



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

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

SUMMARY OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jan Valehrach

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. OTTO PLÁŠEK, Ph.D.

BRNO 2021

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.

Keywords

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

© Ing. Jan Valehrach, 2021

Místo uložení práce:

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta stavební

Ústav železničních konstrukcí a staveb

OBSAH

OBSAH.....	3
ÚVOD.....	5
1 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	6
1.1 Vady kolejnic	6
1.1.1 Zatřídění vady dle standardů	6
1.1.2 Skluzové vlny (krátké vlny).....	7
1.1.3 Další související vady.....	7
1.2 Teoretický základ popisující vznik skluzových vln	8
1.3 Stávající způsoby sběru, zpracování a vyhodnocování dat.....	10
1.3.1 Sběr dat	10
1.3.2 Diagnostické prostředky	10
1.3.3 Zpracování dat	11
1.4 Stávající způsoby odstraňování a potlačování skluzových vln	13
2 CÍLE PRÁCE	14
3 METODIKA VÝZKUMNÉ ČINNOSTI	15
3.1.1 Teoretický úvod	15
3.1.2 Výběr úseků	15
3.2 Měření	17
3.3 Zpracování dat.....	17
3.3.1 Úvod.....	17
3.3.2 Vlnovité deformace	18
3.3.3 Sledování rychlosti rozvoje skluzových vln	19
3.3.4 Nedostatek/přebytek převýšení koleje	23
3.3.5 Simulace změny převýšení/změnu rychlosti v daném úseku	24
4 PŘEHLED A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	25
4.1 Predikce rozvoje.....	25
4.1.1 Podle přechozího rozvoje vady	25
4.1.2 Podle stanovených mezí	27
4.2 Porovnání rychlosti rozvoje s nedostatky převýšení ve sledovaných úsecích	28
4.3 Návrh nových rychlostí ve sledovaných úsecích	29
5 ZÁVĚR.....	29
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	32
ŽIVOTOPIS.....	34
ABSTRACT	37

ÚVOD

Vlivem provozu dochází k opotřebování a poškození 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.

1 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

1.1 VADY KOLEJNIC

N 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].

1.1.1 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 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 ČSN EN 13231-3 Železniční aplikace - Kolej - Přejímka praci - 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 [6] 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).

1.1.2 Skluzové vlny (krátké vlny)

Krátké vlny jsou vlnovité nerovnosti na pojížděné ploše, jejichž vyvýšeniny mají rozteč 8 až 30 cm [3], dle jiných publikací [7, 8] 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]

1.1.3 Další související vady

Ve většině případů je výskyt skluzových vln provázen dalšími vadami. Mezi tyto vady 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. 2 Vlevo obroušené kamenivo, vpravo chybějící upevnění a ulomená svěrka, foto doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.

1.2 TEORETICKÝ ZÁKLAD POPISUJÍCÍ VZNIK SKLUZOVÝCH VLN

Definice

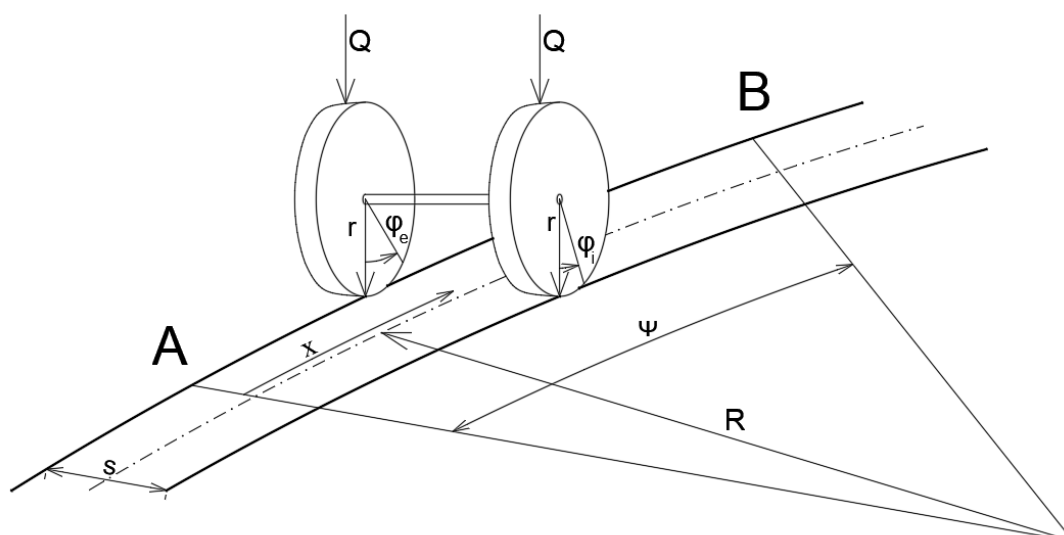
Pojmem skluz je pro potřeby této práce chápán rozdíl mezi obvodovou rychlostí kola a vlastní rychlostí vozidla.

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

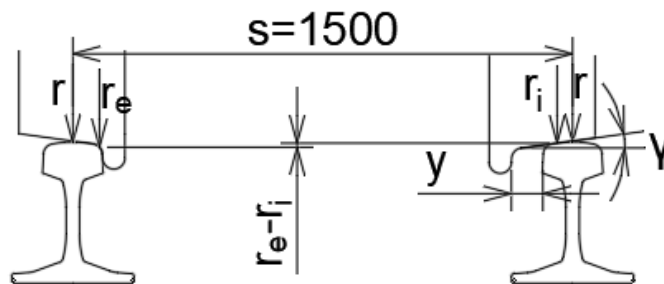
Pro zjednodušení je dále uvažováno pouze s dvojkolím bez vazby na podvozek či celé vozidlo.

Při jízdě obloukem z profilu A do profilu B (Obr. 3) musí urazit vnitřní a vnější kolo nápravy rozdílnou vzdálenost.



Obr. 3 Geometrie pohybu dvojkolí podle[7]

Rozdíl poloměrů styčných kružnic



Obr. 4 Rozdíl okamžitých poloměrů valení kol při příčném posunutí dvojkolí

Z Obr. 4 lze vyvodit při kuželovitém jízdním obryse následující vztahy

$$r_e = r + \Delta r \quad (1)$$

$$r_i = r - \Delta r \quad (2)$$

$$\Delta r = \gamma y \quad (3)$$

kde funkce Δr je „rozdl okamžitého poloměru valení jednoho kola dvojkolí a okamžitého poloměru valení druhého kola dvojkolí při příčném posunutí dvojkolí v koleji.“ [9]

Kritický poloměr oblouku

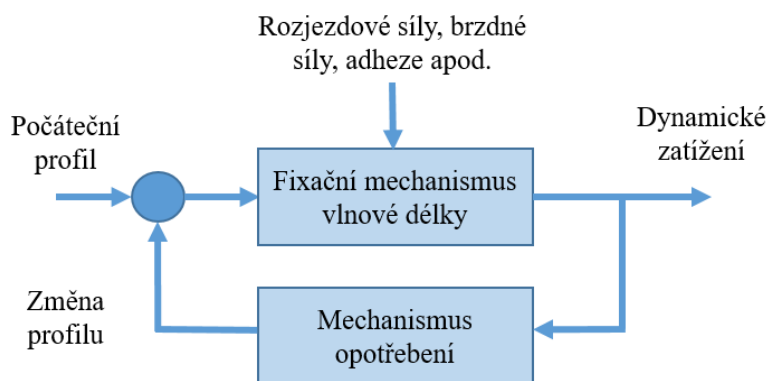
Poloměr R_{krit} představuje nejmenší možný poloměr oblouku, při kterém se může dvojkolí pohybovat obloukem při jednoduchém valení.

