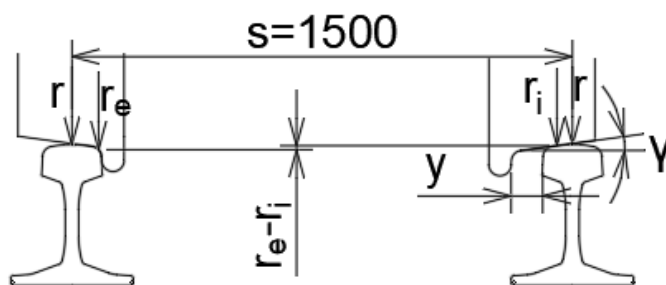
$$x_e = \left(R + \frac{s}{2}\right)\Psi \quad (12)$$

$$x_i = \left(R - \frac{s}{2}\right)\Psi \quad (13)$$

Platí tedy i vztah

$$x = R\Psi \quad (14)$$

### Rozdíl poloměrů styčných kružnic



Obr. 14 Rozdíl okamžitých poloměrů valení kol při příčném posunutí dvojkolí

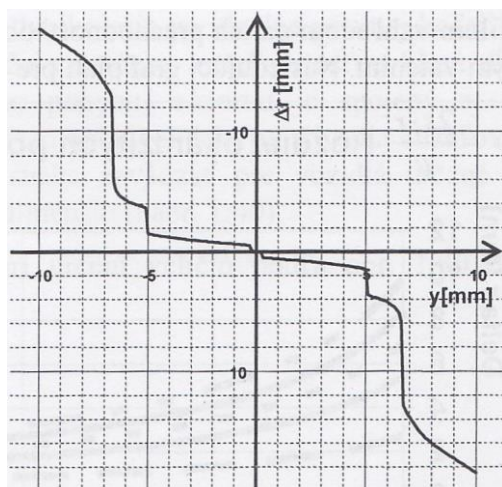
Z Obr. 14 lze vyvodit při kuželovitém jízdním obryse následující vztahy

$$r_e = r + \Delta r \quad (15)$$

$$r_i = r - \Delta r \quad (16)$$

$$\Delta r = \gamma y \quad (17)$$

kde funkce  $\Delta r$  je „rozdíl okamžitého poloměru valení jednoho kola dvojkolí a okamžitého poloměru valení druhého kola dvojkolí při příčném posunutí dvojkolí v koleji.“ [28]



Obr. 15 Funkce  $\Delta r$  [28]

### ***Kritický poloměr oblouku***

Poloměr  $R_{krit}$  představuje nejmenší možný poloměr oblouku, při kterém se může dvojkolí pohybovat obloukem při jednoduchém valení.

Jsou-li obě kola dvojkolí pevně spojena nápravou a nemohou-li se vůči sobě pootočit, můžeme vztahy (9) a (10) přepsat na

$$x_e = r_e \varphi \quad (18)$$

$$x_i = r_i \varphi \quad (19)$$

Následně můžeme porovnat dvojice vztahů (12), (13) a (18), (19) a dosadíme do nich vztah (17). Po úpravách dostaneme vztah pro kritický poloměr

$$R_{krit} = \frac{rs}{2\Delta r}, \quad (20)$$

nebo též zapsaný jako

$$R_{krit} = \frac{rs}{2\gamma y}, \quad (21)$$

kde

$$R_{krit} = f(\gamma, \Delta r) \quad (22)$$

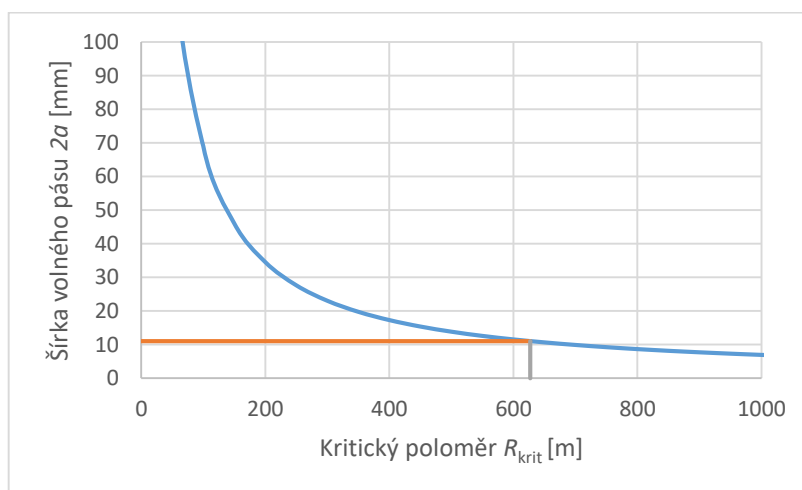
$$R_{krit} = R(\Delta y_{max}) \quad (23)$$

Jak je vidět ve vzorci (21), kritický poloměr  $R_{krit}$  zohledňuje parametry železničního dvojkolí a jeho polohu v koleji.

Za předpokladu, že  $s = 1500$  mm,  $r = 460$  mm,  $\gamma = 0,05$  (1:20),  $y = 11$  mm (při jmenovitém rozchodu koleje 1435 mm a novém jízdním obrysu, kdy se dvojkolí příčně posune z osy koleje na jednu stranu o 5,5 mm) je pak  $R_{krit}$  rovno 627,3 m.

Pojede-li dvojkolí obloukem o poloměru menším, než je kritický poloměr  $R_{krit}$ , obě kola se pootočí o shodný úhel  $\varphi$ , ale každé kolo je nuceno urazit jinou vzdálenost a „v obloucích s menším poloměrem pak kuželovitost kola neplní svoji funkci“ [28] a dochází ke skluzu jednoho (nejčastěji vnitřního) kola, neboť v ideálním případě vnitřní kolo plní pouze funkci nosnou, kdežto vnější kolo navíc i funkci vodící a má tak větší kontaktní plochu s kolejnici.

Zmenšení hodnoty kritického poloměru je možné např. zvětšením šířky volného pásu mezi kolejnici a okolkem kola.



**Obr. 16** Velikost kritického poloměru v závislosti na šířce volného pásu mezi kolejnici a okolkem

### Délka vlny

Dle [12] v místě styku kola a kolejnice dochází k tření zastoupenému třecí silou

$$F_t = \mu Q \quad (24)$$

Náprava dvojkolí je tak namáhána momentem

$$M = F_t r \quad (25)$$

a v nápravě vzniká torzní moment, který omezuje torzní tuhost nápravy

$$M = GI_p \frac{\Delta\varphi}{s} \quad (26)$$

Po rovnosti rovnic (25) a (26), vyjádřením  $\Delta\varphi$  a úpravách dostaneme přes (14) vzorec pro výpočet délky vlny

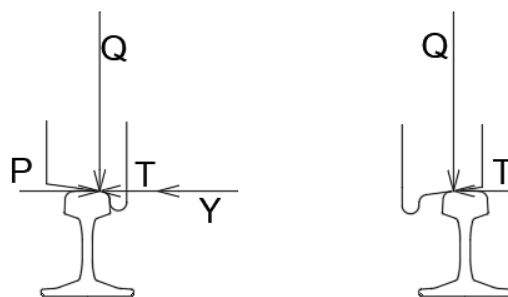
$$\lambda = \left( \frac{r^2 \mu Q}{GI_p} \right) R, \quad (27)$$

kde v závorce máme vliv vozidla a za závorkou vliv infrastruktury.

#### 1.2.4 Kontakt kolo-kolejnice

Neplní-li již kuželovitost v oblouku svoji funkci dle předchozí kapitoly, dojde ke skluzu jednoho kola. Ke skluzu kterého kola dojde, záleží na skutečné poloze vozidla, resp. dvojkolí v koleji. Tato poloha je dána výsledkem účinku všech sil působících na vozidlo.

Některé síly působící na první dvojkolí vozidla či podvozku jsou znázorněny na Obr. 17, kde  $Q$  je kolová síla,  $Y$  vodící síla,  $T$  třecí síla a  $P$  řídicí síla.



Obr. 17 Síly působící mezi dvojkolím a kolejí [25]

V případě kontaktu kolo-kolejnice působí na obě kola valivý odpor mezi kolem a hlavou kolejnice, kdy se kola dotýkají kolejnic přes dotykovou plochu. Vnější kolo se v oblouku může dotýkat vnější kolejnice dále na „vodící“ ploše okolku, přičemž oba dotykové body nejsou v jedné svislé rovině kolmé na osu koleje.

Lze tedy předpokládat, že na kontaktu vnější kolo-kolejnice dochází k většímu tření než na kontaktu vnitřní kolo-kolejnice a dojde tak k prokluzu vnitřního kola.

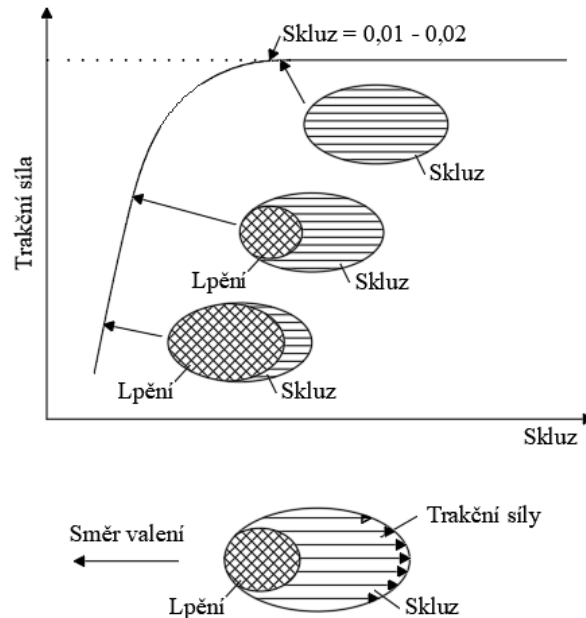
#### Kontaktní plocha mezi kolem a kolejnicí

Kontaktní plocha mezi kolem a kolejnicí je pro zjednodušení definována jako elipsa, jejíž parametry lze vypočítat pomocí Hertzovy teorie. Kontaktní plochu lze rozdělit na oblast lpění (někdy nazývanou jako uzamčenou oblast) a oblast skluzu. Oblast lpění vzniká na náběžné straně a kolo se po kolejnici odvaluje bez vzájemného posunu.



V oblasti skluzu nejdříve dochází k přenosu trakčních sil a následně k vzájemnému posunu plochy kola vůči ploše kolejnice – ke skluzu. [29, 30]

S rostoucí trakční silou se oblast skluzu zvětšuje a oblast lpění naopak zmenšuje.

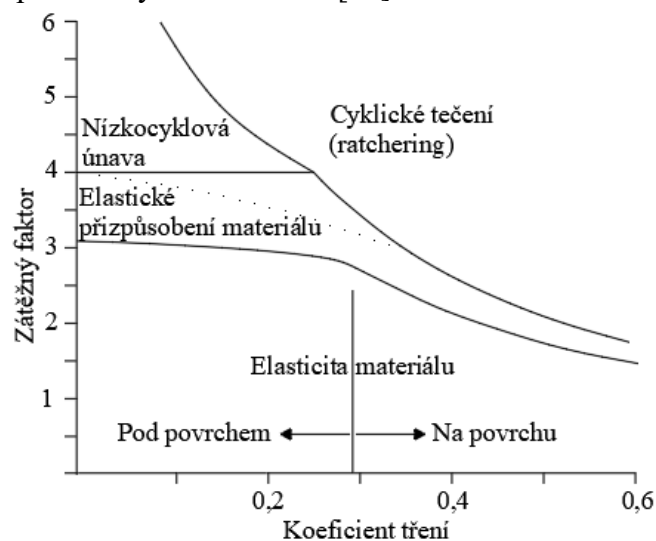


**Obr. 18** Vztah mezi trakční silou a skluzem [29]

Maximální hodnota trakční síly závisí na tření mezi kontaktní plochou kola a kolejnicí vyjádřenými součinitelem tření.

Dle [29, 30] závislost *zátěžného faktoru* (poměr kontaktního napětí a smykové meze kluzu) na součiniteli tření je znázorněna na shakedown mapě na Obr. 19. Je-li hodnota součinitele tření pod 0,3, dochází ke kumulaci plastické deformace pod povrchem materiálu, je-li hodnota nad 0,3, nastává plastická deformace na povrchu materiálu.

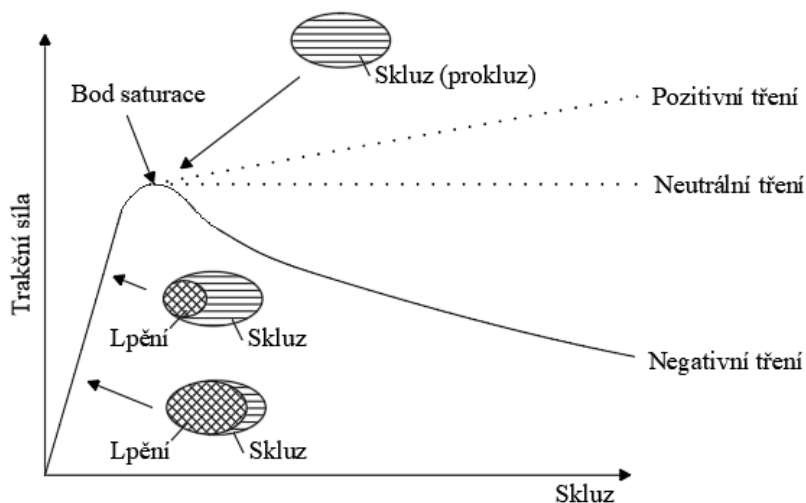
Oblast kumulace plastických deformací je označována jako oblast ratschetingu, či proces kumulace přímo jako ratscheting. Při překročení meze kluzu dochází k tvorbě povrchových či podpovrchových deformací. [29]



**Obr. 19** Shakedown mapa [29]

## Podélný skluz

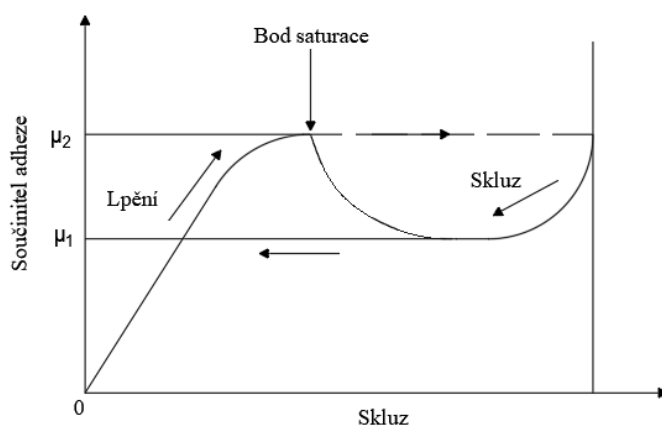
Závislost trakční síly na skluzu popisuje trakční křivka. Počáteční valivý pohyb kola po kolejnici postupně s rostoucí trakční silou přechází přes částečný skluz (efektivní skluz) do úplného skluzu, který nastane v tzv. bodu saturace, tedy stavu, kdy celá kontaktní plocha je celá oblastí smykovou.



Obr. 20 Trakční křivka [29]

Následně nastává tzv. neefektivní skluz, jenž se může projevit třemi způsoby tření. V případě negativního tření, např. suchý kontakt kola-kolejnice nebo výskyt materiálu zvyšující součinitel tření – modifikátoru s negativními třecími vlastnostmi, dochází k výskytu tzv. „stick-slip“ (lpění-skluz) cyklu, kdy se ve skluzové kontaktní ploše začne objevovat oblast lpění. [29, 30].

Pozitivní tření nastává v případě výskytu modifikátoru s pozitivními třecími vlastnostmi. Výskyt modifikátoru může být úmyslný/žádoucí (mazníky v koleji či na vozidlech), nebo neúmyslný/nežádoucí (spadané listí, voda apod.).



Obr. 21 Stick-slip cyklus [31]

Skluz je v [2] definován jako relativní hodnota:

$$\varepsilon_x = \frac{v - \omega r}{v}. \quad (29)$$

### ***Příčný skluz***

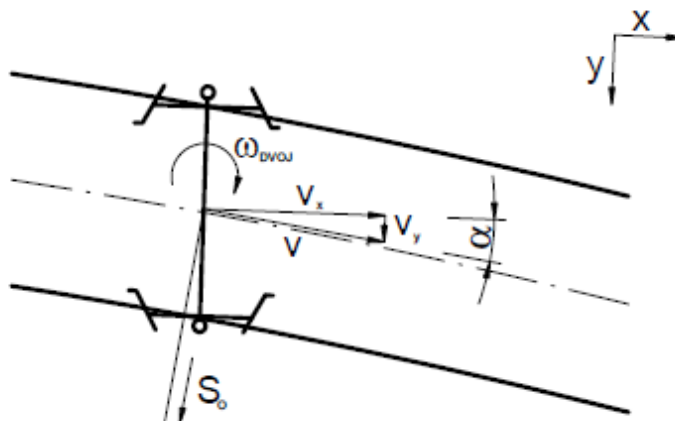
Kromě podélného skluzu, popsaného výše, dochází při průjezdu vozidla obloukem i k příčnému skluzu dvojkolí v závislosti na úhlu náběhu  $\alpha$ .

Dle [2, 32] jsou skluzové rychlosti zjednodušeně vyjádřeny jako skluzová rychlost:

$$v_y = v \cdot \sin\alpha \quad (30)$$

a relativní skluz

$$\varepsilon_y = \frac{v_y}{v} = \sin\alpha. \quad (31)$$

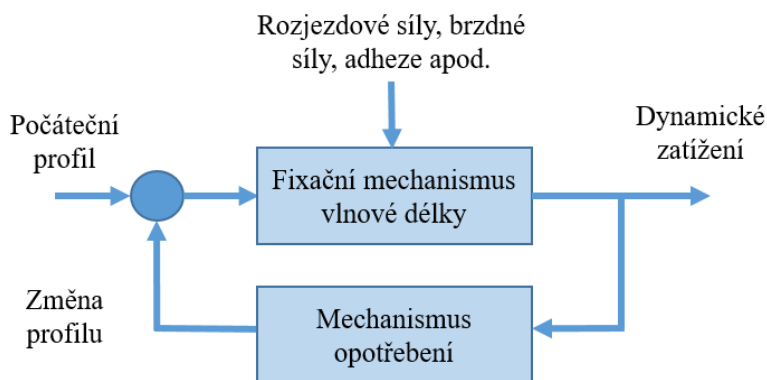


**Obr. 22** Příčný skluz [32]

Úhel náběhu lze částečně řešit konstrukcí vozidel viz kapitola 1.2.1.

### ***Mechanismus fixace vady***

Dle [33] je na počátku kolejnice bez vlnovitých deformací pořízené plochy hlavy kolejnice, avšak s počátečními nerovnostmi. Tyto nerovnosti v kombinaci s dalšími faktory jako trakce, skluz, tření na kontaktu kolo-kolejnice vytvářejí dynamická zatížení, která způsobují počáteční poškození a deformace určitého druhu, které jsou spojeny se změnami v krystalické struktuře v oceli [34] (zvýšením hustoty krystalů), což vede k lokálnímu zvýšení tvrdosti oceli. Za předpokladu, že po koleji projede dostatečné množství vlaků podobné konstrukce a podobnou rychlostí, dojde k zafixování vady v daném místě. Tato vada při průjezdech dalších vlaků je spouštěčem dalšího cyklu procesu poškození.

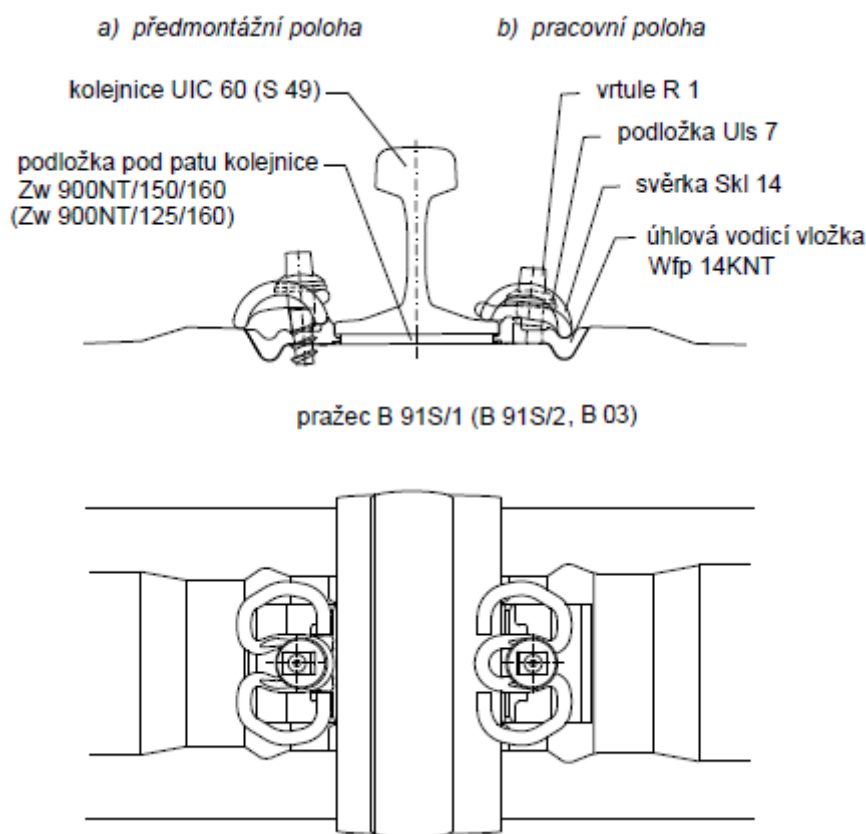


**Obr. 23** Mechanismus fixace vady [33]

## 1.2.5 Parametry tratí

### *Konstrukce koleje*

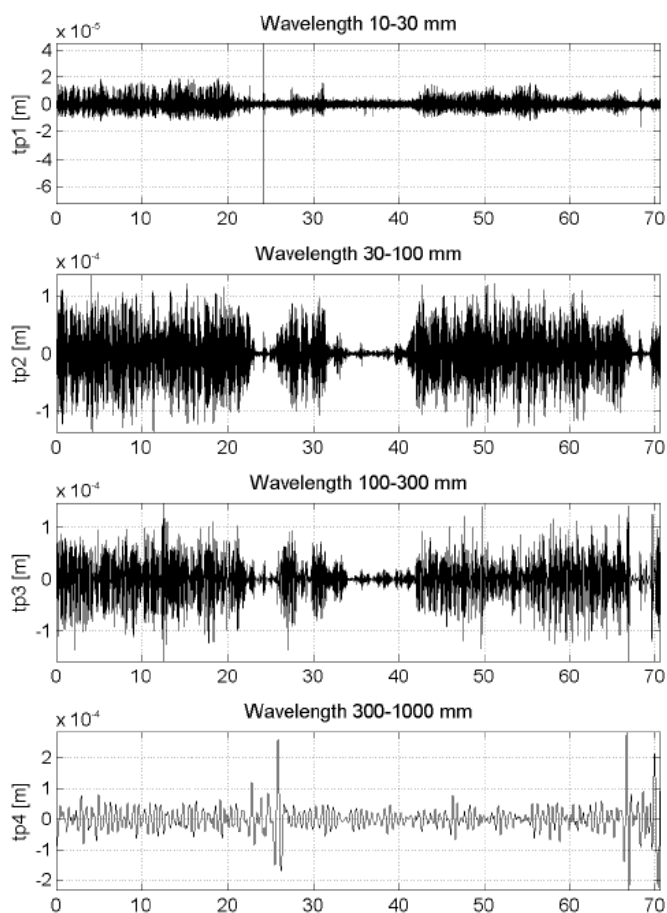
Běžná kolej se skládá z mnoha částí, které mají rozdílné vlastnosti. Typická skladba svršku pro současné tratě je na Obr. 24.



**Obr. 24** Kolejnice tv. UIC 60 (S 49) na betonových pražcích B 91S/1 (B 91S/2, B 03) s pružnými svěrkami Skl14 pro oblouky s malými poloměry - upevnění W 14NT [35]

Přechod koleje z jedné skladby svršku na jinou znamená současně i změnu tuhosti koleje.

Obr. 25 z [36] ukazuje záznam z měření na úseku Velký Osek – odb. Kanín. Ve staničení cca 33 až 41 m lze pozorovat méně výrazné skluzové vlny. V celém oblouku se nacházejí betonové pražce SB 8P s tuhými svěrkami, avšak na délce cca 8 m přes železniční přejezd s betonovými panely je svršek tvořen dřevěnými pražci se shodným upevněním kolejnic na pražci jako ve zbytku úseku. Tlumící schopnosti dřevěných kolejnicových podpor s ohledem na rozvoj vlnovitých vad lze pozorovat i na mostech s prvkovou mostovkou. [37] Na mostnicích a na dřevěných pražcích v přechodových oblastech mostů vlnky doslova zmizí, aby se opět objevily až za mostem.



**Obr. 25** Výstup ze zařízení Salamander II (krátké úseky se změňnou svislou tuhostí jízdní dráhy).  
 Nepravidelnosti ve staničeních cca 24 m a 69 m byla dána umístěním lepených izolovaných  
 styků. [36]

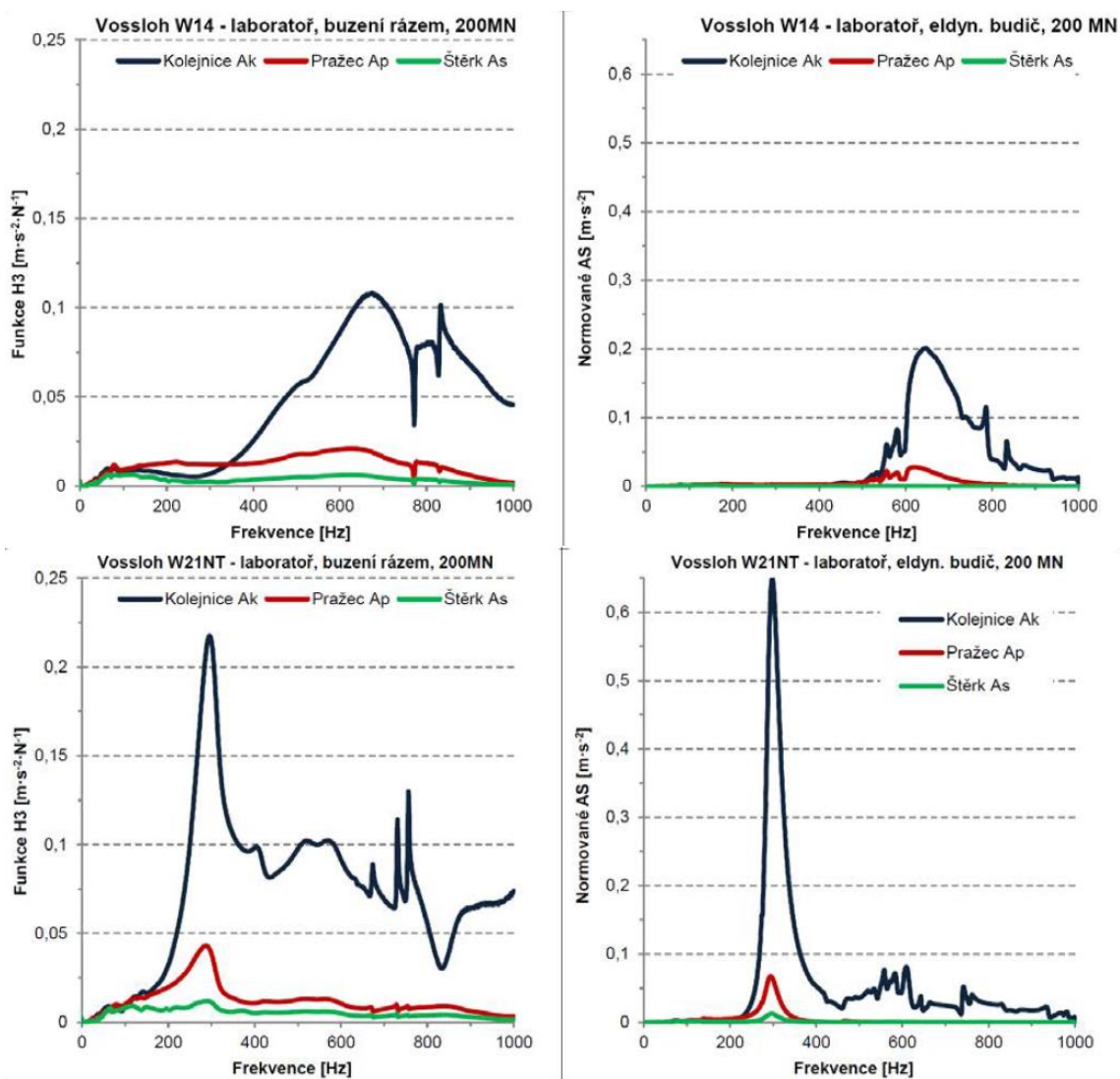
Na Ústavu železničních konstrukcí a staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně byly v minulosti experimentálně zjišťovány modálních parametry, tzn. vlastní frekvence, vlastní tvary, příp. modální tlumení prvků železničního svršku.

*„V teoretických řešeních úloh mechaniky tratě má mimořádný význam koncepce přenosové funkce, protože představuje efektivní charakteristiky lineární soustavy, které se využívají i při všeobecném buzení, resp. při stochastické analýze konstrukce tratě nebo interakční soustavy kolejové vozidlo – trať. Frekvenční odezvoová funkce je ovlivněna hmotností, tlumením a tuhostí. Tyto parametry určují vlastní frekvence. Pokud se v zatížení vyskytne složka s touto frekvencí, projevuje se vysokými dynamickými účinky.*

*Vlastní vyhodnocení bylo zaměřeno na nízkofrekvenční oblast  $0 \div 80$  Hz, středněfrekvenční oblast  $80 \div 400$  Hz a vysokofrekvenční oblast  $400 \div 1000$  Hz. Toto rozdělení vychází z předchozích úloh a je založeno na principu, že v oblasti nízkých frekvencí se projevují zejména účinky vyvolané působením podvozků a dvojkolí jedoucích železničních vozidel, pásmo středních frekvencí je projevem imperfekcí na stykové ploše kolo kolejnice stejně tak, jako vysokofrekvenční oblast do 1000 Hz. Zde se však navíc přidává vliv akustických jevů zapříčiněných pohybem vozidla.*

Upevnění Pandrol FC I vykazuje zajímavé vlastnosti v rezonančním pásmu kolem frekvence 430 Hz. Tato frekvence bývá projevem vlnkovitosti s délkou vlnek cca  $7 \div 9$  cm v závislosti na jízdní rychlosti, která je uvažována v rozmezí typickém pro koridorové tratě, tj.  $120 \div 160$  km·h<sup>-1</sup>. Použití upevnění Pandrol FC I na tratích, kde hrozí vznik vlnkovitosti s uvedenou vlnovou délkou, může urychlit rozvoj této kolejnicové vady. Obdobnou charakteristiku vykazuje rovněž upevnění Vossloh W 21NT na středních frekvencích kolem 290 Hz, resp. upevnění Vossloh E 14 na frekvencích v pásmu  $220 \div 265$  Hz.

U testovaných upevnění s největší statickou sečnou tuhostí Vossloh W 14 a Vossloh W 14NT je patrný posun nejdůležitějších rezonančních pásem směrem k vyšším frekvencím. Na koridorových tratích se v těchto vysokofrekvenčních pásmech může projevovat přítomnost vlnek kratších vlnových délek do 5 cm.“ [38]



**Obr. 26** Frekvenční charakteristika laboratorních vzorků upevnění [38]

„Z uvedeného vyplývá, že v oblastech, kde lze očekávat rozvoj periodických vad pojižděné plochy kolejnice malých a středních délek, je vlivem obecných vlastností

vhodné použití svisle zpružněných systémů upevnění kolejnic, jako např. Vossloh E 14, či Vossloh W 21NT. Naopak v místech, kde lze očekávat kolejnicové vady typu skluzových či dlouhých vln, jsou vhodnější upevnění s vyšší statickou sečnou tuhostí podložky pod patu kolejnice. Mezi tato upevnění patří např. konstrukce Vossloh W 14, ať již v provedení s vodící lištou na spodní ploše úhlové vodící vložky (typ NT) či bez ní.“ [38]

### **Parametry konstrukčního uspořádání koleje**

Dle normy [39] „Ke snížení účinků odstředivé síly má být v koleji v oblouku projektováno převýšení koleje, a to zvýšením polohy vnějšího kolejnicového pásu vůči pásu vnitřnímu, který zůstává v úrovni nivelety temene kolejnicového pásu.

Teoretické převýšení  $D_{EQ}$  je dáno takovým úhlem odklonu spojnice temen kolejnicových pásů od horizontální roviny, kdy výslednice svislého zrychlení vyvolaného gravitací a odstředivého zrychlení vyvolaného průjezdem vozidla s rychlostí  $V$  obloukem o poloměru  $R$  působí kolmo ke spojnici temen kolejnicových pásů. Tuto veličinu lze počítat dle vzorce:

$$D_{EQ} = \frac{11,8 \cdot V^2}{R}. \quad (32)$$

Vlaky jedoucí rychlostí:

$$V > \sqrt{\frac{D \cdot R}{11,8}} \quad (33)$$

projíždějí obloukem s nedostatkem převýšení  $I$ :

$$I = \frac{11,8 \cdot V^2}{R} - D > 0 \quad (34)$$

V takovém případě dochází ke zvětšení zatížení vnějšího kolejnicového pásu nárůstem vodící a svislé kolové síly.

Vlaky jedoucí rychlostí:

$$V < \sqrt{\frac{D \cdot R}{11,8}} \quad (35)$$

projíždějí obloukem s přebytkem převýšení  $E$ :

$$E = D - \frac{11,8 \cdot V^2}{R} > 0. \quad (36)$$

V takovém případě dochází ke zvětšení zatížení vnitřního kolejnicového pásu především nárůstem svislé kolové síly.“

Dále norma [39] uvádí: Převýšení „má dále zohledňovat hospodárnost údržby tak, aby opotřebením obou kolejnicových pásů vlivem zatížení provozem bylo, pokud možno, vyrovnané. V projektu je tedy třeba při návrhu velikosti převýšení zohlednit uvažovanou skladbu vlaků (četnost vlaků podle jejich rychlosti a hmotnosti).“

Výsledkem návrhu je tedy pro daný poloměr převýšení, které pro danou kolej a charakter provozu na ní považuje projektant a správce za nejvhodnější. Vzhledem ke skutečnosti, že se rychlosti, skladba a hmotnost souprav, opotřebením dvojkolí v čase mění a převýšení je konstantní po dobu jednotek i desítek let, nemusí parametry oblouku vyhovovat aktuálnímu stavu. I v případě optimálního návrhu budou obloukem projíždět

rozdílné soupravy rozdílnými rychlostmi, a tedy rozdílnými nedostatky převýšení, resp. přebytky převýšení neboli rozdílným vlivem na kolej.

S příchodem nových, plně či částečně autonomních provozů založených na systémech AVV, ETCS či jiných, *kdy systémy dokáží „rychlost udržovat s přesností do 1 km.h<sup>-1</sup>, cílově zabrzdit do určeného místa (na nulovou i nenulovou rychlost) s vysokou přesností (přesnost zastavení 1 m)“* [40], lze předpokládat sjednocení rychlostí dle určitých kategorií, skladeb či jiných parametrů souprav (osobní vs. rychlíkové vs. nákladní, různých provozovatelů drážní dopravy atd.).

### 1.3 STÁVAJÍCÍ ZPŮSOBY SBĚRU, ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCOVÁNÍ DAT

#### 1.3.1 Sběr dat

„Pro zajištění provozuschopnosti dráhy a bezpečnosti drážní dopravy se provádějí pravidelné prohlídky a měření staveb drah.“ [41] Časové intervaly prohlídek a měření jsou uvedeny ve vyhlášce 177/1995 Sb. [41] a v předpisu S2/3 [42]. Na všech tratích se tak alespoň jednou za rok uskuteční měření. Na koridorových tratích se během roku uskuteční 3 měření.

**Tab. 2** Prohlídky a měření na dráze celostátní a dráze regionální s rychlostí do 200 km.h<sup>-1</sup> včetně [41]

Pol.	Předmět a způsob prohlídky	Objekt	Časový interval prohlídky
3	Měření rozchodu, vzájemné výškové polohy kolejnicových pásů a směru kolejí a výhybek měřicími prostředky s kontinuálním záznamem	traťové a hlavní staniční koleje při rychlosti vyšší než 120 km.h <sup>-1</sup>	4 měsíce
		traťové a hlavní staniční koleje při rychlosti vyšší než 60 km.h <sup>-1</sup> a nižší nebo rovné 120 km.h <sup>-1</sup>	6 měsíců
		traťové a hlavní staniční koleje při rychlosti nižší nebo rovné 60 km.h <sup>-1</sup>	12 měsíců
		ostatní dopravní koleje:	
		• při měření rozchodu a vzájemné výškové polohy kolejnicových pásů	12 měsíců
		• při měření směru oblouků kolejí	36 měsíců
		manipulační koleje	určí provozovatel

Vzhledem k rozsahu železniční sítě se měření provádí [42] „centrálními měřicími prostředky SŽDC, které provozuje TÚDC (měřicí vůz, měřicí drezína a malá měřicí drezína) podle předpisu SŽDC S2/4“ (viz kap 1.3.3).

Předpis S2/3 [42] předepisuje měření mikrogeometrie povrchu hlavy kolejnice pro jízdy měřicího vozu.



### 1.3.2 Diagnostické prostředky

#### *Měřicí přístroje*

Pro měření konkrétního místa lze použít např. ocelové pravítko, Poschův přístroj nebo přístroj Cemafer [3].



**Obr. 27** Měřicí sonda na zjištění vlnkovitosti povrchu kolejnice, která je současně zabudovaná do defektoskopické sondy [42]

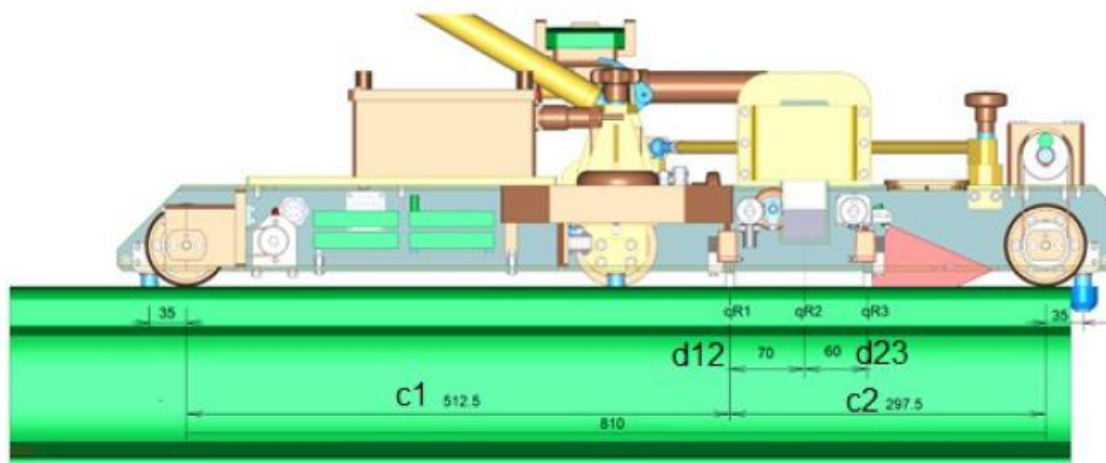
#### *Měřicí zařízení*

Pro lokální měření se v České republice používají např. zařízení Salamander II nebo Gekon.



**Obr. 28** Měřicí zařízení Gekon [43]

V současnosti se nejčastěji jedná o laserové bezkontaktní měřicí přístroje pracující na principu mikrotěživové geometrie.



**Obr. 29** Princip tětív u zařízení Salamander [44]

Vozíky jsou vybaveny bezkontaktními laserovými senzory. Princip měření je založen na snímání plochy hlavy kolejnice skenováním světelného paprsku. Světelný paprsek, generovaný laserem, vytváří světelný bod, jehož poloha je snímána kamerou. Z naskenovaného obrazu je pomocí počítačového zpracování změřena vzdálenost povrchu označeného světelnou tečkou. Měření se provádí na dvou tětívách (krátké a dlouhé). Např. u zařízení Salamander (Obr. 29) je krátká základna určena senzory očíslované qR1, qR2, qR3. Dlouhá základna je dána roztečí vozíku  $c1 + c2$ . [44]

### ***Měřící vozidla***

Pro měření vlnovitých deformací pojížděné plochy hlavy kolejnice delších úseků se používají kolejová vozidla od malých přívěsných, přes měřící drezíny až po samostatné vozy či vozidla s vlastním pohonem. Z možných snímačů, které mohou pracovat na induktivním, odporovém, kapacitním, piezoelektrickém, optoelektrickém nebo jiném principu. Jako snímače se používají zejména:

- induktivní snímač dráhy kmitu;
- induktivní snímače rychlosti, případně zrychlení;
- piezoelektrické snímače zrychlení;
- bezdotykové indukční snímače. [3]

Pro diagnostiku tratí ve správě Správy železnic se v současné době používá *měřící vůz pro železniční svršek*. [45]

Měřící vůz pro železniční svršek je určen pro měření a vyhodnocování následujících parametrů koleje:

- rozchod koleje;
- křivost koleje;
- směr koleje;
- převýšení koleje;
- zborcení koleje;
- podélná výška koleje;
- mikrogeometrie povrchu hlavy kolejnice – vlnkovitost;

- profil kolejnic (ojetí kolejnic);
- hodnocení odezvy vozidla.



**Obr. 30** Měřicí vůz pro železniční svršek [45]

Základní technické údaje:

- nejvyšší provozní rychlost 160 km.h<sup>-1</sup>;
- jmenovitá hmotnost 43 245 kg;
- maximální šířka 3 140 mm;
- maximální výška 4 050 mm;
- délka přes nárazníky 26 400 mm;
- nejmenší poloměr oblouku koleje při průjezdu traťovou rychlostí 150 m. [45]

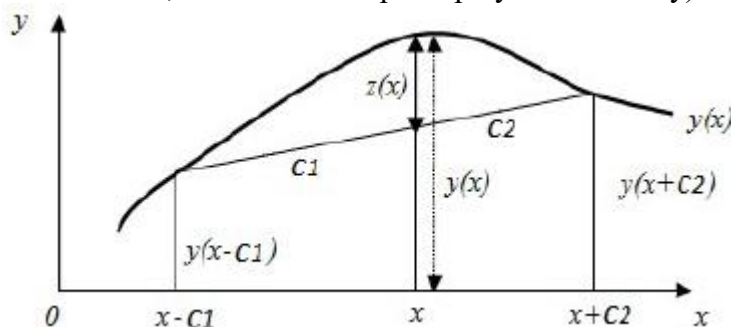
Princip měřicího systému (dále RCMS) měřicího vozu pro železniční svršek je podobný jako u měřících zařízení a je taktéž vybaven bezkontaktními laserovými senzory. Oproti měřícím zařízením je zde osvětlena celá šíře pojezdné plochy hlavy kolejnice, kterou snímá kamera. Následně systém automaticky vybírá měřenou stopu, což je nezbytné vzhledem ke konstrukci vozu, resp. k jeho délce, a příčným posunům měřící jednotky vůči kolejnici při jízdě obloukem.



**Obr. 31** Příklad nejčastějšího způsobu měření na měřícím vozidle – přímou bezkontaktní metodou: Systém používá pro měření na kolejnicovém pásu čtyři lasery a kamery vytvářející čtyři optické asymetrické tětivy. [46]

### 1.3.3 Zpracování dat

Základem zpracování dat je výpočet vzepětí nad tětivou dle Obr. 32, kde podle konstrukce zařízení  $y(x-c1)$ ,  $y(x)$  a  $y(x+c2)$  představují hodnoty odečtené třemi snímači nebo jedním snímačem a dvěma známými hodnotami (konstrukce může být u různých zařízení v detailech rozdílná, avšak základní princip bývá zachován).



Obr. 32 Princip výpočtu vzepětí nad tětivou [44]

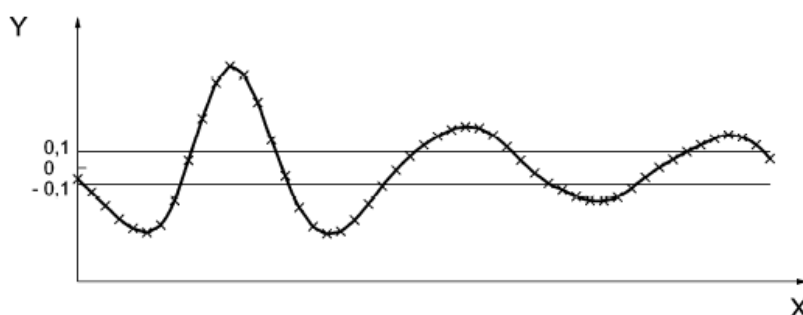
Měřicí jednotka vypočítává vzepětí nad tzv. krátkou a dlouhou tětivou podle vzorce:

$$z(x) = y(x) - \left[ \frac{c2}{c1+c2} y(x-c1) + \frac{c1}{c1+c2} y(x+c2) \right]. \quad (37)$$

Krátká tětiva je užitá pro pásma D1, D2 a D3, dlouhá pro pásmo D4.

Z hodnot  $z(x)$  jsou následně sestaveny tzv. „základní profily“ (někdy nesprávně nazývané jako „krátká a dlouhá tětiva“). Na tyto základní profily je aplikován „profilový filtr“ (kdy se podle [10] jedná o „elektronický přístroj nebo zpracování signálu separující profily do dlouhovlnných a krátkovlnných složek nebo složek uvnitř specifikovaného vlnového pásma“) pomocí FFT. Výsledkem jsou čtyři „filtrované profily“ reprezentující čtyři vlnová pásma D1 až D4 (někdy nazývané jako „surface“).

Následně je pro každé vlnové pásmo vypočítáno procento překročení hodnot špička-špička podle ČSN EN 13231-3 [10] přílohy C.1. za využití hodnot z Tab. 3.



Obr. 33 Výběr hodnot pro výpočet procenta překročení špička-špička [10]

Tab. 3 Kritéria pro přejímku pro mez špička-špička [10]

Rozsah vlnových délek [mm]	10 až 30	30 až 100	100 až 300	300 až 1000
Mezní hodnoty špička-špička [mm]	±0,010	±0,010	±0,015	±0,075

„Základní nebo sejmутý profil musí být zpracován tak, aby vznikl filtrovaný profil v každém z rozsahů vlnových délek uvedených v“ Tab. 4.

