



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

OJETÍ KOLEJNIC V OBLOUCÍCH MALÝCH POLOMĚRŮ

RAIL WEAR IN CURVES OF SMALL RADII

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavla Kubiszová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Říha

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav železničních konstrukcí a staveb
Studentka: **Bc. Pavla Kubiszová**
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Říha**
Akademický rok: 2024/25
Studijní program: N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Ojetí kolejnic v obloucích malých poloměrů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V úvodu práce bude uvedena charakteristika měřeného úseku a bude nastíněna metoda měření. Bude uvedeno, jakým způsobem byla vyhodnocena měřená data, a bude provedena jejich analýza. Na jejím základě budou publikovány závěry a případná doporučení.

Cíle a výstupy diplomové práce:

V rámci diplomové práce budou provedena měření ojetí kolejnic v úseku koleje s malým poloměrem a vysokým provozním zatížením. Měření budou provedena vícekrát, přibližně v pravidelných intervalech. Práce se bude zabývat zejména analýzou rozvoje ojetí v čase a také vztahem k poloze měřeného místa v rámci směrového oblouku.

Seznam doporučené literatury a podklady:

Český normalizační institut (ČNI) 2008 - Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha - Část 1: Projektování (ČSN 73 6360-1)

Esveld C. 2001 - Modern railway track (Zaltbommel: MRT-Productions)

Funke H. 1986 - Rail Grinding (Berlin: Transpress)

International Union of Railways (UIC) 2002 - Rail defects (UIC Code 712 R)

Správa železniční dopravní cesty s.o. (SŽDC) 2017 - Vady a lomy kolejnic (Regulation SZDC S67)

Nákresný přehled železničního svršku předmětného úseku

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 29. 3. 2024

L. S.

doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
vedoucí ústavu

Ing. Tomáš Říha
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá podrobným zkoumáním časového vývoje ojetí kolejnic v obloucích malých poloměrů. Věnuje se vlivům na ojetí kolejnic v konkrétních místech a popisuje souvislosti s ostatními faktory a geometrickými parametry koleje. V práci je zpracováno vlastní měření za pomoci profiloměru a měření z diagnostických prostředků správce dráhy.

KLÍČOVÁ SLOVA

ojetí kolejnic, opotřebení kolejnic, geometrické parametry koleje, profiloměr

ABSTRACT

The thesis deals with detailed investigation of the evolution of rail wear in curves of small radii. It focuses on rail wear at specific locations and describes links with other factors and track geometry parameters. This thesis processes own measurements using a profilometer and measurements from vehicles for railway diagnostics operated by railway infrastructure manager.

KEYWORDS

rail wear, track geometry parameters, profilometer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. KUBISZOVÁ, Pavla. *Ojetí kolejnic v obloucích malých poloměrů*. Brno, 2025. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí: Ing. Tomáš Říha.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Ojetí kolejnic v obloucích malých poloměrů* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 7. 1. 2025

Bc. Pavla Kubiszová
autor

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala především svému vedoucímu práce Ing. Tomáši Říhovi za ochotu, cenné rady a připomínky v rámci konzultací této diplomové práce. Poděkování patří také rodině a nejbližším za podporu při studiu.

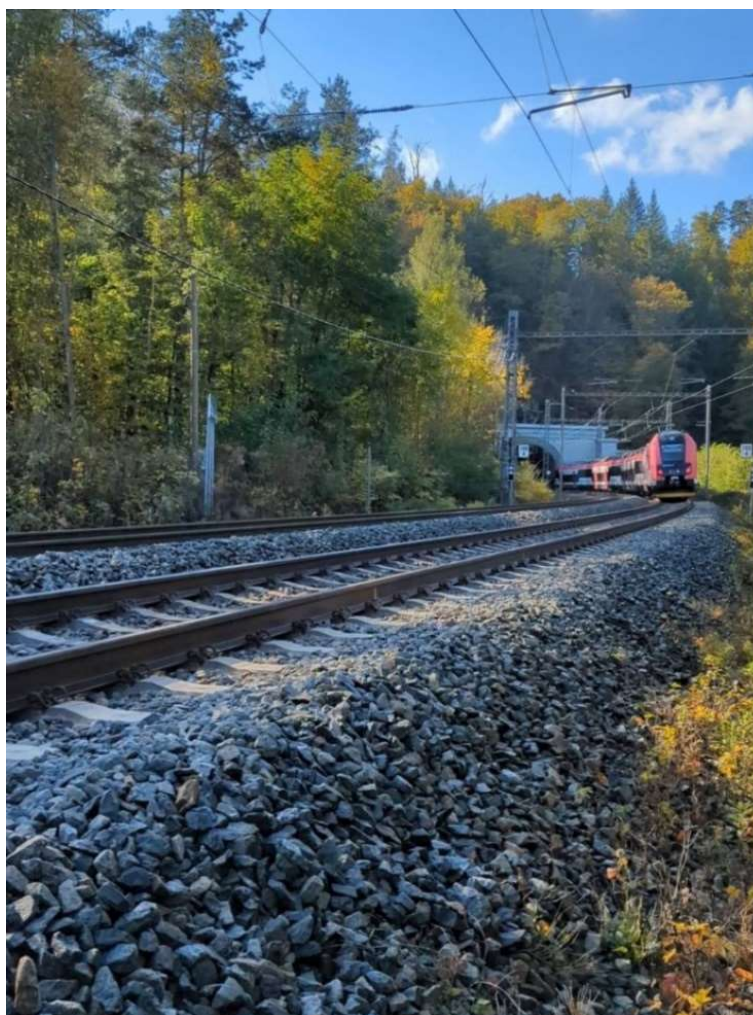
1	ÚVOD	10
2	SYSTÉM VOZIDLO – KOLEJ	11
2.1	JÍZDA VOZIDLA V KOLEJI	11
2.1.1	Jízda vozidla v přímé koleji	11
2.1.2	Poloha dvojkolí v oblouku	12
2.1.3	Traťové a jízdní odpory	13
2.2	SÍLY PŮSOBÍCÍ MEZI VOZIDLEM A KOLEJNICEMI	13
2.2.1	Heumannova metoda	13
2.2.2	Vogelova metoda	14
2.2.3	Rámová síla	15
2.2.4	Nevyrovnané boční zrychlení	15
2.3	KONTAKTNÍ GEOMETRIE	16
2.3.1	Geometrie na kontaktu kolo – kolejnice	16
2.3.2	Kuželovité profily kol	16
2.3.3	Ekvivalentní konicita	16
2.3.4	Kontaktní plocha mezi kolem a kolejnicí	17
3	TEORIE OJETÍ	19
4	MĚŘENÍ OJETÍ	20
4.1	ŠABLONA A KONTAKTNÍ PROFILOMĚR	20
4.2	MĚŘICÍ VŮZ	20
4.3	LASEROVÝ PROFILOMĚR	20
5	POPIS ZKOUMANÉHO ÚSEKU	23
5.1	SMĚROVÉ A VÝŠKOVÉ POMĚRY	24
5.2	PRAŽCE A KOLEJNICE	26
6	MĚŘENÍ DAT	28
6.1	VOLBA ÚSEKU A PŘÍPRAVA NA MĚŘENÍ	28
6.2	PODMÍNKY MĚŘENÍ	29
6.3	PRŮBĚH MĚŘENÍ	29
7	VYBRANÉ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ OJETÍ V MĚŘENÉM ÚSEKU	32
7.1	VLIV SMĚROVÉHO VEDENÍ	32
7.2	VLIV SMĚRU POJÍŽDĚNÍ KOLEJE A VÝŠKOVÉHO PROFILU	32
7.3	PROJETÁ ZÁTĚŽ	32
7.4	RYCHLOST	32
8	ZPRACOVÁNÍ VLASTNÍCH NAMĚŘENÝCH DAT	33
8.1	METODY VYUŽITÉ PŘI ZPRACOVÁNÍ DAT	33
8.1.1	Korelační analýza	33

8.2	NAMĚŘENÁ DATA.....	33
8.3	CHYBY MĚŘENÍ	37
8.4	PRŮBĚH OJETÍ PO DÉLCE OBLOUKU	41
8.5	VYŠETŘOVANÁ MÍSTA.....	43
8.5.1	Nerovnoměrný průběh.....	43
8.5.2	Oblast svarů.....	43
8.5.3	Průběh svislého ojetí vnitřní kolejnice	44
8.6	PRŮBĚH OJETÍ V ČASE	45
8.6.1	Nelinearita nárůstu.....	48
8.6.2	Boční ojetí vnější kolejnice	50
8.6.3	Zpomalení nárůstu ojetí	50
9	POROVNÁNÍ S DATY OD SPRÁVY ŽELEZNIC.....	53
9.1	INTERVAL A PŘESNOST MĚŘENÍ.....	53
9.2	POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT OJETÍ KOLEJNIC	53
9.2.1	Výstupy z dat ojetí kolejnic poskytnuté Správou železnic.....	53
9.2.2	Porovnání vlastních naměřených dat ojetí s daty Správy železnic.....	57
9.3	POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT OJETÍ S ROZCHODEM KOLEJE.....	63
9.3.1	Výstupy z dat rozchodu koleje a porovnání s ojetím kolejnic	63
9.3.2	Rozšiřování rozchodu koleje.....	69
9.3.3	Rozchod koleje po délce oblouku.....	71
10	ZÁVĚR.....	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	74
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	76
	SEZNAM PŘÍLOH	77
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	77
	SEZNAM TABULEK.....	78
	SEZNAM GRAFŮ	78
	PŘÍLOHY.....	80

1 Úvod

Tato práce zkoumá vývoj ojetí kolejnic v oblouku malého poloměru a vlivy na jeho průběh v konkrétních místech. Zpracována jsou vlastní data naměřená pomocí profiloměru a data z diagnostických prostředků správce dráhy.

Diplomová práce se zaměřuje zejména na podrobné zkoumání vývoje ojetí v rané fázi životnosti kolejnic. Věnuje se měření ojetí kolejnic pomocí profiloměru s vysokou přesností měření. Vyšetřuje měřením zachycené jevy a hledá souvislosti s jinými faktory, především pak geometrickými parametry koleje.



Obrázek 1: Fotka z měřeného úseku [autor]

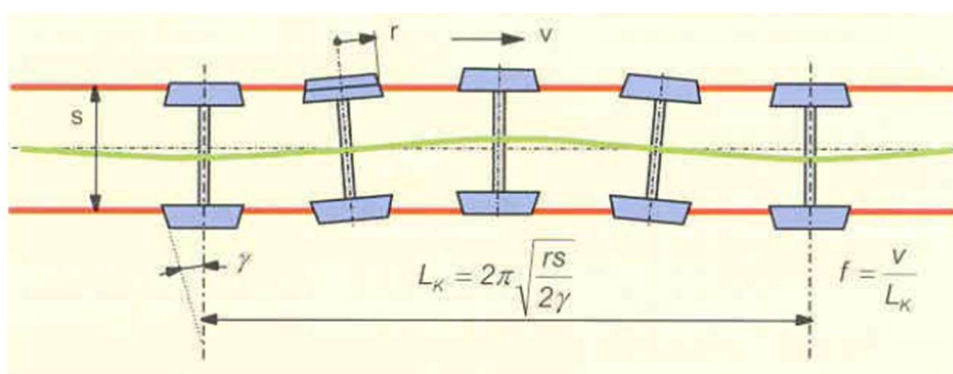
2 Systém vozidlo – kolej

2.1 Jízda vozidla v koleji

Interakce mezi vozidlem a kolejí vytváří složitou mechanickou soustavu. Pro železniční vozidlo má nosnou a vodící funkci dvojkolí, které je základním prvkem pojezdu vozidla. Dvojkolí se skládá z nápravy a dvou kol a jeho uložení vztahujeme k vozové skříni nebo rámu podvozku. Přenos sil mezi dvojkolím a vozovou skříní zajišťují nápravová ložiska. [1]

2.1.1 Jízda vozidla v přímé koleji

Pro způsob jízdy dvojkolí v koleji je rozhodující profil kolejnice a jízdní obrys dvojkolí. Vlivem úklonu kolejnic a kuželovitosti kol se vozidla v přímé koleji dostředují do osy koleje. Podle Klingelovy teorie se při vychýlení dvojkolí změni poloměry odvalování kol a dvojkolí se začne pohybovat v sinusových vlnách. [1] [2]

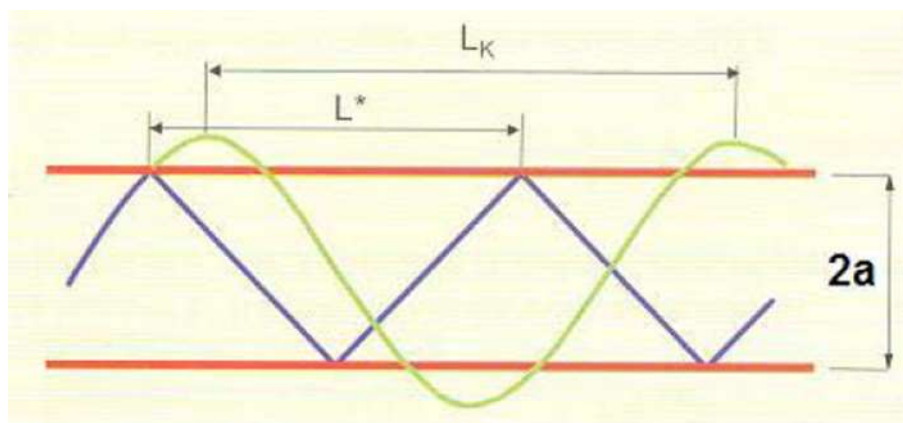


Obrázek 2: Sinusový pohyb dvojkolí [2]

Vzorec pro odhad délky sinusové vlny L_K uvedený v obrázku č. 2 je dán následujícími parametry: poloměr kola R , vzdálenost styčných kružnic s a úkos jízdní plochy γ . Do výpočtu je nutno zahrnout, zda jsou dva podvozky spojeny pevně či nikoli. [1] [2]

Periodický pohyb dvojkolí neboli také Klingelův pohyb byl popsán v teorii, která pro analýzu využívá dokonale rovnou trať a aplikuje značná zjednodušení. Uvažuje čistě kinematický pohyb a zanedbává působení dalších sil působících při jízdě vozidla, včetně jeho adheze. [2]

Pokud do teorie zahrneme i dynamické chování, získáváme namísto harmonického pohybu tzv. „cik-cak“ pohyb. Dvojkolí, které není schopné dostředění, začne najíždět okolky na pojížděnou plochu kolejnice, díky čemuž se pak náhle mění směr jízdy dvojkolí směrem k druhé kolejnici. Cyklicky se opakující pohyb pak vytváří vysoké namáhání kolejového roštu. [1] [2]

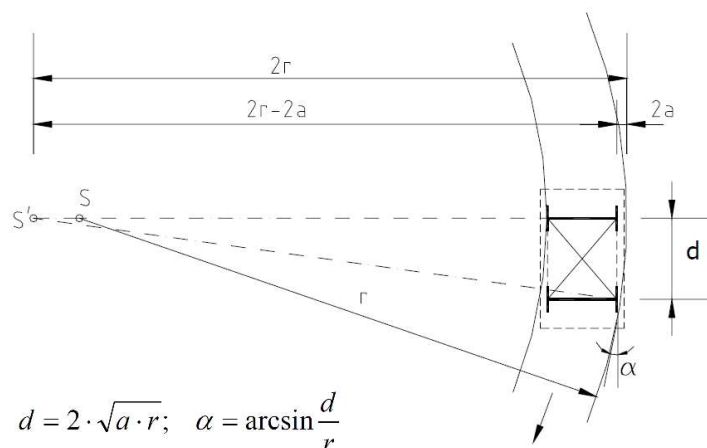


Obrázek 3: Pohyb „cik-cak“ – vliv narážení obruby na kolejnici [2]

2.1.2 Poloha dvojkolí v oblouku

Při jízdě obloukem osa zadního (nevodícího) podvozkového dvojkolí směřuje přibližně do středu oblouku. Poloha předního (vodícího) dvojkolí je dána úhlem náběhu α . Ten je vyjádřen jako úhel mezi styčnou kružnicí vnějšího kola a tečnou ke kolejnici zkonstruovanou v bodě dotyku styčné kružnice vnějšího kola.

Nižší odpor při průjezdu vozidla obloukem zajišťují menší hodnoty úhlu náběhu. Úhel α je minimální vždy pro ideální hodnotu rozvoru vozu (nebo podvozku) právě pro příslušný poloměr oblouku. Optimální rozvor vozu či podvozku, a tedy ideální postavení vozidla v oblouku se dá vypočítat podle vzorce uvedeného v obrázku č. 4. [1]



Obrázek 4: Ideální postavení vozidla nebo podvozku v oblouku [1]

Zde d označuje rozvor vozu nebo podvozku, $2a$ vůli mezi rozchodem koleje a rozchodem okolků, r poloměr vnějšího kolejnicového pásu a α úhel náběhu dvojkolí. [1]

2.1.3 Traťové a jízdní odpory

Pro pohyb vozidla v koleji je faktorem také odpor proti tažné síle hnacího vozidla. Celkový odpor je dán traťovými a jízdními odpory a tíhou vozidla nebo vlaku. Přehled traťových a jízdních odporů uvádím na obrázku č. 5. [1]



Obrázek 5: Traťové a jízdní odpory [1]

2.2 Síly působící mezi vozidlem a kolejnicemi

Mezi dvojkolím a kolejnicemi působí při průjezdu obloukem příčné síly, na jejichž velikost má vliv řada parametrů. Faktory jsou rychlost vozidla V , hmotnost vozidla m , poloměr oblouku R , převýšení D , rozvor podvozku nebo celého vozu d , součinitel tření na styku kolo – kolejnice f , rozchod koleje u (a jeho rozšíření), rozchod dvojkolí, tuhost konstrukce vozidla a tvrdost kolejnic. [3]

Při jízdě v koleji dochází ke složitému dynamickému pohybu, který je obtížně popsitelný pohybovými rovnicemi. Pro zjednodušení popisu se vychází z idealizovaného kvazistatického vedení vozidla v koleji. Kvazistatické hodnocení vedení vozidel v oblouku má za cíl posoudit silové účinky mezi vozidlem a kolejí a stanovit bezpečnost proti vykolejení. Pro zjednodušené silové řešení polohy vozidla v oblouku se používají nejčastěji dvě metody, a to Heumannova a Vogelova. [1] [4]

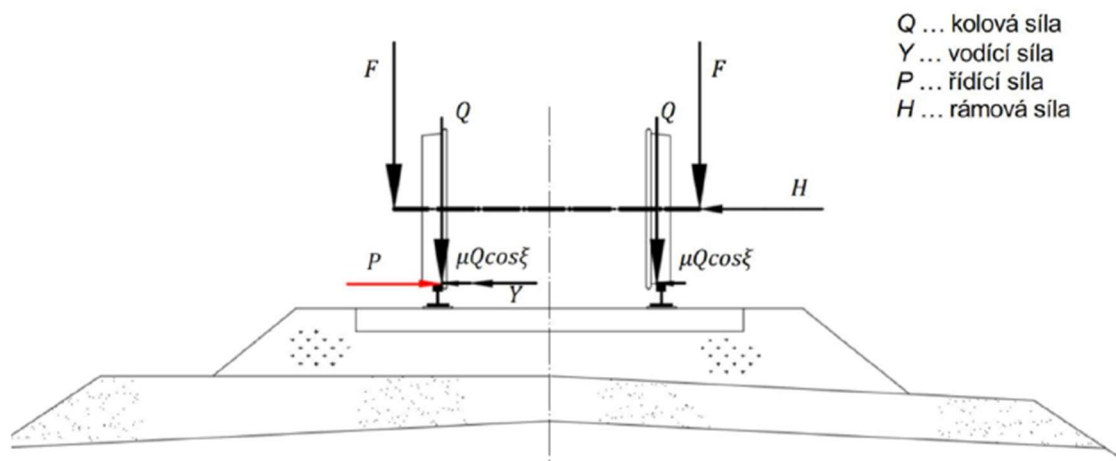
2.2.1 Heumannova metoda

V oblouku se dvojkolí půdorysně pohybuje po kružnicové dráze a vykonává tak rotační a translační pohyb zároveň. Rotační pohyb znamená postupné natáčení vozidla a translační pohyb odpovídá dopřednému pohybu při odvalování kol.

Heumannova metoda využívá grafické zobrazení k výpočtu velikosti řídící síly P . Tato metoda vyšetřuje momentovou rovnováhu adhezních a řídících sil, tedy rovnováhu mezi akcí železničního vozidla a reakcí kolejového roštu. Moment adhezních sil působící proti

2.2.3 Rámová síla

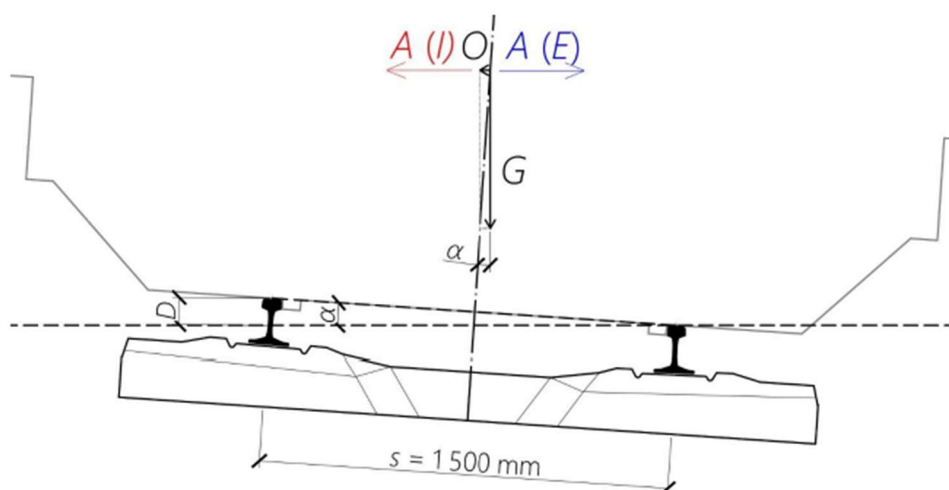
Kromě základní sestavy sil působící mezi kolem a kolejnicí vznikají ještě síly působící mezi rámem vozidla a podvozkem. Tato základní sestava sil zobrazena na obrázku č. 8 zanedbává setrvačné síly od hmotnosti dvojkolí a zrychlení v příčném a podélném směru. [3]



Obrázek 8: Síly působící mezi dvojkolím a kolejí [5]

2.2.4 Nevyrované boční zrychlení

Dalším z faktorů je síla od nevyrovaného bočního zrychlení A . Tato síla vzniká při průjezdu vozidla obloukem s přebytkem nebo nedostatkem převýšení. Při průjezdu obloukem působí na vozidlo odstředivá a gravitační síla. Pokud výslednice těchto sil není kolmá ke spojnici temen kolejnicových pásů, ale dochází k odchýlení, vzniká vnější síla od nevyrovaného bočního zrychlení. [3] [5]



Obrázek 9: Nevyrované boční zrychlení [5]

2.3 Kontaktní geometrie

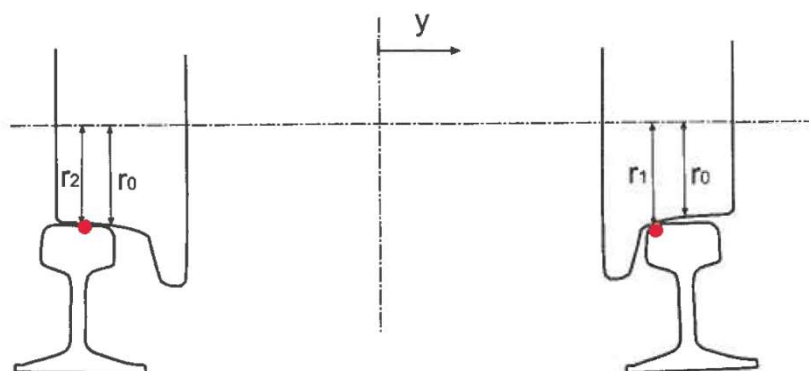
2.3.1 Geometrie na kontaktu kolo – kolejnice

Hlavními parametry, které ovlivňují kontaktní geometrii na styku kolo – kolejnice jsou geometrie profilů kol a kolejnic, rozchod kolejnic a jejich úklon. Tyto parametry se používají pro posouzení kontaktní geometrie nebo jako vstupní data pro simulace dynamiky pohybu železničních vozidel.

Kromě zmíněných faktorů mají vliv také pružnost kolejnicových podpor a odchylky v uložení kolejnic, a to jak bočně, tak svisle. [7]

2.3.2 Kuželovité profily kol

Konkrétní bod dotyku pro pravé a levé kolo dvojkolí bývá běžně odlišný. Rozdíl poloměrů styčných kružnic je vyjádřen pomocí funkce Δr , která je závislá na příčné poloze dvojkolí v koleji. Funkce Δr ovlivňuje chování dvojkolí na rovných úsecích trati a síly působící mezi kolem a kolejnicí v obloucích. [2] [6]



Obrázek 10: Bod dotyku a rozdílný poloměr odvalování [6]

Kuželovité profily kol se vyznačují vysokou počáteční jízdní stabilitou, ale dochází k většímu opotřebení kolejnice vlivem jednobodového kontaktu. Příímým následkem je pak zhoršení jízdních vlastností vlivem opotřebení kola i kolejnice.

Chování kuželovitého profilu kola při zanedbání nelinearity kontaktu kola s kolejnicí je možné popsat pomocí ekvivalentní konicity. [6]

2.3.3 Ekvivalentní konicita

Ekvivalentní konicita je parametr hojně využívaný pro charakteristiku geometrie kontaktu kola s kolejnicí a jeden z klíčových parametrů pro bezpečnost na železnici. Ovlivněna je rozchodem kolejnic, sklonem kolejnic a profilem kola a kolejnice.

Pro jízdu v přímé je výhodná nízká ekvivalentní konicita, protože frekvence pohybu po sinusoidě bude menší. Pro jízdu v oblouku je výhodná pro stabilní jízdu vyšší ekvivalentní konicita, úsek je totiž překonán s menším prokluzem i vibracemi.

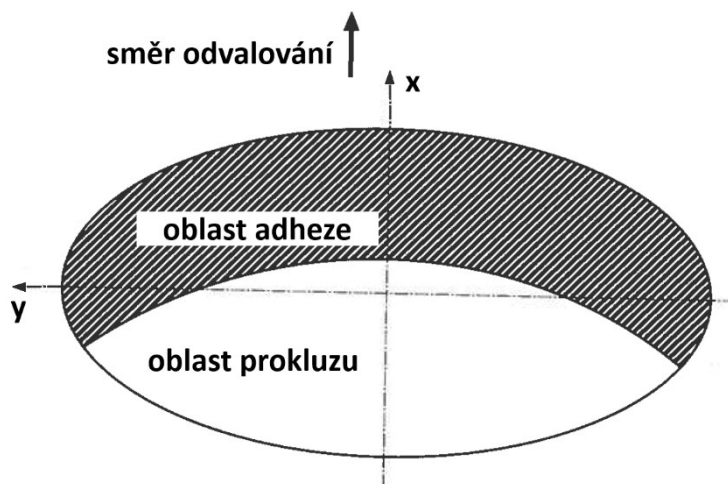
Hodnota ekvivalentní konicity se snižuje s rozšiřováním rozchodu a je nižší pro úklon kolejnic 1:20, vyšší pro úklon 1:40. [6] [8]

Pro výpočet ekvivalentní konicity lze využít několik způsobů. Ekvivalentní linearizace, dle vzorce podle Klingela, lineární regrese funkce dle rozdílných poloměrů odvalování, nebo harmonická linearizace. Podrobnosti k výpočtům ekvivalentní konicity uvádí norma ČSN EN 15302. [7]

Pokud bychom chtěli stanovit hodnotu ekvivalentní konicity, můžeme využít i vlastní měření. Například Systém Calipri, který byl použit v této práci pro měření opotřebení kolejnic, ve svých modelových softwarech nabízí měření všech parametrů, díky kterým lze ekvivalentní konicitu získat. Je nutné změřit profil kola a jeho poloměr, vzdálenost kol, profil kolejnice, geometrii tratě a převýšení koleje. [8]

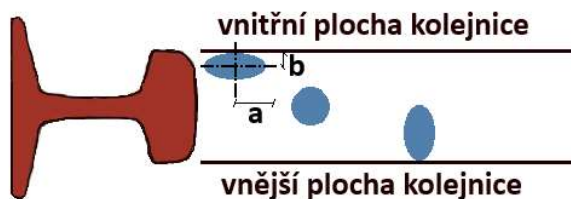
2.3.4 Kontaktní plocha mezi kolem a kolejnicí

Při kontaktu kolo – kolejnice dochází k odvalování kola po kolejnici, ale také prokluzu. Rozdílné chování je charakteristické pro různé části styčné plochy. [6]



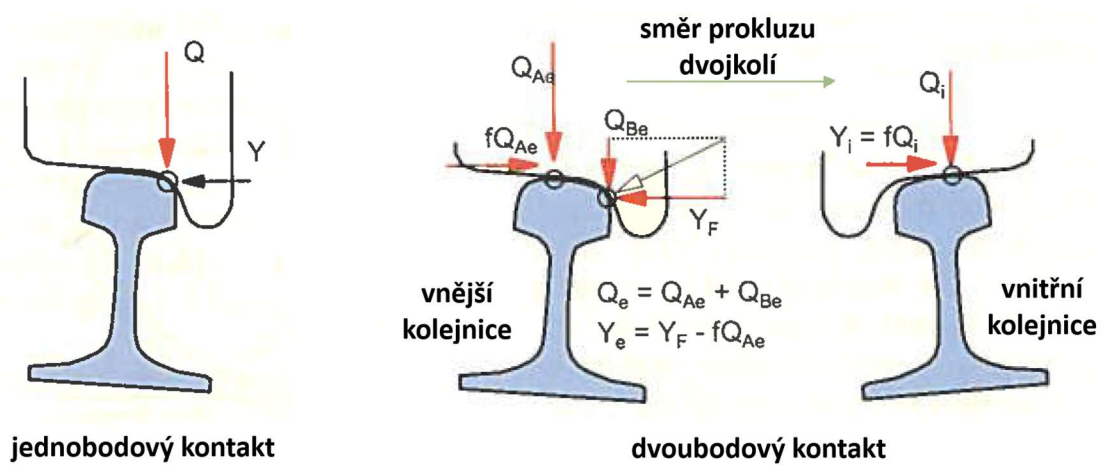
Obrázek 11: Kontaktní plocha [6]

Podrobnosti o kontaktním namáhání na styku kola a kolejnice vysvětluje Hertzova teorie. Pružné deformace kola a kolejnice způsobují podle této teorie dotykovou plošku eliptického tvaru. Rozměry kontaktní elipsy jsou závislé na velikosti normálových sil působících na styku kolo – kolejnice. [2] [6]



Obrázek 12: Příklady kontaktních plošek [2]

Aplikace Hertzovy teorie vysvětluje rozdíl působení vodorovných a svislých sil při jednobodovém a dvoubodovém kontaktu.