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 ϕ , ale každé kolo je nuceno urazit jinou vzdálenost a „v obloucích s menším poloměrem pak kuželovitost kola neplní svoji funkci“ [9] 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 kolejnicí.

Mechanismus fixace vady

Dle [10] je na počátku kolejnice bez vlnovitých deformací pořížděné plochy hlavy kolejnice, avšak s počátečními nerovnostmi. Tyto nerovnosti v kombinaci s dalšími faktory jako trakce, skluz, tření na kontaktu kolo-kolejnice vytváří dynamická zatížení, která způsobují počáteční poškození a deformace určitého druhu, které jsou spojeny se změnami v krystalické struktuře v oceli [11] (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. 5 Mechanismus fixace vady [10]

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.“ [12] Časové intervaly prohlídek a měření jsou uvedeny ve vyhlášce 177/1995 Sb. [12] a v předpisu S2/3 [13]. Na všech tratích se tak alespoň jednou za rok uskuteční měření. Na koridorových tratích se během roku uskuteční 3 měření.

1.3.2 Diagnostické prostředky

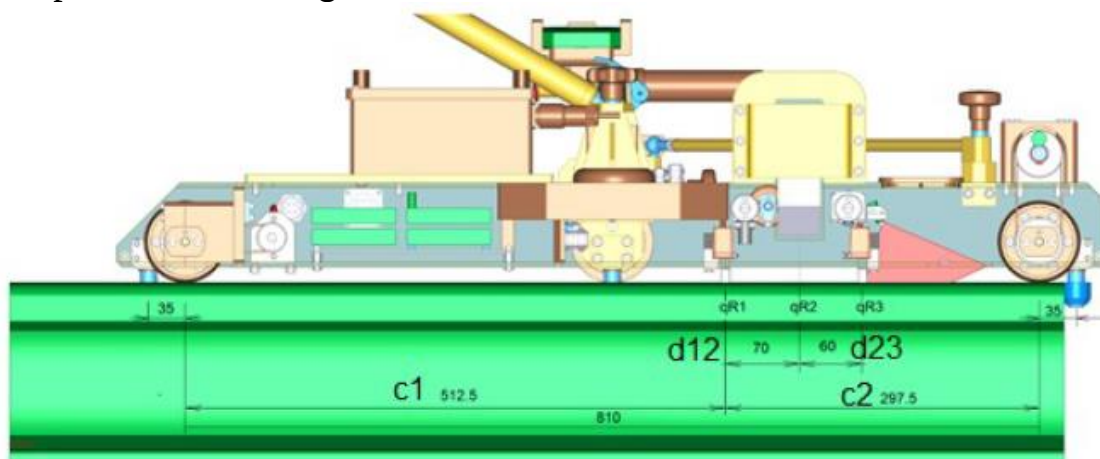
Měřicí přístroje

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

Měřicí zařízení

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

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



Obr. 6 Princip tětiv u zařízení Salamander [14]

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 těživách (krátké a dlouhé). Např. u zařízení Salamander (Obr. 6) je krátká základna určena senzory očíslované qR1, qR2, qR3. Dlouhá základna je dána roztečí vozíku $c1 + c2$. [14]

Měřicí vozidla

Pro měření vlnovitých deformací pojížděné plochy hlavy kolejnice delších úseků se používají kolejová vozidla od malých přívěsných, přes měřicí 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.

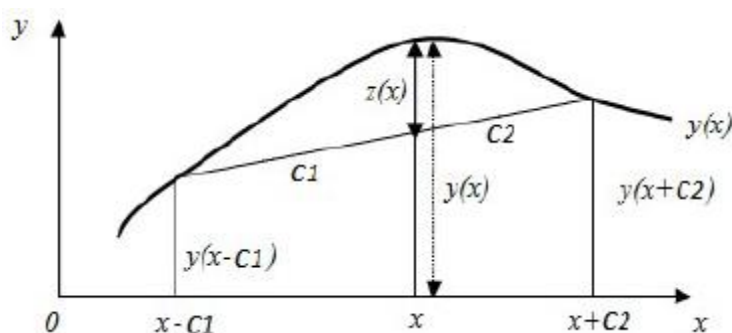
Princip měřicího systému měřicího vozu pro železniční svršek je podobný jako u měřicích zařízení a je také vybaven bezkontaktními laserovými senzory. Oproti měřicím zařízením je zde osvětlena celá šíře pojížděné plochy hlavy kolejnice, kterou snímá kamera. Následně systém automaticky vybírá měřenou stopu, což je nezbytné vzhledem ke konstrukci vozu, resp. k jeho délce, a příčným posunům měřicí jednotky vůči kolejnici při jízdě obloukem.



Obr. 7 Příklad nejčastějšího způsobu měření na měřicím vozidle – přímou bezkontaktní metodou: Systém používá pro měření na kolejnicovém pásu čtyři lasery a kamery vytvářející čtyři optické asymetrické těживы. [15]

1.3.3 Zpracování dat

Základem zpracování dat je výpočet vzepětí nad těživou dle Obr. 8, 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 zachovaný).



Obr. 8 Princip výpočtu vzepětí nad tětivou [14]

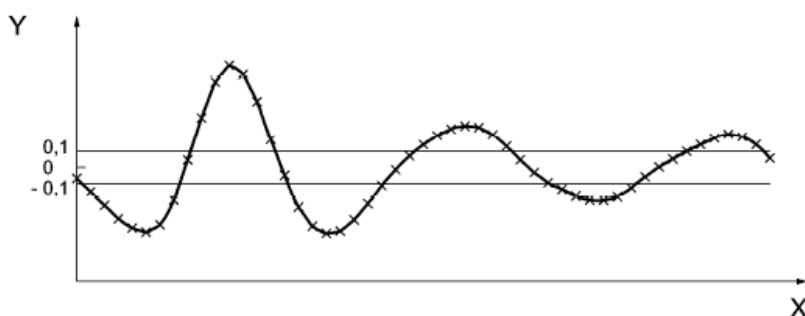
Měřicí jednotka vypočítává vzepětí nad tzv. krátkou a dlouhou tětivou podle vzorce:

$$z(x) = y(x) - \left[\frac{c_2}{c_1+c_2} y(x-c_1) + \frac{c_1}{c_1+c_2} y(x+c_2) \right]. \quad (4)$$

Krátká tětiva je užita 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 [6] 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 [6] přílohy C.1. za využití hodnot z Tab. 1.



Obr. 9 Výběr hodnot pro výpočet procenta překročení špička-špička [6]

Tab. 1 Kritéria pro přejímku pro mez špička-špička [6]

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

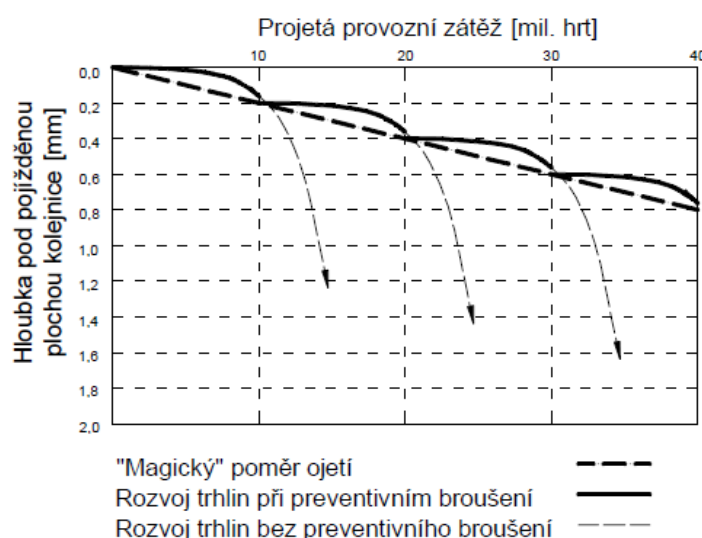
Zpracování dat systémem Měřicího vozu pro železniční svršek je mírně odlišné od výše uvedeného postupu. Důvody jsou jiné primární funkce (diagnostické s dlouhými měřenými úseky), kvantitativní (velké množství dat) a výrazně vyšší provozní rychlosti (běžně měřeny tratě s rychlostí 160 km.h⁻¹). Ačkoliv 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.