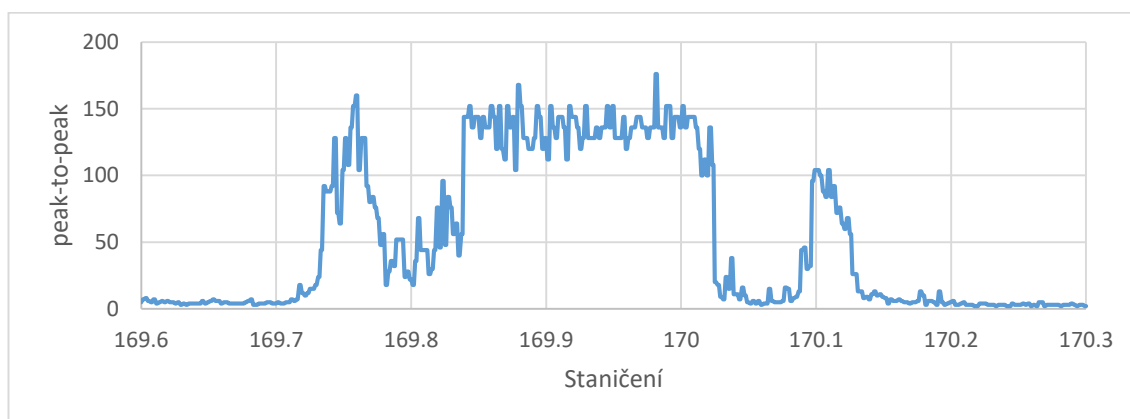
**Tab. 4** Kritéria pro přejímku podélného profilu, vyjádřená jako dovolené procento překročení [10]

Rozsah vlnových délek [mm]	10 až 30	30 až 100	100 až 300	300 až 1000
Třída 1	5 %	5 %	5 %	5 %
Třída 2	žádný požadavek	10 %	10 %	žádný požadavek

Zpracování dat systémem Měřicího vozu pro železniční svršek je mírně odlišné od výše uvedeného postupu. Důvody jsou jiné primární funkce (diagnostické s dlouhými měřeními úseky), kvantitativní (velké množství dat) a výrazně vyšší provozní rychlosti (běžně měřeny tratě s rychlostí 160 km.h<sup>-1</sup>). Ačkoliv systém měří kolejnici také po 5 mm, při zpracování jsou data dále odesílána v datových paketech do počítače po 25 cm a porovnáváním paketů mezi sebou dochází k vyhlazení výstupního profilu na tzv. kvantovaný profil s délkou stupně 1 m.

### 1.3.4 Výstup dat

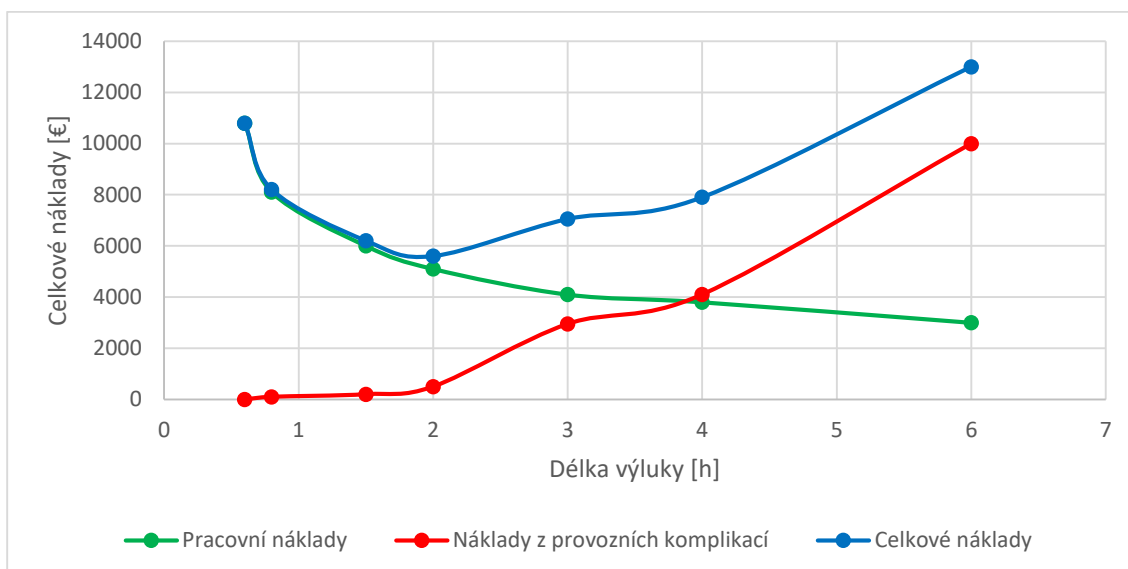
Předpis S2/4 [47] uvádí: „Výstup měřicího systému pro měření vlnkovitosti kolejnic (RCMS) umožňuje zaznamenat na grafické výstupní sestavě a v DSD čtyři stopy mikrogeometrie pro každý kolejnicový pás. Každá stopa představuje grafické znázornění hodnot mikrogeometrie pro různá vlnová pásma ve formě peak-to-peak. Rozlišují se následující vlnová pásma: 10-30 mm, 30-100 mm, 100-300 mm a 300-1000 mm. Pro možnost posouzení mikrogeometrie jsou v grafickém výstupu pro každé vlnové pásmo zobrazeny hladiny 0,1 mm a 0,2 mm.“

**Obr. 34** Mikrogeometrie pásma 100–300 mm vnitřní kolejnice koleje v oblouku

Příklad plné grafické výstupní sestavy mikrogeometrie kolejnic je v Příloze 1.

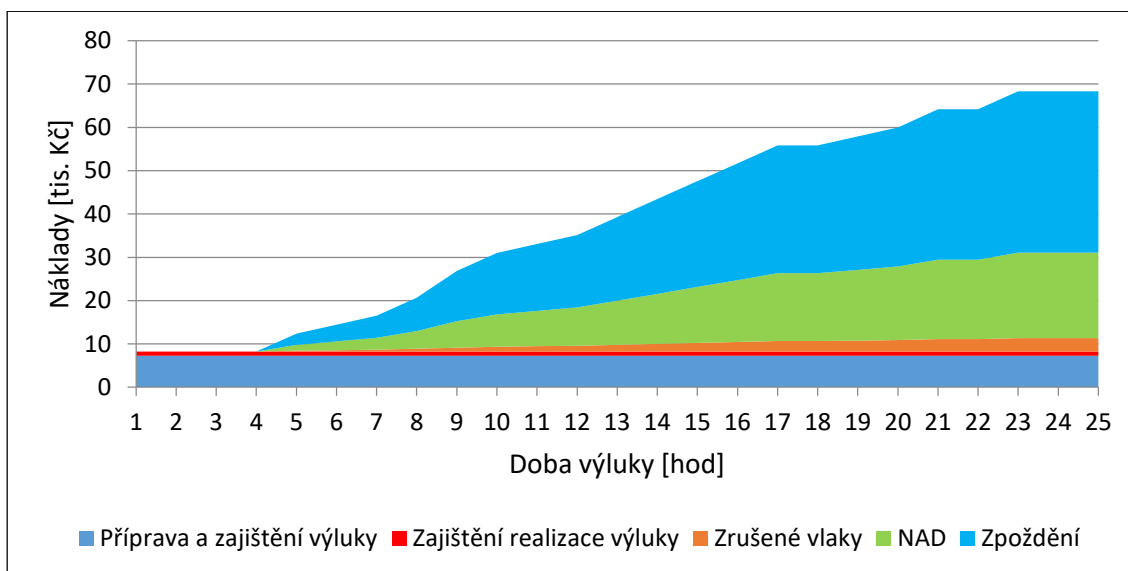
### 1.3.5 Rozhodovací proces

Výstupy z měření společně s dalšími požadavky na kvalitní jízdní dráhu mohou sloužit jako podklad pro rozhodovací proces, na kterých úsecích v rámci údržby provádět příslušné zásahy, případně určit o jaké zásahy se bude jednat (broušení, výměna kolejnic apod.) (viz kap 1.4).

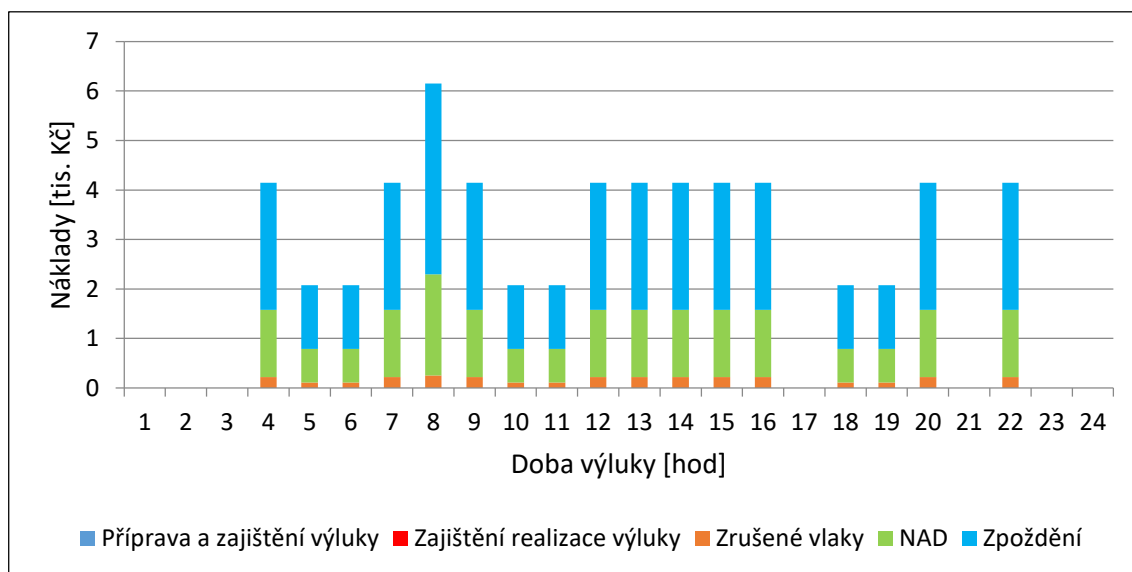


Obr. 35 Závislost nákladů na výluku dle ÖBB [48]

Zásadní roli při výběru technologie či způsobu řešení hrají finanční náklady. „Průměrná cena opravného broušení / frézování koleje je cca 4-5 x nižší než cena vložení nové kolejnice. Přitom kolejnice s dokonale odstraněnými vadami má z hlediska provozuschopnosti téměř shodné vlastnosti jako kolejnice nová. Další benefit spočívá v prodloužení životnosti ostatních prvků železničního svršku a GPK.“ [1] Finanční prostředky je třeba vynakládat nejen na samotný zásah, ale i další náklady ve formě externalit jako jsou náhradní autobusová doprava, zpoždění, hluk apod. [49]



Obr. 36 Denní výluka na regionální trati (součtový graf) [49]

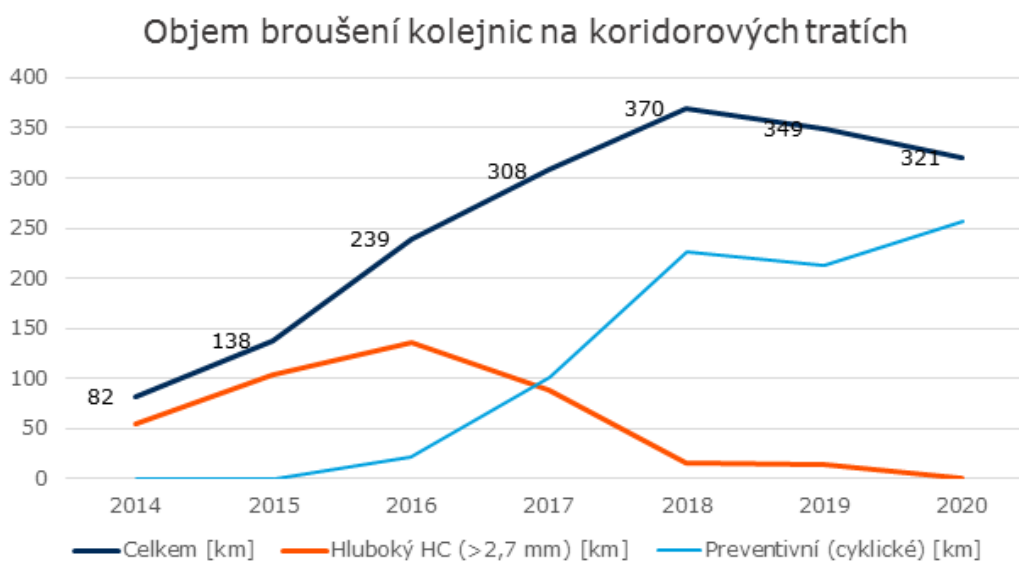


Obr. 37 Denní výluka na regionální trati (hodinový graf) [49]

„Grafy na obrázcích ukazují náklady na výluku trvající jeden pracovní den. „Součtový graf“ (Obr. 36) zobrazuje nárůst nákladů s délkou výluky. Oproti tomu z „hodinového grafu“ (Obr. 37) můžeme vyčíst cenu za jednu hodinu výluky (zde závislé především na množství běžně provozovaných spojů a s nimi spojenými externalitami během výluky). Paušální částky (příprava a zajištění výluky a realizace výluky) v tomto případě nejsou zahrnuty.“ [49]

V případě zahraničních správců infrastruktury dává např. německý správce infrastruktury DB AG přednost zkrácení výluky i v případě, že náklady na zkrácení jsou výrazně vyšší než na omezení provozu. [49]

Přesun k preventivním činnostem je možné pozorovat i u Správy železnic.



Obr. 38 Objem broušení na koridorových tratích [50]

Jak je vidět na Obr. 38, po antiheadcheckových kampaních se brousící aktivity Správy železnic zaměřují především na preventivní broušení. „Interval je nastaven na 10 let nebo maximální úběr materiálu z pojižděné hrany 2 mm – rozhoduje stav, který nastane dříve.“ [50] V rozhodovacím procesu je kromě časového hlediska nutné zohledňovat i výběr správného způsobu odstraňování a potlačování rozvoje skluzových vln.

## 1.4 STÁVAJÍCÍ ZPŮSOBY ODSTRAŇOVÁNÍ A POTLAČOVÁNÍ SKLUZOVÝCH VLN

### 1.4.1 Fyzické odstranění

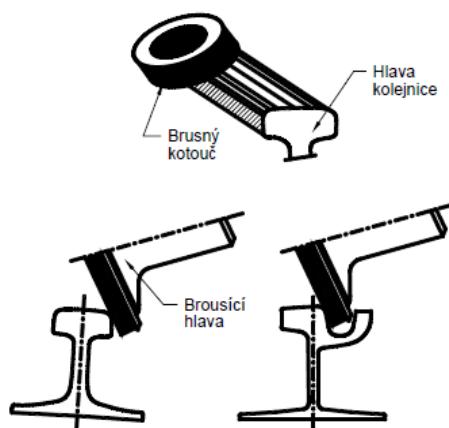
Pro odstranění vlnkovitosti se stejně jako pro většinu vad hlav kolejnic, kromě výměny samotných kolejnic, používají technologie, které lze souhrnně nazvat „opracování“ nebo „oprava pojižděných ploch kolejnic“ [51] – broušení, hoblování a frézování. Broušení kolejnic je účinné v prvních fázích vzniku vad. Frézování a hoblování kolejnic se používá jako alternativní technologie pro odstranění větších či jiných vad. Při některých zásazích je riziko tvorby martenzitické struktury (vnášení tepla do kolejnice) či vznik jemných rýh na povrchu kolejnic, což je možné ovlivnit či redukovat výběrem správné technologie. [52]

#### *Broušení kolejnic*

Brousící technologie lze dělit podle způsobu pohybu brusných kamenů:

- rotační pohyb brusných kamenů;
- podélný oscilující pohyb brusných kamenů;
- pevné brusné kameny.

Broušení pomocí rotujících prstencovitých brusných kotoučů za sucha je velmi účinné. Osa otáčení je kolmo k podélné ose kolejnice a je možné ji vychylovat tak, aby bylo možné opracovat celý profil hlavy kolejnice, používá se přitom proměnná přitlačná síla. Obroušení materiálu při jednom záběru kolísá mezi 0,02 a 0,15 mm. [3, 53]



**Obr. 39** Princip brousící technologie pomocí rotačních brusných kamenů [53]

Při použití oscilujících brusných kamenů je kontinuální kluzný pohyb doplněn o oscilující podélné pohyby brusných kamenů. [3]



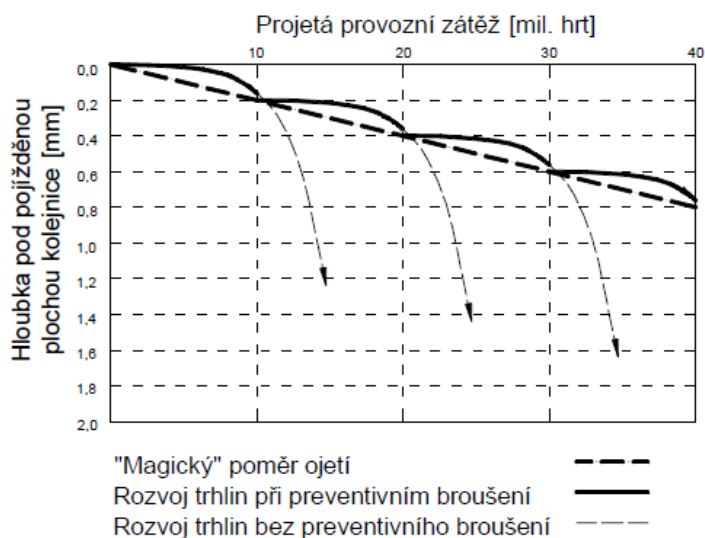
Mechanizace pro broušení kolejnic je rozmanitá – od drobné mechanizace a dvoucestných vozidel přes brousící agregáty až po brousící vlaky. Brousící vlaky se pohybují rychlostí 5–8 km.h<sup>-1</sup>, vlaky s oscilujícími brusnými kameny dosahují pracovní rychlosti asi 1,5 km.h<sup>-1</sup>. [53]. Tyto vlaky potřebují pro odstranění výrazných vad více pojezdů přes dané místo, čímž jsou vyžadovány výluky provozu. V současnosti se při broušení uplatňují tzv. vysokorychlostní brousící vlaky, jež umožňují provádět broušení při rychlosti 80 km.h<sup>-1</sup>, [54] tedy bez výluk.



**Obr. 40** Vysokorychlostní brousící vlak HSG-2 [54]

Vysokorychlostní brousící vlaky slouží především pro preventivní broušení kolejnic.

Principem preventivního broušení je umělé zvýšení ojetí kolejnic tak, aby nedošlo k vadám z kontaktního namáhání. Případná vada odstraněná již v počáteční fázi rozvoje se nemůže dále rozvíjet a dochází tím k prodloužení životnosti kolejnic, jak ukazuje Obr. 41.



**Obr. 41** Princip preventivního broušení, uvedené hodnoty projeté zátěže jsou orientační [55]

### ***Frézování kolejnic***

Frézování se užívá v případech výrazných deformací hlav kolejnic, např. hlubokých vln – odděluje se větší množství materiálu na jeden pojezd. [53]

*„Principem metody je rotace frézovacího kola, při které je z kolejnice odebírána tříška. Na frézovacím kole je umístěno několik soustav frézovacích nožů, každá soustava tvoří dohromady výsledný příčný profil.*

*Každé frézovací kolo je určeno pro jedinou kombinaci příčného profilu a úklonu kolejnice. Je-li v průběhu frézování vyžadována změna příčného profilu, je nezbytné vyměnit celé frézovací kolo za jiné.*

*Výkon jedné sady frézovacích kol (tzn. pro každý kolejnicový pás jedno) je obvykle 0,8–1,1 mm úběru materiálu jedním pojezdem.“ [56]*



**Obr. 42** Detail frézovacího kola [56]

### ***Hoblování***

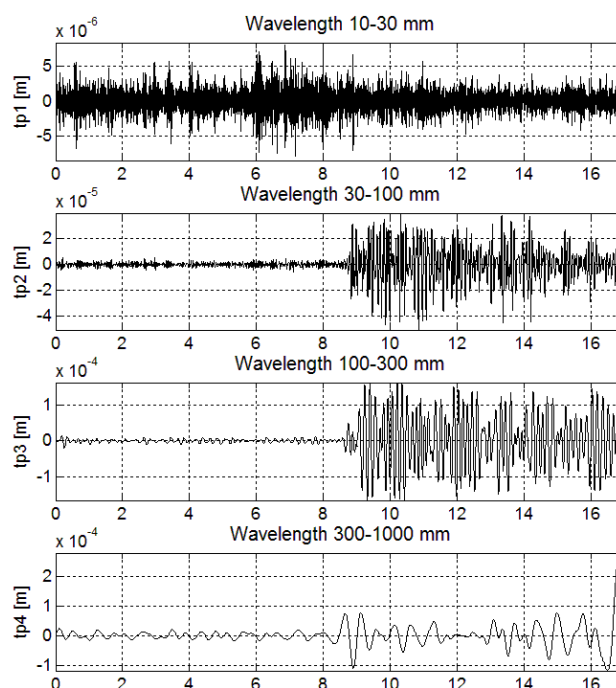
Stejně jako frézování hoblování odebírá větší množství materiálu z kolejnic. Podle technologie hoblování je možný odběr 3 mm nebo 1,5–2,5 mm materiálu na jeden cyklus. [56] Z tohoto důvodu se s frézováním nejedná o vhodnou technologii pro odstraňování vlnovitých deformací.

### ***Výměna kolejnic***

Výměnu kolejnic lze považovat za radikální a poslední řešení odstranění vad. Výměna je nejen finančně, ale především časově náročná, jejímž důsledkem je mnohdy několikadenní výluka, což v případě silně zatížených tratí není příliš žádoucí.

S výměnou kolejnic je spojena celá řada dalších činností, které prodlužují výlukovou činnost a zvyšují organizační náročnost celé akce dalšími pracovními mechanismy a dalšími pracovníky. Mezi přidružené činnosti patří řezání kolejnic, jejich odvoz, výměny podložek pod patu kolejnice, práce s upevňovacími, svařování kolejnic atd.

Measurement: MDK\_51120144037, Line: Vyskov, Start Km: 1, Rail: 1



**Obr. 43** Výstupní graf z měřicího zařízení Salamander ukazuje kolej, v jejíž části byly kolejnice vyměněny (vlevo) a část, kde byly kolejnice ponechány (vpravo) [57]

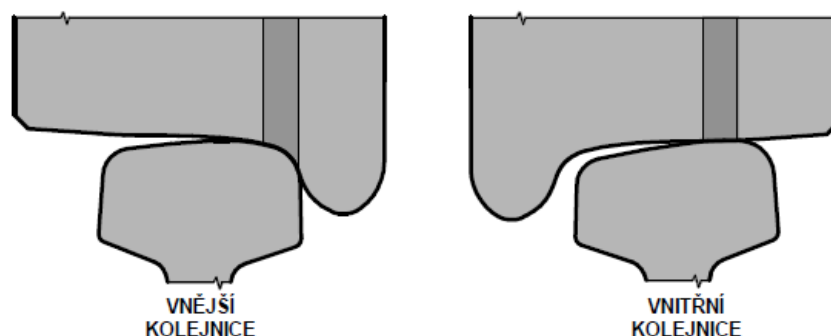
## 1.4.2 Preventivní opatření

Především broušení je vhodné jako preventivní opatření prodlužující životnost kolejnic. Jako nevhodnější způsob preventivního broušení se jeví odstraňování vad v prvotních fázích jejich rozvoje (viz Obr. 41) např. pravidelnými jízdami brousících strojů, kdy je možné využít volný čas mezi běžnými vlaky a není tak nutné využívat výluk

### *Asymetrické tvary profilu kolejnic*

Protože dvojice vozidlo – kolej, resp. dvojkolí – kolejnice vzájemně tvoří jeden systém, je možno ovlivnit tvorbu skluzových vln i tvarem příčných profilů hlav kolejnic a jízdnicích obrysů kol. Lze použít širokou paletu jízdnicích obrysů kol od cylindrických až po kónická. [58]

V praxi se dále využívá možnost úpravy kolejnic technologiemi uvedenými výše do asymetrického tvaru pro ovlivnění rychlosti rozvoje opotřebování vnější kolejnice a rozvoje vlnovitosti. [58]



**Obr. 44** Princip zlepšení kontaktních poměrů dvojkolí-kolej speciálním tvarem příčných profilů hlav kolejnic v oblouku koleje, tzv. asymetrické broušení [58]

Dle [58] např. speciální příčný profil hlav kolejnic ve srovnání s kolejnicí 60 E2 při kombinaci s jízdním obrysem kol ORE S 1002 vytváří v obloucích malých poloměrů:

- vhodnější geometrické kontaktní poměry pro nabíhající kolo a vnější kolejnici. Při dvoubodovém dotyku snížením předstihu bodu dotyku na okolkou nabíhajícího kola dojde k výraznému snížení skluzové rychlosti na okolkou a tím i opotřebení okolkou 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 tím i vodicích sil na nabíhajících kolech. Na nenabíhajících dvojkolích strmější průběh funkce  $\Delta r$  naopak způsobí snížení podélných skluzových sil, které se podílejí na rozvoji vlnkovitosti vnitřní kolejnice.

### ***Kolejnicové oceli s vyšší otěruvzdorností***

Materiál kolejnic hraje důležitou roli při rozvoji vlnovitých deformací, neboť některé materiály jsou náchylnější k rozvoji vad, např. Thomasova ocel je náchylnější k rozvoji vad než Martinská [64].

Dle [37, 65] je základním kolejnicovým materiálem ocel třídy R260 podle [66], ekvivalentní k UIC 900 A podle [67].

Předpis [65] uvádí “Při novostavbě, rekonstrukci nebo souvislé výměně kolejnic se v hlavních a průběžných traťových kolejích 1. až 4. řádu v obloucích s poloměrem do 700 m včetně v obou kolejnicových pásech ... použijí kolejnice z oceli R350HT.”

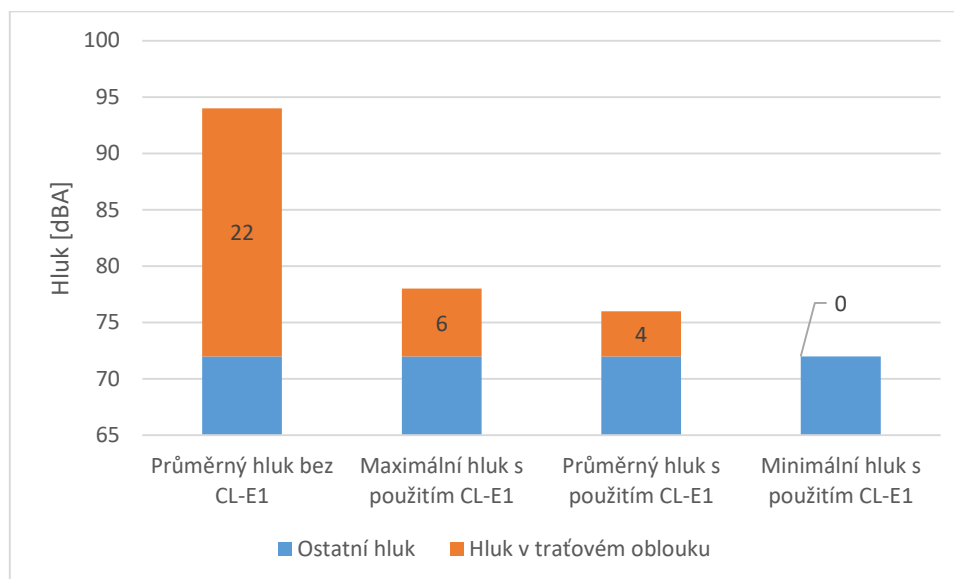
Správa železnic má dle [37] dobré zkušenosti s kolejnicemi s tepelně zpracovanou hlavou - konkrétně kolejnicemi třídy R350HT, neboť má vysledováno, že má minimálně dvojnásobně vyšší otěruvzdornost a odolnost vůči kontaktně-únarovým vadám oproti oceli R260. Je dále snahou uplatňování těchto kolejnic do oblouků menších než 400 m.

### ***Mazníky***

Mazníky jsou zařízení sloužící ke snížení koeficientu tření v soustavě kolo-kolejnice (více v kap. 1.2.4) použitím vhodného modifikátoru tření. Ten může být nanášen na okolky vozidel, což je výhodné především pro dopravce nebo je nanášení modifikátoru

tření prováděno pomocí mazníků instalovaných přímo na kolejnici. Principi modifikátoru tření je vysvětlen v kap. 1.2.4.

Kromě výše uvedeného se může v závislosti na místních podmínkách pomocí mazníků snížit hluk o 7 až 15 dBA, v některých případech až o 20 dBA. [59]



**Obr. 45** Snížení hluku v traťových obloucích s použitím systému CL-E1 [59]

Je potřeba zvolit správné dávkování maziva – jak množství, tak i intervaly. [60]. V první řadě musí být ekologické, přírodně odbouratelné. Musí zachovávat původní brzdné i rozjezdové podmínky kolejových vozidel, provozně-technické podmínky pro činnost kolejových obvodů a nezhoršovat podmínky přilnavosti sypkých materiálů na hlavě kolejnice [61]. Do směsi je možné přidávat např. antikoroziční přísady. Složení maziva se liší výrobce od výrobce.

### Zpružnění jízdní dráhy

Možností redukce skluzových vln je zpružnění upevnění železničního svršku. Příkladem může být zkušební úsek s podpražcovými podložkami v Havlíčkově Brodě. [62] V dnešní době se čím dál častěji setkáváme s tzv. zpružněním upevnění kolejnic. Zvýšení elasticity upevnění kolejnic má příznivý vliv na rychlost rozvoje skluzových vln (viz 1.2.5).

*„Pružnost upevnění může hrát také pozitivní roli při tvorbě kontaktně-únavových vad a na rychlosti opotřebení kolejnic, jak vypovídají především zkušenosti ze zahraničí. K podobným poznatkům dospěli například zaměstnanci správy tratí Brno, kteří zjistili, že v jednom z oblouků na trati Brno – Blansko, který leží zčásti na dřevěných pražcích a zčásti na betonových pražcích, se skluzové vlny vyskytují v daleko větší míře právě v koleji s betonovými pražci. V úseku se po výměně kolejnic a upevnění sleduje vliv upevnění s podložkou pod patu kolejnice s nižší tuhostí na vznik skluzových vln na kolejnici v porovnání s klasickým upevněním.“* [37]

Naopak užitím nevhodných komponent je možné rozvoj skluzových vln urychlit. [38]

Další možností zpružnění jízdní dráhy jsou podpražcové podložky. „Pomocí podpražcových podložek je možné ovlivnit chování pražců v požadované oblasti frekvenčního spektra. Tak lze potlačit vznik vibrací a emise hluku v těchto frekvencích. Vložením pružné vrstvy na ložnou plochu pražce se zvýší pražci možnost vibrovat. Část energie dynamických jevů se z koleje vyzáří ve formě hluku od vibrujícího pražce. Pro nově zřízenou kolej s pražci s pružnou ložnou plochou byla pozorována mírně zvýšená úroveň hluku (v řádu jednotek dB). S časem však taková kolej vykazuje pomalejší rozvoj imperfekcí pojižděných ploch kolejnic. V důsledku toho je hlučnost takové koleje nižší než u srovnatelné koleje bez podpražcových podložek. Z tohoto důvodu se ve zkušebních úsecích sledují kromě hlučnosti zejména parametry vibrací, pohyby pražců a kolejnic a měření rozvoje nepravidelností na pojižděné ploše kolejnic.“ [63]

### **Pojezdy vozidel**

Základním prvkem pojezdu vozidla je dvojkolí a jeho uložení vzhledem k vozové skříni nebo k rámu podvozku a k vypružení vozové skříně. Skříně vozidel pro vyšší únosnost dlouhých vozidel se ukládají na podvozcích [25]. Tramvaje typu T3 nebo Tramvaj 15 T ForCity Praha mají podvozky otočné, které se při jízdě obloukem staví do radiální polohy a umožňují hladký průjezd vozidel. Novější typy tramvajů (Anitra, 13T) jsou vybaveny pevnými podvozky, kdy natočení v oblouku je zajištěno kloubovým provedením skříně vozidla. Tato konstrukce vede ke snižování životnosti kolejnic.

Další možností mohou být kola nespojená nápravou, ale pouze s krátkými nápravami pro jednotlivá kola. Dnes se využívají hlavně pro zajištění nízkopodlažnosti vozidel. Příkladem je tramvaj RT6N1. Prostřední nehnaný podvozek je tvořen čtyřmi samostatně uloženými koly s kyvnými rameny (bez náprav) [68]. U hnaných podvozků této konstrukce jsou problémy se synchronizací pohonů jednotlivých kol.

## 2 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem disertační práce je rozvoj metod sledování rozvoje skluzových vln v čase s možností predikce dalšího vývoje. Pokud by měl správce infrastruktury k dispozici nástroj, jenž by na základě vývoje stávajícího stavu umožnil plánovat údržbu, opravné práce a výlukovou činnost, došlo by k minimalizaci vlivu těchto zásahů na provoz a k menšímu vlivu tratě na okolí, například ve formě nižší hlukové zátěže. Výběrem správného zásahu by dále došlo ke snížení finanční náročnosti a zvýšení spolehlivosti železniční dopravy.

Je proto nutné nalézt takové parametry, které je potřeba sledovat pro možnost vykreslení křivek rozvoje skluzových vln. Parametry lze rozdělit do tří skupin:

- Infrastruktura;
- Vozidla;
- Doprava.

Všechny tři skupiny dohromady tvoří jeden celek a propojenou soustavu. Nelze se tak zabývat pouze jednou jeho částí, neboť změna vlastností jedné části může vyvolat změnu vlastností v jiné části nebo dokonce vlastnosti zcela nové.

Pro nalezení hlavního cíle byly stanoveny dílčí cíle práce

- zpracování stávajících dat z uskutečněných měření;
- zpracování informací z pasportů tratí, výlukové činnosti a údržbových prací;
- nalezení vhodných parametrů tratí pro sledování;
- vyhodnocení měřitelnosti jednotlivých parametrů;
- vyhodnocení dlouhodobé sledovatelnosti jednotlivých parametrů;
- posouzení způsobu hodnocení dat (množství, zpracování);
- navržení způsobu měření a sledování parametrů;
- návrh (alternativního) řešení ovlivnitelným parametrem.

## 3 METODIKA VÝZKUMNÉ ČINNOSTI

### 3.1 METODIKA SLEDOVÁNÍ VLNOVITÝCH DEFORMACÍ

#### 3.1.1 Teoretický úvod

Ačkoliv existují postupy a metodiky pro měření mikrogeometrie kolejnic, v drtivé většině případů se jedná o praktické (často zjednodušené) aplikace pro záznam a případně zpracování velkého množství dat, případně pro „Přejímku reprofilace kolejnic“ [10]. Jednotlivá data bývají zpracovávána až na základě požadavků např. správců tratí.

Pro potřeby problematiky skluzových vln je nutné hledat vlastní postupy a metodiky sledování, neboť praktické aplikace mnohdy nepopisují a nesledují potřebné parametry.

Disertační práce se z propojené soustavy Infrastruktura-vozdila-doprava zabývá především infrastrukturou. Na parametry ovlivňující rozvoj skluzových vln lze nahlížet ve dvou rovinách:

- sledované vs. nesledované;
- ovlivnitelné vs. neovlivnitelné.

Například poloměr oblouku je parametr sledovaný, avšak v drtivé většině případů neovlivnitelný. Oproti tomu rychlost drážních vozidel je parametr ovlivnitelný, ovšem doposud systematicky nesledovaný ve vztahu ke skluzovým vlnám.

Metodika popsaná v této práci koresponduje s [69].

#### ***Základní parametry pro sledování vlnovitých deformací poježděné plochy kolejnice***

Pro potřeby měření a sledování je vybráno rozdělení dle normy ČSN EN 13231-3 [10] s rozdělením na vlnová pásma:

- 10–30 mm;
- 30–100 mm;
- 100–300 mm;
- 300–1000 mm.

Dle [70] se vlnové délky ve vlnovém pásmu 100–300 mm vyhodnocují jako skluzové vlny (vlnkovitost zejména na vnitřních kolejnicích v obloucích).

Toto dělení vlnových pásem dle ČSN [10] není pro potřeby sledování skluzových vln příliš vhodné, neboť vlny se mohou vyskytovat s vlnovou délkou kratší než 100 mm [2, 3], obzvláště v obloucích malých poloměrů. Na základě teorie vzniku skluzových vln, vlastních měření a porovnání dat, lze konstatovat, že pro potřeby sledování skluzových vln je možné do jisté míry kategorii 30–100 mm sloučit s kategorií 100–300 mm, neboť v obou pásmech je mnohdy dosahováno stejných nebo velice podobných hodnot amplitud vln.

Z výše uvedeného jsou pro potřeby skluzových vln pro tuto práci sledována především vlnová pásma 30–100 mm a 100–300 mm.



## 3.2 SLEDOVANÉ ÚSEKY

### 3.2.1 Výběr úseků

Ve spolupráci s tehdejší Správou železniční dopravní cesty s. o. (SŽDC), dnes Správou železnic, s. o. byly vytipovány vhodné úseky pro sledování skluzových vln typické výrazným projevem této vady. Dalšími kritérii ovlivňující výběr byly shodné nebo alespoň podobné známé parametry a vlastnosti oblouků, mezi které patří:

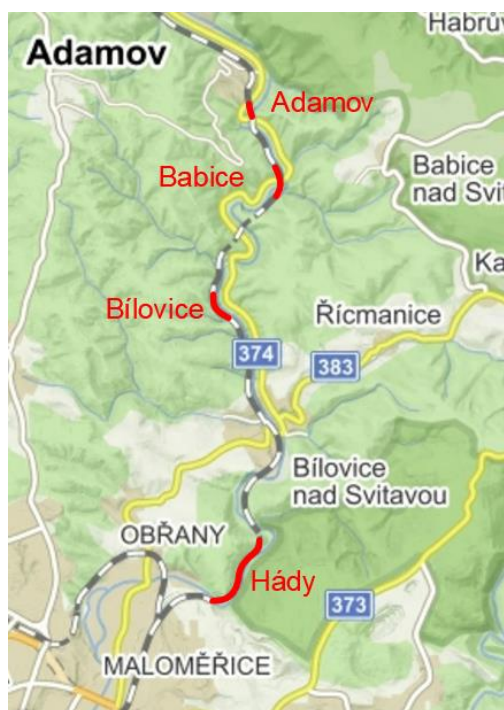
- poloměry oblouků;
- převýšení koleje;
- dopravní zatížení.

Následně proběhlo vyhodnocení dostupných dat k jednotlivým úsekům. Nákrešné přehledy železničního svršku, které sloužily jako prvotní zdroj informace o úsecích, nejsou vždy aktuální a nezaznamenávají poslední uskutečněné práce na tratích.

Pro praktické geografické rozlišení a organizaci jednotlivých měření byly zavedeny pojmy úsek a měřící místo. Úsekem je myšlena geografická oblast nebo část tratě, přičemž se nejčastěji jedná o konkrétní oblouk či oblouky a úsek může být složen z více měřících míst. Měřícím místem je pak část konkrétní koleje, ve které bylo provedeno měření a je definováno číslem koleje, začátkem a koncem měření vztahených k pevným bodům (viz kap. 3.3.2). Jednotlivá měřící místa se mohou překrývat.

Monitorované úseky železničních drah:

- Havlíčkův Brod;
- Hády, Bílovice, Babice;
- Velký Osek – odb. Kanín;
- Vyškov.



Obr. 46 Návaznost úseků na trati č. 326 Brno – Česká Třebová

Většina úseků tratí je dvoukolejných, a proto je možné provádět porovnání dvou míst v jedné koleji, nebo jedno místo v každé koleji např. v zájmovém oblouku.

Pro správné pochopení rozvoje skluzových vln je důležité sledovat i další vlivy vstupující do procesu rozvoje. Samostatnou kapitolou může být skladba jednotlivých vlaků, neboť na některých úsecích je skladba neměnná, a na jiných úsecích je skladba souprav velice různorodá. Například v okolí velkých spádových center převažuje příměstská osobní doprava.

I přes veškerou snahu nebudou porovnávané oblouky nikdy dokonale shodné. Proto byla z výše uvedených důvodů z jednotlivých úseků vybírána krátká měřicí místa délek v řádech desítek metrů a až na výjimky se na úsecích nalézají více měřicích míst umožňujících alespoň porovnávání v rámci jednoho úseku či úseků, jsou-li na jedné trati. Tímto odpadá právě různorodá skladba provozovaných souprav vlaků v rámci jednotlivých úseků, čímž dochází k eliminaci vlivu interakce konkrétního jízdního obrysu kola – tvaru kolejnice a konstrukce vozidel. Konkrétní měřicí místa byla volena dle předpokladu ovlivňování vzniku a rozvoje skluzových vln kromě směrových parametrů vedení tratí i samotnou konstrukcí železničního svršku (skladba konstrukce železničního svršku včetně vlivu jiných doposud zkoušených konstrukčních prvků – např. zpružněné systémy upevnění kolejnic na pražci, svěrky se zvýšeným únavovým limitem, podpražcové podložky) a konstrukce železničního spodku tratí (např. vliv skalního podloží, mostních konstrukcí apod.).

Uvedené číslování tratí je podle sešitového a nákrešného jízdního řádu.

### 3.2.2 Popis úseků

#### *Adamov*

**Lokalizace:** Úsek se nachází na trati č. 326 Brno – Česká Třebová mezi Brno-Maloměřice St. 6 – žst. Adamov.

**Staničení:** km 169,694–170,119

**Popis:** Dvoukolejný úsek je tvořen pravostranným obloukem v místě bývalého tunelu č. 6.

**Tab. 5** Měřicí místa na úseku Adamov

Označení místa	Kolej	Staničení [km]	Poloměr [m]	Převýšení [mm]	Motiv oblouku
AD1.1	1	169,800–170,050	354	146	pravý

Podrobný popis jednotlivých měřicích míst je v Příloze 2.

#### *Babice*

**Lokalizace:** Úsek se nachází na trati č. 326 Brno – Česká Třebová mezi Brno-Maloměřice St. 6 – žst. Adamov.

**Staničení:** km 168,550–169,300

**Popis:** Dvukolejný úsek Babice začíná v zastávce Babice nad Svitavou a jeho součástí je levostranný oblouk na mostě přes řeku Svitavu a zářez po zrušeném tunelu. Úsek je charakteristický zastavováním některých vlaků v zastávce.

**Tab. 6** Měřicí místa na úseku Babice

Označení místa	Kolej	Staničení [km]	Poloměr [m]	Převýšení [mm]	Motiv oblouku
BS1.1	1	168,715–168,754	378	100	levý
BS1.2	1	168,985–169,082	375	140	levý

Podrobný popis jednotlivých měřicích míst je v Příloze 3.

### ***Bílovice***

**Lokalizace:** Úsek se nachází na trati č. 326 Brno – Česká Třebová mezi Brno-Maloměřice St. 6 – žst. Adamov.

**Staničení:** km 166,250–167,150

**Popis:** Na úseku se nacházejí dva protisměrné oblouky. Celý úsek je dvukolejný.

**Tab. 7** Měřicí místa na úseku Bílovice

Označení místa	Kolej	Staničení [km]	Poloměr [m]	Převýšení [mm]	Motiv oblouku
BV1.1	1	166,745–166,779	275	130	pravý
BV1.2	1	166,955–166,990	302	130	pravý

Podrobný popis jednotlivých měřicích míst je v Příloze 4.

### ***Hády***

**Lokalizace:** Úsek se nachází na trati č. 326 Brno – Česká Třebová mezi Brno-Maloměřice St. 6 – žst. Adamov

**Staničení:** km 161,685–163,000

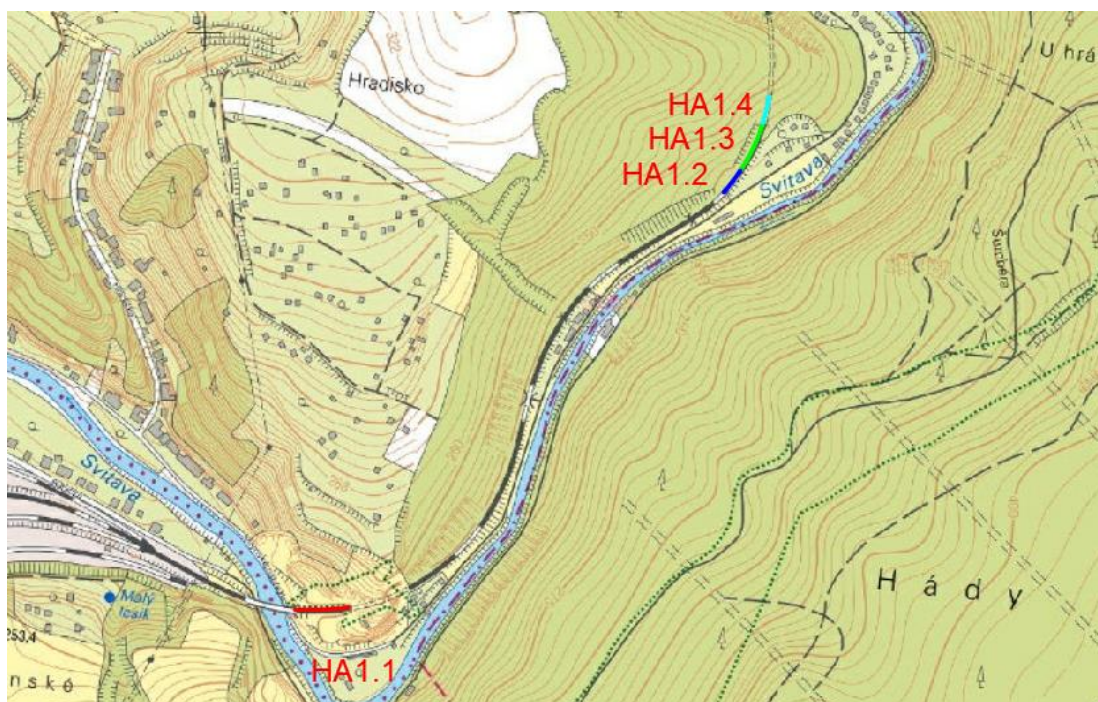
**Popis:** Úsek Hády začíná za posledními výhybkami Brna-Maloměřic. Celý úsek je dvukolejný se třemi protisměrnými oblouky, dvěma tunely a mostem přes řeku Svitavu.

Na úseku se nacházejí měřicí místa především u jižního portálu tunelu č. 1 a u jižního portálu tunelu č. 2. Přestože se jedná o dvukolejnou trať, byla pravidelně sledována pouze první traťová kolej. Tato kolej je běžně pojížděna ve směru od tunelu 2 k tunelu 1, tedy ve směru od České Třebové do Brna.

**Tab. 8** Měřicí místa na úseku Hády

Označení místa	Kolej	Staničení [km]	Poloměr [m]	Převýšení [mm]	Motiv oblouku
HA1.1	1	161,733–161,913	283	123	levý
HA1.2	1	162,750–162,792	261	123	levý
HA1.3	1	162,792–162,865	261	123	levý
HA1.4	1	162,865–162,910	261	123	levý

Podrobný popis jednotlivých měřicích míst je v Příloze 5.



Obr. 47 Měřicí místa na úseku Hádý

### Havlíčkův Brod

Úsek se nachází na trati č. 502, dříve č. 324 Havlíčkův Brod – Nymburk mezi žst. Havlíčkův Brod a žst. Okrouhlice.

**Staničení:** km 224,394–225,700

**Popis:** Úsek Havlíčkův Brod se nachází na okrouhlickém záhlaví žst. Havlíčkův Brod. Celý úsek je dvoukolejný s dvěma protisměrnými oblouky. Oblouky jsou charakteristické velkými převýšeními, velmi rozvinutými vlnovými deformacemi hlav kolejnic obou kolejnicových pásů a častým praskáním svěrek upevnění.

