



# 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

## HODNOCENÍ KVALITY GEOMETRIE KOLEJE

EVALUATION OF THE TRACK GEOMETRY QUALITY

### DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Erik Dušek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Richard Svoboda, Ph.D.

BRNO 2025

# ABSTRAKT

Disertační práce se zabývá porovnáním veličin pro hodnocení kvality geometrie koleje na základě dat z měřícího vozu pro železniční svršek. V teoretické části práce je popis strategií údržby a obnovy, procesu degradace koleje a způsobu měření a zpracování geometrických parametrů koleje a měřících zařízení. V praktické části práce jsou popsány metody a postupy, které zahrnují popis sledovaných úseků, způsobu čtení dat a veličin pro hodnocení kvality geometrie koleje. Poslední část praktické části práce tvoří přehled výsledků, kde jsou prezentovány grafy průběhu veličin po délce koleje a vývoje v čase, lineární regrese vývoje v čase a také výkonové spektrální hustoty používané pro frekvenční analýzu geometrie koleje.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Hodnocení kvality geometrie koleje, měřící vůz, směrodatná odchylka, index kvality koleje, fraktální dimenze, výkonová spektrální hustota.

# **ABSTRACT**

The dissertation is aimed comparison of variables for evaluation of the quality of track geometry based on data from a measuring car for railway superstructure. The theoretical part of the thesis describes the maintenance and renewal strategies, the process of track degradation and the method of measuring and processing the track geometry and measuring equipment. In the practical part of the thesis, methods and procedures are described, which include a description of the sections of interest, the method of reading data and variables for assessing the quality of the track geometry. The rest of the practical part of the thesis consists of a summary of the results, where plots of the progression of the variables along the length and the progress over time, linear regression of the progress over time, as well as power spectral density (which is used for a frequency analysis of the track geometry) are presented.

# **KEYWORDS**

Evaluation of the track geometry quality, measuring car, standard deviation, track quality index, fractal dimension, power spectral density.

# BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DUŠEK, Erik. *Hodnocení kvality geometrie koleje*. Brno, 2025. 122 s., 17 s. příl. Disertační práce.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb.

Vedoucí práce: Ing. Richard Svoboda, Ph.D.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 9. 2025

---

Ing. Erik Dušek

autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych vyjádřil své poděkování vedoucímu práce, Ing. Richardu Svobodovi, Ph.D., za jeho odborné vedení, cenné náměty a myšlenky, které mě provázely během celého mého doktorského studia.

Mé poděkování patří také kolegům z Ústavu železničních konstrukcí a staveb, jejichž podpora, podnětné diskuse a přátelská atmosféra mi pomohly překonat obtížné chvíle a vydržet až k úspěšnému dokončení studia.

Na závěr chci poděkovat své rodině za jejich trpělivost, podporu a pochopení, které pro mě byly nepostradatelné, zejména v počátcích studia, kdy jsem se rozhodl dát přednost dráze doktoranda před jistotou dobře placeného zaměstnání.

# OBSAH

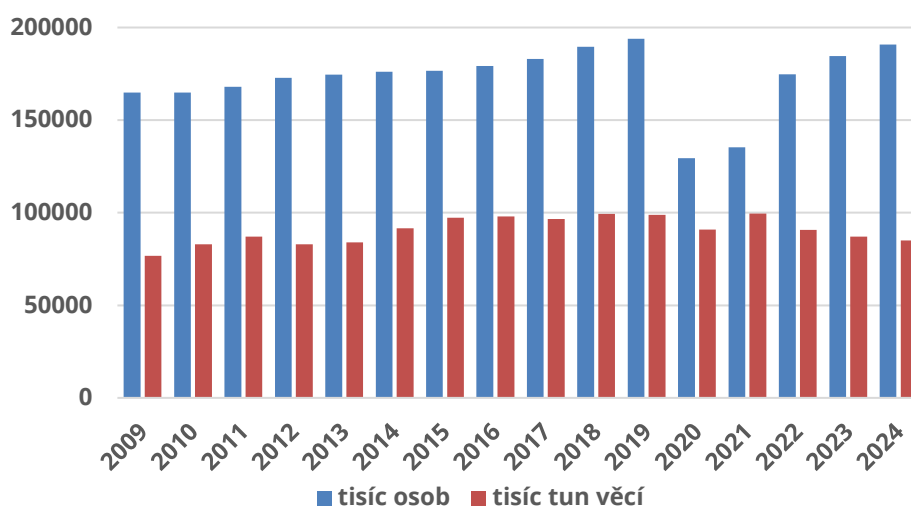
<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ</b> .....	<b>12</b>
2.1. ÚDRŽBA A OBNOVA .....	12
2.1.1. Analýza životního cyklu.....	12
2.1.2. Údržba.....	13
2.2. DEGRADACE KOLEJE.....	14
2.2.1. Hodnocení kvality koleje.....	15
2.2.2. Vliv železničního svršku .....	16
2.2.3. Vliv železničního spodku.....	19
2.3. MĚŘENÍ GEOMETRICKÝCH PARAMETRŮ KOLEJE.....	20
2.3.1. Právní ustanovení, normy a předpisy.....	20
2.3.2. Měření a zpracování naměřeného signálu .....	23
2.3.3. Hodnocení naměřeného signálu .....	27
2.3.4. Měřicí prostředky .....	28
2.4. VELIČINY PRO HODNOCENÍ KVALITY GEOMETRIE KOLEJE.....	39
2.4.1. Lokální závady (ID).....	39
2.4.2. Směrodatná odchylka (SD) .....	40
2.4.3. Index kvality koleje (TQI).....	42
2.4.4. Fraktální dimenze (FD) .....	44
2.4.5. Výkonová spektrální hustota (PSD).....	47
2.4.6. Úrovně hodnocení kvality geometrie koleje .....	49
2.5. KORELAČNÍ ANALÝZA.....	50
2.5.1. Vzájemná korelace .....	50
2.5.2. Pearsonův korelační koeficient.....	51
2.5.3. Autokorelace.....	53
<b>3. PŘEDMĚT A CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>54</b>
<b>4. POUŽITÉ METODY A POSTUPY</b> .....	<b>55</b>
4.1. ZPRACOVÁNÍ DAT Z MĚŘICÍHO VOZU.....	55
4.1.1. Popis sledovaných úseků.....	55

4.1.2.	Provozní zatížení .....	58
4.1.3.	Čtení dat s různými formáty.....	58
4.1.4.	Oprava staničení pomocí korelace .....	61
4.2.	HODNOCENÍ KVALITY GEOMETRIE KOLEJE .....	62
4.2.1.	Přístupy pro hodnocení .....	63
4.2.2.	Lokální závady (ID).....	65
4.2.3.	Směrodatná odchylka (SD) .....	65
4.2.4.	Index kvality koleje (TQI).....	65
4.2.5.	Fraktální dimenze (FD) .....	65
4.3.	VÝKONOVÁ SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA (PSD) .....	67
4.3.1.	Vztah mezi PSD a SD .....	68
4.3.1.	Mezní křivky PSD .....	68
4.4.	KORELAČNÍ ANALÝZA.....	73
4.4.1.	Vzájemná korelace .....	73
4.4.2.	Pearsonův korelační koeficient .....	73
<b>5.</b>	<b>PŘEHLED A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>74</b>
5.1.	KORELAČNÍ ANALÝZA.....	74
5.1.1.	Korelace GPK .....	74
5.1.2.	Korelace veličin.....	75
5.2.	PRŮBĚH PO DÉLCE KOLEJE .....	77
5.3.	VÝVOJ V ČASE .....	80
5.3.1.	Srovnání vývoje v čase a podle zatížení.....	83
5.3.2.	Lineární regrese .....	84
5.4.	VÝVOJ PO DÉLCE I V ČASE .....	86
5.5.	POROVNÁNÍ ZMĚN GPK MEZI MĚŘENÍMI.....	91
5.6.	VÝKONOVÁ SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA (PSD) .....	94
5.6.1.	Porovnání parametrů .....	94
5.6.2.	Porovnání s mezními křivkami .....	97
5.6.3.	Porovnání měření.....	99
5.6.4.	Porovnání tratí.....	100
5.6.5.	Porovnání změn ve zpracování signálů .....	103

<b>6. SOUHRN VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>107</b>
<b>7. ZÁVĚR .....</b>	<b>109</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>111</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>116</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>119</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>120</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>122</b>

# 1. ÚVOD

Celkový počet přepravených cestujících po železnici v ČR rostl mezi lety 2009 a 2019 průměrnou rychlostí přes 3 miliony cestujících za rok. Ve stejném období rostlo také množství přepraveného zboží. V současné době se intenzita dopravy na tranzitních železničních koridorech pohybuje na hraně jejich kapacity, a to i přes mírný pokles přepravy způsobený pandemií a souvisejícím poklesem české ekonomiky. [1]



Obr. 1.1 – Přeprava osob a věcí na železnici v ČR [1]

Zlepšení spolehlivosti a kvality železniční sítě má pozitivní vliv na atraktivitu železniční dopravy. Proto je třeba plánovat údržbu a obnovu železniční sítě na základě pravidelných měření jejího stavu.

Zvyšování poptávky po železniční dopravě má za následek zvyšování nákladů na údržbu a obnovu železniční sítě. [2] Údržba a obnova železniční infrastruktury vyžaduje značné investice. Roční výdaje na údržbu železniční sítě v ČR v roce 2024 dosáhly téměř 22 miliard Kč a tvořily přibližně 18 % všech výdajů Státního fondu dopravní infrastruktury (SFDI), jenž přispívá také na ostatní druhy dopravy. [3]

Geometrické parametry koleje (GPK) jsou základní prvky směrového a výškového vedení železniční tratě a jejich stav je klíčovým ukazatelem kvality železniční infrastruktury a mají zásadní vliv na bezpečnost a komfort železniční dopravy. Jejich pravidelné měření a vyhodnocování je proto nezbytné pro zajištění spolehlivého provozu na železniční síti a efektivní plánování její údržby a obnovy.

V současné době se pro hodnocení kvality geometrie koleje používá několik různých veličin, přičemž každá z nich má své specifické vlastnosti a omezení. Nejrozšířenější je směrodatná odchylka, která se používá ve většině evropských zemí. Další možností je tzv. index kvality koleje, jenž se využívá ve Spojených státech amerických. V posledních letech se objevují i nové přístupy jako je například využití fraktální dimenze nebo výkonové spektrální hustoty.

Disertační práce se zaměřuje na komplexní analýzu dat z měřicího vozu pro železniční svršek s cílem lépe porozumět vývoji kvality geometrie koleje. Důraz je kladen na porovnání různých metod hodnocení kvality a jejich využitelnost pro účely plánování údržby a obnovy. Práce zkoumá vztahy mezi jednotlivými parametry a veličinami pomocí korelační analýzy a analyzuje jejich vývoj v čase i po délce koleje.

Výzkum provedený při zpracování disertační práce využívá rozsáhlý soubor dat naměřených v letech 2008–2024 na vybraných tratích. Tato data zahrnují různé druhy tratí s odlišnými směrovými poměry, což umožňuje komplexní posouzení využitelnosti jednotlivých veličin v různých podmínkách.

Lepší pochopení degradačních procesů v železničním svršku a spodku je nezbytné pro efektivnější plánování údržby a obnovy železničních tratí. Práce také poskytuje doporučení pro efektivnější hodnocení kvality geometrie koleje v podmínkách české železniční sítě.

## 2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

### 2.1. ÚDRŽBA A OBNOVA

#### 2.1.1. ANALÝZA ŽIVOTNÍHO CYKLU

Jedním z hlavních cílů analýzy životního cyklu (*Life Cycle Analysis* = LCA) je poskytnout data pro návrh optimální strategie údržby. To znamená definovat harmonogram údržbových zásahů, které minimalizují náklady na provoz systému, zatímco je zajištěna jeho bezpečnost a dostupnost. Údržbovými zásahy se rozumí jakékoliv aktivity, které jsou prováděny za účelem prodloužení životnosti systému. Údržbu provádíme, protože se systém nachází ve stavu, který považujeme za vadu či poruchu (tento přístup se označuje jako korektivní údržba), nebo ji můžeme provést ještě předtím, než se vada či porucha projeví (označuje se jako preventivní údržba). [4]

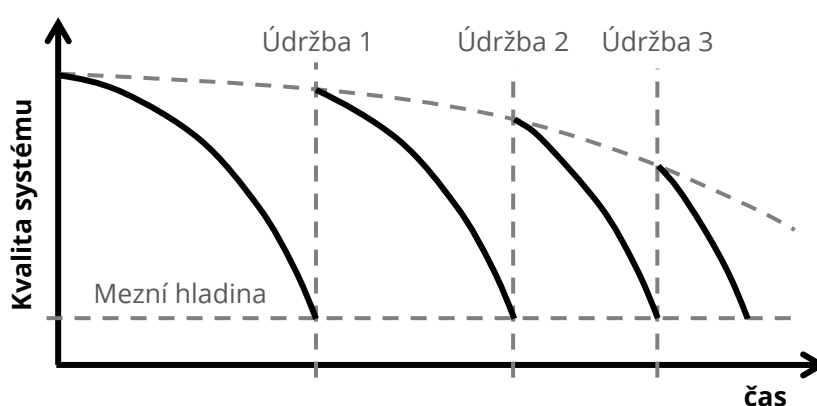
Kvalita systému (může se jednat o stroj, budovu či infrastrukturu obecně) závisí na počáteční kvalitě po uvedení do provozu a rychlosti degradace, které se snažíme vzdorovat údržbou. Náš primární cíl by měla být podpora tzv. analýzy nákladů životního cyklu (*Life Cycle Cost Analysis* = LCCA), která posuzuje náklady po celou životnost koleje od její výstavby, přes údržbu, až po její odstranění při rekonstrukci. Nesmíme zapomenout ani na vliv, jež má kvalita geometrie koleje na operativní náklady. [5]

Kvalita systému se v průběhu jeho životnosti neustále snižuje až na úroveň, kdy se již nevyplatí ho znovu opravovat, ale je výhodnější systém rekonstruovat. Náklady životního cyklu by měly být vždy co nejnižší. Velkou část tvoří ztráta hodnoty vlivem používání a plynutím času. Nemalou složkou jsou i náklady na řešení mimořádných událostí v dopravě. Lepší počáteční kvalita systému znamená menší náklady na pozdější údržbu, nebo prodloužení životnosti systému. Nekvalitní údržba může způsobit rychlejší zhoršování kvality systému, a tedy kratší životnost. [5]

Opravné práce prováděné v průběhu životnosti systému mají negativní vliv na provoz systému, protože dochází k částečnému nebo úplnému omezení jeho funkce. Tím dochází k finančním ztrátám a zároveň tím klesá atraktivita pro jeho uživatele.