1.4 STÁVAJÍCÍ ZPŮSOBY ODSTRAŇOVÁNÍ A POTLAČOVÁNÍ SKLUZOVÝCH VLN

Pro odstranění vlnkovitosti se stejně jako pro většinu vad hlav kolejnic, kromě výměny samotných kolejnic, používají technologie, které lze souhrnně nazvat „opracování“ nebo „oprava pojížděných ploch kolejnic“ [16] – broušení, hoblování a frézování.

Principem 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. 10.



Obr. 10 Princip preventivního broušení, uvedené hodnoty projaté zátěže jsou orientační [17]

Mezi další opatření patří především preventivní opatření:

- Asymetrické tvary profilu kolejnic
- Kolejnicové oceli s vyšší otěruvzdorností
- Mazníky
- Zpružnění jízdní dráhy
- Pojezdy vozidel

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

3.1.1 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 případné zpracování velkého množství dat, případně pro „Přejímku reprofilace kolejnic“ [6]. 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-vozidla-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 [18].

3.1.2 Výběr úseků

Ve spolupráci s tehdejší Správou železniční dopravní cesty s. o., 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. Nákrese 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 měřicí 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 měřicích míst. Měřicím místem je pak část konkrétní koleje, ve které bylo provedeno měření a je definováno číslem koleje, začátkem a koncem měření vztažených k pevným bodům. Jednotlivá měřicí místa se mohou překrývat.

Monitorované úseky železničních drah:

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

- Vyškov.

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.

Tab. 2 Tabulka měřících míst

Úsek	Trat' č.	Označení místa	Kolej	Staničení [km]	Poloměr [m]	Převýšení [mm]
Adamov	326	AD1.1	1	169,800–170,050	354	146
Babice	326	BS1.1	1	168,715–168,754	378	100
		BS1.2	1	168,985–169,082	375	140
Bílovice	326	BV1.1	1	166,745–166,779	275	130
		BV1.2	1	166,955–166,990	302	130
Hády	326	HA1.1	1	161,733–161,913	283	123
		HA1.2	1	162,750–162,792	261	123
		HA1.3	1	162,792–162,865	261	123
		HA1.4	1	162,865–162,910	261	123
Havl. Brod	502	HB1.1	1	224,583–224,607	258	43
		HB1.2	1	224,943–224,967	288	139
		HB2.1	2	224,583–224,607	266	65
		HB2.2	2	224,943–224,967	284	139
Velký Osek	505	VO1.1	1	1,330–1,400	305	91
Vyškov	315	VY1.1	1	48,272–48,289	572	113

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 měřící místa délek v řádech desítek metrů a až na výjimky se na úsecích nalézá více měřících 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 měřící 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 trati (např. vliv skalního podloží, mostních konstrukcí apod.).

3.2 MĚŘENÍ

Sledována byla jednotlivá místa v pravidelných intervalech, které se vzájemně lišily dle současného stavu rozvoje vad, hustoty provozu, údržbových a opravných pracích, 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 periodicitu měření delší vzhledem k výraznějším (hlubším a tvarově lépe pozorovatelným) vlnám a je možné zde provádět měření jednotlivých vln.

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 pojezdné plochy hlavy kolejnic přístrojem Salamander;
- měření rychlostí projíždějících souprav a záznam o jejich skladbě.

Kromě mikrogeometrie pojezdné 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 nákresech přehledů 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 ZPRACOVÁNÍ DAT

3.3.1 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. 3.1.2), 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.

3.3.2 Vlnovité deformace

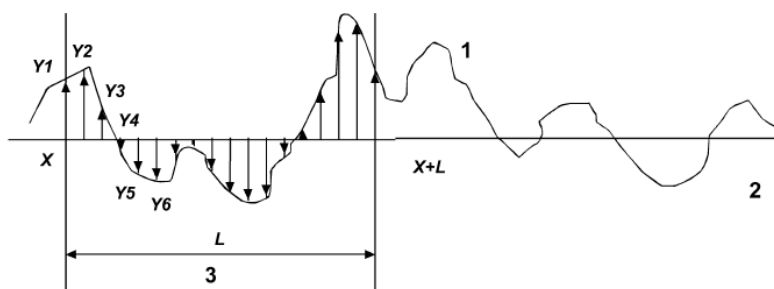
Délka výpočetního okénka

Počet vzorků pro vyhodnocení je dán měřícím krokem, avšak délky výpočetních okének jsou stanoveny jako 5násobky délky nejdelší vlny daného pásma λ_p .

Tab. 3 Délka výpočetního okénka L (v tabulce jsou pro porovnání uvedeny délky výpočetního okénka i pro další vlnová pásma než jen pro skluzové vlny). [19]

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

Plovoucí průměr RMS



Obr. 11 Záznam z měření vlnovité deformace s vyznačením ekvidistantních vzorků y_i výpočetního okénka o stanovené délce L [19]

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 :

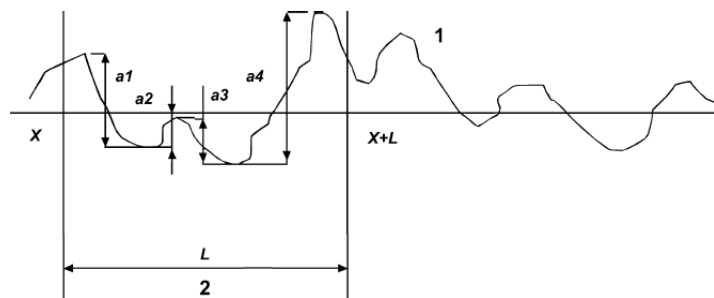
$$RMS(x, L) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n-1}}. \quad (5)$$

RMS celého úseku

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

$$RMS(x, L_m) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n-1}} \quad (6)$$

Plovoucí průměr P2P



Obr. 12 Záznam z měření vlnovité deformace s vyznačením rozdílů po sobě jdoucích vrcholů amplitud a_i měřené „mikro-výšek“ výpočetního okénka o stanovené délce L [19]