Literatura [71] popisuje úsek následovně: „V prvním oblouku i před ním je traťová rychlost  $60 \text{ km.h}^{-1}$  (v koleji č. 1 jen  $55 \text{ km.h}^{-1}$ ), ve druhém oblouku i v navazujícím úseku  $70 \text{ km.h}^{-1}$ . Kolejové spojky ve stanici i předjízděné koleje jsou na  $40 \text{ km.h}^{-1}$ . Rychlost vlaků je zde ovlivněna brzděním/rozjezdem ve stanici Havlíčkův Brod. Některé nákladní vlaky jedoucí od Kutné Hory zastavily na zhlaví tak, že konec vlaku stál v prvním oblouku. Tato zvláštní situace patří v H. Brodě k běžné praxi, usnadňuje předávání dokumentů na lokomotivu, která zastaví u služebního přechodu před výpravní budovou.“

Tab. 9 Měřicí místa na úseku Havlíčkův Brod

Označení místa	Kolej	Staničení [km]	Poloměr [m]	Převýšení [mm]	Motiv oblouku
HB1.1	1	224,583–224,607	258	43	levý
HB1.2	1	224,943–224,967	288	139	pravý
HB2.1	2	224,583–224,607	266	65	levý
HB2.2	2	224,943–224,967	284	139	pravý

Podrobný popis jednotlivých měřicích míst je v Příloze 6.



Obr. 48 Měřicí místa na úseku Havlíčkův Brod

### Velký Osek – odb. Kanín

**Lokalizace:** Úsek se nachází na trati č. 505 Velký Osek – Hradec Králové mezi žst. Velký Osek a odb. Kanín

**Staničení:** km 1,100–1,500

**Popis:** Úsek Velký Osek se nachází na vratné jednokolejné spojnici mezi tratěmi 502 a 505. V oblouku se nachází přejezd s odlišnou skladbou svršku v porovnání se zbytkem oblouku.

Tab. 10 Měřicí místo na úseku Velký Osek

Označení místa	Kolej	Staničení [km]	Poloměr [m]	Převýšení [mm]	Motiv oblouku
VO1.1	1	1,330–1,400	305	91	levý

Podrobný popis měřicího místa je v Příloze 7.



Obr. 49 Měřicí místo na úseku Velký Osek

## Vyškov

**Lokalizace:** Úsek se nachází na trati č. 315 Brno – Přerov mezi žst. Vyškov na Moravě a žst. Ivanovice na Hané

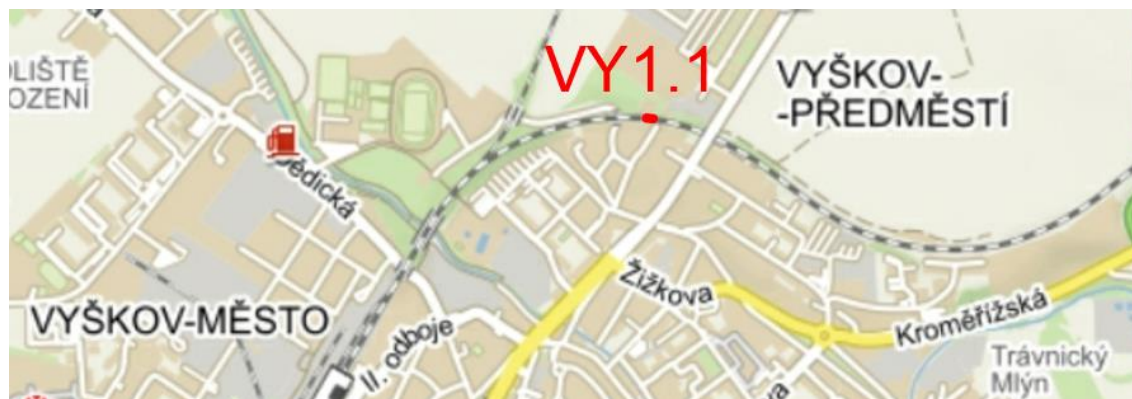
**Staničení:** km 47,436–48,600

**Popis:** Jednokolejný úsek Vyškov se nachází v oblouku s rozdílnými svršky a s částečně vyměněnými kolejnicemi.

**Tab. 11** Měřicí místo na úseku Vyškov

Označení místa	Kolej	Staničení [km]	Poloměr [m]	Převýšení [mm]	Motiv oblouku
VY1.1	1	48,272–48,289	572	113	pravý

Podrobný popis měřicího místa je v Příloze 8.



**Obr. 50** Měřicí místo na úseku Vyškov

### 3.3 MĚŘENÍ

Cílem bylo sledovat jednotlivá místa v pravidelných intervalech, které se vzájemně lišily dle současného stavu rozvoje vad, hustoty provozu, údržbových a opravných prací, plánech SŽDC apod. Bohužel z technických a organizačních důvodů nebyly tyto intervaly vždy přísně dodržovány. Další komplikací narušující harmonogram měření byly případné údržbové práce.

Pro měření byly vybírány dva druhy úseků – úseky, kde došlo k výměně nebo broušení kolejnic a úseky bez těchto zásahů.

Úseky, na kterých došlo k výměně kolejnic, umožňují sledovat rozvoj skluzových vln v počátečních fázích rozvoje, a proto byly sledovány v kratších intervalech. Oproti tomu u lokalit s rozvinutou vadou byla periodičita měření delší vzhledem k výraznějším (hlubším a tvarově lépe pozorovatelným) vlnám a je možné zde provádět měření jednotlivých vln. Jak je vidět na Obr. 51, skluzové vlny dosahují v mnoha případech zajímavých tvarů, které se v rámci jednoho oblouku postupně mění.



**Obr. 51** Zvýrazněné skluzové vlny nečistotami v Havlíčkově Brodě

Výše uvedené úseky, resp. jejich jednotlivá měřicí místa byla sledována a zdokumentována následujícími metodami:

- vizuální prohlídka úseku a fotodokumentace;
- měření geometrických parametrů koleje;
- měření vlnovitých deformací pojezděné plochy hlavy kolejnic přístrojem Salamander;
- měření rychlostí projíždějících souprav a záznam o jejich skladbě.

Kromě mikrogeometrie pojezděné plochy hlavy kolejnice, konkrétně vlnovité deformace, byly měřeny geometrické parametry koleje z důvodu popsání aktuálního stavu koleje, který bohužel v mnoha případech neodpovídal informacím uváděných v nákrešných přehledech železničního svršku. Dalším důvodem pro sledování geometrických parametrů koleje je aktualizace informací, jako jsou rozchod koleje, resp. rozšíření rozchodu apod.

V ideálním případě by bylo žádoucí na každém úseku zdokumentovat celý zájmový oblouk nebo oblouky a vzájemně je porovnávat. Bohužel v některých případech nebylo z technických důvodů možno zaznamenat celý oblouk, neboť byla snaha se vyvarovat

izolovaným stykům, místům s vadami kolejnic, projetým svarům, mazníkům, místům s převalky apod. Na úsecích byla proto primárně vybírána konkrétní měřicí místa. Navíc měření probíhala v provozovaných kolejích bez vyloučení provozu.

### 3.3.1 Měření vlnovitých deformací poježděné plochy hlavy kolejnice

Veškerá vlastní měření probíhala pomocí přístroje Salamander II.

#### *Měřicí zařízení*

*„Měřicí zařízení Salamander je laserový měřicí přístroj určený pro bezkontaktní měření drsnosti a vlnovitosti povrchu kolejnice a kola bez demontáže podvozku. Může sloužit i pro potřeby hlukového hodnocení železniční tratě. Je možné s ním měřit nepřerušené úseky v neomezené délce, vyhodnotit naměřená data a vypočítat výslednou třetinooktávovou analýzu podle pravidel normy EN15610 41. Lze příčně nastavovat měřicí stopu na poježděném povrchu plochy kola nebo hlavy kolejnice. Pro měření se používá metoda mikrotěťivové kontaktní geometrie se snímací hlavou osazenou optoelektrickými snímači.*

*Salamander se skládá z měřicího ručního vozíku pro práci v trati, posuvné měřicí hlavy pro měření na kole vozidla a elektroniky externího počítače (PDA, případně touchpad nebo notebook). Vozík je lehký a kompaktní. Je velmi snadné jej sundat a opět vrátit do tratě během několika sekund. Proto je možné měřit i na trati za plného provozu.“ [72]*



**Obr. 52** Zařízení Salamander II, foto Ing. Petr Guziur



Měřicí metoda je bezkontaktní. Je založena na snímání a vyhodnocení světelných stop na povrchu kolejnice.

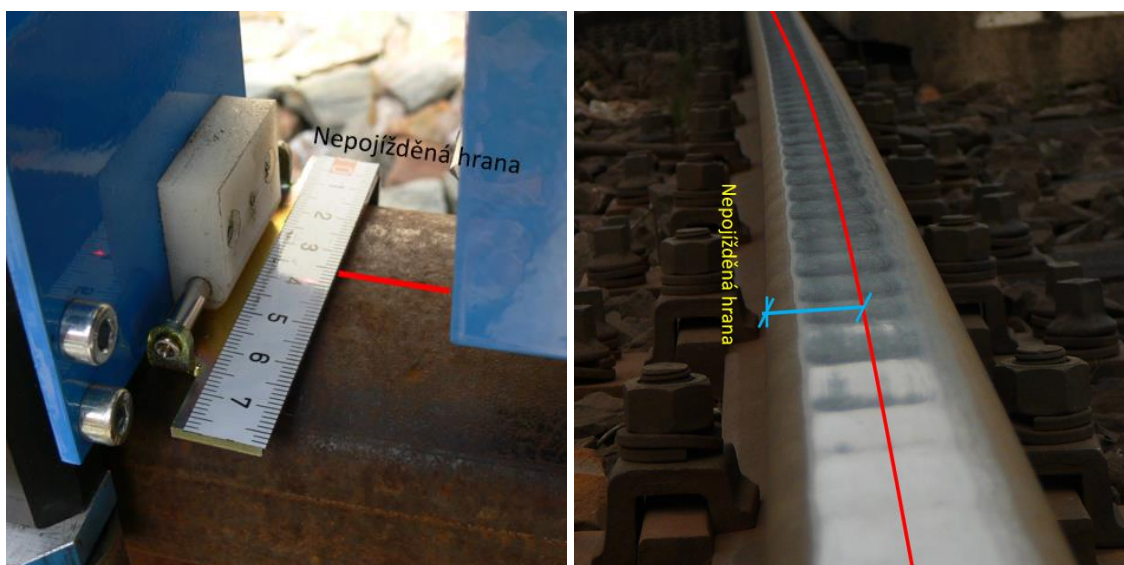
Světelnými paprsky generovaný laser vytváří na povrchu měřeného tělesa světelnou stopu. Z polohy světelné stopy se vypočítá vzdálenost měřeného povrchu od snímače. Ze sejmutých dat se pomocí počítačového zpracování získává vzdálenost měřeného povrchu od vztažné úsečky. Měření vyžaduje difúzní rozptyl světla na povrchu kolejnice. Proto musí být povrch kolejnice suchý. Voda nebo vodní kapky znemožňují správné měření. [72]

#### Technické parametry:

- maximální délka měřeného úseku: doporučeno do 30 m;
- rychlost měření:  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ ;
- krok měření: 5 mm;
- rozlišení snímače:  $0,6 \mu\text{m}$ ;
- délka provozu na baterie: 4 h pro vozík, u řídicího počítače závisí na jeho konkrétním typu;
- hmotnost: 8 kg;
- rozměry v transportním stavu: 400 x 800 x 340. [72]

#### Měření

Měření vlnovitých deformací (měřicí profil) bylo prováděno co nejbližší středu pojezděné plochy hlavy kolejnice. U každého měření byla zaznamenána vzdálenost mezi nepoježděnou hranou hlavy kolejnice a měřícím profilem (Obr. 53).



**Obr. 53** Umístění měřícího profilu (červeně) na poježděné ploše hlavy kolejnice s ukázkou zaměření k nepoježděné hraně hlavy kolejnice

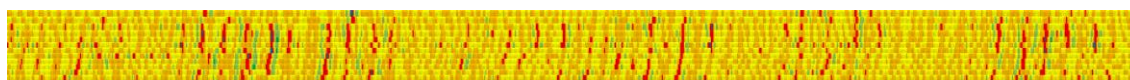
V odůvodněných případech je možno v příčném řezu užít i jiný měřicí profil, avšak tato měření nelze porovnávat s měřeními uprostřed poježděné plochy hlavy kolejnice. Na úseku Havlíčkův Brod bylo měřicí místo „pod mostem“ délky 6 m zkušebně projeto

v různých stopách ve vzdálenosti 0,3, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0, 4,5, 5,0, 5,5 a 6,0 mm od nepojížděné hrany. Následně byly ve vlnových pásmech 30–100 mm a 100–300 mm zvýrazněné hodnoty podle Tab. 12.

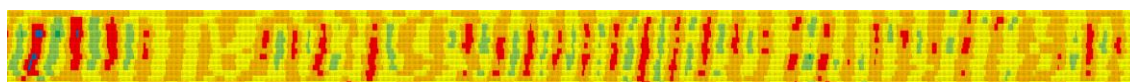
Tab. 12 Legenda k Obr. 54 a Obr. 55



Výsledek je na Obr. 54 a Obr. 55, které společně s Obr. 51 demonstrují nepravidelné tvary této periodické vady kolejnic. Porovnávání měření díky rozdílným měřícím profilům mezi měřeními by nebylo možné.



Obr. 54 Vlnové pásmo 30–100 mm



Obr. 55 Vlnové pásmo 100–300 mm

Maximální délka měřeného úseku nebyla omezena. Minimální délka byla stanovena na 10 m z důvodů dostatečného množství dat pro vlnové pásmo s vlnovými délkami 300–1000 mm

### Měření vlnovitých deformací

Lokalita: Hády  
Datum: 12.05.2017  
Trať: 326 (Brno-Maloměřice St.6 - Česká Třebová), km 161.685 - 163.000  
Měřil: Guziur  
Zapísoval: Valehrach  
Počasí: slunečno

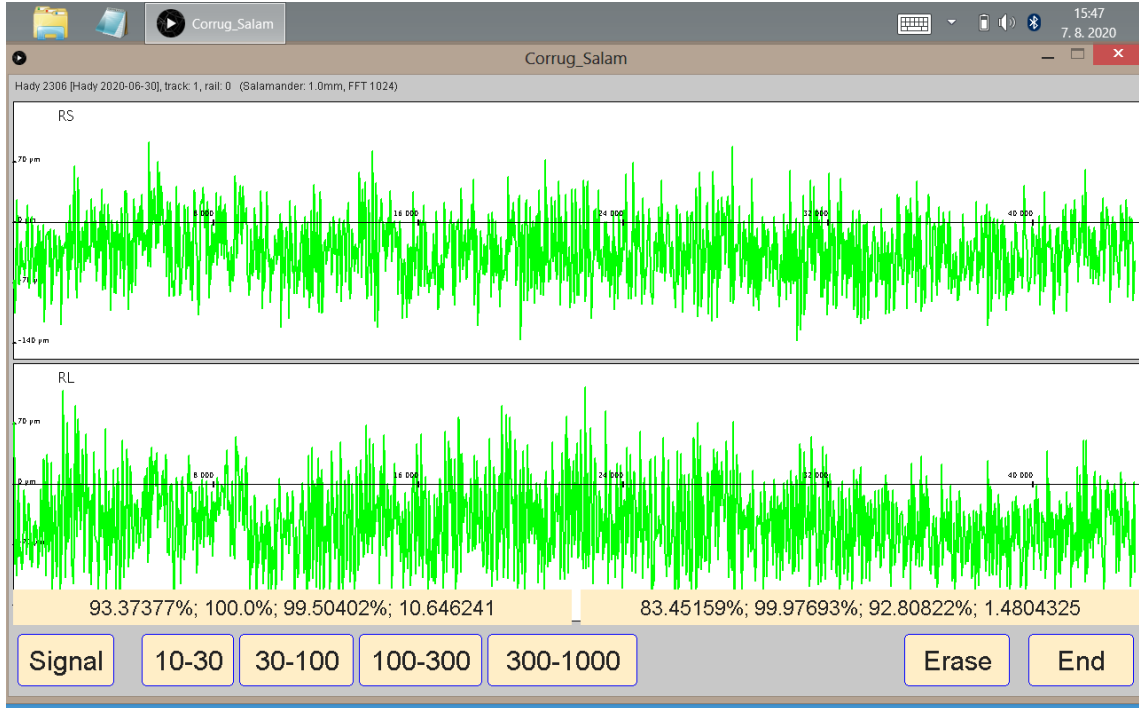
Č. měření	kolej	kolejnice	od	do	Měř. profil	poznámka	soubor*
1211	1	levá	portál 2. tunelu jih	162,8 (55)	3,9	Sl.57-47,5m; obrus 69m	170512103311
1212	1	levá	162,8 (55)	LIS	3,9		170512103520
1213	1	levá	LIS	162,7	3,9	Sl.51-27,5m	170512104054
1214	1	levá	162,7	sl 49	3,9		170512104433
1215	1	levá	162,1		3,9	přerušeno	170512104847
1216	1	levá	162,1	162	3,9		170512111212
1217	1	levá	162	tunel 1. konec	3,9	pokračování 1216 (překryv), 13m-162,0	170512111401
1218	1	levá	portál 1. tunelu sever	cca 2. výklenek	3,9		170512111755
1219	1	levá	tunelové rozhraní	portál 1. tunelu jih	3,9	9m-2. výklenek	170512112221
1220	1	levá	portál 1. tunelu jih	most konec	3,9		170512112743
1221	1	levá	162,1	tunel 1. konec	3,9	162,0-74m	170512113116
1222	1	levá	portál 1. tunelu jih		3,9	přerušeno	
1223	1	levá	portál 1. tunelu jih	sloup 3	3,9	7A-25,4m; 161,9-28,9m	170512114001
1224	1	levá	sloup 7	sloup 5A	3,9		170512114323
1225	2	levá	sloup 8	sloup 6A	3,9		170512115245

Poznámky: Sl.57-47,5m = u sloupu číslo 57 (v místě zajišťovací značky) byla měřícím zřízením ujeta vzdálenost 47,5 m  
162,8 (55) = staničení (km 162,8 (sloup č. 55))  
LIS = izolovaný styk (162.750)

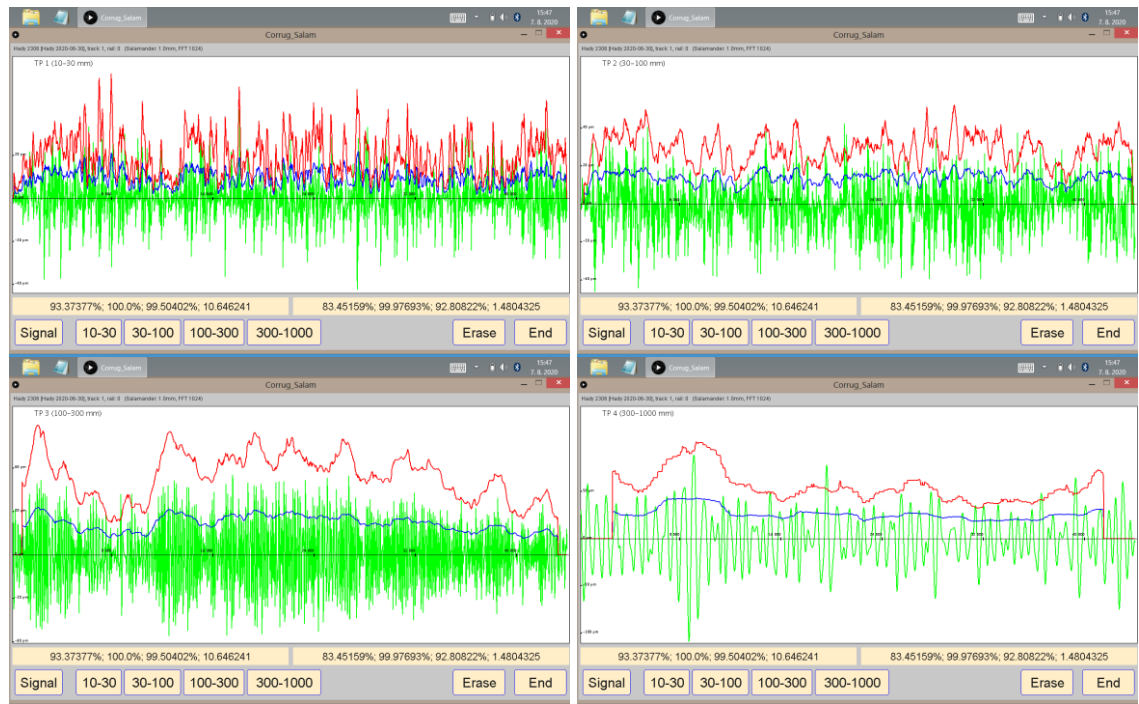
### Obr. 56 Příklad měřičského protokolu.

Příklad měřičského protokolu je na Obr. 56. Měření č. 1215 a 1222 z příkladu byla předčasně ukončena např. z důvodu průjezdu vlaku po měřené koleji. Konec měření není uveden, neboť nebylo možno přiřadit žádný pevný bod. Měření č. 1215 přesto bylo uloženo a je možné jej pro částečné vyhodnocení využít, např. pro kontrolu

opakovatelnosti měření s již řádně provedeným měřením č. 1216. Oproti tomu měření č. 1222 bylo příliš krátké a pro nemožnost dalšího zpracování nebylo měřicím zařízením uloženo.



Obr. 57 Zobrazení krátké tětiny (nahore) a dlouhé tětiny (dole)



Obr. 58 Výstupní grafy ze zařízení Salamander II pro všechna čtyři měřená vlnová pásma s vyhodnocením plovoucích hodnot a překročení RMS (modře) a P2P (červeně), zeleně filtrovaný profil

### **3.3.2 Evidence úseků**

#### ***Staničení***

Měření byla prováděna mezi tzv. pevnými body, které nemění svoje umístění v prostoru a jsou svojí stálostí nezávislé na případných změnách v a na koleji, resp. kolejnicích samotných. Bylo-li to možné, bylo každému pevnému bodu přiřazeno i staničení konkrétní tratě. Nejčastěji byla jako pevné body použita čísla stožárů trakčního vedení přilehlých k zájmové koleji, mezi kterými bylo měření provedeno v pořadí dle směru měření (tato evidence umožnila kontrolu směru měření a sloužila k jednodušší orientaci na místě měření).

#### ***Kolej***

Číslo sledované koleje je nutné uvádět na vícekolejných tratích (možno zjistit z pasportu tratě).

#### ***Kolejnice a směr***

Přestože se skluzové vlny vyskytují především na vnitřním kolejnicovém pasu, je vždy nutné uvádět, která kolejnice byla měřena (ve směru staničení) a směr měření, např. „levá – proti staničení“.

#### ***Měřicí profil***

Měřícím profilem je myšlena měřící stopa příslušného zařízení, ve které zaznamenává vlnovité deformace. Do protokolu se u každého měřeného úseku uvede umístění měřícího profilu.

#### ***Evidence zajímavých míst a činností***

Během samotného měření se do protokolu mohou uvádět i další staničení zájmových míst (např. monitorovací místo pro měření hluku), hektometry, trakční vedení apod.

Bezpodmínečně byla uváděna staničení jiných viditelných vad kolejnic, styků kolejnic/izolovaných styků, změny svršku či jen části svršku (např. upevňovadel), přechodů zářez/násep, začátku a konce mostů a tunelů, přejezdů.

U každého měřeného místa je důležitá evidence údržbových prací či dalších činností a událostí, které byly na daném úseku provedeny a mohly by ovlivnit výsledky měření, zejména oprava geometrických parametrů koleje, výměna pražců, výměna upevňovatel, dotahování upevňovadel, zřízení bezstykové koleje apod.

### **3.3.3 Měření souvisejících geometrických parametrů koleje**

Přestože je možno množství parametrů vyčíst z dokumentace tratě, je důležité pro zpracování a vyhodnocení u každého úseku změřit skutečné hodnoty níže uvedených veličin po celé délce měřeného úseku.

Měření geometrických parametrů koleje byla prováděna zařízením Krab-Slight (dále jen Krab), případně pro kontrolu ruční digitální rozchodkou.

### **Měřicí zařízení**

„Měřicí vozík KRAB-SLIGHT je zařízení, které měří základní geometrické veličiny koleje: rozchod, směr, výšku, převýšení a zborcení. Směr a výška koleje jsou měřeny metodou tříbodové tětivy v délce D1 (1-25 m). Vozík je vybaven odnímatelným ramenem zborcení, které měří hodnotu  $q\_Twist$  (tzv. kvazi-zborcení). Tento pomocný geometrický signál slouží ke zlepšení kvality měření převýšení koleje. Všechny údaje jsou měřeny pomocí elektronických čidel, jejichž elektrický výstup je přeměněn A/D převodníkem. Vzorková frekvence 100 Hz odpovídá prostorové vzdálenosti 1 cm pro měřenou rychlost  $3,6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , avšak konečný záznam geometrických veličin je proveden konstantním krokem založeným na místní kilometrůž. Tento krok je volitelný od 2cm až do hodnoty 25 cm.

KRAB-Slight může být vybaven přídatnými kladkami pro měření žlábků. Používá se to hlavně pro kontrolu spínačů, ale mohou tak být měřeny také přídržné kolejnice. Další využití je také při měření sklonu trati a měření Vrcholu&Směru vlnových pásmech D2 (délka pásma 25-70 m) s použitím pomocného dlouhého ramene. Vyhodnocení naměřených signálů (tzv. primárních hodnot) umožňuje vypočítat řadu dalších geometrických veličin: křivost oblouku 1/R, změnu rozchodu, směr a výšku koleje na libovolné tětivě nebo tzv. skutečné geometrii.“ [73]

**Tab. 13** Měřené a počítané hodnoty zařízením Krab [73]

Popis	Rozsah [mm]	Reprodukovatelnost 95 % [mm]	Rozlišení
Rozchod	-20+50	±0,4	0,02 mm
pr Směr (vodorovná tětiva 2,1 m)	±25	±0,1	0,02 mm
Směr L/R (vodorovná tětiva 10 m, vypočítaná)	±400	±1,0	0,02 mm
pr Výška (svislá tětiva 2,1 m)	-15+12	±0,1	0,02 mm
Výška L/R (svislá tětiva 10 m, vypočítaná)	±100	±0,7	0,02 mm
Převýšení (relativní hodnoty)	-	±0,3	0,02 mm
Převýšení (absolutní hodnoty)	±200	±0,7	0,025 mm
pr Zborcení (báze zborcení)	±12	±0,1	0,02 mm
Zborcení (Vypočítané z převýšení), jakákoliv báze zborcení l	±400	±1,0/1	0,05 mm
Žlábek L/R	+20+110	±0,4	0,05 mm
Sklon trati	±100 mm/m		0,02 mm/m
Rychlost pohybujícího se vozíku	< 10 km/h	0,5 km/h	0,3 km/h
Délka tratě (projetá vzdálenost)	-	1 m/km	1 mm
Vzorkovací krok	0,25 m		

**Tab. 13** Měřené a počítané hodnoty zařízením Krab [73] - pokračování

Délka tělavy	2,1-2,5 m
Výdrž bez dobytí baterie	8 hodin
Maximální délka jednotlivých měření	> 100 km
Skladovací kapacita měření	> 10000 km
Rozmezí teplot pro měření	-30°C až +55°C
Teplotní limity pro skladování	-40°C až +70°C
Elektrická izolace	všechna kola
Hmotnost	30 kg

**Obr. 59** Zařízení Krab S-light, foto Ing. Erik Dušek

### **Měření**

Jakožto související parametry koleje byly měřeny parametry: převýšení koleje, rozchod koleje a směrové poměry.

Měření souvisejících parametrů se řídilo dle [74], [75] a [76].

V ideálním případě jsou v kružnicové části oblouku o poloměru  $R$  převýšení, rozchod koleje a směrové poměry konstantní (vyjma některých případů definovaných v [39]). Provozem však může dojít k reálné změně.

Měření zařízením Krab byla prováděna kontinuálně přes celé úseky. Měření geometrických parametrů koleje byla uskutečněna pouze ve vybraných měřicích kampaních.

### 3.3.4 Měření související parametrů dopravy

Pro potřeby dokumentace dopravního provozu byly sledovány skladba projíždějících souprav a rychlosti těchto souprav.

#### *Skladba a hmotnosti souprav*

Skladba a hmotnosti souprav byly zjišťovány pro soupravy, u kterých byly změřeny rychlosti dle následující kapitoly Měření rychlostí.

Skladba a složení souprav byly zaznamenávány optickým záznamovým zařízením.

#### *Měření rychlostí*

Výběr místa pro měření rychlostí závisel na předpokladu stálosti či změny rychlostí projíždějících souprav. U úseků s předpokládanou konstantní rychlostí jízdy vlaků postačovalo měření rychlosti uprostřed kružnicové části oblouku (úseky Hády, Bílovice a Babice). U oblouků s předpokládanou změnou rychlostí souprav bylo měření prováděno na dvou místech úseku (úsek Havlíčkův Brod).

Byla snaha změřit rychlost pro každou projíždějící soupravu na dvou místech (shodné parametry soupravy jako hmotnost, konstrukce apod.) a získat tak data pro porovnání jednotlivých míst. Měření byla prováděna na dvojicích míst:

- Hády km 161,7 a 162,8;
- Bílovice km 167,0 a Babice km 169,0;
- Havlíčkův Brod km 224,4 a 224,9.

Měření na první a druhé dvojici míst byla několikadenní, monitoring rychlostí zahrnoval několik provozních stavů dopravy (pracovní den, víkend, den, noc). V případě třetí a čtvrté dvojice byla měření pouze jednodenní.

#### *Měřicí zařízení*

Několikadenní měření byla prováděna zařízeními DRS, interně označené MRKEV (Měřiče Rychlosti Kolejových Vozidel), což jsou frekvenčně modulované radarové jednotky, pracující na principu odrazu radarových vln od projíždějících vozidel.

#### **Technické parametry:**

- frekvence radaru: 24,125 GHz;
- rozsah měření: 1–199 km.h<sup>-1</sup>;
- přesnost měření: ±0,1 km.h<sup>-1</sup>;
- napájení: dobíjecí akumulátor (vlastní);
- plastové provedení, rozměry (š x v x h): 180 x 230 x 110 [mm];
- umístění zařízení: výškově: nejvýše 2,0 m nad temenem kolejnice, směrově: na sloupech trakčního vedení (přípevněno pomocí jednorázových plastových stahovacích pásků) nebo ve stativu (pouze pro krátkodobá měření za přítomnosti pověřené osoby). [77]



*Obr. 60 Vlevo zařízení DRS (Mrkev) a optické záznamové zařízení na stožáru trakčního vedení, vpravo ve stativu*

V Havlíčkově Brodě byly skutečné rychlosti projíždějících souprav měřeny pomocí ručního radaru Bushnell.

**Technické parametry:**

- rozsah měření: 16–177 km.h<sup>-1</sup>;
- přesnost měření: ±2,0 km.h<sup>-1</sup>. [78]

### 3.3.5 Další parametry

Mezi další sledované parametry patřily:

- sklonové poměry;
- skladba železničního svršku, kolejnice (tvar, materiál), podložka pod patu kolejnice, podpražcové podložky, štěrk, typ pražce, druh upevnění;
- základní vizuálně zjistitelné údaje o železničním spodku (zemní těleso – násep, zářez, mostní konstrukce apod.);
- údaje o počasí.

Tyto parametry slouží společně s evidencí úseků především k zaznamenání průběhu měření. Dále slouží k zohlednění délky sledovaného úseku a v případě, že se v daném úseku mění některý z uvedených parametrů, je nutné usek rozdělit na několik



samostatných vyhodnocovacích úseků. Využity byly také jako případný porovnávací parametr mezi jednotlivými oblouky.

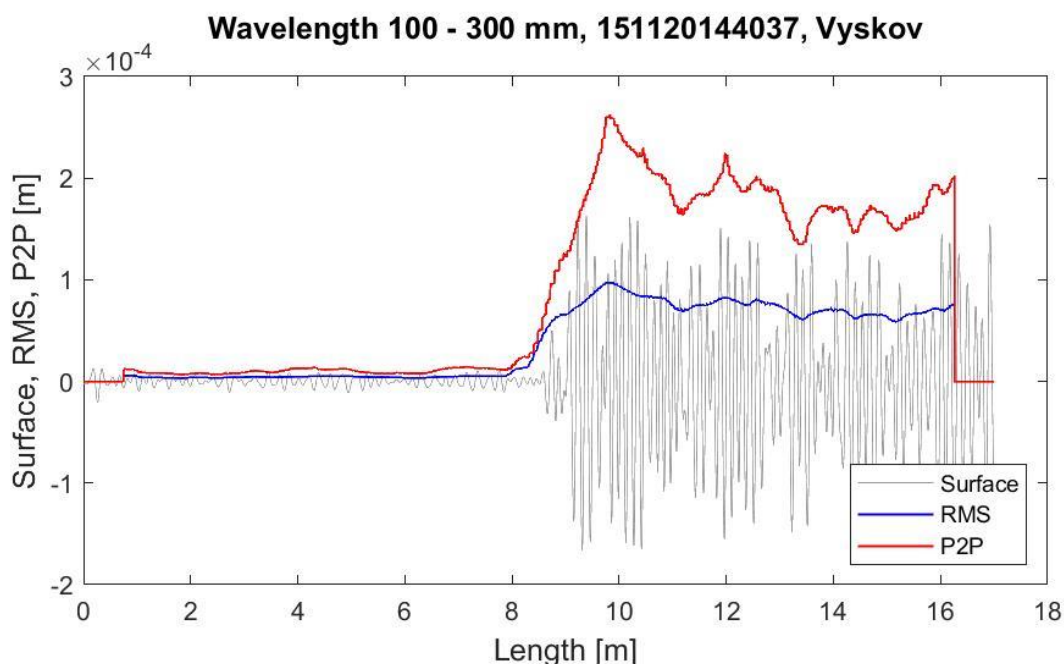
Údaje byly získány vizuálně při prohlídce úseku, případně alternativně z pasportu trati či jiných zdrojů.

### 3.4 ZPRACOVÁNÍ DAT

#### 3.4.1 Úvod

Pro sledování, vyhodnocování a kvantifikaci dat byly využívány výpočty plovoucích průměrů RMS a P2P, RMS a P2P celého úseku a procentuální překročení hodnot RMS a P2P, neboť je důležitá nejen informace o hodnotě překročení normových hodnot, ale i o délce, na které k překročení došlo.

Prvotní myšlenka vyhodnocovat celý měřicí úsek na jeden záznam byla opuštěna z důvodu měření v provozované koleji a komplikacím při navazování jednotlivých měření. Byla tak měřena krátká místa (viz kap. 3.2.1), jež poskytovala konzistentní parametry měření (svršek, poloměr oblouku apod.), čímž se následně výrazně zjednodušilo zpracování a vyhodnocení získaných dat. V případě vyhodnocení měření v celé délce může být např. procentuální překročení hodnot zkreslující.



**Obr. 61** Výstup z programu na výpočet RMS a P2P pro úsek Vyškov pro měřicí místo z Obr. 43 (VY1.1)

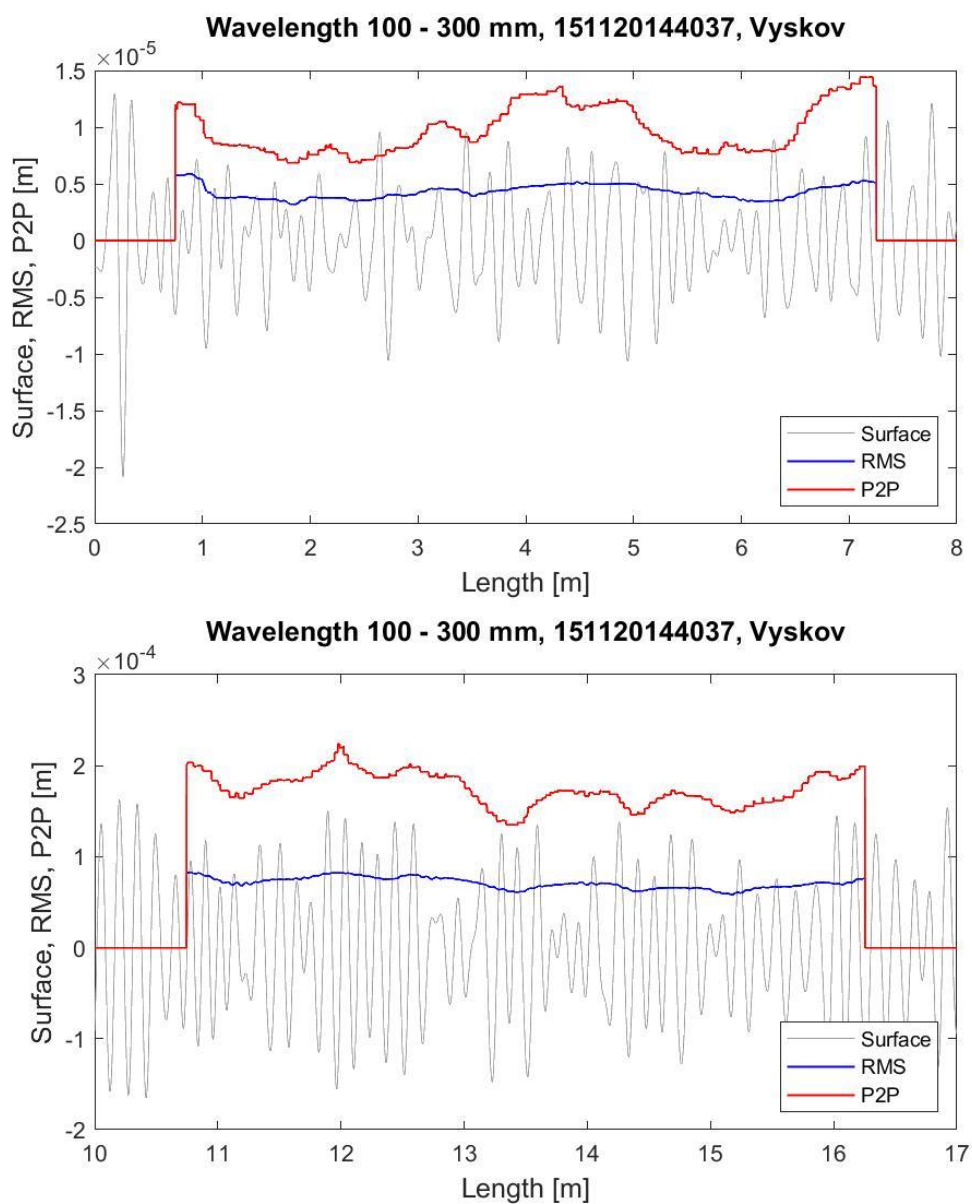
Na Obr. 61 je výstup z programu na výpočet RMS a P2P pro měřicí místo VY1.1 v úseku Vyškov z Obr. 43, kde byly v části vyměněny kolejnice. Vyhodnocení takového úseku je pak zkreslující. Vhodnější je rozdělit místo na dvě samostatná místa (na staničení 0 až 8 m a 10 až 17 m).

**Tab. 14** Procento překročení hodnot RMS pro místo VY1.1

Vlnové pásmo	0 až 17 m [%]	0 až 8 m [%]	10 až 17 m [%]
30–100	49,6	0	100
100–300	52,8	0	100

**Tab. 15** Hodnoty RMS pro místo VY1.1

	0 až 17 m [%]	0 až 8 m [%]	10 až 17 m [%]
30–100	1,0345e-05	1,7977e-06	1,4105e-05
100–300	5,2831e-05	4,7217e-06	7,4534e-05



**Obr. 62** RMS a P2P pro úsek Vyškov pro měřicí místo z Obr. 43 a Obr. 61 (VY1.1), nahoře pro staničení 0 až 8 m a dole 10 až 17 m

Na výstupních Tab. 14, Tab. 15 a Obr. 62 jsou vidět rozdílné hodnoty pro celé měřicí místo VY1.1 a rozdělení na dvě části podle konstrukce a stáří svršku.

Vyhodnocení vychází z normy ČSN 13231-3:2006 [79] z roku 2006, neboť stávající ČSN 13231-3:2012 [10] z roku 2012 již neobsahuje podklady k RMS. S RMS však bylo pracováno především z důvodu možnosti využití dat naměřených před účinností normy ČSN 13231-3:2012 [10].

### 3.4.2 Vlnovité deformace

#### *Délka výpočetního okénka*

Počet vzorků pro vyhodnocení je dán měřicím krokem, avšak délky výpočetních okének jsou stanoveny jako 5násobky délky nejdelší vlny daného pásma  $\lambda_p$ .

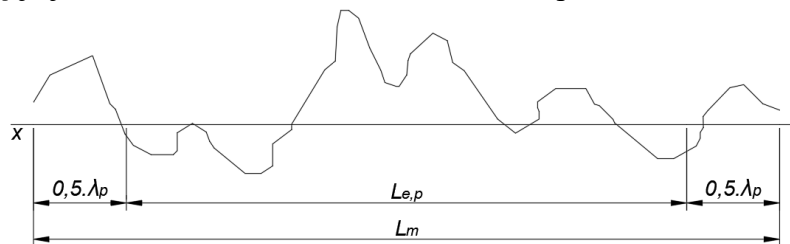
**Tab. 16** Délka výpočetního okénka  $L$  (v tabulce jsou pro porovnání uvedeny délky výpočetního okénka i pro další vlnová pásma než jen pro skluzové vlny). [79]

Vlnová délka $\lambda_p$ [mm]	10–30	30–100	100–300	300–1000
Délka výpočetního okénka $L$ [m]	0,15	0,5	1,5	5

Délka zobrazení hodnot RMS a P2P  $L_{e,p}$  se získá ze změřené délky  $L_m$  jako

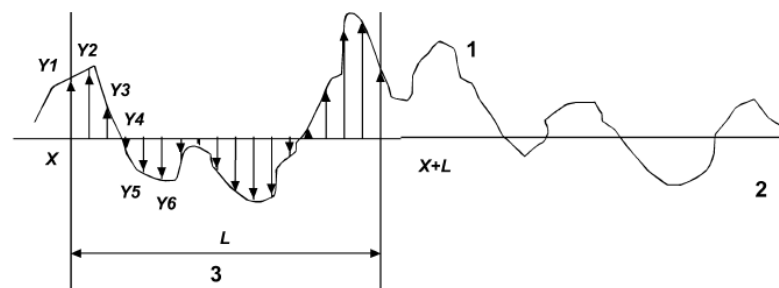
$$L_{e,p} = L_m - 2 \cdot 0,5 \cdot \lambda_p, \quad (37)$$

kde  $0,5 \cdot \lambda_p$  je jednou odečteno ze začátku záznamu a podruhé z konce záznamu.



**Obr. 63** Délka zobrazení hodnot RMS a P2P  $L_{e,p}$

#### *Plovoucí průměr RMS*



**Obr. 64** Záznam z měření vlnovité deformace s vyznačením ekvidistantních vzorků  $y_i$ ; výpočetního okénka o stanovené délce  $L$  [79]

Plovoucí průměry efektivních hodnot RMS (Root Mean Square) zde početně odpovídají výpočtu směrodatné odchylky tj.  $n$  ekvidistantních vzorků  $y_i$  výpočetního okénka o stanovené délce  $L$ :

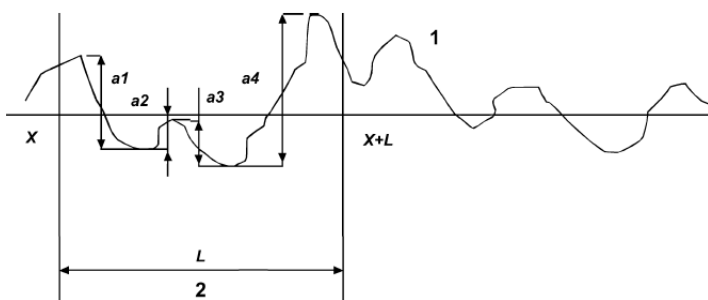
$$RMS(x, L) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n-1}}. \quad (38)$$

### ***RMS celého úseku***

Výpočet odpovídá výpočtu Plovoucího průměru RMS. Délka výpočetního okénka je délka změřeného úseku.

$$RMS(x, L_m) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n-1}} \quad (39)$$

### ***Plovoucí průměr P2P***



**Obr. 65** Záznam z měření vlnovité deformace s vyznačením rozdílů po sobě jdoucích vrcholů amplitud  $a_i$  měřené „mikro-výšek“ výpočetního okénka o stanovené délce  $L$  [79]

Kluzavé aritmetické průměry hodnot P2P („peak to peak“, „špička-špička“) tj. rozdílů po sobě jdoucích vrcholů amplitud  $a_i$  měřené mikrogeometrie:

$$P2P(x, L) = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}. \quad (40)$$

### ***P2P celého úseku***

Výpočet odpovídá výpočtu plovoucího průměru P2P, avšak za délku výpočetního okénka je stanovena délka změřeného úseku.

$$P2P(x, L_m) = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (41)$$

### ***Procentuální překročení hodnot RMS a P2P***

Pro RMS a P2P celého úseku je počítáno překročení hodnot z Tab. 17.

**Tab. 17** Limity RMS a P2P (v tabulce jsou pro porovnání uvedeny délky výpočetního okénka i pro další vlnová pásma než jen pro skluzové vlny). [79]

	RMS			
Vlnová délka [mm]	10–30	30–100	100–300	300–1000
Limity [ $\mu\text{m}$ ]	4	4	12	40
	P2P			
Vlnová délka [mm]	10–30	30–100	100–300	300–1000
Limity [ $\mu\text{m}$ ]	10	10	30	100

### ***Programové zpracování dat***

Primární zpracování dat včetně aplikace filtrů dle příslušných norem probíhá ve výpočetní jednotce zařízení.

Pro další zpracování a zobrazení dat z vlastních měření zařízením Salamander II byly postupně na Ústavu železničních konstrukcí a staveb vytvořeny programy Vlnkovitost a Vlnky.

Grafickým výstupem jsou grafy, viz Obr. 43 a Obr. 61.

Datovým výstupem je výpočet RMS a P2P ve čtyřech vlnových pásmech a procento překročení hodnot dle ČSN EN 13231:2006 [79]. Je možné provádět výpočty pro celé změřené místo nebo pro vybrané staničení.

### ***Porovnání dat s CTD***

Vzhledem k dalšímu zjednodušení výstupních dat, které provádí CTD (viz kap. 1.3.3), nejsou data ze zařízení plně porovnatelná. Svoji roli hraje i jiný měřicí prostředek a mírně odlišná technologie. Malé měřicí zařízení je více náchylné na případné nečistoty či vady kolejnic (např. převalky), které měřicímu vozu nevadí. Navíc měřicí vůz snímá celou hlavu kolejnice a vybírá pro měření mikrogeometrie danou stopu. Na malém zařízení je stopa nastavena na začátku měření a průběžně, tedy ani v oblouku, není měněna.

### **3.4.3 Sledování souvisejících geometrických parametrů koleje a provozních parametrů**

Při zpracování a následném vyhodnocení bylo nutné zohlednit délku sledovaného úseku a v případě, že se v daném úseku měnil některý z uvedených geometrických parametrů koleje a provozních parametrů, bylo nutné úsek rozdělit na několik samostatných vyhodnocovacích míst.

Tyto parametry se využívaly také jako případný porovnávací parametr mezi jednotlivými oblouky.

Obecně pro určení hodnot pro vyhodnocení byly hodnoty souvisejících parametrů brány nejméně na třech místech sledovaného úseku, resp. místa (mimo vzestupnice a jejich zaoblání) vzájemně vzdálených alespoň třetinu délky oblouku, přičemž jedno měření bylo uskutečněno co nejbližší středu délky oblouku. V případě dalších měření budou jednotlivé hodnoty v pravidelných vzdálenostech a to vně i mezi výše uvedenými třemi měřeními.