## 2.1.2. ÚDRŽBA

Údržbu můžeme definovat jako soubor akcí, které provádíme, abychom udrželi systém v použitelném stavu nebo nad předem specifikovanou úrovní kvality. Při plánování údržby se snažíme odhadnout čas a míru opravného zásahu, což je složitý optimalizační problém, jehož cílem je maximalizace dostupnosti systému a minimalizace nákladů. To znamená udržování systému v uspokojivém stavu během co nejdelšího období. Efektivita údržbových zásahů se v průběhu času snižuje v důsledku postupného opotřebení vlivem používání i údržby, což ilustruje Obr. 2.1. [4]



Obr. 2.1 – Efektivita údržbových zásahů v průběhu času [4]

**Prioritizace** spočívá v hodnocení stavu infrastruktury a zaměření finančních zdrojů prioritně na důležité části systému a horší vady. Ve chvíli, kdy dojde k vyčerpání prostředků na údržbu, provede se nová re-prioritizace, kam jsou zahrnuty nové vady, které mezitím vznikly a opět dojde k dělení nových finančních zdrojů způsobem „horší napřed“. Tento způsob plánování údržby však může být neefektivní. [6]

Oproti tomu **optimalizační metody** plánování údržby berou v potaz i efekt odkládání údržby. Ideální optimalizační přístup spočívá v hodnocení všech možných přístupů k plánování údržby. Optimalizace může být provedena programem se správně nastavenými kritérii, jenž vybere nejlepší metodu, zatímco dodrží zvolený rozpočet. [6]

Mezi klasické přístupy k plánování údržby patří:

### **Preventivní (periodická, cyklická) údržba**

Je založena na pravidelném měření, údržbě a obnově částí systému s cílem předejít selhání systému. Údržba se provádí v předem zvolených časových intervalech. [4] Délka

cyklů mezi údržbovými zásahy se obvykle volí kratší, aby nedošlo k selhání. To však znamená vyšší náklady oproti prediktivní údržbě a rychlejší opotřebovávání systému kvůli častějším opravám, které ještě nejsou nezbytné.

### **Prediktivní údržba**

Provádí se na základě výsledků měření a diagnostiky systému. Na rozdíl od preventivní údržby bere v úvahu skutečný stav systému a bývá tedy prováděna nepravidelně. [4] Hlavní nevýhodou je náročnější plánování prostředků na prediktivní údržbu oproti preventivní, kde je množství oprav předem známé.

### **Korektivní údržba**

Provádí se pouze po selhání systému nebo překročení určené mezní hladiny kvality. Kvůli tomu může dojít k omezení použitelnosti systému, což může zvýšit náklady na údržbu. [4] Nejdříve se řeší vady, které je nutno okamžitě odstranit. Ostatní vady je třeba sledovat a na základě několika faktorů se rozhodne o tom, jestli se opraví nebo ne. [6] Korektivní údržba ignoruje poznatky LCCA, které říkají, že náklady na údržbu stoupají exponenciálně v průběhu životnosti systému. [2]

## **2.2. DEGRADACE KOLEJE**

Degradace je proces popisující postupný pokles schopnosti systému plnit svůj účel, jenž se projevuje jako viditelné poškození způsobené řadou různých fyzických procesů, které samy o sobě nemusí být viditelné. Tyto procesy však můžeme sledovat pomocí zvolených indexů kvality. [4]

Degradace začíná pozvolna vlivem drobných nedokonalostí materiálu a chybami při výrobě např. kolejnic a dalších součástí železničního svršku a spodku. Pro udržení infrastruktury v dobrém stavu je tedy rozhodující kvalita materiálu a výroby jednotlivých komponent. K vlivům materiálu a výroby dále přispívají chyby při návrhu a výstavbě. Další odchylky jsou do systému vneseny vlivem chyb při měření a při provádění údržby. Na degradaci se kromě provozního zatížení přímo podílí také vliv prostředí, kam můžeme zařadit povětrnost, ale i stav podloží, na kterém byla kolej postavena. Jakékoliv změny v podloží se mohou negativně projevit i zrychlením degradace koleje. [4][7]

V průběhu životnosti koleje se některé z těchto faktorů vzájemně ovlivňují, např. špatná kvalita kol vozů působí negativně na kvalitu koleje a špatná kvalita koleje zároveň negativně působí na kola projíždějících vozů. Každý úsek koleje má svůj vlastní jedinečný proces degradace s tím, jak se liší kombinace vlivů všech působících faktorů. V praxi dokážeme měřit pouze některé faktory, ale interakce mezi faktory je neměřitelná. Kvůli tomu je rychlost degradace obvykle považována za náhodnou. [7][8]

Kvalita koleje se v zásadě snižuje vlivem rostoucího dynamického zatížení od projíždějících vozidel. [2] Výskyt vln různých frekvencí v GPK budí různé části projíždějících vozidel, což způsobuje dynamické zatížení. [9] Největší procento dynamického zatížení pochází z nerovností o vlnové délce kolem 1 m. Podbíjení koleje je přitom účinné pouze u nerovností s vlnovou délkou od 3 m. Kratší nerovnosti tak musí být odstraňovány pomocí broušení kolejnic a vyrovnávání svarů. [8]

Čerstvě podbitá kolej relativně rychle sedá, načež se sedání zpomalí [8][10][11]. Sedání samo o sobě není problém, ale kolej má tendenci sedat po délce nerovnoměrně, čímž vznikají poruchy v plynulosti výšky koleje, jež mají negativní vliv na kvalitu železničního svršku, technický stav vozidel a také komfort cestujících. Homogenní úseky koleje by měly v rámci normálních odchylek vykazovat stejné chování, pokud to tak není, může to naznačovat problémy v konstrukci koleje např. špatné odvodnění. [5]

### **Provozní zatížení**

Provozní (někdy též dopravní) zatížení trati vyjadřuje celkovou hmotnost vlaků, které projedou po dané trati za zvolené časové období. Měří se v milionech hrubých tun. Je to velmi důležitý parametr při sledování vývoje kvality koleje. S přibývajícím provozním zatížením se snižuje kvalita geometrie koleje [8][6].

### **2.2.1. HODNOCENÍ KVALITY KOLEJE**

Aby bylo možné udržet železniční infrastrukturu v uspokojivém stavu, je třeba správně pochopit způsob, jakým se mění stav každého jejího prvku. Pokud dostatečně pochopíme, jak změna stavu jednotlivých prvků funguje, můžeme ji začít i předvídat. Abychom ale mohli předvídat chování prvků v budoucnosti, potřebujeme tzv. degradační model (*Deterioration Model* = DM). [11]

K tomu je třeba vytvořit dostatečně flexibilní databázovou strukturu, přístupnou pro různé druhy analýz a systémy pro sledování stavu infrastruktury. Je třeba shromáždit všechny důležité informace o jednotlivých prvcích infrastruktury (kolejnice, pražce, kolejové lože, upevnění, trolejové vedení apod.) např. datum instalace, kumulativní provozní zatížení, rychlost, podélný sklon nivelety, aktuální provozní zatížení atd. Dále by měla obsahovat měřené veličiny, jako jsou GPK, profily kolejnic, vady kolejnic, geometrie trakčního vedení, parametry opotřebení a jiné. Důležitá je také schopnost obsahovat jak prostorové souřadnice (GCS), tak i lineární (staničení) s možností vygenerovat geografický informační systém (GIS). [11]

Systém by měl umožňovat provádění dvou úrovní analýz – nízkou a vysokou. Nízká spočívá v podrobnějším zkoumání kratšího úseku a sledování grafického výstupu jednoho parametru nebo případně porovnání s dalšími. Provádí ji specializovaní pracovníci a měla by umožňovat zobrazení, několika různými způsoby, jež si uživatel určí. Vysoká spočívá v automatické analýze velkého množství úseků (segmentů) koleje, které by měly být co možná nejvíce homogenní z hlediska GPK, rychlosti, svršku a spodku atd. Připouští se však jejich různá délka. Uživatel specifikuje, které parametry se sledují a jaký druh křivky se využije při předpovídání budoucího chování na základě naměřených dat. [11]

## **2.2.2. VLIV ŽELEZNIČNÍHO SVRŠKU**

### **Kolejnice**

Vlastnosti, které by kolejnice měly mít:

- hladkost
- vysoká pevnost a tvrdost,
- odolnost proti únavě materiálu,
- houževnatost,
- svařitelnost,
- odolnost vůči korozi.

Základní funkce kolejnic jsou:

- směrové a výškové vedení vozidla,
- přenos svislých a vodorovných sil.

Faktory, které mají negativní vliv na vlastnosti kolejnic, jsou:

- dynamické namáhání,
- únavové procesy,
- opotřebení od kol vozidel (ojíždění),
- koroze,
- tepelné změny (hrozba lomu nebo vybočení),
- materiálové vady.

Z hlediska geometrie koleje je největší pozornost potřeba věnovat zejména vadám mikrogeometrie kolejnic, které způsobují dynamické zatížení při průjezdu vozidel po nerovných kolejnicích. Dynamické zatížení má negativní vliv na kvalitu kolejového lože, jehož horší kvalita vede k rozpadu geometrie koleje.

### **Kolejové lože**

Kolejové lože by mělo být: [12]

- odolné a pevné,
- odolné vůči změnám počasí,
- propustné,
- dostatečně únosné vůči hmotnosti projíždějících vlaků,
- správně zrnité,
- dostatečně pružné atd.

Základní funkce kolejového lože jsou: [12]

- přenést svislé a vodorovné zatížení od dopravy do podkladních vrstev,
- udržet kolej ve stálé poloze,
- zajistit pružnost a absorpci energie,
- odvod srážkové vody,
- udržet výšku a převýšení koleje,
- tlumit nárazy,
- tlumení vibrací a hluku od projíždějících vozidel,
- izolace pro konstrukční a podkladní vrstvy,

- předejití růstu plevelu v koleji.

Faktory, které mají negativní vliv na vlastnosti kolejového lože, jsou: [12]

- ohlazení zrn kameniva vlivem zatížení od dopravy,
- mechanické opotřebení při podbívání koleje,
- znečištění vlivem padání sypkých materiálů z nákladních vozů,
- růst plevelu
- vliv atmosférických faktorů (např. mráz, změna teploty a další).

Kolejové lože je jedna z nejdůležitějších komponent konstrukce koleje, protože umožňuje opravy směrového a výškového vedení trati podbitím. Porozumění zhoršování kvality kolejového lože, jež souvisí s tvorbou jemných frakcí, je důležité s ohledem na vylepšení ekonomiky životního cyklu koleje. [10]

Nejvýraznějším zdrojem jemných frakcí v kamenivu je rozpad zrn kolejového lože vlivem provozního zatížení, podbívání koleje a dalších údržbových prací. Se zvýšeným výskytem jemné frakce v kolejovém loži se zhoršuje propustnost a zvyšuje namrzavost kameniva, zhoršuje se pružnost a také dochází k poklesům koleje, což vede k potřebě podbití koleje a dalšímu zhoršení stavu kolejového lože. Stupeň znečištění kolejového lože vlivem jemné frakce se určuje ze vzorků kameniva, pro které se stanoví křivka zrnitosti a sečte se propad na sítích určených průměrů, jenž nesmí překročit mezní hodnotu. [10]

Vlivem degradace kolejového lože dochází v průběhu času ke zkracování časových intervalů mezi podbíváními koleje. Jakmile se kvalita kolejového lože zhorší pod určenou mez (přítomnost jemné frakce v kamenivu je příliš vysoká), je třeba provést jeho čištění. [10]

## **Pražce**

Kvalita pražců ovlivňuje kvalitu geometrie koleje. Betonovým pražcům se vlivem dopravního zatížení a podbívání otupují spodní hrany, čímž může docházet ke snížení jejich stability. Dále hrozí poškození úložné plochy vlivem zatlačování kolejnice do pražce. U dřevěných pražců zase hrozí hniloba, kroucení od vysychání a praskání. [5]

K prodloužení životnosti pražců můžeme přispět zajištěním dostatečné únosnosti pražcového podloží spolu s fungujícím systémem odvodnění a rovněž použitím tzv.

podpražcových podložek (*Under Sleeper Pads* = USP), jež snižují kontaktní napětí, a tedy namáhání a opotřebenění kolejového lože. K tomu dochází díky zatlačení zrn kameniva do podpražcových podložek, což způsobí, že zatížení od pražce působí na větší plochu. [5]

Pražce s USP mají také větší podélný a příčný odpor proti posunutí v kolejovém loži a tím prodlužují životnost GPK, zejména parametru směr koleje (SL, SP, SK).

Při analýze naměřených dat z železniční sítě Rakouských spolkových drah se zjistilo, že rychlost degradace GPK s USP je o 63 % nižší, díky čemuž je podbíjecí cyklus prodloužen až 2,75krát a životnost je tím pádem o 38 % delší. Cena pražce je přitom jen asi o 30 % vyšší. [5] LCA tedy ukazuje, že použití USP má smysl, což v závěru konstatuje také [13].

### **2.2.3. VLIV ŽELEZNIČNÍHO SPODKU**

#### **Konstrukční a podkladní vrstvy**

Pražcové podloží se skládá z kolejového lože pod pražcem, konstrukčních a podkladních vrstev a podloží trati. Špatná kvalita pražcového podloží má velmi významný vliv na kvalitu geometrie koleje. Úseky se špatnou kvalitou mají tendenci rychleji degradovat. Špatný návrh konstrukce pražcového podloží může vést např. k promrznutí zeminy v podloží a tím ke zvětšení objemu a narušení geometrie koleje. U spousty méně významných tratí nevyhovuje skladba konstrukčních a podkladních vrstev aktuálnímu dopravnímu zatížení a požadavkům předpisů, nebo nebyly zřízeny žádné vrstvy.

Dle [14] se problémy v železničním spodku projevují v dlouhohlenné výšce koleje.

#### **Odvodnění**

Dobře fungující odvodnění má velký vliv na deformační odolnost pražcového podloží a tím i na kvalitu geometrie koleje. Přítomnost vody v pražcovém podloží může vést k namrznutí zeminy v podloží nebo k pronikání jemných částic z podloží do kolejového lože, které tím ztrácí své klíčové vlastnosti. U spousty méně významných tratí je odvodnění nefunkční, či nebylo vůbec navrženo. Pro správnou funkci odvodnění jsou velmi důležité pravidelné kontroly jeho funkčnosti a následné čištění.

## 2.3. MĚŘENÍ GEOMETRICKÝCH PARAMETRŮ KOLEJE

### 2.3.1. PRÁVNÍ USTANOVENÍ, NORMY A PŘEDPISY

*Zákon o drahách 266/1994 Sb.* určuje, že se na všech provozovaných kolejích musí měřit geometrické parametry koleje minimálně jednou za rok. Stejně tak je nutné provést měření ještě před uvedením nové tratě do provozu. Intervaly měření specifikuje *Vyhláška 177/1995 Sb. Stavební a technický řád drah* pro traťové a hlavní staniční koleje:

- $V \leq 60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  – 12 měsíců
- $60 < V \leq 120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  – 6 měsíců
- $V > 120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  – 4 měsíce

V sousedních zemích platí obdobné zákony a vyhlášky na základě, kterých se organizují pravidelná měření. Například na Slovensku platí Zákon č. 513/2009 Z. z. Zákon o dráhach a Vyhláška č. 350/2010 *Stavebný a technický poriadok dráh*.

Měření se provádí a vyhodnocuje podle předpisů *SŽ S2/3 Organizace a provádění prohlídek a měření na dráze celostátní a drahách regionálních* a *SŽ S2/4 Předpis pro zajišťování diagnostiky železničního svršku měřicími prostředky s kontinuálním záznamem*. Při hodnocení GPK se používá norma *ČSN 73 6360-2*, v níž jsou uvedeny stavební a provozní odchylky.