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

$$P2P(x, L) = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}. \quad (7)$$

P2P celého úseku

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

$$P2P(x, L_m) = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (8)$$

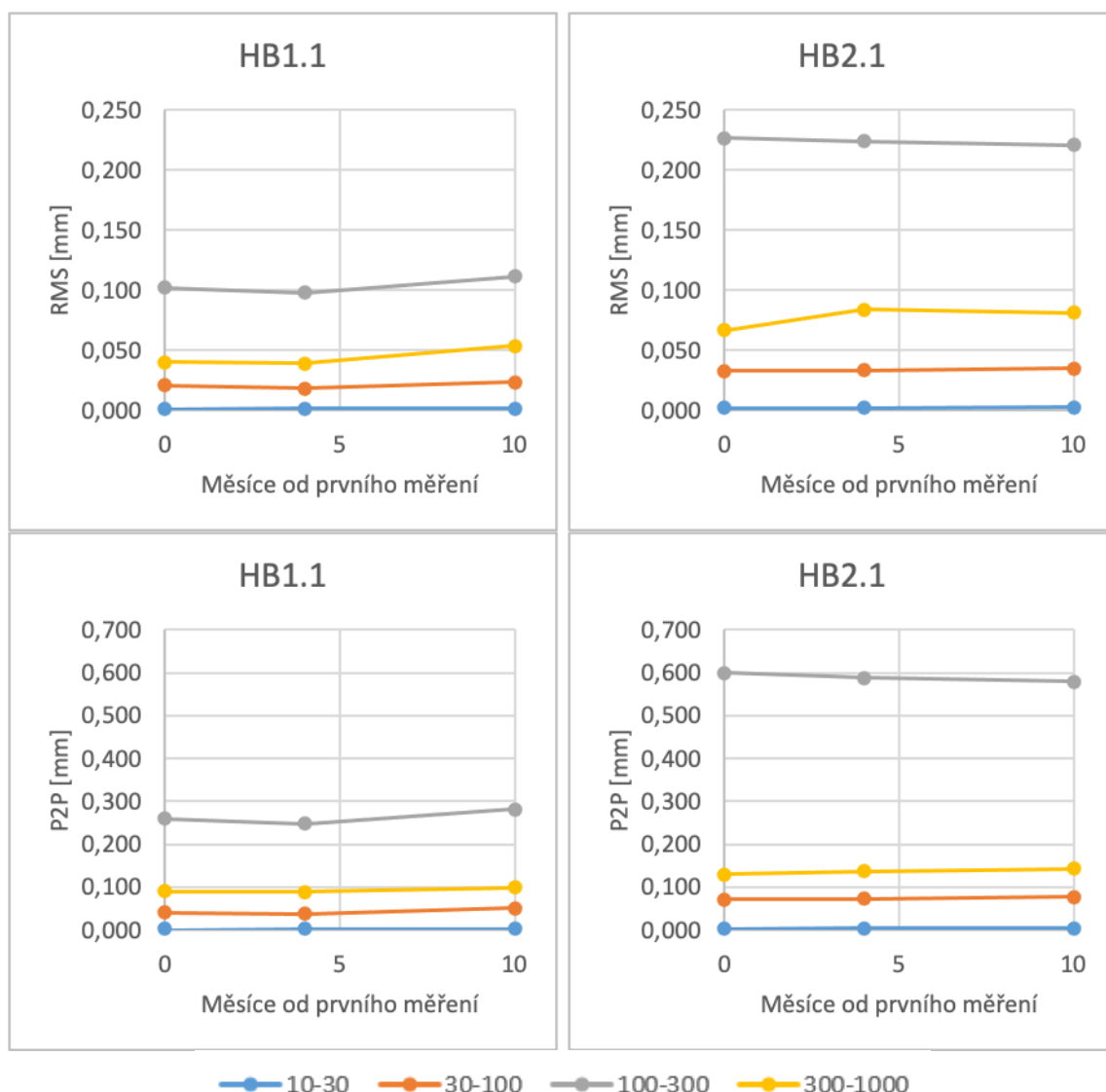
Procentuální překročení hodnot RMS a P2P

Pro RMS a P2P celého úseku je počítáno překročení mezních hodnot.

3.3.3 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. Celkem čtyři oblouky (dva v každé koleji) v této lokalitě umožňují vzájemné porovnání.



Obr. 13 Časový vývoj RMS a P2P pro vybraná místa úseku Havlíčkův Brod

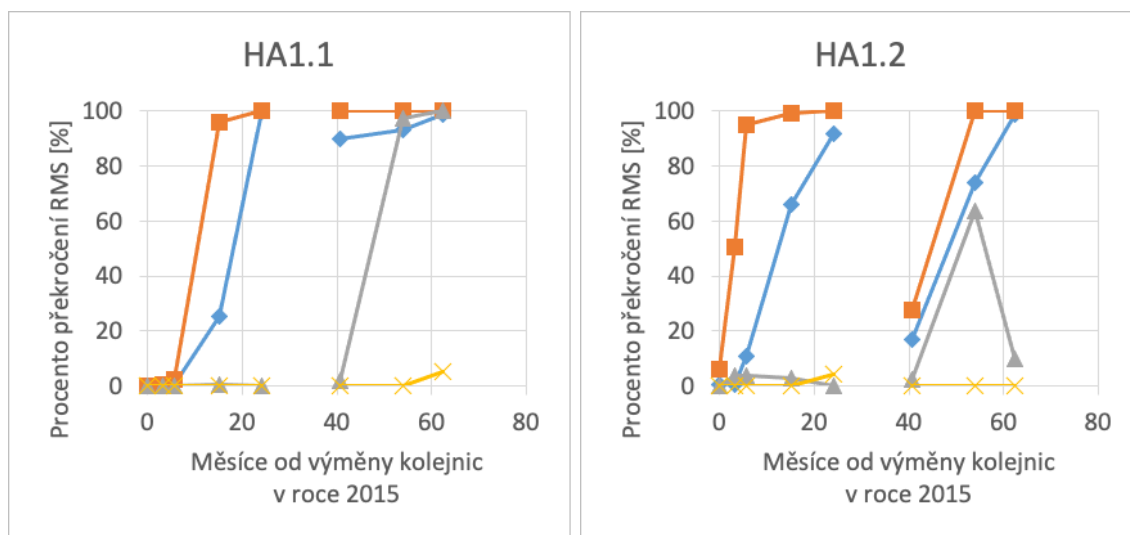
V jednotlivých obloucích byly zjištěny vady v rozdílné fázi rozvoje, přestože dle dostupných informací na úseku proběhlo broušení v obou kolejích v roce 2009 nebo 2010.

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 měřím 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).

Grafy níže zobrazují dvě vybraná místa v koleji číslo 1 úseku Hády. Grafy ukazují porovnání rychlosti rozvoje vlnovitých vad (zde reprezentované jako procento překročení mezní hodnoty RMS dle [19]) (Obr. 14).