### ***Převýšení koleje***

Pro stanovení převýšení koleje postačoval výpočet aritmetického průměru:

$$D(x, L_m) = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} . \quad (42)$$

V případě, že je některá hodnota  $D_i$  výrazně odlišná od ostatních, byla vyřazena nebo se provedlo rozdělení úseku dle první věty této kapitoly.

### ***Rozchod koleje***

Pro stanovení rozchodu koleje postačoval výpočet aritmetického průměru:

$$u(x, L_m) = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n}. \quad (43)$$

V případě, že je některá hodnota  $u_i$  výrazně odlišná od ostatních, byla vyřazena nebo se provedlo rozdělení úseku dle první věty této kapitoly.

### ***Směrové poměry***

Pro stanovení poloměru oblouku koleje postačoval výpočet aritmetického průměru:

$$R(x, L_m) = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}. \quad (44)$$

V případě, že je některá hodnota  $R_i$  výrazně odlišná od ostatních, byla vyřazena nebo se provedlo rozdělení úseku dle prvního odstavce této kapitoly.

### ***Skladba a hmotnosti souprav***

Na základě získané skladby projíždějících souprav byly následně za pomoci grafikonu, jízdních řádů a dalších zdrojů dohledány informace o konkrétním projíždějícím vlaku:

- kategorie vlaku (osobní/nákladní, rychlík, ...);
- číslo vlaku;
- skladba soupravy/konkrétní jednotka/typy vozů;
- hmotnosti souprav;
- zpoždění.

S ohledem na charakter provozu a evidenci provozovatele dráhy se nepodařilo ve všech případech všechny soupravy nebo informace k nim dohledat.

Hmotnosti byly určeny u osobních vlaků z tabulek osobních vozů a poznámek o řazení každého vlaku.

U nákladních vlaků, kde nebyla známa hmotnost, byla stanovena odhadem s ohledem na délku a normativ souprav na 1 000 t pro Havlíčkův Brod a 2 000 t pro Hány a přidružené úseky. To sice vnáší do výsledku dávku nejistoty, nicméně se ukázalo, že vzhledem k řádově vyšším hmotnostem nákladních vlaků je citlivost výsledku na odchylky hmotnosti relativně malá. [dle 71]

### ***Rychlosti vlaků***

U oblouků s předpokládanou konstantní rychlostí vlaků, je výsledkem měření jediná rychlost  $V_i$  změřená nejčastěji na čele soupravy.

U oblouků s předpokládanou změnou rychlostí vlaků, je výsledkem měření několik sad rychlostí. Z každé sady byla vypočtena rychlost aritmetickým průměrem zaznamenaných hodnot

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (45)$$

O způsobu užití konkrétní výsledné rychlosti rozhodovalo umístění změřeného a vyhodnocovaného profilu v rámci daného oblouku. Nejčastěji pro potřeby vyhodnocení

byla použita pouze první hodnota reprezentující rychlost čela vlaku (lokomotivy) v zájmovém měřicím profilu.

### 3.4.4 Výpočet váženého nedostatku a přebytku převýšení

Výpočet váženého nedostatku  $I_v$  a přebytku převýšení  $E_v$  slouží k porovnání jednotlivých měřených míst.

Optimální rychlost pro konkrétní oblouk získáme dle teorie v kap. 1.2.5, podkapitoly Parametry konstrukčního uspořádání koleje ze vzorce:

$$V = \sqrt{\frac{D_{eq} \cdot R}{11,8}}. \quad (45)$$

Přebytek převýšení konkrétní soupravy pak:

$$E_i = D - \frac{11,8 \cdot V_i^2}{R} \quad (46)$$

a analogicky nedostatek převýšení:

$$I_i = \frac{11,8 \cdot V_i^2}{R} - D \quad (47)$$

Vliv jednotlivých souprav je zohledněn pomocí jejich hmotností

$$E_v = \frac{\sum_i^n m_i \cdot E_i}{\sum_i^n m_i} \quad (48)$$

$$I_v = \frac{\sum_i^n m_i \cdot I_i}{\sum_i^n m_i}. \quad (49)$$

## 3.5 VYHODNOCENÍ

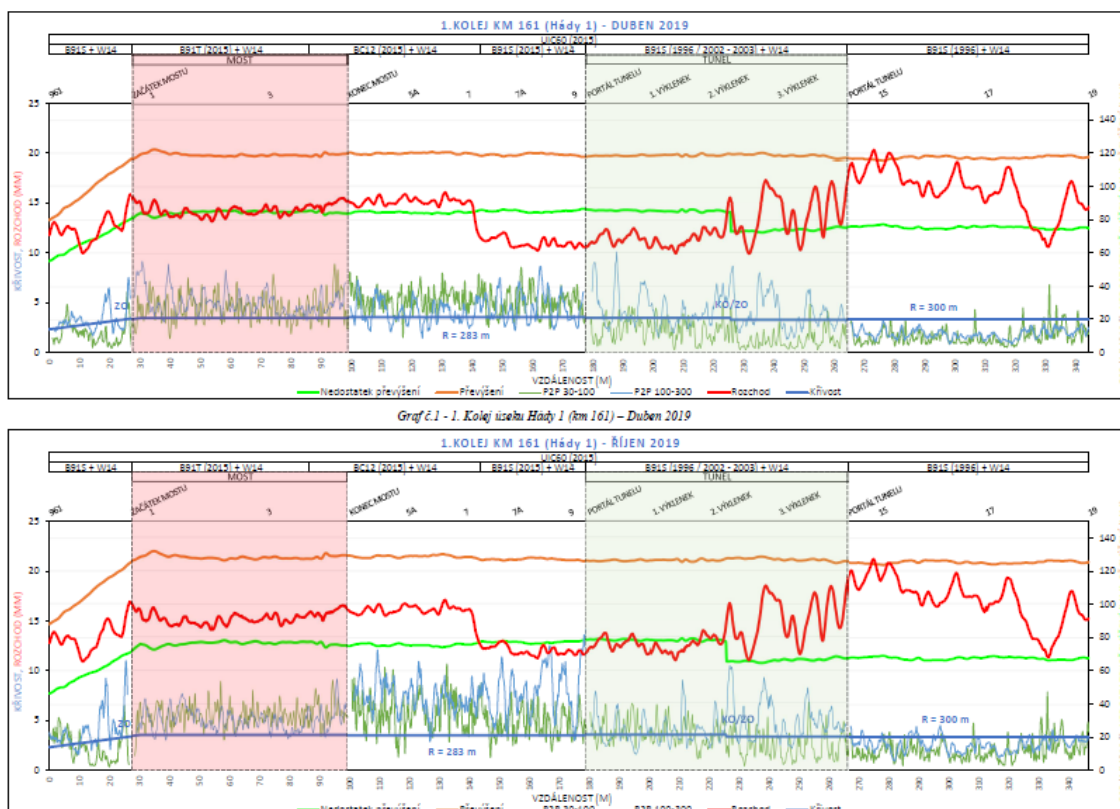
### 3.5.1 Sledovatelnost parametrů

Vztahu geometrických parametrů koleje a rozvoje skluzových vln se věnuje práce [80]. Práce porovnává vlnovité deformace pásem 30–100 a 100–300 mm s rozchodem koleje, křivostí oblouku, převýšením koleje a nedostatkem převýšení.

V rámci korelační analýzy nebyla prokázána „přímá spojitost“ mezi sledovanými veličinami a skluzovými vadami, na což má pravděpodobně vliv:

- rozchod koleje – podle kap. 1.2.3, podkapitoly „Kritický poloměr oblouku“ tzv. volný pás umožňuje dvojkolí využít kuželovitost kol a volné odvalování a po jeho vyčerpání začínou vznikat skluzové vlny. Významnou roli může v některých obloucích hrát vznik převalků [27];
- křivost oblouku (poloměr) – má vliv na délku vlny, viz kap. 1.2.3 podkapitola „Délka vlny“. Při zvětšování křivosti, resp. zmenšování poloměru oblouku může změnou délek vlny dojít k přesunutí dominantních vln z jednoho vlnového pásma do druhého. Porovnání komplikuje i kombinace poloměru oblouku a rozchodu koleje, resp. rozšíření rozchodu, kdy pro daný poloměr mohou být dle konstrukce zvolené upevnění rozdílné počáteční/provozní hodnoty;
- převýšení koleje – spojitost nepotvrzena dle předpokladu, neboť převýšení koleje jako takové se samostatně v teoriích o skluzových vlnách nevyskytuje;

- nedostatek převýšení – práce [80] nepopsala spojitost mezi nedostatkem převýšení a skluzovými vlnami, což může být zapříčiněno výpočtem nedostatku převýšení dle rychlosti uvedené v Nákrešném přehledu. Je tedy důležité sledovat skutečné rychlosti projíždějících souprav daným místem.



Obr. 66 Vztah geometrických parametrů koleje a rozvoje skluzových vln dle [80]

Tab. 18 Příklad korelační analýzy provedené na délku přechodnice a kružnicových částí (Hády 1 – Kolej 1, duben 2019), zjednodušeno z [80]

		RK	PK
Přechodnice	30–100	0,338	0,132
	100–300	0,752	0,554
Oblouk R1	30–100	0,375	0,32
	100–300	-0,015	-0,008
Oblouk R2	30–100	-0,095	0,036
	100–300	-0,263	576

V rámci [80] byla vyhodnocována a srovnávána data v tzv. prostorovém sledování, tedy po délce koleje (Obr. 66) a je konstatováno, že „s velkou pravděpodobností se dá říct, že parametr, který má viditelný vliv na rozvoj kolejnicových vad je rozchod koleje, resp. náhlá změna tohoto parametru, a to ať už zvětšování, či zmenšování tohoto parametru. V grafech je vidět, že kolejnicové vady dosahují často svých špiček právě v místech výraznějších změn rozchodu. Změna rozchodu je způsobována ojetím kolejnic a opotřebením úhlových vložek v uzlech upevnění.



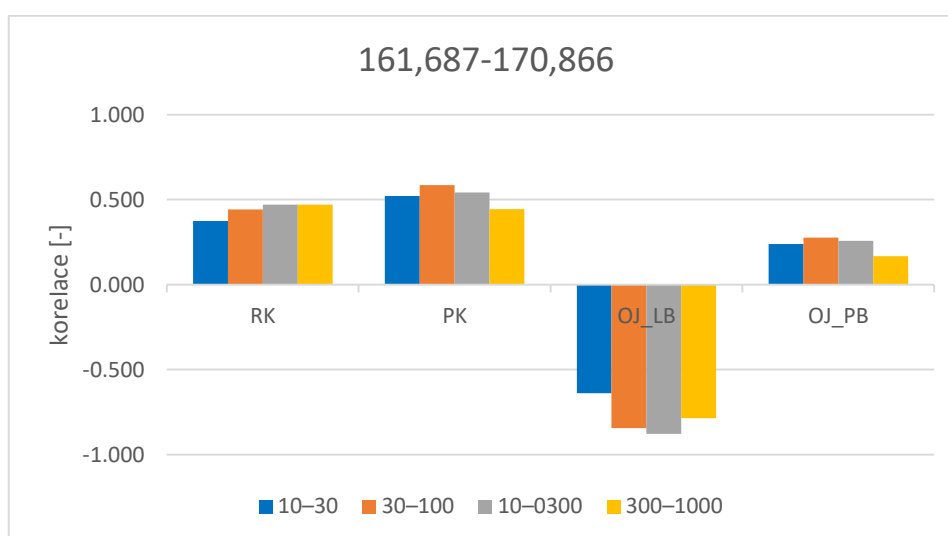
*V úsecích, kde je rozchod koleje už značně vlivem ojetí kolejnic zvětšen, se kolejnicové vady rozvíjejí pomaleji, větší hodnota rozchodu bude mít pravděpodobně pozitivní vliv na rozvoj kolejnicových vad (např. úsek Hády 1, Kolej 1 - úsek za tunelem, nebo Hády 2, Kolej 1 – úsek před tunelem).“*

Pro trať č. 326 Brno – Česká Třebová pro kolej č. 1 mezi Brno-Maloměřice St. 6 – žst. Adamov byly zpracovány korelační analýzy z dat měřicího vozu pro železniční svršek. Porovnávány byly vlnovité deformace pravého kolejnicového pásu (ve směru staničení) s rozchodem koleje (RK), převýšením koleje (PK), bočním ojetím pravého kolejnicového pásu (OJ\_LB) a boční ojetí levého kolejnicového pásu (OJ\_PB). Označení BL a BP je dáno nesprávným postavením měřicího vozu. Analýzy byly provedeny pro následující staničení:

- celý mezistaniční úsek (km 161,687-170,866);

**Tab. 19** Korelační analýza pro celý mezistaniční úsek (km 161,687-170,866)

	RK	PK	OJ_LB	OJ_PB
10–30	0,374	0,521	-0,638	0,239
30–100	0,443	0,585	-0,844	0,276
100–300	0,471	0,543	-0,877	0,259
300–1000	0,471	0,444	-0,786	0,168

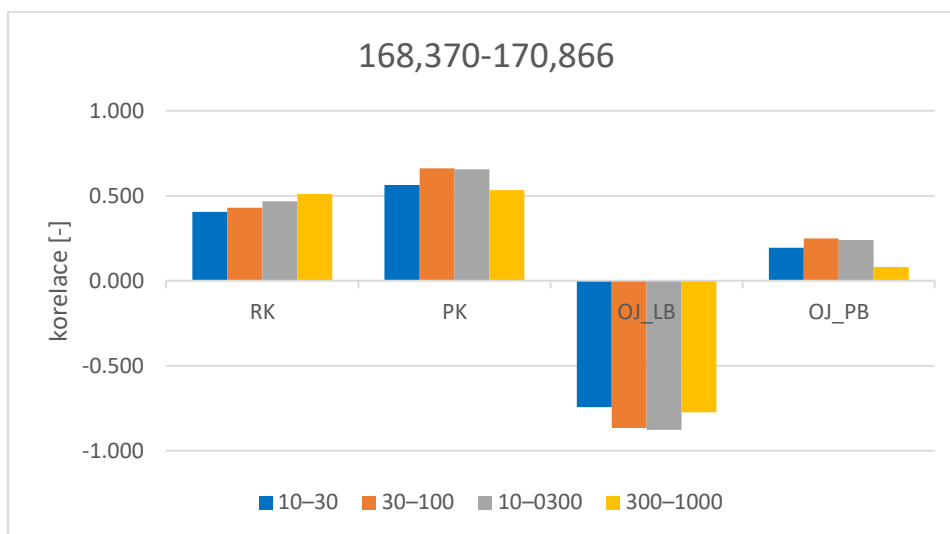


**Obr. 67** Korelační analýza pro celý mezistaniční úsek (km 161,687-170,866)

- dlouhé měřicí místo (km 168,370-170,866) přes několik protisměrných oblouků a mostů;

**Tab. 20** Korelační analýza pro dlouhé měřicí místo (km 168,370-170,866)

	RK	PK	OJ_LB	OJ_PB
10–30	0,406	0,564	-0,744	0,195
30–100	0,430	0,661	-0,866	0,249
100–300	0,468	0,656	-0,878	0,239
300–1000	0,511	0,533	-0,774	0,082

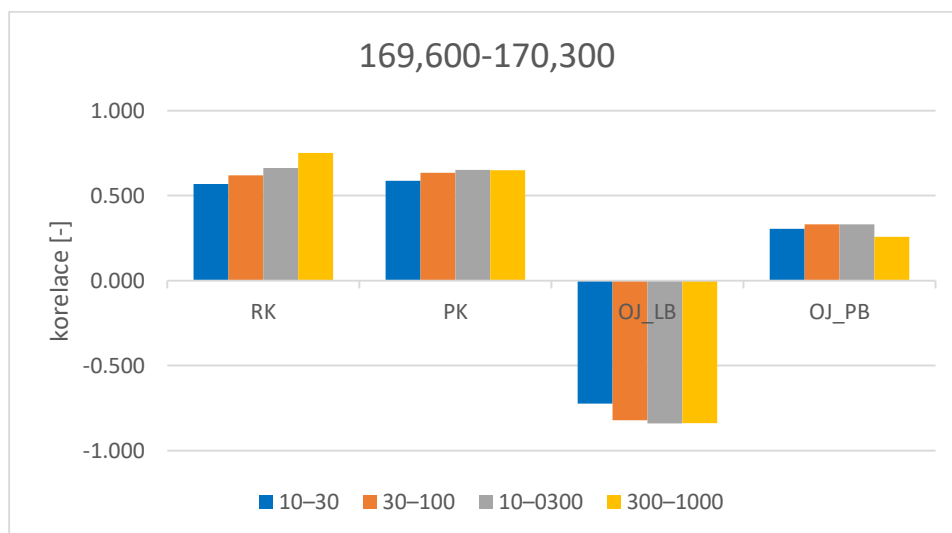


**Obr. 68** Korelační analýza pro dlouhé měřicí místo (km 168,370-170,866)

- krátké měřicí místo (km 169,600-170,300) zahrnující celý oblouk včetně přechodnic;

**Tab. 21** Korelační analýza pro krátké měřicí místo (km 169,600-170,300)

	RK	PK	OJ_LB	OJ_PB
10 – 30	0,568	0,587	-0,723	0,305
30 – 100	0,618	0,634	-0,821	0,330
100 – 300	0,663	0,651	-0,840	0,331
300 – 1000	0,752	0,649	-0,839	0,257

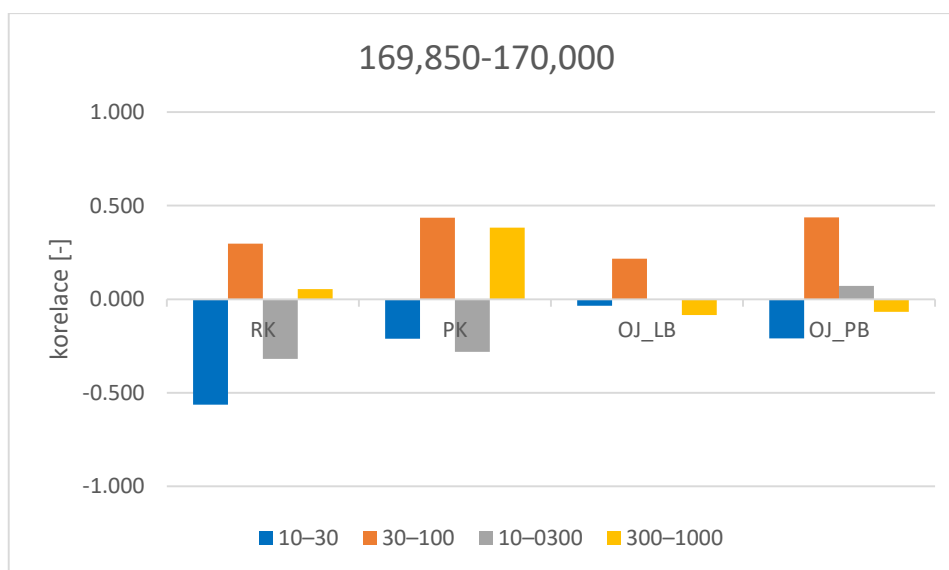


**Obr. 69** Korelační analýza pro krátké měřicí místo (km 169,600-170,300)

- část oblouku (km 169,850-170,000).

**Tab. 22** Korelační analýza pro část oblouku (km 169,850-170,000)

	RK	PK	OJ_LB	OJ_PB
10–30	-0,563	-0,211	-0,035	-0,210
30–100	0,296	0,435	0,217	0,438
100–300	-0,320	-0,282	-0,001	0,072
300–1000	0,054	0,382	-0,085	-0,068



**Obr. 70** Korelační analýza pro část oblouku (km 169,850-170,000)

Z analýzy vyplývá, že největších hodnot korelace, v tomto případě pro nepřímou závislost, k vlnovitým deformacím pravého kolejnicového pásu obecně dosahuje boční ojetí pravého kolejnicového pásu (na Obr. 67 až Obr. 70 uvedeno jako OJ\_LB).

První tři sady korelací dosahují relativně podobných výsledků, při čemž nejvyšší korelace má krátké měřící místo (přes celý oblouk včetně přechodnic). Poněkud zklamáním jsou korelace pro samotnou kružnicovou část, jež dosahuje výrazně nižších hodnot porovnání s ostatními sadami.

Z důvodů malých korelací jednotlivých parametrů je dále pro sledování rychlosti rozvoje skluzových vln užito primárně RMS a P2P. Měřící místa dále zůstávají v délkách desítek metrů a omezují se části koleje se stejnými parametry (poloměr, svršek apod.), neboť je cílem sledovat určitá vlnová pásma. Měření zasahující např. do přechodnic by hodnoty RMS a P2P ovlivnila z důvodu měnících se délek skluzových vln.

### 3.5.2 Sledování rychlosti rozvoje skluzových vln

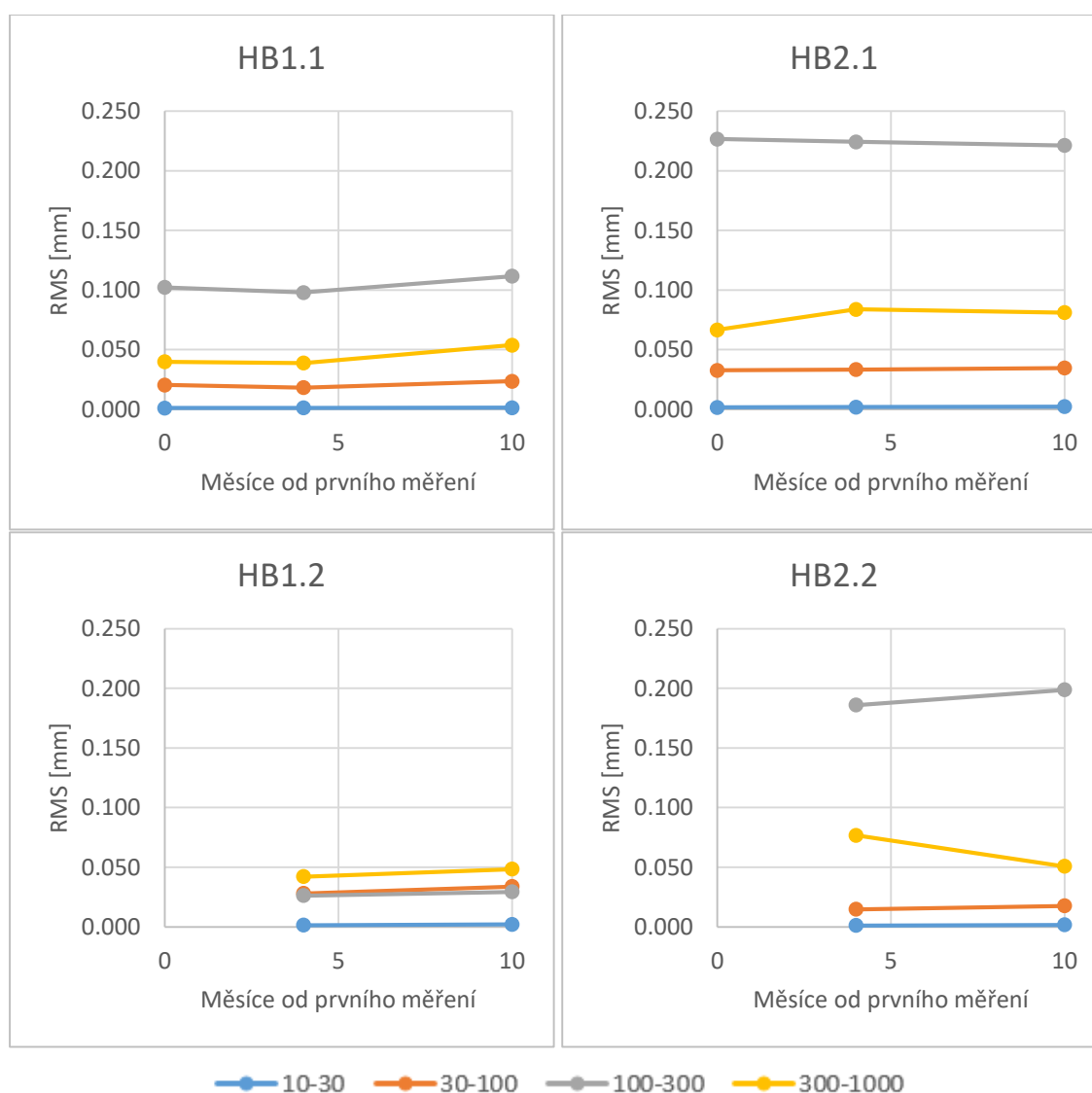
#### *Fáze rozvinuté vady*

Pro první vlastní měření byl vybrán úsek Havlíčkův Brod známý svými vlnovitými vadami na okrouhlickém záhlaví stanice. Kromě rozvinutých vad patří k přednostem

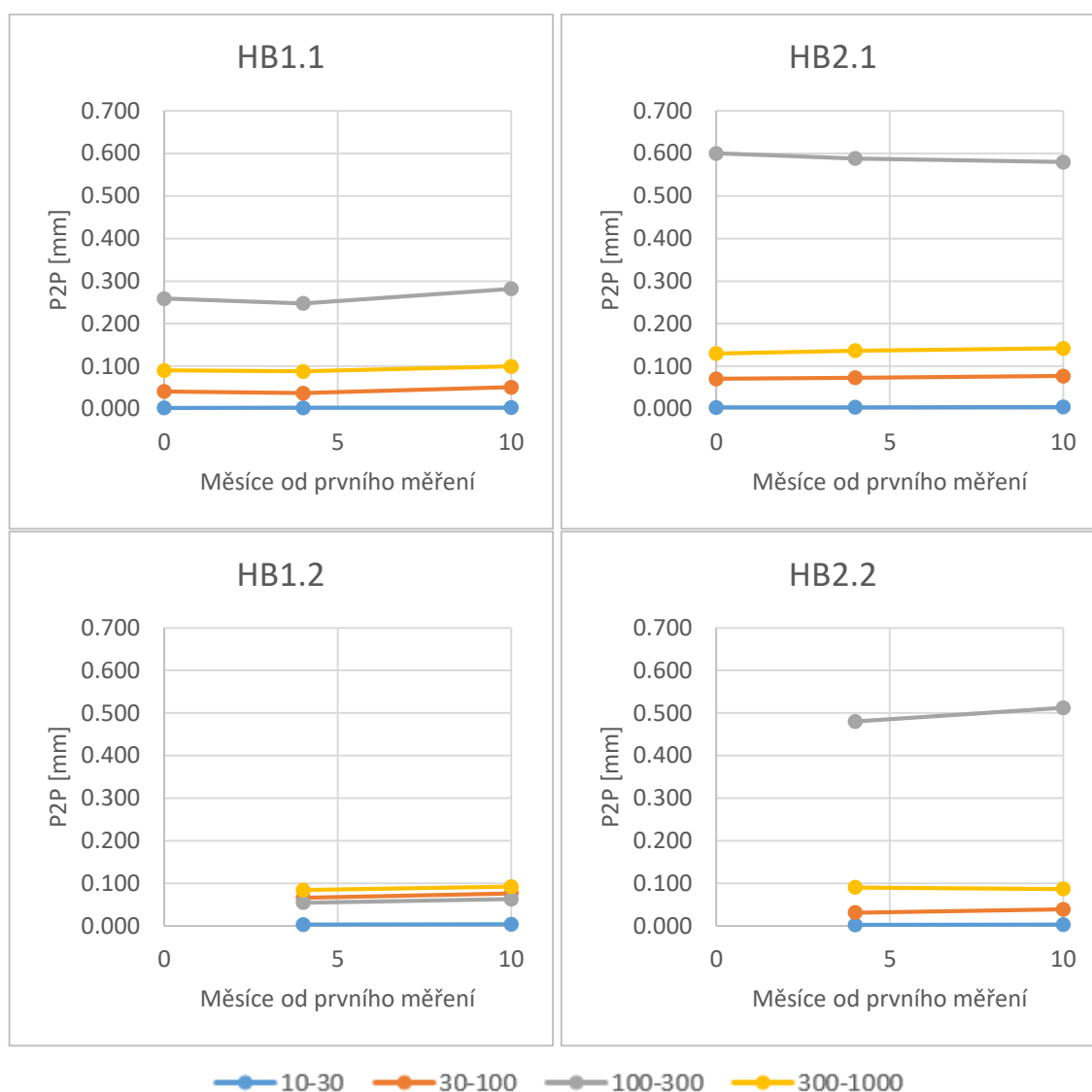
úseku snadný přístup ke sledovaným obloukům. Dále celkem čtyři oblouky (dva v každé koleji) v této lokalitě umožňují vzájemné porovnání. Navíc v druhém oblouku v koleji číslo 1 (měřící místo HB1.2) jsou na rozdíl od koleje číslo 2 nainstalovány podpražcové podložky.

V době sledování v letech 2014 a 2015 [57, 81] byl svršek tvořen kolejnicemi 49 E1, upevněním E 14 se svřkami Skl 40 a upevněním W 14 se svřkami Skl 14 a pražci B 91S/1.

Na základě uskutečněných měření v této lokalitě hodnoty RMS a P2P zájmových pásem 30–100 a 100–300 mm běžně přesahují 100 %. Není tak možné dále pomocí výše uvedené metodiky výpočtu překročení hodnot RMS a P2P sledovat rozvoj vlnovitých deformací v čase.



Obr. 71 Časový vývoj RMS pro úsek Havlíčkův Brod



**Obr. 72** Časový vývoj P2P pro úsek Havlíčkův Brod

V jednotlivých obloucích byly zjištěny vady v rozdílné fázi rozvoje, přestože dle dostupných informací na úseku proběhlo broušení v obou kolejích v roce 2009 nebo 2010.

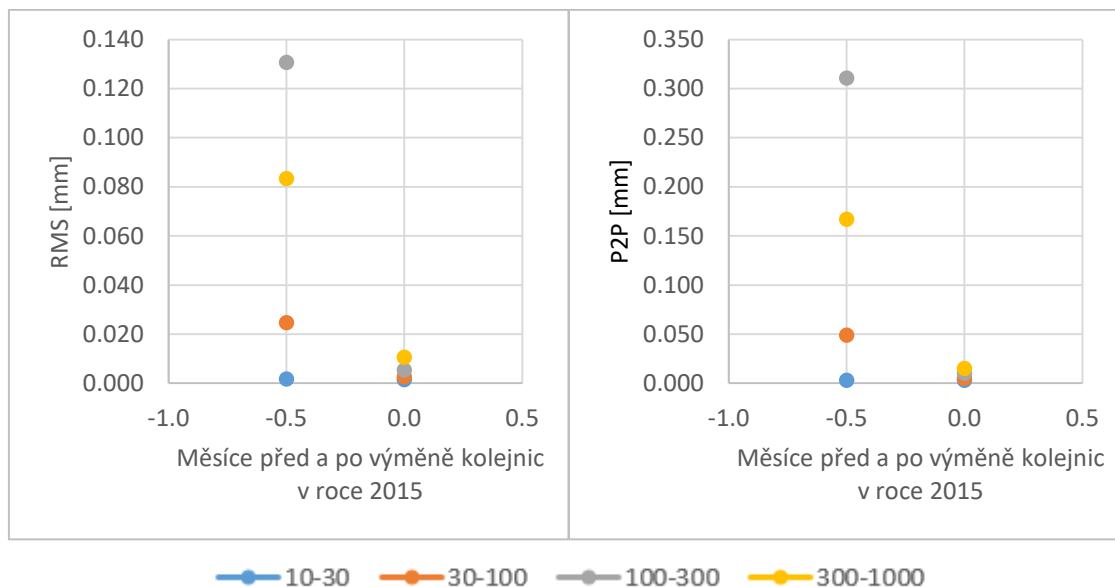
Přesto pro další sledování byla rychlost rozvoje vady vyhodnocena jako nízká a úsek nebyl dále sledován.

### **Počáteční fáze rozvoje**

Jako vhodný úsek pro dlouhodobá měření umožňující sledovat rozvoj vln v čase byl vybrán úsek Hády, na kterém v roce 2015 proběhla výměna kolejnic. Navíc je úsek z Brna dobře dostupný, i když přístup k některým měřicím místům je komplikovanější.

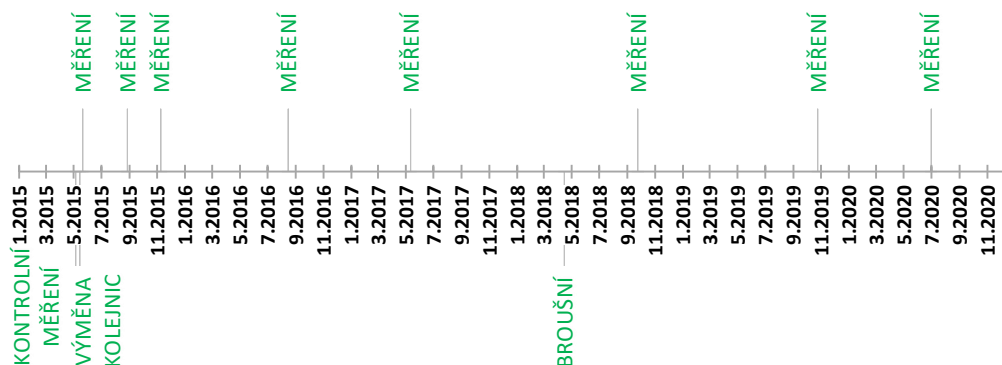
První měření proběhlo na jaře 2015 před výměnou kolejnic v zájmových obloucích a druhé měření několik dní po výměně (slouží jako referenční měření reprezentující stavy s minimálními a maximálními projevy vlnovitých deformací, viz Obr. 73). Obr. 73 ukazuje porovnání hodnot RMS a P2P pro měřicí místo HA1.4 před výměnou kolejnic (-

0,5), kdy se měření uskutečnilo 15 dní před měřením tzv. počátečního stavu (0,0) po výměně kolejnic (počátek sledování rozvoje vad).



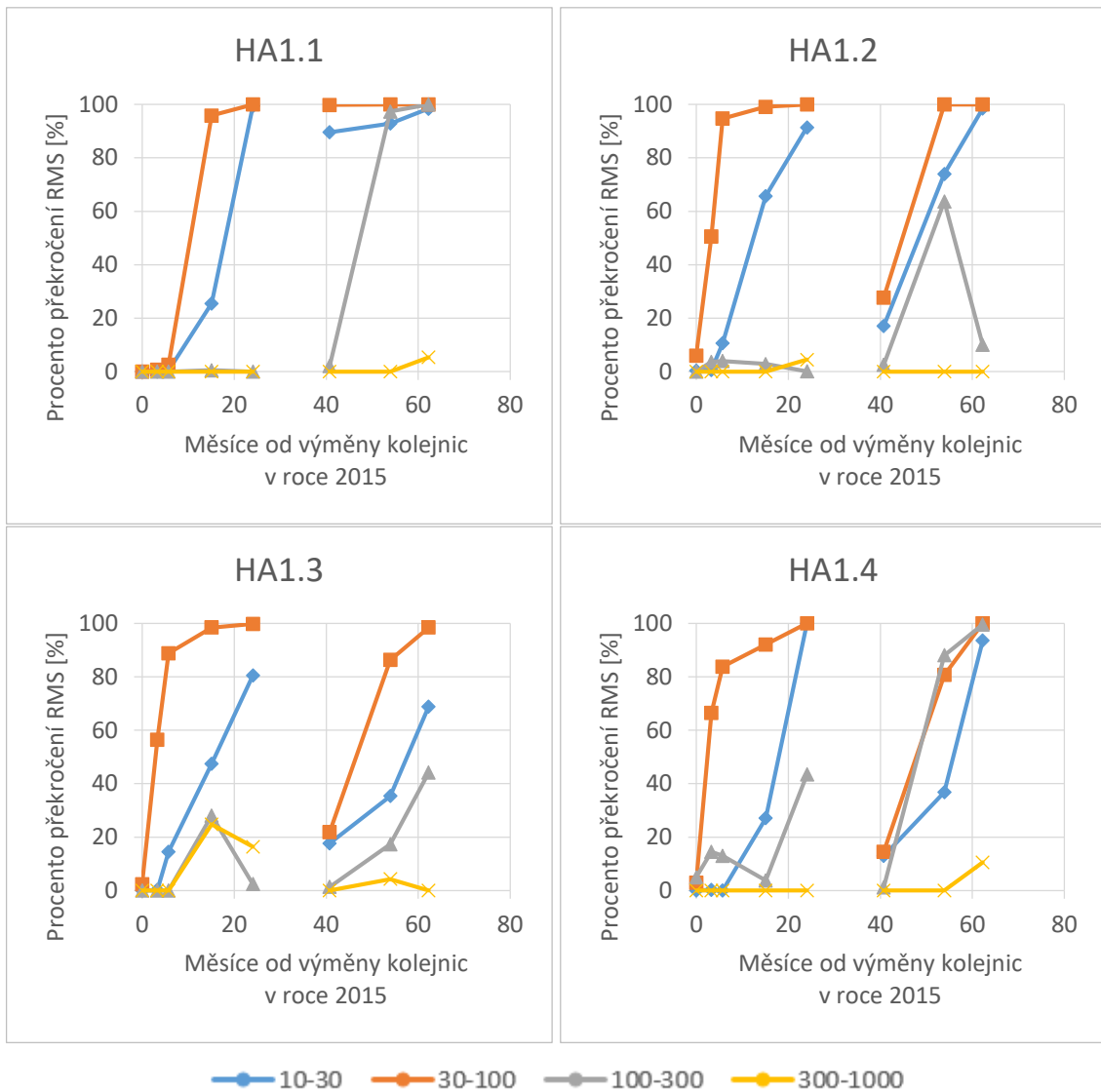
**Obr. 73** Porovnání hodnot RMS a P2P pro měřící místo HA1.4 před výměnou kolejnic (-0,5) a po výměně kolejnic (0 – počátek sledování rozvoje vad)

Další dvě měření se uskutečnila přibližně po 3 měsících.

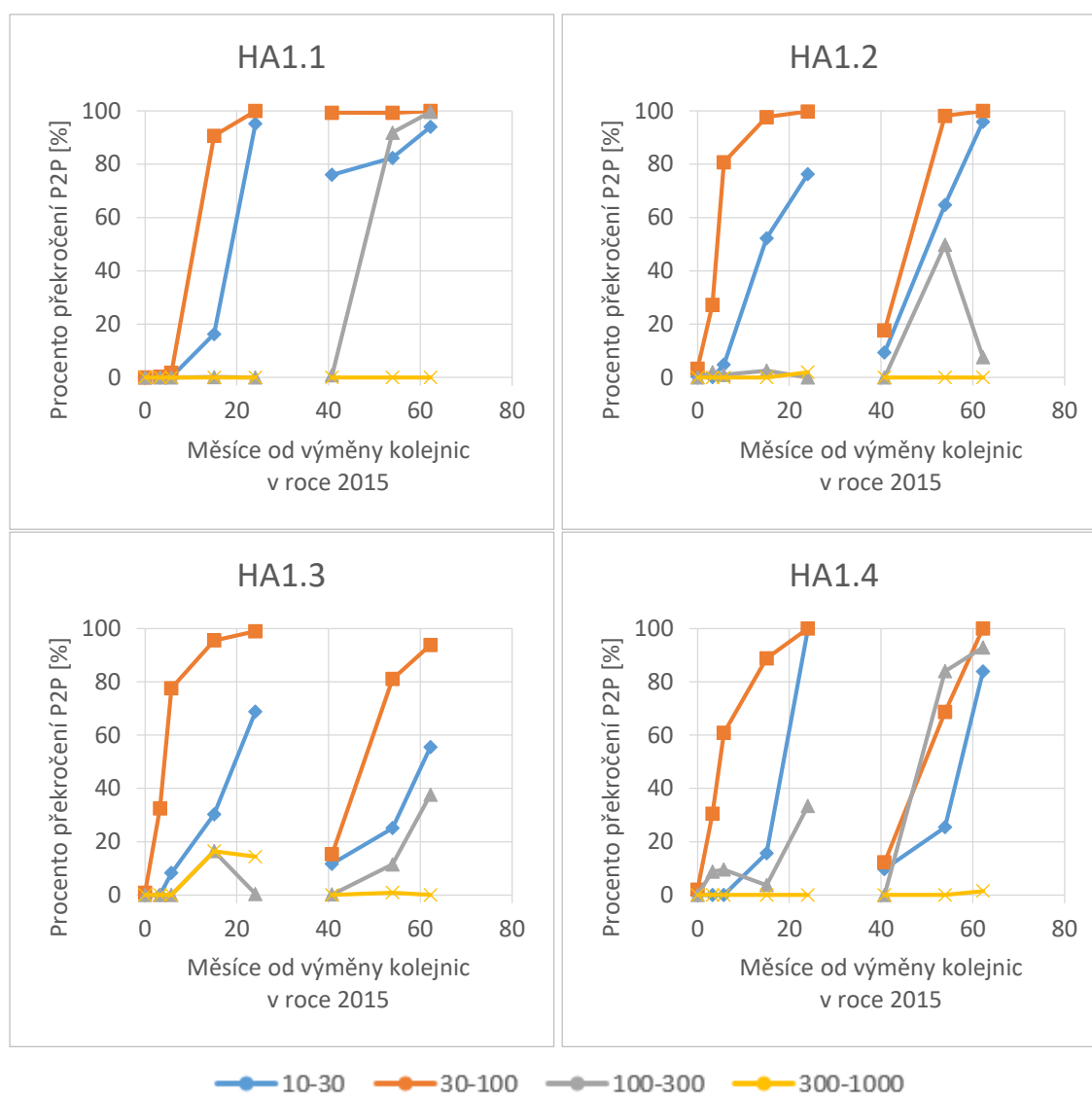


**Obr. 74** Časový harmonogram měření na úseku Hády

Grafy níže zobrazují čtyři místa v koleji číslo 1 úseku Hády. Grafy ukazují porovnání rychlosti rozvoje vlnovitých vad (zde reprezentované jako procento překročení mezní hodnoty RMS dle [79] (Obr. 75) a procento překročení hodnoty P2P dle [79] (Obr. 76)) na čtyřech místech ve dvou obloucích.



**Obr. 75** Procentuální překročení hodnot RMS pro úsek Hády



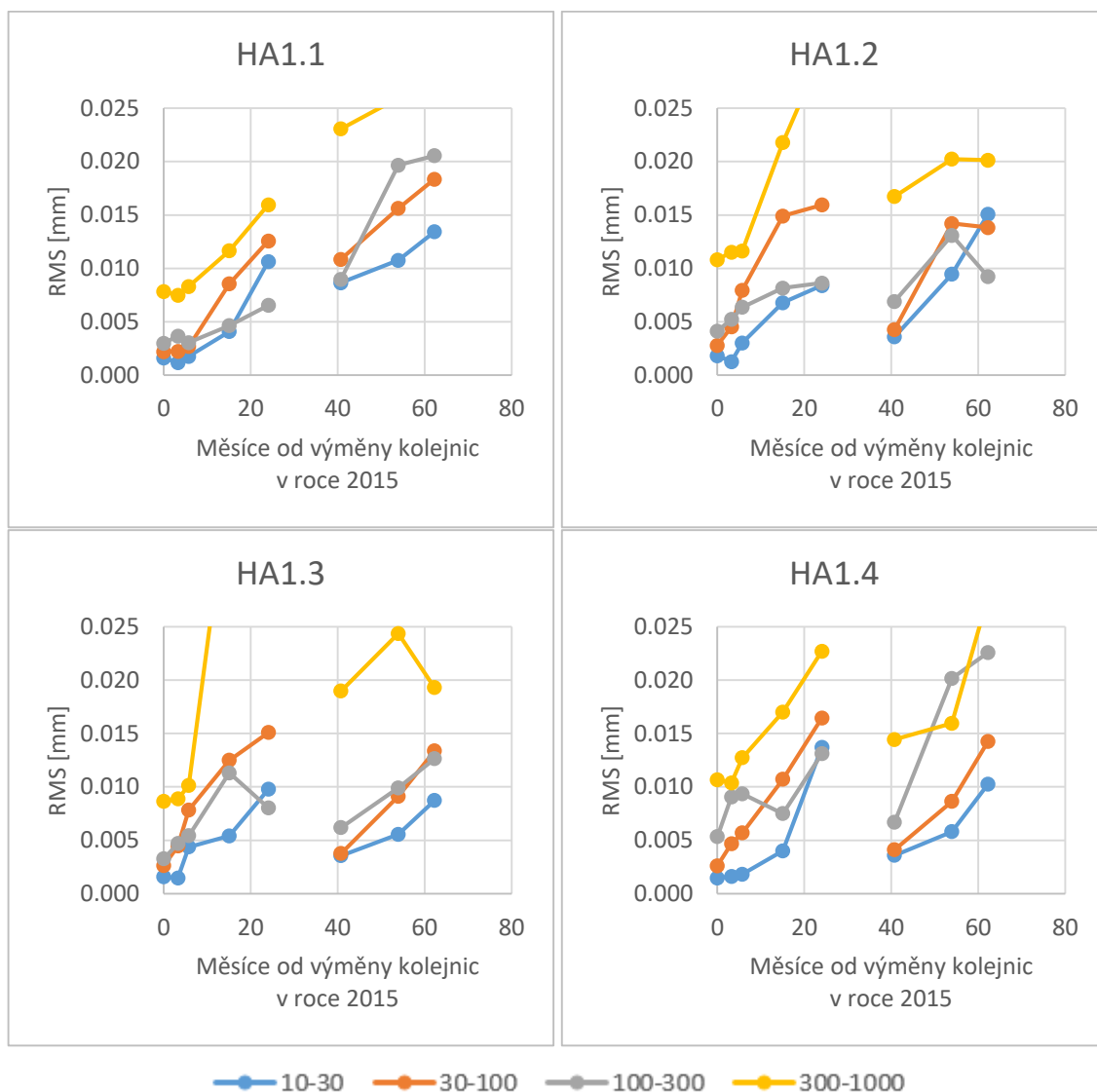
**Obr. 76** Procentuální překročení hodnot P2P pro úsek Hády

Některá vlnová pásma vykazují podobný trend rozvoje vln, avšak v jiných vlnových pásmech je rozvoj víceméně náhodný. V dubnu 2018 (v grafech odpovídá 35. měsíci) došlo v tomto úseku k broušení kolejnic, což se v některých pásmech projevilo snížením hodnot k výchozím, tj. k hodnotám blízkým nule. Následně je možno sledovat nový nárůst rozvoje vad.