V sousedních zemích se měření provádí a vyhodnocuje obdobně podle příslušných předpisů a norem. Například na Slovensku se používá služobná rukoväť *ŽSR SR 103-4 (TS) Meranie a vyhodnocovanie geometrickej polohy koľaje meracím vozňom ŽSR a norma STN 73 6360-2 Koľaj. Časť 2: Preberanie stavebných prác, udržiavacích prác a hodnotenie prevádzkového stavu koľaje*. Geometrické parametry koleje

#### Rozdělení a definice měřených veličin

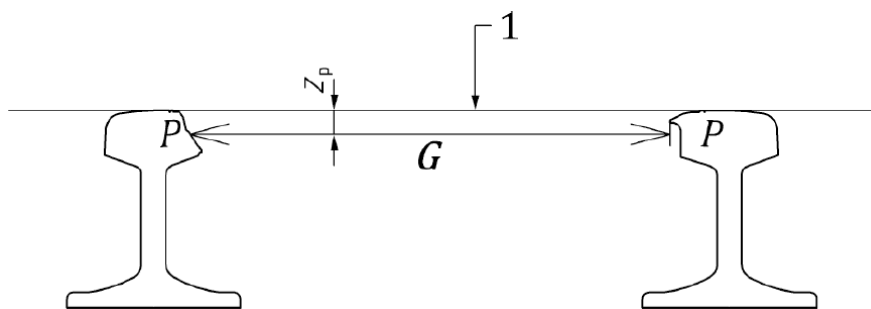
Podle [15] se geometrické parametry koleje (GPK) dělí do tří skupin:

- Konstrukční uspořádání koleje
  - Rozchod koleje a jeho změna
  - Vzájemná výšková poloha kolejnicových pásů
  - Převýšení koleje
  - Sklon vzestupnice

- Zborcení koleje – vzájemný sklon kolejnicových pásů
- Geometrické uspořádání koleje
  - Směr koleje
  - Podélná výška
  - Podélný sklon
- Prostorová poloha koleje
  - Množina bodů osy koleje jednoznačně určených v projektu polohopisnými souřadnicemi a nadmořskou výškou

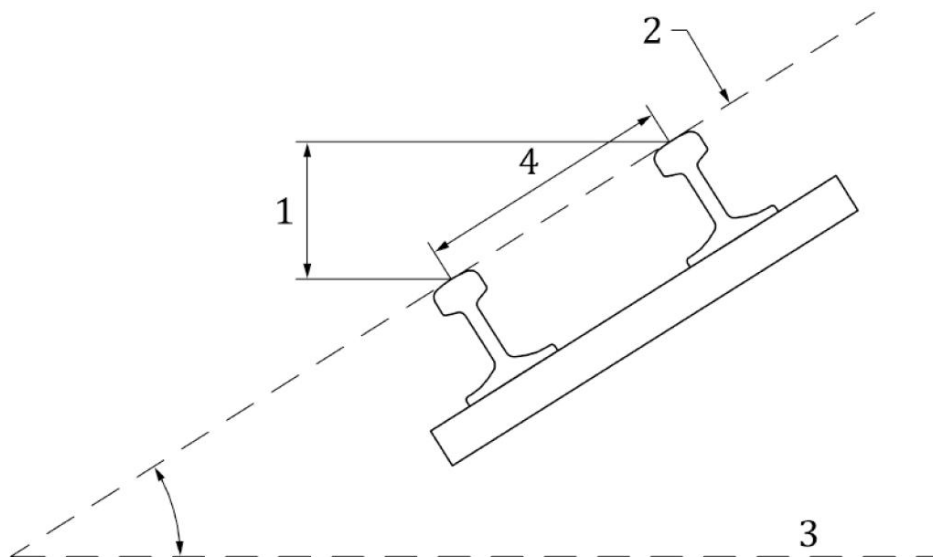
### Hodnocené geometrické parametry koleje

**Rozchod koleje (RK)** je nejmenší vzdálenost mezi liniemi kolnými k jízdni ploše, protínající každou kolejnici v bodě  $P$ , který je v rozsahu 0 až  $Z_p$  (14 mm u širokopatných kolejnic) pod spojnicí temen kolejnicových pásů. Měří se rozdíl oproti jmenovité hodnotě 1435 mm. [16]



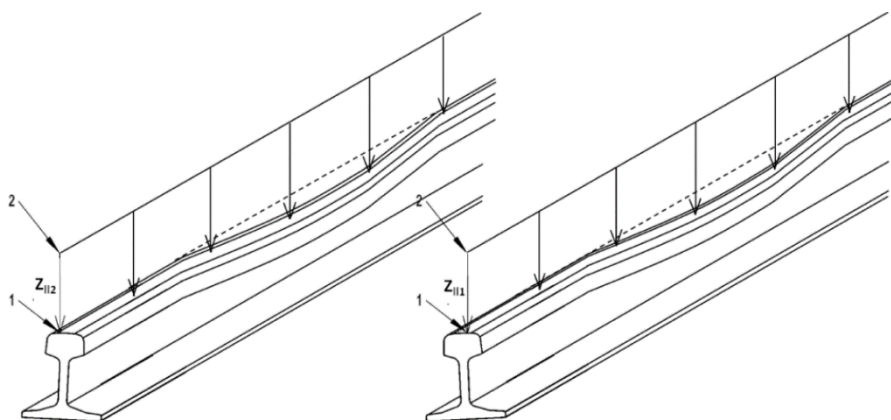
Obr. 2.2 – Rozchod koleje při ojetí kolejnic [16]

**Převýšení koleje (PK)** je výškový rozdíl temen kolejnic (1) daný úhlem, který svírá spojnice temen kolejnicových pásů (2) a vodorovná referenční rovina (3). Udává se jako výška svislé odvěsny pravoúhlého trojúhelníka s přeponou délky 1500 mm (4), která se spočítá jako součet jmenovitého rozchodu koleje a šířky hlavy kolejnice zaokrouhlené na nejbližších 10 mm. PK lze měřit také jako výškový rozdíl temen kolejnic. [16]



Obr. 2.3 – Převýšení koleje [16]

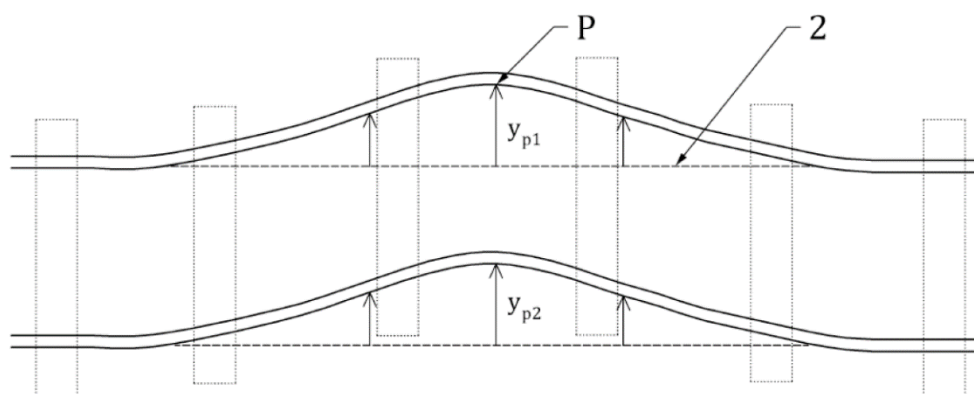
**Podélná výška levého a pravého kolejnicového pásu (VL, VP)** se měří jako svislá odchylka temene kolejnice od vyhlazené referenční linie vyjádřená v definovaných vlnových délkách. Vyhlazení se aplikuje na délku pokrývající zájmový rozsah vlnových délek (minimálně dvojnásobek horní hranice rozsahu). [16]



Obr. 2.4 – Podélná výška [16]

**Podélná výška koleje v ose (VK)** se spočítá jako průměr podélné výšky obou kolejnicových pásů VL a VP. [16]

**Směr levého a pravého kolejnicového pásu (SL, SP)** se měří jako vodorovná odchylka pojížděné hrany kolejnice od vyhlazené referenční linie vyjádřená v definovaných vlnových délkách. Vyhlazení se aplikuje na délku pokrývající zájmový rozsah vlnových délek (minimálně dvojnásobek horní hranice rozsahu). [16]



Obr. 2.5 – Směr koleje [16]

**Směr koleje v geometrické ose (SK)** se spočítá jako průměr směru obou kolejnicových pásů SL a SP. [16]

**Zborcení koleje (ZK)** je změna převýšení koleje na zvolené měřické základně, vyjádřená hodnotou  $\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$ . Vyhodnocení se provádí pro 13 základen délky 1,5 m až 19,5 m. Počítá se jako podíl algebraického rozdílu naměřených hodnot převýšení a zvolené základny. [16]

**Křivost kvazistatická (KR KS)** nazývaná také vodorovná křivost se měří jako směr koleje v ose filtrovaný v rozsahu vlnových délek 70 m až nekonečno. [16]

## 2.3.2. MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÉHO SIGNÁLU

### Rychlostní pásmo (RP)

Rychlostní pásmo je velmi důležitý parametr při hodnocení kvality geometrie koleje. Zjednodušeně lze říct, že čím je rychlostní pásmo vyšší, tím větší mají odchylky v GPK vliv na vlaky projíždějící po koleji. Určuje se podle nejvyšší projektované rychlosti v koleji. Rychlostních pásem je celkem 6: [15]

- RP0  $V \leq 60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$
- RP1  $60 < V \leq 80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$
- RP2  $80 < V \leq 120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$
- RP3  $120 < V \leq 160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$
- RP4  $160 < V \leq 230 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$
- RP5  $230 < V \leq 300 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

S výstavbou vysokorychlostních tratí v ČR lze očekávat přidání 7. rychlostního pásma pro nejvyšší rychlosti v rozmezí 300 až 350 km·h<sup>-1</sup>.

### **Pásma vlnových délek ve skutečné geometrii**

Při hodnocení geometrických parametrů koleje se naměřený signál filtruje do určených rozsahů (pásem) vlnových délek. Tím se z naměřeného signálu odfiltrují odchylky, které nemají takový vliv na průjezd vozidel a ztěžují jeho vyhodnocení jako třeba mikrogeometrie kolejnic nebo směrové a výškové oblouky. [15]

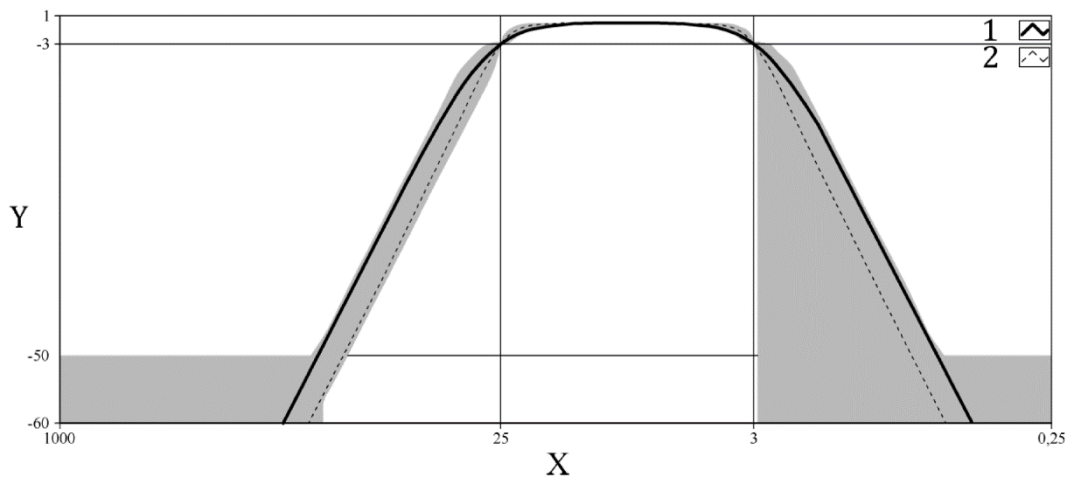
- D0:  $1\text{ m} < \lambda \leq 5\text{ m}$  (běžně se nepoužívá, ale rozlišujeme ho [16])
- D1:  $3\text{ m} < \lambda \leq 25\text{ m}$  (pro RP0 až RP5)
- D2:  $25\text{ m} < \lambda \leq 70\text{ m}$  (pro RP3 až RP5)
- D3:  $70\text{ m} < \lambda \leq 150\text{ m}$  (běžně se nepoužívá, ale rozlišuje ho [16])

### **Střednice geometrické veličiny ve skutečné geometrii**

Myšlená jako průběh hodnot, jež by vznikly filtrací geometrické veličiny měřené v celém vlnovém rozsahu dolnofrekvenční propustí s hraniční hodnotou 25 m pro rozsah vlnových délek D1:  $3\text{ m} < \lambda \leq 25\text{ m}$  a s hraniční hodnotou 70 m pro rozsah vlnových délek D2:  $25\text{ m} < \lambda \leq 70\text{ m}$ . Střednice geometrické veličiny není měřicím systémem konkrétně vyhodnocována, zavádí se však z důvodu hodnocení relativních odchylek. [15]

### **Popis filtrace**

Pro účely filtrace se používá kaskádový Butterworthův filtr 2. řádu (tlustá čára) a Butterworthův filtr 4. řádu (tenká čárkovaná čára). Na Obr. 2.6 jsou šedou barvou vyznačena toleranční pásma, která jsou doporučena pro přenosové funkce pro filtraci ve vlnovém pásmu D1. Toleranční pásmo bylo záměrně zvoleno asymetricky, protože na straně krátkých vlnových délek jsou amplitudy závad výrazně menší, takže na celkové amplitudy nemají příliš velký vliv. Toleranční pásmo pro D2 je symetrické, protože amplituda závady může být pro všechny sousední vlnové délky významná. [16]

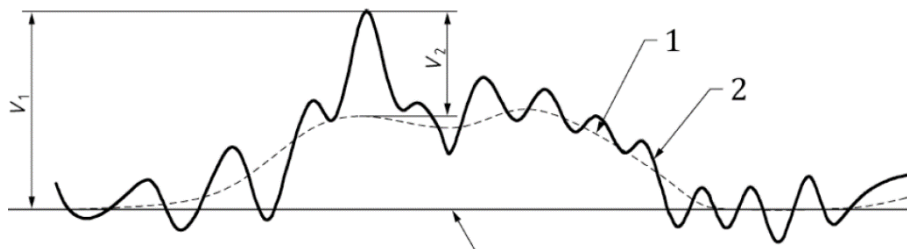


Obr. 2.6 – Pásmový filtr D1 a dvě možné přenosové funkce [16]

Je-li přenosová funkce pod dolní mezí tolerančního pásma, musíme snížit meze dle [17]. Při porovnávání měření či měřicích systémů bychom měli použít shodný filtr. [16]

### Relativní odchylka ve skutečné geometrii

Jde o odchylku měřeného parametru ve zvoleném vlnovém pásmu vůči její střednici. Měření relativních stavebních odchylek VK a SK ve skutečné geometrii se uskutečňuje u měřicích zařízení s využitím inerčního měřicího systému přímo. U měřicích prostředků s těťivovým měřicím systémem se využívá přepočítání na skutečnou geometrii. [15]



Obr. 2.7 – Relativní odchylka ve skutečné geometrii [16]

### Těťivový měřicí systém

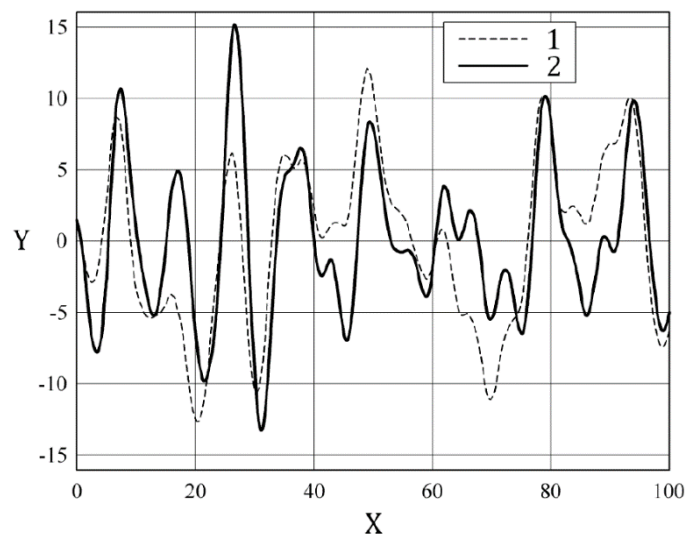
Hodnocení podélné výšky a směru koleje na principu měření výškového a směrového vzepětí asymetrickou těťivou měřicími prostředky a měřicím zařízením traťových strojů. Naměřené veličiny lze přepočítat na hodnocení ve skutečné geometrii pomocí vhodné korekce přenosové funkce měřicího prostředku na jednotkovou funkci společně s filtrací pro zvolený vlnový rozsah. [15][18]