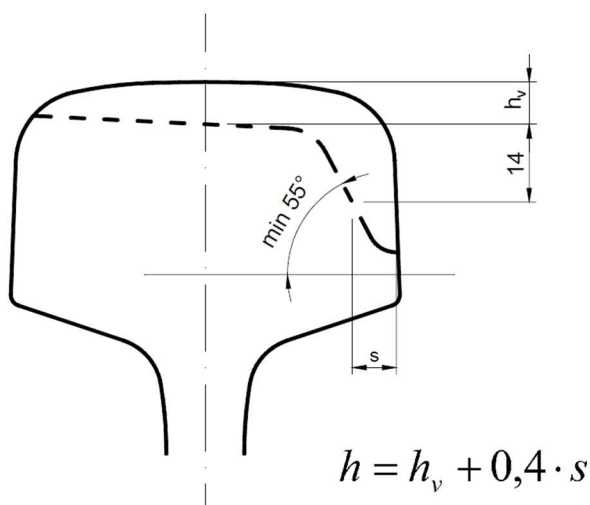


Obrázek 13: Jednobodový a dvoubodový kontakt [2]

3 Teorie ojetí

Kolejnice se opotřebovává korozí a ojetím neboli opotřebením otěrem. Tvar ojíždění je dán geometrickým a konstrukčním uspořádáním koleje. V přímých úsecích tratě dochází především k výškovému ojetí hlavy kolejnic, v obloucích dochází navíc k bočnímu ojetí. Pro oblouky s velkým počtem vlaků projíždějících s přebytkem převýšení mohou vznikat díky roztlačení vnitřního kolejnicového pásu převalky.

Velikost ojetí závisí na kvalitě materiálu kolejnic, jejich průřezu, a na intenzitě dopravy. Ojetí také ovlivňuje tvrdost a materiál kol a kolejnic. Optimální poměr tvrdosti materiálu obručí kol a kolejnic je kolem 1,2. [3]



Obrázek 14: Ojetí hlavy kolejnice [9]

Svislé ojetí h_v je definováno jako výškový rozdíl ojetého průřezu kolejnice k průřezu nové kolejnice, měřeného v její ose. Boční ojetí s se měří v úrovni 14 mm pod temenem ojeté kolejnice a jedná se o horizontální rozdíl ojetého průřezu kolejnice vůči novému průřezu kolejnice.

Srovnané výškové ojetí h se stanovuje ze vzorce uvedeného na obrázku. Výsledná hodnota je zaokrouhlena na celé milimetry. [3]

Nižších hodnot ojetí můžeme dosáhnout mazáním styčných ploch kola a kolejnice, a to zejména ve směrových obloucích. Mazníky se umísťují na kola hnacích vozidel, případně do koleje. S redukcí ojetí může pomoci také použití oceli s vyšší otěruvzdorností. Opotřebení snížíme také vhodnou úpravou tvaru kol a kolejnic, u současných nových vozidel se využívá jízdní obrys UIC ORE. [9] [3]

4 Měření ojetí

Tato kapitola se zabývá jednotlivými metodami měření profilů kolejnic a blíže se věnuje metodě použité při vlastním měření dat.

4.1 Šablona a kontaktní profiloměr

Nejjednodušším pro malý počet měření, ale zato velmi nepřesným způsobem měření profilu kolejnice jsou šablony. Prostorové šablony PŠR-1 a PŠR-2 pomáhají určit výškové a tvarové nerovnosti na jízdní ploše kolejnic. Používají se pro zjištění stavu opotřebení provozem běžně v trati, v srdcovkách, ale také v dilatačních zařízeních. [10]

Kontaktní profiloměr měří ojetí kolejnice tak, že zaznamenává posun jehel obepínajících profil kolejnice vůči referenčnímu posunu odpovídající novému profilu kolejnice. Měření je pomalé, vhodnější pro menší rozsah měřených bodů. [3] [10]

4.2 Měřicí vůz

Pro železniční síť zajišťuje měření správce infrastruktury. V České republice se tedy ve většině případů jedná o Správu železnic, konkrétně organizační jednotku CTD – Centrum telematiky a diagnostiky. Pro měření se používají diagnostické prostředky MVŽSv, MVŽSv2, MD a EM100. Tedy měřicí vozy železničního svršku a měřicí drezíny.

Měřicí prostředky se liší jednak specifickými měřicími systémy příčného profilu kolejnic, ale také krokem měření. Koridorové tratě jsou měřeny 1–3x ročně, dle příslušného rychlostního pásma. Využity jsou zpravidla nejmodernější měřicí vozy, kterými jsou měřicí vozy železničního svršku (MVŽSv a MVŽSv2). Dále se věnují pouze MVŽSv2, kterým bylo uskutečněno měření v našem úseku. [11] [12]

Měření je prováděno optickými jednotkami, jejichž kamery snímají obraz příčného profilu kolejnice vytvořený laserovým paprskem. Infračervené světlo umožňuje zaznamenat profil bez rušivých vlivů okolního světla. Naměřená data se porovnávají s profily nových kolejnic dle typu a je vyhodnoceno boční a svislé opotřebení hlavy kolejnice. Měřicí perioda je 0,25 m s přesností měření 1 mm. [11]

4.3 Laserový profiloměr

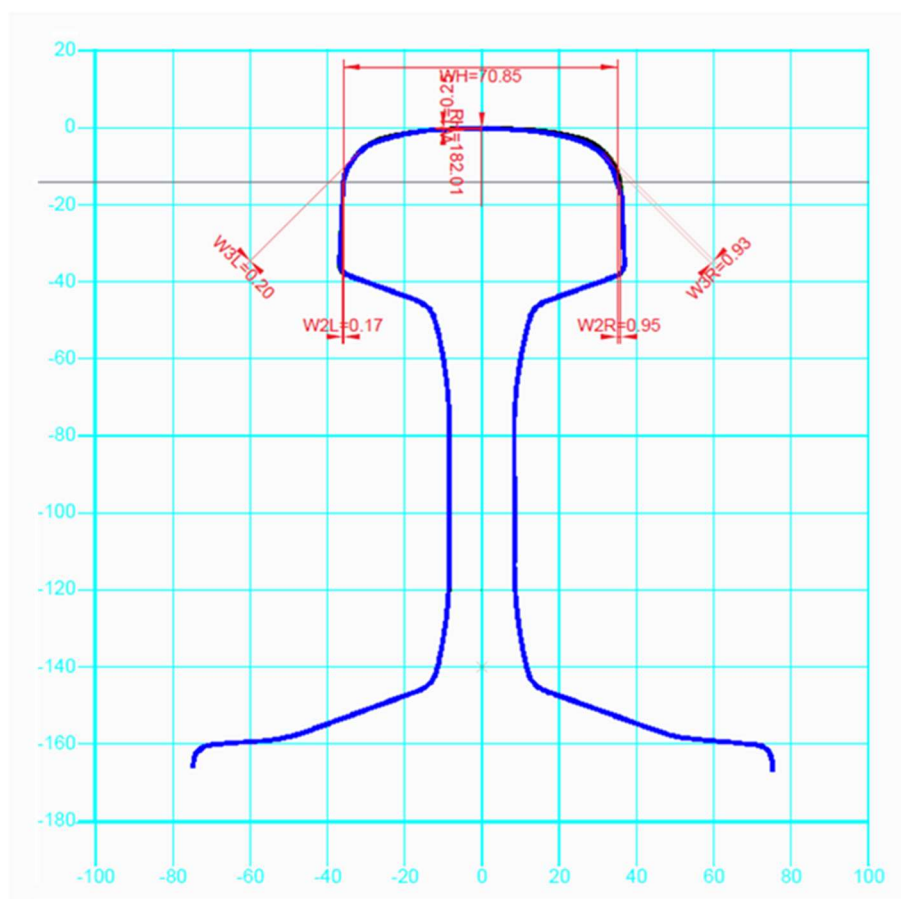
Pro laserový profiloměr jsou hlavními výhodami vysoká přesnost, snadné použití a vyšší rychlost měření, než je tomu u kontaktních metod. Laserové profiloměry fungují na různých principech. V rámci mého měření byl použit přístroj Calipri C42, který využívá technologii laserového řezu. [13] [14]

Profiloměr Calipri C42 je multifunkčním nástrojem navrženým pro kompletní měření systému kolo – kolejnice. Bezkontaktní měření využívá technologii červeného laseru s vlnovou délkou 600 nm. Přesnost měření je $\pm 0,08$ mm. [15] [16] [17]

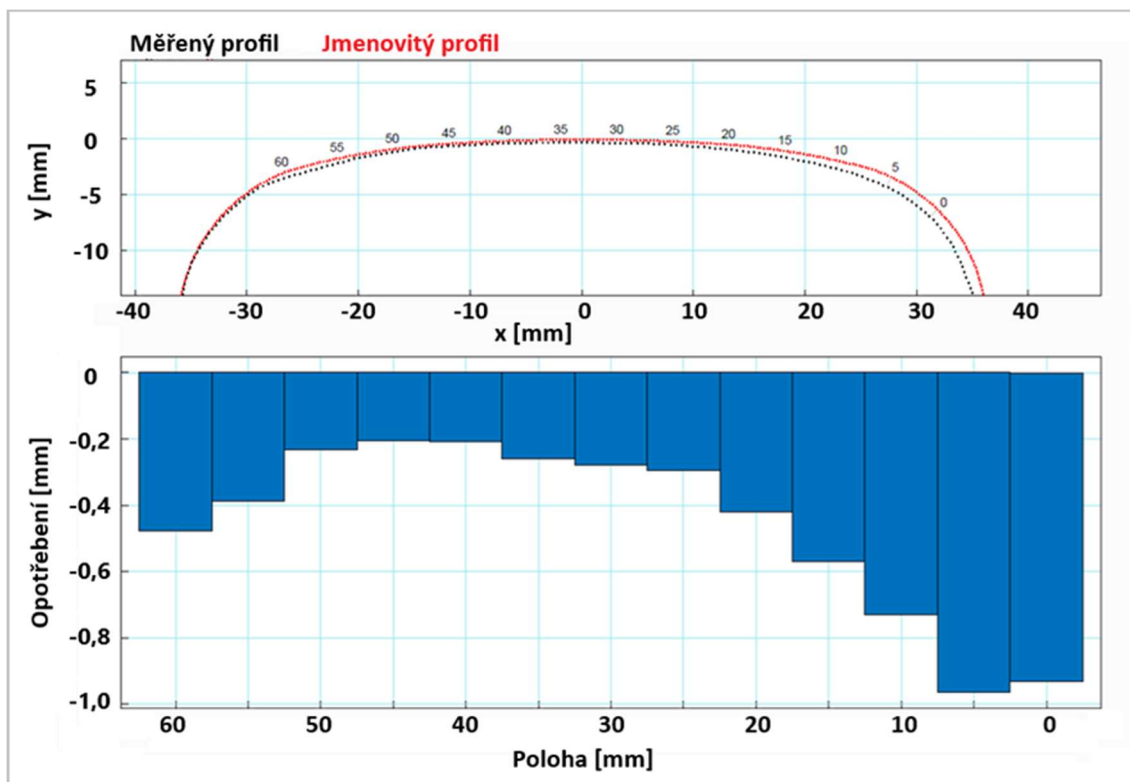
Modul pro měření kolejnic umožňuje měření všech tvarů širokopatných a žlábkových kolejnic. Naměřené parametry lze srovnat s referenčním profilem kolejnic a stanovit tak boční a svislé ojetí. Z měření dále získáme šířku hlavy kolejnice a její poloměr. Zobrazeno je také detailní opotřebení hlavy kolejnice pro jednotlivá měření. [15] [16]

Rozsah využití přístroje Calipri C42 je zajištěn softwarovými modely. Přístroj lze využít k měření parametrů kol, opotřebení brzdových kotoučů a profilu kolejnic, a to i ve výhybkách. Měření parametru kol zahrnuje profil kola, jeho průměr, rozkolí a ekvivalentní konicitu. Modulární systém pro měření ekvivalentní konicity zvládne graficky zobrazit kontaktní bod kolo – kolejnice během jízdy a vykreslit rozdíl průměrů pravého a levého kola. [8] [15]

Dále uvádím příklady výstupů z vlastního měření opotřebení kolejnice pomocí profiloměru Calipri C42.



Obrázek 15: Detail profilu levé (vnější) kolejnice



Obrázek 16: Detail opotřebení hlavy levé (vnější) kolejnice

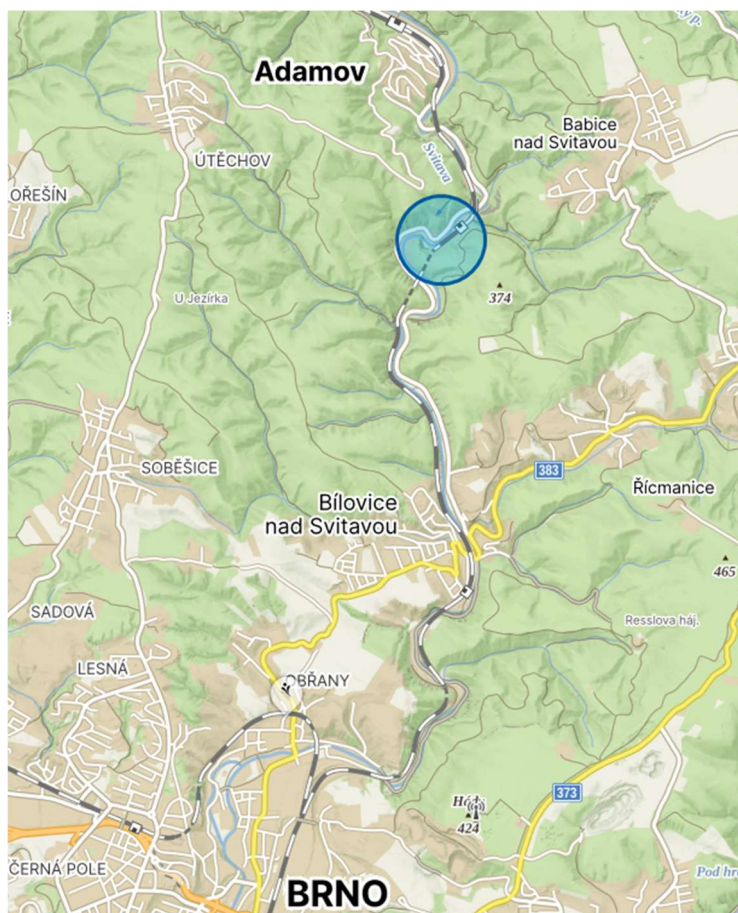
5 Popis zkoumaného úseku

Měření se uskutečnilo na silně zatížené dvojkolejný koridorové trati Brno – Česká Třebová. Trať je specifická vyšším provozním zatížením a četnými oblouky malých poloměrů. Díky této kombinaci dochází k poměrně rychlému rozvoji ojetí kolejnic.

Na úsek mezi Brnem a Blanskem, ležící na I. tranzitním železničním koridoru se po rozsáhlejší rekonstrukci a nickolejním provozu částečně vrátila doprava 11. prosince 2022. Plné obnovení provozu proběhlo zhruba v polovině roku 2023. Opotřebenění kolejnic z posledního vlastního měření provedeného v prosinci roku 2024 tedy odpovídá dvěma letům provozu. [5] [18] [19]

Vybraný úsek tvořený jedním směrovým obloukem leží v koleji č. 1 mezi kilometry 168,181 a 168,491. Oblouk o poloměru 373 m, s přechodnicemi odlišné délky má převýšení 132 mm. Kolej č. 1 je běžně pojížděna proti směru staničení. První část úseku, mezi km 168,181 až 168,260 leží v tunelu. Konec úseku se nachází před zastávkou Babice nad Svitavou.

Celý měřený úsek je pojížděn po spádu koleje a v km 168,325 leží lom nivelety.



Obrázek 17: Mapa zobrazující místo měření [21]

5.1 Směrové a výškové poměry

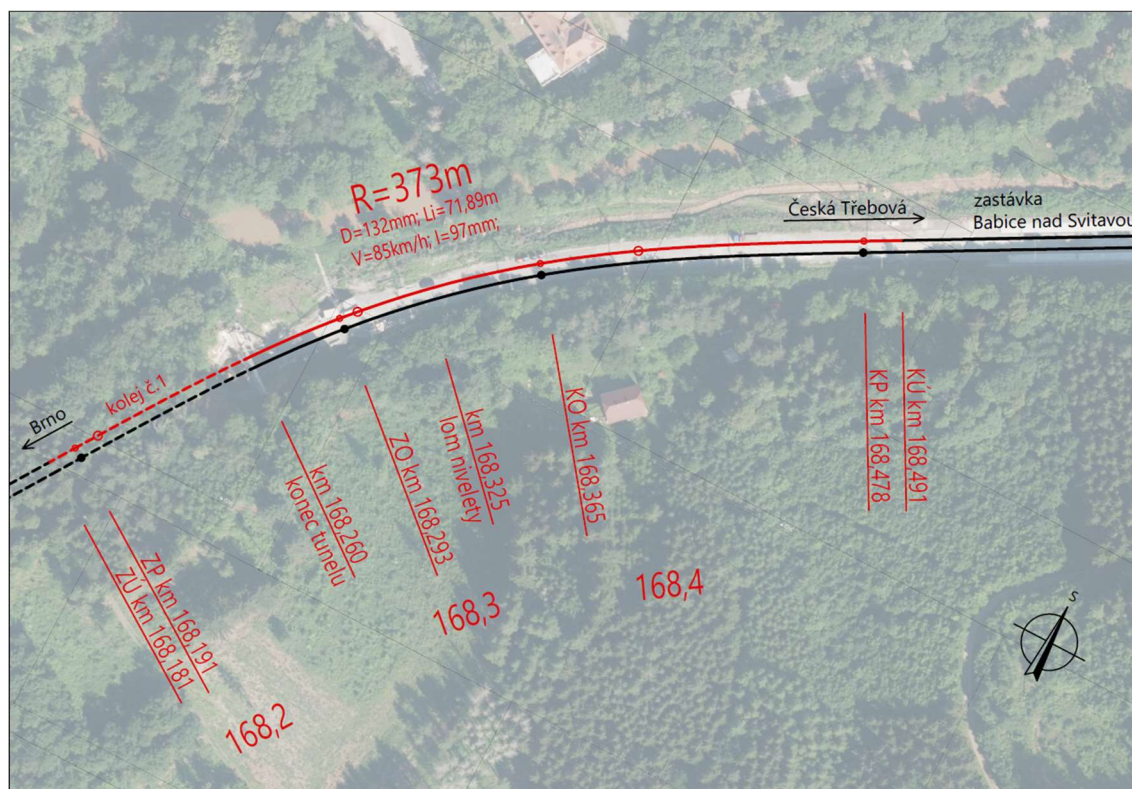
Přesná specifikace směrových a sklonových poměrů je uvedena v následujících tabulkách. Údaje byly převzaty z nákrešného přehledu železničního svršku [20]. Charakteristice měřeného úseku se dále podrobně věnuji v kapitole č. 6.

Tabulka 1: Směrové poměry

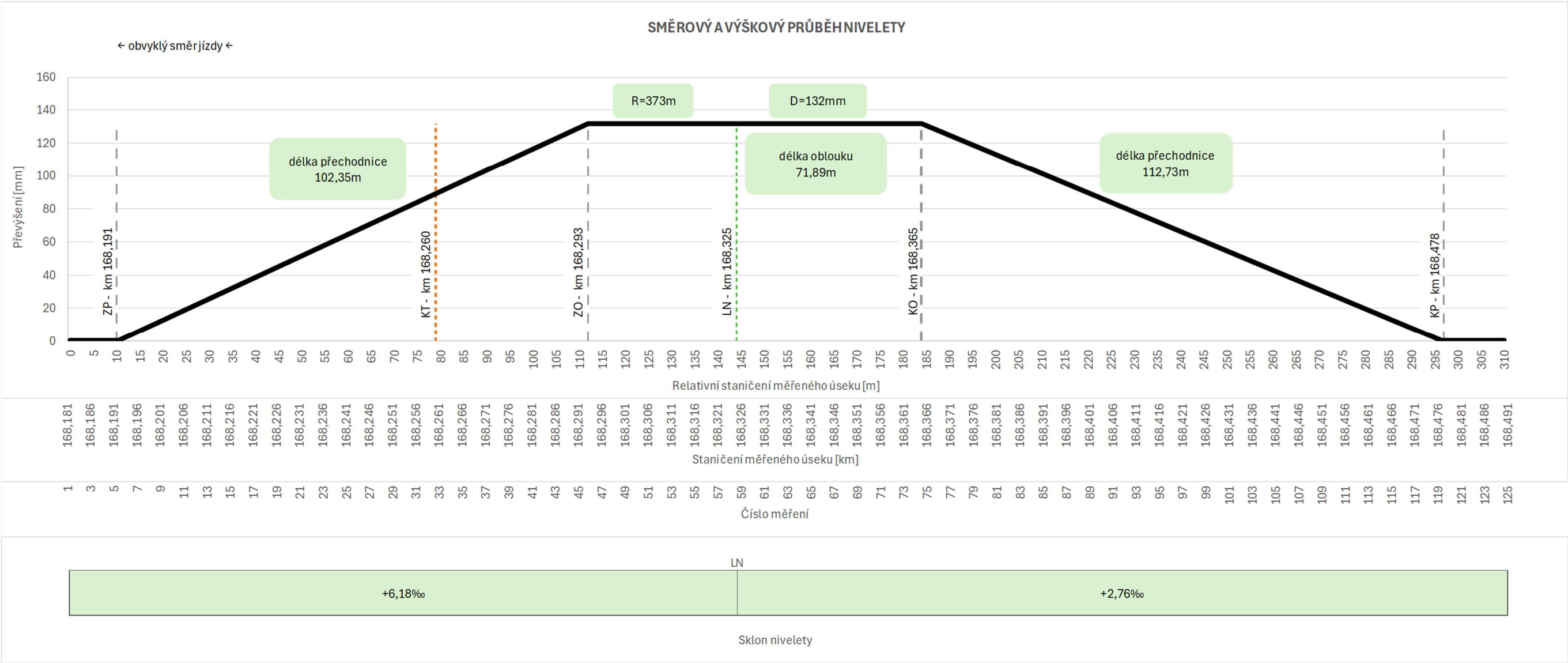
Staničení [km]	Označení	Popis	Délka [m]
168,181 000	ZÚ		10,000
168,191 000	ZP	Přechodnice , n=9,1V	102,350
168,293 000	ZO	Oblouk R=373 m, D=132 mm, V=85 km/h, V _k = V ₁₃₀ = V ₁₅₀ =90 km/h	71,890
168,365 000	KO		
168,478 000	KP	Přechodnice , n=10,0V	112,730
168,491 000	KÚ		13,000

Tabulka 2: Sklonové poměry

Staničení [km]	Označení	Sklon [‰]	Délka [m]
168,181 000	ZÚ	+6,18	144,000
168,325 000	LN	+2,76	166,000
168,491 000	KÚ	+2,76	



Obrázek 18: Detail měřeného úseku na ortofoto mapě



Graf 1: Směrový a výškový průběh nivelety

5.2 Pražce a kolejnice

Trať v tomto úseku leží na pražcích B91T s pružným bezpodkladnicovým upevněním kolejnic W14 od firmy Vossloh. Pražce jsou uloženy v rozdělení „u“, tedy po 600 mm. Pražce mají návrhový rozchod 1437 mm a jsou opatřeny podražcovými podložkami. [20][22]

Na měřeném úseku jsou použity kolejnice tvaru 60 E2 s délkou kolejnicových pásů 120 m. V tomto úseku trati jsou pravděpodobně v obloucích použity kolejnice z ocele R350HT s větší otěruvzdorností.

Naměřená staničení a typy svarů jsou uvedeny v tabulce č. 3. Po směru staničení jsou první svary v kolejnici zřízeny technologií stykovou s odtavením a další dva technologií aluminotermického svařování.

Nákresný přehled železničního svršku neposkytoval v době zpracování veškeré informace o kolejnicích a nepodařilo se ani jejich dodatečné získání. [20]

Tabulka 3: Naměřená staničení svarů

Popis	Staničení [km]	Typ svaření
pravá (vnitřní) kolejnice	168,293 460	stykové s odtavením
	168,414 020	aluminotermické
levá (vnější) kolejnice	168,293 390	stykové s odtavením
	168,413 460	aluminotermické



Obrázek 19: Fotka svaru levé (vnější) kolejnice v km 168,293 390 [autor]



Obrázek 20: Fotka svaru pravé (vnitřní) kolejnice v km 168,414 020 [autor]

6 Měření dat

Naplánováno bylo celkem 6 měření během 7 měsíců. Vlastní měření proběhlo ve 4–7týdenních intervalech, a to v období od šestého do dvanáctého měsíce roku 2024. Měření se uskutečnila v datech 18. 6., 26. 7., 27. 8., 16. 10., 15. 11., a 27. 12. roku 2024. Počet dnů od začátku sledování a interval mezi jednotlivými sadami měření uvádím v následující tabulce.

Tabulka 4: Intervaly mezi jednotlivými sadami měření

datum	18.6.2024	26.7.2024	27.8.2024	16.10.2024	15.11.2024	27.12.2024
pořadový den měření	0	38	70	120	149	191
počet dní mezi sadami		38	32	50	29	42

6.1 Volba úseku a příprava na měření

Vzhledem k použité metodě měření bylo nutné předem dobře zvážit několik faktorů. Důležitá byla správná volba objemu měření s ohledem na časovou náročnost měření, včetně rezerv při komplikacích. Zároveň bylo vhodné pro dobré pozorování rozvoje ojetí vybrat oblouk co nejmenšího poloměru, ale kratší délky, kvůli celkovému počtu měřených bodů. Při výběru úseku byl zohledněn i aspekt snadného zajištění bezpečnosti při měření.

Vybrán byl oblouk s přechodnicemi o celkové délce 287 m. Pro zachycení úseku včetně zaoblení vzestupnic a také pro porovnání naměřených dat s přímým úsekem byly přidány přesahy měření. Po přidání přesahu měření na obě strany je celková délka měřeného úseku 310 m.

Před zahájením prvního měření bylo potřeba rozměřit úsek a stabilizovat měřené body ve zvoleném kroku 5 m. Dohromady tedy 63 měřených bodů na jedné kolejnici, celkem tedy 126 bodů. Po druhé sadě měření, kdy již bylo možné z dat zhodnotit přesnost a vývoj dat ojetí, bylo s vedoucím práce dohodnuto, že bude krok zahuštěn na poloviční interval. Další čtyři sady měření tedy proběhly s krokem měření 2,5 m. Jedno měření pak zahrnovalo celkem 250 měřených bodů.

6.2 Podmínky měření

Dny pro měření musely být vybírány s ohledem na počasí. Měření v dešti nebo při vysoké vlhkosti vysrážené na kolejnici je s přístrojem Calipri C42 velmi obtížné. Komplikace při měření přinášelo také přímé slunce. Při měření bylo vždy potřeba dobře zastínit měřenou oblast. Jedním z problémů při měření byla také námraza, která způsobila zkreslení části naměřených dat.

Přestože opustit kolej před průjezdem vlaku je s tímto přístrojem velmi snadné, časté průjezdy vlaků výrazně prodlužují dobu měření. Čas měření bylo proto vhodnější plánovat mimo dopravní špičky.

6.3 Průběh měření

K měření je potřeba profiloměr a tablet k obsluze. Před každým měřením je nutné profiloměr zkalibrovat. V tabletu je možné předdefinovat si parametry měření, tedy zvolit tvar kolejnice a nastavit si mezní hodnotu ojetí.

Při snímání povrchu kolejnice se data okamžitě zobrazují na tabletu a lze sledovat upozornění na případné chyby měření. Po nasnímání se měřený profil automaticky uloží a může se přistoupit k následujícímu měření.

S ohledem na objem dat a jejich následnou možnost zpracování, byla data ukládána po menších datových balíčcích, dle uživatelem vytvořených šablon se zvoleným počtem bodů. Tyto datové balíčky lze pojmenovat a zapsat k nim poznámku o měření. Data jsou po exportování dostupná ve formátu CSV.

Na obrázku č. 23. je zachycena ukázka výstupu z měření v tabulkovém formátu. Zobrazeny jsou svislá, boční a šikmá ojetí, celková plocha kolejnice, procento plochy ojetí, šířka hlavy kolejnice a její poloměr.



Obrázek 21: Detail měření pomocí Calipri C42 [autor]



Obrázek 22: Měření bodu [autor]

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	MeasPlan.Name	Infrastructure							
2	Comment	babice_leva							
3	User	21-40							
4	MeasPoint Name	Dimension. Name	Dimension. Value	Dimension. Unit	Meas.Date	Meas.Time			
5	RailProfile_1	AW	62,01	mm^2	20241227	91959	Wear Area	Plocha ojetí	
6	RailProfile_1	AWP	2,02		20241227	91959	Wear Area perc.	Procento plochy ojetí	
7	RailProfile_1	RH	169,41	mm	20241227	91959	Crown Radius	Poloměr hlavy kolejnice	
8	RailProfile_1	W1	0,26	mm	20241227	91959	Wear 0°	Svislé ojetí	
9	RailProfile_1	W2L	0,13	mm	20241227	91959	Wear -90°	Boční ojetí levé	
10	RailProfile_1	W2R	1,88	mm	20241227	91959	Wear +90°	Boční ojetí pravé	
11	RailProfile_1	W3L	0,2	mm	20241227	91959	Wear -45°	Šikmé ojetí levé	
12	RailProfile_1	W3R	1,58	mm	20241227	91959	Wear +45°	Šikmé ojetí pravé	
13	RailProfile_1	WH	69,97	mm	20241227	91959	Head width	Šířka hlavy kolejnice	
14	RailProfile_2	AW	67,4	mm^2	20241227	92028			
15	RailProfile_2	AWP	2,2		20241227	92028			
16	RailProfile_2	RH	174,15	mm	20241227	92028			
17	RailProfile_2	W1	0,25	mm	20241227	92028			
18	RailProfile_2	W2L	0,24	mm	20241227	92028			
19	RailProfile_2	W2R	2,04	mm	20241227	92028			
20	RailProfile_2	W3L	0,26	mm	20241227	92028			
21	RailProfile_2	W3R	1,7	mm	20241227	92028			
22	RailProfile_2	WH	69,69	mm	20241227	92028			
23	RailProfile_3	AW	67,8	mm^2	20241227	92049			
24	RailProfile_3	AWP	2,21		20241227	92049			
25	RailProfile_3	RH	204,41	mm	20241227	92049			

Obrázek 23: Výstup z měření a popis jednotlivých parametrů

7 Vybrané faktory ovlivňující ojetí v měřeném úseku

7.1 Vliv směrového vedení

Směrový oblouk s poloměrem 373 m patří mezi oblouky malého poloměru, což má vliv na charakteristiku ojetí. Na této trati však nepatří mezi oblouky s nejmenšími poloměry, na kterých byly před rekonstrukcí tratě sledovány největší míry ojetí a také rozvoje kolejnicových vad. Přesto po relativně krátké době od opětovného zahájení provozu na trati vykazují kolejnice měřitelné hodnoty ojetí.