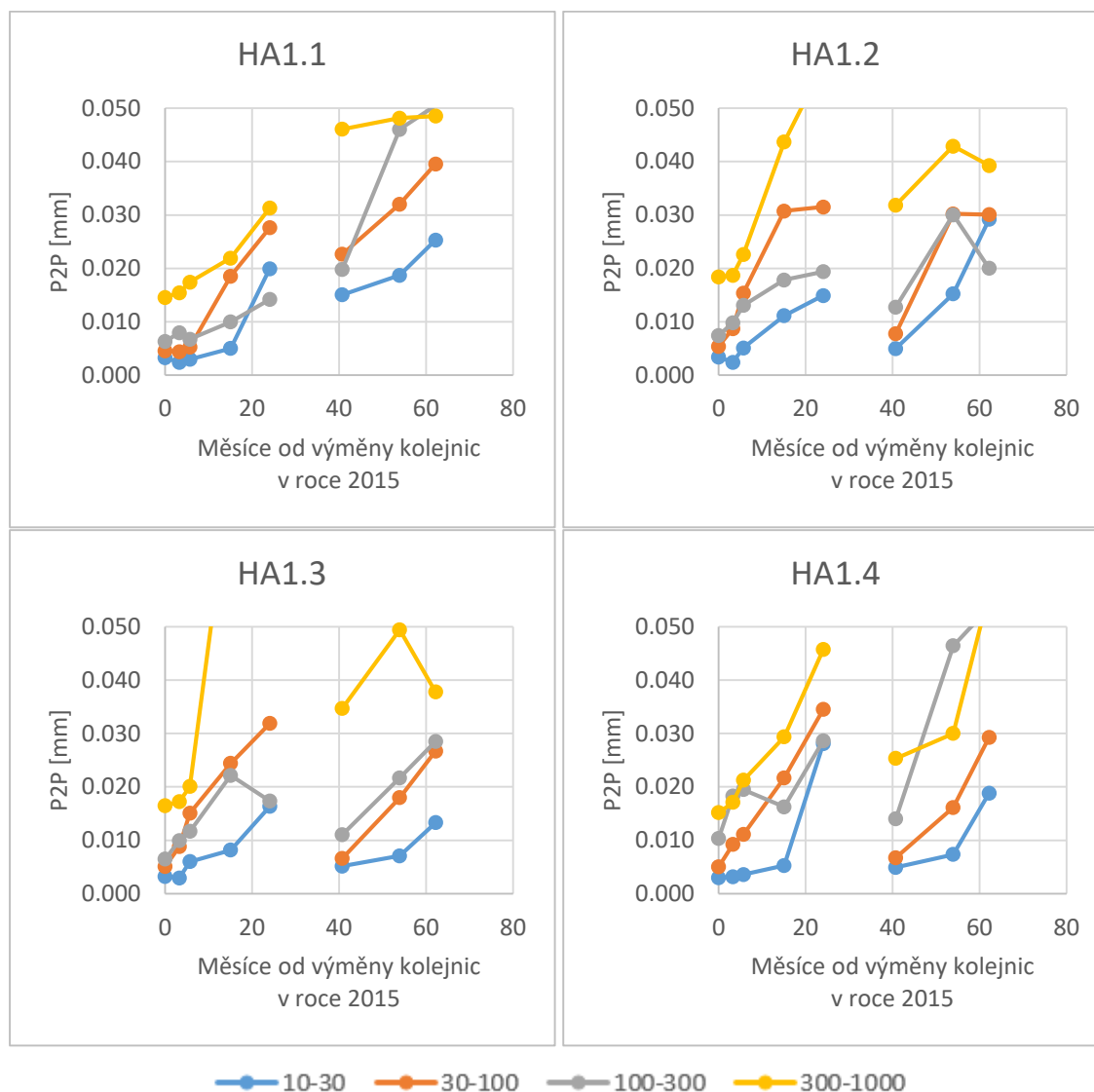
Pro pásma 10–30 a 30–100 mm hodnoty po 20 měsících od výměny kolejnic dosáhly 100 % a následně byly v roce 2018 provedeny opravné práce. Tento soulad vypovídá o souladu nastavení normy a údržbové činnosti.

Nicméně procentuální hodnoty překročení nerepresentují vhodně rozvoj příslušné vady (viz příklad s místem VY1.1 z Vyškova v kap. 3.4.1), proto zobrazením samotného RMS a P2P můžeme lépe sledovat samotný rozvoj.





Obr. 77 Časový vývoj RMS pro úsek Hádý



Obr. 78 Časový vývoj P2P pro úsek Hády

Ačkoliv grafy pro místa HA1.2, HA1.3 a HA1.4 jsou z téhož oblouku, dosahují rozdílných rychlostí rozvoje. Na základě historie oblouku, bylo zjištěno, že na místech HA1.2 až HA1.4 byly v září 2009 vyměněny podložky WFP 14K a upevnění W 14 za měkčí podložky WFP 21NT a upevnění W 21. Později (pravděpodobně v roce 2015 při výměně kolejnic) bylo vráceno upevnění W14 na místa HA1.2 a HA1.3. a částečně HA1.4. V druhé části HA1.4 je upevnění W 28.

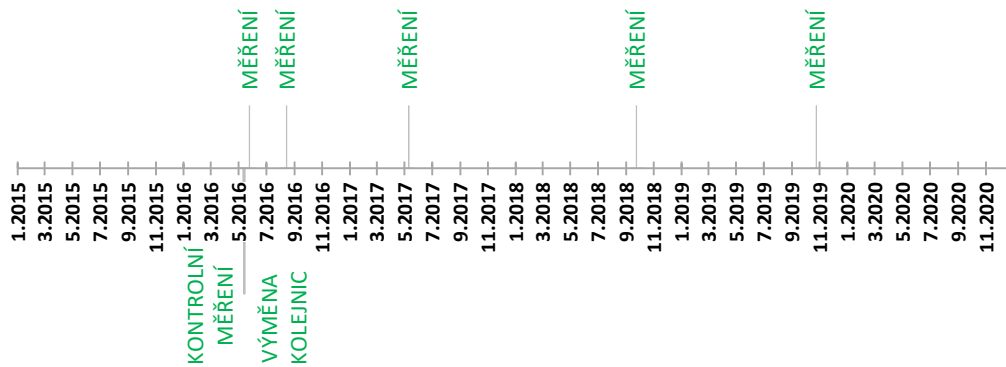
Porovnáme-li místo HA1.3 s místem HA1.1 téže koleje téhož úseku, můžeme pozorovat počáteční pomalejší rychlost rozvoje v prvním oblouku. Následuje výrazný nárůst vlnovitých vad mezi 6. a 15. měsícem od výměny kolejnic. Za hlavní faktor změny rychlosti rozvoje vln je považována výměna pražců za typ B 91T (faktorem s největší pravděpodobností nejsou právě nové pražce, ale proces výměny, tedy zásah do konstrukce svršku).

Na základě měření v koleji (Obr. 79) a dle teorie v kap. 1.1.3 a 1.2.3 se pro daný úsek vlnová délka skluzových vln pohybuje kolem hranice pásem (100 mm), proto jsou dále vyhodnocována především pásma 30–100 (D2) a 100–300 mm (D3).

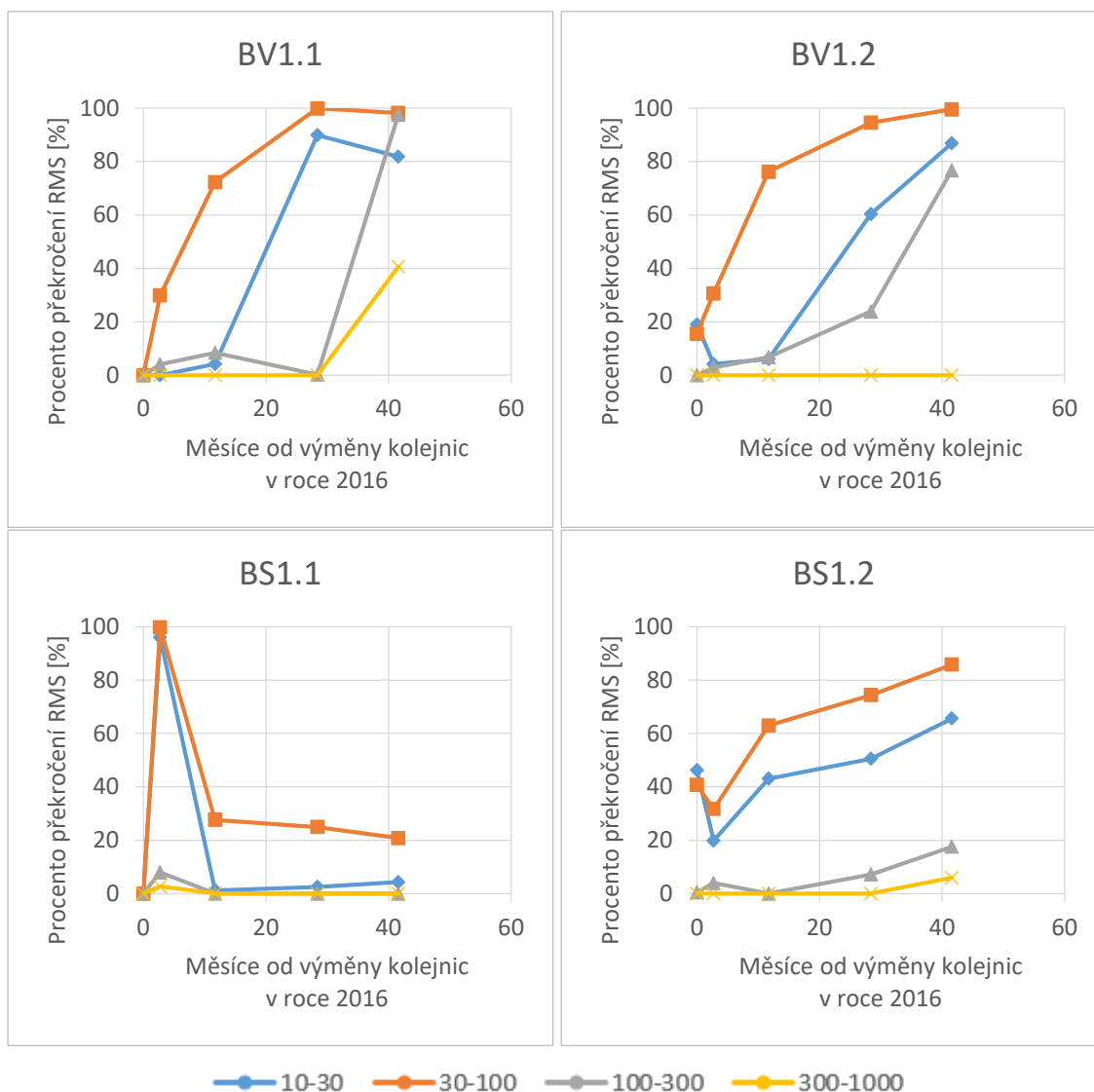


**Obr. 79** Vlnvité deformace na úseku Hády

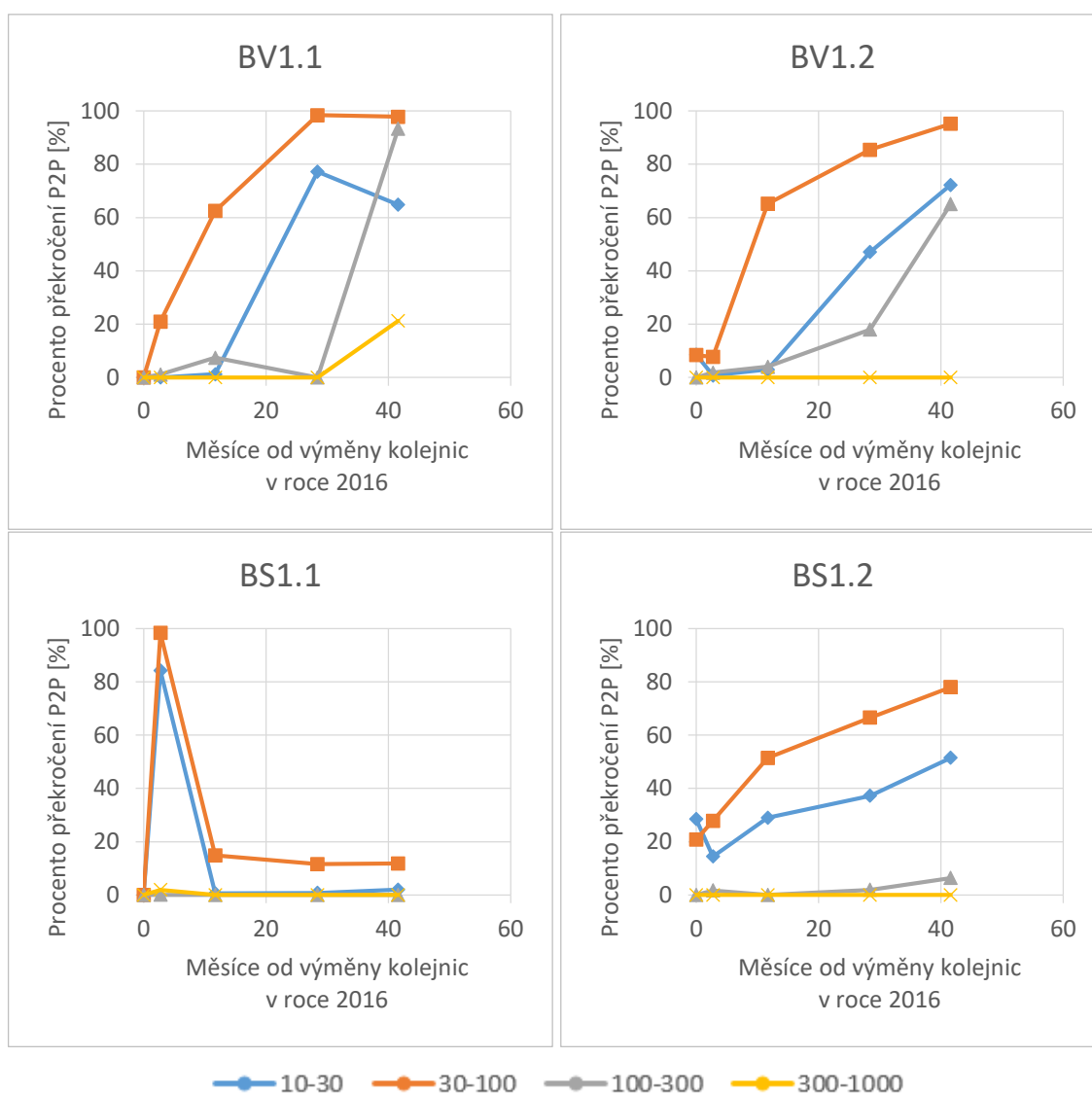
Stejným způsobem byla zpracována měření na úsecích Babice a Bílovice. Po výměně kolejnic byla měření intenzivnější a intervaly se dále postupně prodlužovaly.



**Obr. 80** Časový harmonogram měření na úsecích Bílovice a Babice

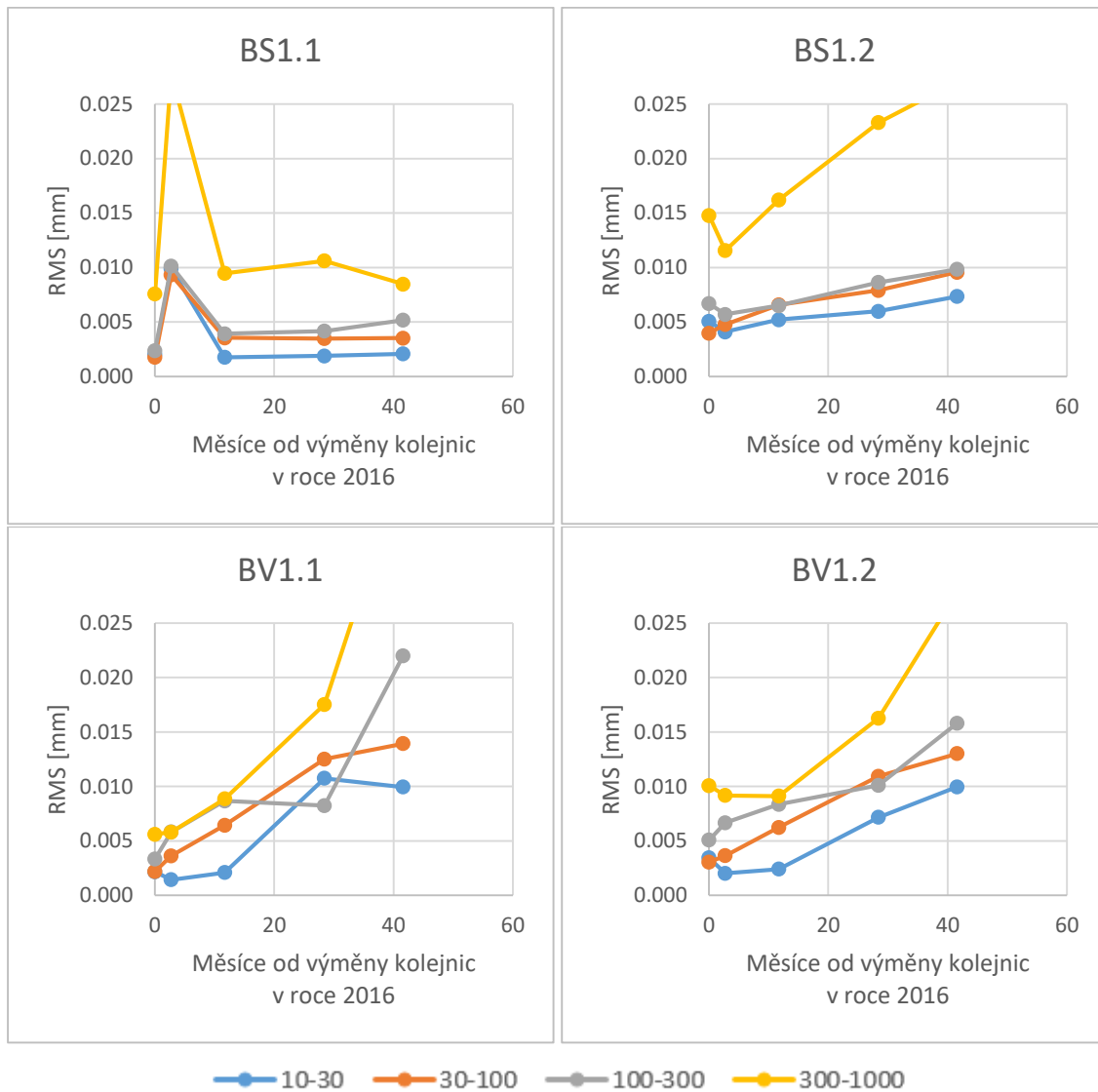


**Obr. 81** Procentuální překročení hodnot RMS pro úseky Bilovice a Babice

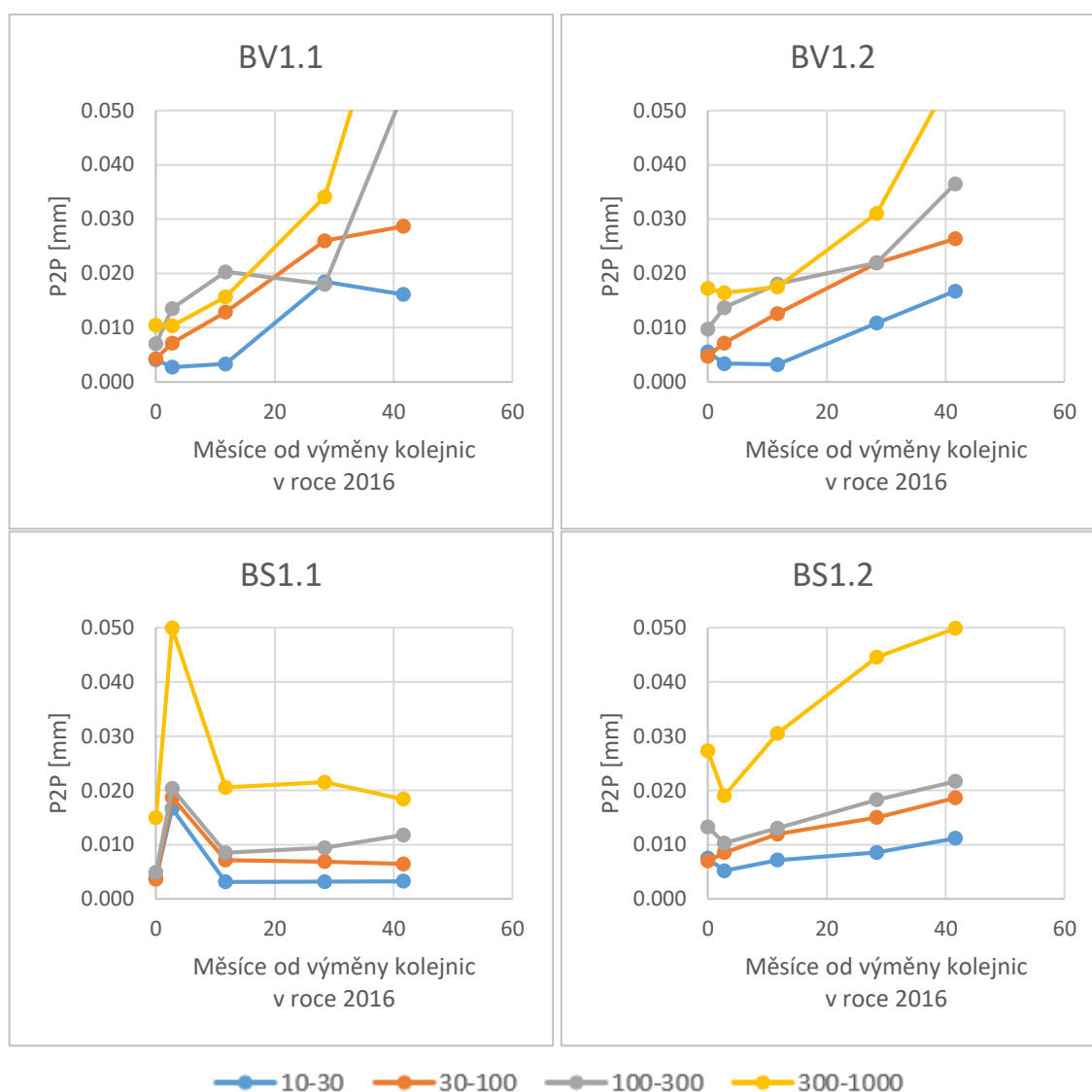


**Obr. 82** Procentuální překročení hodnot P2P pro úseky Bílovice a Babice

Na Obr. 81 a Obr. 82 z úseku Babice pro měřicí místa BS1.1 a BS1.2 jsou hodnoty druhého měření po výměně kolejnic výrazně odlišné od ostatních. Na úseku proběhlo dosypání šterku (patrně z fotodokumentace) a pravděpodobně i podbití pražců (nepotvrzeno).

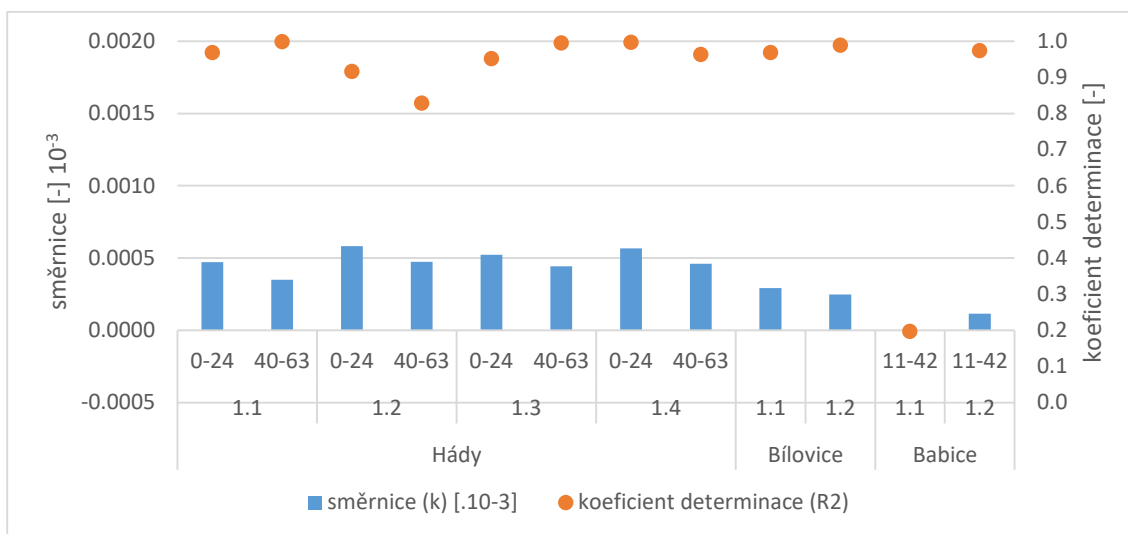


**Obr. 83** Časový vývoj RMS pro úseky Bílovice a Babice

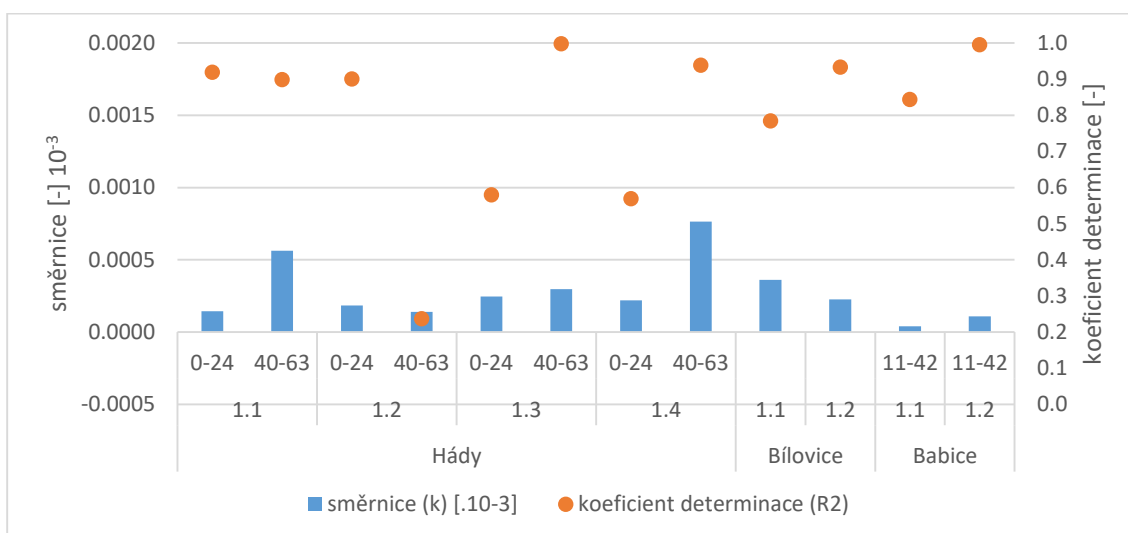


**Obr. 84** Časový vývoj P2P pro úseky Bílovice a Babice

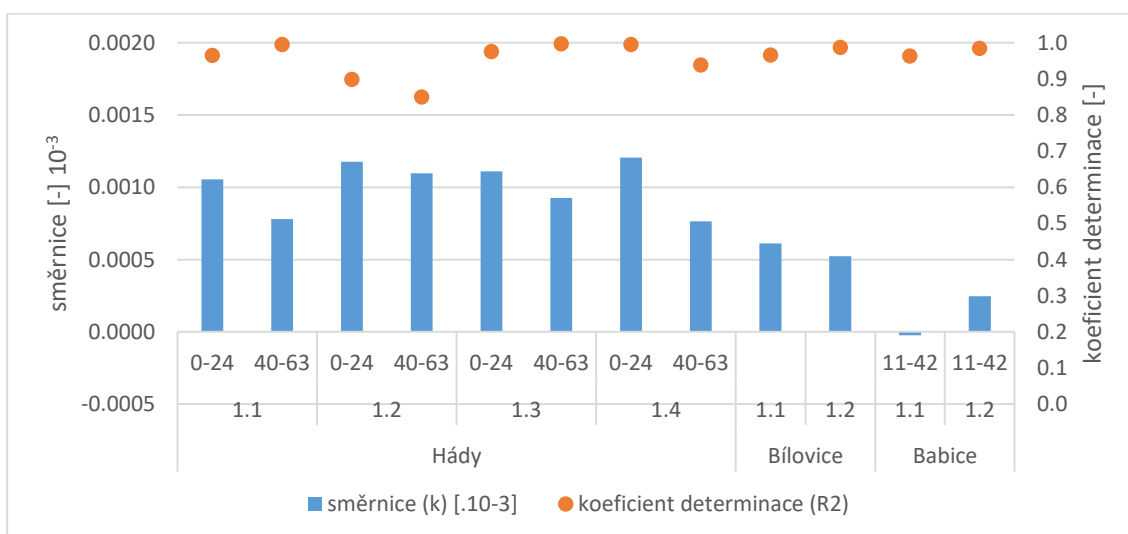
Z hodnot RMS a P2P pro vlnová pásma 30–100 a 100–300 mm byly vypočítány směrnice trendu. Z důvodů broušení kolejnic v roce 2018 je směrnice pro úsek Hády rozdělena na část před těmito pracemi (měsíce 0–24) a po nich (měsíce 40–63). V případě úseku Babice byly směrnice vypočítány až pro měsíce 11–42. Tabulka k Obr. 85 až Obr. 88 je v příloze 9.



**Obr. 85** Směrnice a koeficient determinace z RMS pro pásmo 30–100 mm

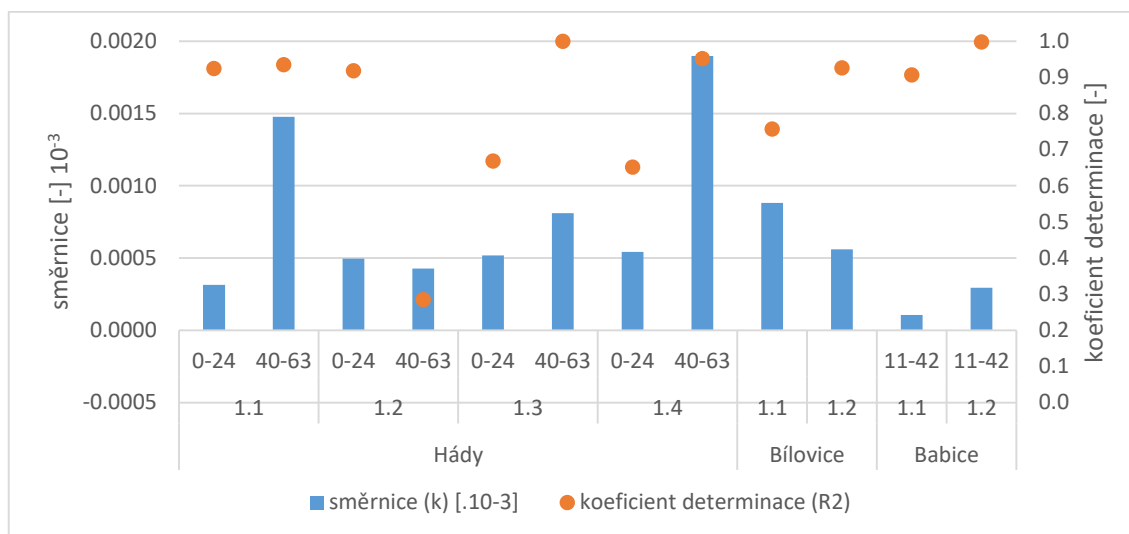


**Obr. 86** Směrnice a koeficient determinace z RMS pro pásmo 100–300 mm



**Obr. 87** Směrnice a koeficient determinace z P2P pro pásmo 30–100 mm





**Obr. 88** Směrnice a koeficient determinace z P2P pro pásmo 100–300 mm

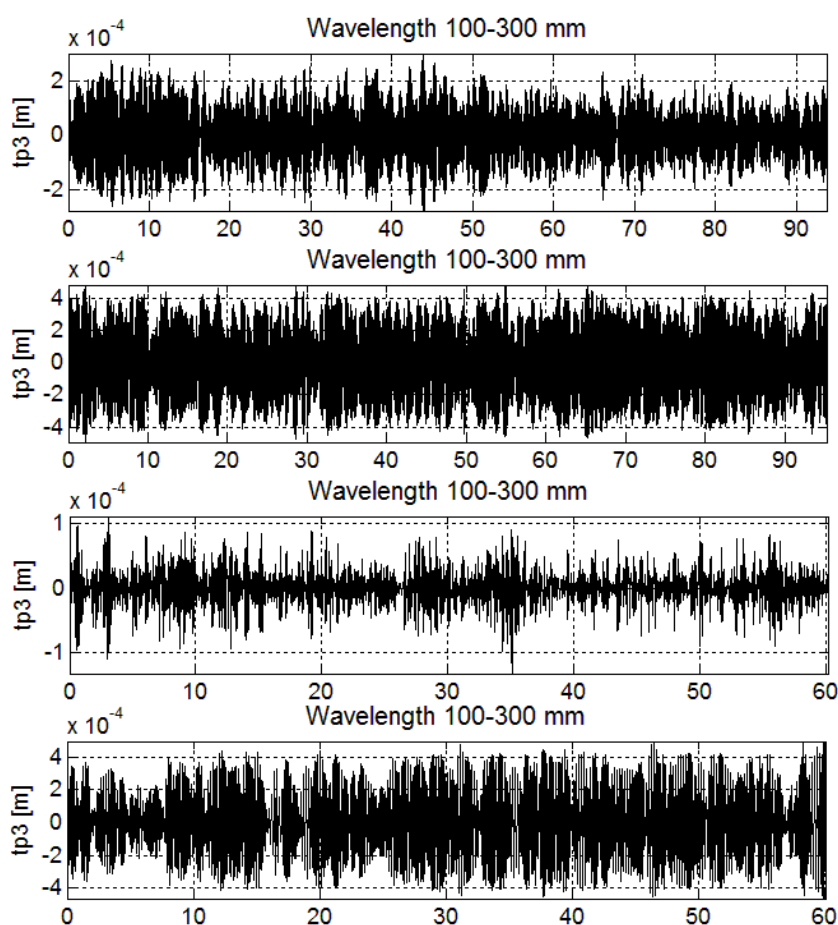
V případě vlnového pásma 30–100 mm se hodnoty směrnic na úseku Hády blíží hodnotě  $0,0005 \cdot 10^{-3}$  pro RMS a  $0,0009 \cdot 10^{-3}$  pro P2P. Obdobně na úseku Bílovice dosahují směrnice podobných hodnot. Na Babickém úseku má vyšší hodnotu směrnice pro místo BS1.2.

Výraznější rozdíly směrnic lze nalézt v případě vlnového pásma 100–300 mm. Na úseku Hády se v 75 % případů rychleji rozvíjí vady v měsících 40–63. Nutno ovšem podotknout, že pro některé směrnice je koeficient determinace velice nízký. Pomineme-li možnou chybu při měření (obzvláště u místa HA1.2), zvolená lineární regrese se v těchto případech nejeví jako vhodná. Na všech místech úseku Hády a většině míst úseků Bílovice a Babice se podařilo alespoň jednou zachytit celý cyklus rozvoje od výměny kolejnic do stoprocentního překročení hodnot RMS i P2P. Přesto pro stanovení optimálních křivek by bylo potřeba více měření, která by zachytila celý cyklus opakovaně pro možná porovnání, zda stejný vývoj nastane jak po výměně kolejnic, tak i po jejich broušení.

### 3.5.3 Nedostatek/přebytek převýšení koleje

#### *Úsek Havlíčkův Brod*

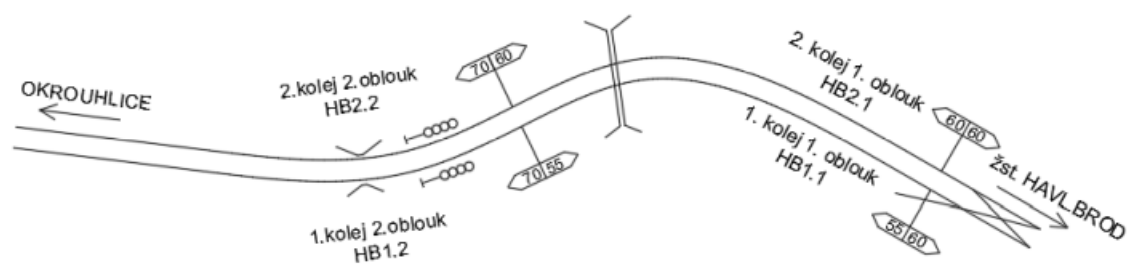
Při měření vlnovitých deformací na úseku Havlíčkův Brod (viz kap. 3.5.2 podkapitola Fáze rozvinuté vady) byly zjištěny výrazné rozdíly v hodnotách zájmového vlnového pásma 100–300 mm, jak ukazuje Obr. 89.



**Obr. 89** Vlnové pásmo 100–300 mm v Havlíčkově Brodě (od shora: první oblouk první kolej, první oblouk druhá kolej, druhý oblouk první kolej, druhý oblouk druhá kolej).

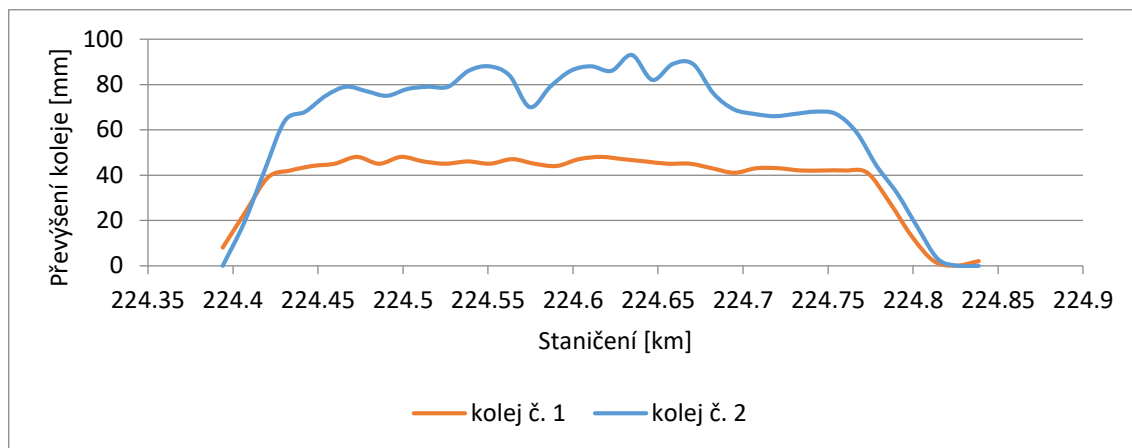
Při hledání příčin byla provedena měření geometrických parametrů koleje a byly měřeny rychlosti projíždějících souprav. Nabízela se i možnost, že příčinou rozdílného stavu vady může být rozdílný systém upevnění popsany výše, avšak tomu tak není, neboť rozdílná upevnění byla zkoušena jako prostředek zpomalení rozvoje vady.

Rozložení a označení oblouků je patrné z Obr. 90.



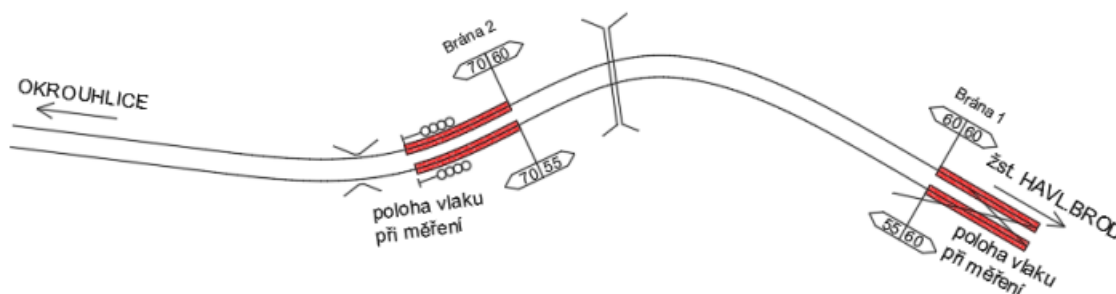
**Obr. 90** Schéma řešených oblouků v záhlaví žst. Havlíčkův Brod, podle [71]

Měření převýšení koleje ukázala v každé koleji jinou hodnotu převýšení, a to jak mezi kolejemi, tak i při porovnání s Nákrešným přehledem železničního svršku (v koleji č. 2 by mělo být převýšení 65 mm).



**Obr. 91** Převýšení koleje č. 1 a 2 v prvních obloucích, úsek Havlíčkův Brod

Rychlosti byly zpracovány z několika měřících kampaní pro 3 skupiny vlaků: osobní ( $O_s$ ), rychlíky (R) a nákladní (N). Nebyl brán zřetel na skutečnost, zda vlak projížděl výhybkami v přímém či odbočném směru. Snahou je vyhodnocení převýšení a rychlost pro danou lokalitu. Vyloučeny nebyly ani vlaky, které v obloucích zastavily (viz [82]).



**Obr. 92** Schéma měření rychlostí vlaků na úseku „Havlíčkův Brod“. Upraveno z [71]

Na Obr. 92 jsou vyznačeny polohy vlaků tzv. “brány“, ve kterých byly měřeny jejich rychlosti.

Při měřeních byla snaha změřit tutéž soupravu na obou místech, což se bohužel ne vždy z technických důvodů podařilo. Z tohoto důvodu jsou procentuální zastoupení jednotlivých skupin mírně rozdílné mezi oblouky 1 a 2.

**Tab. 23** Průměrné rychlosti jednotlivých skupin.  $V_{NP}$  je rychlost z Nákrešného přehledu (před/za rychlostníkem dle směru jízdy v dané koleji). Podíl ukazuje procentuální zastoupení jednotlivých skupin během měření.

Okrouhlice – Havl. Brod (kolej 1)				Havl. Brod – Okrouhlice (kolej 2)			
	brána 2	brána 1	podíl		brána 1	brána 2	podíl
	$V$	$V$			$V$	$V$	
	[km.h <sup>-1</sup> ]	[km.h <sup>-1</sup> ]	[%]		[km.h <sup>-1</sup> ]	[km.h <sup>-1</sup> ]	[%]
Os	37,5	34,6	42,4	Os	37,1	50,1	34,1
R	48,0	45,7	30,3	R	50,2	58,4	26,8
N	36,6	6,3	27,3	N	26,4	42,1	39,0
$V_{NP}$	70/55	55/60		$V_{NP}$	60/60	60/70	

Z Tab. 23 je vidět, že soupravy u rychlostníků nedosahují rychlostníky zobrazovaných rychlostí. Výjimkou jsou rychlíky v druhé koleji druhého oblouku.

V Tab. 24 jsou uvedena převýšení v jednotlivých obloucích a rychlosti podle jízdy z/do hlavních a předjízdnych kolejí dle Nákrešného přehledu. Následně byl vypočítán nedostatek převýšení  $I$  (kladná hodnota), resp. přebytek převýšení  $E$  (záporná hodnota) pro rychlosti dle rychlostníků, případně dle omezení ve stanici a převýšení.

**Tab. 24** Parametry oblouků dle Nákrešného přehledu včetně nedostatku/přebytku převýšení.

	$R$	$D$	$V_{hl}$	$V_{př}$	$I_{hl}/E_{hl}$	$I_{př}/E_{př}$
	[m]	[mm]	[km.h <sup>-1</sup> ]	[km.h <sup>-1</sup> ]	[mm]	[mm]
1. kolej 1. oblouk	250	43	55	40	99,8	32,5
	258	43	55	40	95,4	30,2
	330	43	55	40	65,2	14,2
1. kolej 2. oblouk	288	139	70	70	61,8	61,8
2. kolej 1. oblouk	520	82	60	40	-0,3	-45,7
	266	65	60	40	94,7	6,0
	330	65	60	40	63,7	-7,8
2. kolej 2. oblouk	284	139	70	70	64,6	64,6

Pokud do zjednodušené tabulky Tab. 25 dosadíme skutečné převýšení v obloucích z měření konstrukčních parametrů koleje vozíkem KRAB ( $D_{krab}$ ), rychlosti souprav změřené v zájmových obloucích a zohledníme i hmotnosti souprav, dostaneme dle [83] vážené nedostatky, zde pouze přebytky, převýšení ( $I_{váž}/E_{váž}$ ).

**Tab. 25** Parametry oblouků dle měření Krabem a nedostatky/přebytky převýšení.

	$R$	$D_{krab}$	$I_{váž}/E_{váž}$
	[m]	[mm]	[mm]
1. kolej 1. oblouk	258	43	-2
1. kolej 2. oblouk	288	139	-72
2. kolej 1. oblouk	266	83	-27
2. kolej 2. oblouk	284	139	-57

Jelikož při měření rychlostí nebylo zaznamenáno, z které koleje souprava odjížděla, příp. na kterou přijížděla, není možné spočítat ideální vážené hodnoty pro stav dle Nákresného přehledu a porovnat přímo se skutečností. Lze ovšem předpokládat, že by se výsledná hodnota pohybovala v rozmezí  $I_{hl}/E_{hl}$  a  $I_{pr}/E_{pr}$ . Vypočítané vážené hodnoty na základě reálně změřených dat jsou ovšem mimo toto rozmezí. Toto zjištění v kombinaci se získanými reálnými rychlostmi jasně dokazují, že soupravy v obloucích nedosahují rychlostí uvedených na rychlostnicích.

Vezmeme-li 1. oblouk 1. koleje jako referenční (hodnota  $E = 2$  mm tedy blízcí se nule), vezmeme i vlnovité deformace pásma 100–300 mm tohoto oblouku jako referenční (Obr. 89 první řádek). Rychlost vlaků v oblouku 1 v koleji číslo 1 je ovlivněna brzděním/rozjezdem ve stanici Havlíčkův Brod a dalšími nestandardními situacemi na zájmové záhlaví (kap. 3.2.2 podkapitola Havlíčkův Brod). Podle [71] „Z tohoto důvodu je v tomto oblouku v koleji č. 1 menší převýšení i traťová rychlost. Téměř všechny vlaky zde jezdí s přebytkem převýšení, protože musí respektovat změnu traťové rychlosti mezi prvním a druhým obloukem. Zde se paradoxně negativně projevil vliv snížení rychlosti v následujícím oblouku v koleji č. 1 na 55 km.h<sup>-1</sup>, který naopak v prvním oblouku pomáhá. Navíc vlaky vjíždějící odbočkou jedou od vjezdového návěstidla rychlostí nejvýše 40 km.h<sup>-1</sup>.“

V prvním oblouku v koleji č. 2 vyšel vážený průměr  $E = 27$  mm. V porovnání s kolejí číslo 1 dosahují vlnovité deformace 2x větších hodnot amplitud (Obr. 89 druhý řádek).

Naopak ve druhém oblouku téže koleje přebytek převýšení výrazně dominuje. Vážený průměr vyšel v druhé koleji druhého oblouku  $E = 57$  mm. Stav mikrogeometrie ukazuje Obr. 89 čtvrtý řádek a je prakticky shodný s prvním obloukem této koleje.

V druhém oblouku koleje č. 1 téměř všechny vlaky jezdí s přebytkem převýšení ( $E = 72$  mm), protože musí respektovat změnu traťové rychlosti mezi prvním a druhým obloukem.

„Navržené převýšení 139 mm je v tomto kontextu nesmyslně velké, odpovídá převýšení  $D_{N1}$  pro rychlost 75 km.h<sup>-1</sup>, přestože traťová rychlost je 70 km.h<sup>-1</sup> a reálně dosažitelná jen 55 km.h<sup>-1</sup> v koleji č. 1.“ [71]

$$D_{N1} = \frac{7,1 \cdot V^2}{R} \quad (50)$$

Mikrogeometrie je na Obr. 89 na třetím řádku a je oproti předchozím měřicím místům výrazně méně výrazná.