## Inerční měřicí systém

Geometrie koleje je hodnocena z polohy kolejnic v podélném a příčném směru, vzhledem k inerčnímu vztažnému bodu. Tato poloha je zpravidla zjišťována akcelerometry a gyroskopy. S ohledem na umístění snímačů inerčního systému měření (podvozek, skříň vozu), jsou k měření vzdálenosti mezi kolejnicemi a inerčním referenčním systémem používány doplňkové snímače (čidla). Tento měřicí princip má jednotkovou přenosovou funkci. Pro hodnocení ve skutečné geometrii je aplikována filtrace pro zvolený vlnový rozsah. Pro správnou funkci systému je nutná určitá minimální rychlost. [15][18]

## Oprava zkreslení

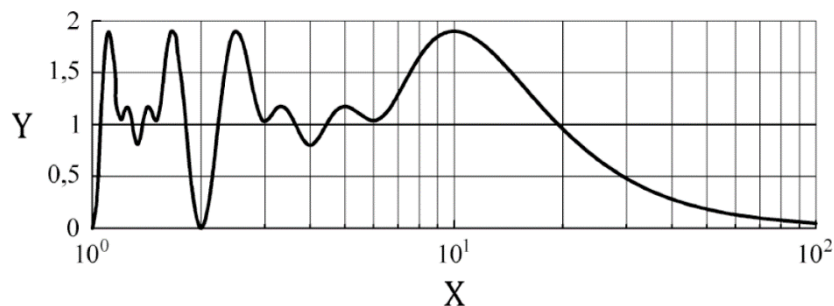
Jsou-li GPK zaznamenány těživovým měřicím systémem, dochází ke zkreslení rozsahu a fáze SK a VK. Proces kompenzace tohoto zkreslení se nazývá „oprava zkreslení“. Zkreslení je závislé na délce použité tětivy a jejím rozdělení. U asymetrického rozdělení tětivy závisí také na směru jízdy měřicího prostředku. Na Obr. 2.8 je vidět srovnání měření tětivou (2) a odpovídajícího opraveného signálu (1) na krátkém úseku koleje. [16]



Obr. 2.8 – Příklad zkreslení měření tětivou [16]

Zkreslení je možné popsat pomocí přenosové funkce, jejíž hodnota představuje zesílení jako funkci vlnové délky a pohybuje se mezi 0 a 2. Jako příklad je na Obr. 2.9 znázorněna přenosová funkce měřená 10m tětivovým systémem s rozdělením 4 a 6 m. Nulová hodnota, která odpovídá vlnové délce 2 m, znamená, že tato vlnová délka nebyla vůbec zaznamenána a nelze ji tedy rekonstruovat. Stejně tak jsou silně oslabeny i dlouhé

vlny. Obecně platí, že nízké hodnoty přenosové funkce znamenají horší poměr signál/šum, což znamená, že oprava zkreslení bude selhávat. [16]



Obr. 2.9 – Příklad přenosové funkce tětívového měření [16]

### Ověření opravy zkreslení

Ověření opravy zkreslení může být provedeno dvěma způsoby:

- Použitím zkušebních signálů
- Ověřením zaznamenaných GPK

Používané signály by měly samozřejmě pokrývat všechny zájmové vlnové délky.

Ověření ze zaznamenaných dat je užitečné, není-li znám přesný algoritmus opravy zkreslení nebo není-li k dispozici testovací signál. Používá se křížová kontrola mezi RK a rozdílem směrů kolejnic (opravených o zkreslení a filtrovaných) nebo mezi dynamickým PK a rozdílem podélných výšek kolejnic (opravených o zkreslení a filtrovaných). Přednost by měla mít křížová kontrola RK a rozdílů SL a SP, jelikož přesnost měření RK je vyšší než u měření PK. [16]

## 2.3.3. HODNOCENÍ NAMĚŘENÉHO SIGNÁLU

### Stavební odchylka

Odchylka od projektované nebo jmenovité hodnoty geometrické veličiny při přejímce prací v koleji.

### Provozní odchylka

Odchylka od projektované nebo předepsané hodnoty geometrické veličiny na provozované trati. Dělí se na tři stupně:

**Mez sledování (AL = *Alert Limit*)** – pokud je stanovená hodnota překročena, je třeba stav GPK posoudit a vzít v úvahu při plánování udržovacích prací.

**Mez zásahu (IL = *Intervention Limit*)** – pokud je stanovená hodnota překročena, je třeba provést údržbu tak, aby před příští kontrolou nedošlo k překročení meze IAL.

**Mez bezodkladného zásahu (IAL = *Immediate Action Limit*)** – pokud dojde k překročení stanovené hodnoty, je nutné provést bezodkladně opatření k zajištění bezpečnosti provozu. [15]

## 2.3.4. MĚŘICÍ PROSTŘEDKY

Měřicí prostředky se dělí:

- Dle záznamu dat
  - Bodové
  - Kontinuální
- Dle působení na kolej
  - Měření pod zatížením
  - Měření bez zatížení
- Dle typu čidel
  - Kontaktní
  - Bezkontaktní

Měření pod zatížením je obecně lepší, protože měřicí zařízení působí na kolej podobně jako jedoucí vlak a tím pádem jsou naměřené hodnoty parametrů o něco horší než bez zatížení, lépe korespondují se skutečným provozem. Z toho vyplývá, že měření bez zatížení poskytuje o něco méně relevantní hodnoty. Prostředky pro měření bez zatížení jsou jednodušší a tím pádem levnější a také lépe přenosné. Zařízení pro měření pod zatížením krom lepších dat poskytují pohodlnější pracovní prostředí za každého počasí.

Jednodušší měřicí prostředky zpravidla měří bodově, zatímco komplikovanější prostředky měří kontinuálně.

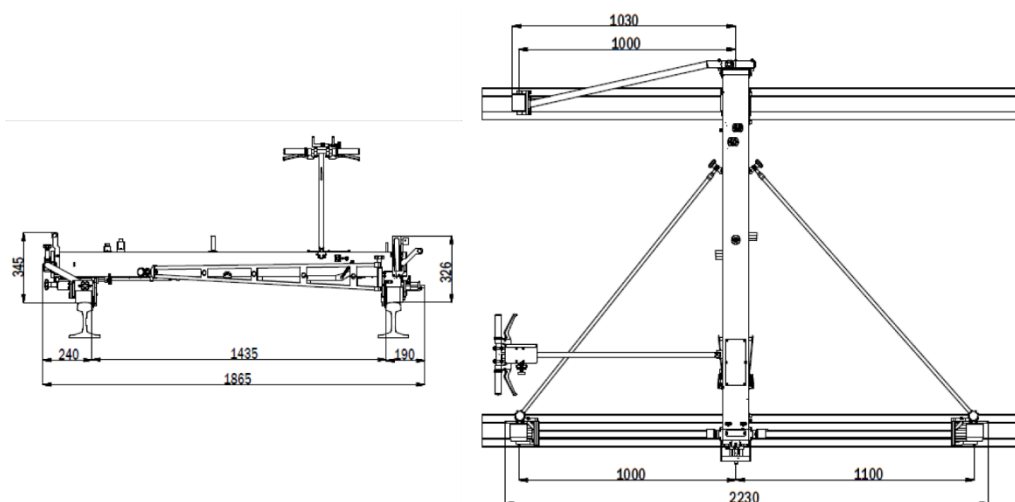
Pro účely předpisu SŽ S2/4 se za kontinuální měření považuje takové měření, které vyhovuje požadavku na vzorkovací frekvenci maximálně 0,25 m. Tento požadavek neplatí pro parametry ve vlnovém pásmu D2, pro které stačí 1 m. [19]

Ve smyslu ČSN EN 13848-1 se za měření pod zatížením považuje takové měření, kdy zatížení působící v bodě měření na kolejnici odpovídá svislému zatížení kol minimálně 25 kN při uvažované svislé tuhosti koleje  $90 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$  na kolejnici (podíl zatížení kol a průhybu kolejnice) a profilu kolejnice 60 E1 (UIC 60). [16][19]

## Rozchodka

Jde o nejjednodušší používaný měřicí prostředek, který slouží ke kontrole RK a PK na konkrétních místech v koleji a ve výhybkách. Jedná se o prostředek k bodovému měření bez zatížení. Díky její nízké ceně je široce dostupná, takže ji používají jak pracovníci stavby, tak i správy tratí při dohledávání závad nebo pravidelných kontrolách. S rozchodkou doplněnou o pravítko je možné měřit i výšku a vzdálenost nástupní hrany od osy koleje.

## Měřicí vozík KRAB



Obr. 2.10 – Měřicí vozík KRAB – schéma [19]

Jedná se o měřicí prostředek pro kontinuální měření bez zatížení, který se obvykle používá pro měření kolejí při přejímkách staveb a pro pravidelná měření vleček. Hmotnost zařízení je 36 kg (platí pro model KRAB S-Light). Maximální rychlost měření je  $15 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Měření GPK probíhá mechanickým snímáním za pomoci kontaktních čidel. Systém pro

snímání GPK je tvořen kombinací těživového snímání asymetrickou těživou na jednom kolejnicovém pásu a inklinometru. [19]

**Rozchod koleje** je snímán kontaktními čidly umístěnými na středových kolečkách, která jsou od sebe tlačena pružinami. Rozchod se zjistí jako rozdíl údajů z čidel.

**Směr levého a pravého kolejnicového pásu** se měří kontaktem jednostranné asymetrické těivy s kolejnicí. Směr druhého pásu se dopočítá pomocí rozchodu koleje.

**Křivost koleje** je snímána kontaktními čidly tříbodového těživového systému.

**Podélná výška levého a pravého kolejnicového pásu** je měřena kontaktem jednostranné asymetrické těivy s kolejnicí. Podélná výška druhého pásu se dopočítává pomocí převýšení koleje.

**Převýšení koleje** se získá inklinometrem, který měří úhel náklonu měřicího podvozku.

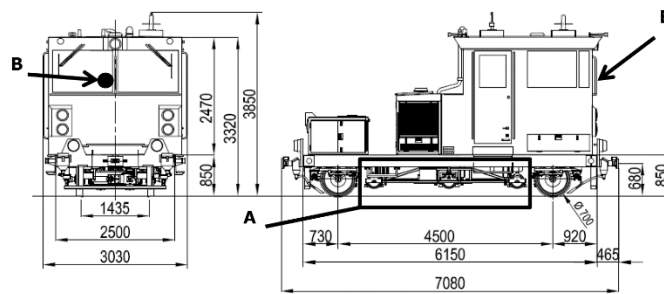
**Zborcení koleje** se počítá z nefiltrovaného převýšení na normou stanovených 13 základnách.



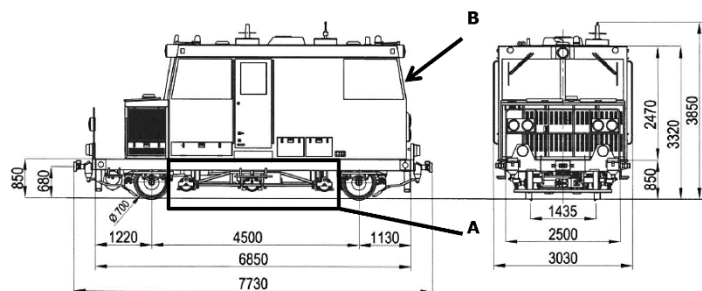
Obr. 2.11 – Měřicí vozík KRAB

Výpočet všech statických a dynamických veličin probíhá přímo v měřicím vozíku v reálném čase. Určení polohy naměřených dat spočívá v zadání počáteční kilometrické polohy uživatelem a následných kilometrických korekcích v průběhu měření. Počítač pro ovládání vozíku umožňuje také zaznamenání přibližné polohy pomocí GNSS. [19]

## Malá měřicí drezína (MMD.1 a MMD.2)



Obr. 2.12 – Malá měřicí drezína 1 – schéma [19]



Obr. 2.13 – Malá měřicí drezína 2 – schéma [19]

Jedná se o měřicí prostředek pro kontinuální měření pod zatížením, který se používá pro měření staničních kolejí na tratích TEN-T. Drezína je vybavena kontaktními snímači (A) a kamerou (B). Používá se pro měření předjízdových kolejí v železničních stanicích. Měřicí podvozek je samostatná tuhá příhradová konstrukce, která je během měření vedena spojovacím táhlem pod rámem vozidla. Snímání GPK probíhá kombinací tětívového snímání asymetrickou tětivou pro jeden kolejnicový pás a inerciální jednotky. Vzájemnou rychlostně závislou kombinací lze dosáhnout přesnosti měření pro rychlosti 2 až 50 km·h<sup>-1</sup>. Přesnost měřicího systému je určena reprodukovatelností směrodatných odchylek na délce 200m úseků měření koleje.

**Rozchod koleje** je snímán kontaktními čidly umístěnými na středových kolečkách měřicího podvozku. Rozchod se zjistí jako rozdíl údajů z čidel.

**Směr levého a pravého kolejnicového pásu** se měří kontaktem jednostranné asymetrické tětivy s kolejnicí. Směr druhého pásu se dopočítá pomocí rozchodu koleje.

**Křivost koleje** je snímána kontaktními čidly tříbodového tětívového systému a inerciální jednotkou.

**Podélná výška levého a pravého kolejnicového pásu** je měřena kontaktem jednostranné asymetrické tětivy s kolejnicí. Podélná výška druhého pásu se dopočítává

pomocí převýšení koleje. Výsledky měření jsou ve vztahu k měřicí rychlosti průběžně kompenzovány inerciálním systémem.

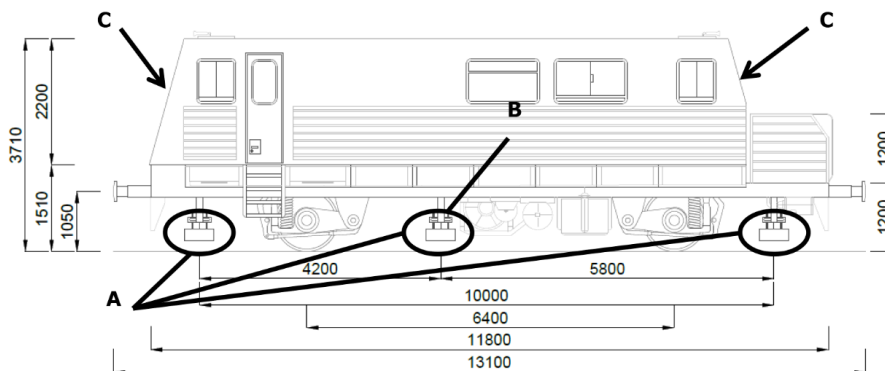
**Převýšení koleje** se získá inerciálním systémem, který měří úhel náklonu měřicího podvozku.

**Zborcení koleje** se počítá z nefiltrovaného převýšení na normou stanovených 13 základnách.

Získání všech statických a dynamických veličin probíhá v reálném čase, kdy se všechny nutné operace se signály jednotlivých snímačů provádějí digitálně přímo v počítači malé měřicí drezíny. Přesnost polohové identifikace závad je dána přesností snímání ujeté vzdálenosti a také přesností určení polohy MMD. Dosažitelná přesnost je 1 m na 1 km. Pro účely dosažení požadované přesnosti a reprodukovatelnosti jsou v železniční síti osazeny magnetické značky, umožňující automatickou korekci dráhy během měření.