Kromě poloměru oblouku je důležitým faktorem také délka kružnicové části oblouku. [5] [23]

7.2 Vliv směru poježdění koleje a výškového profilu

V minulosti bylo na některých tratích při srovnání ojetí v obloucích malých poloměrů pozorováno výrazně větší boční ojetí, pokud byly úseky pravidelně projížďeny po spádu [24]. Pokud bychom předpokládali tento jev na vlastním úseku, byly by větší hodnoty ojetí dosaženy právě v měřené koleji č. 1. Pro kolej č. 2, poježděnou do stoupání, by měly být hodnoty bočních ojetí nižší.

Jistou roli v průběhu ojetí by mohl hrát dle dřívějších analýz také lom nivelety [5]. Tento faktor se ve vyhodnocených datech nepodařilo prokázat.

7.3 Projetá zátěž

Správa železnic poskytla pro účely této diplomové práce pouze souhrnná data o dopravní zátěži z roku 2023. Tato data jsou navíc ovlivněna výlukou na trati v první polovině roku. Podrobnější údaje o projeté zátěži, které by byly užitečné pro analýzu vývoje ojetí v čase se nepodařilo získat.

7.4 Rychlost

Jedním z faktorů při vývoji ojetí je také rychlost, jakou vlak úsek projíždí. Traťová rychlost měřeného úseku je $V = 85 \text{ km/h}$, kdy $V_k = V_{130} = V_{150} = 90 \text{ km/h}$. Při převýšení $D = 132 \text{ mm}$ tak většina vlaků projíždí obloukem s nedostatkem převýšení, což způsobuje větší boční opotřebení vnější kolejnice [25]. Výjimkou je část souprav osobních vlaků RegioPanter (Moravia), které nepravidelně zastavují v blízké zastávce Babice nad Svitavou – zastávka na znamení. Zastavující vlaky v měřeném úseku nedosahují návrhovou rychlost, po čas průjezdu oblouku však zcela určitě svoji rychlost zvyšují a ke konci měřeného úseku již dosahují traťové rychlosti. Osobní vlaky Moravia tvoří pouze malou část celkové projeté zátěže. Při shrnutí zmíněných faktorů lze usuzovat zanedbatelný vliv těchto vlaků na vývoj ojetí v měřeném oblouku. [26] [27]

8 Zpracování vlastních naměřených dat

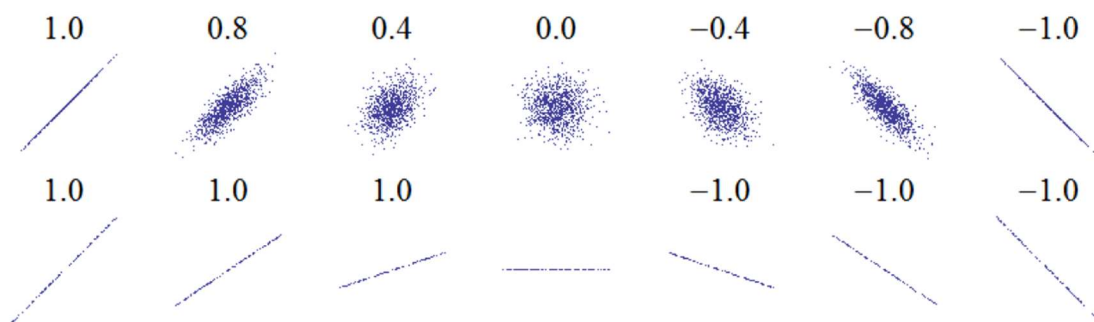
8.1 Metody využívané při zpracování dat

8.1.1 Korelační analýza

Při srovnávání datových sad vlastního měření i pro porovnání s ostatními získanými daty byla využita korelační analýza. Díky tomu bylo možné zkoumat míry odchylek mezi jednotlivými sadami a míru korelace mezi různými daty, což přispělo k prozkoumání možných závislostí mezi měřenými veličinami.

Pro naše data byla vhodná regresní analýza, kdy se výsledná lineární spojnice trendu stanovuje pomocí metody nejmenších čtverců.

Stupeň závislosti mezi dvěma veličinami je dán korelačním koeficientem R . Tento ukazatel nabývá hodnot od -1 po 1, kdy 0 značí neexistující lineární vztah mezi veličinami a hodnoty 1, -1 značí dokonalý (kladný či záporný) lineární vztah. [28]



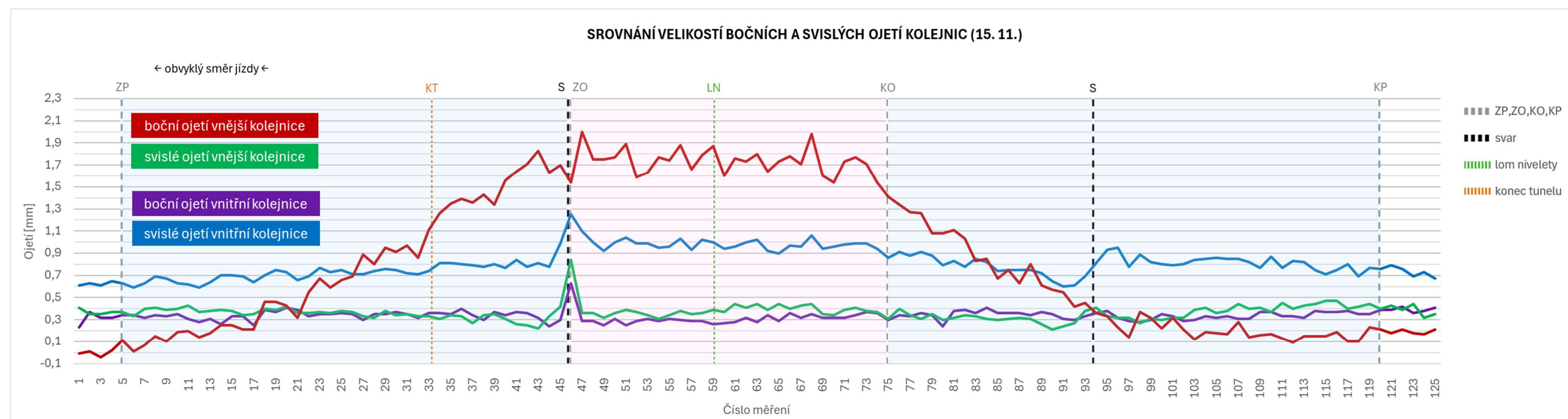
Obrázek 24: Příklady korelačních koeficientů závislých a nezávislých veličin [28]

Správnost, nebo také kvalitu modelu vyjadřujeme koeficientem determinace R^2 , který nabývá hodnot od 0 do 1. Hodnota 0 značí lineární nezávislost mezi veličinami a hodnota 1 vyjadřuje pevnou lineární závislost. [28] [29]

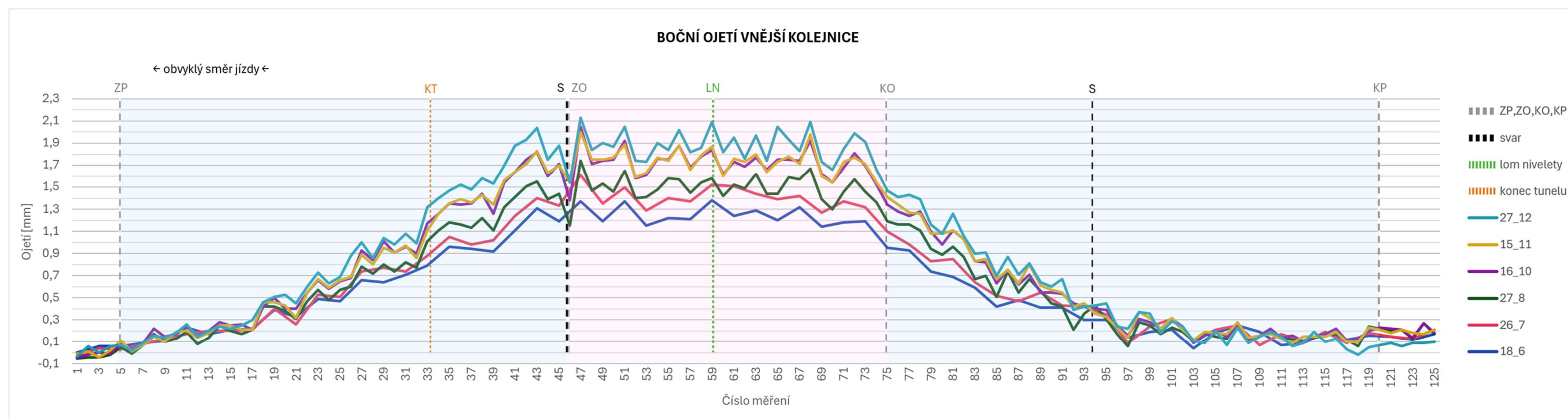
8.2 Naměřená data

Pro srovnání velikostí naměřených hodnot bočních a svislých ojetí kolejnic po délce oblouku uvádím graf č. 2. Tento graf je zpracován pro jeden vybraný den měření ze dne 15. listopadu 2024.

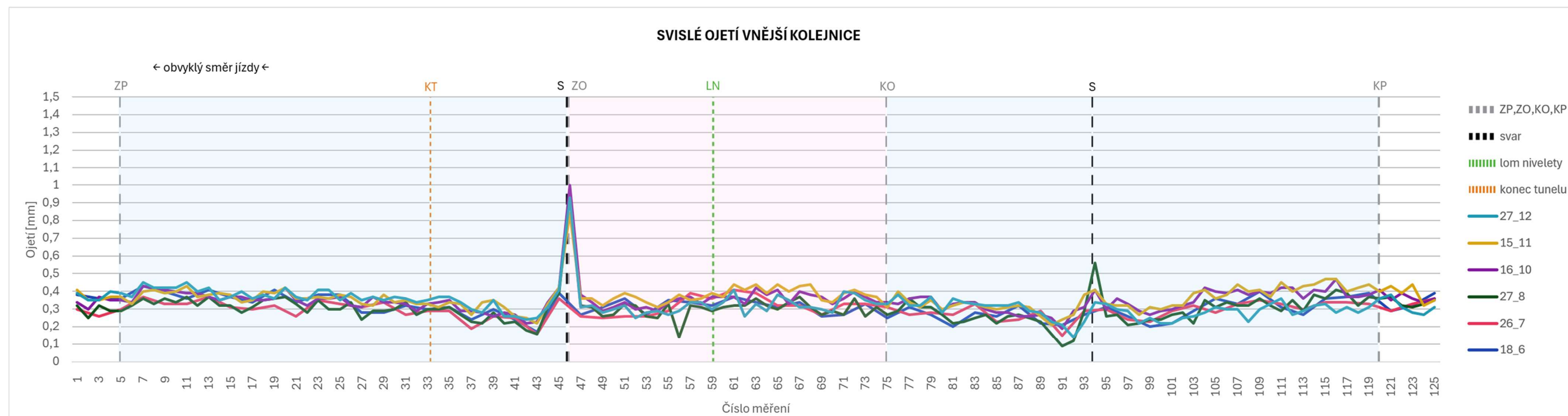
V grafech č. 3. až 6. uvádím kompletní naměřené datové sady pro boční a svislé ojetí vnitřní a vnější kolejnice. Označení řad v legendách grafů odpovídá datům jednotlivých měření.



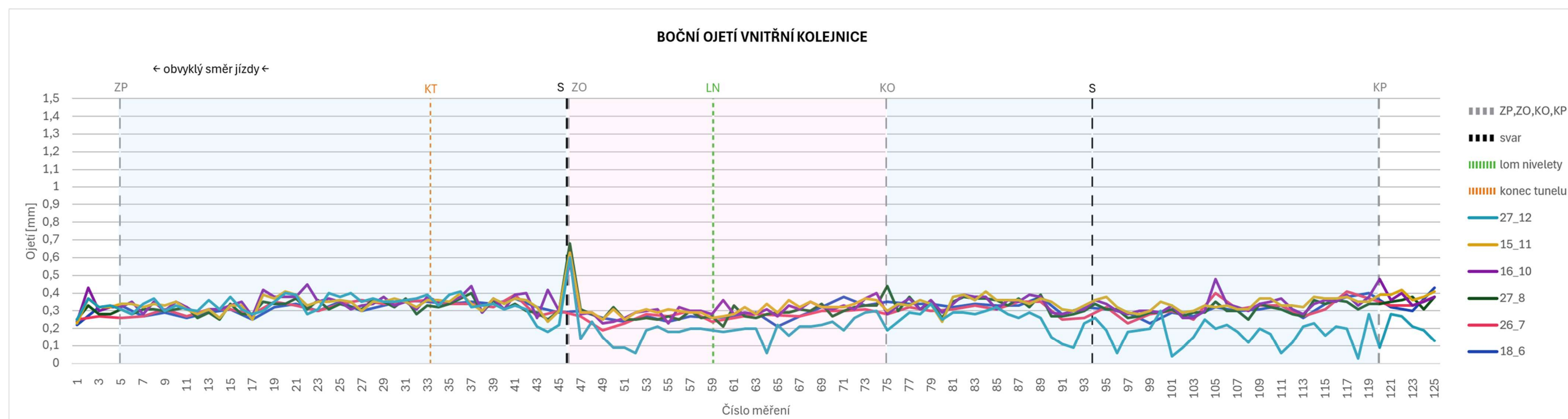
Graf 2: Srovnání velikostí bočních a svislých ojetí kolejnic (15. 11.)



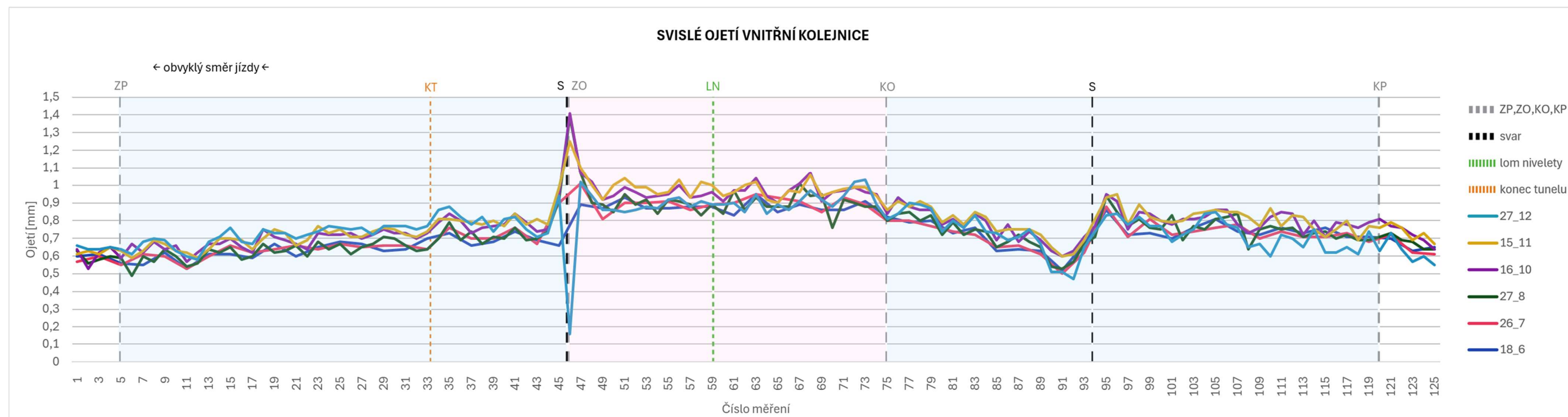
Graf 3: Naměřené datové sady – boční ojetí vnější kolejnice



Graf 4: Naměřené datové sady – svislé ojetí vnější kolejnice



Graf 5: Naměřené datové sady – boční ojetí vnitřní kolejnice



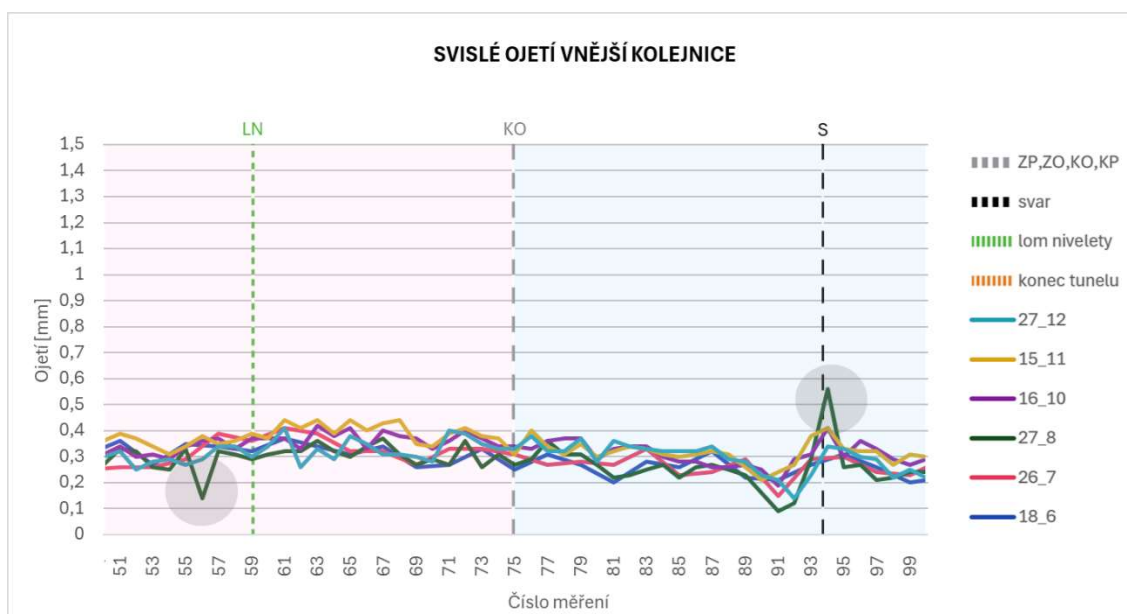
Graf 6: Naměřené datové sady – svislé ojetí vnitřní kolejnic

8.3 Chyby měření

Měření a zpracování dat ukázalo, že přístroj Calipri C42 měří poměrně přesně. Podle naměřených dat lze říct, že jejich kvalita roste s vyššími naměřenými hodnotami.

Na grafech č. 3 až 6 lze kromě sady z data 27. 12. 2024 pozorovat několik míst, u kterých je podezření, že se jedná o chybné měření. Vzhledem k počtu těchto míst a míry odchýlení nebylo potřeba tyto body vyřadit.

Příkladem jsou body z třetího měření číslo 56 a 94 svislého ojetí vnější kolejnice, zobrazené na grafu č. 7.



Graf 7: Chyby měření – svislé ojetí vnější kolejnice

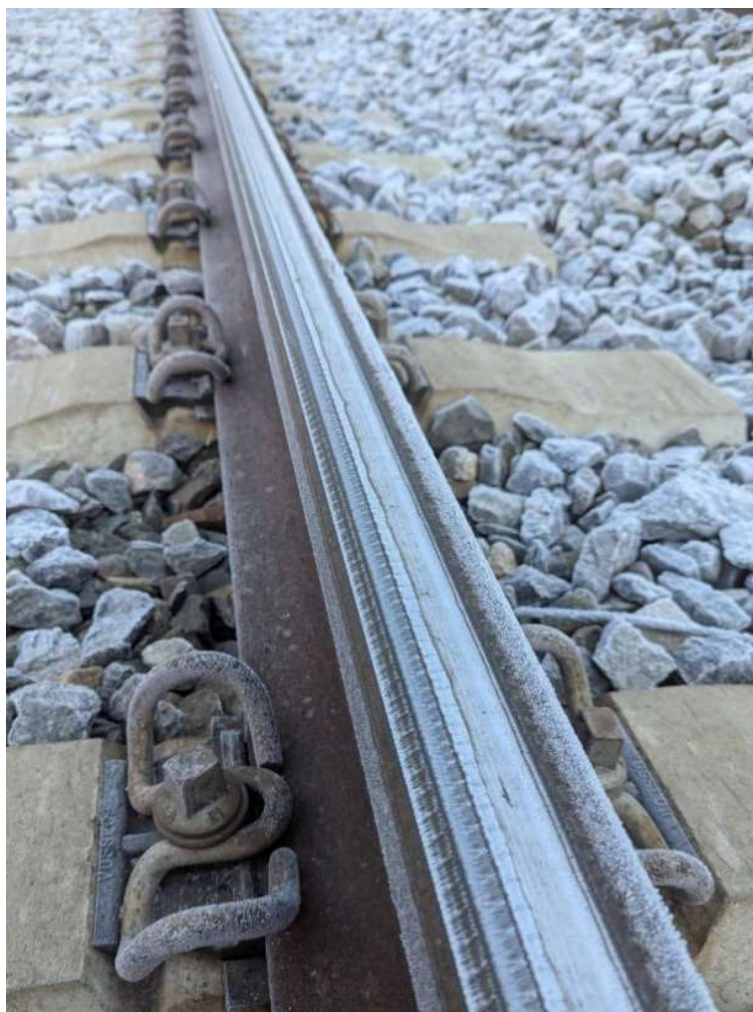
Šesté měření, které proběhlo 27. 12., bylo silně ovlivněno námrazou na kolejnicích. Tato skutečnost způsobila chyby měření, které výrazně ovlivnily hodnoty ojetí vnitřní kolejnice a částečně ovlivnily hodnoty svislých ojetí vnější kolejnice.

Při vizuálním zhodnocení kolejnic byla znatelně více pokryta námrazou právě vnitřní kolejnice. Důvodem jsou kontaktní plochy mezi kolem a kolejnicím při průjezdu vozidel obloukem. U vnitřní kolejnice jsou kontaktní body zejména na temenu hlavy kolejnice, zatímco u vnější kolejnice jsou body jak na temenu hlavy, tak i na pojížděné hraně.

Důvodem je tedy použití měřící technologie v konkrétních podmínkách, protože chyba měření přímo souvisela s plochou pokrytí hlavy kolejnice námrazou.

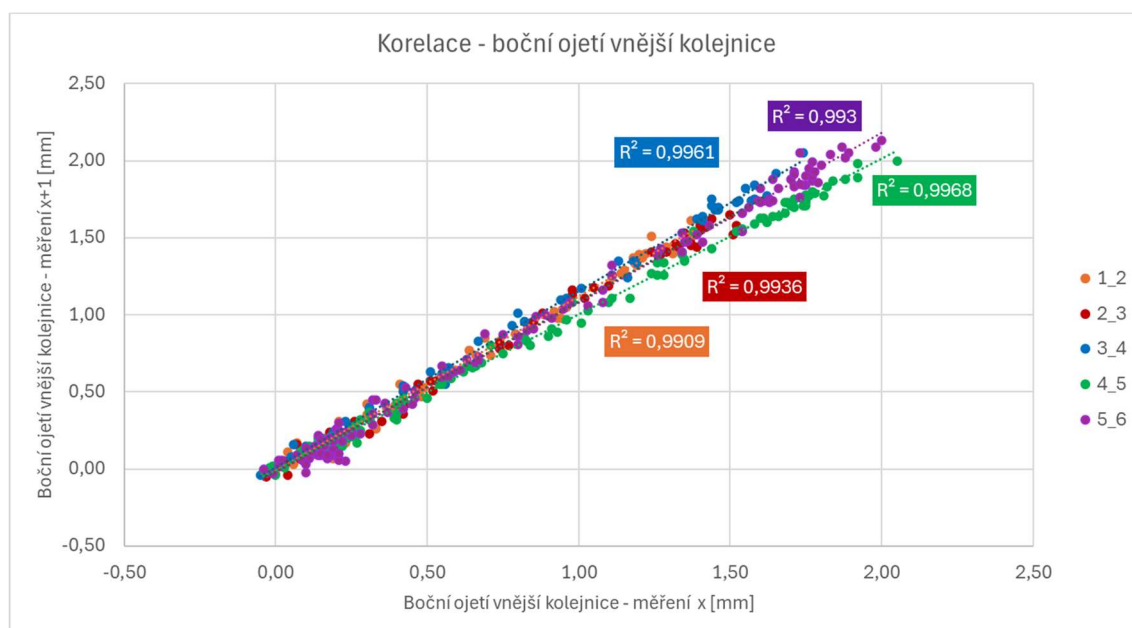
Šestá datová sada však nebyla úplně vyřazena, protože byla podstatná pro analýzu nelinearity ojetí v čase.

Z grafů č. 3 až 6 je také patrné, že část úseku ležící v tunelu nebyla námrazou ovlivněna.

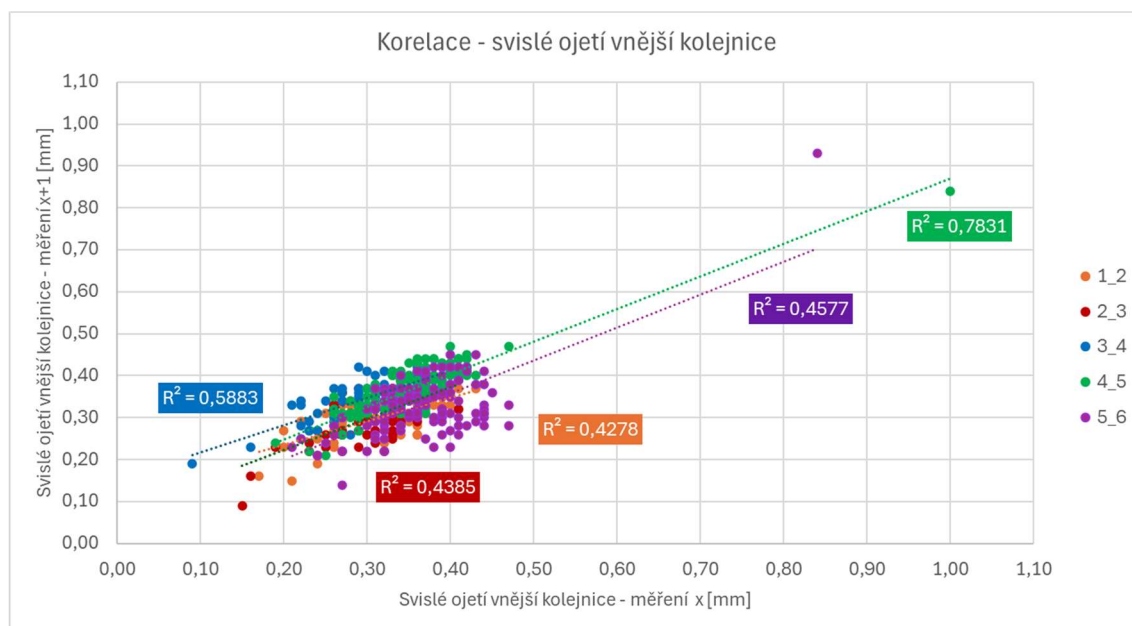


Obrázek 25: Námraza na vnitřní kolejnici [autor]

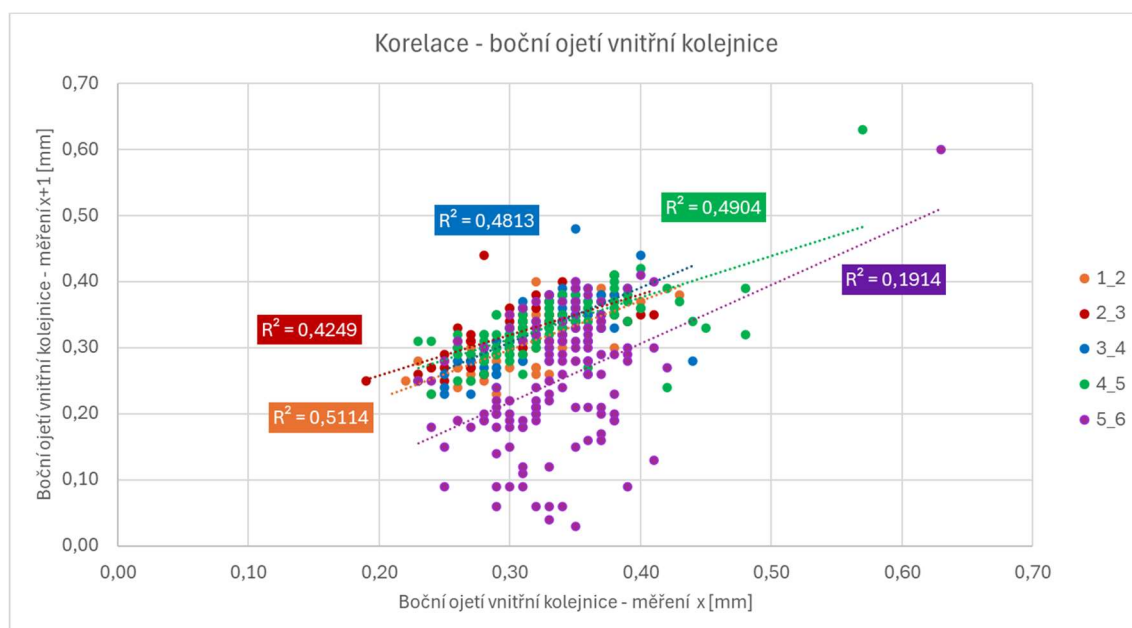
Kvalitu naměřených dat lze sledovat dle opakovatelnosti v čase pro jednotlivé body. Na grafech č. 8 až 11 jsou vyjádřeny míry korelace mezi za sebou následujícími sadami měření. Vyšší hodnoty koeficientu determinace jsou dosaženy pro vyšší naměřené hodnoty, tedy pro boční ojetí vnější kolejnice a svislé ojetí vnitřní kolejnice. Nižší hodnoty jsou dosaženy pro data, kdy se hodnoty naměřených dat přibližují přesnosti přístroje $\pm 0,08$ mm. Shrnutí koeficientů determinace je následně uvedeno v tabulce č. 5. Korelace mezi jednotlivými dvojicemi datových sad jsou barevně odlišeny. V legendě např. porovnání mezi první a druhou sadou 1_2, s hodnotami 1. sady na ose x a 2. sady na ose y.