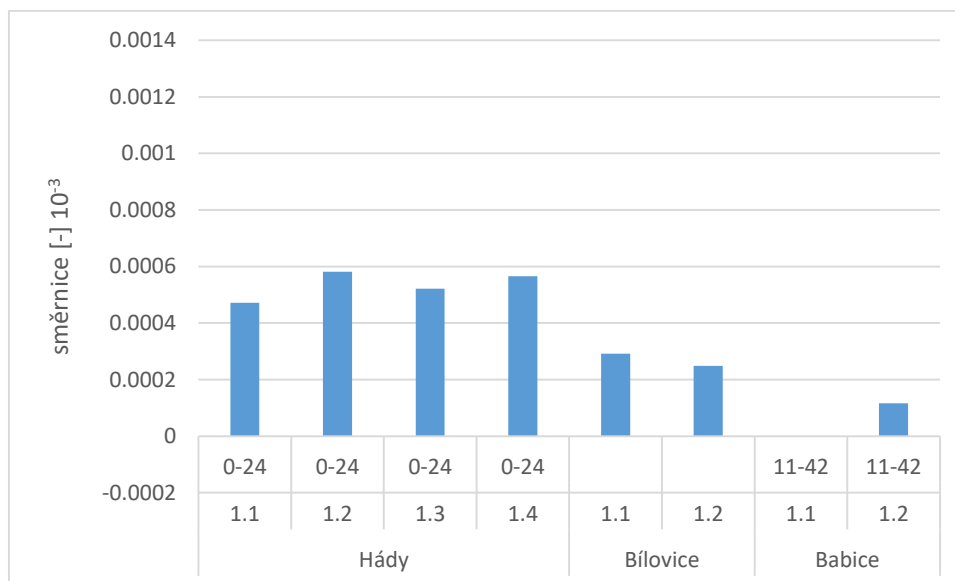
V obou kolejích je železniční svršek tvořen kolejnicemi 49 E1, a pražci B 91S/1, upevněním E 40 v prvním oblouku, ve druhém oblouku v koleji č. 2 E 14. V koleji č. 1 byly ve druhém oblouku použity pražce s podpražcovými podložkami a upevnění W 14. V obou kolejích byly zjištěny skluzové vlny, ve druhém oblouku koleje č. 2 navíc masivní praskání svěrek Skl 14. Lze se domnívat, že k poruchám svěrek přispívá vysoký vážený průměr přebytku převýšení.

K nejpomalejšímu rozvoji skluzových vln došlo v druhém oblouku koleje č. 1, přestože dle výše uvedených informací by se dalo předpokládat, že s rostoucí hodnotou přebytku převýšení bude tento oblouk mít nejhorší projev mikrogeometrie. Jako

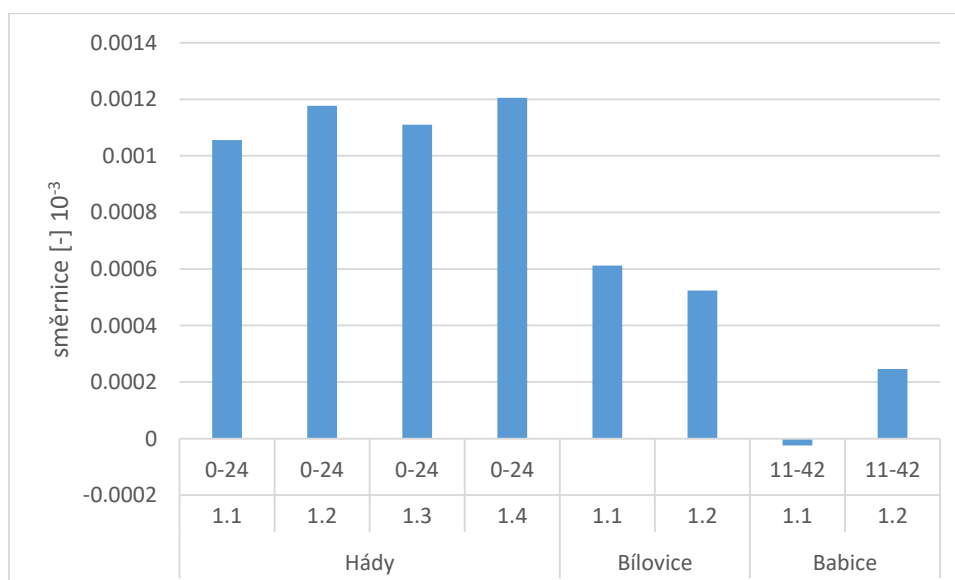
vysvětlení se nabízejí podpražcové podložky, které byly v tomto oblouku pouze v koleji číslo 1 nainstalovány.

### ***Úseky Hády, Bílovice a Babice***

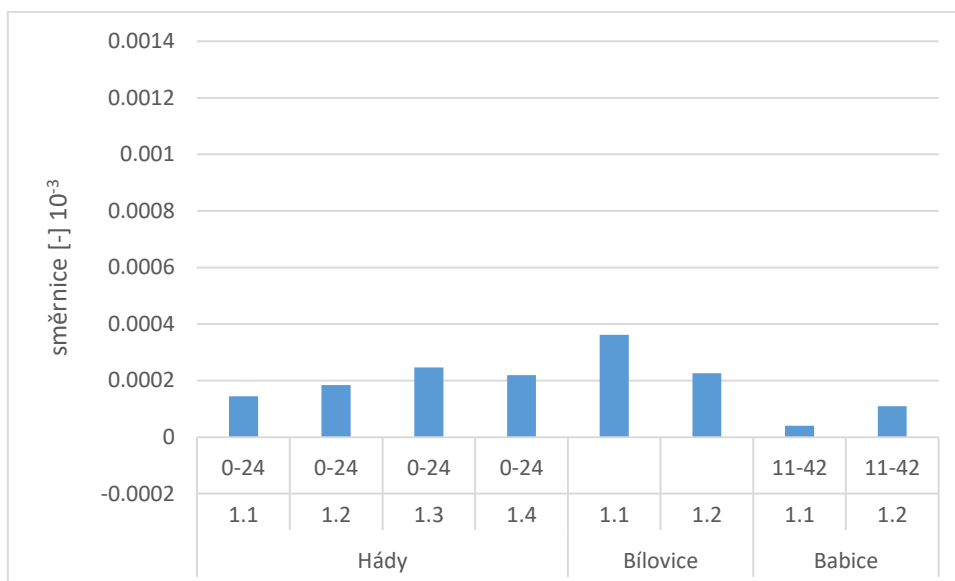
Na základě výsledků z Havlíčkova Brodu, byly úseky na trati č. 326 podrobeny porovnání nedostatků, resp. přebytků převýšení se směrnicemi rychlostí rozvoje skluzových vln (tabulky v příloze 9).



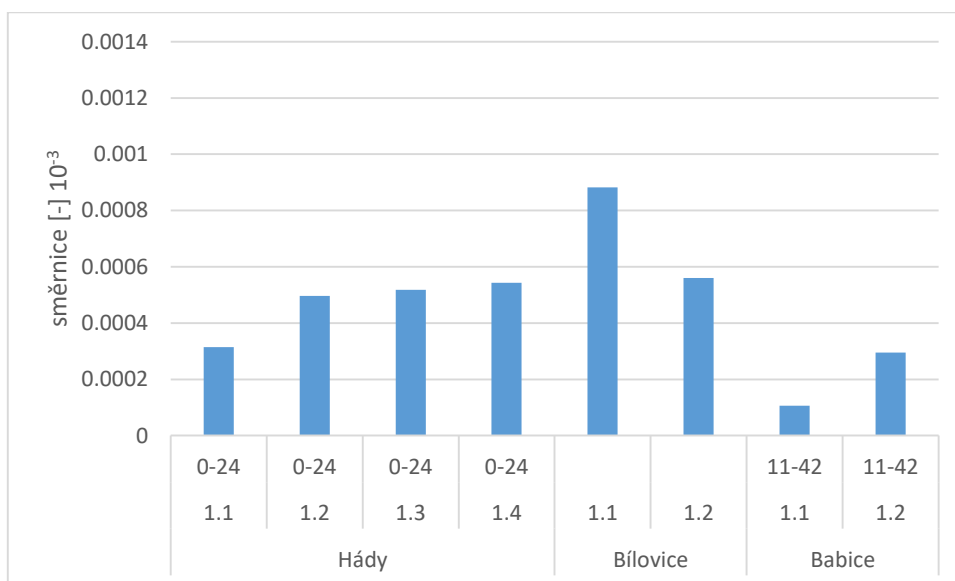
**Obr. 93** Směrnice RMS pro pásmo 30–100 mm



**Obr. 94** Směrnice P2P pro pásmo 30–100 mm



**Obr. 95** Směrnice RMS pro pásmo 100–300 mm



**Obr. 96** Směrnice P2P pro pásmo 100–300 mm

Na Obr. 93 až Obr. 96 jsou vyneseny směrnice vždy pro rozvoj vad v daných úsecích po výměně kolejnic (stejný zásah do svršku). Porovnání je provedeno pro místa v jednotlivých obloucích:

- HA1.1, odpovídá rychlostem z km 161,7;
- HA1.2, HA1.3, HA1.4, dále jen HA1.2-4, odpovídá rychlostem z km 162,8;
- BV1.1, odpovídá rychlostem z km 167,0;
- BV1.2, odpovídá rychlostem z km 167,0;
- BS1.2, odpovídá rychlostem z km 169,0.

Přestože místo BV1.1 je umístěno přibližně 250 m za měření rychlostí, byly u něj předpokládány stejné rychlosti.

Oproti tomu, babický oblouk se skládá z poloměru 375 m ( $D = 140$  mm) a poloměru 378 m ( $D = 100$  mm). Rychlosti byly měřeny v části s poloměrem 375 m (odpovídá měřicímu místu BS1.2). Výpočet vážených nedostatků/přebytků převýšení není možné aplikovat i na část s poloměrem 378 m (odpovídá měřicímu místu BS1.1), protože osobní vlaky zde zastavují v zastávce a jejich aktuální rychlosti jsou odlišné od místa BS1.2.

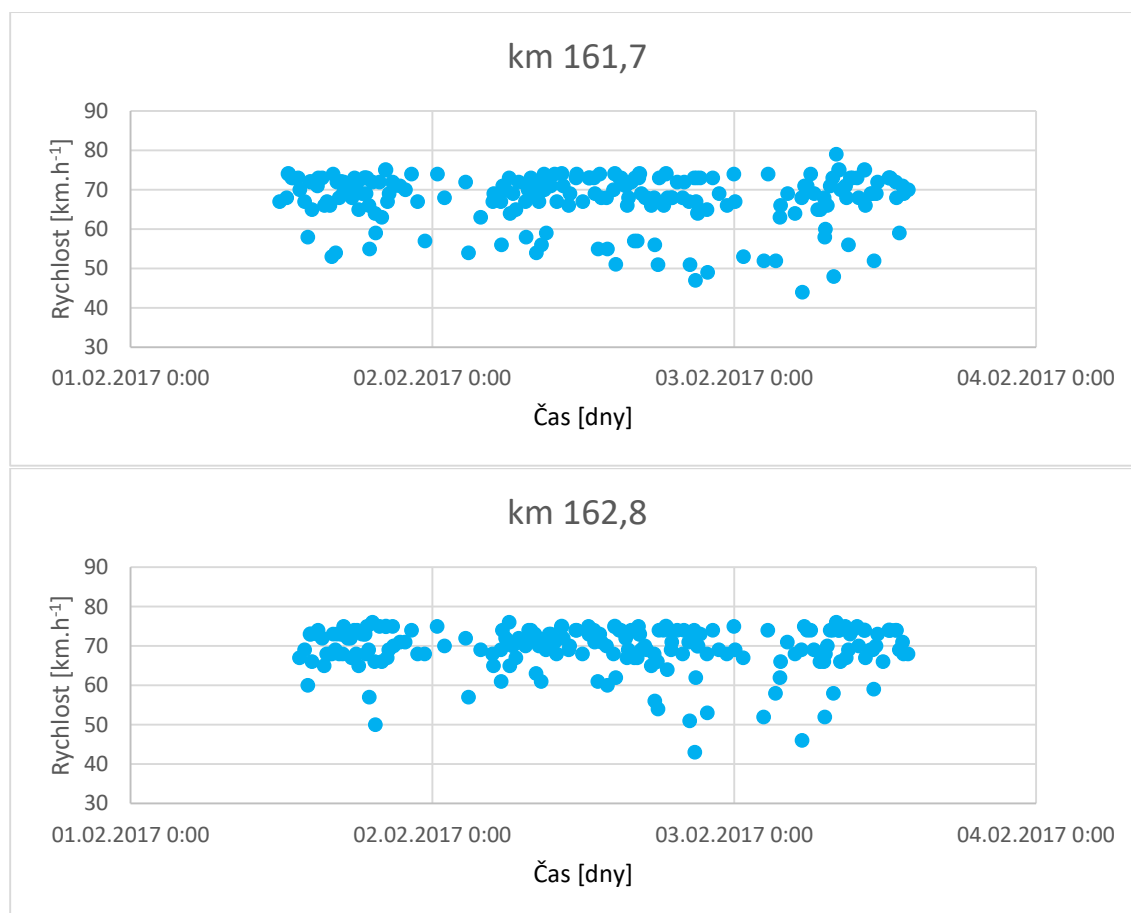
Seřazení míst, resp. oblouků podle směrnic je v Tab. 26 od nejméně strmé (nejvýše) po nejstrmější (nejníže). Pořadí se liší podle vlnového pásma.

**Tab. 26** Seřazení míst dle strmostí

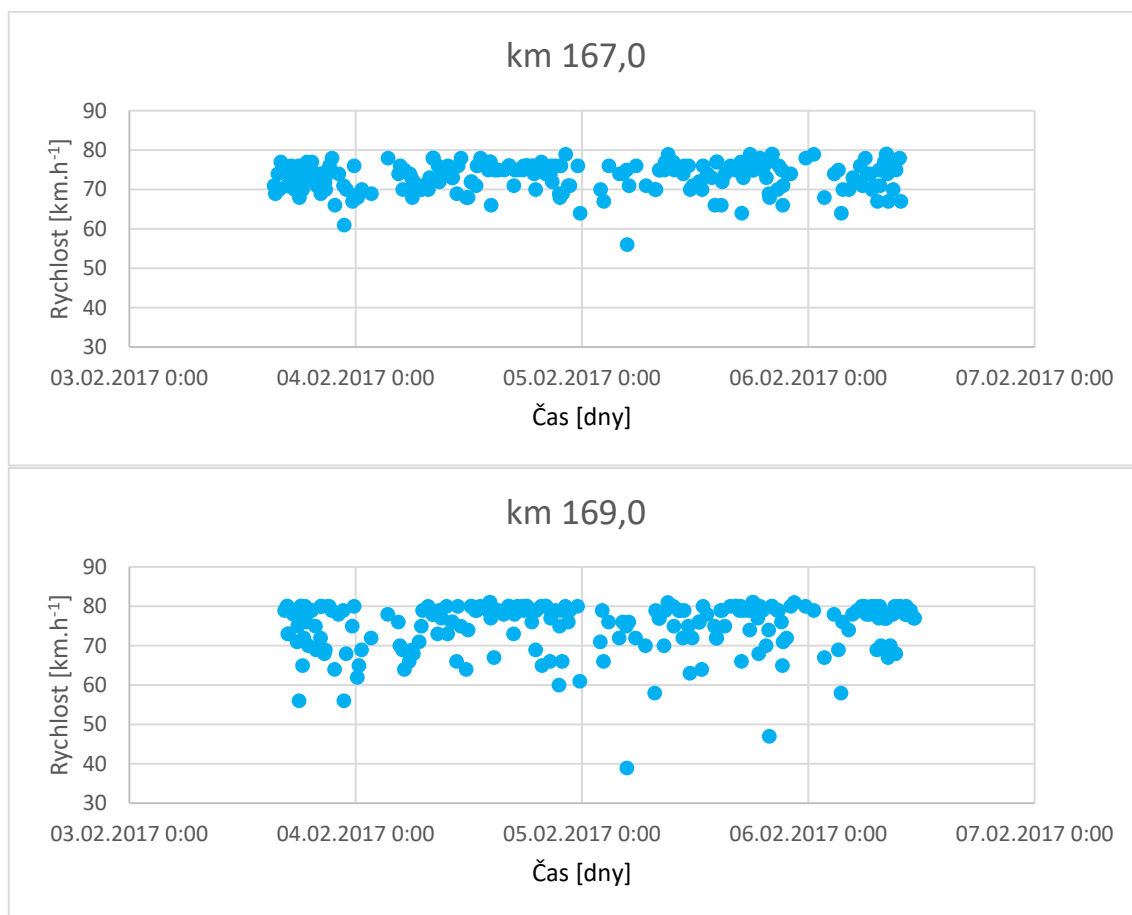
30–100 mm	100–300
BS1.2	BS1.2
BV1.2	HA1.1
BV1.1	BV1.2
HA1.1	HA1.2-4
HA1.2-4	BV1.1

Soumístí H1.2-4 bylo vybráno podle nejstrmější směrnice (H1.3) v RMS.

Na Obr. 97 jsou vyneseny jednotlivé změřené rychlosti projíždějících souprav. Při měřeních byly měřicí zařízení umístěné ve dvojicích – dvojice Hády 1 a Hády 2 a dvojice Bílovice a Babice.







**Obr. 97** Zaznamenané rychlosti v jednotlivých obloucích

Na prvním grafu (km 161,7) lze pozorovat pod skupinou rychlostí (65 až 80 km.h<sup>-1</sup>) několik “ostře” oddělených rychlostí (45 až 60 km.h<sup>-1</sup>). Oproti tomu na třetím grafu (km 167,0) rychlosti tvoří kompaktní skupinu.

Průměry rychlostí jsou uvedeny v Tab. 27.

**Tab. 27** Průměry rychlostí pro všechny vlaky

oblouk	Průměrná rychlost [km.h <sup>-1</sup> ]
161,7	67,84
162,8	70,00
167,0	74,41
169,0	76,96

V Tab. 28 jsou uvedeny průměrné rychlosti v jednotlivých obloucích pro jednotlivé skupiny vlaků.

Jednotlivé skupiny byly vytvořeny na základě:

- kategorií vlaků (osobní zastavují v zast. Babice nad Svitavou, nákladní do Maloměřic vjíždějí odbočnou větví výhybky apod.);
- zohledňující jednotlivé dopravce (RegioJet se svoji méně rozmanitou skupinou lokomotiv a vozů);

- konstrukcí souprav (Railjet, stejné pojezdy, stejná instalovaná zařízení (AVV) apod.).

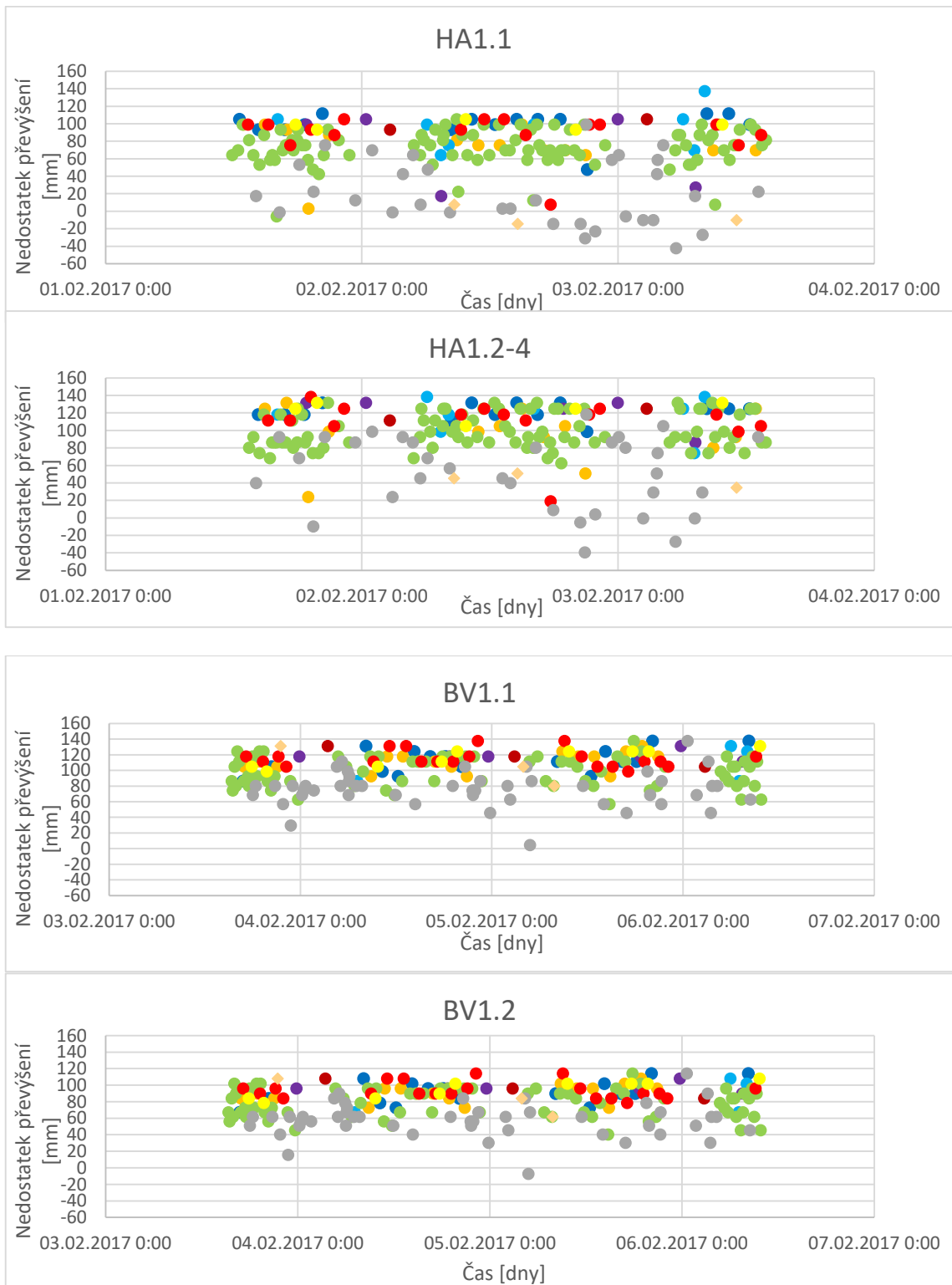
Nutno podotknout, že kategorie jsou vztaheny k roku 2017, kdy probíhala měření. Byly tak vytvořeny skupiny:

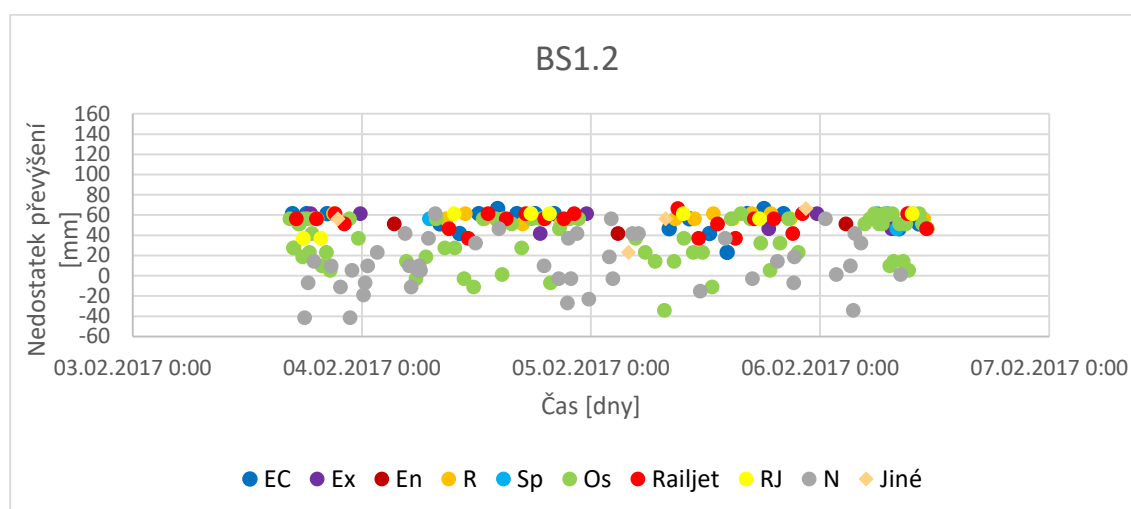
- EC (Eurocity – nejvyšší kategorie osobních vlaků zastavujících pouze ve velkých stanicích, tvořeny lokomotivou a 6–11 vozy);
- Ex (expresy – kategorie osobních vlaků zastavujících pouze ve velkých stanicích, tvořeny lokomotivou a 3–6 vozy);
- En (Euronight – noční vlaky);
- R (rychlíky – kategorie osobních vlaků zastavujících ve větších stanicích, tvořeny nejčastěji soupravami InterPanter);
- Sp (spěšné vlaky – kategorie osobních vlaků zastavujících častěji než „R“, ale méně než „Os“, tvořeny lokomotivou a 3–6 vozy);
- Os (osobní vlaky – kategorie osobních vlaků zastavujících ve všech stanicích a zastávkách, tvořeny lokomotivou a 3–6 vozy nebo soupravami RegioPanter);
- Railjet (stejná kategorie jako EC, avšak tvořena výhradně soupravami Siemens Viaggio Comfort);
- RegioJet (stejná kategorie jako EC, avšak tvořena lokomotivami a soupravami soukromého dopravce, tvořeny lokomotivou a 6–11 vozy);
- N (nákladní);
- Jiné.

**Tab. 28** Průměry rychlostí pro jednotlivé skupiny vlaků

km	Rychlosti pro jednotlivé skupiny vlaků [km.h <sup>-1</sup> ]									
	EC	Ex	En	R	Sp	Os	Railjet	RegioJet	N	Jiné
161,7	72,9	67,0	73,0	68,9	72,1	68,5	71,1	72,8	58,3	53,0
162,8	73,5	73,4	73,0	69,6	72,8	70,1	71,6	73,8	61,6	60,7
167,0	75,2	76,1	76,0	75,0	74,3	73,0	75,6	75,8	69,2	74,0
169,0	78,7	78,6	77,3	78,8	79,0	74,4	78,4	78,6	68,0	77,8

Pro jednotlivé vlaky, resp. jejich rychlosti byly vypočítány nedostatky/přebytky převýšení.





**Obr. 98** Porovnání nedostatků [+] a přebytků [-] převýšení ve sledovaných obloucích

Na Obr. 98 je možno pozorovat, že na místech H1.2-3 a BV1.1 dosahují nedostatky převýšení hodnot přes 130 mm. Na druhou stranu nejnižších nejvyšších nedostatků dosahují vlaky projíždějící obloukem v Babicích.

Vážené nedostatky, resp. přebytky převýšení pro jednotlivé oblouky byly vypočítány podle vzorců (48) a (49).

V případě nákladních vlaků bylo uvažováno s hmotností 2000 t na soupravu. Tato hodnota vychází z normativu tratě. Ta sice na jednu stranu připouští vyšší hodnoty, na druhou některé vlaky nebyly ložené nebo plně ložené. Užitím jiné hmotnosti v rámci normativu dojde k změně hodnot nedostatků/přebytků převýšení u nákladních vlaků a celkové hodnoty, avšak pořadí míst v absolutních hodnotách se nezmění.

**Tab. 29** Vážené nedostatky a přebytky převýšení pro jednotlivé skupiny vlaků

km	Vážený $I_{váz}/E_{váz}$ pro jednotlivé skupiny vlaků [mm]									
	EC	Ex	En	R	Sp	Os	Railjet	RegioJet	N	Jiné
HA1.1	99,4	81,7	99,2	71,9	91,5	73,3	88,6	98,0	19,6	-3,3
HA1.2-4	121,6	12,39	118,0	93,0	113,6	97,9	109,6	123,3	51,5	41,5
BV1.1	111,5	119,8	118,0	111,2	103,5	97,4	115,4	116,5	76,0	107,2
BV1.2	89,9	97,5	95,8	89,7	82,6	77,1	93,5	94,5	57,6	86,0
BS1.2	55,5	56,3	48,2	55,6	56,8	34,0	53,6	54,7	7,3	50,9

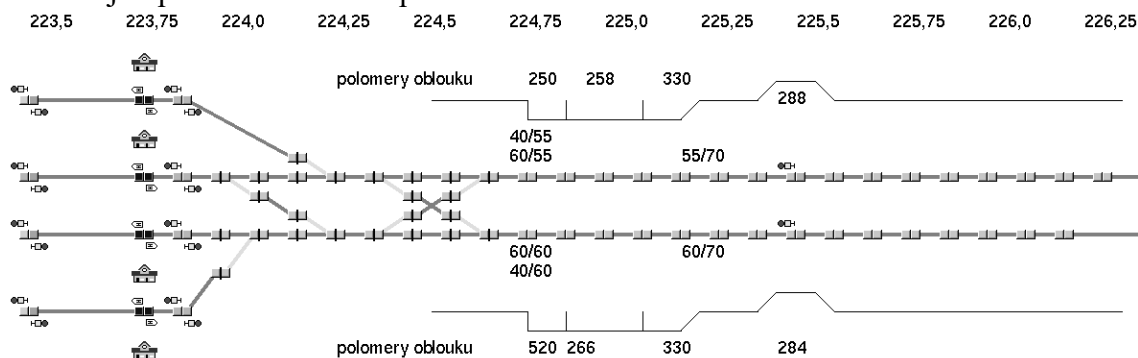
### 3.5.4 Simulace změny převýšení/změny rychlosti v daném úseku

#### *Simulace rychlosti jízdy vlaku*

Vezmeme-li do úvahy hodnoty přebytků převýšení z Tab. 25, přesněji z druhých oblouků, o kterých víme, že jsou zde vlnovité vady více rozvinuté než v prvních obloucích, nabízí se otázka: Je vyšší rychlost ( $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) v druhých obloucích nezbytná? Využijí soupravy tuto rychlost?

Pro zodpovězení těchto otázek byla dle [84, 85] provedena simulace jízdy vlaků v programu OpenTrack. Byl vytvořen zjednodušený simulační model okrouhlického

zhlaví, záhlaví stanice a část trati směrem na Okrouhlice podle Nákrešného přehledu a byl uvažován pouze pravostranný provoz. Traťová kolej do Humpolce, výtažná kolej a některé spojky nebyly modelovány, neboť pro simulaci v zájmových obloucích nejsou nezbytné. Naopak byly přidány některé další pomocné prvky (např. světelná návěstidla) umožňující požadované řízení provozu.

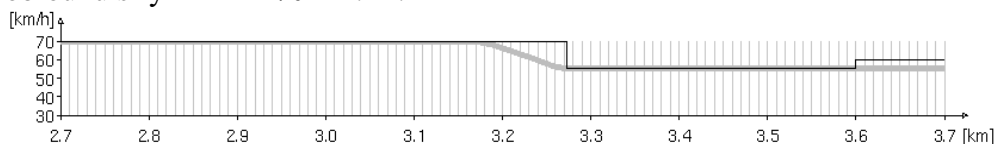


**Obr. 99** Zjednodušený model záhlaví žst. Havlíčkův Brod v prostředí aplikace OpenTrack

Nutno však zdůraznit, že pro simulaci byly použity modernější, výkonnější a relativně lehčí soupravy, než jsou ve skutečnosti na daném úseku provozovány. Nevyužijí-li rychlostního profilu ani tyto soupravy, bude to potvrzením nevhodného řešení stávajícího stavu. Konkrétně byla použita osobní souprava ř. 640 a nákladní vlak s hnacím vozidlem ř. 230 a hmotností soupravy pouze 800 t.

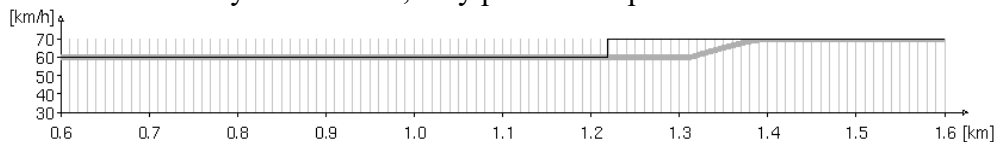
Výsledky těchto simulací jsou na Obr. 100 až Obr. 105, kde tlustá šedá čára představuje průběh rychlosti a tenká černá čára rychlostní omezení.

Na Obr. 100 je výřez průběhu rychlosti soupravy ř. 640 při jízdě hlavní kolejí č. 1 z Okrouhlic do Havlíčkova Brodu. Brzdění nastává po průjezdu cca 2/3 druhého oblouku, tedy oblouku s rychlostní 70 km.h<sup>-1</sup>.



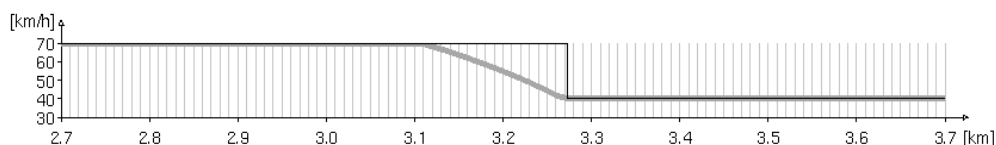
**Obr. 100** Výřez průběhu rychlosti při jízdě osobní soupravy hlavní kolejí č. 1 z Okrouhlic do Havlíčkova Brodu

Na Obr. 101 je tatáž souprava při jízdě do Okrouhlic a souprava dosahuje rychlosti 70 km.h<sup>-1</sup> cca 170 m za rychlostníkem, tedy přibližně v polovině druhého oblouku.



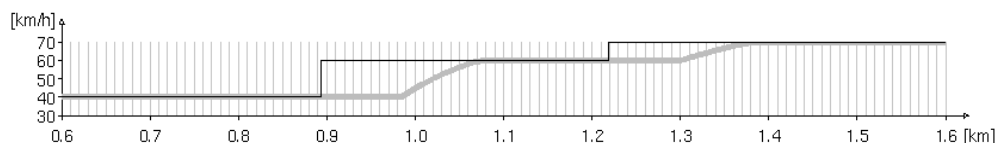
**Obr. 101** Výřez průběhu rychlosti při jízdě osobní soupravy hlavní kolejí č. 2 z Havlíčkova Brodu do Okrouhlic

Výraznější nevyužití rychlosti 70 km.h<sup>-1</sup> nastane, pokud souprava pojedě z/do předjízdových kolejí. Na Obr. 102 je vidět brzdění soupravy. Brzdění nastává po průjezdu již cca 1/3 oblouku.



**Obr. 102** Výřez průběhu rychlosti při jízdě osobní soupravy předjízdou kolejí č. 1 z Okrouhlic do Havlíčkova Brodu

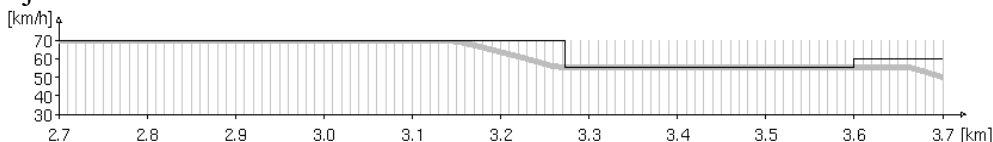
Na spodním řádku téhož obrázku jsou zaznamenána dvě zrychlení soupravy odpovídající dvěma rychlostníkům. Průběh rychlosti v druhém oblouku je shodný s Obr. 101.



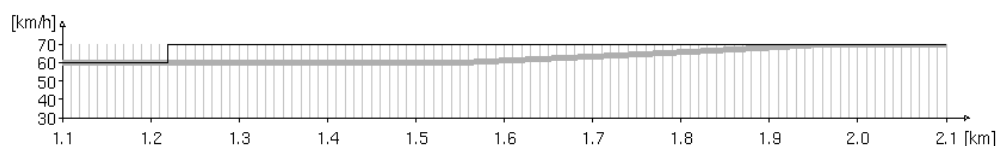
**Obr. 103** Výřez průběhu rychlosti při jízdě osobní soupravy předjízdou kolejí č. 2 z Havlíčkova Brodu do Okrouhlic

Z uvedených simulací vyplývá, že rychlost  $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  využijí alespoň z části soupravy jedoucí hlavními kolejemi a pro něž jsou oblouky navrženy.

Užijeme-li v simulaci nákladní vlak, výběhy rychlostí se dále prodlouží. Přestože byl na simulaci použit relativně lehký nákladní vlak, je především při jízdě ze stanice po hlavní koleji (Obr. 105) vidět dlouhý výběh a souprava dosahuje rychlosti  $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  daleko za druhým obloukem. Pojede-li nákladní vlak z předjízdny koleje, posune se výběh ještě více do trati.



**Obr. 104** Výřez průběhu rychlosti při jízdě nákladního vlaku hlavní kolejí č. 1 z Okrouhlic do Havlíčkova Brodu



**Obr. 105** Výřez průběhu rychlosti při jízdě nákladního vlaku hlavní kolejí č. 2 z Havlíčkova Brodu do Okrouhlic

Nedosahování největší dovolené rychlosti stávajícím vozovým parkem i technologická nekázeň (viz kap. 3.2.2 podkapitola Havlíčkův Brod), které byly pozorovány na úseku, způsobují ještě delší výběhy rychlostí. Totéž platí i pro moderní, avšak delší soupravy s větší hmotností.

## 4 PŘEHLED A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

### 4.1 PREDIKCE ROZVOJE

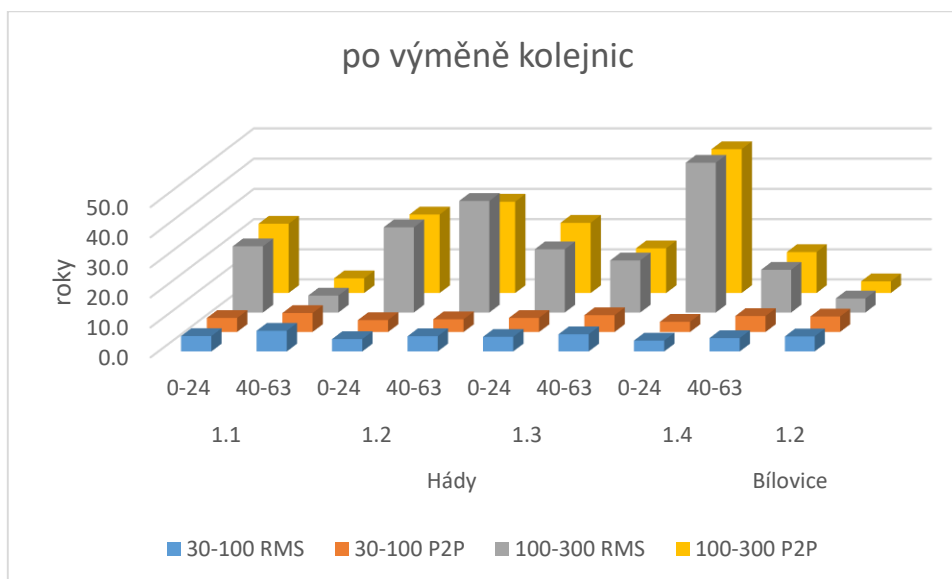
#### 4.1.1 Podle přechozího rozvoje vady

##### *Hády a Bílovice*

Užitím směrnic z přílohy 9 byla vypočítána časová období nutná k dosažení hodnot RMS a P2P před výměnami, případně před broušením kolejnic.

**Tab. 30** Počet roků nutných k dosažení rozvoje vlnových deformací odpovídajících stavu před výměnou kolejnic

Úsek		Hády								Bílovice
Měřicí místo		1.1		1.2		1.3		1.4		1.2
Směrnice z období		0–24	40–63	0–24	40–63	0–24	40–63	0–24	40–63	
30–100	RMS	5,1	6,9	4,1	5,1	4,9	5,7	3,6	4,5	5,0
	P2P	4,7	6,3	4,0	4,2	4,7	5,6	3,4	5,3	5,1
100–300	RMS	22,0	5,6	28,3	37,0	21,0	17,4	49,7	14,2	4,7
	P2P	23,0	4,9	26,1	30,3	23,3	14,9	47,7	13,7	3,9

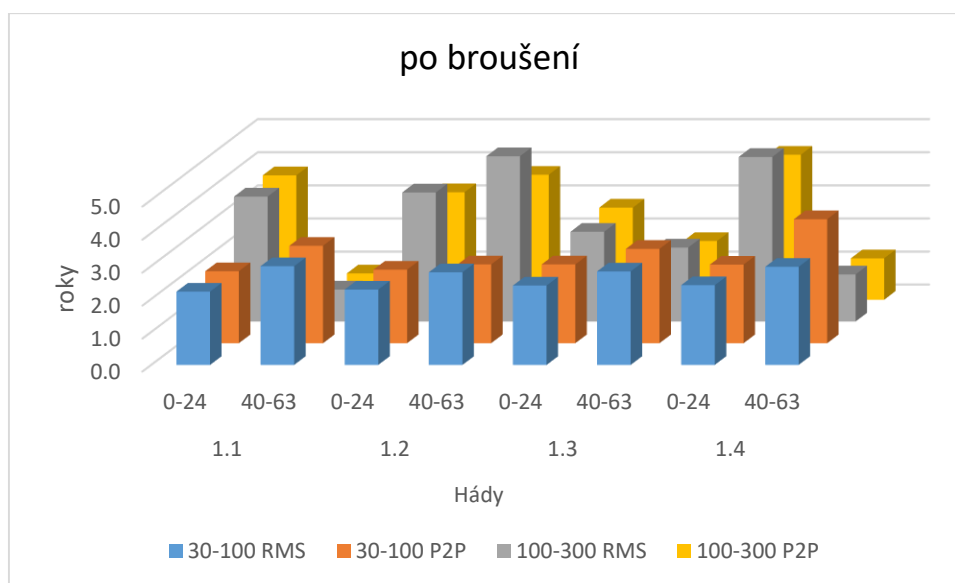


**Obr. 106** Počet roků nutných k dosažení rozvoje vlnových deformací odpovídajících stavu před výměnou kolejnic

Počet roku se výrazně liší podle vlnového pásma. U vlnového pásma 30–100 mm je odhad v jednotkách let. U pásma 100–300 je odhad již v desítkách let. Rozmezí 17–19 let odpovídá přibližně zprovoznění zmodernizovaného koridoru, na kterém se úseky nacházejí. Nelze ovšem předpokládat, že by se vady rozvíjely dvě desetiletí, neboť v daném období byly provedeny zásahy do svršku (broušení apod.). Výrazně delší předpokládané období rozvoje vad pro místo HA1.4 není dáno pomalým rozvojem vad, ale výrazně horším stavem před výměnou kolejnic v roce 2015.

**Tab. 31** Počet roků nutných k dosažení rozvoje vlnových deformací odpovídajících stavu před broušením kolejnic v roce 2015

Úsek		Hády							
Měřicí místo		1.1		1.2		1.3		1.4	
Směrnice z období		0–24	40–63	0–24	40–63	0–24	40–63	0–24	40–63
30–100	RMS	2,2	3,0	2,3	2,8	2,4	2,8	2,4	3,0
	P2P	2,2	3,0	2,2	2,4	2,4	2,9	2,4	3,8
100–300	RMS	3,8	1,0	3,9	5,1	2,7	2,2	5,0	1,4
	P2P	3,8	0,8	3,3	3,8	2,8	1,8	4,4	1,3

**Obr. 107** Počet roků nutných k dosažení rozvoje vlnových deformací odpovídajících stavu před broušením kolejnic v roce 2015

Budeme-li počítat časové období pro rozvoj vad odpovídající stavu před broušením kolejnic, dostaneme kratší intervaly než v předchozím případě. To je dáno jednak menšími absolutními hodnotami, kterých je nutno dosáhnout, ale také počátečním stavem, neboť po broušení nemusí být kolejnice a kolej obecně ve stavu, který odpovídá novostavbě.

Pro místa BV1.1, BS1.1 a BS1.2. nebyl bohužel zdokumentován stav před výměnou kolejnic v roce 2016.

### Adamov

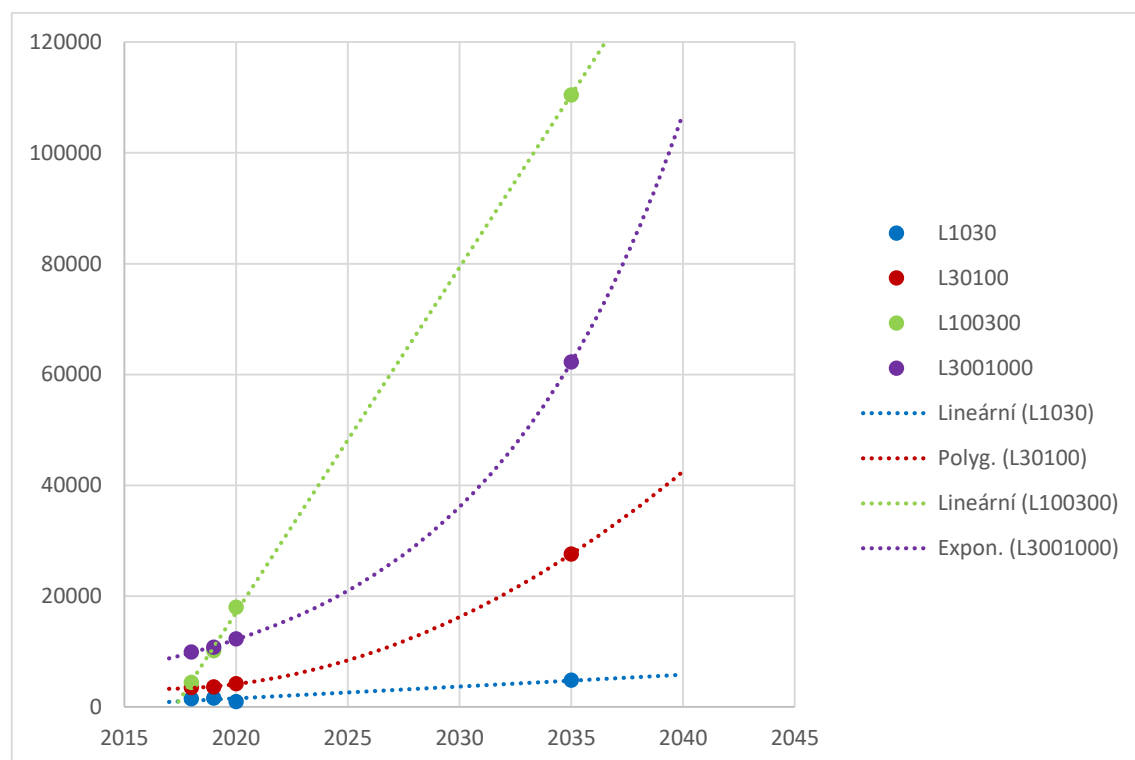
Stejný princip predikce byl aplikován i na data z měřicího vozu na místo AD1.1.

P2P ze systému měřicího vozu je zjednodušeno na hodnoty po 0,25 m, kdy 4 hodnoty, reprezentující jeden délkový metr kolejnice, mají stejnou hodnotu (viz kap 1.3.3). Takové hodnoty jsou pro potřeby této práce označeny jako P2P modifikované (P2Pm). Sečteme-li všechny hodnoty v určeném měřicím místě, dostaneme sumu P2P modifikovaného (P2Pms). Tímto výrazným zjednodušením P2P dochází ke ztrátě části informace o rozvoji vady, na druhou stranu jsou eliminovány lokální nepřesnosti.



Vynesením hodnoty P2Pms do grafu, můžeme určit směrnici trendu. Vynesené P2Pms jsou od výměny kolejnic, tedy od bezvadného stavu. Zároveň díky známé P2Pms před tímto zásahem, je opět možné prodloužením směrnic trendů hledat, kdy díky rozvoji vady P2Pms dosáhne stejné hodnoty jako před zásahem.

Toto hledání je možné pro všechna 4 vlnová pásma, avšak největší vypovídající hodnotu mají pásma 30–100 mm a 100–300 mm. U pásma 10–30 mm, vzhledem k vadám kolejnic, které reprezentuje, může být vývoj lokálně náhodný. Naopak u pásma 300–1000 m je možný delší rozvoje vady koleje či přímo drážního tělesa (např. sedání) bez ohledu na případné práce na samotném svršku.