Měřicí prostředek je vybavený jednou kamerou umístěnou v čelní části vozu. Kamera je orientovaná tak, aby zabírala celé kolejové lože a horizont byl ve 2/3 záběru. Snímek je pořizován každých 20 m. [19]

### Měřicí drezína (MD1)



Obr. 2.14 – Měřicí drezína – schéma [19]

Jedná se o měřicí prostředek pro kontinuální měření pod zatížením, který se do roku 2023 používal pro měření regionálních a mimořádně i celostátních tratí. Od té doby se používá převážně pro měření staničních kolejí. Drezína je vybavena bezkontaktními snímači pro měření GPK (A), příčného profilu kolejnic (B) a kamerami (C). Měření GPK je založeno na rozměrovém snímání světelné stopy laserového paprsku, která je snímána bezkontaktním optickým kamerovým systémem. Použitý triangulační princip umožňuje

vyloučení dalších snímačů pro kompenzaci polohy snímacích jednotek. Systém snímání je tvořen kombinací tětívového snímání asymetrickou tětivou pro oba kolejnicové pásy a inerciální jednotky. Vzájemnou rychlostně závislou kombinací lze dosáhnout požadované přesnosti měření pro rychlosti  $10 \div 80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Přesnost měřicího systému je určena reprodukovatelností směrodatných odchylek na délce 200m úseků měření koleje.

**Rozchod koleje** je snímán bezkontaktně pomocí kamer umístěných ve střední jednotce tětívového systému. Kolejnice jsou osvětleny laserem. Rozchod je určen rozdílem údajů snímačů kamer.

**Směr levého a pravého kolejnicového pásu** se měří tětívovým systémem oboustranné asymetrické tětivy optickými jednotkami. Výsledky měření jsou ve vztahu k měřené rychlosti průběžně kompenzovány inerciálním systémem umístěným ve střední snímací jednotce. Směr koleje v ose v pásmu D2 je měřen inerciální jednotkou.

**Křivost koleje** je snímána optickými jednotkami tříbodového tětívového systému a inerciální jednotkou. Výsledná hodnota je dána kombinací obou systémů. Při nízkých rychlostech převažuje ve výsledku podíl křivosti měřené tětivou a při vyšších rychlostech inerciální jednotkou.

**Podélná výška levého a pravého kolejnicového pásu** je měřena tětívovým systémem oboustranné asymetrické tětivy optickými jednotkami. Výsledky měření jsou ve vztahu k měřené rychlosti průběžně kompenzovány inerciálním systémem.

**Převýšení koleje** se získá inerciálním systémem, který měří úhel náklonu vozové skříňe v místě středních optických jednotek.

**Zborcení koleje** se počítá z nefiltrovaného převýšení na 13 základnách.



Obr. 2.15 – Měřicí drezína – fotografie



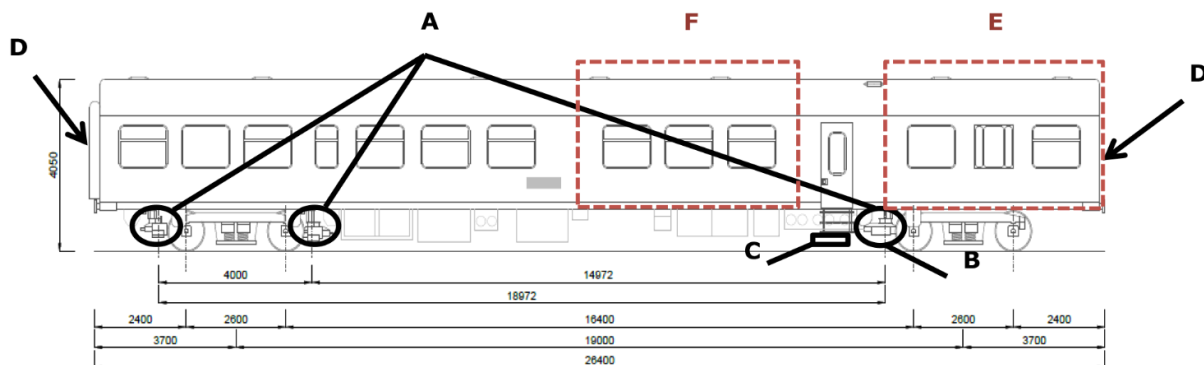
polohových souřadnic k měřeným datům. V případě výpadku GNSS (zejména v tunelech) jsou po přechodnou dobu souřadnice dopočítávány pomocí IMU. [19]



Obr. 2.17 – Měřicí drezína EM100 – fotografie [20]

GPK jsou hodnoceny v kroku po 0,25 m až do maximální rychlosti  $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Naměřené signály jsou vyhodnocovány během měření ve 3 vlnových pásmech (D0, D1 a D2). Rozchod a převýšení koleje se hodnotí i jako celkový signál. [19]

### Měřicí vůz železničního svršku (MVŽSv)



- Bezkontaktní inerčně-optický systém pro měření GPK (A)
- Optický měřicí systém příčného profilu kolejnic (B)
- Optický měřicí systém vertikální mikrogeometrie hlav kolejnic (C)
- Kamera pro snímání obrazu měřené koleje (D)

Obr. 2.18 – Měřicí vůz železničního svršku – schéma [19]

Jedná se o měřicí prostředek pro kontinuální měření pod zatížením, který se do roku 2023 používal pro měření celostátních a vybraných regionálních tratí s rychlostí vyšší než  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Měření GPK je založeno na rozměrovém snímání světelné stopy laserového

paprsku, která je snímána bezkontaktním optickým kamerovým systémem. Použitý triangulační princip umožňuje vyloučení dalších snímačů pro kompenzaci polohy snímacích jednotek. Systém snímání je tvořen kombinací tětívového snímání asymetrickou tětívou pro oba kolejnicové pásy a inerciální jednotky. Vzájemnou rychlostně závislou kombinací lze dosáhnout požadované přesnosti měření pro rychlosti 10 až 160 km·h<sup>-1</sup>. Přesnost měření je určena reprodukovatelností směrodatných odchylek na délce 200m úseků měření koleje. [19]

parametr	šířka pásma [m]	symbol	jednotka	rozsah	přesnost
směr koleje levý, pravý	3 ÷ 25	<i>SL, SP</i>	mm	± 25	±0,3 mm
směr koleje v ose	25 ÷ 70	<i>SK</i>	mm	± 25	±0,5 mm
podélná výška koleje levá, pravá	3 ÷ 25	<i>VL, VP</i>	mm	± 25	±0,3 mm
podélná výška v ose	25 ÷ 70	<i>VK</i>	mm	± 25	±0,5 mm
převýšení koleje celkové	1 ÷ ∞	<i>PK</i>	mm	± 200	±2 %
převýšení koleje dynamické	3 ÷ 25	<i>PKD</i>	mm	± 25	±0,3 mm
převýšení koleje kvazistatické	70 ÷ ∞	<i>PK<sub>KS</sub></i>	mm	± 200	±2 %
celkový rozchod koleje	1 ÷ ∞	<i>RK</i>	mm	-10, +40	±0,2 mm
rozchod koleje dynamický	3 ÷ 25	<i>RK</i>	mm	± 25	±0,2 mm
křivost koleje	70 ÷ ∞	<i>K<sub>KS</sub></i>	m <sup>-1</sup>	≥ 150	R ≤ 250 m ±2 % R ≥ 103 m ±10 %
celková křivost koleje	1 ÷ ∞	<i>K<sub>n</sub></i>	m <sup>-1</sup>	≥ 150	

Obr. 2.19 – Měřené parametry MVŽSv a jejich přesnost [19]

**Rozchod koleje** je snímán bezkontaktně pomocí kamer umístěných ve střední jednotce tětívového systému. Kolejnice jsou osvětleny laserem. Rozchod je určen rozdílem údajů snímačů kamer.

**Směr levého a pravého kolejnicového pásu** se měří tětívovým systémem oboustranné asymetrické tětivy optickými jednotkami. Výsledky měření jsou ve vztahu k měřicí rychlosti průběžně kompenzovány inerciálním systémem umístěným ve střední snímací jednotce. Směr koleje v ose v pásmu D2 je měřen inerciální jednotkou.

**Křivost koleje** je snímána optickými jednotkami tříbodového tětívového systému a inerciální jednotkou. Výsledná hodnota je dána kombinací obou systémů. Při nízkých rychlostech převažuje ve výsledku podíl křivosti měřené tětívou a při vyšších rychlostech inerciální jednotkou.

**Podélná výška levého a pravého kolejnicového pásu** je měřena tětiovým systémem oboustranné asymetrické tětivy optickými jednotkami. Výsledky měření jsou ve vztahu k měřicí rychlosti průběžně kompenzovány inerciálním systémem. Podélná výška v ose koleje v pásnu D2 je měřena inerciální jednotkou.

**Převýšení koleje** se získá inerciálním systémem, který měří úhel náklonu vozové skříně v místě středních optických jednotek.

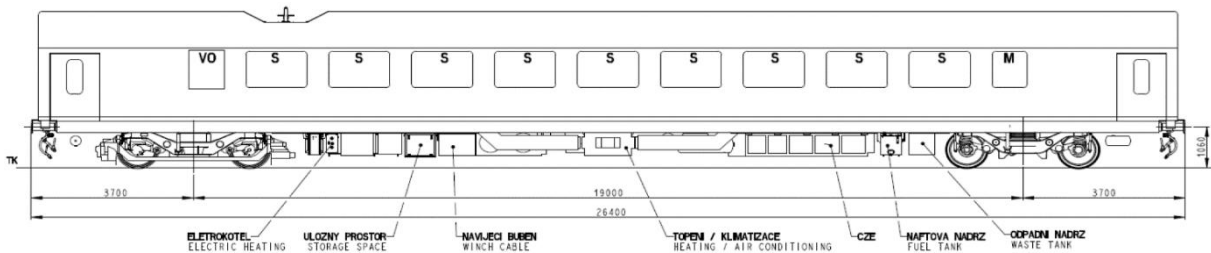
**Zborcení koleje** se počítá z nefiltrovaného převýšení na 13 základnách.



Obr. 2.20 – Měřicí vůz pro železniční svršek – fotografie [21]

Získání všech statických a dynamických parametrů probíhá v reálném čase, kdy se všechny nutné operace se signály jednotlivých snímačů provádějí digitálně přímo v počítači měřicího vozu. Přesnost polohové identifikace závad je dána přesností snímání ujeté vzdálenosti a také přesností určení polohy MVŽSv. Dosažitelná přesnost je 1 m na 1 km. Pro účely dosažení požadované přesnosti a reprodukovatelnosti jsou v železniční síti osazeny magnetické značky, umožňující automatickou korekci dráhy během měření. Měřicí prostředek je vybaven dvojicí kamer umístěných v přední a zadní části vozu. Kamery jsou orientované tak, aby zabíraly celé kolejové lože a horizont byl ve 2/3 záběru. Snímek je pořizován každých 20 m. [19]

## Měřicí vůz železničního svršku (MVŽSv2)



Obr. 2.21 – Měřicí vůz pro železniční svršek 2 – schéma [19]

Jedná se o měřicí prostředek pro kontinuální měření pod zatížením. Používá se pro měření celostátních a vybraných regionálních tratí s rychlostí nad  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . V roce 2023 nahradil starší MVŽSv. Kvůli zachování porovnatelnosti výsledků se starším měřicím vozem byla v průběhu roku 2023 prováděna měření oběma měřicími vozy najednou.

Měřicí systémy umístěné na speciálním rámu na podvozku vozidla jsou: [19]

- Bezkontaktní inerciálně-optický systém pro měření GPK
- Optický měřicí systém příčného profilu pro vyhodnocení ojetí kolejnic
- Optický měřicí systém vertikální mikrogeometrie hlav kolejnic
- Systém měření zrychlení na ložiskových domcích na jedné nápravě podvozku

Na zadním čele vozidla ve směru jízdy jsou umístěny tyto systémy: [19]

- Systém měření příčného profilu kolejového lože, osových vzdáleností mezi pojížděnou kolejí a sousedními kolejemi a kontroly průjezdného průřezu
- Kamera pro snímání obrazu měřené koleje



Obr. 2.22 – Měřicí vůz pro železniční svršek 2 – fotografie

Bezkontaktní měřicí systém GPK je založen na inerciální měřicí jednotce (IMU) obsahující 3 snímače úhlové rychlosti a 3 akcelerometry. Z měřených úhlových rychlostí a zrychlení se vyhodnocují tzv. prostorové křivky pohybu vozu. Měření rozchodu koleje, návaznost polohy IMU vůči koleji a snímání příčného profilu kolejnic zajišťují 4 optické jednotky s lasery. Díky dvěma dvojicím měřicích jednotek lze GPK vyhodnocovat i při nejnižších měřených rychlostech. IMU je doplněna přesným přijímačem GNSS pro přiřazení polohových souřadnic k měřeným datům. V případě výpadku GNSS (zejména v tunelech) jsou po přechodnou dobu souřadnice dopočítávány pomocí IMU. [19]

Veličiny GPK jsou hodnoceny v kroku po 0,25 m až do nejvyšší rychlosti 200 km·h<sup>-1</sup>. Naměřené signály jsou vyhodnocovány v průběhu měření ve 3 vlnových pásmech (D0, D1 a D2). Rozchod a převýšení koleje se hodnotí i jako celkový signál. [19]

## 2.4. VELIČINY PRO HODNOCENÍ KVALITY GEOMETRIE KOLEJE

Používané indexy kvality (veličiny) můžeme počítat buď diskrétně, nebo klouzavě. **Diskrétní** přístup spočívá ve výpočtu indexů pro jednotlivé segmenty úseku stejné délky. Zatímco u **klouzavého** přístupu se index počítá klouzavě v každém měřeném místě na určené délce segmentu. Klouzavá metoda poskytuje věrnější charakteristiku řešeného úseku. Diskrétní metoda je vhodnější pro plánování údržby jednotlivých segmentů. [22]

Zásadní pro hodnocení je **délka segmentu**. Dle [22] nejčastěji bývá 100 a 200 m, může však být i 1 km. Délka by se měla s klesající rychlostí zmenšovat, protože tratě s nižší rychlostí mívají častější změny geometrie. Větší délka segmentů ukazuje širší obrázek o stavu trati, ale rozmazává vliv lokálních závad, zatímco kratší délka se více blíží originální geometrii a lokální závady jsou výraznější. Pro sledování vývoje kvality geometrie koleje v čase je nutné zachovat metody výpočtu a délku segmentů. [22]

### 2.4.1. LOKÁLNÍ ZÁVADY (ID)

Lokální závady (*Isolated Defects* = ID) jsou reprezentované amplitudou od nuly po hodnotu špičky [16]. Velké lokální závady mohou způsobit vykolejení vlaku. Pro účely hodnocení kvality geometrie koleje se počítají odchylky, které překračují vybranou mezní hladinu např. mez zásahu na zvolené délce koleje. Jednotlivé odchylky musí mít minimální

délku 0,25 či 1 m (s ohledem na krok měření), aby se jejich vliv projevil. [23] Provozní odchylky pro kontrolu lokálních závad udávají normy [15] a [23].

V Tab. 2.1 jsou uvedeny mezní provozní odchylky na úrovni meze sledování a meze zásahu pro směr a výšku koleje ve vlnových pásmech D1 a D2. Tab. 2.1 vychází z tabulek z normy [16].