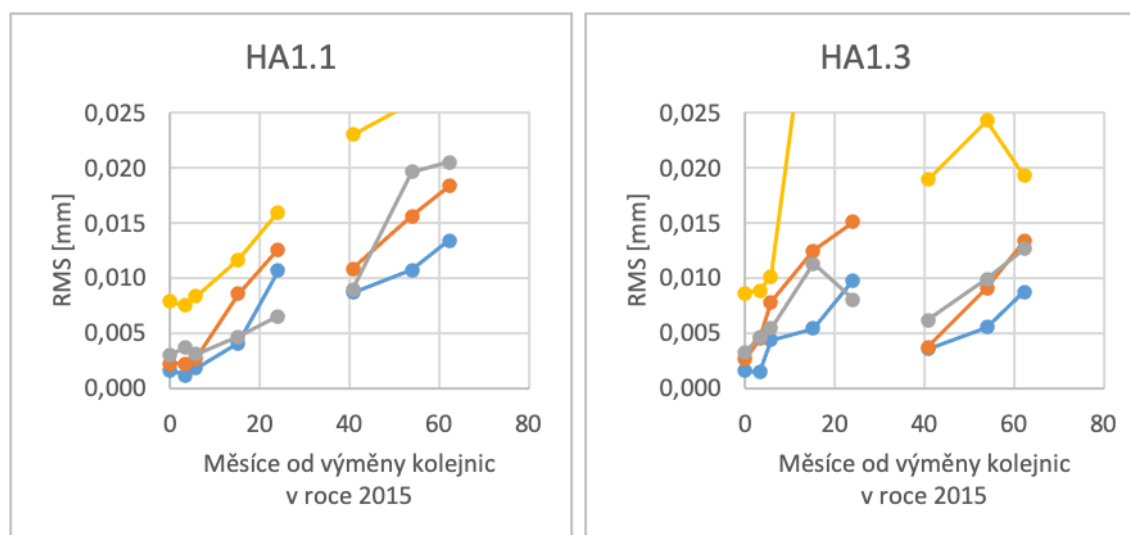


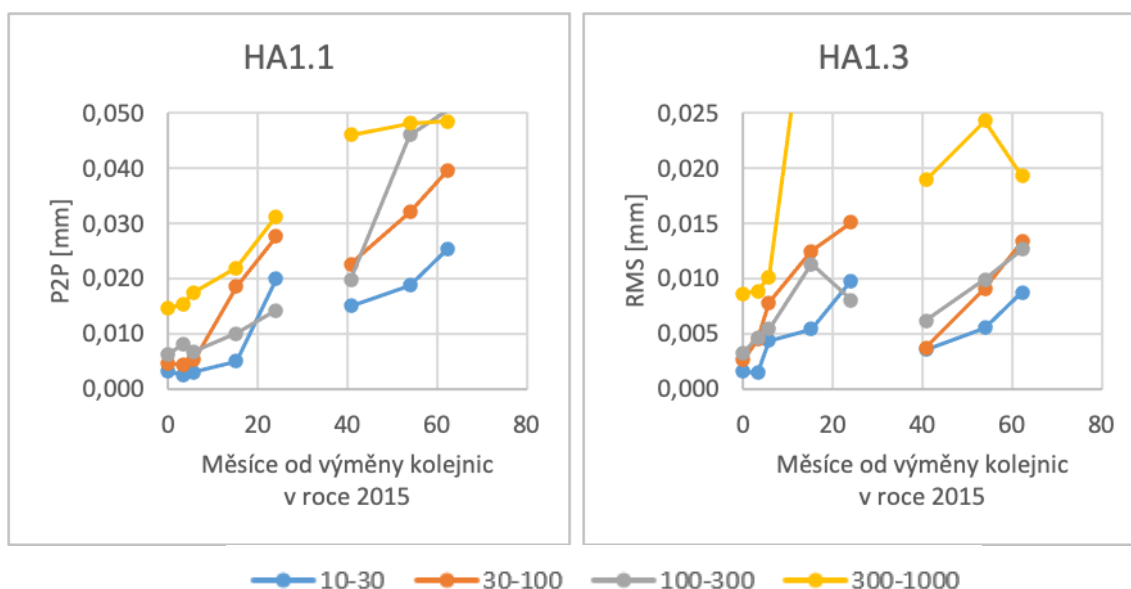
Obr. 14 Procento překročení mezní hodnoty RMS na vybraných místech úseku Hády

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 nereprezentují vhodně rozvoj příslušné vady, proto zobrazením samotného RMS a P2P můžeme lépe sledovat samotný rozvoj.





Obr. 15 Časový vývoj RMS a P2P pro úsek Hády

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 vliv změny rychlosti rozvoje vln je považována výměna pražců za typ B 91T (vlivem s největší pravděpodobností nejsou právě nové pražce, ale proces výměny, tedy zásah do konstrukce svršku).

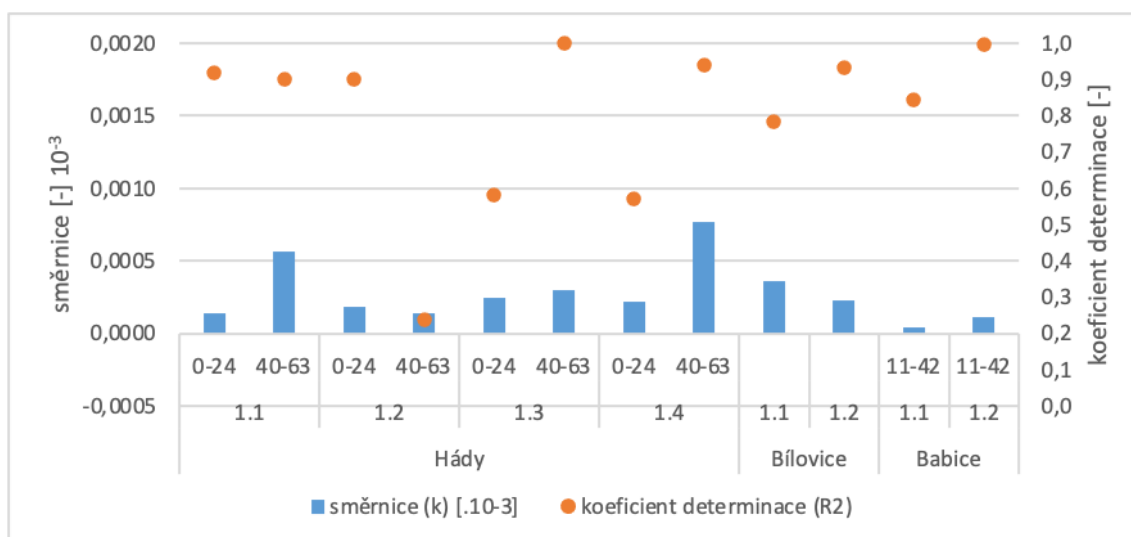
Na základě měření v koleji (Obr. 16) se pro daný úsek vlnová délka skluzových vln pohybuje kolem hranice pásem (100 mm), proto byla dále vyhodnocována především pouze pásma 30–100 (D2) a 100–300 mm (D3).



Obr. 16 Vlnové deformace na úseku Hády

Obdobně byla zpracována data i z dalších měřicích míst.

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.



Obr. 17 Směrnice a koeficient determinace z RMS pro pásmo 100–300 mm

Výrazné 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.

3.3.4 Nedostatek/přebytek převýšení koleje

Úseky Hády, Bílovice a Babice

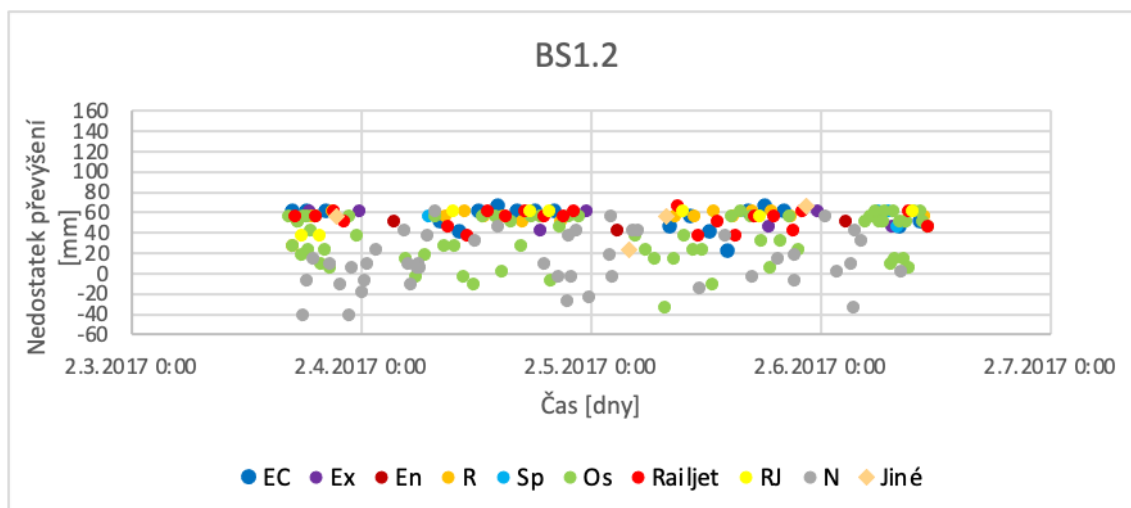
Jednotlivá měřicí místa na trati č. 326 byla podrobena porovnání nedostatků, resp. přebytků převýšení se směrnicemi rychlostí rozvoje skluzových vln.

Seřazení míst, resp. oblouků podle směrnic je v Tab. 4 od nejméně strmé (nejvýše) po nejstrmější (nejníže). Pořadí se liší podle vlnového pásma.

Tab. 4 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

Z měření rychlostí projíždějících souprav danými místy a z parametrů oblouků byly vypočítány nedostatky, resp. přebytky převýšení pro jednotlivé vlaky.