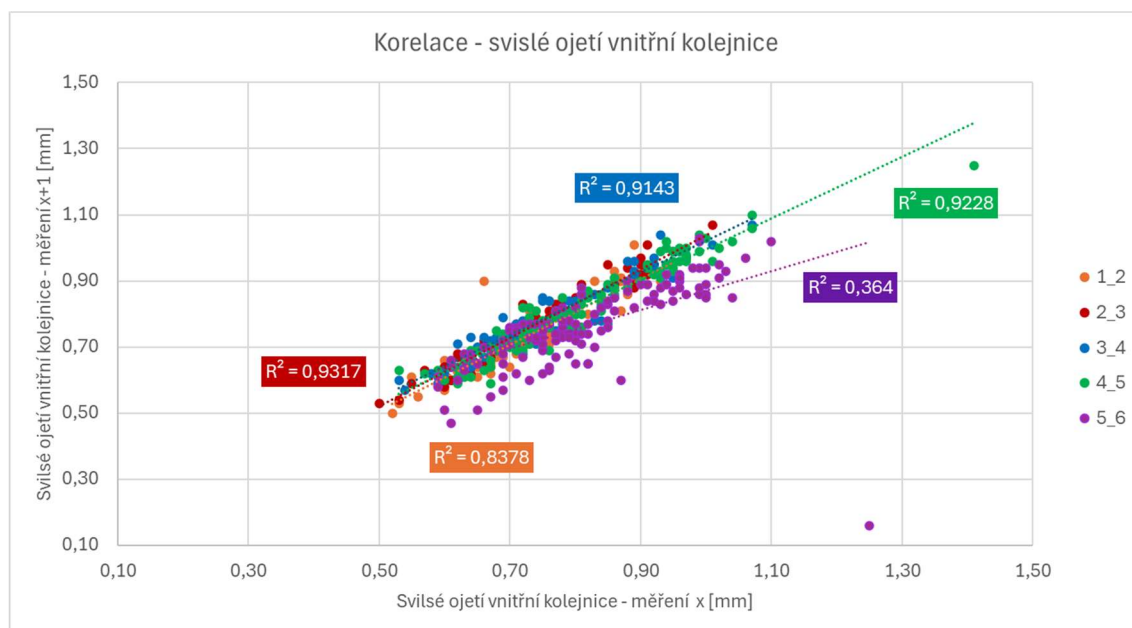
Graf 8: Korelace datových sad – boční ojetí vnější kolejnice



Graf 9: Korelace datových sad – svislé ojetí vnější kolejnice



Graf 10: Korelace datových sad – boční ojetí vnitřní kolejnice



Graf 11: Korelace datových sad – svislé ojetí vnitřní kolejnice

Tabulka 5: Korelace mezi sadami měření

sady měření	Hodnoty koeficientu determinace R^2			
	vnější kolejnice		vnitřní kolejnice	
	boční ojetí	svislé ojetí	boční ojetí	svislé ojetí
1_2	0,9909	0,4278	0,5144	0,8378
2_3	0,9936	0,4385	0,4249	0,9317
3_4	0,9954	0,7623	0,4151	0,9011
4_5	0,9968	0,7831	0,4904	0,9228
5_6	0,9930	0,4577	0,1914	0,3640

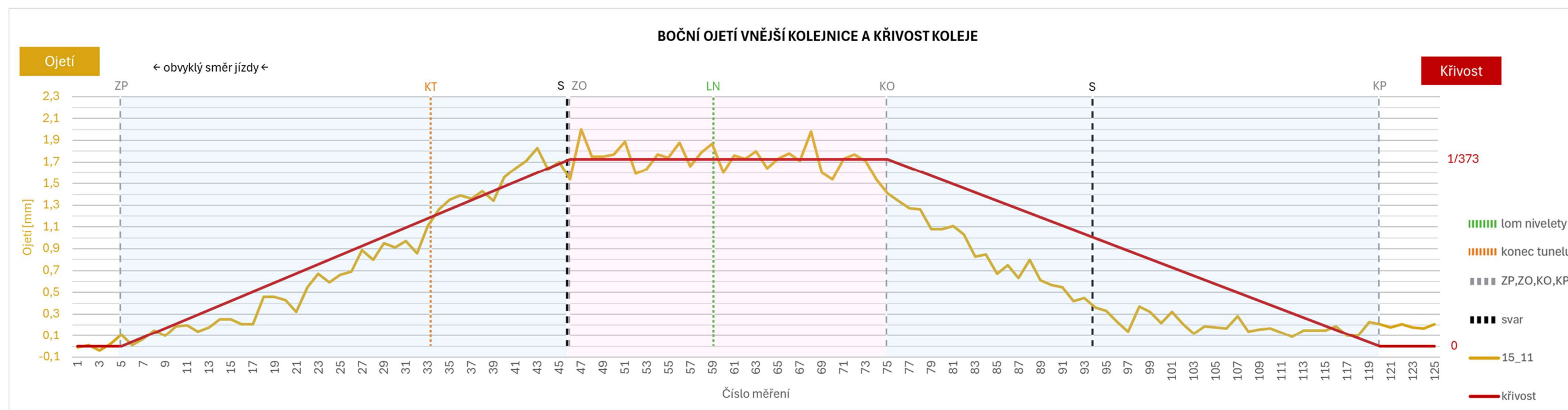
Velmi vysoké korelace vykazují všechny porovnané datové sady bočního ojetí vnější kolejnice. Tato kvalitní data jsou také nejvíce využita v dalších částech práce pro další analýzu. Poměrně dobrých výsledků dosáhly korelace datových sad pro svislé ojetí vnější kolejnice. Zde je však znatelná nižší kvalita dat z šestého měření.

8.4 Průběh ojetí po délce oblouku

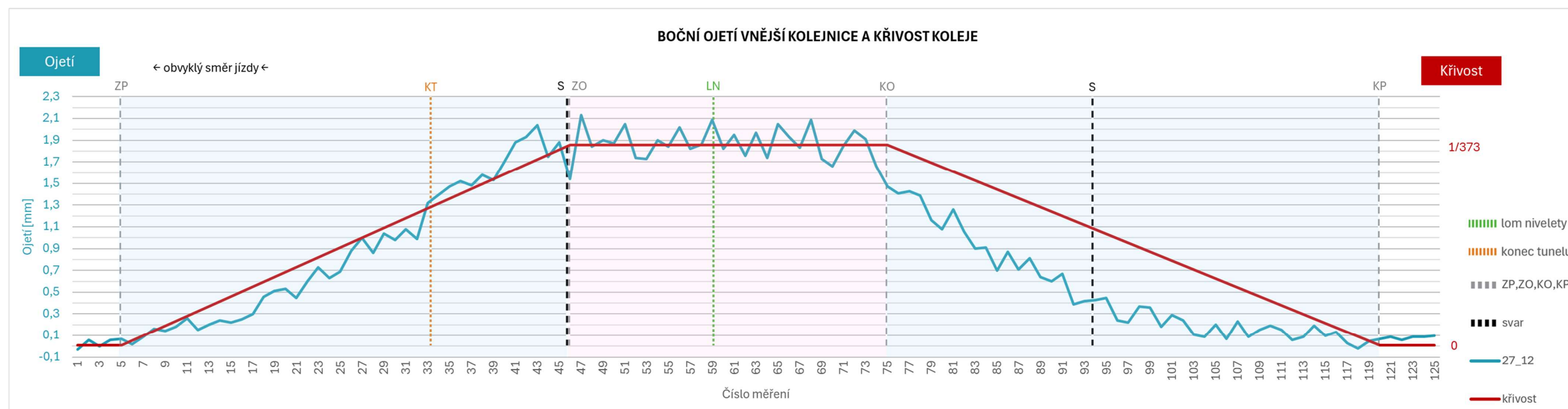
Největších hodnot ojetí v měřeném oblouku dosahuje boční ojetí vnější kolejnice, dále pak svislé ojetí vnitřní kolejnice. Pro oblouky, ve kterých soupravy projíždí s nedostatkem převýšení, je toto často pozorovaným jevem. [25]

Ve směru jízdy hodnoty bočního ojetí vnější kolejnice postupně narůstají s konstantnějším průběhem v kružnicové části oblouku. V místě druhé přechodnice jsou hodnoty ojetí větší než v první a více odpovídají myšlené čáře křivosti. Viz graf č. 12 a 13, který porovnává boční ojetí vnější kolejnice s průběhem křivosti v oblouku. Porovnání je vyhotoveno pro poslední 2 sady měření z listopadu a prosince.

Na tento průběh může mít vliv mazání kol v obloucích s nerovnoměrnou distribucí maziva po délce. Další vlivy byly zkoumány v kapitole 9.3.



Graf 12: Porovnání bočního ojetí vnější kolejnice s čarou křivosti (15. 11)



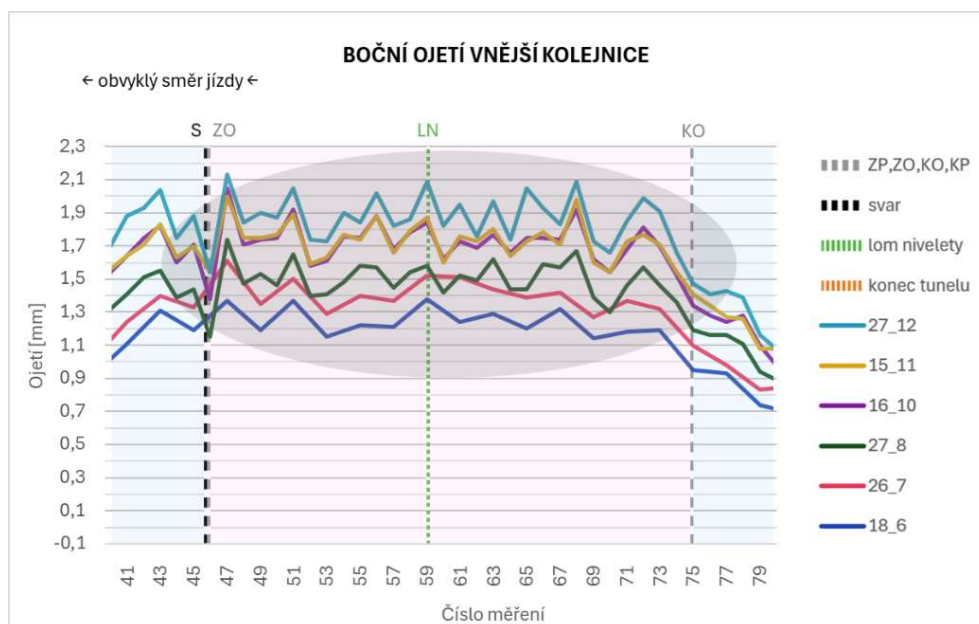
Graf 13: Porovnání bočního ojetí vnější kolejnice s čarou křivosti (27. 12)

8.5 Vyšetřovaná místa

8.5.1 Nerovnoměrný průběh

Při sledování průběhů svislých a bočních ojetí pozorujeme nerovnoměrný průběh pro po sobě následující měřené body. Výrazněji pak ve střední části oblouku.

Příčinou je zřejmě dynamika pohybu vozidla v oblouku a obecně kvalita geometrických parametrů koleje. Vzájemnému vztahu mezi ojetím a rozchodem koleje se blíže věnuji v kapitole č. 9.3.



Graf 14: Nerovnoměrný průběh bočního ojetí vnější kolejnice

8.5.2 Oblast svarů

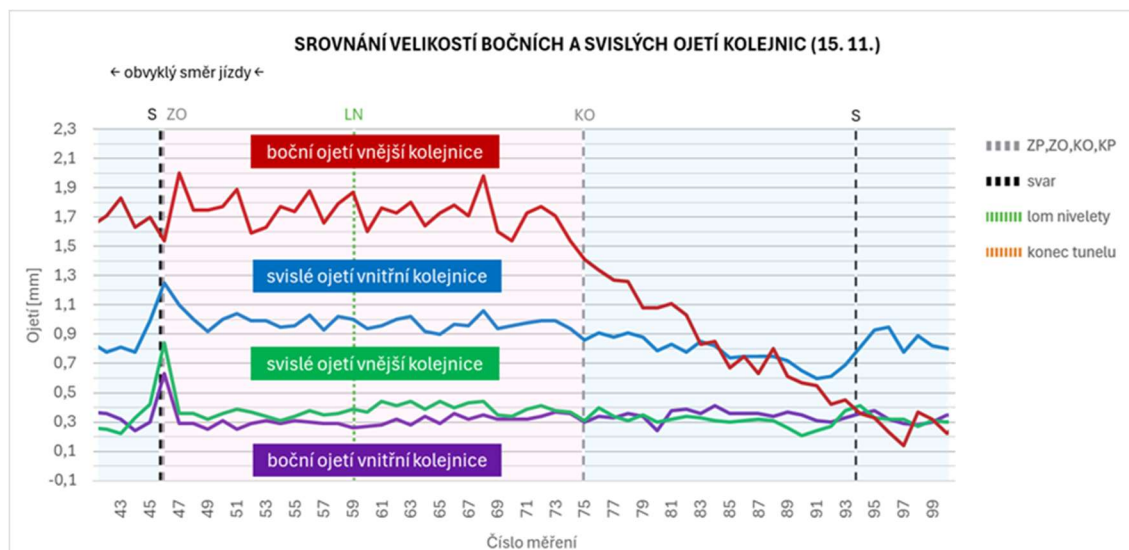
Ve vlastním měření se odlišně projeví naměřené hodnoty pro první a druhou oblast svarů (body č. 46 a 94 v grafu č. 15). Vliv může mít jak technologie svařování, tak vzdálenost svarů od měřeného místa.

V první oblasti pozorujeme vliv přítomnosti svaru na všechna boční i svislá ojetí. V místě měření, nejbližšímu k poloze svaru, jsou dosaženy nižší hodnoty pro boční ojetí vnější kolejnice. Lokální maxima pozorujeme pro hodnoty vnitřního ojetí boční kolejnice a svislého ojetí vnitřní i vnější kolejnice.

V druhé oblasti se přítomnost svaru neprojevuje tak výrazně, přestože se svar nachází ve větší blízkosti měřeného bodu. Ve vnější kolejnici leží měřené místo několik centimetrů za svarem, takže přesný tvar hlavy kolejnice může být ovlivněn přebroušením zhotoveného termického svaru. Vyšší lokální maxima ojetí lze pozorovat u svislých ojetí kolejníc.

Vyšší míra ojždění temene hlavy kolejnice v oblasti svarů by mohla být způsobena většími dynamickými rázy při průjezdu vozidla, které způsobí zvýšené velikosti působících sil.

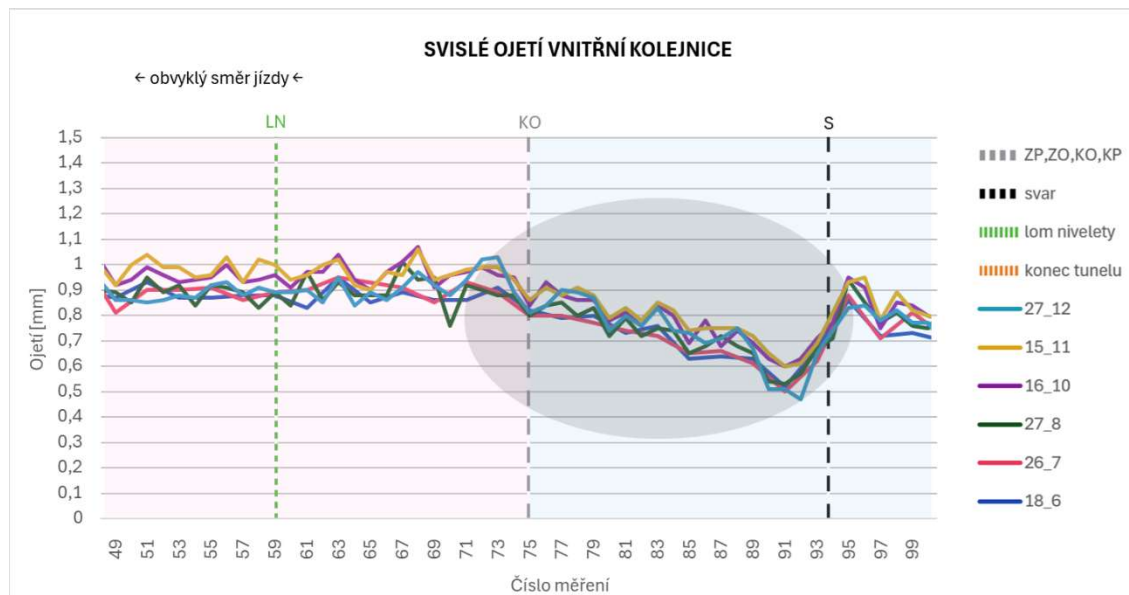
Přesná analýza oblasti svarů by však vyžadovala hustší interval naměřených bodů.



Graf 15: Ojetí v oblasti svarů kolejnic

8.5.3 Průběh svislého ojetí vnitřní kolejnice

Zajímavý jev můžeme sledovat i pro část vývoje svislého ojetí vnitřní kolejnice, kde dochází v oblasti mezi koncem oblouku a svarem k výraznějšímu poklesu hodnot ojetí. Tento průběh se nepodařilo objasnit.



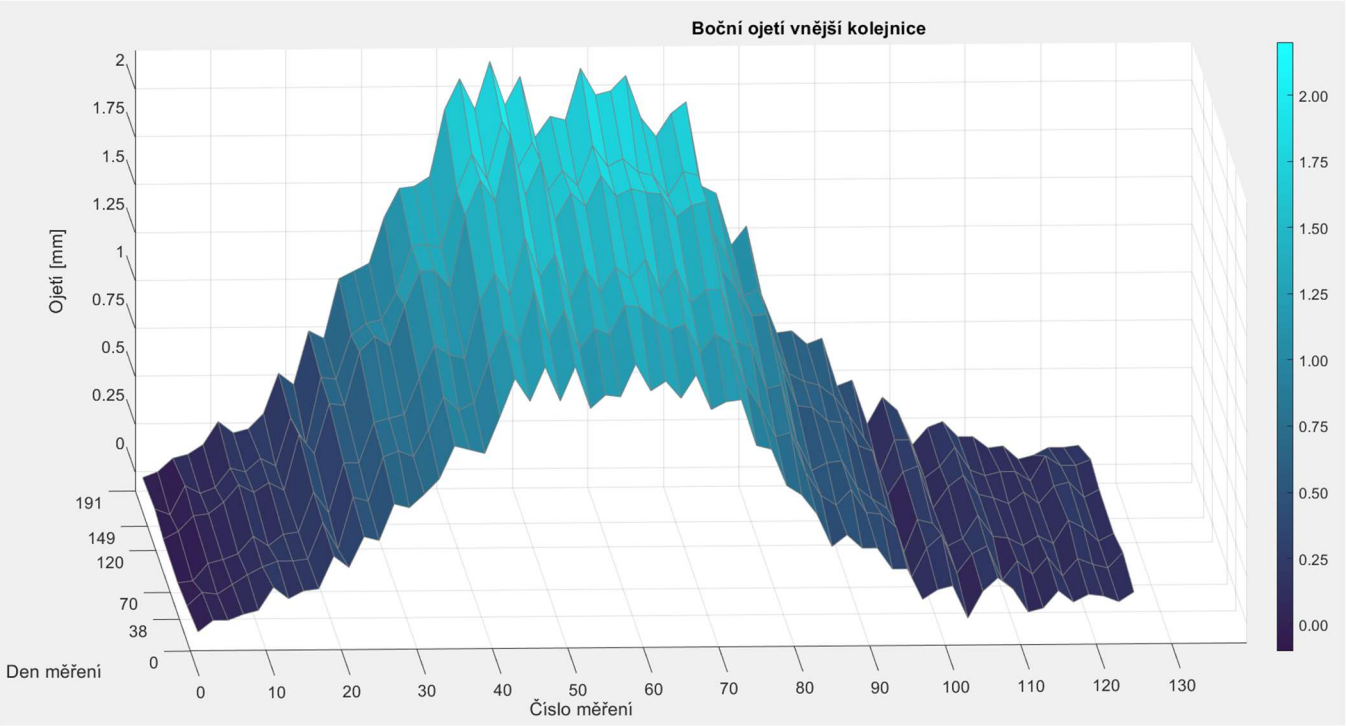
Graf 16: Nerovnoměrný vývoj svislého ojetí vnitřní kolejnice

8.6 Průběh ojetí v čase

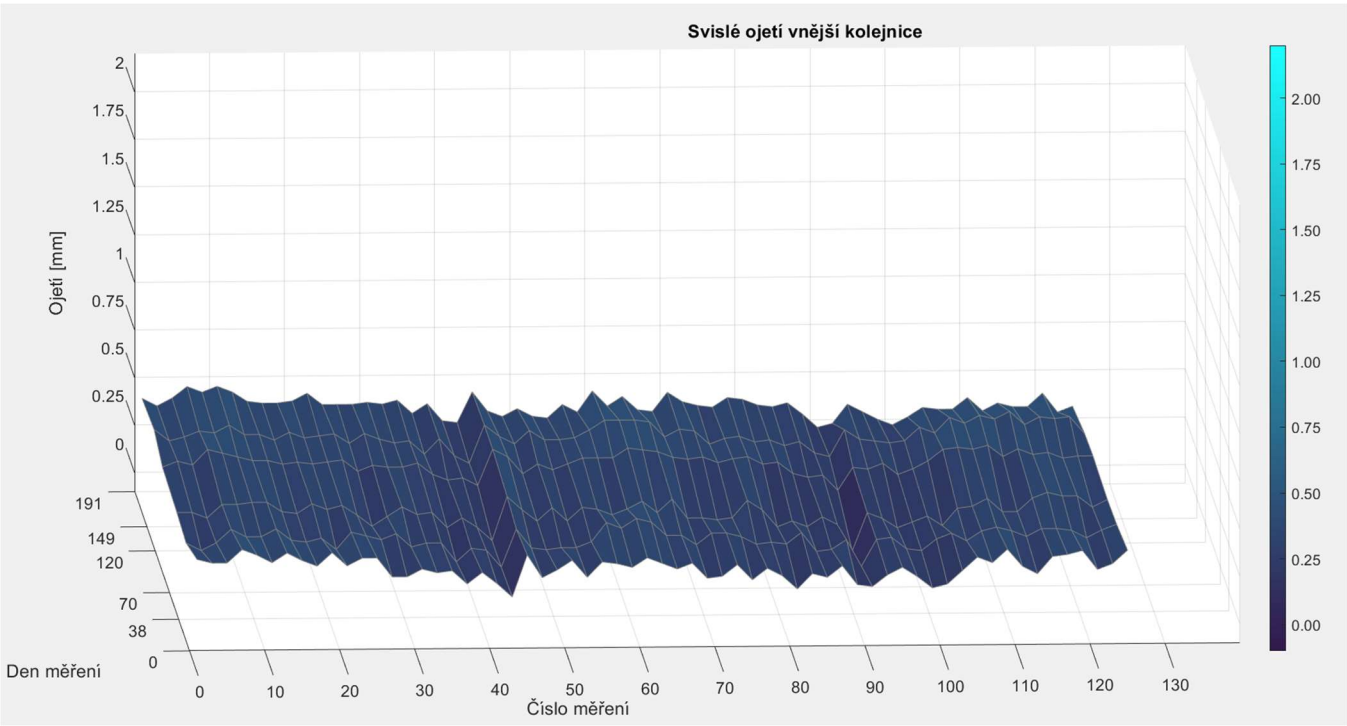
Naměřené údaje jsou v časovém rozmezí 191 dnů, tedy zhruba půl roku.

Pro nárůst ojetí v čase byly zpracovány přehledné 3D grafy pro boční i svislá ojetí kolejnic a dále doplňující grafy lépe znázorňující nelinearitu nárůstu ojetí.

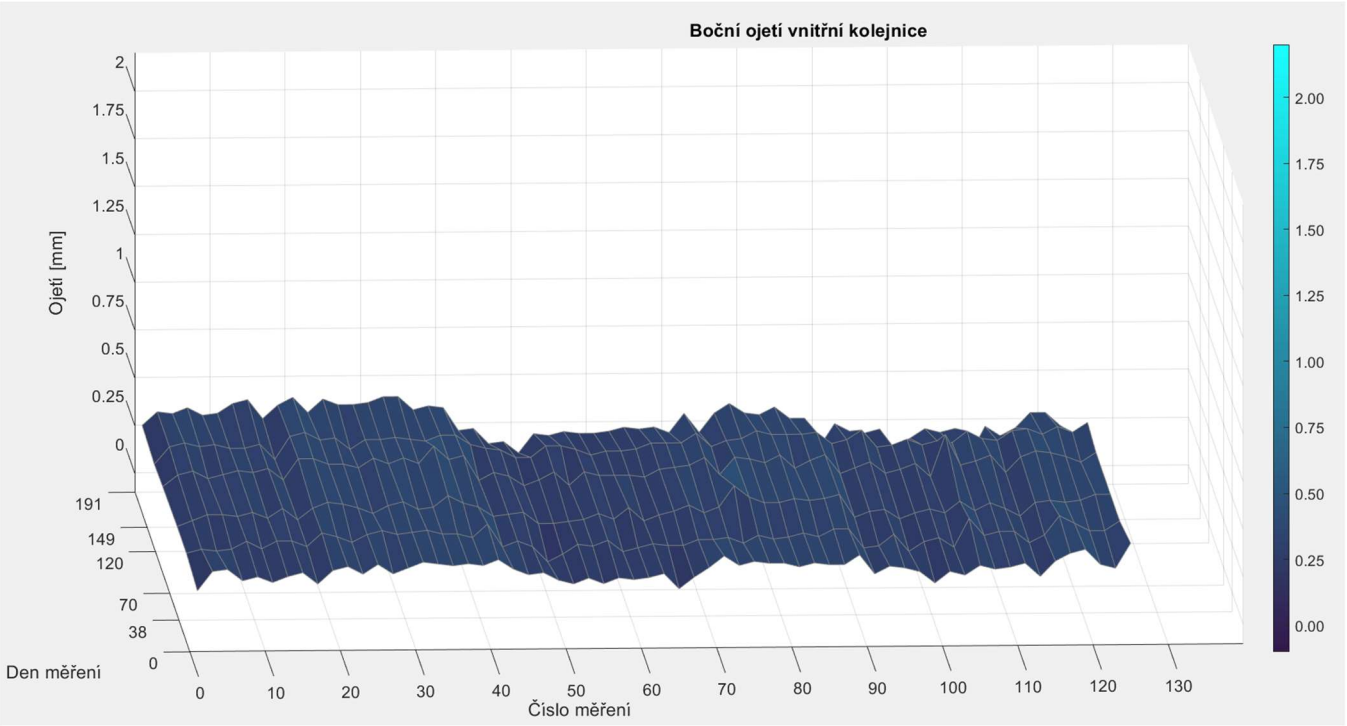
Na 3D grafech je zachycen vývoj všech 6 měřených datových sad ojetí po délce oblouku. Osa x označuje číslo měřeného bodu, na ose y je zachyceno ojetí kolejnice a na ose z pořadový den měření. V tomto zobrazení jsou patrné zejména lokální maxima a minima opakující se v jednotlivých měřeních. Grafy dobře zachycují srovnání naměřených hodnot pro jednotlivá boční a svislá ojetí.



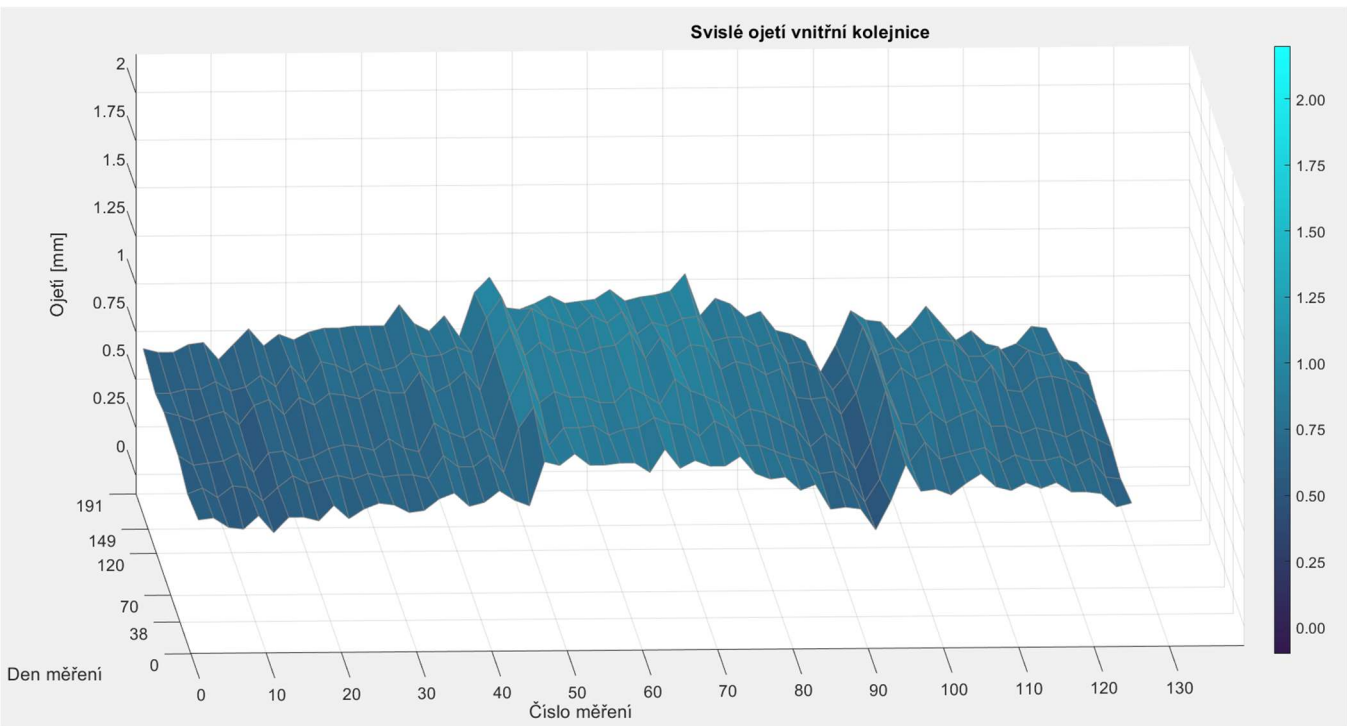
Graf 17: Vývoj v čase pro boční ojetí vnější kolejnice



Graf 18: Vývoj v čase pro svislé ojetí vnější kolejnice

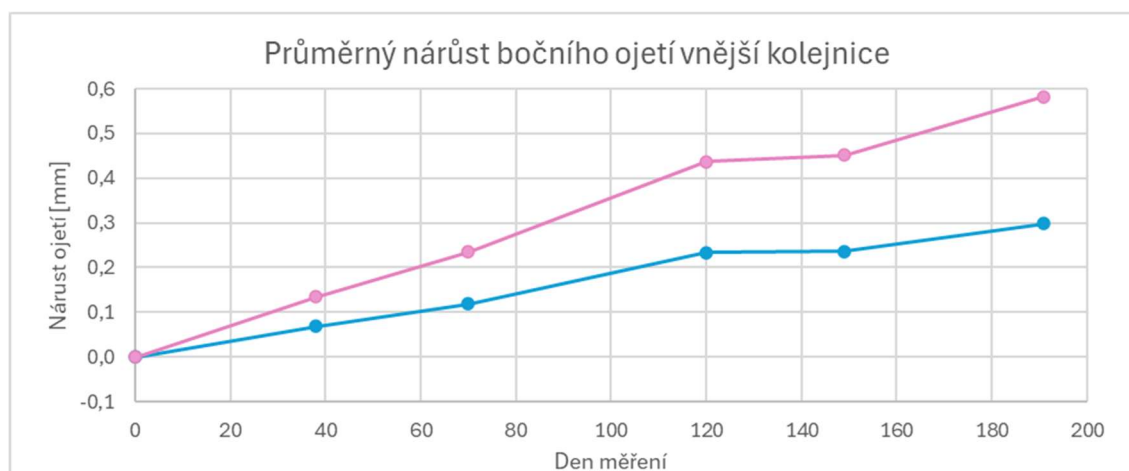


Graf 19: Vývoj v čase pro boční ojetí vnitřní kolejnice

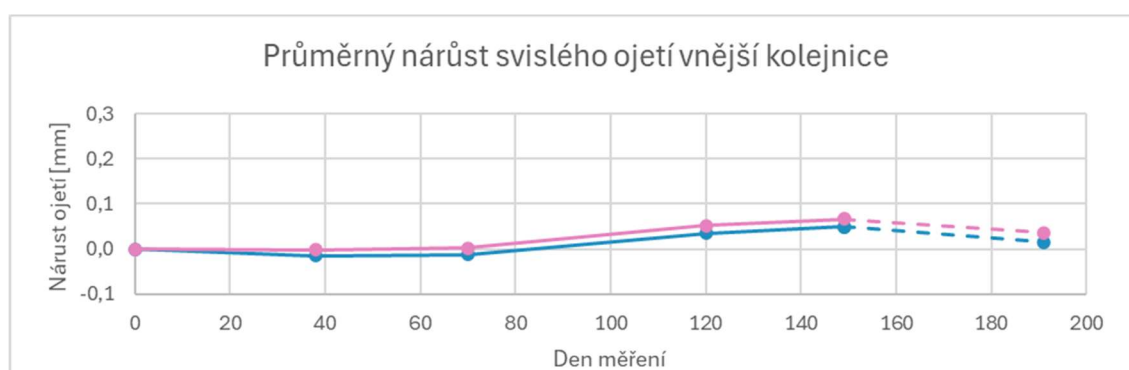


Graf 20: Vývoj v čase pro svislé ojetí vnitřní kolejnice

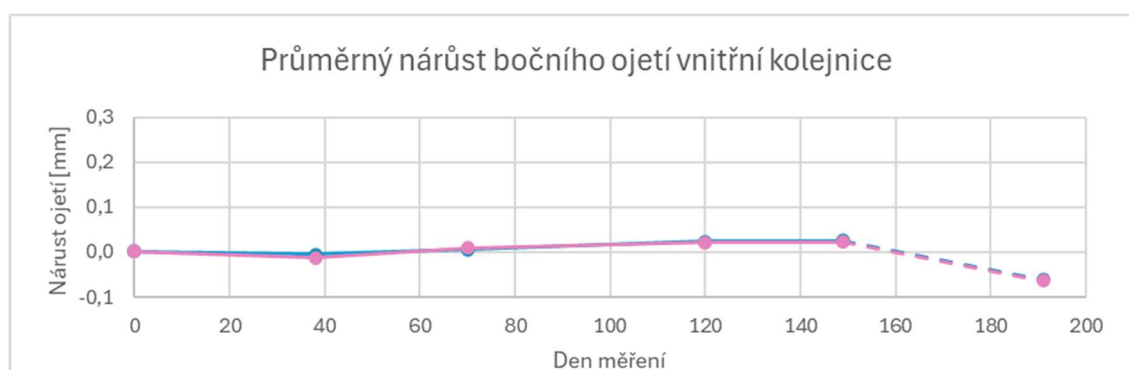
Následující grafy zobrazují průměrný nárůst ojetí v čase pro celý oblouk s přechodnicemi (modré křivky) a pro střední část oblouku s křivostí menší než 1/500 (ružové křivky). Pro úplnost dat jsou zobrazena všechna měření. V grafech č. 22 až 24 je zahrnuto i šesté měření, které je zatížené chybou měření – viz kapitola 8.3.