RP	V	VL, VP D1		VK D2		SL, SP D1		SK D2	
	km/h	mm		mm		mm		mm	
	mez	AL	IL	AL	IL	AL	IL	AL	IL
0	$V \leq 60$	±17	±20	-	-	±16	±18	-	-
1	$60 < V \leq 80$	±14	±18	-	-	±13	±15	-	-
2	$80 < V \leq 120$	±11	±13	-	-	±9	±11	-	-
3	$120 < V \leq 160$	±7	±10	±12	±18	±7	±8	±12	±14
4	$160 < V \leq 230$	±5	±9	±10	±16	±5	±7	±10	±12
5	$230 < V \leq 300$	±4	±8	±8	±14	±4	±6	±8	±10

Tab. 2.1 – Provozní odchylky veličin pro stupně AL a IL [15]

Počet lokálních závad na segmentu koleje se nejčastěji používá pro následující parametry: VK D1, SK D1, ZK, RK, PK. Počítá se ale i pro VK D2 a SK D2. Dle evropské normy [23] je délka posuzovaných segmentů koleje běžně větší než 1 km, ale může být i 100 či 200 m. Je-li to třeba, rozlišuje se druh úseku (širá trať, stanice, výhybky a výhybkové konstrukce). Lze vypočítat, jak velké procento tratě překračuje určenou mezní hladinu. Tento index kvality používají někteří evropští správci infrastruktury. [23]

## 2.4.2. SMĚRODATNÁ ODCHYLKA (SD)

Směrodatná odchylka (*Standard deviation* = SD) je jeden z nejčastěji používaných indexů kvality v Evropě i ve světě. Vyjadřuje míru rozptýlení signálu na určité délce koleje kolem střední hodnoty. SD souvisí s energií signálu v daném rozsahu vlnových délek. [23] Směrodatná odchylka se získá jako odmocnina z rozptylu signálu.

Dle evropské normy [23] se SD spočítá podle rovnice:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (2.1)$$

kde  $N$  je počet hodnot ve vzorku,

$x_i$  je hodnota signálu

$\bar{x}$  je střední (průměrná) hodnota signálu

Zatímco dle českého předpisu [19] se SD počítá dle vztahu:

$$SDO = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2.2)$$

kde  $n$  je počet vzorků měření,

$x_i$  je odchylka od střednice geometrické veličiny.

Rovnice (2.2) předpokládá, že už pracujeme s odchylkami od střední hodnoty. Musíme si proto dát pozor na parametry, které neprošly filtrací do vlnových pásem a bylo by tedy logičtější použít první vztah. Analogicky rovnici (2.1) bychom neměli aplikovat na již filtrovaný signál, protože by to SD mohlo zmenšit. Je-li střední hodnota rovna 0, oba vztahy poskytují stejné výsledky.

SD se většinou používá pro hodnocení směru a výšky kolejnicových pásů ve vlnovém pásmu D1. Počítá se ale i pro ostatní parametry jako jsou: ZK, RK, PK, VK D2 a SK D2. [23]

Předpis [19] udává mezní hodnoty SD pro jednotlivé mezní hladiny viz Tab. 2.2.

<b>V</b> <b>[km/h]</b>	<b>Mezní</b> <b>hladiny</b>	<b>SK</b> <b>[mm]</b>	<b>RK</b> <b>[mm]</b>	<b>PK</b> <b>[mm]</b>	<b>VK</b> <b>[mm]</b>
$V \leq 60$	IAL	3,62	2,91	2,48	4,81
	IL	3,32	2,71	2,38	4,51
	AL	3,02	2,51	2,28	4,21
$60 < V \leq 80$	IAL	3,02	2,51	2,28	4,21
	IL	2,74	2,36	2,18	3,89
	AL	2,46	2,20	2,08	3,57
$80 < V \leq 120$	IAL	2,46	2,20	2,08	3,57
	IL	2,15	2,00	1,93	3,32
	AL	1,84	1,80	1,77	3,06

Tab. 2.2 – Mezní hodnoty SD dle Předpisu SŽ S2/4 [19]

Dle evropské normy [23] byl v roce 2010 zorganizován průzkum s cílem stanovit mezní hodnoty SD na základě dat o kvalitě geometrie kolejí (ve vlnovém pásmu D1) z různých států Evropy. Výsledkem byla funkce kumulativního rozdělení získaná pomocí váženého průměru podle délky tratí v síti jednotlivých zemí. Takto byla stanovena rozdělení pro pět rychlostních pásem. Evropská norma [23] rozeznává 5 Tříd kvality tratí (*Track Quality Classes*) od A do F, kdy A reprezentuje 10 % nejlepších tratí a E 10 % nejhorších.

Rychlost (km/h)	Mezní hodnoty směrodatné odchylky (mm)				
	Třída kvality trati				
	A	B	C	D	E
$V \leq 80$	1,25	1,75	2,75	3,75	3,75
$80 < V \leq 120$	0,75	1,10	1,80	2,50	2,50
$120 < V \leq 160$	0,65	0,85	1,40	1,85	1,85

Tab. 2.3 – Mezní hodnoty SD VK dle ČSN EN 13848-6 (přeloženo z [23])

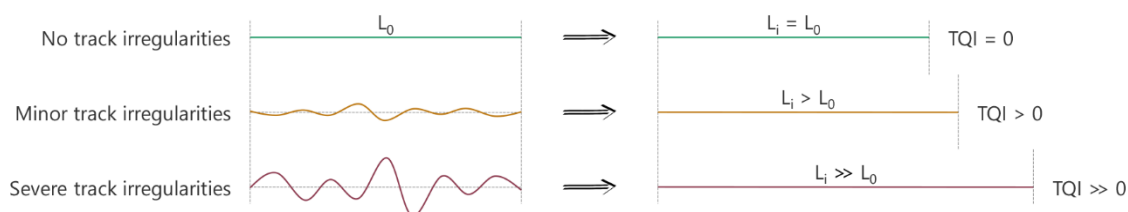
Rychlost (km/h)	Mezní hodnoty směrodatné odchylky (mm)				
	Třída kvality trati				
	A	B	C	D	E
$V \leq 80$	0,90	1,25	1,95	2,70	2,70
$80 < V \leq 120$	0,50	0,70	1,05	1,45	1,45
$120 < V \leq 160$	0,45	0,55	0,75	1,00	1,00

Tab. 2.4 – Mezní hodnoty SD SK dle ČSN EN 13848-6 (přeloženo z [23])

Obě tabulky byly zkráceny tak, že v nich jsou pouze hodnoty pro rychlostní pásma používaná v ČR. Srovnáním Tab. 2.3 a Tab. 2.4 můžeme vidět, že mezní hodnoty z českého předpisu jsou mnohem vyšší a tím pádem mírnější než v evropské normě. Z neznámého důvodu jsou hodnoty ve sloupcích D a E identické.

### 2.4.3. INDEX KVALITY KOLEJE (TQI)

Index kvality koleje (*Track Quality Index* = TQI) byl poprvé představen v [24]. Používá ho americký Federální železniční úřad (*Federal Railroad Administration* = FRA). TQI zkoumali také [22] a [25]. Je založený na měření tzv. **Délky prostorové křivky** (hodnoceného signálu), která závisí na počtu a velikosti odchylek, které se vyskytují v segmentu koleje zvolené délky, což ilustruje Obr. 2.23.



Obr. 2.23 – Princip délky prostorové křivky [22]

Index kvality koleje vybraného parametru se spočítá dle vztahu: [24]

$$TQI_i = \left( \frac{L_s}{L_0} - 1 \right) \cdot 10^6 \quad (2.3)$$

kde  $L_s$  je délka prostorové křivky,

$L_0$  je délka segmentu koleje (teoretická délka signálu bez závad).

Délka prostorové křivky se spočítá jednoduše s pomocí Pythagorovy věty: [24]

$$L_s = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} \quad (2.4)$$

kde  $\Delta x_i$  je vzdálenost mezi měřeními,

$\Delta y_i$  je rozdíl naměřených hodnot,

$n$  je počet měření na segmentu koleje.

Indexy kvality jednotlivých parametrů lze zkombinovat do jednoho „manažerského“ indexu kvality za pomoci aritmetického průměru. Dle [22] se na počátku ještě provede normalizace signálu za pomoci mezních odchylek pro hodnocení lokálních závad z [23], což TQI zmenší dle použité mezní hladiny (AL, IL a IAL). Tímto se do výpočtu také zavede vliv rychlosti, protože mezní odchylky se liší podle rychlostního pásma. [22]

### **Postup výpočtu:**

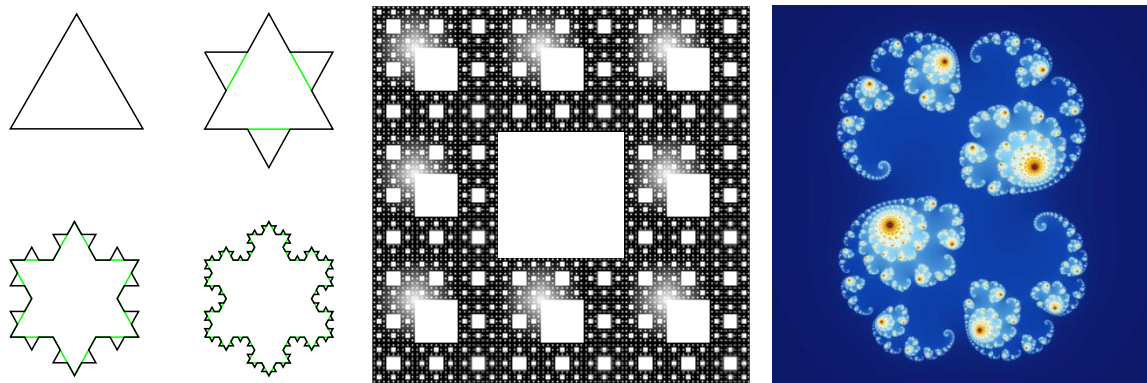
1. Oddělení kladných a záporných hodnot naměřených odchylek RK
2. Normalizace (dělení) signálů mezními odchylkami pro jednotlivé parametry
3. Výpočet délky prostorové křivky klouzavě pro jednotlivé segmenty koleje
4. Výpočet indexů kvality parametrů jako podíl délky křivky a segmentu
5. Zprůměrování levého a pravého kolejnicového pásu pro směr a výšku
6. Výpočet výsledné hodnoty jako aritmetický průměr jednotlivých indexů

Kolegové z Technické univerzity ve Grazu provedli demonstraci metody na 5 km dlouhém úseku trati. Dle jejich pozorování index dobře ukazuje nejen části úseku se zhoršenou kvalitou, ale i ojedinělé závady.

Porovnání směrodatné odchylky a TQI ukázalo, že v případě VK se jejich průběh téměř shoduje. Zatímco u ZK směrodatná odchylka vykazuje v přechodnicích falešné chyby, TQI naproti tomu téměř žádné chyby nevykazuje. Navrhovaný index je však náchylný k přehlédnutí vad podobného typu. [22]

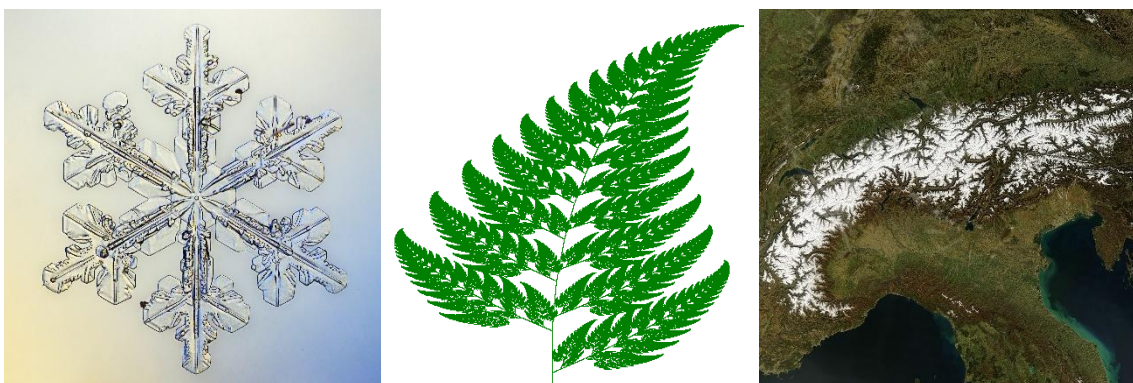
## 2.4.4. FRAKTÁLNÍ DIMENZE (FD)

Fraktální analýza se používá k charakterizování nepravidelných vzorů a ke kvantifikaci vzorů, které jsou zdánlivě chaotické a náhodné. [26] „Fraktální objekt“ či „fraktál“ jsou termíny vytvořené Benoîtem B. Mandelbrotem z latinského slova „fractus“, které znamená rozlámaný nebo rozbitý. [27] Fraktály jsou útvary, jejichž povrch je drsný a tvar je velmi složitý bez ohledu na to, z jaké blízkosti se na ně koukáme. Ideální fraktály (např. Kochova vločka, Scierpińského trojúhelník a koberec, Mandelbrotova a Juliova množina aj.) jsou soběpodobné, tj. jejich libovolná část je tvořena jedním tvarem, který se v nich opakuje donekonečna viz Obr. 2.24.



Obr. 2.24 – Fraktály (Kochova vločka [28], Scierpińského koberec [29] a Juliova množina [30])

Fraktály se velmi často vyskytují také v přírodě (např. mraky, stromy, hory, sněhové vločky, galaxie atd.). Jejich tvar je nepravidelný vlivem náhody a oni tak nejsou dokonale soběpodobné, jak je vidět na Obr. 2.25.



Obr. 2.25 – Fraktály v přírodě (sněhová vločka [31], kapradina [32], pohoří Alpy [33])

## Fraktální dimenze

Fraktální dimenze vzoru závisí na stupni „hrubosti“ (drsnosti) a má jinou hodnotu pro každý druh vzoru. GPK vykazují nepravidelné a hrubé charakteristiky. [26]

Na rozdíl od obvyklých dimenzí v Euklidovské geometrii, které jsou celočíselné, může být fraktální dimenze zlomkem např.  $1/2$  nebo  $5/3$ , racionálním a dokonce i iracionálním číslem např.  $\pi$ . Můžeme tedy o některých velmi nepravidelných a rovinných křivkách tvrdit, že jejich fraktální dimenze je mezi 1 a 2, o některých velmi „zmačkaných a poskládaných“ plochách, že se jejich fraktální dimenze nachází mezi 2 a 3, a nakonec definovat prach na přímce, jehož fraktální dimenze je mezi 0 a 1. [27] Existuje mnoho metod, jak vypočítat fraktální dimenzi. [26]

Fraktální dimenze se dá spočítat analyticky např. pro Kochovu vložku, která je na Obr. 2.24 vlevo, kde jednu úsečku nahradíme úsečkami zmenšenými v měřítku  $\varepsilon = 1/3$ . Délka nově přidaných úseček je  $N = 4$ . Fraktální dimenzi tedy spočítáme podle rovnice:

$$\log_{\varepsilon} N = -D = \frac{\log N}{\log \varepsilon} \quad (2.5)$$

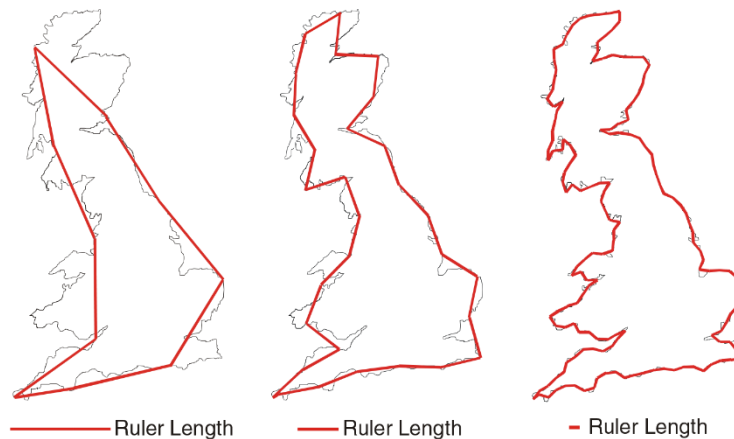
Výsledná fraktální dimenze Kochovy vložky je  $D = 1,26185$ .