Obr. 18 Porovnání nedostatků [+] a přebytků [-] převýšení na místě BS1.2

Dále byly vypočítány vážené nedostatky, resp. přebytky převýšení pro jednotlivé oblouky, kdy jako váhy byly použity hmotnosti souprav, neboť jiné působení bude mít na trať pomalu jedoucí těžký nákladní vlak a jiné rychlá lehká osobní souprava.

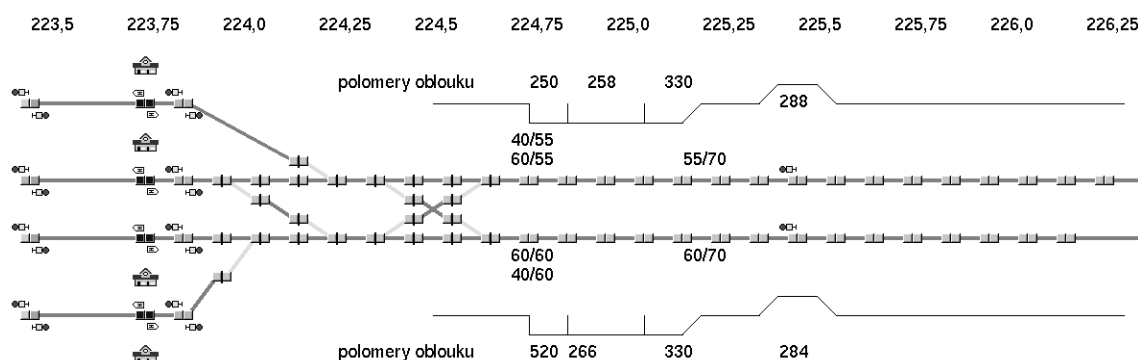
3.3.5 Simulace změny převýšení/změnu rychlosti v daném úseku

Pro úsek Havlíčkův Brod byl modelován provoz v zájmových obloucích pro ověření vhodnosti navržených rychlostních profilů, neboť na základě měření bylo zjištěno, že soupravy nedosahují povolených rychlostí. Nabízely se tak otázky:

Je vyšší rychlost (70 km.h^{-1}) v druhých obloucích nezbytná?

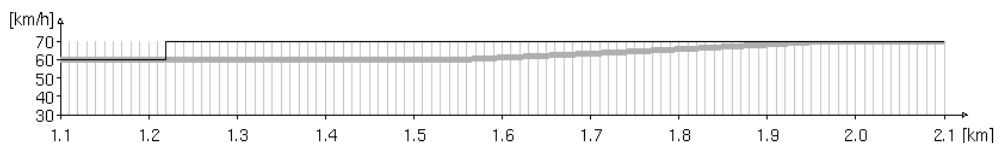
Využijí soupravy tuto rychlost?

Pro zodpovězení těchto otázek byla provedena simulace jízdy vlaků v programu OpenTrack. Byl vytvořen zjednodušený simulační model okrouhlického zhlaví, zhlaví 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. 19 Zjednodušený model zhlaví žst. Havlíčkův Brod v prostředí aplikace OpenTrack

Užijeme-li v simulaci nákladní vlak, výběhy rychlostí jsou značné. Přestože byl na simulaci použit relativně lehký nákladní vlak, je především při jízdě ze stanice po hlavní koleji (Obr. 20) vidět dlouhý výběh a souprava dosahuje rychlosti 70 km.h^{-1} daleko za druhým obloukem. Pojede-li nákladní vlak z předjízdny koleje, posune se výběh ještě více do trati.



Obr. 20 Výřez průběhu rychlosti při jízdě nákladního vlaku hlavní kolejí č. 2 z Havlíčkova Brodu do Okrouhlic

Nedosažování největší dovolené rychlosti stávajícím vozovým parkem i technologická nekázeň, které byly pozorovány na úseku, způsobují ještě delší výběhy rychlostí. Totéž platí i pro moderní, avšak delší soupravy s větší hmotností.

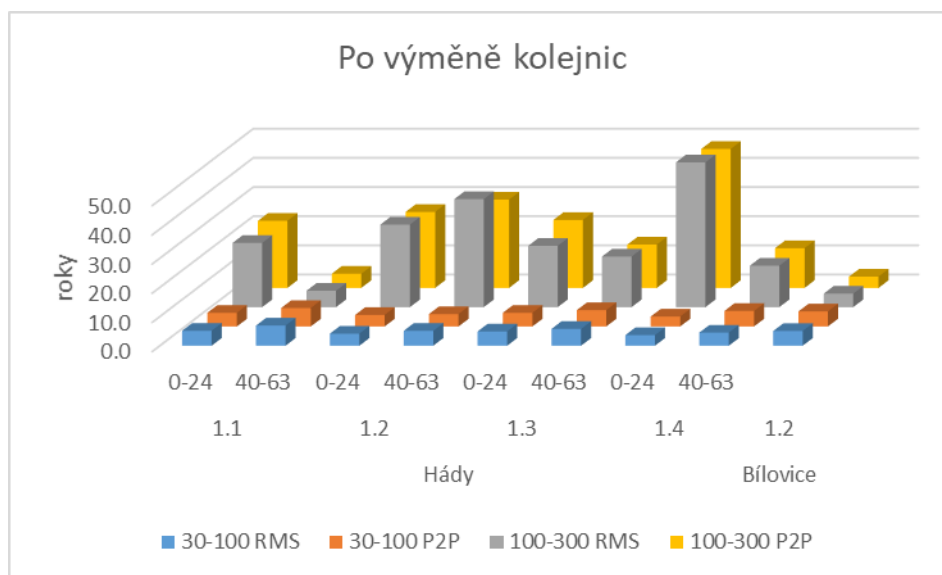
4 PŘEHLED A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

4.1 PREDIKCE ROZVOJE

4.1.1 Podle přechozího rozvoje vady

Hády a Bílovice

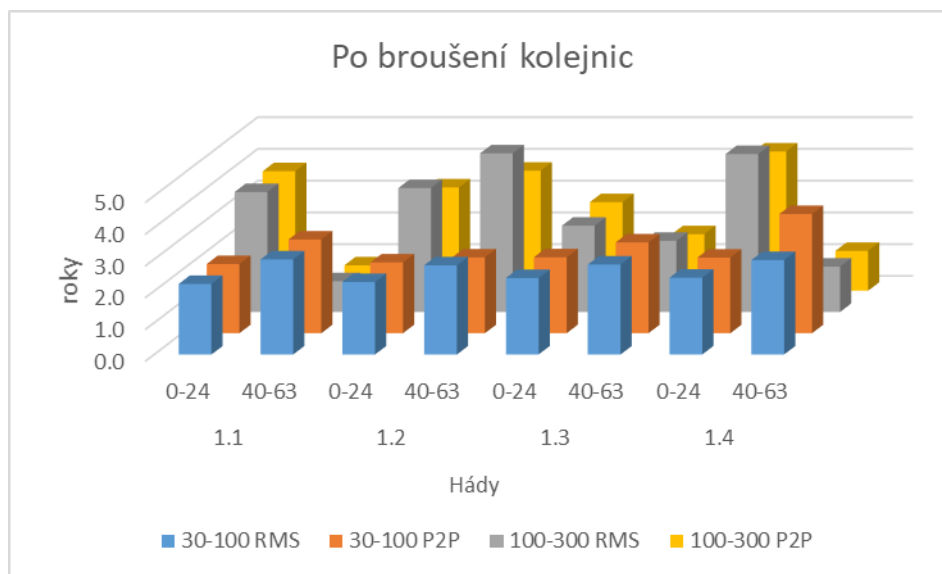
Užitím směrnic, získaných z měření vad, byly vypočítány časová období nutná k dosažení hodnot RMS a P2P před výměnami, případně před broušením kolejnic.