**Obr. 108** Predikce rozvoje vlnovitých deformací na základě předchozích měření měřicím vozem

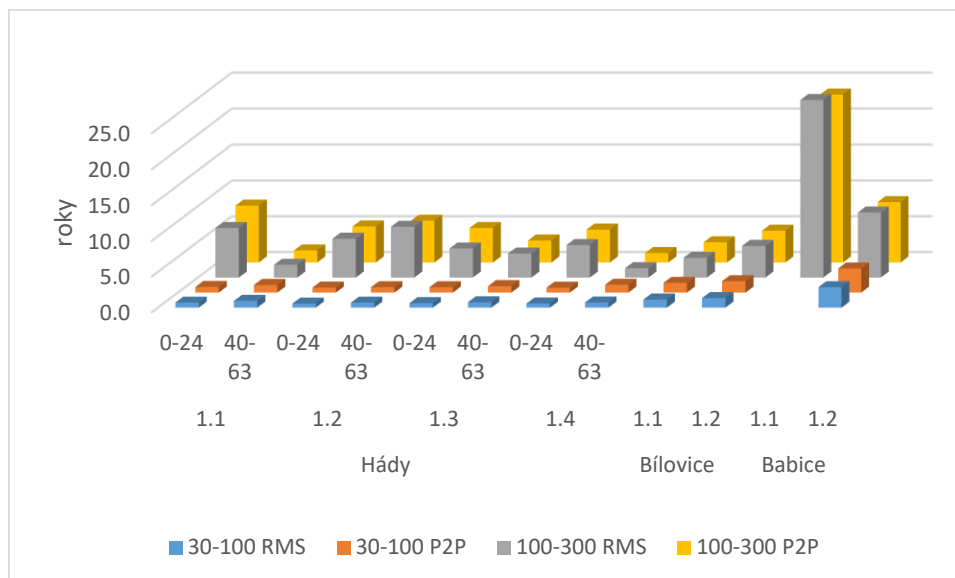
Pro měřicí místo AD1.1 byla referenční hodnota rozvinuté vady před zásahem použita z roku 2016. Opravné práce proběhly v roce 2018 (hodnoty pro stanovení trendu byly z let 2018, 2019, 2020).

Hodnota P2Pms shodná se stavem před opravným zásahem byla pro měřicí místo AD1.1 nalezena přibližně v roce 2035, což odpovídá rozvoji vady 17 let. Je zajímavé porovnat tuto časovou hodnotu s předchozím rozvojem vady mezi lety 1999 (zprovoznění modernizovaného koridoru [86], byť jednokolejně se jezdilo dříve) a opravnými pracemi v roce 2018. Jedná se tak o podobný časový rozsah.

V rámci predikce vad nebyly zohledněny jiné drobné opravné či údržbové práce a vzhledem k malému počtu hodnot P2Pms je odhad zatížen jistou mírou nejistoty. Navíc příslušný zásah v roce 2018 byl výrazně menšího rozsahu v porovnání s modernizací koridoru a je otázkou, zda nový časový úsek pro rozvoj vady bude mít stejnou či rozdílnou délku (viz Obr. 108).

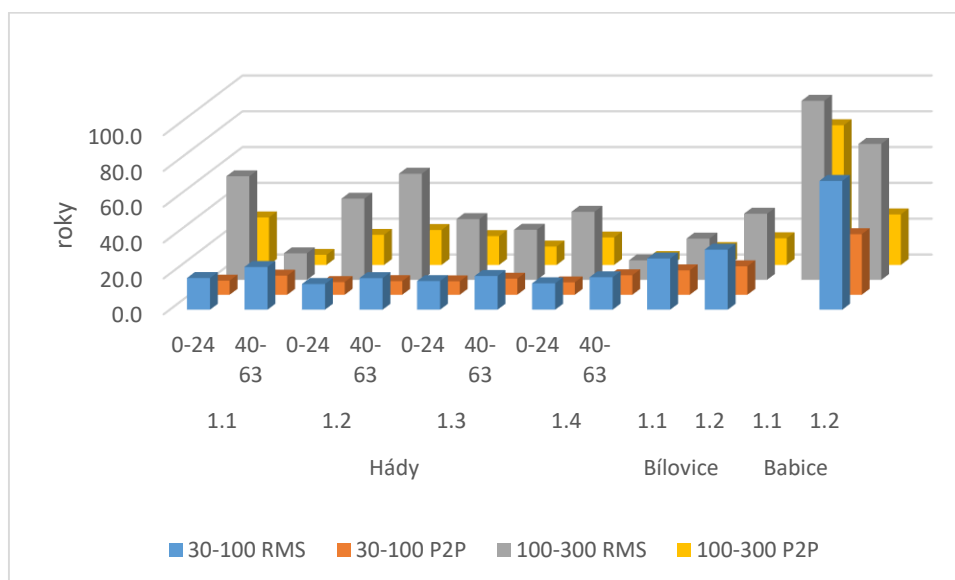
#### 4.1.2 Podle stanovených mezí

Nejvhodnější se pro predikci jeví užití směrnic pro výpočet RMS a P2P na hodnoty z Tab. 17 (ČSN 13231-3:2006 [79]). Časy nutné k rozvoji vad jsou v Příloze 9.3



**Obr. 109** Čas potřebný k rozvoji vad dle Tab. 17 (ČSN 13231-3:2006 [79])

A totéž dle hladiny 0,1 mm z předpisu SŽDC S2/4 [47]. Časy nutné k rozvoji vad jsou v Příloze 9.4



**Obr. 110** Čas potřebný k rozvoji vad dle hladiny 0,1 mm z předpisu SŽDC S2/4 [47]

Nejdéle bude rozvoj trvat v Babicích, i když vzhledem k záporným směrnicím pásma 30–100 mm byly odhady pro toto pásmo z hodnocení vyřazeny a hodnota RMS pro 100–300 mm je oříznuta viz příloha 9.4.

## 4.2 POROVNÁNÍ RYCHLOSTI ROZVOJE S NEDOSTATKY PŘEVÝŠENÍ VE SLEDOVANÝCH ÚSECÍCH

Seřadíme-li místa v Tab. 32 od nejnižší hodnoty po nejvyšší a porovnáme-li s Tab. 26, dostaneme pro pásmo 100–300 mm (D3) stejné pořadí.

**Tab. 32** Vážené nedostatky převýšení v obloucích pro všechny vlaky (nezaokrouhlo)

Oblouk	$l_{váž}$ [mm]
BS1.2	21,0
HA1.1	46,1
BV1.2	67,6
HA1.2-4	73,8
BV1.1	87,0

## 4.3 NÁVRH NOVÝCH RYCHLOSTÍ VE SLEDOVANÝCH ÚSECÍCH

### *Zpomalení rychlosti rozvoje skluzových vln*

Upravíme-li (v tomto případě snížíme) rychlosti v obloucích na úroveň odpovídající provoznímu stavu a vozovému parku, můžeme následně snížit i převýšení v obloucích, neboť stávající „tabulkové“ hodnoty převýšení nebudou nutné. Výstupem budou při stávajících rychlostech a nových převýšeních nové (nižší) hodnoty nedostatků převýšení, což by do budoucna mělo vést k pomalejšímu rozvoji skluzových vln v obloucích malých poloměrů.

### *Stanovení vhodného převýšení koleje dle rychlostí*

Na základě zprůměrovaných skutečných rychlostí a parametrů oblouků z měření měřicím vozíkem Krab byla vypočítána teoretická převýšení  $D_{eq}$ .

**Tab. 33** Navržené teoretické převýšení ze skutečných rychlostí ( $D_{eq}$ ) a převýšení změřené měřicím vozíkem Krab ( $D_{krab}$ ) (rozložení tabulek odpovídá Tab. 23)

kolej 1					kolej 2				
	brána 2		brána 1			brána 2		brána 1	
	$D_{eq}$	$D_{krab}$	$D_{eq}$	$D_{krab}$		$D_{eq}$	$D_{krab}$	$D_{eq}$	$D_{krab}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Os	58	43	55	139	Os	61	83	104	139
R	94	43	96	139	R	112	83	142	139
N	55	43	2	139	N	31	83	74	139

Pokud bychom při návrhu vzali v úvahu pouze rychlost, v obloucích by mohla být navržena teoretická převýšení, neboť jakákoliv z uvedených hodnot je dle normy [39] přípustná. Zůstává otázka, jaké převýšení zvolit.

### ***Stanovení převýšení dle nedostatků/přebytků převýšení***

Chceme-li snižovat provozní opotřebení a vady (mít nedostatky a přebytky převýšení co nejnižší, ideálně nulové), je nutné při stanovení převýšení zohlednit další působení vlaků na trať. Jako metoda zohledňující toto působení byl zvolen výpočet váženého nedostatku, resp. přebytku převýšení. Při výpočtu bylo vždy takové převýšení, aby výsledná hodnota váženého nedostatku/přebytku převýšení byla nulová.

Navržená převýšení a z nich vypočítané nové ideální rychlosti jsou v Tab. 34.

**Tab. 34** Porovnání stávajících parametrů ( $D_{stav}$  a  $V_{stav}$ ) s hodnotami z vážených výpočtů ( $D_{váž}$  a  $V_{váž}$ )

	$D_{stav}$	$V_{stav}$	$D_{váž}$	$V_{váž}$
	[mm]	[km.h <sup>-1</sup> ]	[mm]	[km.h <sup>-1</sup> ]
1. kolej 1. oblouk	43	55	41	30
1. kolej 2. oblouk	139	70	70	40
2. kolej 1. oblouk	83	60	68	40
2. kolej 2. oblouk	139	70	92	50

### ***Nové rychlostníky***

Porovnáme-li si nové rychlosti ( $V_{váž}$ ) v Tab. 34 s průměrnými rychlostmi jednotlivých skupin vlaků v Tab. 23, zjistíme, že především rychlíky výkonově zvládají vyšší rychlosti v daných obloucích. Proto byly nově navržené rychlosti  $V_n$  zpětně částečně zvýšeny oproti rychlostem  $V_{váž}$  vypočítaných z vážených nedostatku/přebytků převýšení a skutečných rychlostí tak, aby rychlíkové vlaky nebyly zbytečně zpomalovány.

**Tab. 35** Doporučené výsledné rychlosti pro nové rychlostníky

	$V_n$
	[km.h <sup>-1</sup> ]
1. kolej 1. oblouk	50
1. kolej 2. oblouk	50
2. kolej 1. oblouk	50
2. kolej 2. oblouk	60

## 5 ZÁVĚR

V současnosti existuje celá řada opatření pro potlačení rozvoje skluzových vln, a to od prostředků, kdy se snažíme rozvoji vady předcházet, nebo alespoň rozvoj zpomalit, až po metody odstraňování již rozvinutých vad. Je tak možné použít např. zpružněný železniční svršek nebo vady odstranit broušením kolejnic. Správce infrastruktury tak stojí před rozhodnutím, kterou metodu či řešení použít. V případě, že by měl vhodný nástroj k predikci rozvoje vady, mohl by na základě předchozích sledování lépe rozhodnout a vybrat vhodné opatření s minimalizací výlukové činnosti a finanční nákladnosti.

Tato disertační práce se věnuje tématu skluzových vln se zaměřením na sledování vzniku a rozvoje vln v čase. Ověření možnosti sledování rozvoje skluzových vln v čase je základem pro případné budoucí modely predikující rozvoj vad.

Na jednotlivých úsecích, resp. měřících místech bylo sledováno množství parametrů. V každém oblouku je jiná kombinace faktorů ovlivňující rychlost rozvoje skluzových vln a v jednotlivých obloucích může být dominantním faktorem jiný parametr tratí.

Základním výsledkem této práce je konstatování, že na základě měření a pozorování má výrazný vliv na rozvoj vad, vyjma směrových poměrů, nepochybně rychlost projíždějících souprav. A to především v kombinaci s nevhodně navrženými geometrickými parametry koleje, konkrétně s převýšením koleje. Výsledkem jsou pak vysoké hodnoty nedostatků, resp. přebytků převýšení.

Na základě měření a sledování lze prohlásit, že čím větší rozdíl skutečného převýšení od teoretického převýšení, tím rychlejší, případně výraznější je rozvoj vady. Důvodem přitom nemusí být pouze nevhodný návrh převýšení, ale jak ukazuje příklad z Havlíčkova Brodu, tak i případné nedodržování či přizpůsobování si provozních předpisů.

Řešeními přitom mohou být úprava geometrických parametrů koleje, obzvláště převýšení, a rychlostních limitů daného úseku. Tyto úpravy, jak ukazuje simulace, nemusí nutně znamenat prodloužení cestovních dob.

Uskutečněná měření také ukázala, že sledování samotných skluzových vln prostřednictvím parametru peak-to-peak se jeví jako nejvhodnější způsob. Vyhodnocení ukázala, že toto sledování nemůže být prováděno odtrženě od sledování dalších faktorů a parametrů, neboť skluzové vlny jsou důsledkem procesů a stavů odehrávajících se v propojené soustavě infrastruktura – vozidlo – doprava. Některé parametry se dynamicky mění a vyvíjejí (ojetí kolejnic, skladba vlaků), jiné jsou stálé a neměnné (poloměry oblouků). Sledování dále ukázala, že i na úsecích, jež vypadají na první pohled jako homogenní s jednotnou konstrukcí a parametry, se vyskytují místa či části s rozdílnými vlastnostmi. Tyto vlastnosti mohou být nejen konstrukční (typ svršku), ale i historické (předchozí zásahy nejen do koleje samotné, ale do celé soustavy infrastruktura – vozidlo – kolej). Důležitý je proto vhodný výběr parametrů, které je potřebné sledovat.

Vzhledem ke skutečnosti, že tratě jsou pravidelně diagnostikovány pomocí měřícího vozu pro železniční svršek, je k dispozici velké množství dat. V případě hlavních koridorových tratí jsou data k dispozici třikrát ročně v pravidelných intervalech, a tudíž se vyloženě nabízí jejich možné zpracování jak pro zpětnou analýzu historie rozvoje

skluzových vln, tak především pro predikci rozvoje vad. V dnešní době výkonných hardwarů za využití neuronových sítí je zpracování dat o to jednodušší. Doplněním těchto dat o další informace o úsecích, provozu apod. bude možné vytvořit modely pro predikci rozvoje vad. S rostoucím objemem dat bude dále možné porovnávat podobné úseky mezi sebou a tím opět zpřesňovat prediktivní modely.

Bude-li mít projektant stejně jako správce trati graf s vykreslenou rychlostí rozvoje pro oblouk se známými konstrukčními parametry a přijatelnou rychlostí rozvoje vad (ovlivněno cenou svršku podle jeho skladby, cenou broušení/výměnou kolejnic dle frekvence provádění (dříve či později k těmto zásahům bude muset dojít kvůli jinému vlivu), cenou výluk a náhradní dopravy apod.), může u nového či sledovaného oblouku se stejnými konstrukčními parametry a předpokládaným provozem alespoň odhadnout, zda se daný posuzovaný oblouk bude zhoršovat rychleji či pomaleji. Čím více konstrukčně shodných oblouků (a tedy i křivek) bude k dispozici, tím přesnější odhad bude. Budou-li u referenčního oblouku známy termíny preventivních či opravných prací, bude u zájmového oblouku snazší tyto termíny predikovat. Strmější křivka na méně vytížené trati nemusí být nutně komplikací, neboť nižší náklady na svršek budou vykoupeny častějšími pracemi, které při menším provozu je možno provádět. Naopak na velmi vytížených tratích tak bude moci být volen vhodnější dražší svršek (grafy z dalších oblouků s podpražcovými podložkami) s menším počtem opravných činností. Rozhodnutí pak záleží na LCC.

Výsledkem bude kvalitnější, bezpečná, spolehlivější a k okolí trati přívětivější železniční dopravní cesta.

Motto: *„Když již dnes četná data automaticky sbíráme, bylo by škoda je dále nevyužívat.“*

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] TÁBORSKÝ, Martin. Údržba kolejnic v podmínkách SŽDC. In *Věda a výzkum pro práce na železniční dopravní cestě: sborník přednášek vydaný u příležitosti semináře konaného ve dnech 9. a 10. března 2016 v Děčíně*. Děčín: VOŠ a SPŠ Děčín, 2016, s. 56-61. ISBN 978-80-905733-3-8
- [2] ESVELD, Coenraad. *Modern railway track*. 2nd ed. Zaltbommel: MRT-Productions, 2001. ISBN 90-800-3243-3
- [3] FUNKE, Heinz. *Broušení kolejnic*. Praha: Elka Press, 1992. 122 s.
- [4] SŽDC S67. *Vady a lomy kolejnic*. Účinnost od 1. 1. 2017. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2016
- [5] IRS 70712. *Rail defects*. 1th edition, Paris: UIC, 2018. 115 s. ISBN 978-2-7461-2699-2 (English version)
- [6] OYARZABAL, Olatz, Josu GÓMEZ, Javier SANTAMARÍA a Ernesto García VADILLO. Dynamic optimization of track components to minimize railcorrugation. In *Journal of Sound and Vibration*. [online] 2009, 319(3-5), 904-9017. ISSN 0022-460X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.06.020>
- [7] CORREA, Nekane, Olatz OYARZABAL, Ernesto García VADILLO, Javier SANTAMARIA a Josu GÓMEZ. Rail corrugation development in high speed lines. *Wear*. [online] 2011, 271 (9-10), s. 2438-2447. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.028>
- [8] TORSTENSSON, Peter T. *Rail Corrugation Growth on Curves*. Göteborg, 2012. 50 s. Teze disertační práce. Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics. ISBN 978-91-7385-758-1
- [9] UIC 712. *Rail defects*. 4th edition, Paris: UIC, 2002. 111 s. ISBN 2-7461-0341-9 (English version)
- [10] ČSN EN 13231-3. *Železniční aplikace - Kolej - Přejímka praci - Část 3: Přejímka reprofilace kolejnic v koleji*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 736374. 2012
- [11] OOSTERMEIJER, Kimmo H. Short pitch rail corrugation – cause and contributing factors. In *7th World Congress on Railway Research (WCRR)*. Montréal: Railway Research, 2006
- [12] BERTHEL, Holger a Ulf Gerber. Schienenfehler und Schienenschleifen. In: *Železniční dopravní cesta*, Děčín: VOŠ a SPŠ Děčín, 2009
- [13] ČSN EN 13231-5. *Železniční aplikace - Kolej - Přejímka praci - Část 5: Postupy reprofilace kolejnic v běžné koleji, výhybkách a výhybkových konstrukcích včetně dilatačních zařízení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 736374. 2019.
- [14] UIC. *Schäden und Brüche von Schienen, Merkblatt für den Bahnunterhaltungsdienst*. Internationaler Eisenbahnverband UIC-Forschungs- und Versuchsamt ORE, 1959

- [15] REMINGTON, Paul J. Wheel/rail noise— Part I: Characterization of the wheel/rail dynamic system. In *Journal of Sound and Vibration*. [online] 1976, 46 (3), 359-379. ISSN 0022-460X. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(76\)90861-0](https://doi.org/10.1016/0022-460X(76)90861-0)
- [16] GÓMEZ, Josu a Ernesto GARCÍA VADILLO. A linear model to explain short pitch corrugation on rails. In *Wear*. [online] 2003, 255 (7-12), s. 1127-1142. ISSN 0043-1648. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00282-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00282-5)
- [17] KAEWUNRUEN, Sakdirat. Monitoring of Rail Corrugation Growth on Sharp Curves For Track Maintenance Prioritisation. In *International Journal of Acoustics and Vibrations*. [online] 2008, 23. ISSN 1027-5851. Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.20855/ijav.2018.23.11078>
- [18] CHOI, Ha-Young, Dong-Hyong LEE a Jongsoo LEE. Optimization of a rail way wheel profile to minimize flange wear and surface fatigue. In *Wear*. [online] 2013, 300 (1-2), s. 225-233. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.02.009>
- [19] AFFERRANTE Luciano a Michele CIAVARELLA. Corrugation models and the “roaring rails” enigma: a simple analytical contact mechanics model based on aperturbation of Carter’s solution. In *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. [online] 2009, 4 (2), s 191-209. Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.2140/jomms.2009.4.191>
- [20] NEUBERGOVÁ, Kristýna. Problematika hluku ze železniční dopravy. In *Časopis Stavebnictví*. 2011, 19 (10), 33-36. ISSN 1802-2030.
- [21] NEUBERGOVÁ, Kristýna a Dagmar KOČÁRKOVÁ. Snížení hluku z železniční dopravy jako jedna z cest k udržitelné dopravě. In *Vědeckotechnický sborník Českých drah*. [online] 32. Praha: Generální ředitelství Českých drah, 2011, s. 13. ISSN 1214-9047. Dostupné z: [https://vts.cd.cz/documents/168518/195369/32\\_komplet.pdf](https://vts.cd.cz/documents/168518/195369/32_komplet.pdf)
- [22] Nařízení vlády č. 148/2006 Sb. *o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*
- [23] ČSN 73 0532 Akustika - Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních konstrukcí a výrobků – Požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 730532. 2020
- [24] ZELENKA Jaromír a Martin KOHOUT. Vztah kolo-kolejnice v podmínkách tramvajového provozu. In *46. zasedání odborné skupiny Tramvajové tratě Sdružení Dopravních podniků České republiky*. Plzeň. 2012
- [25] PLÁŠEK Otto. *Železniční konstrukce I - Interakce vozidla a kolejové jízdní dráhy* (skripta). Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007
- [26] HOLIČ, Jakub. *Problematika vztahu dvojkolí-kolej v podmínkách Dopravního podniku Hl. m. Prahy, Metro*. Pardubice, 2008. 40 s., Bakalářská práce.
-



- Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravních prostředků. Vedoucí práce Ing. Martin Březina
- [27] CHUDĚJOVÁ, Ludmila. *Opotřebení kolejnic v úsecích se směrovými oblouky malého poloměru*. Brno, 2020. 102 s., 24 s. příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
- [28] GERLICI, Juraj a Tomáš LACK. *Kontakt železničního dvojkolesia a koľaje*. Žilina: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2004. ISBN 80-8070-317-5
- [29] LEWIS, R. a Ulf OLOFSSON. Basic tribology of the wheel–rail contact. In *Wheel-rail interface handbook*. [online] 1. Cambridge: Woodhead, 2009, s. 34-57. ISBN 978-1-84569-412-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9781845696788.1.34>
- [30] NOHEL, Rostislav. *Klasifikace a hodnocení opotřebení kolejnic*. Brno. 2015. 45 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Radovan Galas
- [31] SUN, Yanquan a Scott A. SIMSON. Wagon–track modelling and parametric study on rail corrugation initiation due to wheel stick-slip process on curved track. In *Wear*. [online] 2008, 265 (9-10), s. 1193-1201. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.02.043>
- [32] KOHOUT, Martin. *Výzkum kontaktní geometrie dvojkolí-kolej při průjezdu vozidel oblouky malých poloměr*. Pardubice, 2009. 72 s. Disertační práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce doc. Ing. Jaromír Zelenka, CSc.
- [33] GRASSIE, Stuart a J. KALOUSEK. Rail Corrugation: Characteristics, Causes and Treatments. In *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part F-journal of Rail and Rapid Transit*. [online] 1993, 207 (16), s. 57-68. Dostupné z: [https://dx.doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1993\\_207\\_227\\_02](https://dx.doi.org/10.1243/PIME_PROC_1993_207_227_02)
- [34] SATOH, Yukio a Kengo IWAFUCHI. Crystal orientation analysis of running surface of rail damaged by rolling contact. In *Wear*. [online] 2005, 258 (7-8), s. 1126-1134. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.048>
- [35] SŽDC S3, díl VII. *Železniční svršek – Sestavy železničního svršku a jejich použití*. Ve znění změny č. 4, účinnost od 1. března 2021. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2008
- [36] VALEHRACH, Jan. Skluzové vlny a jejich měření. In: *Juniorstav 2016*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016, 8 s. ISBN 978-80-214-5311-1
- [37] TÁBORSKÝ, Martin. Opatření snižující ojždění kolejnic. In: *16. konference „Železniční dopravní cesta 2010“ Pardubice, 23.- 25.3.2010: Sborník přednášek*. [online] Praha: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2010, s. 5. ISBN 978-80-254-6802-2. Dostupné z: <https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/50159407/sbornik-zdc-2010.pdf>

- [38] SMUTNÝ, Jaroslav, Vladimír TOMANDL, Ivan VUKUŠIČ a Luboš PAZDERA. Vybrané metody modální analýzy uplatňované na železniční infrastrukturu. In. *Vědeckotechnický sborník Českých drah*. [online] 35. Praha: Generální ředitelství Českých drah, 2013, s. 19. ISSN 1214-9047. Dostupné z: [https://vts.cd.cz/documents/168518/195438/35\\_komplet.pdf](https://vts.cd.cz/documents/168518/195438/35_komplet.pdf)
- [39] ČSN 73 6360-1. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha - Část 1: Projektování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 736374. 2020
- [40] LIESKOVSKÝ, Aleš, Ivo MYSLIVEC a Pavel ŠPAČEK. ETCS a AVV - spolupráce, nikoliv konkurence. In. *Vědeckotechnický sborník Českých drah*. [online] 21. Praha: Generální ředitelství Českých drah, 6 s. 2006. ISSN 1214-9047. Dostupné z: [https://vts.cd.cz/documents/168518/195375/22\\_komplet.pdf](https://vts.cd.cz/documents/168518/195375/22_komplet.pdf)
- [41] Vyhláška č. 177/1995 Sb. kterou se vydává stavební a technický řád drah.
- [42] SŽDC S2/3. *Organizace a provádění prohlídek a měření na dráze celostátní a dráhách regionálních*. Účinnost od 1. dubna 2020. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2020
- [42] BÉLI, János. Diagnostika železničního svršku u MAV. In: *18. konference „Železniční dopravní cesta 2014“ České Budějovice, 8. - 10.4.2014: Sborník přednášek*. [online] Praha: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2014, 10 s. ISBN 978-80-905200-6-6. Dostupné z: <https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/50157106/zdc2014-sbornik.pdf>
- [43] Gekon – Komerční Železniční Výzkum. *Komerční Železniční Výzkum – Další nový web v rámci sítě Komerční Železniční Výzkum Sítě* [online]. Copyright © KŽV, spol. s r.o. 2019 [cit. 30.04.2021]. Dostupné z: <https://kzv.cz/gekon/>
- [44] KŽV. *Technical documentation, Laser roughness and rail corrugation measurement trolley, Salamander*. Praha: KŽV. 2020
- [45] Diagnostické prostředky provozované CTD – CTD. CTD – Centrum telematiky a diagnostiky [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://www.tudc.cz/index.php/diagnosticke-prostredky/>
- [46] TECNOGAMMA. *Operation and Maintenance Manual: Rail Corrugation Measurement System (RCMS)*. Morgano: Tecnohamma. 2012
- [47] SŽDC S2/4. *Předpis pro zajišťování diagnostiky železničního svršku měřicími prostředky s kontinuálním záznamem*. Účinnost od 1. ledna 2020. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2020
- [48] MARSCHRING, Stefan a Peter VEIT. *Baustellenlogistik Sperrpausenoptimierung*. Graz : Eigenverlag, 2008
- [49] VALEHRACH, Jan a Petr GUZIUR. Stanovení nákladů na výluku. In *Juniorstav 2017*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2017. 7 s. ISBN: 978-80-214-5473-6
-

- 
- [50] KOVAŘÍK Radovan a Martin TÁBORSKÝ. *Rail maintenance system of SŽDC / Údržba kolejnic u SŽDC*. Sopron, 2019 (aktualizováno)
- [51] TÁBORSKÝ, Martin. Systém pravidelného broušení kolejnic. In: *19. konference „Železniční dopravní cesta 2016“ Olomouc, 18.- 20.4.2016: Sborník přednášek*. [online] Praha: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2016, s. 5. ISBN 978-80-905200-8-0. Dostupné z: <https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/50157007/zdc2016-sbornik.pdf>
- [52] HARTLEBEN, Dieter. Opracování hlav kolejnic - stroje pro opracování kolejnic v kolejích a výhybkách. In: *20. konference „Železniční dopravní cesta 2018“ Ústí nad Labem, 10. - 12. 4. 2018: Sborník přednášek*. Praha: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2018, s. 7. ISBN 978-80-907189-0-6
- [53] PLÁŠEK Otto, Pavel ZVĚŘINA, Richard SVOBODA a Milan MOCKOVČIAK. *Železniční stavby. Železniční spodek a svršek*. Brno: 2004, Akademické nakladatelství CERM, 291 s. ISBN 80-214-2621-7
- [54] BREMSTELLER, Johannes. Vysokorychlostní broušení: údržba kolejnic 2.0. In: *18. konference „Železniční dopravní cesta 2014“ České Budějovice, 8. - 10.4.2014: Sborník přednášek*. [online] Praha: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2014, 10 s. ISBN 978-80-905200-6-6. Dostupné z: <https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/50157106/zdc2014-sbornik.pdf>
- [55] PLÁŠEK Otto. *Železniční konstrukce I - Mechanika kolejové jízdní dráhy* (skripta). Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007
- [56] TÁBORSKÝ, Martin. Reprofilace kolejnic. In: *Technologie prací na železničním svršku*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2020. s. 341-359. ISBN: 978-80-88265-17-7
- [57] VALEHRACH, Jan a Jaroslav ŠMÍD. Monitoring of Track Sections with Long- pitch Corrugation. In *Interoperability of Railway Transport - IRICoN 2016*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. s. 33-34. ISBN: 978-80-01-05939-5.
- [58] ZELENKA, Jaromír a Martin KOHOUT. Možnosti ovlivnění jízdních a vodících vlastností kolejových vozidel parametry dopravní cesty. In: *16. konference „Železniční dopravní cesta 2010“ Pardubice, 23.- 25.3.2010: Sborník přednášek*. [online] Praha: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2010, s. 5. ISBN 978-80-254-6802-2. Dostupné z: <https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/50159407/sbornik-zdc-2010.pdf>
- [59] JAROŠOVÁ, Lenka. Snížení hluku a opotřebení adhezních ploch v kolejové dopravě s využitím nové technologie WONROS. *Časopis SILNICE ŽELEZNICE - Rozvoj dopravní infrastruktury v České republice, na Slovensku i ve světě, moderní trendy, stavební postupy, používané materiály a*
-

- technologie*. [online]. 2002 [cit. 20. 05. 2021]. Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/snizeni-hluku-a-opotrebeni-adheznich-ploch-v-kolejove-doprave-s-vyuzitim-nove-technologie-wonros>
- [60] OOSTERMEIJER, Kimmo H. Review on short pitch rail corrugation studies. In *Wear*. [online] 2008, 265 (9-10), s. 1231-1237. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.037>
- [61] Kolejnicový mazník z První signální snižuje tření v obloucích. In: *ACRI News* [online]. Praha, ACRI, 2012 [cit. 2014-02-21]. Dostupné z: <http://www.acri.cz/news/625/41/Kolejnicovy-maznik-z-Prvni-signalni-snizuje-treni-v-obloucich>
- [62] HRUZÍKOVÁ, Miroslava a Otto PLÁŠEK. Vyhodnocení zkušebních úseků s podpražcovými podložkami v ČR. In *Železniční dopravní cesta 2011*. Děčín: VOŠ a SPŠ stavební, Děčín, 2011, s. 101-112. ISBN: 978-80-254-8811-9
- [63] PLÁŠEK, Otto a Miroslava Hruzíková. Přínos podpražcových podložek ke zvyšování kvality geometrických parametrů koleje. In *Pozemne komunikacie a drahy, Environmentalna kapacita pozemnych komunikacii a drah (Herlany)*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 10 s. 2006. ISBN 9788080736026
- [64] AFFERRANTE, Luciano a Michele Ciavarella. Short-pitch rail corrugation: A possible resonance-free regime as a step forward to explain the “enigma”? In *Wear*. [online] 2009, 266 (9-10), s. 934-944. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.003>
- [65] SŽDC S3, díl IV. *Železniční svršek – Kolejnice*. Ve znění změny č. 3, účinnost od 1. března 2019. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2008
- [66] ČSN EN 13674-1+A1. *Železniční aplikace - Kolej - Kolejnice - Část 1: Vignolovy železniční kolejnice o hmotnosti 46 kg/m a větší*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 736361. 2018
- [67] UIC 860. *Technical specification for the supply of rails*. 9th edition, Paris: UIC, 2008. 28 s. ISBN 2-7461-1363-5 (English version)
- [68] BUTSCHEK, Alan a kol. *100 let elektrické pouliční dráhy v Brně 1900–2000*. Ústí nad Labem: Vojtěch Wolf – Vydavatelství WOLF, 2000, 85 s.
- [69] VALEHRACH, Jan, Otto PLÁŠEK a Jaroslav SMUTNÝ. *Měření skluzových vln na železničních a tramvajových tratích*. Certifikovaná metodika, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2018
- [70] SCHOLLE, Stanislav, Možnosti měřících vozů TUDC železničního svršku pro detekci kolejnicových vad. Příspěvek na workshopu *Výhybky a výhybkové konstrukce. Kolejnicové vady*. Brno. 2015
- [71] ŠMÍD Jaroslav. Přebytek převýšení – sledování traťových úseků. In *Juniorstav 2016*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016, 6 s. ISBN 978-80-214-5311-1
- [72] MEAS PROG. *Manuál Salamander II*. Praha: Meas Prog. 2014
-

- 
- [73] KŽV. *Technická dokumentace - Měřicí vozík Krab-slight*. Praha: KŽV. 2014.
- [74] ČSN EN 13848-2. *Železniční aplikace - Kolej - Kvalita geometrie koleje - Část 2: Měřicí systémy - Měřicí vozy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 736359. 2006
- [75] ČSN EN 13848-4. *Železniční aplikace - Kolej - Kvalita geometrie koleje - Část 4: Měřicí systémy - Lehké kolejové prostředky a ruční zařízení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 736359. 2012
- [76] ČSN EN 13848-3. *Železniční aplikace - Kolej - Kvalita geometrie koleje - Část 3: Měřicí systémy - Stroje pro stavbu a údržbu koleje*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 736359. 2009
- [77] DAS ELEKTRO. *Manuál DRS*. Kostelec: Das elektro. 2016
- [78] Buy Velocity Speed Gun and More | Bushnell. *Performance Binoculars, Riflescopes, Rangefinders & Night Vision Equipment* [online]. Copyright © 2021 Bushnell. All Rights Reserved. [cit. 18. 05. 2021]. Dostupné z: <https://www.bushnell.com/additional-products/speed-guns/velocity-speed-gun/BU-101911.html>
- [79] ČSN EN 13231-3. *Železniční aplikace - Kolej - Přejímka prací - Část 3: Přejímka reprofily kolejnič v koleji*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 736374. 2006
- [80] JUNG, Jiří. *Vztah geometrických parametrů koleje a rozvoje skluzových vln*. Brno, 2020. 77 s., 7 s. příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce Ing. Tomáš Říha
- [81] VALEHRACH Jan, Petr GUZIUR, Tomáš ŘÍHA a Otto PLÁŠEK. Assessment of rail long-pitch corrugation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online], 2017, roč. 236, č. 1, 8 s. ISSN: 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/236/1/012048
- [82] VALEHRACH, Jan. Návrh převýšení koleje v obloucích malých poloměrů s ohledem na rozvoj skluzových vln. In *Sborník studentské vědecké konference Železniční výzkumné aktivity*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2019. s. 132-140. ISBN: 978-80-01-06622-5
- [83] VALEHRACH, Jan, Tomáš ŘÍHA a Erik DUŠEK. Cant Excess and Cant Deficiency Evaluation in Relation to Train Speeds. In *Modernization of the Railways - IRICoN 2017*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2017. s. 39-40. ISBN: 978-80-01-06140-4
- [84] VALEHRACH, Jan. Návrh převýšení koleje v obloucích malých poloměrů s ohledem na rozvoj skluzových vln. In *Sborník studentské vědecké konference Železniční výzkumné aktivity*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2019. s. 132-140. ISBN: 978-80-01-06622-5.
-

- [85] VALEHRACH, Jan. Návrh převýšení koleje v obloucích malých poloměrů s ohledem na rozvoj skluzových vln - pokračování. In *Sborník studentské vědecké konference Železniční výzkumné aktivity*. Praha: České vysoké učení technické, 2020. s. 102-109. ISBN: 978-80-01-06765-9.
- [86] ČERNÝ, Karel, Roman JESCHKE, Martin NAVRÁTIL, Jiří NOVÁK, Marek ŘÍHA, Pavel STEJSKAL a Milan SÝKORA. *Železniční trať Brno - Česká Třebová na starých pohlednicích*. Polnička: Tváře, 2019. ISBN 9788090729476

Pro práci byly použity mapové podklady:

- [mapy.cz](http://mapy.cz);
- [ags.cuzk.cz/geoprohlizec/](http://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/).

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 1</b>	Skluzové vlny v Babicích nad Svitavou.....	6
<b>Obr. 2</b>	Vlnky na tramvajové trati.....	11
<b>Obr. 3</b>	Skluzové vlny na trati č. 326 Brno – Česká Třebová.....	12
<b>Obr. 4</b>	Dlouhé vlny .....	13
<b>Obr. 5</b>	Vlevo obroušené kamenivo, vpravo chybějící upevnění a ulomená svěrka, foto doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.....	14
<b>Obr. 6</b>	Hlavní technické parametry nákladních vozů .....	15
<b>Obr. 7</b>	Dvojkolí.....	16
<b>Obr. 8</b>	Jízdní obrys UIC-ORE S1002 .....	16
<b>Obr. 9</b>	Sinusový pohyb dvojkolí v přímé koleji .....	17
<b>Obr. 10</b>	„Cik-cak“ pohyb dvojkolí v koleji .....	17
<b>Obr. 11</b>	Ideální postavení vozidla nebo podvozku v oblouku .....	18
<b>Obr. 12</b>	Vyšetření polohy podvozku v koleji Vogelovou metodou .....	18
<b>Obr. 13</b>	Geometrie pohybu dvojkolí podle .....	19
<b>Obr. 14</b>	Rozdíl okamžitých poloměrů valení kol při příčném posunutí dvojkolí. 20	
<b>Obr. 15</b>	Funkce $\Delta r$ .....	20
<b>Obr. 16</b>	Velikost kritického poloměru v závislosti na šířce volného pásu mezi kolejnicí a okolkem .....	21
<b>Obr. 17</b>	Síly působící mezi dvojkolím a kolejí.....	22
<b>Obr. 18</b>	Vztah mezi trakční silou a skluzem .....	23
<b>Obr. 19</b>	Shakedown mapa .....	23
<b>Obr. 20</b>	Trakční křivka .....	24
<b>Obr. 21</b>	Stick-slip cyklus .....	24
<b>Obr. 22</b>	Příčný skluz .....	25
<b>Obr. 23</b>	Mechanismus fixace vady .....	25
<b>Obr. 24</b>	Kolejnice tv. UIC 60 (S 49) na betonových pražcích B 91S/1 (B 91S/2, B 03) s pružnými svěrkami Sk114 pro oblouky s malými poloměry - upevnění W 14NT .....	26
<b>Obr. 25</b>	Výstup ze zařízení Salamander II (krátké úseky se změněnou svislou tuhostí jízdní dráhy). Nepravidelnosti ve staničeních cca 24 m a 69 m byla dána umístěním lepených izolovaných styků.....	27
<b>Obr. 26</b>	Frekvenční charakteristika laboratorních vzorků upevnění .....	28
<b>Obr. 27</b>	Měřicí sonda na zjištění vlnkovitosti povrchu kolejnice, která je současně zabudovaná do defektoskopické sondy .....	31
<b>Obr. 28</b>	Měřicí zařízení Gekon .....	31
<b>Obr. 29</b>	Princip tětív u zařízení Salamander.....	32
<b>Obr. 30</b>	Měřicí vůz pro železniční svršek.....	33
<b>Obr. 31</b>	Příklad nejčastějšího způsobu měření na měřícím vozidle – přímou bezkontaktní metodou: Systém používá pro měření na kolejnicovém pásu čtyři lasery a kamery vytvářející čtyři optické asymetrické tětivy. ....	33

<b>Obr. 32</b>	Princip výpočtu vzepětí nad tětivou .....	34
<b>Obr. 33</b>	Výběr hodnot pro výpočet procenta překročení špička-špička.....	34
<b>Obr. 34</b>	Mikrogeometrie pásma 100–300 mm vnitřní kolejnice koleje v oblouku...	35
<b>Obr. 35</b>	Závislost nákladů na výluku dle ÖBB .....	36
<b>Obr. 36</b>	Denní výluka na regionální trati (součtový graf).....	36
<b>Obr. 37</b>	Denní výluka na regionální trati (hodinový graf).....	37
<b>Obr. 38</b>	Objem broušení na koridorových tratích .....	37
<b>Obr. 39</b>	Princip brousící technologie pomocí rotačních brusných kamenů.....	38
<b>Obr. 40</b>	Vysokorychlostní brousící vlak HSG-2.....	39
<b>Obr. 41</b>	Princip preventivního broušení, uvedené hodnoty projeté zátěže jsou orientační .....	39
<b>Obr. 42</b>	Detail frézovacího kola.....	40
<b>Obr. 43</b>	Výstupní graf z měřícího zařízení Salamander ukazuje kolej, v jejíž části byly kolejnice vyměněny (vlevo) a část, kde byly kolejnice ponechány (vpravo) .....	41
<b>Obr. 44</b>	Princip zlepšení kontaktních poměrů dvojkolí-kolej speciálním tvarem příčných profilů hlav kolejnic v oblouku koleje, tzv. asymetrické broušení .....	42
<b>Obr. 45</b>	Snížení hluku v traťových obloucích s použitím systému CL-E1 .....	43
<b>Obr. 46</b>	Návaznost úseků na trati č. 326 Brno – Česká Třebová.....	47
<b>Obr. 47</b>	Měřící místa na úseku Hády .....	50
<b>Obr. 48</b>	Měřící místa na úseku Havlíčkův Brod .....	51
<b>Obr. 49</b>	Měřící místo na úseku Velký Osek.....	51
<b>Obr. 50</b>	Měřící místo na úseku Vyškov .....	52
<b>Obr. 51</b>	Zvýrazněné skluzové vlny nečistotami v Havlíčkově Brodě .....	53
<b>Obr. 52</b>	Zařízení Salamander II, foto Ing. Petr Guziur .....	54
<b>Obr. 53</b>	Umístění měřícího profilu (červeně) na pojížděné ploše hlavy kolejnice s ukázkou zaměření k nepojížděné hraně hlavy kolejnice.....	55
<b>Obr. 54</b>	Vlnové pásmo 30–100 mm.....	56
<b>Obr. 55</b>	Vlnové pásmo 100–300 mm.....	56
<b>Obr. 56</b>	Příklad měřičského protokolu.....	56
<b>Obr. 57</b>	Zobrazení krátké tětiny (nahore) a dlouhé tětiny (dole).....	57
<b>Obr. 58</b>	Výstupní grafy ze zařízení Salamander II pro všechna čtyři měřená vlnová pásma s vyhodnocením plovoucích hodnot a překročení RMS (modře) a P2P (červeně), zeleně filtrovaný profil.....	57
<b>Obr. 59</b>	Zařízení Krab S-light, foto Ing. Erik Dušek .....	60
<b>Obr. 60</b>	Vlevo zařízení DRS (Mrkev) a optické záznamové zařízení na stožáru trakčního vedení, vpravo ve stativu.....	62
<b>Obr. 61</b>	Výstup z programu na výpočet RMS a P2P pro úsek Vyškov pro měřící místo z Obr. 43 (VY1.1).....	63



<b>Obr. 62</b>	RMS a P2P pro úsek Vyškov pro měřící místo z Obr. 43 a Obr. 61 (VY1.1), nahoře pro staničení 0 až 8 m a dole 10 až 17 m.....	64
<b>Obr. 63</b>	Délka zobrazení hodnot RMS a P2P $L_{e,p}$ .....	65
<b>Obr. 64</b>	Záznam z měření vlnovité deformace s vyznačením ekvidistantních vzorků $y_i$ výpočetního okénka o stanovené délce $L$ .....	65
<b>Obr. 65</b>	Záznam z měření vlnovité deformace s vyznačením rozdílů po sobě jdoucích vrcholů amplitud $a_i$ měřené „mikro-výšek“ výpočetního okénka o stanovené délce $L$ .....	66
<b>Obr. 66</b>	Vztah geometrických parametrů koleje a rozvoje skluzových vln dle [80]	70
<b>Obr. 67</b>	Korelační analýza pro celý mezistaniční úsek (km 161,687-170,866) ...	71
<b>Obr. 68</b>	Korelační analýza pro dlouhé měřící místo (km 168,370-170,866) .....	72
<b>Obr. 69</b>	Korelační analýza pro krátké měřící místo (km 169,600-170,300) .....	72
<b>Obr. 70</b>	Korelační analýza pro část oblouku (km 169,850-170,000) .....	73
<b>Obr. 71</b>	Časový vývoj RMS pro úsek Havlíčkův Brod .....	74
<b>Obr. 72</b>	Časový vývoj P2P pro úsek Havlíčkův Brod .....	75
<b>Obr. 73</b>	Porovnání hodnot RMS a P2P pro měřící místo HA1.4 před výměnou kolejnic (-0,5) a po výměně kolejnic (0 – počátek sledování rozvoje vad)	76
<b>Obr. 74</b>	Časový harmonogram měření na úseku Hády .....	76
<b>Obr. 75</b>	Procentuální překročení hodnot RMS pro úsek Hády.....	77
<b>Obr. 76</b>	Procentuální překročení hodnot P2P pro úsek Hády.....	78
<b>Obr. 77</b>	Časový vývoj RMS pro úsek Hády .....	79
<b>Obr. 78</b>	Časový vývoj P2P pro úsek Hády .....	80
<b>Obr. 79</b>	Vlnovité deformace na úseku Hády .....	81
<b>Obr. 80</b>	Časový harmonogram měření na úsecích Bílovice a Babice .....	81
<b>Obr. 81</b>	Procentuální překročení hodnot RMS pro úseky Bílovice a Babice.....	82
<b>Obr. 82</b>	Procentuální překročení hodnot P2P pro úseky Bílovice a Babice.....	83
<b>Obr. 83</b>	Časový vývoj RMS pro úseky Bílovice a Babice .....	84
<b>Obr. 84</b>	Časový vývoj P2P pro úseky Bílovice a Babice .....	85
<b>Obr. 85</b>	Směrnice a koeficient determinace z RMS pro pásmo 30–100 mm .....	86
<b>Obr. 86</b>	Směrnice a koeficient determinace z RMS pro pásmo 100–300 mm .....	86
<b>Obr. 87</b>	Směrnice a koeficient determinace z P2P pro pásmo 30–100 mm .....	86
<b>Obr. 88</b>	Směrnice a koeficient determinace z P2P pro pásmo 100–300 mm .....	87
<b>Obr. 89</b>	Vlnové pásmo 100–300 mm v Havlíčkově Brodě (od shora: první oblouk první kolej, první oblouk druhá kolej, druhý oblouk první kolej, druhý oblouk druhá kolej). .....	88
<b>Obr. 90</b>	Schéma řešených oblouků v záhlaví žst. Havlíčkův Brod .....	88
<b>Obr. 91</b>	Převýšení koleje č. 1 a 2 v prvních obloucích, úsek Havlíčkův Brod.....	89
<b>Obr. 92</b>	Schéma měření rychlostí vlaků na úseku „Havlíčkův Brod“ .....	89
<b>Obr. 93</b>	Směrnice RMS pro pásmo 30–100 mm .....	92
<b>Obr. 94</b>	Směrnice P2P pro pásmo 30–100 mm .....	92

<b>Obr. 95</b>	Směrnice RMS pro pásmo 100–300 mm.....	93
<b>Obr. 96</b>	Směrnice P2P pro pásmo 100–300 mm.....	93
<b>Obr. 97</b>	Zaznamenané rychlosti v jednotlivých obloucích .....	95
<b>Obr. 98</b>	Porovnání nedostatků [+] a přebytků [-] převýšení ve sledovaných obloucích .....	98
<b>Obr. 99</b>	Zjednodušený model záhlaví žst. Havlíčků Brod v prostředí aplikace OpenTrack .....	99
<b>Obr. 100</b>	Výřez průběhu rychlosti při jízdě osobní soupravy hlavní kolejí č. 1 z Okrouhlic do Havlíčkova Brodu.....	99
<b>Obr. 101</b>	Výřez průběhu rychlosti při jízdě osobní soupravy hlavní kolejí č. 2 z Havlíčkova Brodu do Okrouhlic.....	99
<b>Obr. 102</b>	Výřez průběhu rychlosti při jízdě osobní soupravy předjízdou kolejí č. 1 z Okrouhlic do Havlíčkova Brodu.....	100
<b>Obr. 103</b>	Výřez průběhu rychlosti při jízdě osobní soupravy předjízdou kolejí č. 2 z Havlíčkova Brodu do Okrouhlic.....	100
<b>Obr. 104</b>	Výřez průběhu rychlosti při jízdě nákladního vlaku hlavní kolejí č. 1 z Okrouhlic do Havlíčkova Brodu.....	100
<b>Obr. 105</b>	Výřez průběhu rychlosti při jízdě nákladního vlaku hlavní kolejí č. 2 z Havlíčkova Brodu do Okrouhlic.....	100
<b>Obr. 106</b>	Počet roků nutných k dosažení rozvoje vlnových deformací odpovídajících stavu před výměnou kolejnic .....	101
<b>Obr. 107</b>	Počet roků nutných k dosažení rozvoje vlnových deformací odpovídajících stavu před broušením kolejnic v roce 2015 .....	102
<b>Obr. 108</b>	Predikce rozvoje vlnovitých deformací na základě předchozích měření měřícím vozem .....	103
<b>Obr. 109</b>	Čas potřebný k rozvoji vad dle Tab. 17 (ČSN 13231-3:2006).....	104
<b>Obr. 110</b>	Čas potřebný k rozvoji vad dle hladiny 0,1 mm z předpisu SŽDC S2/4	104

Neoznačené foto autor nebo Ing. Erik Dušek.