Pokud neznáme přesný vztah mezi délkou nově přidaného tvaru a změnou jeho měřítka, musíme použít některou z metod pro odhad fraktální dimenze.

V přírodě se často vyskytují i tzv. multifraktály, jejichž tvar se při různém přiblížení liší, a tudíž je nemůžeme popsat jednou fraktální dimenzí, ale potřebujeme celé spektrum.

## Obvodová metoda

Je založená na empirických studiích obrysu pobřeží a používá se pro kvantifikaci křivek, jejichž fraktální dimenze je mezi 1 a 2. Příklad použití této rovnice je měření délky pobřeží Velké Británie viz Obr. 2.26. Aby se zjistila tato délka, je nutné proložit křivku pobřeží řadou stejně dlouhých úseček (pravítek), které se vzájemně dotýkají. Délka pobřeží se získá jednoduše vynásobením počtu pravítek jejich délkou. Čím menší je délka pravítka, tím je výsledná délka pobřeží přesnější, ale zároveň i delší. Se stále zmenšující se délkou pravítka se délka pobřeží může teoreticky zvětšovat až do nekonečna. [26]



Obr. 2.26 – Měření délky pobřeží Velké Británie s různými délkami pravítka [26]

Fraktální dimenze vyjadřuje poměr mezi délkou křivky a počtem pravítek nutných ke změření délky křivky. Spočítá se podle rovnice:

$$L(\lambda) = N \cdot \lambda^{1-D} \quad (2.6)$$

kde  $L(\lambda)$  je celková délka křivky jako funkce  $\lambda$ ,

$\lambda$  je délka jedné části (pravítka),

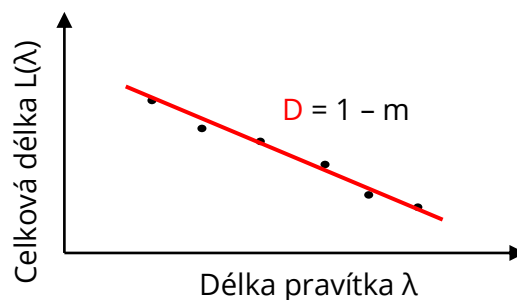
$N$  je počet dělení (pravítek),

$D$  je fraktální dimenze.

Vynesení naměřené délky a počtu pravítek do grafu s logaritmickými osami se nazývá **Richardsonův graf** viz Obr. 2.27. Rovnice pro výpočet FD je:

$$D = 1 - m \quad (2.7)$$

kde  $m$  je sklon regresní přímky skrz vynesené body v grafu. [14]



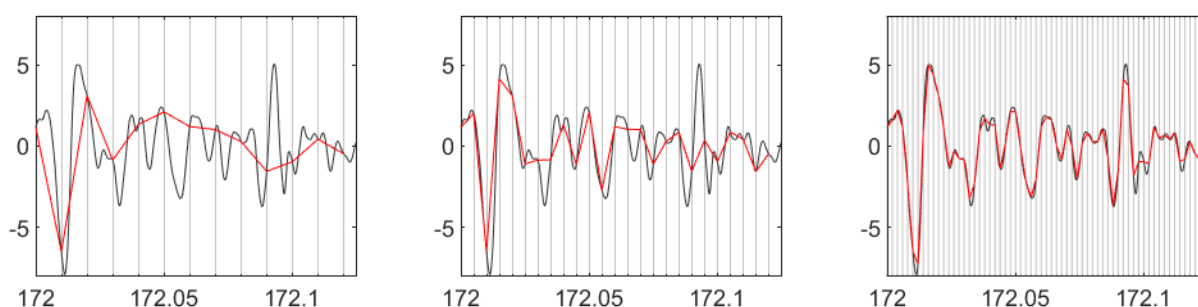
Obr. 2.27 – Richardsonův graf

Sklon regresních křivek udává drsnost signálu a také vliv různých vlnových délek. Panuje hypotéza, že vysoká hodnota FD (velký sklon regresní přímky) indikuje problémy v kolejovém loži, ve spodku nebo v obojím. Vyšší sklon v rozmezí dlouhých vln (25–70 m)

indikuje problémy v železničním spodku, zatímco vyšší sklon v pásmu 3–25 m by měl indikovat problémy v kolejovém loži. [14]

### Zjednodušená obvodová metoda

Na rozdíl od klasické obvodové metody, používá kroky (pravítka) konstantní délky na ose x. S tím, jak se délka kroků na ose x zmenšuje, délka křivky roste a výsledná křivka je více a více podobá té původní. Výsledky zjednodušené a klasické obvodové metody jsou pro GPK téměř stejné. Většina výzkumníků [14][26][34] využívá zjednodušenou metodu, protože je výpočetně méně náročná, a tedy i rychlejší.



Obr. 2.28 – Znázornění principu zjednodušené obvodové metody

Typický průběh v Richardsonově grafu GPK je složený ze dvou [26] až ze tří přímk [14], takže má tzv. multifraktální průběh. Délka křivky měřená dlouhými kroky je ovlivněná celkovým tvarem křivky (dlouhé vlnové délky), zatímco délka měřená krátkými kroky je ovlivněná jemnou texturou křivky (krátké vlnové délky). Tím pádem v závislosti na velikosti změny délky kroků, se jednotlivé aspekty nebo „měřítka“ křivky buď ukážou, nebo už nejsou viditelné. [26]

### 2.4.5. VÝKONOVÁ SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA (PSD)

Popisuje, jak je výkon signálu rozložen v závislosti na frekvenci. U abstraktních signálů je výkon ztotožňován s druhou mocninou signálu. Statistickí studují rozptyl funkce, který je zvykem označovat jako výkonové spektrum, i když se nejedná o fyzikální výkon. Plocha pod PSD má blízkou spojitost s energií, která působí na vlak jedoucí po nerovné koleji. PSD se mimo hodnocení kvality geometrie koleje používá také jako vstup do dynamických modelů pro analýzu odezvy vozidla. [35]

Protože pracujeme s daty měřenými po délce koleje, používá se tzv. délková frekvence (vlnové číslo). PSD získáme z druhé mocniny Fourierovy transformace signálu.

Aby byly výsledky reprezentativní, měla by se PSD počítat na segmentu s co největší délkou, ideálně aspoň 10násobek nejdelší vlnové délky v hodnoceném signálu, abychom dlouhou vlnu vůbec zachytili. To znamená, že pro vlnové pásmo D1 bychom potřebovali segment délky 250 m respektive 700 m pro pásmo D2. Tímto postupem získáme pouze odhad výkonové spektrální hustoty, kterému se říká **Periodogram**.

S pomocí PSD můžeme odhalit vlnové délky závad přítomných v koleji. PSD je také velmi dobrá pro detekci závad, které se cyklicky opakují jako např. nekvalitní svary. [23] Značnou nevýhodou je však složitá interpretace PSD oproti běžným statistickým veličinám. [36]

### Postup výpočtu a odvození

Oboustranné spektrum PSD je dáno rovnicí:

$$S_x = \int_{-\infty}^{\infty} |F(k)|^2 dk \quad (2.8)$$

kde  $F(k)$  je Fourierova transformace spojitého tvaru vlny,

$k$  je vlnové číslo (počet vlnových délek připadajících na jednotku délky).

Oboustranné spektrum rozděluje energii rovnoměrně mezi kladné a záporné frekvence. V praxi chceme pouze jednostranné spektrum, protože fyzicky nás zajímají jen kladné frekvence. Abychom zachovali stejnou celkovou energii, musíme vzít energii ze záporného spektra a „přičíst“ ji k energii z kladného. To se dělá tak, že hodnoty PSD v kladných frekvencích vynásobíme 2. To se netýká 0 a Nyquistovy frekvence (polovina vzorkovací frekvence), které nemají záporný protějšek, a tudíž se nenásobí. [36]

Fourierova transformace z prostorové domény do domény založené na vlnových číslech je dána rovnicí:

$$F(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot e^{-j2\pi kx} dx \quad (2.9)$$

kde  $f(x)$  je spojitá funkce v prostorové doméně,

$k$  je vlnové číslo, dané vztahem  $k = 1/\lambda$ , kde  $\lambda$  je vlnová délka,

$x$  je vzdálenost.

S pomocí tohoto vztahu dostaneme inverzní Fourierovu transformaci:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(k) \cdot e^{j2\pi kx} dk \quad (2.10)$$

Podle Parsevalova teorému je integrace (suma) druhé mocniny funkce rovna integraci (sumě) druhé mocniny její transformace, což ilustruje rovnice: [36]

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)^2 dx = \int_{-\infty}^{\infty} F(k)^2 dk \quad (2.11)$$

Druhé mocnině Fourierovy transformace se také říká Výkonová spektrální hustota, která vyjadřuje hustotu energie signálu v daném vlnovém pásmu. Jednotkou PSD je energie na vlnové číslo (délkovou frekvenci). [36]

### Vzájemný vztah PSD a SD

Rozptyl spojitě prostorové domény se získá jako druhá mocnina odchylek od střední hodnoty, která je dána vztahem:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |f(x) - f_{mean}|^2 dx \quad (2.12)$$

To znamená, že pro prostorový průběh s nulovou střední hodnotou bude rozptyl roven výkonu v časové oblasti, a tedy i výkonové spektrální hustotě. Definujeme-li rozptyl jako druhou mocninu směrodatné odchylky, dostaneme vztah mezi SD a PSD: [36]

$$SD = \sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |F(k)|^2 dk} \quad (2.13)$$

Tudíž platí, že **směrodatná odchylka** stacionárního náhodného průběhu je rovna **druhé odmocnině plochy** pod výkonovou spektrální hustotou. [36] PSD na rozdíl od SD poskytuje možnost hodnocení vlivu jednotlivých frekvencí, díky čemuž můžeme např. hledat cyklické závady nebo porovnávat měřící prostředky mezi sebou.

## 2.4.6. ÚROVNĚ HODNOCENÍ KVALITY GEOMETRIE KOLEJE

Analýza kvality geometrie koleje se provádí pro různé účely. Podle toho můžeme zvolit odpovídající druh analýzy a klasifikace výsledků. Běžně se rozlišují tři úrovně hodnocení geometrie koleje: [23]

- **Podrobná** úroveň je ideální pro účely plánování lokálních oprav, krátkodobé údržby a dopravních omezení. Tento druh analýzy může být také užitečný pro konstruktéry vozidel a studie vztahu mezi vozidlem a kolejí;
- **Střední** úroveň se používá pro střednědobé plánování údržby a obnovy. Její poznatky mohou být užitečné i pro konstruktéry vozidel.

- **Obecná** úroveň slouží pro strategická rozhodnutí. Pracuje s velkým množstvím dat, která jsou shrnuta do několika málo indikátorů, díky nimž můžeme zhodnotit stav části nebo celé železniční sítě. Tento druh analýzy se používá pro dlouhodobá rozhodnutí správců infrastruktury a dopravců.

Hodnocení lokálních závad je nejvhodnější pro podrobnou analýzu. Směrodatné odchylky jsou naproti tomu nejčastěji používané pro hodnocení geometrie koleje na střední a obecné úrovni. [23]

## 2.5. KORELAČNÍ ANALÝZA

### 2.5.1. VZÁJEMNÁ KORELACE

Vzájemná korelace (*Cross-Correlation*) popisuje míru podobnosti dvou signálů jakožto funkce posunu jednoho signálu vůči druhému. Běžně se používá pro vyhledávání kratšího známého vzoru uvnitř dlouhého signálu. Vzájemná korelace se v zásadě podobá konvoluci dvou funkcí. Její speciální aplikací je tzv. **autokorelace**, což je vzájemná korelace signálu se sebou samým. [37]

Vzájemná korelace spojitých funkcí  $f$  a  $g$  je definována rovnicí: [37]

$$(f * g)(\tau) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} \overline{f(t)} g(t + \tau) dt \quad (2.14)$$

kde  $\overline{f(t)}$  je komplexně sdružené číslo  $f(t)$  a

$\tau$  je posun či zpoždění.

Maximální vzájemná korelace funkcí  $f$  a  $g$  nastane pro funkci  $f$  v čase  $t$ , zatímco pro funkci  $g$  nastane v čase  $t + \tau$ , díky čemuž můžeme říct, že je  $g$  zpožděná za  $f$  o  $\tau$ . [37]

Vzájemná korelace diskrétních funkcí je definována podle rovnice: [37]

$$(f * g)(n) \triangleq \sum_{m=-\infty}^{\infty} \overline{f(m)} g(m + n) \quad (2.15)$$

Funkce vzájemné korelace procesů, jež mají střední hodnotu a rozptyl, je dána vztahem: [37]

$$R_{XY}(\tau) \triangleq E[X_t \overline{Y_{t+\tau}}] \quad (2.16)$$

kde  $E$  je operátor střední hodnoty.

Odečtením střední hodnoty před vynásobením získáme vzájemnou kovarianci: [37]

$$K_{XY}(\tau) \triangleq E[(X_t - \mu_X)(\overline{Y_{t+\tau} - \mu_Y})] \quad (2.17)$$

kde  $X_t$  je stochastický proces,

$\mu_X$  je střední hodnota a

$\sigma_X$  je směrodatná odchylka.

## 2.5.2. PEARSONŮV KORELAČNÍ KOEFICIENT

Je to korelační koeficient, který měří lineární vztah mezi dvěma řadami. Jedná se o normalizovanou hodnotu kovariance. Může nabývat hodnot od  $-1$  do  $1$ . Čím větší je absolutní hodnota korelačního koeficientu, tím těsnější je lineární vztah veličin a tím více se jejich statistická závislost blíží funkční přímkové závislosti. Přitom pro hodnotu  $1$  jde o funkční závislost, jejímž grafem je přímka s kladnou závislostí (přímá úměra) a pro hodnotu  $-1$  jde o přímku se zápornou směrnici (nepřímá úměra). Když se absolutní hodnota koeficientu zmenšuje, „uvolňuje se“ závislost mezi veličinami a při hodnotě  $0$  už závislost není lineární. Neznamená to ovšem nutně, že jsou veličiny statisticky nezávislé. Při hodnotě  $0$  se říká, že jsou nekorelované. [38]

Korelační koeficient dvou náhodných proměnných se spočítá podle rovnice: [39]

$$\rho(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( \frac{X_i - \mu_X}{\sigma_X} \right) \left( \frac{Y_i - \mu_Y}{\sigma_Y} \right) \quad (2.18)$$

kde  $\mu_X$  je střední hodnota  $X$  a

$\sigma_X$  je směrodatná odchylka  $X$ .

Alternativně můžeme korelační koeficient spočítat i pomocí kovariance: [39]

$$\rho(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (2.19)$$

## Testování hypotéz a statistická významnost

Abychom mohli statistickou analýzu použít pro vyvozování závěrů, musíme si ověřit, jestli námi testovaná hypotéza je statisticky významná. Nulová hypotéza označuje tvrzení, že mezi dvěma proměnnými neexistuje žádný rozdíl nebo vztah. Alternativní hypotéza je tvrzení, že mezi sledovanými proměnnými vztah nebo rozdíl existuje.