Obr. 21 Počet roků nutných k dosažení rozvoje vlnových deformací odpovídajících stavu před výměnou kolejnic

Počet roků 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.



Obr. 22 Počet roků nutných k dosažení rozvoje vlnových deformací odpovídajících stavu před broušením kolejnic v roce 2015

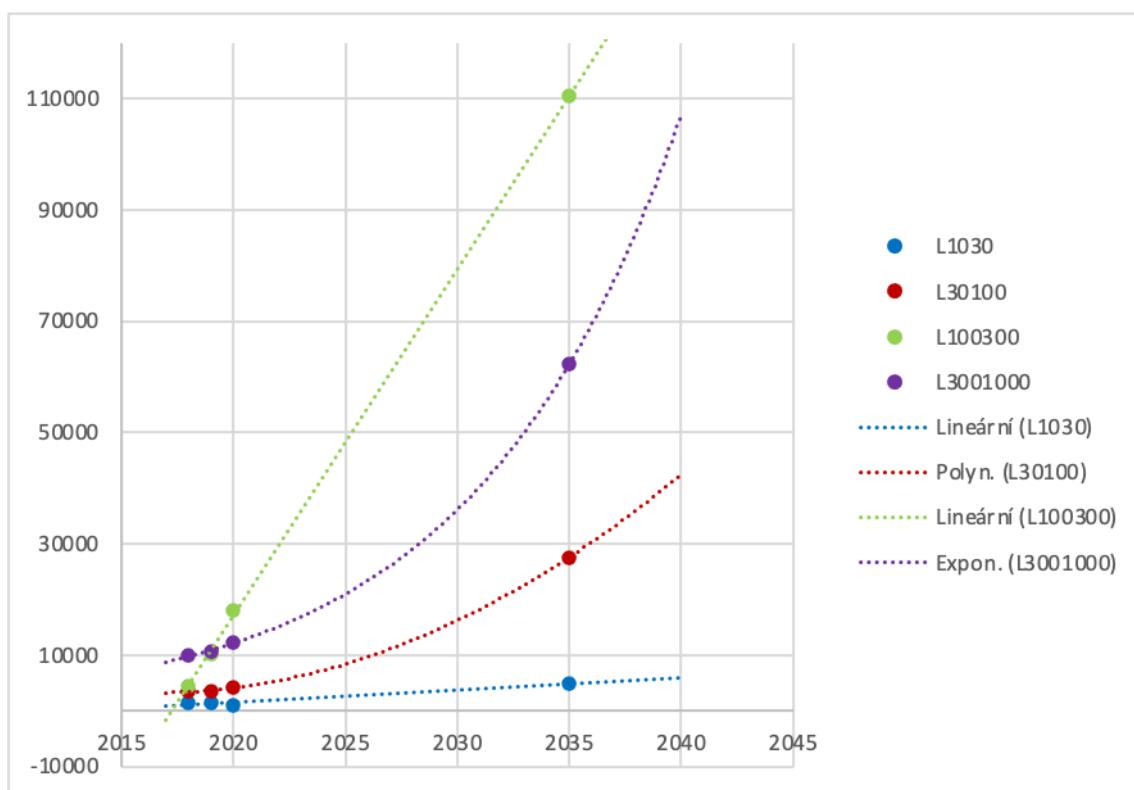
Budeme-li počítat časové období pro rozvoj vad odpovídající stavu před broušením kolejnic, dostaneme kratší intervaly než v předchozím případě. To je dáno jednak menšími absolutními hodnotami, kterých je nutno dosáhnout, ale také počátečním stavem, neboť po broušení nemusí být kolejnice a kolej obecně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

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 1.3.2). 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 mm je možný delší rozvoj vady koleje či přímo drážního tělesa (např. sedání) bez ohledu na případné práce na samotném svršku.



Obr. 23 Predikce rozvoje vlnovitých deformací na základě předchozích měření měřícím vozem

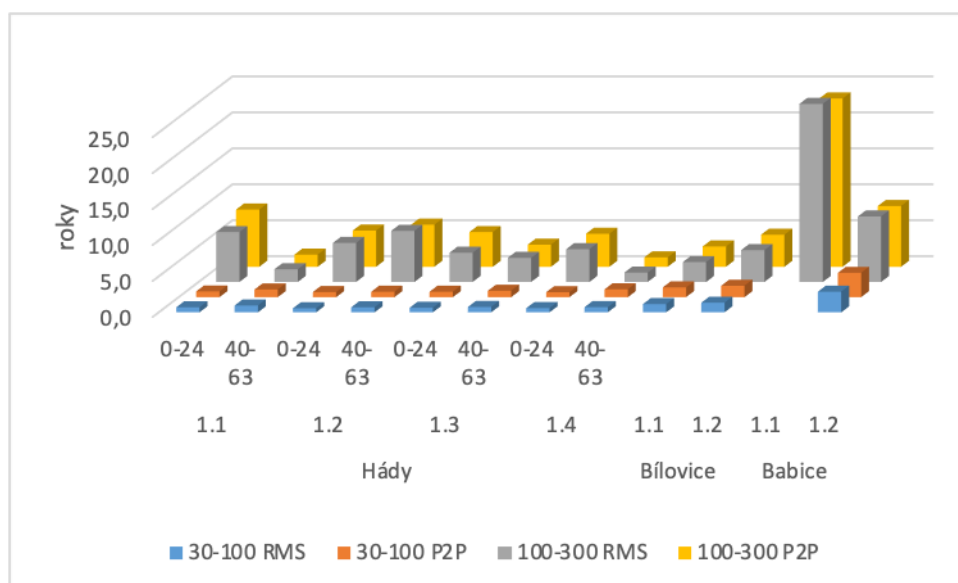
Pro měřící místo AD1.1 byla referenční hodnota rozvinuté vady před zásahem použita z roku 2016. Opravné práce proběhly v roce 2018 (hodnoty pro stanovení trendu byly z let 2018, 2019, 2020).

Hodnota P2Pms shodná se stavem před opravným zásahem byla pro měřící 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 [20], 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. 23).

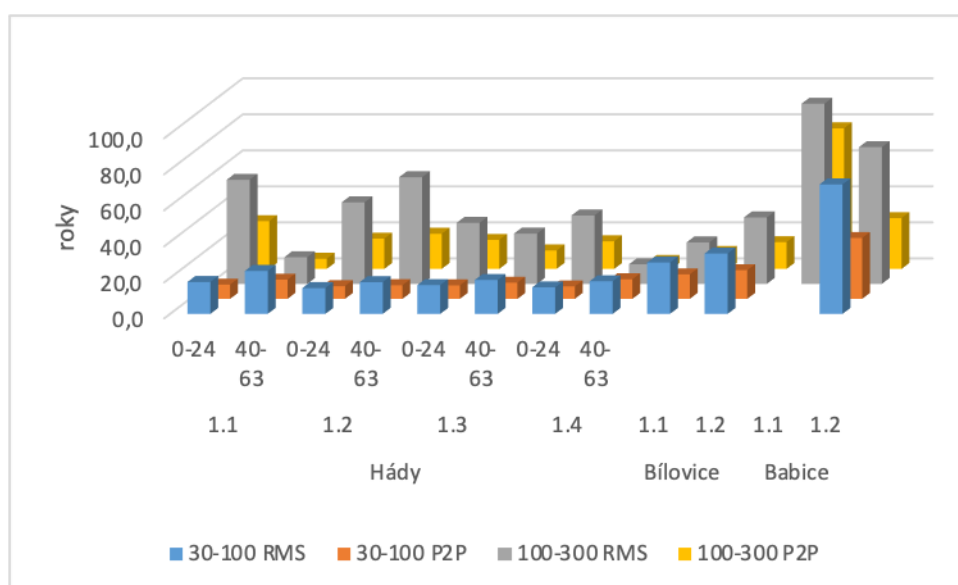
4.1.2 Podle stanovených mezí

Nejvhodnější se pro predikci jeví užití směrnic pro výpočet RMS a P2P na hodnoty odpovídající hodnotám z normy ČSN 13231-3:2006 [19].