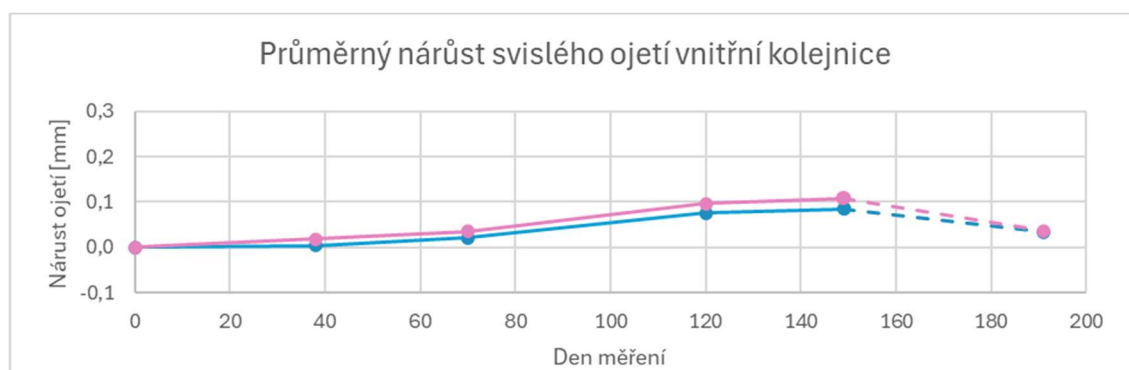
Graf 21: Průměrný nárůst bočního ojetí vnější kolejnice



Graf 22: Průměrný nárůst svislého ojetí vnější kolejnice



Graf 23: Průměrný nárůst bočního ojetí vnitřní kolejnice



Graf 24: Průměrný nárůst svislého ojetí vnitřní kolejnice

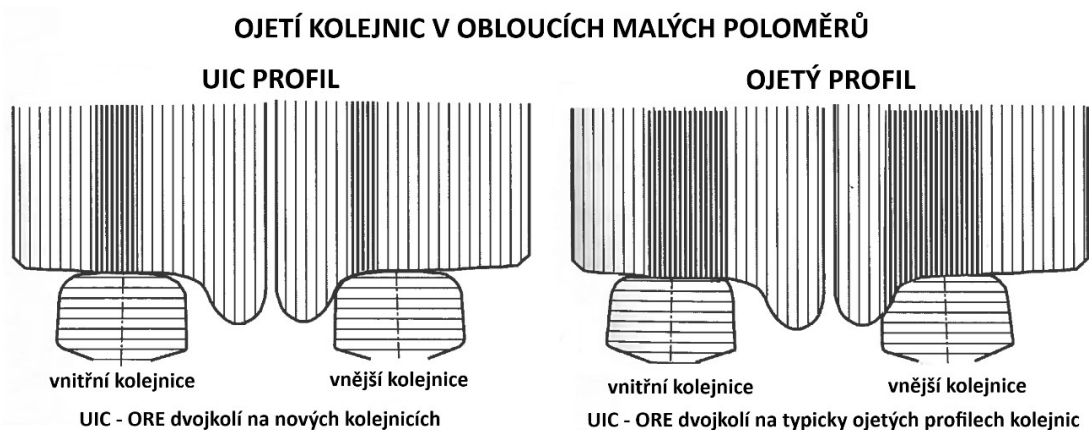
Nejmenších nárůstů ojetí a také nejmenších hodnot ojetí celkově dosahuje boční ojetí vnitřní kolejnice. Lehce vyšších hodnot pak dosahuje svislé ojetí vnější kolejnice. Do čtvrtého měření pozorujeme víceméně lineární průběh nárůstů u všech hodnot ojetí. Následně dochází ke zpomalení nárůstu ojetí v pátém měření. Analýze zpomalení nárůstu se věnuji v podkapitole 8.6.3.

8.6.1 Nelinearita nárůstu

Z hlediska nelinearity nárůstu ojetí je podnětný průběh svislého ojetí vnitřní kolejnice, kde je za dobu měření statisticky nižší přírůstek, než odpovídá současnému stavu ojetí. Přírůstek v oblouku malého poloměru odpovídá 58 % očekávaného přírůstku, pokud by od začátku docházelo k lineárnímu nárůstu ojetí v čase.

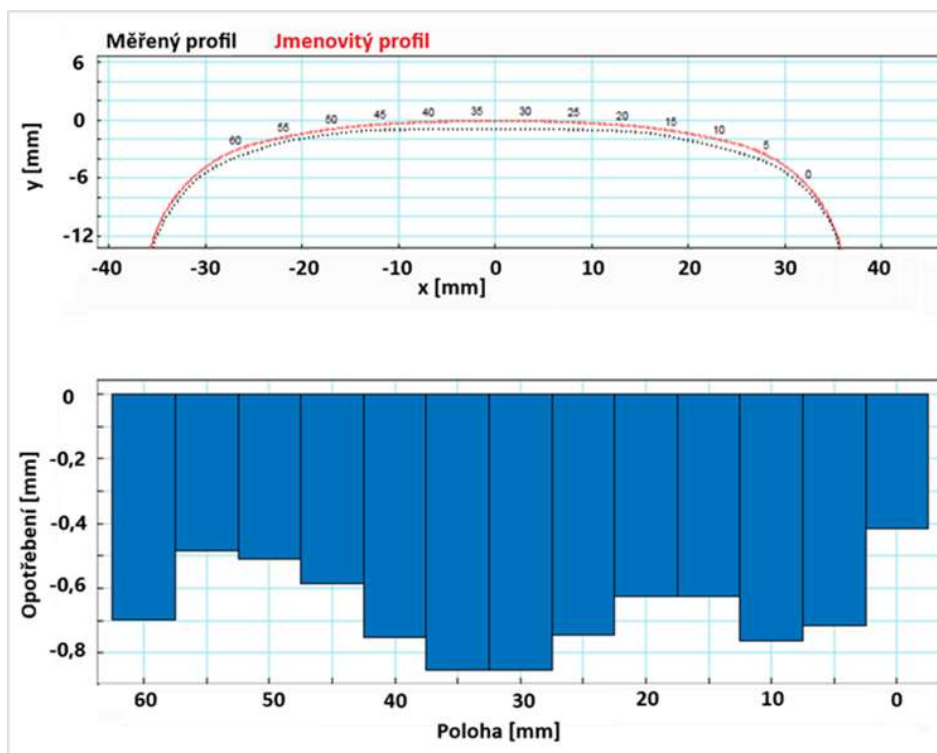
Pro boční ojetí vnější kolejnice dosahuje průměrný nárůst naopak statisticky vyšších hodnot, a to 133 % očekávaného přírůstku při srovnání s lineárním vývojem opotřebení kolejnice.

Důvodem je nejspíše změna kontaktní geometrie v čase. U nových kolejnic je plocha dotyku u vnitřní kolejnice spíše ve střední části temene kolejnice, kdežto u vnější kolejnice spíše k okraji temene kolejnice. Na pravé části obrázku č. 26 pak vidíme, jak se kontaktní geometrie změnila pro ojetý profil kolejnice. U vnitřní kolejnice se začíná kolo dotýkat i na okraji temene kolejnice a u vnější kolejnice se rozšiřuje kontaktní plocha na boční pojízdnou hranu.

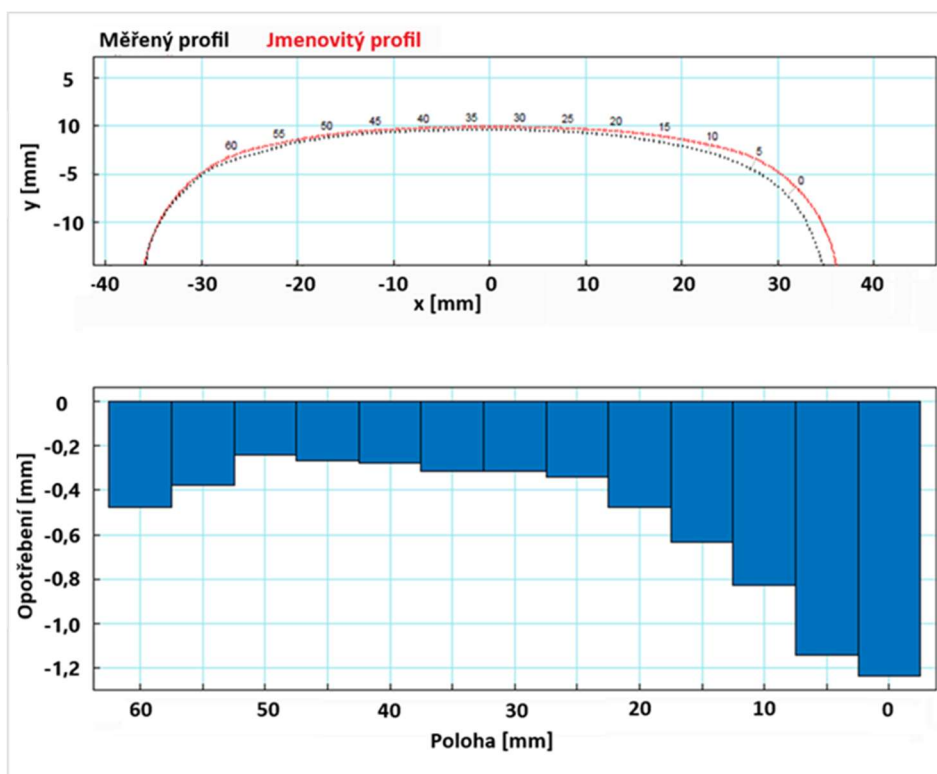


Obrázek 26: Kontaktní plocha pro nové a ojeté profily [6]

Přikládám také obrázky detailu opotřebení hlavy kolejnice z vlastního měření, na kterých je znázorněn detail ojetí vůči původnímu tvaru nové kolejnice.



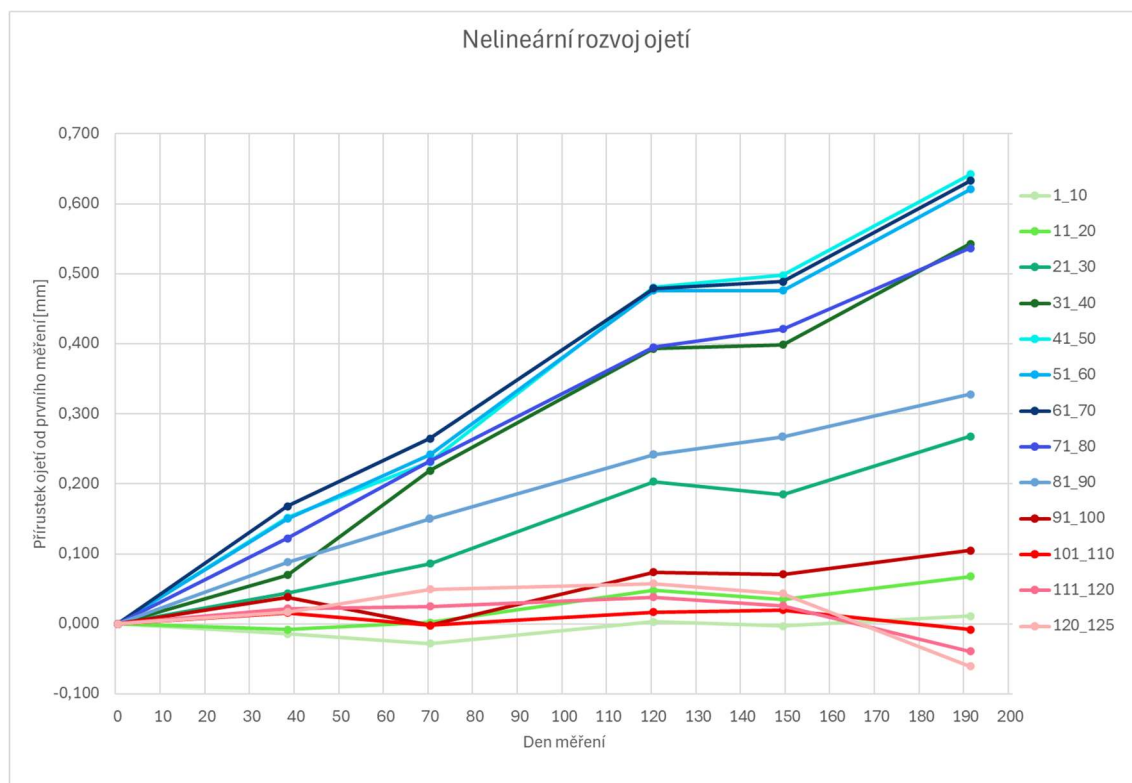
Obrázek 27: Detail ojetí hlavy vnitřní kolejnice



Obrázek 28: Detail ojetí hlavy vnější kolejnice

8.6.2 Boční ojetí vnější kolejnice

Pro boční ojetí vnější kolejnice jsem se rozhodla průběh znázornit ještě o něco podrobněji. V následujícím grafu jsou průběhy nárůstu ojetí v čase vždy z průměru 10 měřených bodů v řadě. Graf č. 25 znázorňuje jednak daleko rychlejší nárůst ojetí podél střední části oblouku (modrými odstíny křivek) a obecně nerovnoměrný nárůst v čase. V místě přechodnic (zelené a červené odstíny křivek) sledujeme nižší přírůstky ojetí. V legendě jsou uvedeny čísla měřených bodů odpovídající dané křivce.



Graf 25: Rozvoj ojetí v čase z průměrných hodnot bočního ojetí vnější kolejnice

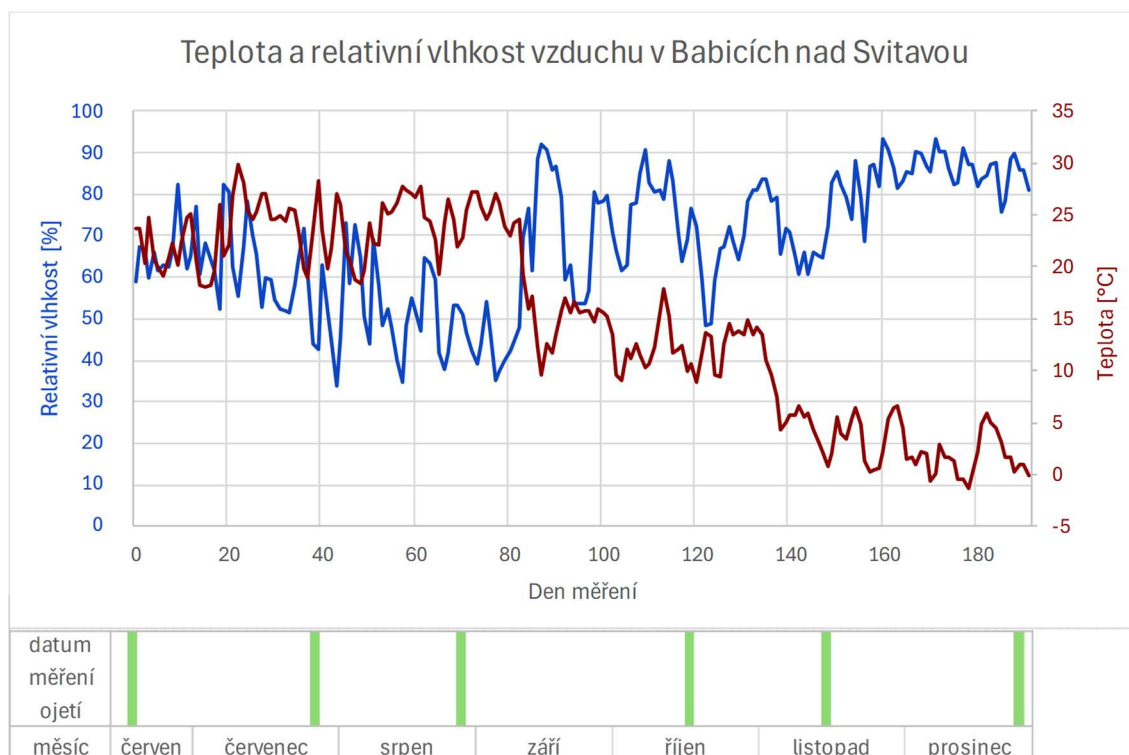
8.6.3 Zpomalení nárůstu ojetí

V pátém měření došlo k výraznému zpomalení nárůstu především u bočního ojetí vnější kolejnice. To by mohlo být způsobeno vyšší vlhkostí v tomto období, pozitivně ovlivňující míru ojíždění kolejnic. Důvod zpomalení trendu ojetí jsem se snažila dále zkoumat.

Na základě archivu počasí a sledování podmínek při měřeních je pravděpodobné, že v podzimních měsících byla na tomto úseku zvýšená vlhkost kolejnic. Na konci listopadu a v prosinci pak teploty podstatně klesly a v údolí řeky Svitavy se často držely průměrné teploty kolem 0 °C. Teploty blízké nule by pak vysvětlovaly opětovné zvýšení nárůstu ojetí díky absenci zvýšené vysrážené vlhkosti na kolejnici. [30]

Zpracovala jsem tedy data z archivu počasí pro Babice nad Svitavou mezi měsíci červen až prosinec 2024, které uvádím v grafu č. 26. K dispozici byly údaje o teplotě vzduchu a relativní vlhkosti. Data o počasí jsou založena na modelování při využití různých dat

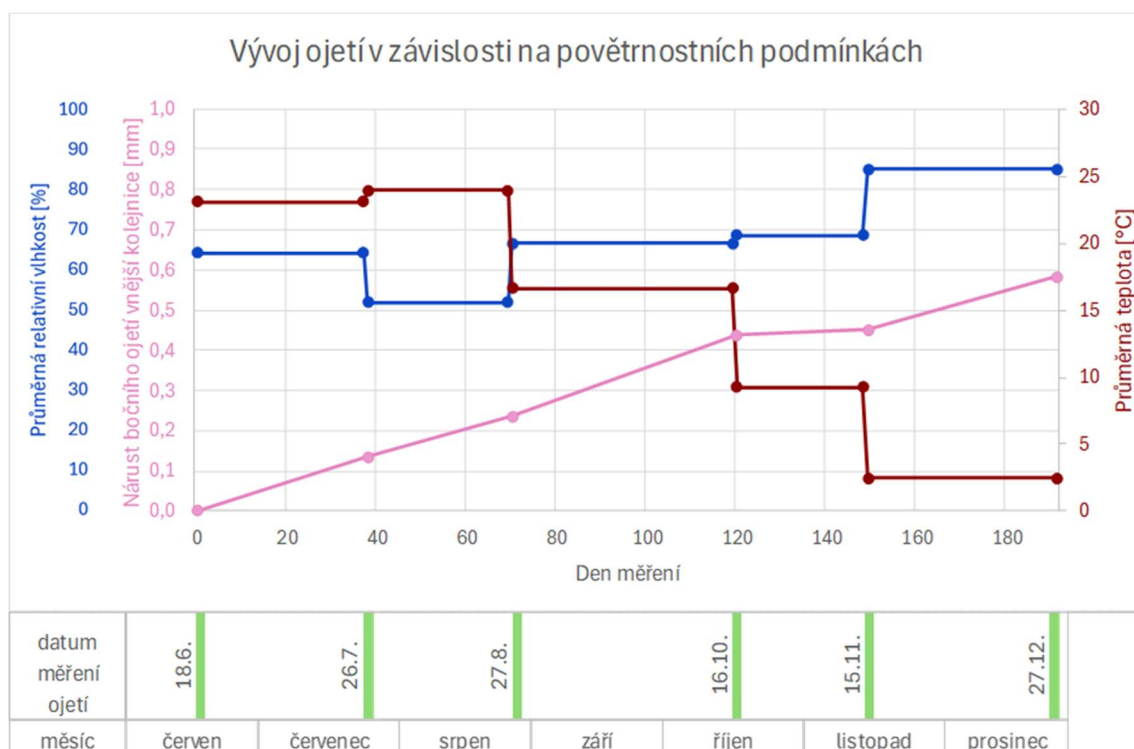
z meteorologických měření, jejich přesnost je tedy omezená. Navíc je lokalita, pro kterou jsou data modelována, odlišná od podmínek v údolí, kde byla uskutečněna měření ojetí kolejnic profiloměrem. [30] [31]



Graf 26: Teplota a relativní vlhkost vzduchu v Babicích nad Svitavou

Na grafu č. 26 pozorujeme vyšší průměrné teploty v letních měsících, které klesají během podzimního a zimního období. Průměrné denní teploty vzduchu v místě, ve kterém probíhalo měření byly pravděpodobně ještě o pár stupňů nižší. Relativní vlhkost vzduchu začíná výrazněji narůstat zhruba v polovině září.

Ke snížení nárůstu ojetí došlo mezi měřeními v měsíci říjnu a listopadu. Pro porovnání údajů s průběhem ojetí byla data z archivu počasí redukována vždy na průměr hodnot mezi jednotlivými daty měření ojetí – viz graf č. 27.



Graf 27: Nárůst bočního ojetí vnější kolejnice a povětrnostní podmínky

Mezi měřeními v říjnu a listopadu poklesly průměrné teploty a zvedla se i vlhkost vzduchu. Po měření v listopadu znovu narostla průměrná vlhkost vzduchu, ale teploty se přiblížily nulovým hodnotám.

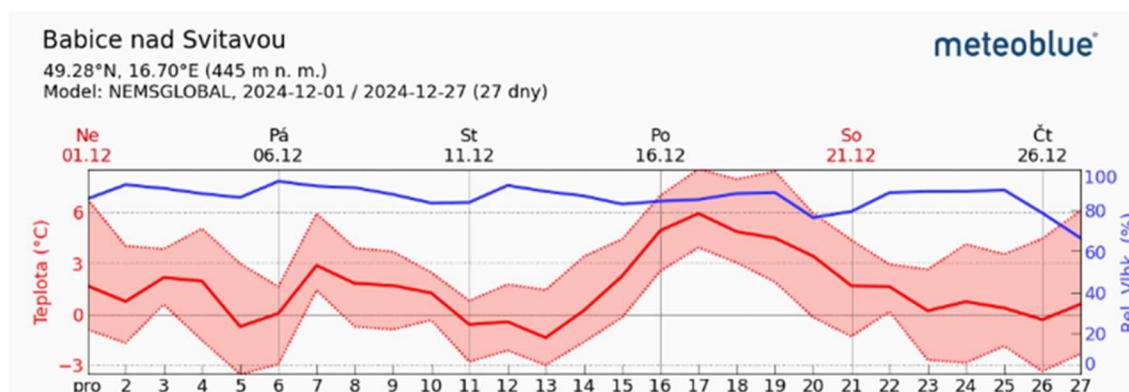
Reálná teplota kolejnic a jejich vlhkost je pouze z údajů o počasí obtížně posouditelná. Nelze tak plně prokázat, že dochází k nižšímu opotřebení kolejnice právě vlivem povětrnostních podmínek.

9 Porovnání s daty od Správy železnic

Správa železnic poskytla pro účely této diplomové práce celkem tři datové sady z měřicího vozu, obsahující hodnoty bočních a svislých ojetí kolejnic a rozchodu koleje. Měření se uskutečnila v datech 26. 3., 30. 7. a 12. 12. 2024.

Pro porovnání s vlastními daty byla vybrána měřená sada ze dne 30. 7. Důvodem byla její časové blízkosti k ostatním měřením a vliv námrazy při měření v prosinci. Přestože nejbližší vlastní měření je z data 26. 7., byla pro porovnání dat využita i sada z 27. 8., která je měřena v hustším intervalu.

V grafice z archivu počasí na obrázku č. 29 můžeme porovnat povětrnostní podmínky z vlastního měření provedeného 27. 12 a měření Správy železnic ze dne 12. 12. Stejně jako u vlastního měření zde s nejvyšší pravděpodobností došlo k ovlivnění měření námrazou. Do jaké míry ovlivnila námraza tuto technologii měření však nelze z výsledných dat jasně určit.



Obrázek 29: Grafika z archivu počasí pro měsíc prosinec [30]

9.1 Interval a přesnost měření

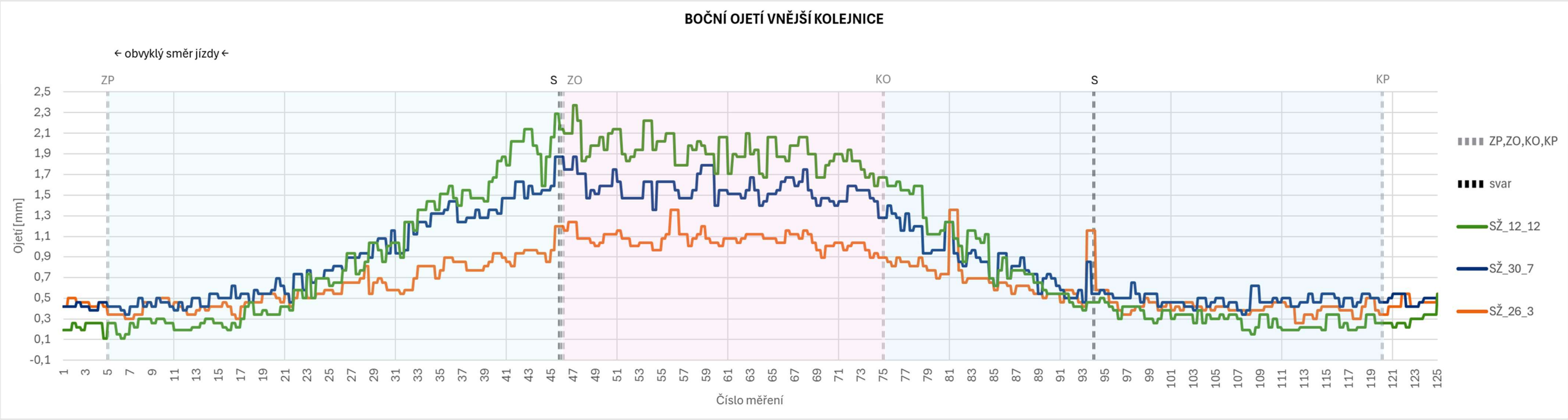
Profil kolejnice je měřen v intervalu 0,25 m s přesností měření ± 1 mm.

Při měření rozchodu koleje je perioda měření rovněž 0,25 m, a přesnost měření je $\pm 0,2$ mm. K bezkontaktnímu měření jsou využity kamery a laserový zdroj světla.