## SEZNAM TABULEK

<b>Tab. 1</b>	Faktory vyvolávající a brzdící vlnkovitost.....	10
<b>Tab. 2</b>	Prohlídky a měření na dráze celostátní a dráze regionální s rychlostí do 200 km.h <sup>-1</sup> včetně .....	30
<b>Tab. 3</b>	Kritéria pro přejímku pro mez špička-špička.....	34
<b>Tab. 4</b>	Kritéria pro přejímku podélného profilu, vyjádřená jako dovolené procento překročení.....	35
<b>Tab. 5</b>	Měřicí místa na úseku Adamov.....	48
<b>Tab. 6</b>	Měřicí místa na úseku Babice .....	49
<b>Tab. 7</b>	Měřicí místa na úseku Bílovice.....	49
<b>Tab. 8</b>	Měřicí místa na úseku Hády.....	49
<b>Tab. 9</b>	Měřicí místa na úseku Havlíčkův Brod.....	50
<b>Tab. 10</b>	Měřicí místo na úseku Velký Osek .....	51
<b>Tab. 11</b>	Měřicí místo na úseku Vyškov.....	52
<b>Tab. 12</b>	Legenda k Obr. 54 a Obr. 55 .....	56
<b>Tab. 13</b>	Měření a počítané hodnoty zařízením Krab .....	59
<b>Tab. 14</b>	Procento překročení hodnot RMS pro místo VY1.1 .....	64
<b>Tab. 15</b>	Hodnoty RMS pro místo VY1.1 .....	64
<b>Tab. 16</b>	Délka výpočetního okénka L (v tabulce jsou pro porovnání uvedeny délky výpočetního okénka i pro další vlnová pásma než jen pro skluzové vlny). 65	65
<b>Tab. 17</b>	Limity RMS a P2P (v tabulce jsou pro porovnání uvedeny délky výpočetního okénka i pro další vlnová pásma než jen pro skluzové vlny). 66	66
<b>Tab. 18</b>	Příklad korelační analýzy provedené na délku přechodnice a kružnicových částí (Hády 1 – Kolej 1, duben 2019) .....	70
<b>Tab. 19</b>	Korelační analýza pro celý mezistaniční úsek (km 161,687-170,866) ...	71
<b>Tab. 20</b>	Korelační analýza pro dlouhé měřicí místo (km 168,370-170,866) .....	71
<b>Tab. 21</b>	Korelační analýza pro krátké měřicí místo (km 169,600-170,300) .....	72
<b>Tab. 22</b>	Korelační analýza pro část oblouku (km 169,850-170,000 .....	73
<b>Tab. 23</b>	Průměrné rychlosti jednotlivých skupin. $V_{NP}$ je rychlost z Nákrešného přehledu (před/za rychlostníkem dle směru jízdy v dané koleji). Podíl ukazuje procentuální zastoupení jednotlivých skupin během měření. ....	90
<b>Tab. 24</b>	Parametry oblouků dle Nákrešného přehledu včetně nedostatku/přebytku převýšení. ....	90
<b>Tab. 25</b>	Parametry oblouků dle měření Krabem a nedostatky/přebytky převýšení. 90	90
<b>Tab. 26</b>	Seřazení míst dle strmostí .....	94
<b>Tab. 27</b>	Průměry rychlostí pro všechny vlaky.....	95
<b>Tab. 28</b>	Průměry rychlostí pro jednotlivé skupiny vlaků .....	96
<b>Tab. 29</b>	Vážené nedostatky a přebytky převýšení pro jednotlivé skupiny vlaků .	98

<b>Tab. 30</b>	Počet roků nutných k dosažení rozvoje vlnových deformací odpovídajících stavu před výměnou kolejnic .....	101
<b>Tab. 31</b>	Počet roků nutných k dosažení rozvoje vlnových deformací odpovídajících stavu před broušením kolejnic v roce 2015 .....	102
<b>Tab. 32</b>	Vážené nedostatky převýšení v obloucích pro všechny vlaky (nezaokrouhlo) .....	105
<b>Tab. 33</b>	Navržené teoretické převýšení ze skutečných rychlostí ( $D_{eq}$ ) a převýšení změřené měřicím vozíkem Krab ( $D_{krab}$ ) (rozložení tabulek odpovídá Tab. 23).....	105
<b>Tab. 34</b>	Porovnání stávajících parametrů ( $D_{stav}$ a $V_{stav}$ ) s hodnotami z vážených výpočtů ( $D_{váž}$ a $V_{váž}$ ).....	106
<b>Tab. 35</b>	Doporučené výsledné rychlosti pro nové rychlostníky .....	106

**PŘÍLOHY**  
disertační práce

## OBSAH

OBSAH .....	124
1 GRAFICKÁ VÝSTUPNÍ SESTAVA MIKROGEOMETRIE KOLEJNIC .....	126
2 ÚSEK ADAMOV .....	127
2.1 Měřicí místo AD1.1 .....	127
3 ÚSEK BABICE .....	128
3.1 Měřicí místo BS1.1 .....	128
3.2 Měřicí místo BS1.2 .....	130
4 ÚSEK BÍLOVICE .....	132
4.1 Měřicí místo BV1.1 .....	132
4.2 Měřicí místo BV1.2 .....	134
5 ÚSEK HÁDY .....	136
5.1 Měřicí místo HA1.1 .....	136
5.2 měřicí místo HA1.2 .....	138
5.3 měřicí místo HA1.3 .....	140
5.4 měřicí místo HA1.4 .....	142
6 HAVLÍČKŮV BROD .....	144
6.1 měřicí místo HB1.1 .....	144
6.2 měřicí místo HB1.2 .....	146
6.3 měřicí místo HB2.1 .....	148
6.4 měřicí místo HB2.2 .....	150
7 VELKÝ OSEK – ODB. KANÍN .....	152
7.1 měřicí místo VO1.1 .....	152
8 VYŠKOV .....	154
8.1 měřicí místo VY1.1 .....	154
9 TABULKY .....	156
9.1 Směrnice trendů RMS .....	156
9.2 Směrnice trendů P2P .....	157
9.3 Čas potřebný k rozvoji vad dle hodnot z ČSN 13231-3:2006.....	158
9.4 Čas potřebný k rozvoji vad dle hladiny 0,1 mm z Předpisu SŽDC S2/4 .....	159

***Poznámky:***

Informace k úsekům uvedené v této příloze odpovídají Nákresným přehledům železničního svršku v době měření.

Foto:

Ing. Erik Dušek

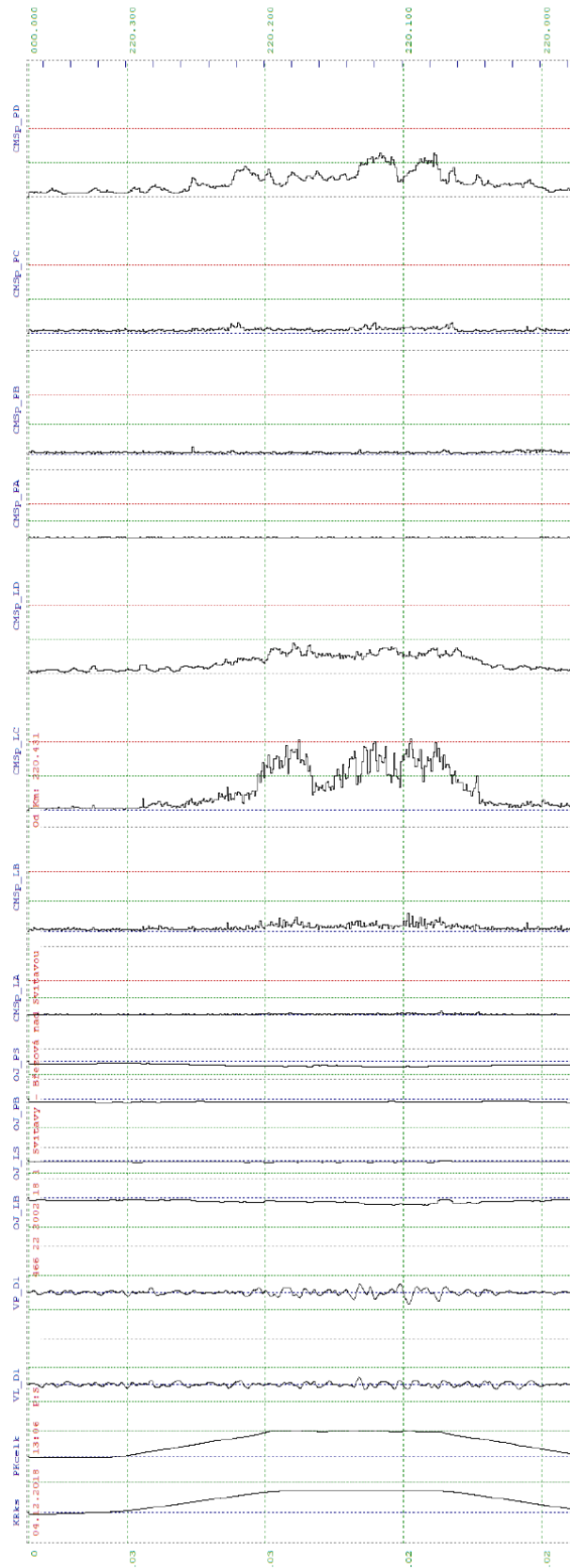
doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.

Ing. Tomáš Říha

Ing. Jaroslav Šmíd

Ing. Jan Valehrach

# 1 GRAFICKÁ VÝSTUPNÍ SESTAVA MIKROGEOMETRIE KOLEJNIC



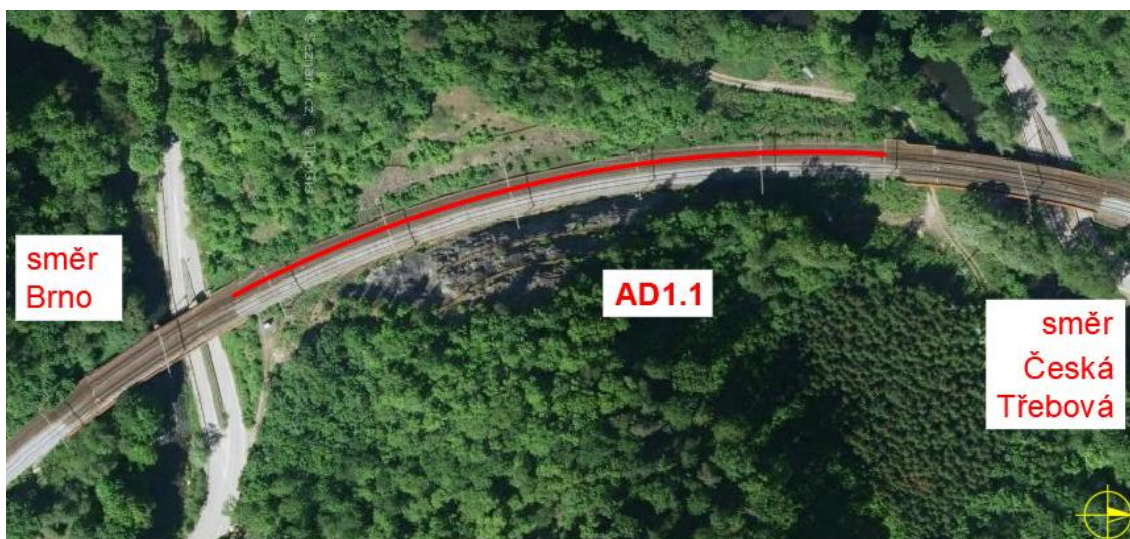
**Obr. 1** Grafická výstupní sestava mikrogeometrie kolejnic

KR – křivost oblouku; PK – převýšení koleje; VL, VP – podélná výška temen levého, pravého kolejnicového pásu, OJ\_LB, OJ\_PB – boční ojetí levého, pravého kolejnicového pásu; OJ\_LS, OJ\_PS – svislé ojetí levého, pravého



## 2 ÚSEK ADAMOV

### 2.1 MĚŘÍCÍ MÍSTO AD1.1



*Obr. 1 Ortofotomapa s vyznačením měřicího místa AD1.1*

**Lokalizace:** trať č. 326 Brno – Česká Třebová mezi Brno-Maloměřice St. 6 – žst. Adamov

**Staničení:** km 169,800–170,050

**Kolej:** 1.

**Popis:** Místo se nachází v pravostranném oblouku o poloměru 354 m v místě bývalého tunelu č. 6 mezi dvěma mosty přes řeku Svitavu. Převažující směr jízdy souprav je proti staničení.

Poloměr oblouku:	354 m
Převýšení:	146 mm
Sklonové poměry:	1,71 ‰
Rychlosti:	80/-/90 km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	60 E2, R260, 2018
Pražce:	B91S, 1996
Výměny kolejnic:	1996 (60 E1, R260), 2018 (60 E2, R260)
Broušení kolejnic:	-
Výměny pražců:	1996, průběžná výměna poškozených pražců

### 3 ÚSEK BABICE

#### 3.1 MĚŘICÍ MÍSTO BS1.1



Obr. 2 Ortofotomapa s vyznačením měřicího místa BS1.1

**Lokalizace:** trať č. 326 Brno – Česká Třebová mezi Brno-Maloměřice St. 6 – žst. Adamov

**Staničení:** km 168,715–168,7547

**Kolej:** 1.

**Popis:** Místo se nachází v levostranném oblouku o poloměru 378 m v těsné blízkosti zastávky Babice nad Svitavou. Úsek je charakteristický zastavováním některých vlaků v zastávce. Převažující směr jízdy souprav je proti staničení.

Poloměr oblouku:	378 m
Převýšení:	100 mm
Sklonové poměry:	4,60 ‰
Rychlosti:	80/-/-90 km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	60 E2, R350HT, 2016
Pražce:	B91S, 1996
Výměny kolejnic:	1996 (60 E1, R260), 2016 (60 E2, R350HT)
Broušení kolejnic:	-
Výměny pražců:	1996, průběžná výměna poškozených pražců



**Obr. 3** Pohled z měřicího místa BS1.1



**Obr. 4** Ulomená svěrka upevnění

### 3.2 MĚŘICÍ MÍSTO BS1.2



Obr. 5 Ortofotomapa s vyznačením měřicího místa BS1.2

**Lokalizace:** trať č. 326 Brno – Česká Třebová mezi Brno-Maloměřice St. 6 – žst. Adamov

**Staničení:** km 168,985–169,082

**Kolej:** 1.

**Popis:** Místo se nachází v levostranném oblouku o poloměru 375 m v místě bývalého tunelu č. 5. Převažující směr jízdy souprav je proti staničení.

Poloměr oblouku:	375 m
Převýšení:	140 mm
Sklonové poměry:	1,00 ‰
Rychlosti:	80/-/-/90 km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	60 E2, R350HT, 2016
Pražce:	B91S, 1996
Výměny kolejnic:	1996 (60 E1, R260), 2016 (60 E2, R350HT)
Broušení kolejnic:	-
Výměny pražců:	1996, průběžná výměna poškozených pražců



**Obr. 6** Skluzové vlny na místě BS1.2 dne 5. 6. 2016 před výměnou kolejnic



**Obr. 7** Skluzové vlny na místě BS1.2 dne 5. 6. 2016 před výměnou kolejnic

## 4 ÚSEK BÍLOVICE

### 4.1 MĚŘÍCÍ MÍSTO BV1.1



Obr. 8 Ortofotomapa s vyznačením měřicího místa BV1.1

**Lokalizace:** trať č. 326 Brno – Česká Třebová mezi Brno-Maloměřice St. 6 – žst. Adamov

**Staničení:** km 166,745–166,779

**Kolej:** 1.

**Popis:** Místo se nachází v pravostranném oblouku o poloměru 275 m. Převažující směr jízdy souprav je proti staničení.

Poloměr oblouku:	275 m
Převýšení:	130 mm
Sklonové poměry:	1,63 ‰
Rychlosti:	70/75/-/90 km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	60 E2, R350HT, 2016
Pražce:	B91S, 1996
Výměny kolejnic:	1996 (60 E1, R260), 2016 (60 E2, R350HT)
Broušení kolejnic:	-
Výměny pražců:	1996, průběžná výměna poškozených pražců



**Obr. 9** Vady vnitřní kolejnice



**Obr. 10** Pohled na měřící místo BV1.1 z druhé koleje

## 4.2 MĚŘÍCÍ MÍSTO BV1.2



**Obr. 11** Ortofotomapa s vyznačením měřicího místa BV1.2

**Lokalizace:** trať č. 326 Brno – Česká Třebová mezi Brno-Maloměřice St. 6 – žst. Adamov

**Staničení:** km 166,955–166,990

**Kolej:** 1.

**Popis:** Místo se nachází v pravostranném oblouku o poloměru 302 m. Převažující směr jízdy souprav je proti staničení.

Poloměr oblouku:	302 m
Převýšení:	130 mm
Sklonové poměry:	2,42 ‰
Rychlosti:	70/75/-/90 km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	60 E2, R350HT, 2016
Pražce:	B91S, 1996
Výměny kolejnic:	1996 (60 E1, R260), 2016 (60 E2, R350HT)
Broušení kolejnic:	-
Výměny pražců:	1996, průběžná výměna poškozených pražců





**Obr. 12** Střídání nových a starých pražců



**Obr. 13** Vady vnitřní kolejnice

## 5 ÚSEK HÁDY

### 5.1 MĚŘICÍ MÍSTO HA1.1



Obr. 14 Ortofotomapa s vyznačením měřicího místa HA1.1

**Lokalizace:** trať č. 326 Brno – Česká Třebová mezi Brno-Maloměřice St. 6 – žst. Adamov

**Staničení:** km 161,733–161,913

**Kolej:** 1.

**Popis:** Místo se nachází v levostranném oblouku o poloměru 283 m v koleji č. 1 mezi mostem přes řeku Svitavu a tunelem č. 1. Převažující směr jízdy souprav je proti staničení.

Poloměr oblouku:	283 m
Převýšení:	123 mm
Sklonové poměry:	9,24 ‰
Rychlosti:	70/75/-/80 km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	60 E2, R350HT, 2015
Pražce:	B91S, 2015; v části B91T
Výměny kolejnic:	1996 (60 E1, R260), 2007 (60 E1, R260), 2015 (60 E2 R350HT)
Broušení kolejnic:	2005, 2018
Výměny pražců:	1996, 2015, souvislá výměna včetně upevnění

Doplňující informace:

V roce 2005 byla na úseku provedena reprofilace kolejnic z profilu 60 E1 na 60 E2.

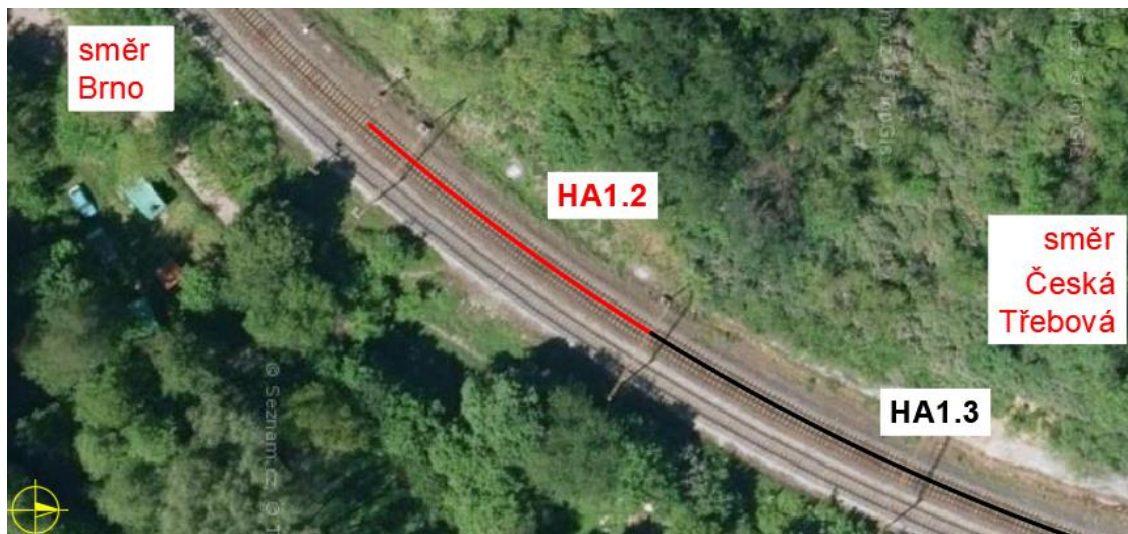


**Obr. 15** Pohled směrem k měřicímu místu HA1.1



**Obr. 16** Skluzové vlny zvýrazněné námrazou

## 5.2 MĚŘICÍ MÍSTO HA1.2



Obr. 17 Ortofotomapa s vyznačením měřicího místa HA1.2

**Lokalizace:** trať č. 326 Brno – Česká Třebová mezi Brno-Maloměřice St. 6 – žst. Adamov

**Staničení:** km 162,750–162,792

**Kolej:** 1.

**Popis:** Místo se nachází v levostranném oblouku o poloměru 261 m v koleji č. 1 v údolí řeky Svitavy. Bezprostředně navazuje na místo HA1.3. Převažující směr jízdy souprav je proti staničení.

Poloměr oblouku:	261 m
Převýšení:	123 mm
Sklonové poměry:	2,06 ‰
Rychlosti:	70/75/-/90 km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	60 E2, R350HT, 2015
Pražce:	B91S, 1996
Výměny kolejnic:	1996 (R260), 2004 (R260), 2015 (R350HT)
Broušení kolejnic:	2005, 2018
Výměny pražců:	1996, průběžná výměna poškozených pražců

Doplňující informace:

V roce 2005 byl na úseku při broušení vytvořen speciální příčný profil hlavy vnější kolejnice (označovaný jako ABK).

V září 2009 vyměněny podložky WFP 14K a upevnění W 14 za měkčí podložky WFP 21NT a upevnění W 21. Později (pravděpodobně v roce 2015 při výměně kolejnic) bylo vráceno upevnění W 14.

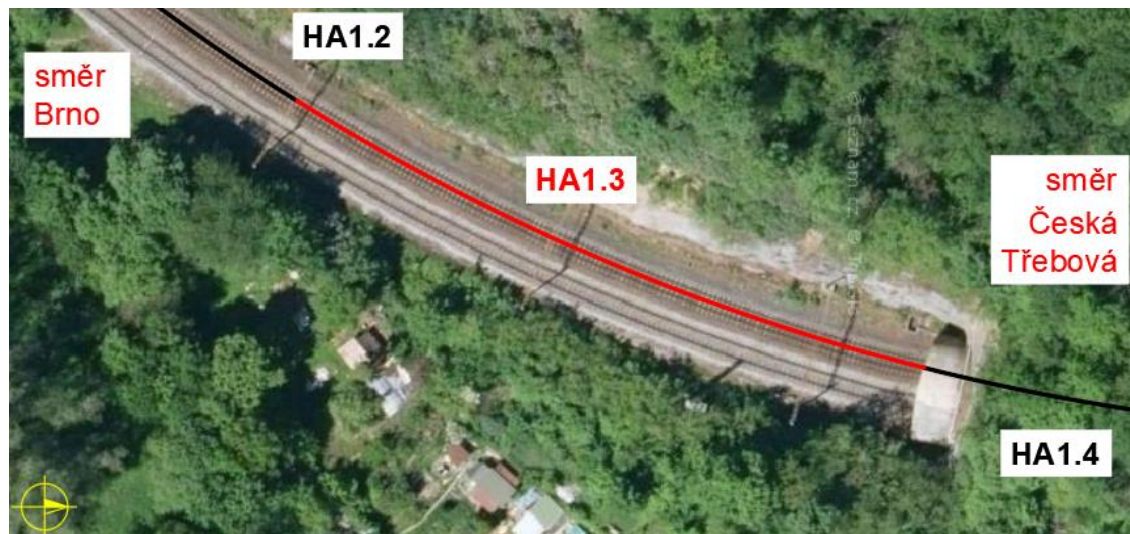


**Obr. 18** Boční ojetí vnější kolejnice a vyměněné pražce



**Obr. 19** Skluzové vlny

### 5.3 MĚŘICÍ MÍSTO HA1.3



Obr. 20 Ortofotomapa s vyznačením měřicího místa HA1.3

**Lokalizace:** trať č. 326 Brno – Česká Třebová mezi Brno-Maloměřice St. 6 – žst. Adamov

**Staničení:** km 162,792–162,865

**Kolej:** 1.

**Popis:** Místo se nachází v levostranném oblouku o poloměru 261 m v koleji č. 1 v údolí řeky Svitavy před tunelem č. 2. Nachází se mezi místy HA1.2 a HA1.4, na které navazuje. Převažující směr jízdy souprav je proti staničení.

Poloměr oblouku:	261 m
Převýšení:	123 mm
Sklonové poměry:	2,06 ‰
Rychlosti:	70/75/-/90 km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	60 E2, R350HT, 2015
Pražce:	B91S, 1996
Výměny kolejnic:	1996 (R260), 2004 (R260), 2015 (R350HT)
Broušení kolejnic:	2005, 2018
Výměny pražců:	1996, průběžná výměna poškozených pražců

Doplňující informace:

V roce 2005 byl na úseku při broušení vytvořen speciální příčný profil hlavy vnější kolejnice (označovaný jako ABK).

V září 2009 vyměněny podložky WFP 14K a upevnění W 14 za měkčí podložky WFP 21NT a upevnění W 21. Později (pravděpodobně v roce 2015 při výměně kolejnic) bylo vráceno upevnění W 14.



**Obr. 21** Skluzové vlny a vyměněné pražce



**Obr. 22** Skluzové vlny

## 5.4 MĚŘÍCÍ MÍSTO HA1.4



Obr. 23 Ortofotomapa s vyznačením měřicího místa HA1.4

**Lokalizace:** trať č. 326 Brno – Česká Třebová mezi Brno-Maloměřice St. 6 – žst. Adamov

**Staničení:** km 162,865–162,910

**Kolej:** 1.

**Popis:** Místo se nachází v levostranném oblouku o poloměru 261 m v koleji č. 1 v tunelu č. 2. Bezprostředně navazuje na místo HA1.3. Převažující směr jízdy souprav je proti staničení.

Poloměr oblouku:	261 m
Převýšení:	123 mm
Sklonové poměry:	2,06 ‰
Rychlosti:	70/75/-/90 km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	60 E2, R350HT, 2015
Pražce:	B91S, 1996
Výměny kolejnic:	1996 (R260), 2004 (R260), 2015 (R350HT)
Broušení kolejnic:	2005, 2018
Výměny pražců:	1996, průběžná výměna poškozených pražců

Doplňující informace:

V roce 2005 byl na úseku při broušení vytvořen speciální příčný profil hlavy vnější kolejnice (označovaný jako ABK).

V září 2009 vyměněny podložky WFP 14K a upevnění W 14 za měkkí podložky WFP 21NT a upevnění W 21. Později (pravděpodobně v roce 2015 při výměně kolejnic) bylo vráceno upevnění W 14 v části H1.4. V druhé části H1.4 je upevnění W 28.





**Obr. 24** Pohled do tunelu č. 2



**Obr. 25** Pohled z tunelu č. 2

## 6 HAVLÍČKŮV BROD

### 6.1 MĚŘÍCÍ MÍSTO HB1.1



Obr. 26 Ortofotomapa s vyznačením měřicího místa HB1.1

**Lokalizace:** trat č. 502, dříve č. 324 Havlíčkův Brod – Nymburk mezi žst. Havlíčkův Brod a žst. Okrouhlice.

**Staničení:** km 224,583–224,607

**Kolej:** 1.

**Popis:** Místo se nachází v levostranném oblouku o poloměru 258 m v koleji č. 1. Bezprostředně navazuje na místo HB1.2. Převažující směr jízdy souprav je proti staničení.

Poloměr oblouku:	258 m
Převýšení:	43 mm
Sklonové poměry:	-0,20 ‰
Rychlosti:	60/-/ km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	S49, 2008
Pražce:	B91S, 2008
Výměny kolejnic:	2008
Broušení kolejnic:	-
Výměny pražců:	2008

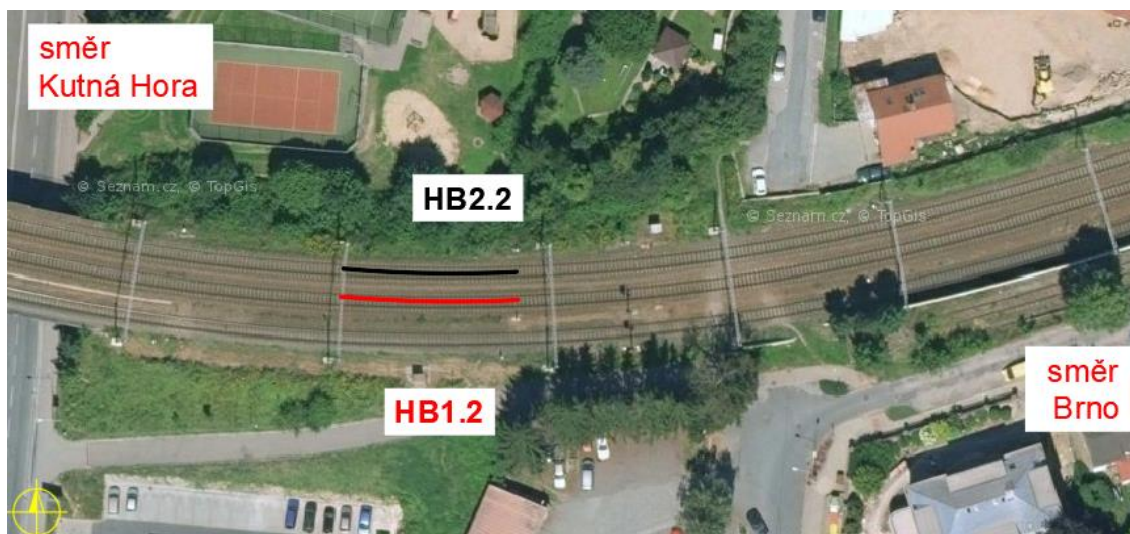


**Obr. 27** Pohled od stanice směrem k měřicím místům



**Obr. 28** Detail poježděné plochy hlavy kolejnice

## 6.2 MĚŘICÍ MÍSTO HB1.2



Obr. 29 Ortofotomapa s vyznačením měřicího místa HB1.2

**Lokalizace:** trat č. 502, dříve č. 324 Havlíčkův Brod – Nymburk mezi žst. Havlíčkův Brod a žst. Okrouhlice.

**Staničení:** km 224,943–224,967

**Kolej:** 1.

**Popis:** Místo se nachází v pravostranném oblouku o poloměru 288 m v koleji č. 1. Bezprostředně navazuje na místo HB1.1. Převažující směr jízdy souprav je proti staničení.

Poloměr oblouku:	288 m
Převýšení:	139 mm
Sklonové poměry:	-6,24 ‰
Rychlosti:	70/-/ km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	S49, 2008
Pražce:	B91S, 2008
Výměny kolejnic:	2008
Broušení kolejnic:	-
Výměny pražců:	2008

Doplňující informace:

V oblouku jsou instalovány podpražcové podložky.

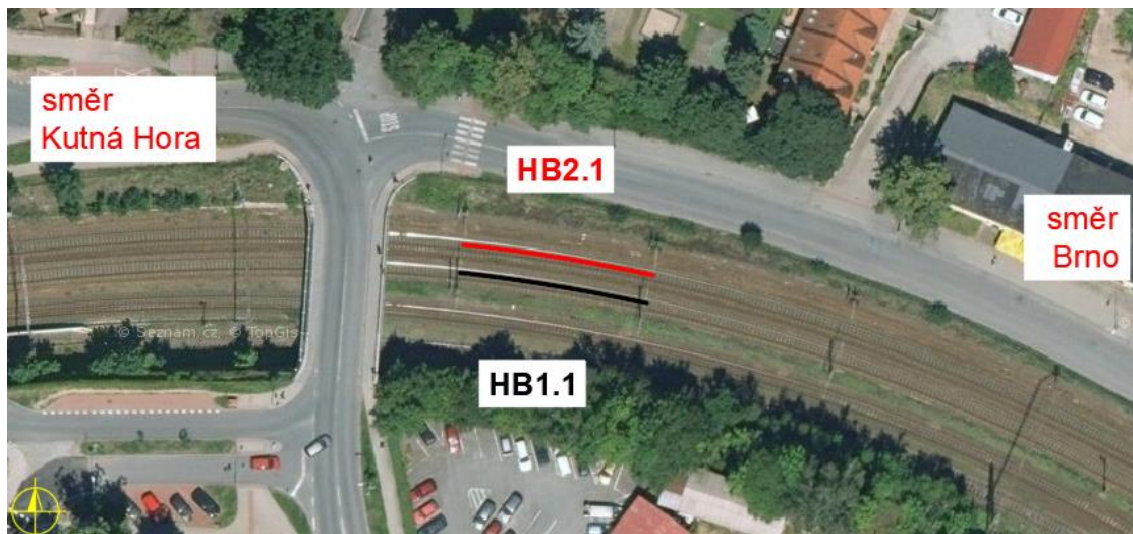


**Obr. 30** Pohled k měřicím místům od Okrouhlic



**Obr. 31** Pohled na měřicí místa HB1.2 a HB 2.2

### 6.3 MĚŘICÍ MÍSTO HB2.1



Obr. 32 Ortofotomapa s vyznačením měřicího místa HB2.1

**Lokalizace:** trat č. 502, dříve č. 324 Havlíčkův Brod – Nymburk mezi žst. Havlíčkův Brod a žst. Okrouhlice.

**Staničení:** km 224,583–224,607

**Kolej:** 1.

**Popis:** Místo se nachází v levostranném oblouku o poloměru 266 m v koleji č. 1. Bezprostředně navazuje na místo HB2.2. Převažující směr jízdy souprav je ve směru staničení.

Poloměr oblouku:	266 m
Převýšení:	65 mm
Sklonové poměry:	-0,20 ‰
Rychlosti:	60/-/ km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	S49, 2007
Pražce:	B91S, 2007

Výměny kolejnic:	2007
Broušení kolejnic:	-
Výměny pražců:	2007

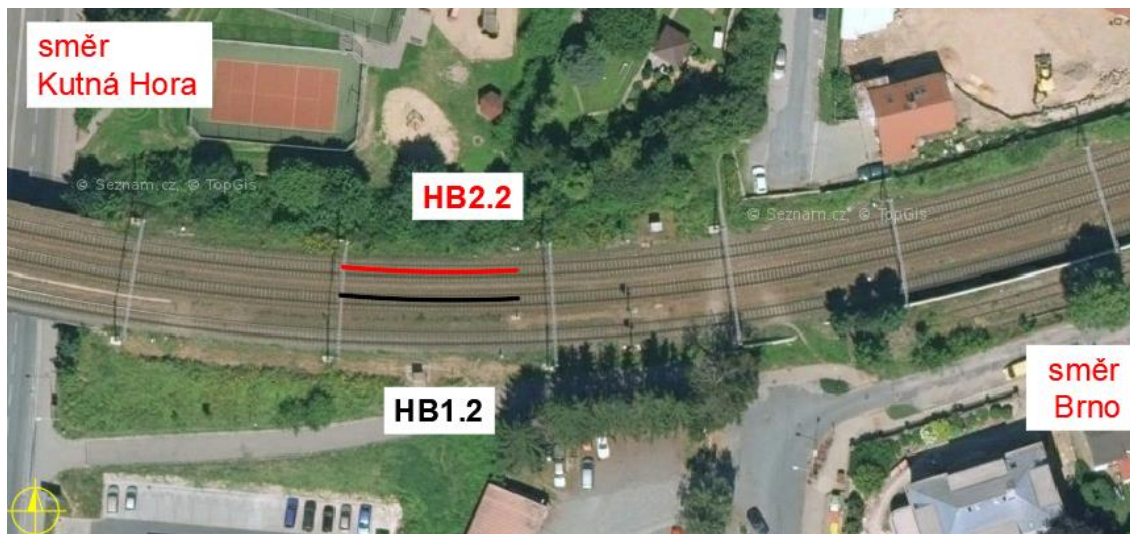


*Obr. 33 Pohled na vnitřní kolejnici*



*Obr. 34 Detailní pohled na vnitřní kolejnici*

## 6.4 MĚŘICÍ MÍSTO HB2.2



Obr. 35 Ortofotomapa s vyznačením měřicího místa HB2.2

**Lokalizace:** trat č. 502, dříve č. 324 Havlíčkův Brod – Nymburk mezi žst. Havlíčkův Brod a žst. Okrouhlice.

**Staničení:** km 224,943–224,967

**Kolej:** 1.

**Popis:** Místo se nachází v pravostranném oblouku o poloměru 284 m v koleji č. 1. Bezprostředně navazuje na místo HB2.1. Převažující směr jízdy souprav je ve směru staničení.

Poloměr oblouku:	284 m
Převýšení:	139 mm
Sklonové poměry:	-6,25 ‰
Rychlosti:	70/-/- km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	S49, 2007
Pražce:	B91S, 2007

Výměny kolejnic:	2007
Broušení kolejnic:	-
Výměny pražců:	2007





**Obr. 36** Vnitřní kolejnice



**Obr. 37** Pohled k měřicím místům

## 7 VELKÝ OSEK – ODB. KANÍN

### 7.1 MĚŘÍCÍ MÍSTO VO1.1



Obr. 38 Ortofotomapa s vyznačením měřicího místa VO1.1

**Lokalizace:** trat č. 505 Velký Osek – Hradec Králové mezi žst. Velký Osek a odb. Kanín

**Staničení:** km 1,330–1,400

**Kolej:** 1.

**Popis:** Místo se nachází v levostranném oblouku o poloměru 305 m. V oblouku se nachází přejezd a dva izolované styky. V přejezdu jsou dřevěné pražce, čímž se liší od zbytku místa.

Poloměr oblouku:	305 m
Převýšení:	91 mm
Sklonové poměry:	-1,10 ‰
Rychlosti:	70/-/ km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	S49, 1989
Pražce:	SB 8P, 1989, v místě přejezdu dřevěné

Výměny kolejnic:	-
Broušení kolejnic:	-
Výměny pražců:	-



**Obr. 39** Měřící místo VO1.1



**Obr. 40** Dřevěné a betonové pražce na úseku Velký Osek

## 8 VYŠKOV

### 8.1 MĚŘICÍ MÍSTO VY1.1



**Obr. 41** Ortofotomapa s vyznačením úseku VY1.1

**Lokalizace:** trat č. 315 Brno – Přerov mezi žst. Vyškov na Moravě a žst. Ivanovice na Hané

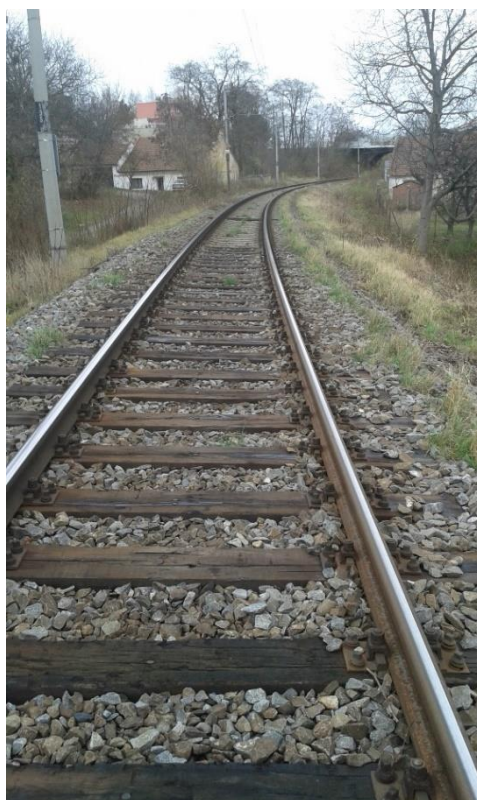
**Staničení:** km 48,272–48,289

**Kolej:** 1.

**Popis:** Vybrané místo se nachází v pravostranném oblouku o poloměru 572 m.

Poloměr oblouku:	572 m
Převýšení:	113 mm
Sklonové poměry:	2,50 ‰
Rychlosti:	90/-/- km.h <sup>-1</sup>
Kolejnice:	S49, 1986 a 2004
Pražce:	SB8, 1996

Výměny kolejnic:	2004 (část vnitřního kolejnicové pasu)
Broušení kolejnic:	-
Výměny pražců:	-



**Obr. 42** Celkový pohled na úsek Vyškov s měřicím místem VY1.1 v pozadí snímku



**Obr. 43** Vnitřní kolejnice v oblouku na úseku Vyškov

## 9 TABULKY

### 9.1 SMĚRNICE TRENDŮ RMS

RMS																
30-100																
vlnové pásmo	úsek	Hády														
		1.1			1.2			1.3			1.4			Bílovice		Babice
měřicí místo	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	1.1	1.2	1.1	1.2
směrnice (k) [ $\cdot 10^{-6}$ ]	0,4713	0,3498	0,5815	0,4729	0,5220	0,4435	0,5663	0,4605	0,2919	0,2487	0,2487	0,2487	0,2919	0,2487	-0,0011	0,1160
koefficient determinace ( $R^2$ )	0,9688	0,9994	0,9168	0,8288	0,9519	0,9958	0,9975	0,9635	0,9689	0,9894	0,9894	0,9894	0,9689	0,9894	0,1976	0,9740
RMS																
100-300																
vlnové pásmo	úsek	Hády														
		1.1			1.2			1.3			1.4			Bílovice		Babice
měřicí místo	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	1.1	1.2	1.1	1.2
směrnice (k) [ $\cdot 10^{-6}$ ]	0,1442	0,5632	0,1840	0,1407	0,2460	0,2984	0,2194	0,7652	0,3620	0,2258	0,3620	0,7652	0,3620	0,2258	0,0404	0,1098
koefficient determinace ( $R^2$ )	0,9195	0,8990	0,9011	0,2378	0,5802	0,9982	0,5697	0,9385	0,7849	0,9332	0,7849	0,9332	0,7849	0,9332	0,8445	0,9953

## 9.2 SMĚRNICE TRENDŮ P2P

P2P													
30-100													
vlnové pásmo	úsek	Hády								Bílovice		Babice	
		1.1		1.2		1.3		1.4		1.1	1.2	1.1	1.2
měřicí místo	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	11-42	11-42	
směrnice (k) [ $\cdot 10^{-6}$ ]	1,0556	0,7795	1,1767	1,0983	1,1102	0,9275	1,2056	0,7652	0,6117	0,5236	-0,0240	0,2465	
koefficient determinace ( $R^2$ )	0,9645	0,9952	0,8981	0,8495	0,9759	0,9968	0,9951	0,9385	0,9658	0,9871	0,9627	0,9845	
P2P													
100-300													
vlnové pásmo	úsek	Hády								Bílovice		Babice	
		1.1		1.2		1.3		1.4		1.1	1.2	1.1	1.2
měřicí místo	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	11-42	11-42	
směrnice (k) [ $\cdot 10^{-6}$ ]	0,3142	1,4777	0,4961	0,4271	0,5180	0,8116	0,5435	1,8972	0,8823	0,5603	0,1068	0,2957	
koefficient determinace ( $R^2$ )	0,9246	0,9351	0,9181	0,2848	0,6690	1,0000	0,6521	0,9517	0,7576	0,9264	0,9066	0,9981	

### 9.3 ČAS POTŘEBNÝ K ROZVOJI VAD DLE HODNOT Z ČSN 13231-3:2006 [79]

Úsek	Hády											
	1.1		1.2		1.3		1.4		Bílovice		Babice	
Měřicí místo	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	1.1	1.2	1.1	1.2
Směrnice z období												
30-100	RMS	0,7	1,0	0,6	0,7	0,6	0,8	0,6	0,7	1,1	1,3	2,9
	P2P	0,8	1,1	0,7	0,8	0,8	0,9	0,7	1,1	1,4	1,6	3,4
100-300	RMS	6,9	1,8	5,4	7,1	4,1	3,4	4,6	1,3	2,8	4,4	24,8
	P2P	8,0	1,7	5,0	5,9	4,8	3,1	4,6	1,3	2,8	4,5	23,4

Hodnoty jsou v rocích.



## 9.4 ČAS POTŘEBNÝ K ROZVOJI VAD DLE HLADINY 0,1 MM Z PŘEDPISU SŽDC S2/4 [47]

Úsek	Hády											
	1.1		1.2		1.3		1.4		Bílovice		Babice	
Měřicí místo	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	0-24	40-63	1.1	1.2	1.1	1.2
Směrnice z období	17,7	23,8	14,3	17,6	16,0	18,8	14,7	18,1	28,6	33,5		71,9
30-100	RMS	P2P	7,9	10,7	7,1	7,5	6,9	10,9	13,6	15,9		33,8
100-300	RMS	P2P	57,8	14,8	45,3	33,9	38,0	10,9	23,0	36,9	206,4	75,9
			26,5	5,6	16,8	19,5	15,3	4,4	9,4	14,9	78,0	28,2

Hodnoty jsou v rocích.