Obr. 24 Čas potřebný k rozvoji vad na hodnoty z normy ČSN 13231-3:2006 [79]

Obdobně je možné pro predikci užití směrnic pro výpočet RMS a P2P na hodnoty odpovídající hodnotám z předpisu SŽDC S2/4 [21] (hladina 0,1 mm).



Obr. 25 Čas potřebný k rozvoji vad dle hladiny 0,1 mm z předpisu SŽDC S2/4 [21]

Nejdéle bude rozvoj trvat na úseku Babice (místa BS1.1 a BS1.2). Vzhledem k záporným směrnicím pásma 30–100 mm na místě BS1.1, byly odhady pro toto pásmo z hodnocení vyřazeny a hodnota RMS pro 100–300 je oříznuta.

4.2 POROVNÁNÍ RYCHLOSTI ROZVOJE S NEDOSTATKY PŘEVÝŠENÍ VE SLEDOVANÝCH ÚSECÍCH

Seřadíme-li místa v Tab. 5 od nejnižší hodnoty po nejvyšší a porovnáme-li s Tab. 4, dostaneme pro pásmo 100–300 mm (D3) stejné pořadí.

Tab. 5 Vážené nedostatky převýšení v obloucích pro všechny vlaky (nezaokrouhleno)

Oblouk	$I_{váž}$ [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.

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 odtržené 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 měřicího 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 vykoupěny 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] ČSN EN 13231-3. *Železniční aplikace - Kolej - Přejímka prací - Část 3: Přejímka reprofilace kolejnic v koleji*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 736374. 2012
- [7] BERTHEL, Holger a Ulf Gerber. Schienenfehler und Schienenschleifen. In: *Železniční dopravní cesta*, Děčín: VOŠ a SPŠ Děčín, 2009
- [8] ČSN EN 13231-5. *Železniční aplikace - Kolej - Přejímka prací - 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.
- [9] GERLICI, Juraj a Tomáš LACK. *Kontakt železničního dvojkolesia a koľaje*. Žilina: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2004. ISBN 80-8070-317-5
- [10] 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
- [11] 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>
- [12] Vyhláška č. 177/1995 Sb. kterou se vydává stavební a technický řád drah.
- [13] 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
- [14] KŽV. *Technical documentation, Laser roughness and rail corrugation measurement trolley, Salamander*. Praha: KŽV. 2020
- [15] TECNOGAMMA. *Operation and Maintenance Manual: Rail Corrugation Measurement System (RCMS)*. Morgano: Tecnohamma. 2012
- [16] 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.spravazeleznic.cz/documents/50004227/50157007/zdc2016-sbornik.pdf>

- [17] PLÁŠEK Otto. *Železniční konstrukce I - Mechanika kolejové jízdní dráhy* (skripty). Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007
- [18] VALEHRACH, Jan, Otto PLÁŠEK a Jaroslav SMUTNÝ. *Měření skluzových vln na železničních a tramvajových tratích*. Certifikovaná metodika, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2018
- [19] ČSN EN 13231-3. *Železniční aplikace - Kolej - Přejímka prací - Část 3: Přejímka reprofilace kolejnic v koleji*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Třídící znak: 736374. 2006
- [20] 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
- [21] 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

ŽIVOTOPIS

Jméno a příjmení: Ing. Jan Valehrach
Datum narození: 29. 4. 1986
Email: valehrach.j@fce.vutbr.cz

Vzdělání:

- 2013–dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Doktorský studijní obor Konstrukce a dopravní stavby, zaměření Železniční stavby
- 2011–2013 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Magisterský studijní obor Konstrukce a dopravní stavby, zaměření Železniční stavby
- 2011–2012 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Doplnující pedagogické studium
- 2006–2011 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Bakalářský studijní obor Konstrukce a dopravní stavby, zaměření Železniční stavby
- 1998–2011 Gymnázium Šlapanice, zaměření všeobecné

Zaměstnání:

- 2019–dosud Město Šlapanice, Komise územního rozvoje (člen)
- 2013–dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb, akademický pracovník (asistent)

Pedagogická činnost:

- Konstrukce a dopravní stavby
- Železniční stavby 1
- Železniční stavby 2
- Výuka v terénu
- Železniční konstrukce 1
- Vybrané statě ze železničních staveb 1
- Železniční stanice a uzly 1

Stáže:

- Technische Universität Dresden, Německo
- Newcastle University, Velká Británie

Výzkumné projekty (výběr):

- Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (TAČR TE01020168)
- Zlepšení technických a kapacitních parametrů železničního spojení jihomoravského a dolnorakouského regionu (TRANSREGIO) (ATCZ158TRANSREGIO)
- Výhybka 4.0 (TAČR CK01000091)
- Pokročilé technologie zřízení a obnovy konstrukčních vrstev tělesa železničního spodku s efektivním využitím materiálů z druhotných surovin (TRIO FV40081)
- Aparatura pro kontinuální měření rychlostí (FAST-J-16-3776)

Publikace (výběr):

- VALEHRACH, J.; PLÁŠEK, O. Vlnkovitost kolejnic. In *Kvalita staveb a oprav tratí železniční dopravní cesty*. Děčín: Vyšší odborná škol a Střední průmyslová škola strojní, stavební, a dopravní, Děčín, příspěvková organizace, 2019. s. 40-46. ISBN: 978-80-905733-6-9.
- VALEHRACH, J. Long-pitch Corrugation Measurement – Tram lines and Railway lines Comparison. In *9th International Scientific Conference of Civil Engineering and Architecture YOUNG SCIENTIST*. Košice: Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, 2017. s. 101-107. ISBN: 978-80-553-3136- 2.
- VALEHRACH, J.; ŘÍHA, T.; DUŠEK, E. Cant Excess and Cant Deficiency Evaluation in Relation to Train Speeds. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 2017, roč. 2017, č. 11, s. 80-85. ISSN: 2336-5382. DOI: <https://doi.org/10.14311/APP.2017.11.0080>
- VALEHRACH, J.; GUZIUR, P.; ŘÍHA, T.; PLÁŠEK, O. Assessment of rail long-pitch corrugation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, roč. 236, č. 1, s. 1-8. ISSN: 1757-899X. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/236/1/012048>
- VALEHRACH, J. Long-pitch Corrugation - Monitored Track Sections. In *8th International Scientific Conference of Civil Engineering and Architecture YOUNG SCIENTIST*. Košice: Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, 2016. s. 101-107. ISBN: 978-80-553-2537- 8.
- VALEHRACH, J.; ŠMÍD, J. Monitoring of Track Sections with Long-pitch Corrugation. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 2016, roč. 2016, č. 5, s. 63-68. ISSN: 2336-5382. DOI: <https://doi.org/10.14311/APP.2016.5.0063>

Projekční činnost (výběr):

- Výměna zákrytu tramvajové tratě na ul. Nové sady
- Stavební úpravy smyčky Komárov, parku a autobusové zastávky Komárov
- Stavební úpravy tramvajové tratě na ul. Křenová, úsek Štěpánská – Tržní
- Rekonstrukce tramvajové tratě Vídeňská, úsek Bohunická – Moravanské lány
- Projekt GPK staničních kolejí v TÚ 1901 v úseku Hoštejn - Štěpánov

Cizí jazyky:

- anglicky (středně pokročilý)
- německy (mírně pokročilý)

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.