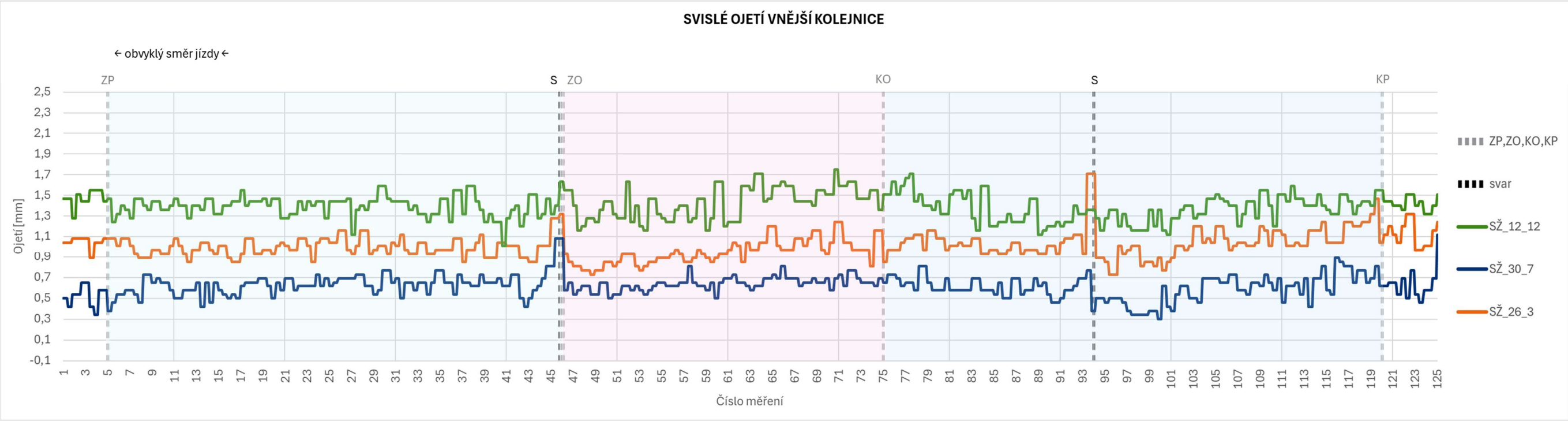
9.2 Porovnání naměřených dat ojetí kolejnic

9.2.1 Výstupy z dat ojetí kolejnic poskytnuté Správou železnic

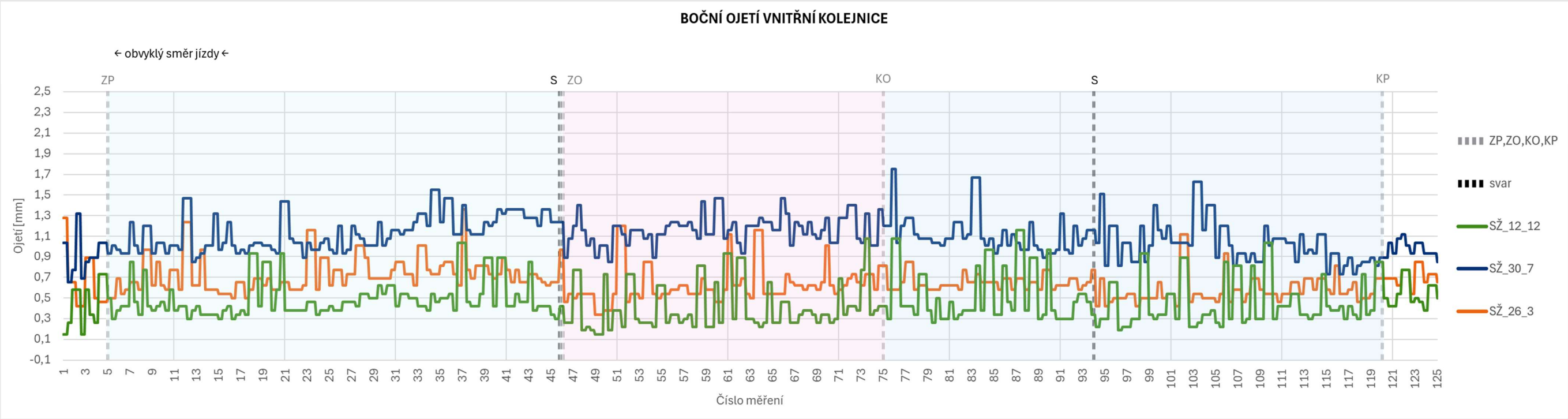
V legendách grafů jsou vždy uvedena data jednotlivých měření.



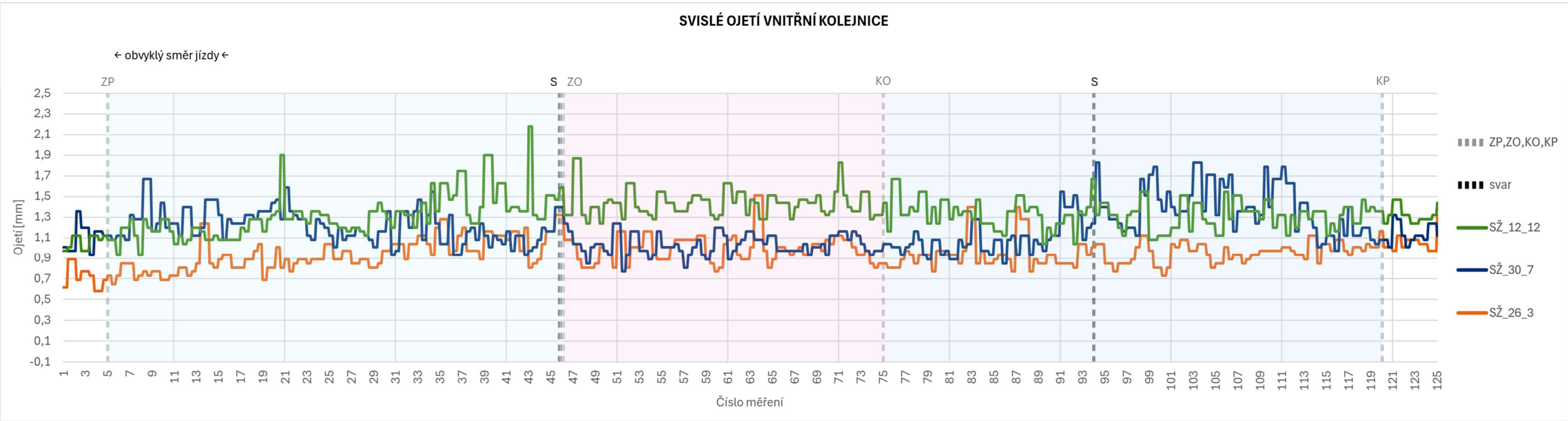
Graf 28: Data SŽ – boční ojetí vnější kolejnice



Graf 29: Data SŽ – svislé ojetí vnější kolejnice



Graf 30: Data SŽ – boční ojetí vnitřní kolejnice

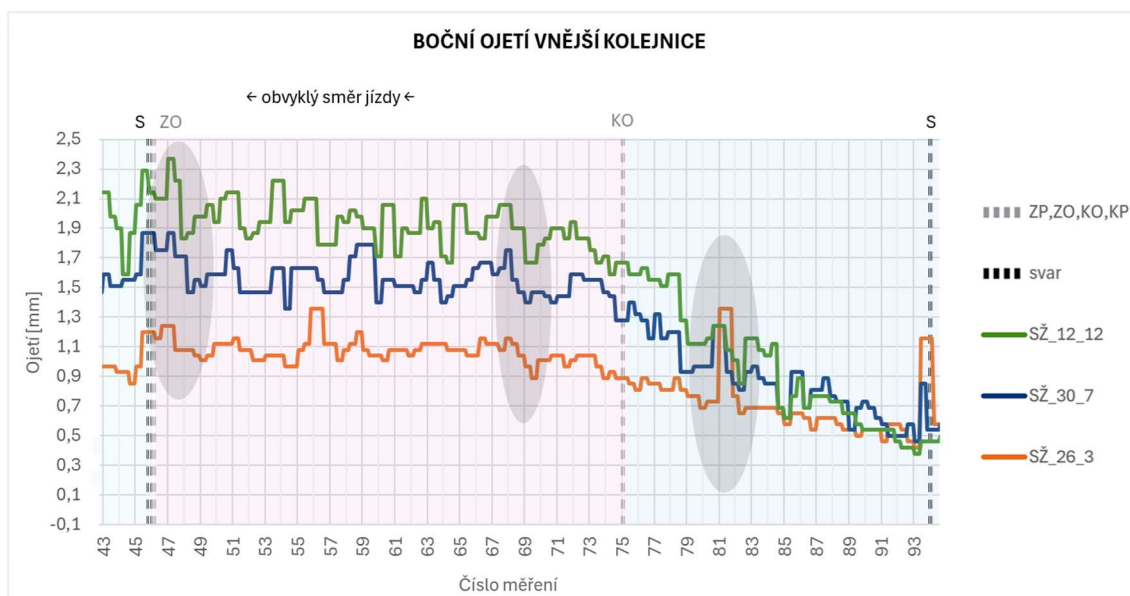


Graf 31: Data SŽ – svislé ojetí vnitřní kolejnice

Při porovnání grafů č. 28 až 31 můžeme pozorovat znatelně větší rozptyl hodnot mezi lokálními minimy a maximy pro vnitřní kolejnici. Rozptyl mezi hodnotami běžně dosahuje až 0,6 mm, přičemž pro vnější kolejnici jsou tyto hodnoty poloviční. Tato skutečnost byla pozorována u všech poskytnutých datových sad, příčinou je tedy pravděpodobně způsob provádění měření.

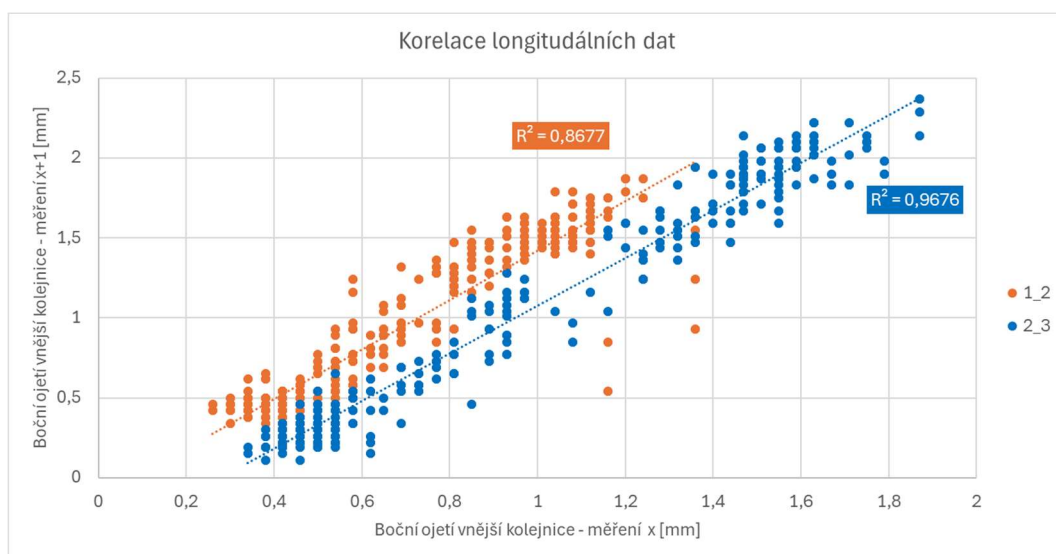
Při porovnání dat rovněž pozorujeme, že v nižších hodnotách ojetí, což je dáno i přesností měření, jsou značné výkyvy průměrných hodnot mezi jednotlivými sadami. U svislého ojetí vnější kolejnice a bočního ojetí vnitřní kolejnice průběhy dokonce neodpovídají nárůstu ojetí mezi jednotlivými sadami měření v čase. Ačkoli průběh měření po délce oblouku vykazuje podobnou tendenci, jednotlivé sady jsou na svislé ose vzájemně posunuty.

Také lze pozorovat posun mezi jednotlivými sadami v podélném směru. Nejvíce znatelné je pozorování u bočního ojetí vnější kolejnice, kde lze sledovat určitá opakující se maxima a minima v jednotlivých sadách, místa jsou ale vůči sobě lehce posunutá. Viz šedě podbarvené části v grafu č. 32.



Graf 32: Odchylky datových sad pro boční ojetí vnější kolejnice

Přesto je u bočního ojetí vnější kolejnice poměrně silná korelace mezi sadami měření. U ostatních měření se koeficienty determinace při porovnávání naměřených sad blížily nulovým hodnotám. V grafu č. 33 je znázorněna rozdílná korelace mezi první a druhou sadou 1_2 a druhou a třetí sadou 2_3 pro boční ojetí vnější kolejnice.



Graf 33: Korelace mezi datovými sadami ojetí od SŽ

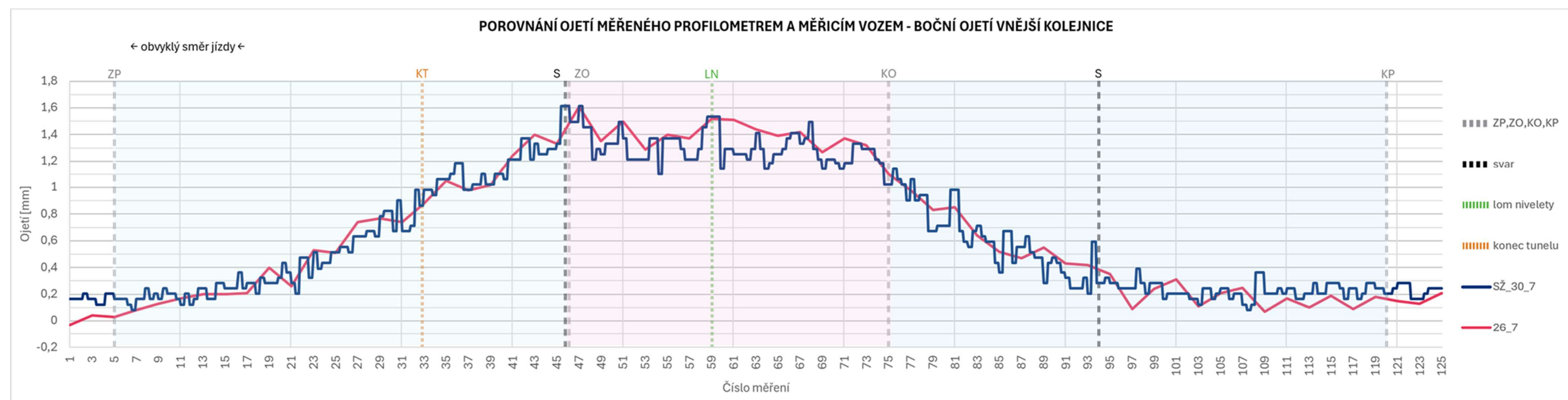
9.2.2 Porovnání vlastních naměřených dat ojetí s daty Správy železnic

Data ojetí z měřicího vozu dosahují poměrně vysokých hodnot ojetí v přímých úsecích a celkově dosahují vyšších hodnot, než jsme naměřili pomocí profiloměru Calipri C42. Pro porovnání průběhů byla poskytnutá data na svislé ose posunuta o rozdíl průměrů ojetí měřené sady vlastní a sady z měřicího vozu. Tyto rozdíly uvádí následující tabulka.

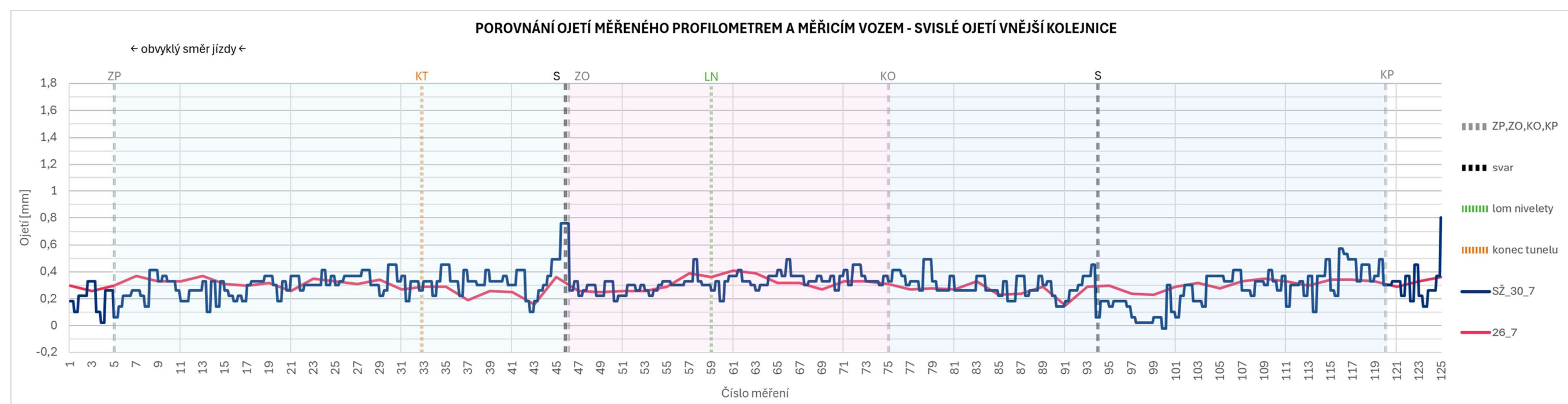
Tabulka 6: Průměrný rozdíl ojetí pro svislý posun

Průměrný rozdíl ojetí [mm]			
vnější kolejnice		vnitřní kolejnice	
boční	svislé	boční	svislé
-0,25703	-0,31825	-0,79673	-0,45134

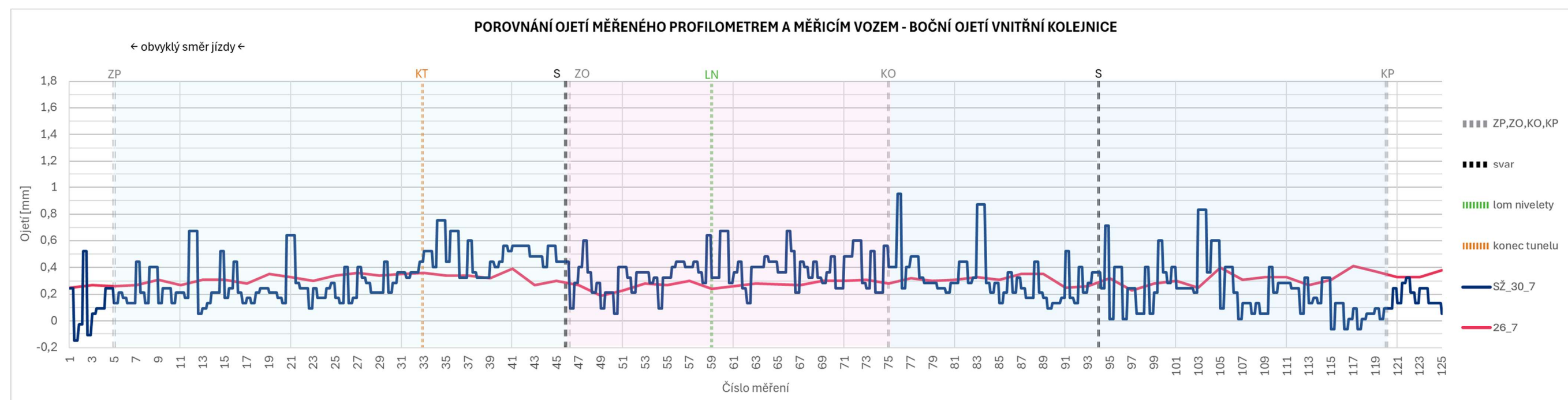
Posunutí aplikuji na všechny následující grafy, pro porovnání vlastních a poskytnutých dat. V legendách grafů označuji jednotlivé křivky datových sad podle data měření.



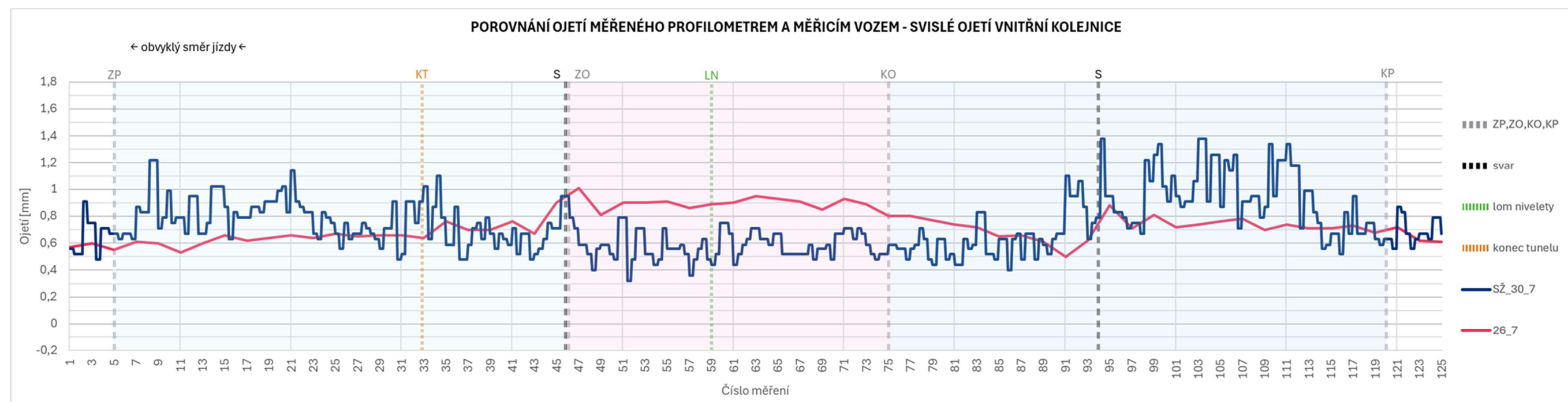
Graf 34: Porovnání dat – boční ojetí vnější kolejnice



Graf 35: Porovnání dat – svislé ojetí vnější kolejnice



Graf 36: Porovnání dat – boční ojetí vnitřní kolejnice



Graf 37: Porovnání dat – svislé ojetí vnitřní kolejnice

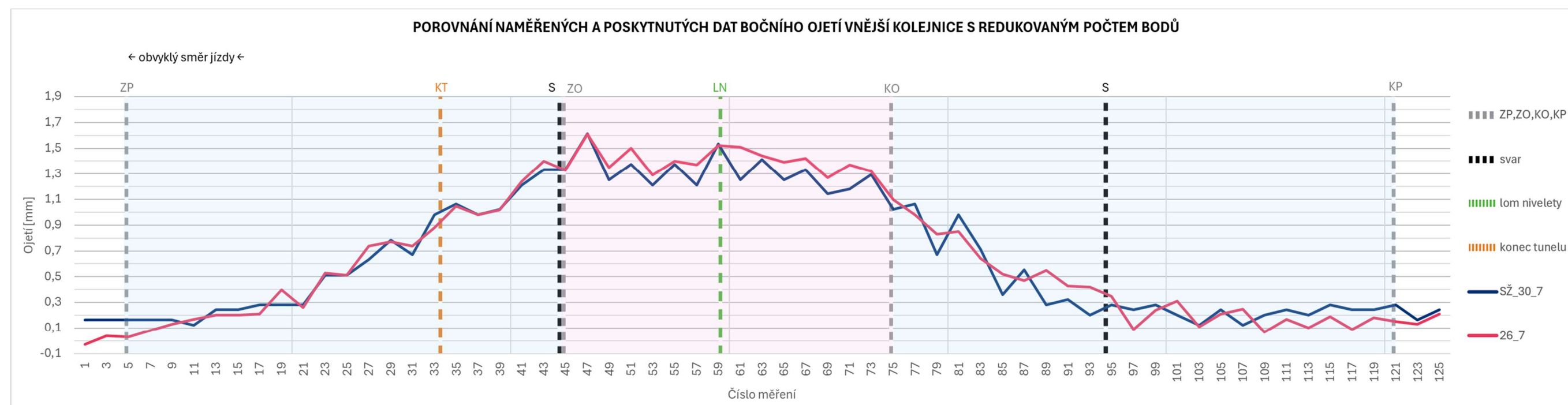
Data ojetí vnitřní kolejnice z měřicího vozu jsou příliš zatížena chybou měření a nebyla tak k dalšímu zpracování využita. Pro svislé ojetí vnější kolejnice jsou hodnoty po svislém posunu dat celkově porovnatelnější, ale vzájemná korelace dat je stále velmi nízká. Dále se věnuji pouze porovnání naměřených hodnot bočního ojetí vnější kolejnice, zlepšení interpretace dat a jejich vzájemné korelaci.

Další úprava dat z měřicího vozu spočívala v jejich redukci. Po vyzkoušení několika metod byla zvolena redukce, která zachovává každou 10. hodnotu. Tato metoda zvládla nejlépe zachytit většinu lokálních maxim a minim. Porovnání bylo zhotoveno v grafech s body po 2,5 metrech.

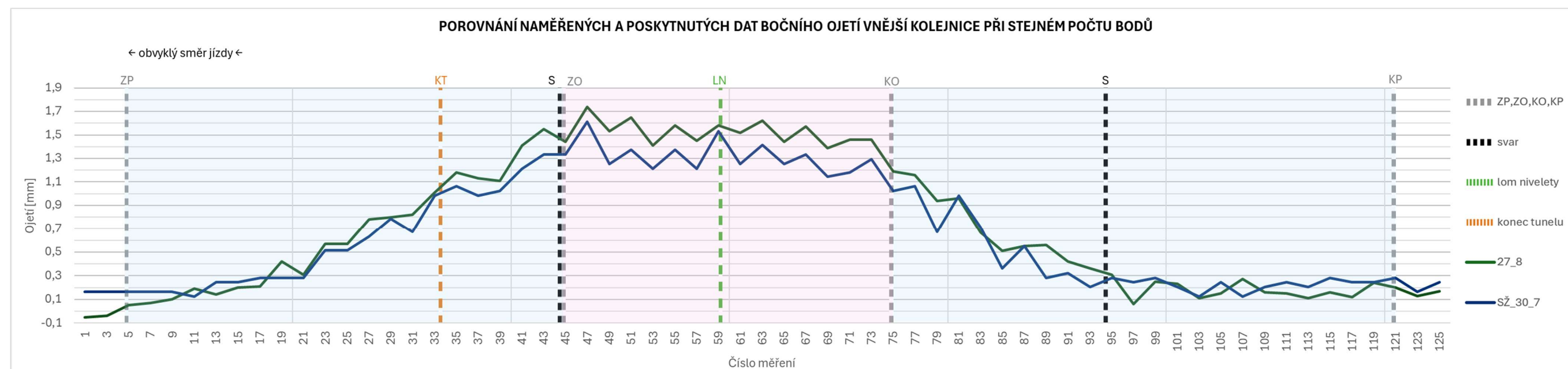
Grafy č. 38 a 39 představují srovnání pro vlastní data ojetí z 26. 7. a 27. 8. s daty z měřicího vozu měřené 30. 7. Pro sedmý měsíc bylo vlastní měření prováděno po 5 metrech. Dále pracuji se sadou z osmého měsíce z důvodu polovičního intervalu mezi body.

Vzhledem ke způsobu měření vlastního úseku se nepředpokládá významné odchýlení polohy bodů. Pro data z měřicího vozu jsem ale ještě dále prověřovala, zda nedosáhnou lepší korelace s vlastními daty. Předpokládala jsem jistou chybovost systému měřicího vozu, kdy přidělení na staničení není přesné. Pro jednoduchost aplikace bylo předpokládáno skokové posunutí v rámci staničení úseku. Cílem bylo upravit data tak, aby si vzájemně odpovídala lokální minima a maxima. Výsledné návrhy posunutí dat uvádím v grafu č. 40.

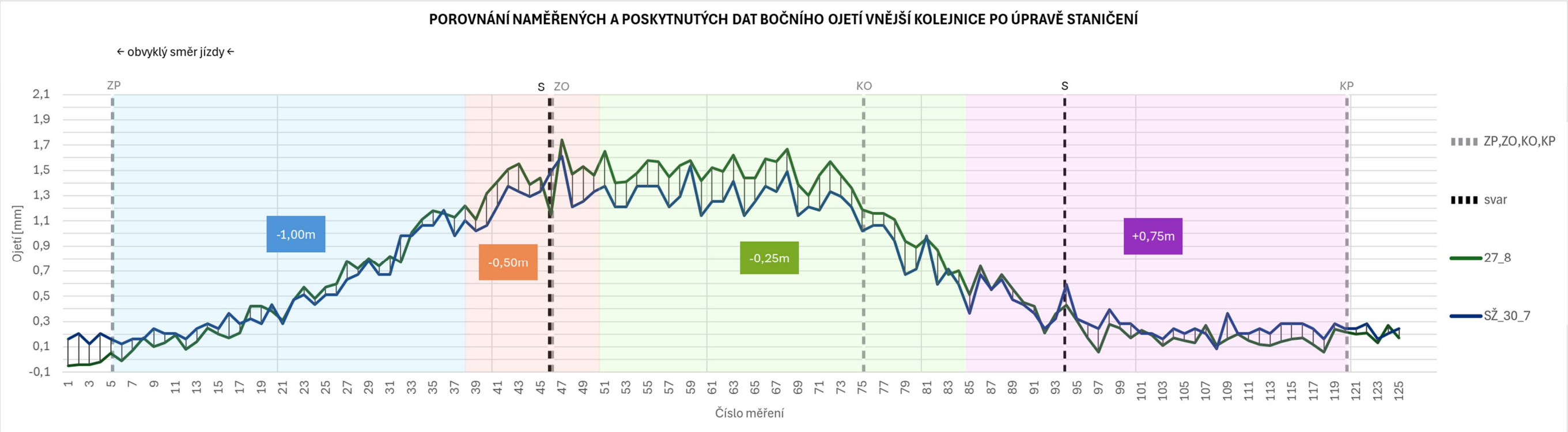
Po úpravě dat došlo k mírnému zlepšení korelace, k posunutí staničení by tedy mohlo docházet. Zlepšení korelace však není výrazné a pro přesnější analýzu by bylo potřeba kvalitu přidělování staničení porovnat na větším množství delších měřených úseků.



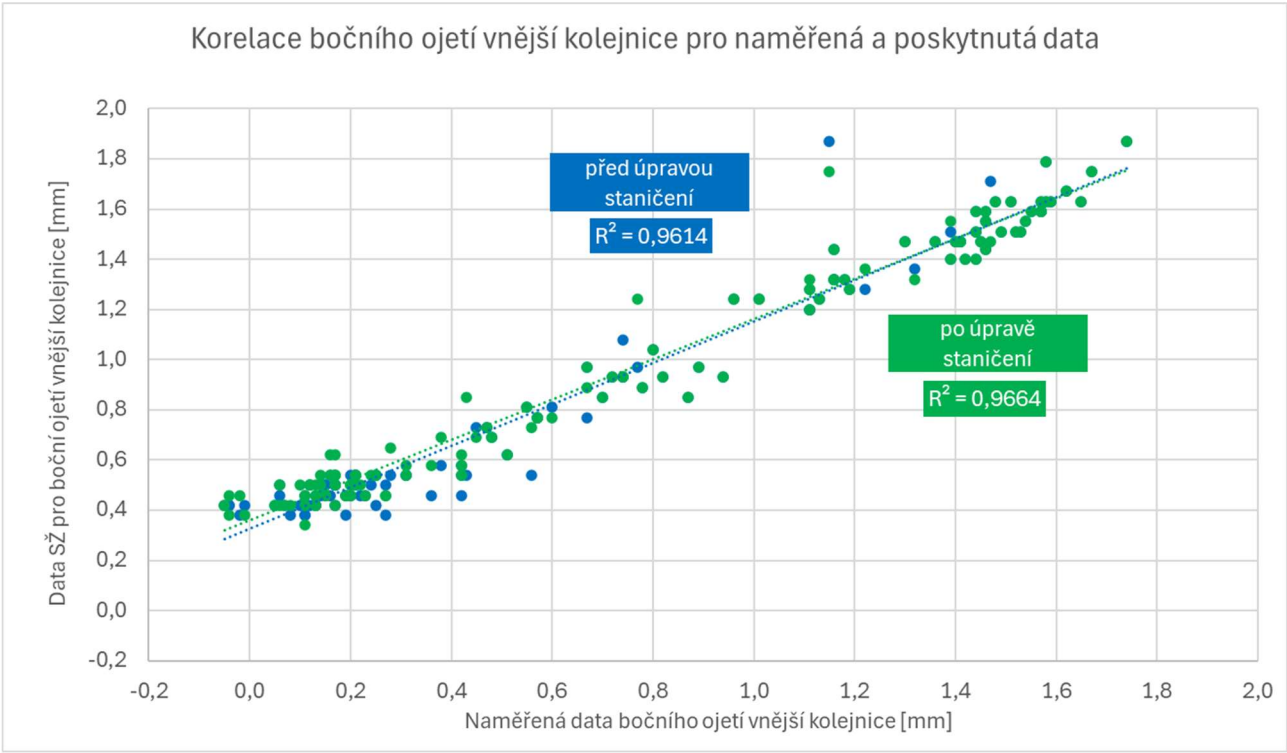
Graf 38: Porovnání dat s redukováným počtem bodů – boční ojetí vnější kolejnice (26.7.)



Graf 39: Porovnání dat ve stejném kroku – boční ojetí vnější kolejnice (27.8)



Graf 40: Porovnání naměřených a redukováných poskytnutých dat s úpravou staničení



Graf 41: Korelace vlastních dat s poskytnutými daty před a po úpravě staničení

9.3 Porovnání naměřených dat ojetí s rozchodem koleje

Rozchod je jedním z hlavních faktorů, který má vliv na kontaktní geometrii kolo – kolejnice, a tudíž se předpokládá i jeho významná souvislost s ojížděním kolejnic. K rozšiřování rozchodu koleje dochází kombinací tří faktorů. Příčinami jsou ojetí hlavy kolejnic a opotřebení upevňovadel, díky kterému dochází k bočnímu posunu paty kolejnic vůči pražcům. Posledním faktorem je zkroucení kolejnice, kdy dochází k vychýlení od svislé osy a hlava kolejnice je tak vůči patě bočně posunuta. [6].

9.3.1 Výstupy z dat rozchodu koleje a porovnání s ojetím kolejnic

Poskytnutá data rozchodu koleje ze tří proběhlých měření jsou zpracována v grafu č. 42. Stejně jako u dat ojetí sledujeme posuny mezi jednotlivými sadami v příčném směru. Posuny se po délce měřeného úseku pro jednotlivé body liší. Rovněž pozorujeme odchylky v podélném směru, kdy data ze sedmého měsíce dosahují nižších hodnot oproti předcházejícímu měření. V grafu uvádím také porovnání s projektovanou hodnotou rozchodu 1437 mm.

Při porovnání všech tří sad měření rozchodu koleje jsou pozorovány opravdu velmi podobné hodnoty. Odchylky v rozchodu se podle tohoto měření v čase příliš nemění, pouze dochází k postupnému nárůstu rozchodu koleje, a to především v kružnicové části oblouku. Korelaci mezi sadami zachycuje graf č. 46.

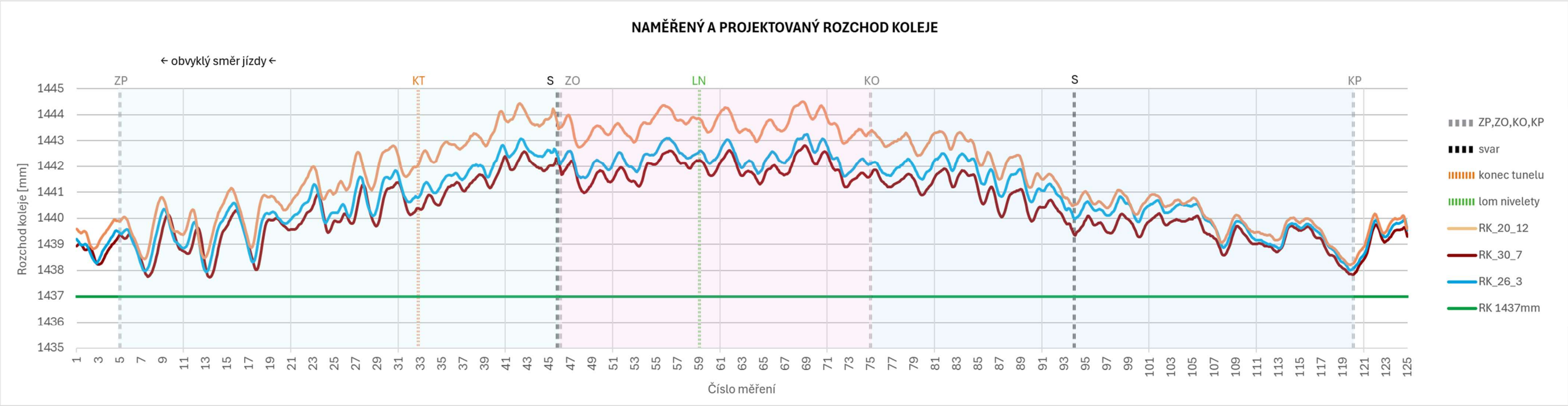
Souvislosti mezi průběhy rozchodu a bočního ojetí vnější kolejnice z měřicího vozu jsou zachyceny na grafu č. 43. Korelaci těchto dat zachycuje graf č. 47.

Při srovnání vlastních naměřených dat bočního ojetí vnější kolejnice s rozchodem koleje je patrná částečná provázanost hodnot v lokálních minimech a maximech (graf č. 44). Poměrně silná korelace je znázorněna i na jednom z následujících grafů (č. 48). Rozchod tedy určitě hraje jistou roli v nepravidelnosti ojíždění, zdaleka však nevysvětluje všechna místa, jako například ta v okolí svarů.

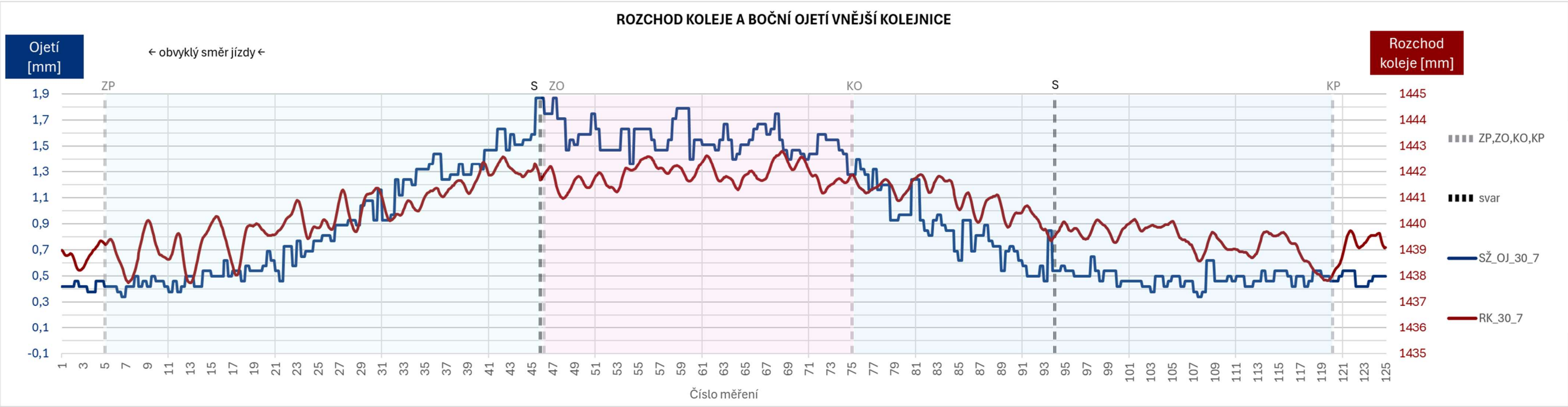
Při hledání lepších hodnot korelace, jsem stejně jako v předchozí kapitole, aplikovala posunutí dat v rámci staničení. O něco lepší korelace, ale také vizuální provázanost dat, je dosažena pro posunutí staničení rozchodu o 1 m vzad (graf č. 45). Mírné zlepšení korelace dat zachycuje graf č. 49.

Při měření hodnot rozchodu by mohlo, stejně jako bylo uvažováno u dat ojetí z měřicího vozu, docházet k více rozdílným posunům v rámci staničení úseku. Jelikož nelze stanovit, jak velký vliv má rozchod na průběh ojetí, tak od analýzy dalších možných posunutí upouštím. Pro další grafy pracuji pouze s posunutím staničení rozchodu koleje o 1 m vzad.

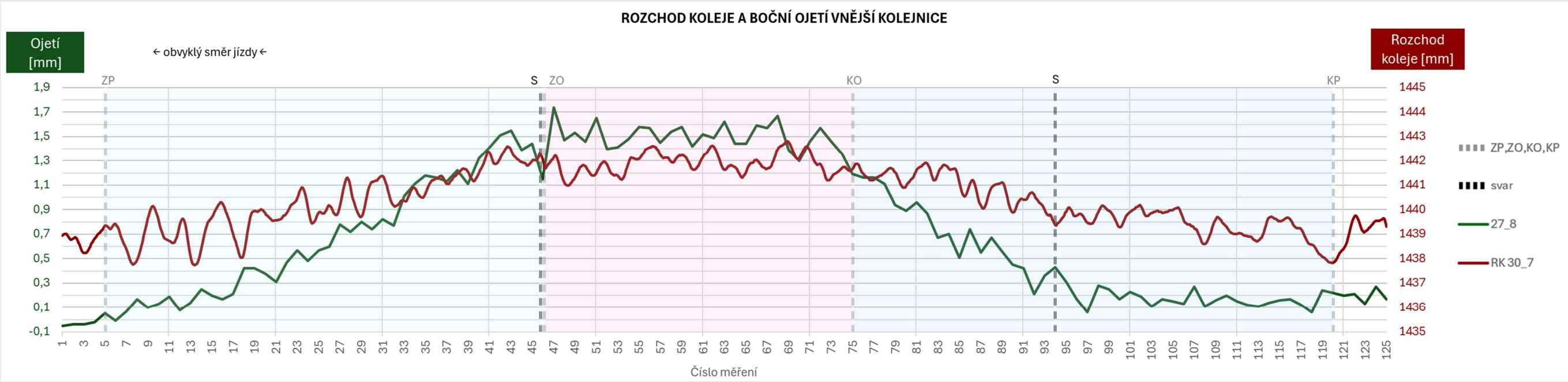
Pro doplnění uvádím ještě graf porovnávající rozchod s bočním ojetím vnitřní kolejnice (graf č. 50), kde vychází téměř nulová korelace. Pro toto ojetí však nevycházely ani silné korelace mezi jednotlivými sadami vlastního měření, takže se nedá předpokládat vysoká korelace při porovnání s ostatními daty. Vzhledem k vlivu rozchodu na kontaktní geometrii uvádím také porovnání rozchodu se svislým ojetím vnitřní kolejnice (graf č. 51). V tomto případě je korelace nízká, koeficient determinace R^2 dosahuje hodnoty 0,367.



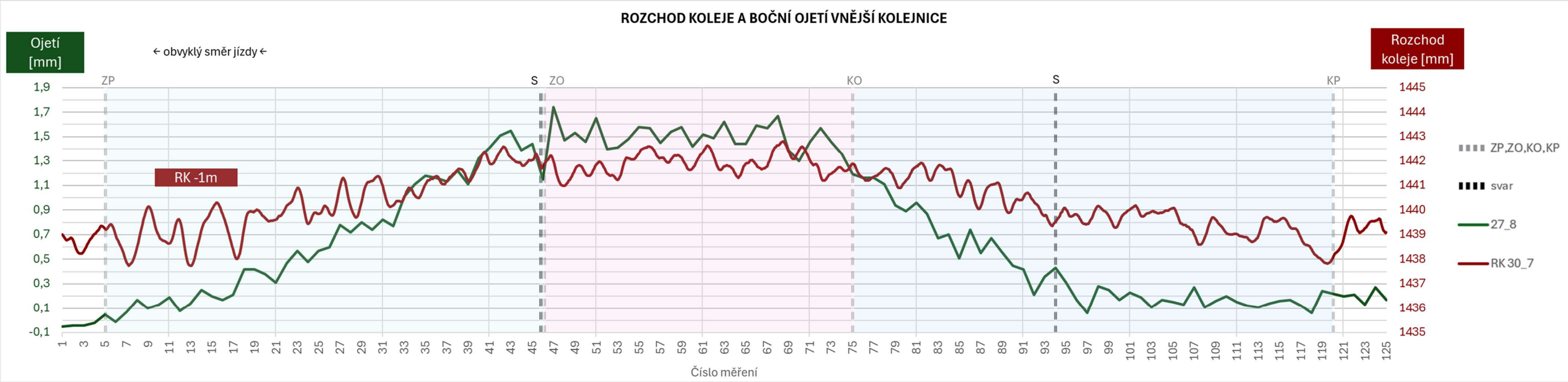
Graf 42: Porovnání tří měření rozchodů a projektované hodnoty rozchodu



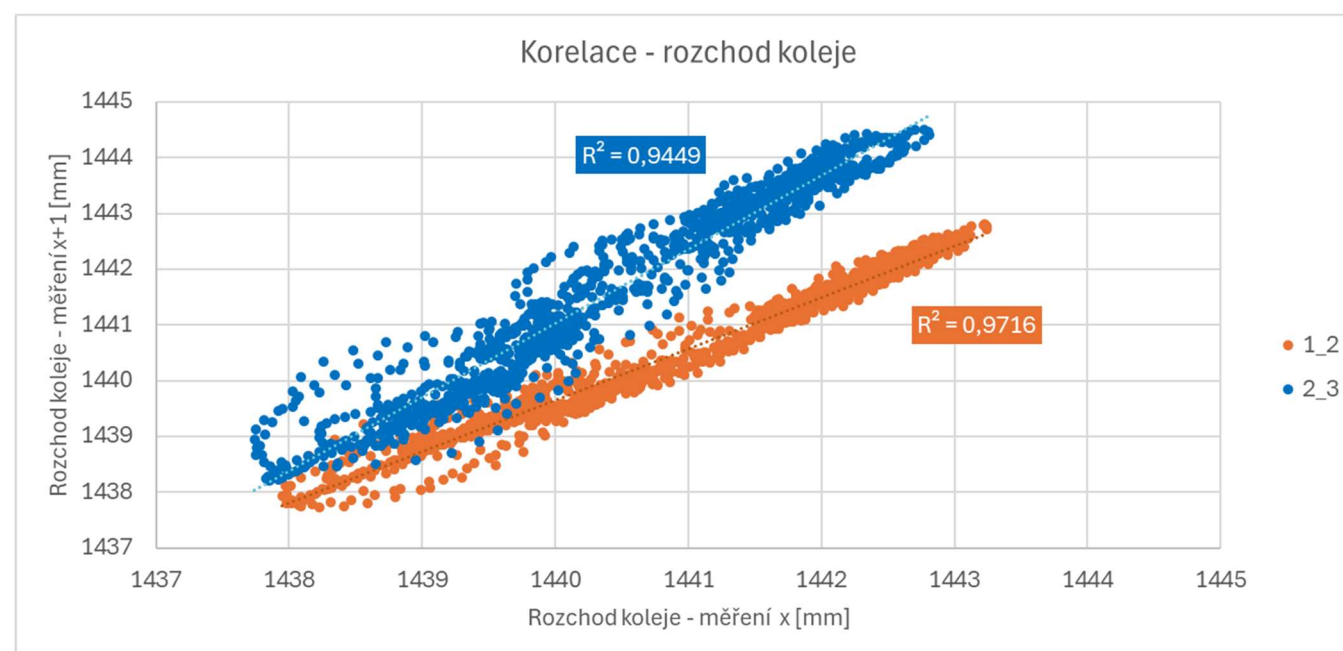
Graf 43: Rozchod a boční ojetí vnější kolejnice (SŽ)



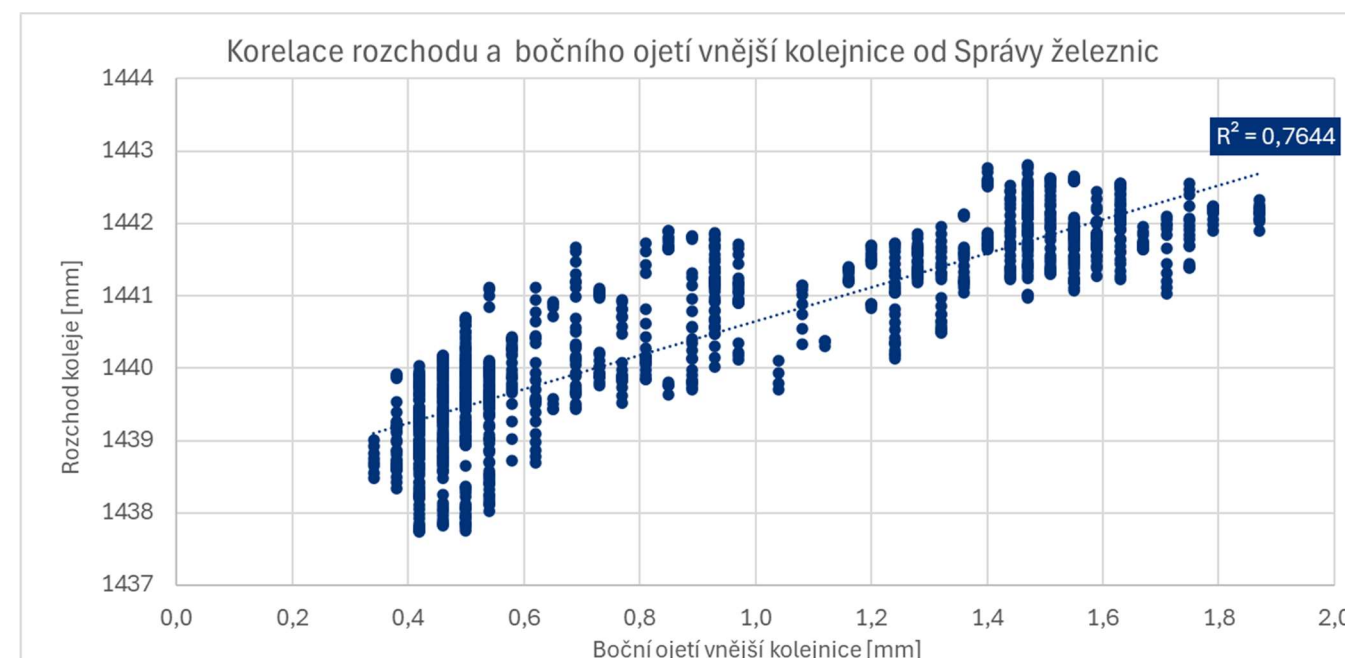
Graf 44: Rozchod a boční ojetí vnější kolejnice (27.8)



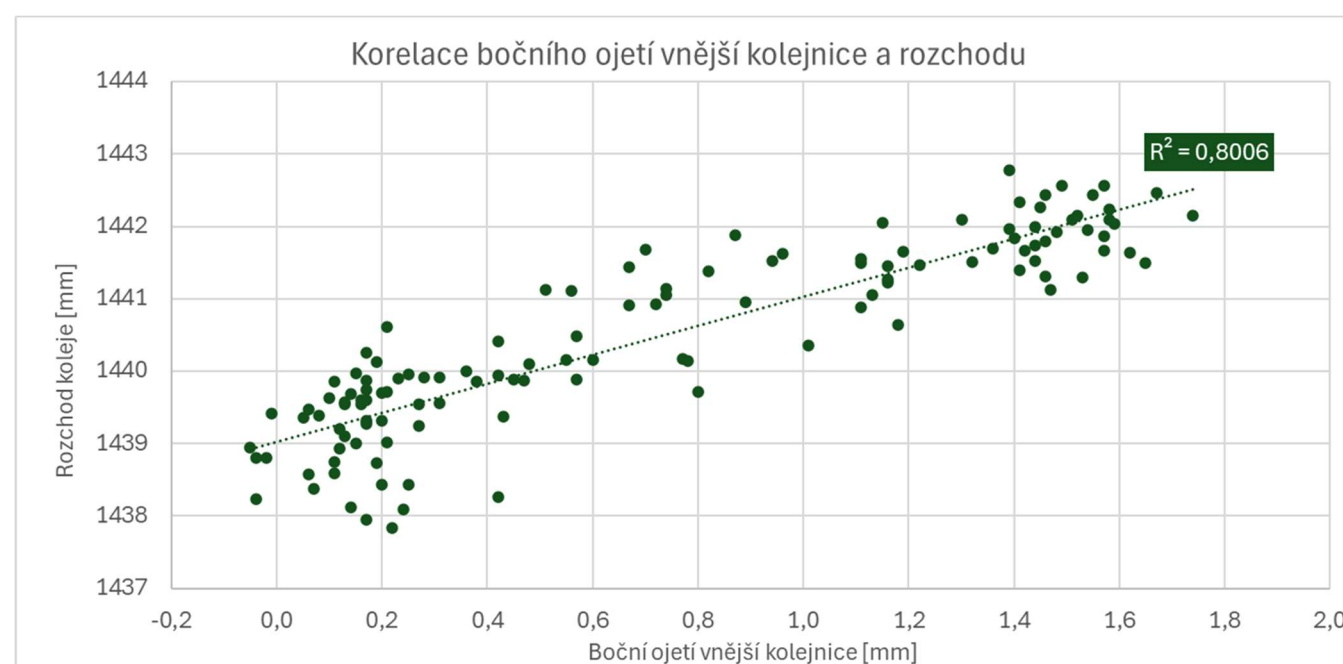
Graf 45: Upravené staničení rozchodu a boční ojetí vnější kolejnice (27.8)



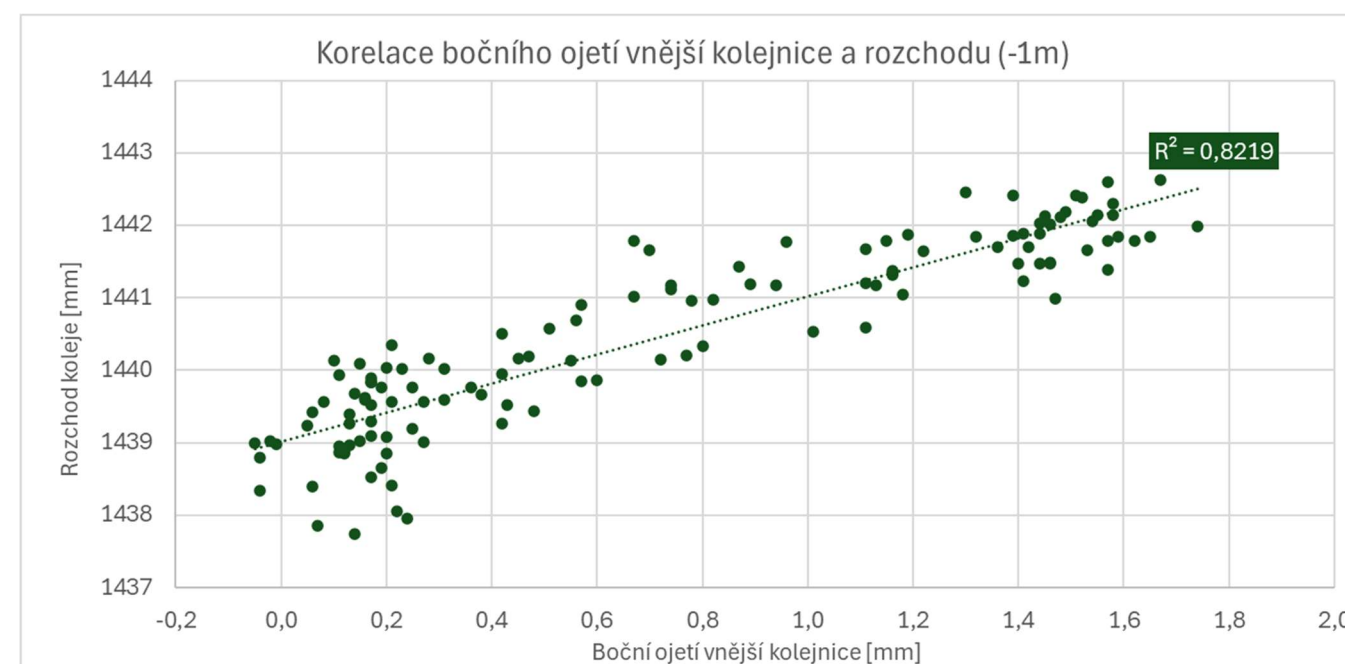
Graf 46: Korelace mezi sadami měření rozchodu koleje



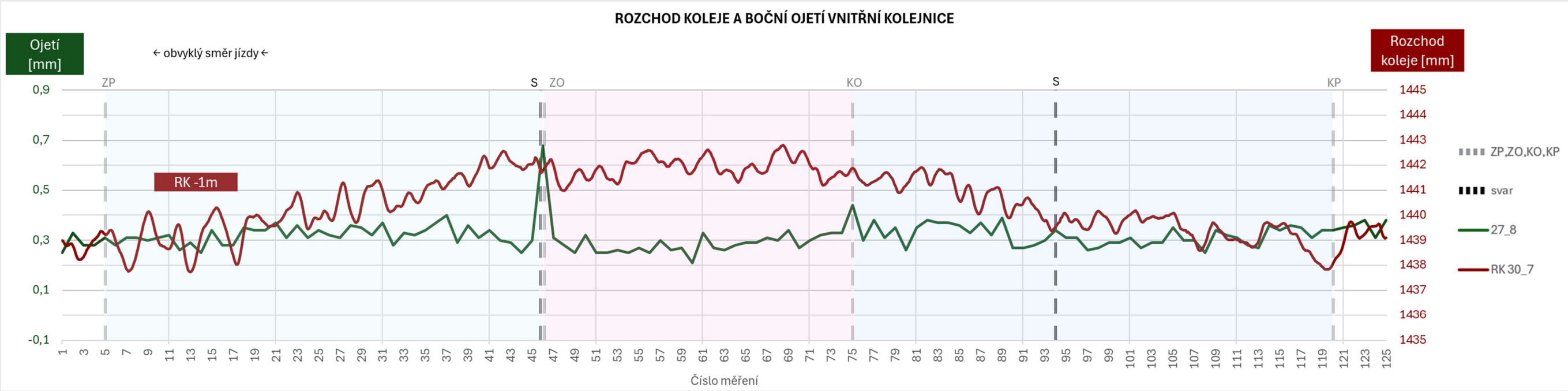
Graf 47: Korelace rozchodu a bočního ojetí vnější kolejnice od Správy železnic



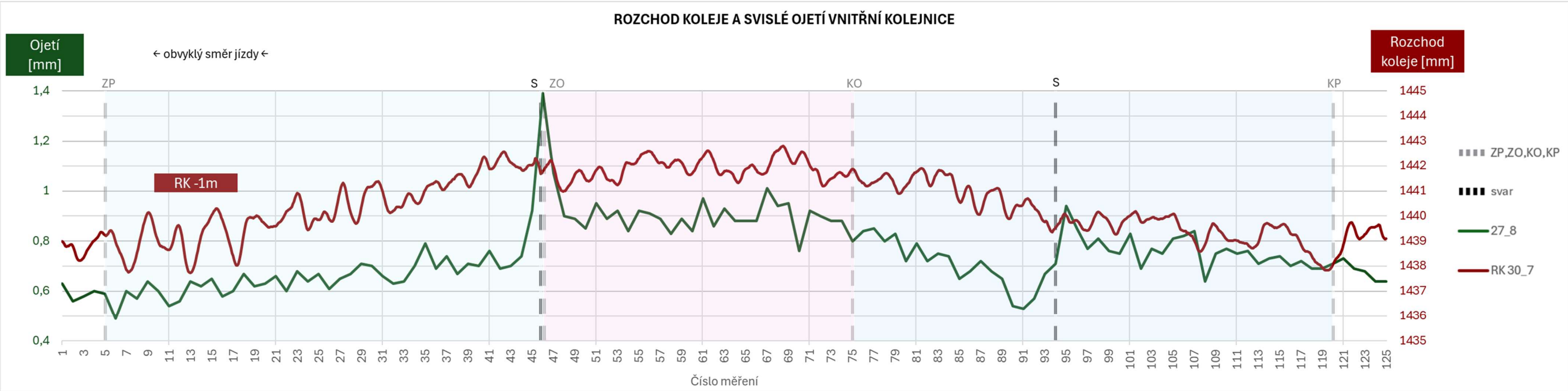
Graf 48: Korelace rozchodu a bočního ojetí vnější kolejnice



Graf 49: Korelace upraveného staničení rozchodu a bočního ojetí vnější kolejnice



Graf 50: Rozchod a boční ojetí vnitřní kolejnice



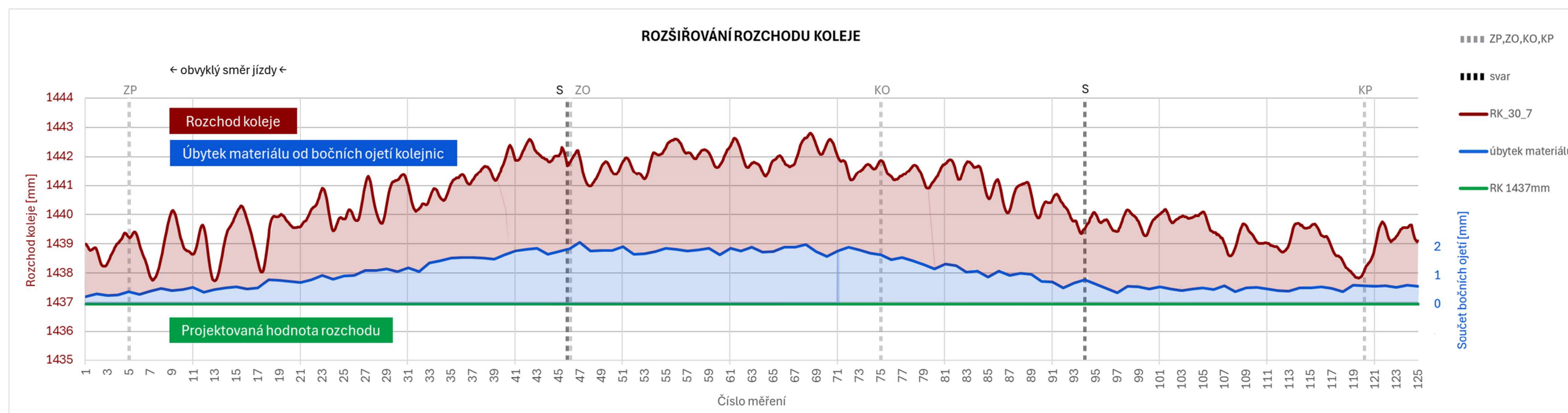
Graf 51: Rozchod a svislé ojetí vnitřní kolejnice

9.3.2 Rozšiřování rozchodu koleje

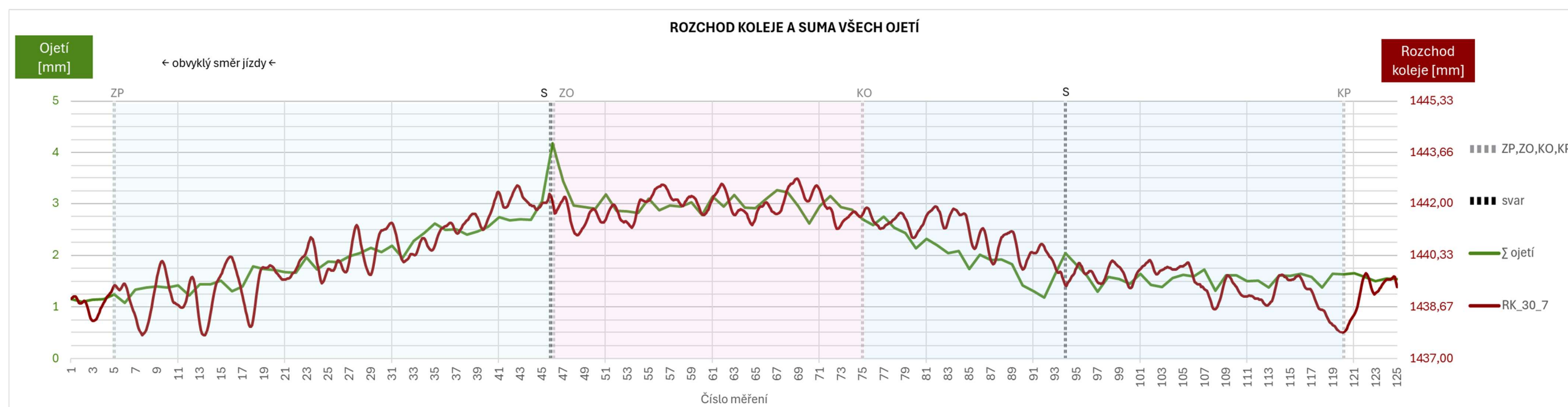
Rozšiřování rozchodu je částečně způsobeno úbytkem materiálu vlivem bočního ojetí kolejnic. Rozdíl mezi tímto úbytkem a vlivem ostatních faktorů na změnu rozchodu znázorňuje graf č. 52. Dalšími faktory jsou zde především počáteční stavební odchylky, držebnost upevňovadel a jejich deformace v čase. Z rešerší uskutečněných v minulosti při zkoumání problematiky oblouků malého poloměru byl pozorován značný vliv na změnu rozchodu opotřebením úhlových vodících vložek. Podstatným vlivem mezi rozdíly je samozřejmě i chybovost obou měřicích zařízení. [24]

Modrá plocha v grafu č. 52 znázorňuje rozdíl mezi projektovanou hodnotou rozchodu a úbytkem materiálu od bočních ojetí kolejnic. Červená plocha vyznačuje vliv ostatních faktorů.

Pokud bychom uvažovali o celkovém součtu bočních a svislých ojetí jako o vyjádření energie disipované do kolejového roštu, mohli bychom analyzovat vliv této energie na rozšiřování rozchodu koleje. Porovnání sumy všech ojetí s rozchodem koleje znázorňuje graf č. 53. V tomto zobrazení odpovídá nárůst sumy ojetí o 1 mm přibližnému nárůstu rozchodu o 1,67 mm.



Graf 52: Rozšiřování rozchodu koleje vlivem úbytku materiálu od bočního ojetí kolejnic

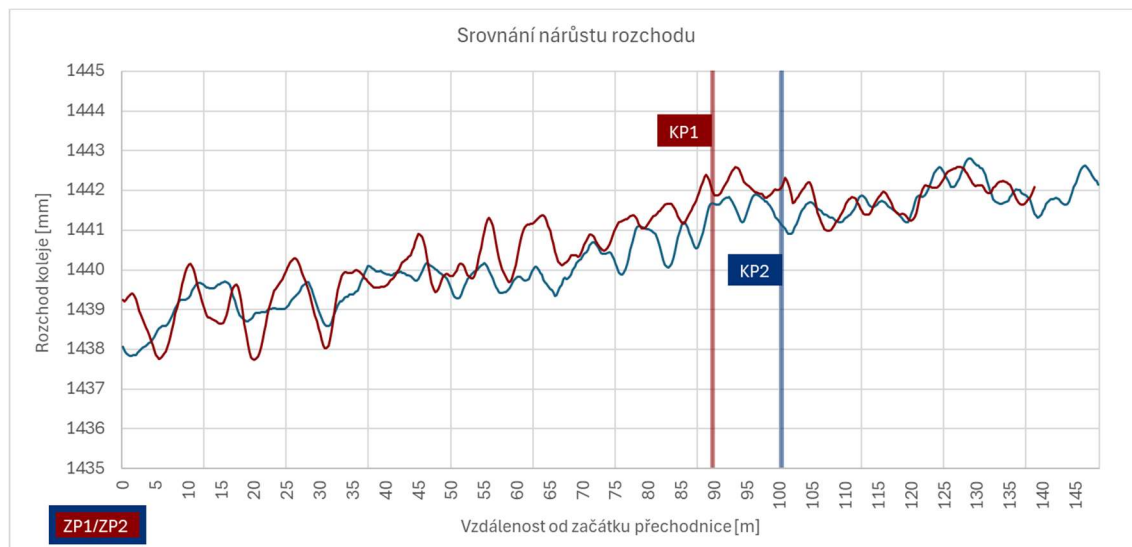


Graf 53: Suma všech hodnot ojetí jako energie disipovaná do kolejového roštu

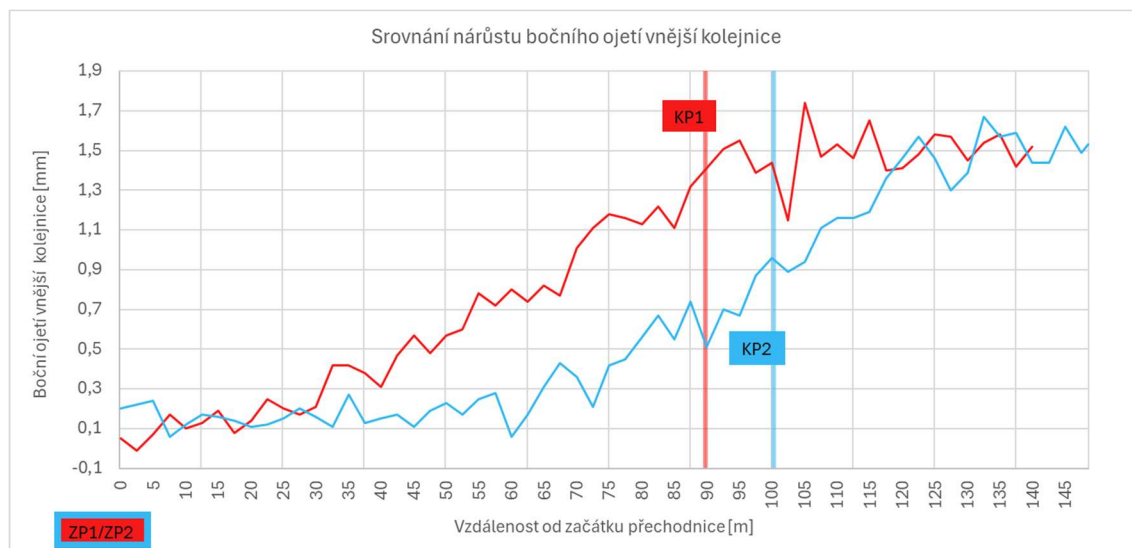
9.3.3 Rozchod koleje po délce oblouku

Zatímco nárůst rozchodu z obou stran oblouku je srovnatelný, ojetí se vyvíjí odlišně. Zobrazení v grafech č. 54 a 55 je vždy od začátku přechodnice po střed oblouku. První část oblouku s přechodnicí č. 1 (proti směru jízdy) a druhá část oblouku s přechodnicí č. 2 (po směru jízdy).

Nerovnoměrný nárůstu ojetí v oblasti první a druhé přechodnice byl již rozebírán v kapitole č. 8.4. Srovnání v následujících grafech vyvrátilo, že by rychlost nárůstu bočního ojetí vnější kolejnice v této oblasti závisela na rozchodu koleje.



Graf 54: Srovnání nárůstu rozchodu od začátku přechodnic



Graf 55: Srovnání nárůstu bočního ojetí vnější kolejnice od začátku přechodnic

10 Závěr

Tato práce nabízí podrobnější vhled do tematiky průběhu ojetí v oblouku malého poloměru, a to jak po délce oblouku, tak v čase.

V první části práce jsem popsala principy jízdy vozidla v koleji, působící síly a kontaktní geometrii na styku kola a kolejnice.

V další části jsem se věnovala teorii ojetí a možným způsobům měření ojetí. V této části je popsána technologie měření pomocí laserového profiloměru i měřicího vozu, které byly zdrojem následně zpracovávaných dat.

Pomyslnou třetí částí je pak měření vlastních dat pomocí profiloměru a jejich následné zpracování. V práci popisuji průběh vlastního měření dat a vyjadřuji se ke specifickým měření pomocí profiloměru Calipri C42. Dále se zaměřuji na chyby měření, a vyšetřuji průběh v různých specifických částech úseku. Podstatná část je věnována také studiu nárůstu ojetí v čase.

Měření profiloměrem přineslo poměrně kvalitní výsledky opakovatelné v čase. Pro nižší hodnoty ojetí se ale výrazněji projevil faktor přesnosti měřicího přístroje. Vzhledem k použité technice a časovým možnostem nebylo vhodné rozsah měření navyšovat. Domnívám se ale, že právě hustší krok měření by mohl přinést další zajímavá data a pomohl by s objasněním průběhu ojetí v oblouku.

Pro další měření s přístrojem Calipri bych určitě doporučila vyhnout se měření za vysoké vlhkosti nebo při námraze na kolejnici.

Pro podrobnější analýzu měřeného úseku i s ohledem na kontaktní geometrii by bylo zajímavé disponovat také dalšími softwarovými moduly Calipri. Zejména pak toho, který umožňuje stanovit z naměřených hodnot ekvivalentní konicitu a zobrazit kontaktní geometrii.

Při zpracování dat byly využity různé formy zobrazení ve 2D grafech, ale také modely 3D grafů pro průběh všech datových sad ojetí v čase. Pro srovnání dat a porovnání souvislostí byla často využita korelační analýza. Díky tomu bylo možné navigovat směřování práce a rozvíjet interpretaci výsledků.

Pro tuto práci původně nemělo proběhnout z časových důvodů šesté měření. Po naměření prvních pěti datových sad se nakonec jeho doplnění zdálo vhodné a hodnotné pro analýzu. Přestože je šesté měření zatíženo určitou chybovostí, považuji ho za důležitou upomínku, že podmínkám měření je potřeba věnovat vyšší pozornost.

Pro další měření by bylo zajímavé zvážit i možnost instalace vlastní meteorologické stanice, která by zaznamenávala povětrnostní podmínky v okolí místa měření.

Poslední část práce je zaměřena na srovnání s daty z měřicího vozu od Správy železnic. V této části porovnávám jednak průběhy ojetí s vlastním měřením, ale také závislost ojetí na rozchodu koleje. V obou případech se pokouším určit míru chybovosti měření a nalézt nejlepší způsob aplikace pro porovnání dat.

Porovnatelnost vlastních dat ojetí s daty ojetí od Správy železnic bylo náročné. Důvodem byla především výrazná odlišnost přesnosti měřicích přístrojů, ale také odlišný krok měření.

Porovnání bočního ojetí vnější kolejnice s rozchodem koleje přineslo poznání o poměrně značné souvislosti těchto veličin v průběhu měřeného oblouku.

Zajímavé výsledky zachytilo také porovnání faktorů na rozšiřování rozchodu. Změna od projektovaného rozchodu koleje na měřeném úseku je pouze zhruba z 1/3 způsobena úbytkem materiálu od bočního ojetí obou kolejnic.

Mrzí mě, že se nepodařilo získat podrobné údaje o projeté zátěži. Porovnání s průběhy ojetí by totiž mohlo přinést zajímavé výsledky.

Přestože jsem se snažila obsáhnout co nejlépe zadané téma a vhodně interpretovat vlastní i poskytnutá data, má tato oblast značný rozsah. Podrobné měření na jednom úseku zdaleka nestačí k vyslovení jednoznačných závěrů. Téma ojetí kolejnic v obloucích malých poloměrů nabízí stále značný prostor pro výzkum. Pro další studium problematiky by bylo vhodné analyzovat větší množství míst, ideálně v dlouhém a uceleném časovém úseku.

Seznam použité literatury

- [1] PLÁŠEK, Otto. *Železniční konstrukce I: Interakce vozidla a kolejové jízdní dráhy*. 2007.
- [2] ESVELD, Coenraad. *Modern Railway Track*. Second edition. MRT-Productions, 2001. ISBN 90-800324-3-3.
- [3] ŘÍHA, Tomáš. *Ojíždění kolejnic v obloucích malých poloměrů*. Brno, 2024. Pojednání k disertační práci. Vysoké učení technické v Brně.
- [4] *Bezpečnosť proti vykoľajeniu železničných vozidiel*. ČSVTS, 1989. ISBN 80-231-0018-1.
- [5] SCHNEIDER, Martin. *Opotřebení kolejnic v úsecích se směrovými oblouky malého poloměru* [online]. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/141767>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [6] LICHTBERGER, Bernhard. *Track Compendium*. 2nd edition, completely revised. Eurail press, 2011. ISBN 978-3-7771-0421-8.
- [7] POLACH, Oldrich. *Characteristic parameters of nonlinear wheel/rail contact geometry* [online]. Dostupné z: doi:10.1080/00423111003668203
- [8] *Equivalent Conicity* [online]. 2021 [cit. 2024-11-16]. Dostupné z: <https://railway-news.com/download/nextsense-equivalent-conicity-safety-parameter-in-railways/>
- [9] PLÁŠEK, Otto. *Železniční stavby II: Železniční svršek - kolejnice*. 2006.
- [10] ŘÍHA, Tomáš. *BN 03 – VÝUKA V TERÉNU* [online]. In: . s. 9 [cit. 2024-12-14]. Dostupné z: https://www.fce.vutbr.cz/zel/svoboda.r/projekt/Opora_BN03.pdf
- [11] *SŽ S2/4: Zajišťování diagnostiky železničního svršku a spodku měřicími prostředky s kontinuálním záznamem*. In: . 2022.
- [12] *SŽ S2/3: Organizace a provádění prohlídek a měření na dráze celostátní a drahách regionálních*. In: . 2022.
- [13] *Calipri C42* [online]. Dostupné také z: <https://nexus.hexagon.com/home/product/calipri-c42/>
- [14] *Measurement Sensors* [online]. [cit. 2024-12-19]. Dostupné z: <https://www.keyence.co.uk/products/measure/>
- [15] *Calipri C42* [online]. Dostupné také z: <https://www.roste.cz/nextsense/calipri-c42/>
- [16] *Měřicí modul kolejnice* [online]. [cit. 2025-01-10]. Dostupné z: https://www.depovybaveni.cz/obj/files/1/sys_media_253.pdf
- [17] *Calipri C42 Data sheet* [online]. 2022 [cit. 2025-01-02]. Dostupné z: https://www.nextsense-worldwide.com/files/content/branchen/stahl/stichprobenartige_profilmessung/C42BD05-Calipri-C42_RollShop-Bundle_DataSheet_EN_Hexagon.pdf?utm

- [18] *Trat' mezi Brnem a Blanskem je dva měsíce před zprovozněním* [online]. 2022 [cit. 2024-12-20]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/obrazem-trat-mezi-brnem-a-blanskem-je-dva-mesice-pred-zprovoznenim-129340/>
- [19] *Údolím Svitavy mezi Brnem a Blanskem se opět prohánějí vlaky* [online]. 2023 [cit. 2024-12-20]. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/-/udolim-svitavy-mezi-brnem-a-blanskem-se-opet-prohaneji-vlaky>
- [20] Nákresný přehled železničního svršku
- [21] *Mapy* [online]. [cit. 2025-01-06]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=16.6032336&y=49.2678314&z=12>
- [22] *Pražec B 91 T/1* [online]. [cit. 2024-12-27]. Dostupné z: <https://www.zpsv.cz/kolejove-dopravni-stavby/kolejnicove-podpory/prazec-b-91-t-1/>
- [23] JUNG, Jiří. *Vztah geometrických parametrů koleje a rozvoje skluzových vln* [online]. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/126286>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [24] HRUBEŠ, Lubor. *Problematika malých poloměrů na hlavních tratích* [online]. In: . 2010. Dostupné také z: <https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/50159407/08sb.pdf>
- [25] CHUDĚJOVÁ, Ludmila. *Opatřebení kolejnic v úsecích se směrovými oblouky malého poloměru* [online]. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/134044>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [26] *České dráhy provozují už čtyřicet nových RegioPanterů* [online]. [cit. 2025-01-10]. Dostupné z: <https://acri.cz/2023/08/05/ceske-drahy-provozuji-uz-ctyricet-novych-regiopanteru/>
- [27] *České dráhy* [online]. [cit. 2024-12-20]. Dostupné z: <https://www.cd.cz/spojeni-a-jizdenka/api-hp/>
- [28] Novák, D., a Eliáš, J. (2024). *Spolehlivost konstrukcí & Teorie spolehlivosti, část 2: Statistika a pravděpodobnost. Spolehlivost konstrukcí*, Vysoké učení technické v Brně.
- [29] *Regresní a korelační analýza* [online]. c2025 [cit. 2025-01-02]. Dostupné z: <https://lean6sigma.cz/regresni-a-korelacni-analyza/>
- [30] *Archiv počasí Babice nad Svitavou* [online]. [cit. 2025-01-04]. Dostupné z: https://www.meteoblue.com/cs/po%C4%8Das%C3%AD/historyclimate/weatherarchive/babice-nad-svitavou_%c4%8cesko_3079721
- [31] *Data sources* [online]. [cit. 2025-01-04]. Dostupné z: <https://content.meteoblue.com/en/research-education/specifications/data-sources>

Seznam použitých zkratk

R	poloměr kružnicového oblouku [m]
L_k	délka přechodnice [m]
D	převýšení koleje [mm]
I	nedostatek převýšení [mm]
V	traťová rychlost [km/h]
V_k	rychlost pro vozidla s naklápěcími skříněmi [km/h]
V_{130}	rychlost pro vozidla vyhovující provozu s nedostatkem převýšení 130 mm [km/h]
V_{150}	rychlost pro vozidla vyhovující provozu s nedostatkem převýšení 150 mm [km/h]
ZÚ	začátek úseku
KÚ	konec úseku
ZP	začátek přechodnice
KP	konec přechodnice
ZO	začátek oblouku
KO	konec oblouku
OJ	ojetí kolejnice
RK	rozchod koleje
ÚM	úbytek materiálu
S	svar
KT	konec tunelu
LN	lom nivelety
R	koeficient korelace
R^2	koeficient determinace
SŽ	Správa železnic

Seznam příloh

Seznam obrázků

Obrázek 1: Fotka z měřeného úseku [autor]	10
Obrázek 2: Sinusový pohyb dvojkolí [2]	11
Obrázek 3: Pohyb „cik-cak“ – vliv narážení obruby na kolejnici [2]	12
Obrázek 4: Ideální postavení vozidla nebo podvozku v oblouku [1]	12
Obrázek 5: Traťové a jízdní odpory [1]	13
Obrázek 6: Heumannova metoda [1]	14
Obrázek 7: Vogelova metoda [1]	14
Obrázek 8: Síly působící mezi dvojkolím a kolejí [5]	15
Obrázek 9: Nevyrovnané boční zrychlení [5]	15
Obrázek 10: Bod dotyku a rozdílný poloměr odvalování [6]	16
Obrázek 11: Kontaktní plocha [6]	17
Obrázek 12: Příklady kontaktních plošek [2]	17
Obrázek 13: Jednobodový a dvoubodový kontakt [2]	18
Obrázek 14: Ojetí hlavy kolejnice [9]	19
Obrázek 15: Detail profilu levé (vnější) kolejnice	21
Obrázek 16: Detail opotřebení hlavy levé (vnější) kolejnice	22
Obrázek 17: Mapa zobrazující místo měření [21]	23
Obrázek 18: Detail měřeného úseku na ortofoto mapě	24
Obrázek 19: Fotka svaru levé (vnější) kolejnice v km 168,293 390 [autor]	26
Obrázek 20: Fotka svaru pravé (vnitřní) kolejnice v km 168,414 020 [autor]	27
Obrázek 21: Detail měření pomocí Calipri C42 [autor]	30
Obrázek 22: Měření bodu [autor]	31
Obrázek 23: Výstup z měření a popis jednotlivých parametrů	31
Obrázek 24: Příklady korelačních koeficientů závislých a nezávislých veličin [28]	33
Obrázek 25: Námraza na vnitřní kolejnici [autor]	38
Obrázek 26: Kontaktní plocha pro nové a ojeté profily [6]	48
Obrázek 27: Detail ojetí hlavy vnitřní kolejnice	49
Obrázek 28: Detail ojetí hlavy vnější kolejnice	49
Obrázek 29: Grafika z archivu počasí pro měsíc prosinec [30]	53
Obrázek 30: Začátek měřeného úseku	80
Obrázek 31: Svar pravé (vnitřní) kolejnice v km 168,293 460 [autor]	80
Obrázek 32: Konec měřeného úseku blízko zastávky [autor]	80
Obrázek 33: Svar blízko měřeného bodu č.94 v km 168,413 460 [autor]	80
Obrázek 34: Zimní měření s námrazou na kolejnicích ze dne 27. 12. 2024 [autor]	81
Obrázek 35: Detail ojetí vnější kolejnice [autor]	81
Obrázek 36: Měření v zimních podmínkách (-6 °C) [autor]	81
Obrázek 37: Měřený oblouk ve směru staničení [autor]	81

Seznam tabulek

Tabulka 1: Směrové poměry	24
Tabulka 2: Sklonové poměry.....	24
Tabulka 3: Naměřená staničení svarů.....	26
Tabulka 4: Intervaly mezi jednotlivými sadami měření.....	28
Tabulka 5: Korelace mezi sadami měření	41
Tabulka 6: Průměrný rozdíl ojetí pro svislý posun.....	57

Seznam grafů

Graf 1: Směrový a výškový průběh nivelety	25
Graf 2: Srovnání velikostí bočních a svislých ojetí kolejnic (15. 11.)	34
Graf 3: Naměřené datové sady – boční ojetí vnější kolejnice	35
Graf 4: Naměřené datové sady – svislé ojetí vnější kolejnice	35
Graf 5: Naměřené datové sady – boční ojetí vnitřní kolejnice	36
Graf 6: Naměřené datové sady – svislé ojetí vnitřní kolejnic	36
Graf 7: Chyby měření – svislé ojetí vnější kolejnice.....	37
Graf 8: Korelace datových sad – boční ojetí vnější kolejnice.....	39
Graf 9: Korelace datových sad – svislé ojetí vnější kolejnice.....	39
Graf 10: Korelace datových sad – boční ojetí vnitřní kolejnice	40
Graf 11: Korelace datových sad – svislé ojetí vnitřní kolejnice	40
Graf 12: Porovnání bočního ojetí vnější kolejnice s čarou křivosti (15. 11)	42
Graf 13: Porovnání bočního ojetí vnější kolejnice s čarou křivosti (27. 12)	42
Graf 14: Nerovnoměrný průběh bočního ojetí vnější kolejnice	43
Graf 15: Ojetí v oblasti svarů kolejnic	44
Graf 16: Nerovnoměrný vývoj svislého ojetí vnitřní kolejnice.....	44
Graf 17: Vývoj v čase pro boční ojetí vnější kolejnice.....	46
Graf 18: Vývoj v čase pro svislé ojetí vnější kolejnice.....	46
Graf 19: Vývoj v čase pro boční ojetí vnitřní kolejnice	46
Graf 20: Vývoj v čase pro svislé ojetí vnitřní kolejnice	46
Graf 21: Průměrný nárůst bočního ojetí vnější kolejnice	47
Graf 22: Průměrný nárůst svislého ojetí vnější kolejnice	47
Graf 23: Průměrný nárůst bočního ojetí vnitřní kolejnice	47
Graf 24: Průměrný nárůst svislého ojetí vnitřní kolejnice	48
Graf 25: Rozvoj ojetí v čase z průměrných hodnot bočního ojetí vnější kolejnice	50
Graf 26: Teplota a relativní vlhkost vzduchu v Babicích nad Svitavou	51
Graf 27: Nárůst bočního ojetí vnější kolejnice a povětrnostní podmínky	52
Graf 28: Data SŽ – boční ojetí vnější kolejnice.....	54
Graf 29: Data SŽ – svislé ojetí vnější kolejnice.....	54
Graf 30: Data SŽ – boční ojetí vnitřní kolejnice	55
Graf 31: Data SŽ – svislé ojetí vnitřní kolejnice.....	55
Graf 32: Odchylny datových sad pro boční ojetí vnější kolejnice	56
Graf 33: Korelace mezi datovými sadami ojetí od SŽ	57

Graf 34: Porovnání dat – boční ojetí vnější kolejnice	58
Graf 35: Porovnání dat – svislé ojetí vnější kolejnice	58
Graf 36: Porovnání dat – boční ojetí vnitřní kolejnice	59
Graf 37: Porovnání dat – svislé ojetí vnitřní kolejnice	59
Graf 38: Porovnání dat s redukováným počtem bodů – boční ojetí vnější kolejnice (26.7.)	61
Graf 39: Porovnání dat ve stejném kroku – boční ojetí vnější kolejnice (27.8)	61
Graf 40: Porovnání naměřených a redukováných poskytnutých dat s úpravou staničení	62
Graf 41: Korelace vlastních dat s poskytnutými daty před a po úpravě staničení	62
Graf 42: Porovnání tří měření rozchodů a projektované hodnoty rozchodu	65
Graf 43: Rozchod a boční ojetí vnější kolejnice (SŽ)	65
Graf 44: Rozchod a boční ojetí vnější kolejnice (27.8)	66
Graf 45: Upravené staničení rozchodu a boční ojetí vnější kolejnice (27.8)	66
Graf 46: Korelace mezi sadami měření rozchodu koleje	67
Graf 47: Korelace rozchodu a bočního ojetí vnější kolejnice od Správy železnic	67
Graf 48: Korelace rozchodu a bočního ojetí vnější kolejnice	67
Graf 49: Korelace upraveného staničení rozchodu a bočního ojetí vnější kolejnice	67
Graf 50: Rozchod a boční ojetí vnitřní kolejnice	68
Graf 51: Rozchod a svislé ojetí vnitřní kolejnice	68
Graf 52: Rozšiřování rozchodu koleje vlivem úbytku materiálu od bočního ojetí kolejnic	70
Graf 53: Suma všech hodnot ojetí jako energie disipovaná do kolejového roštu	70
Graf 54: Srovnání nárůstu rozchodu od začátku přechodnic	71
Graf 55: Srovnání nárůstu bočního ojetí vnější kolejnice od začátku přechodnic	71

Přílohy



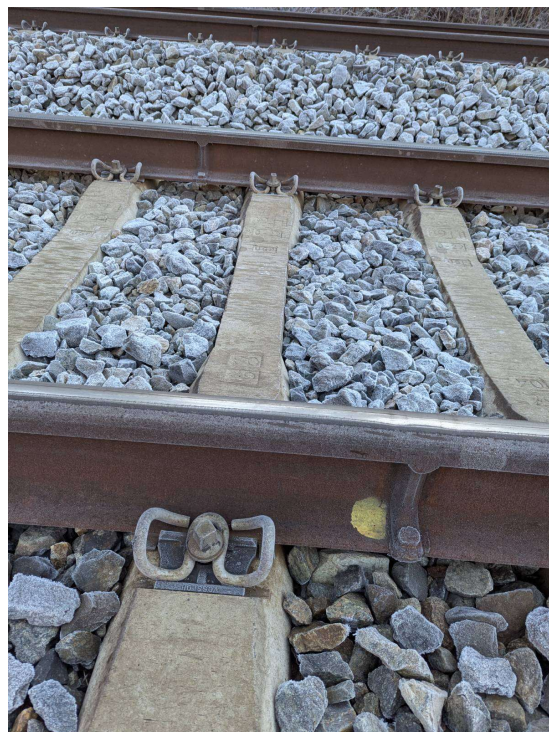
Obrázek 30: Začátek měřeného úseku
[autor]



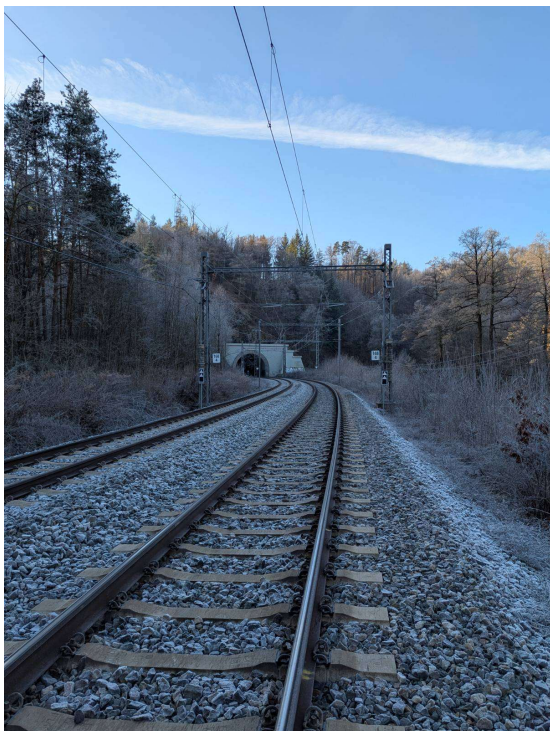
Obrázek 32: Konec měřeného úseku
blízko zastávky [autor]



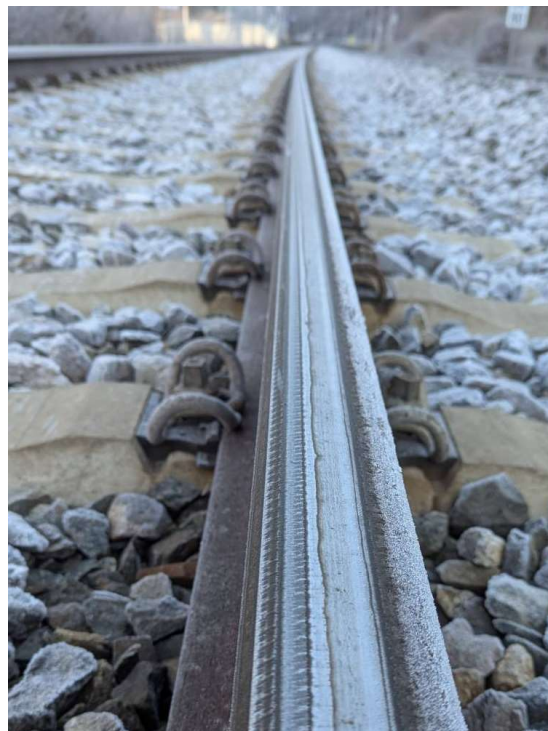
Obrázek 31: Svar pravé (vnitřní) kolejnice
v km 168,293 460 [autor]



Obrázek 33: Svar blízko měřeného bodu
č.94 v km 168,413 460 [autor]



Obrázek 34: Zimní měření s námrazou na kolejnicích ze dne 27. 12. 2024 [autor]



Obrázek 36: Měření v zimních podmínkách (-6 °C) [autor]



Obrázek 35: Detail ojetí vnější kolejnice [autor]



Obrázek 37: Měření oblouk ve směru staničení [autor]