Hladina významnosti  $\alpha$  testu hypotézy je definována jako pravděpodobnost, že se dopustíme chyby prvního druhu, tj. zamítneme nulovou hypotézu, která je ale ve skutečnosti správná. Chyby druhého druhu se dopustíme, pokud přijmeme nulovou hypotézu, která je však ve skutečnosti nepravdivá. Přitom platí, že čím menší je

pravděpodobnost chyby prvního druhu, tím větší je pravděpodobnost chyby druhého druhu a naopak. [40] Hladina významnosti je obvykle 0,05 (5 %).

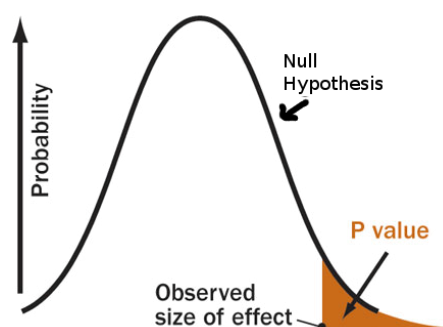
Možné závěry testování hypotéz: [40]

- Jestliže je nulová hypotéza zamítnuta, děláme závěr, že je alternativní hypotéza pravdivá.
- Jestliže nulová hypotéza není zamítnuta, děláme závěr, že nám data neposkytla dostatek podkladů k podpoře alternativní hypotézy.

Výsledek testu se považuje za **statisticky významný** na hladině významnosti  $\alpha$ , pokud se nám podaří zamítnout nulovou hypotézu. Pokud se nám nulovou hypotézu zamítnout nepodaří, výsledek testu není statisticky významný na hladině významnosti  $\alpha$ . [40]

### P-hodnota

Je-li P-hodnota větší než zvolená hladina významnosti, nulová hypotéza by měla být zamítnuta, ale je-li menší, nulovou hypotézu zamítnout nemůžeme. Je to tedy nejmenší hodnota hladiny významnosti, na které by nulová hypotéza měla být zamítnuta. P-hodnota se stanoví jako pravděpodobnost získání stejně extrémní nebo extrémnější testové statistiky (korelace) jako je ta právě pozorovaná. Testová statistika závisí na velikosti vzorku a vypočítaném korelačním koeficientu. [40]



Obr. 2.29 – P-hodnota a nulová hypotéza [41]

P-hodnota slouží pouze pro hodnocení statistické významnosti, ale nijak nevypovídá o síle samotné korelace. V praxi bývá P-hodnota bohužel často nesprávně interpretována. [42]

### **2.5.3. AUTOKORELACE**

Jedná se o zvláštní případ vzájemné korelace signálu s jeho zpožděnou kopií v závislosti na zpoždění. Autokorelace je vhodná pro hledání opakujících se vzorců, jako je přítomnost periodického signálu zakrytého šumem nebo hledání základní frekvence, kterou naznačují její harmonické frekvence. [43] Autokorelaci lze využít i pro výpočet PSD.

### 3. PŘEDMĚT A CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem disertační práce je lepší pochopení vývoje kvality geometrických parametrů koleje naměřených pomocí měřicího vozu pro železniční svršek.

Disertační práce si klade tyto dílčí cíle:

- Rešerše literatury o způsobech měření a zpracování signálu pro účely hodnocení kvality geometrie koleje
- Vyhodnocení kvality několika různých úseků tratí
- Porovnání veličin pro hodnocení kvality geometrie koleje (směrodatná odchylka, index kvality koleje, fraktální dimenze a lokální závady)
- Hledání souvislostí mezi průběhem jednotlivých veličin a GPK
- Porovnání vývoje veličin v čase a podle provozního zatížení
- Korelační analýza GPK a jednotlivých veličin
- Aplikace výkonové spektrální hustoty na získaná data z MVŽSv a ověření její použitelnosti pro účely hodnocení kvality geometrie koleje
- Doporučení pro hodnocení vývoje kvality geometrie koleje pro účely efektivnějšího plánování údržby a obnovy

## 4. POUŽITÉ METODY A POSTUPY

Tato kapitola popisuje jednotlivé metody a postupy, které byly použity v rámci disertace. Veškerá vyhodnocení i práce s daty probíhala od začátku disertačního výzkumu v programu MATLAB, jenž umožňuje efektivní práci s velkým množstvím dat a je velmi užitečný při opakované tvorbě grafů a jiných výstupů.

### 4.1. ZPRACOVÁNÍ DAT Z MĚŘICÍHO VOZU

V raných fázích disertačního výzkumu bylo rozhodnuto, že se bude dále pracovat pouze s daty z MVŽSv, a to kvůli jinému způsobu měření měřicího vozíku KRAB. Jeho hlavní nevýhodou je fakt, že GPK měří bez zatížení a tím pádem se některé závady neprojevují nebo se projevují s větším časovým odstupem, a proto nejsou naměřené hodnoty vypovídající o skutečném stavu koleje při průjezdu vlaku. Dále je nutné provádět pravidelná měření v provozovaných kolejích po velmi dlouhou dobu, aby byl získán dostatek dat pro hodnocení kvality geometrie koleje a sledování jejího vývoje v čase. Naproti tomu MVŽSv provádí měření až třikrát ročně a pro některé zkoumané úseky jsou k dispozici data od roku 2008 do současnosti.

#### 4.1.1. POPIS SLEDOVANÝCH ÚSEKŮ

Disertační práce pracuje s daty naměřenými MVŽSv v 6 traťových úsecích ze 3 různých železničních tratí, které jsou vyznačené v mapě na Obr. 4.1.

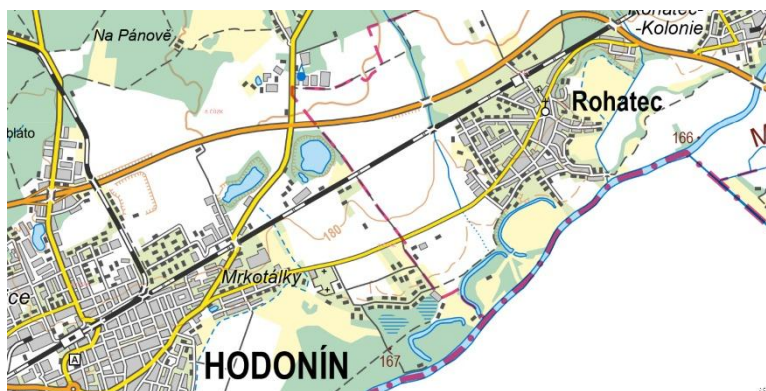


Obr. 4.1 – Mapa železniční sítě ČR s vyznačením sledovaných úseků [44]

Traťové úseky Hodonín – Rohatec a Brno – Blansko byly vybrány, protože byly již dříve zkoumány v rámci bakalářských a diplomových prací. Navíc se v obou případech jedná o silně zatíženou dvoukolejnou koridorovou trať se smíšenou dopravou. Úsek Dobšice – Chlumeck nad Cidlinou byl vybrán, protože se jedná o relativně hodně zatíženou jednokolejnou trať se smíšenou dopravou, která navíc dosud neprošla větší opravou.

### **Hodonín – Rohatec**

Jedná se o 5 km dlouhý úsek dvoukolejné celostátní trati č. 316A Přerov – Břeclav. Řešený úsek prošel rekonstrukcí v letech 1997 až 1998. Úsek leží jak v náspu, tak i v zářezu a po jeho délce se střídá drážní příkop a příkopový žlab UCB 0.



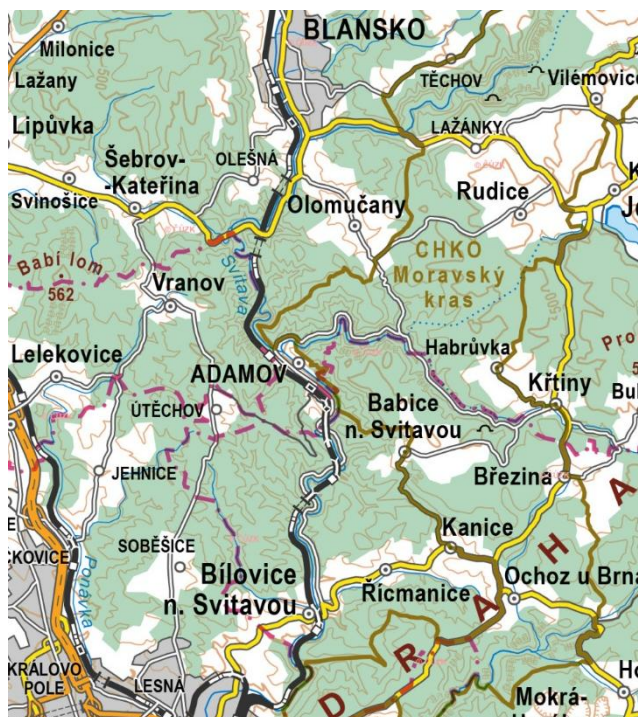
Obr. 4.2 – Mapa úseku Hodonín – Rohatec [45]

Traťová rychlost je  $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Minimální poloměr směrového oblouku je 10 000 m. Lze tedy konstatovat, že celý úsek je prakticky přímý. Sledovaný úsek je sklonově velmi příznivý s maximálním sklonem do 5 ‰. V celém úseku jsou kolejnice 60 E1 na pražcích B 91P z let 1997 a 1998. Provozní zatížení trati se pohybuje mezi 20 až 25 mil. hr. t/rok.

### **Brno-Maloměřice st. 6 – Adamov – Blansko**

Jedná se o 2 traťové úseky (délky 9 a 6,5 km) na dvoukolejné celostátní trati č. 326A Brno – Česká Třebová. Trať je typická oblouky s malými poloměry a velkým převýšením, pomocí nichž kličkuje úzkým údolím řeky Svitavy, které se nachází v CHKO Moravský kras. V řešeném úseku se nachází 9 tunelů a několik mostů. Traťová rychlost se pohybuje od 70 do  $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Minimální poloměr směrového oblouku je 261 m s převýšením 123 mm. Sledovaný úsek je sklonově velmi příznivý s maximálním sklonem do 6 ‰. Provozní zatížení trati se pohybuje mezi 20 až 25 mil. hr. t/rok.

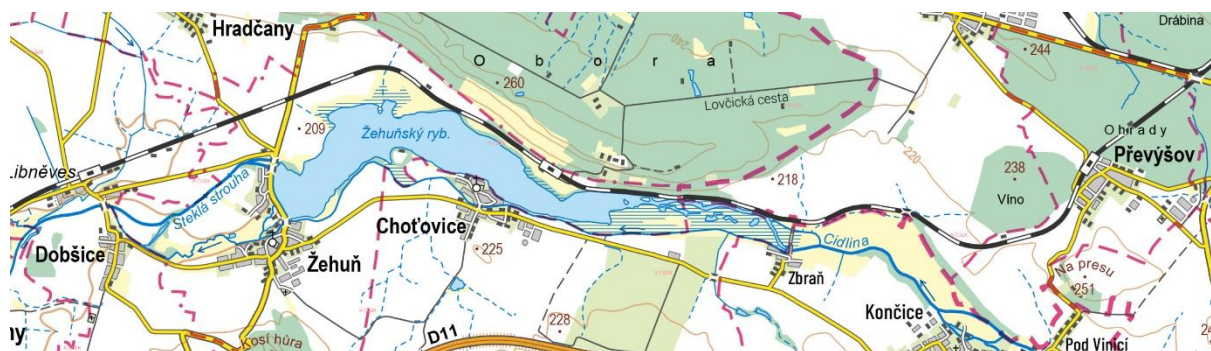
V roce 2021 prošla trať kompletní modernizací. V celém úseku jsou kolejnice 60 E1 na pražcích B 91S/1 z let 1996 až 1997. Až do modernizace, která proběhla v roce 2021, v úseku docházelo k četným výměnám pražců z důvodu výrobních vad, kvůli nimž se v nich tvořily podélné trhliny. Zároveň se zde pravidelně brousí a vyměňují kolejnice, kvůli nadměrnému ojíždění a vzniku skluzových vln. [46]



Obr. 4.3 – Mapa úseku Brno-Maloměřice st.6 – Blansko [47]

### **Dobšice nad Cidlinou – Choťovice – Převýšov – Chlumec nad Cidlinou**

Jedná se o 3 traťové úseky (délky 3,7; 5,5 a 3,2 km) na jednokolejné celostátní trati č. 505A Velký osek – Týniště nad Orlicí. Část trati leží na břehu Žehuňského rybníka. Traťová rychlost je 80 až 100 km·h<sup>-1</sup>. Minimální poloměr směrového oblouku je 353 m s převýšením 125 mm. Sledovaný úsek je sklonově příznivý s maximálním sklonem 12 ‰.



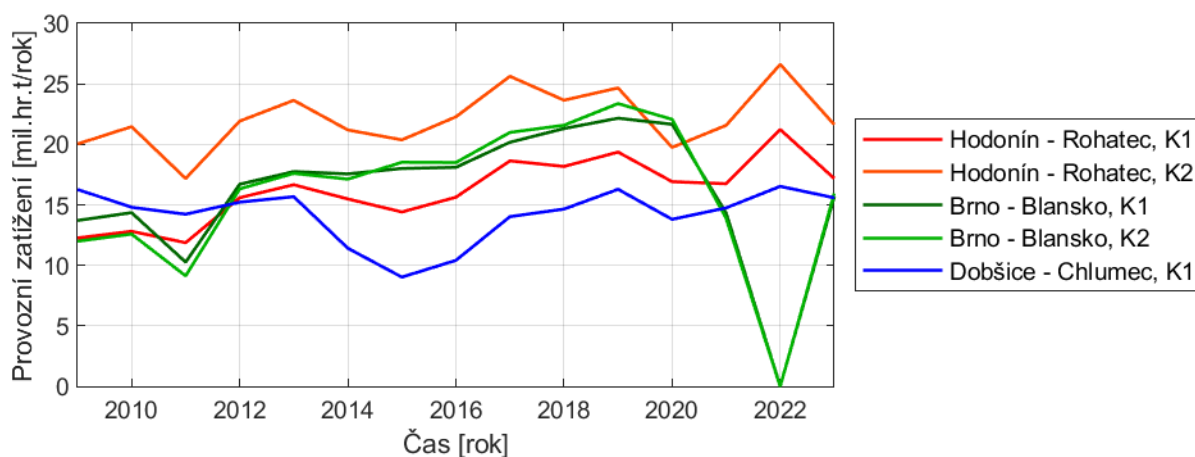
Obr. 4.4 – Mapa úseku Dobšice nad Cidlinou – Chlumec nad Cidlinou [47]

V celém úseku jsou kolejnice 60 E2 na pražcích B 91S/1 z roku 2015. V budoucnu má proběhnout modernizace trati, při níž má dojít k jejímu zdvoukolejnění a ke zvýšení traťové rychlosti až na 160 km·h<sup>-1</sup>. Provozní zatížení se pohybuje kolem 16 mil. hr. t/rok.

#### 4.1.2. PROVOZNÍ ZATÍŽENÍ

Provozní (dopravní) zatížení trati je velmi důležitý parametr při sledování vývoje kvality geometrie koleje, protože ovlivňuje rychlost degradace. Proto byly od Správy železnic získány hodnoty provozního zatížení v letech 2009 až 2023, které byly vyneseny do grafu na Obr. 4.5. Bohužel nejsou k dispozici hodnoty zatížení přímo v čase měření MVŽSv. V současné době se hodnoty archivují pouze jednou ročně.

Na Obr. 4.5 lze vidět značný rozdíl v provozním zatížení kolejí (20 až 40 %) v úseku Hodonín – Rohatec, jenž lze vysvětlit vyšší hmotností nákladních vlaků směřujících z Polska a ČR do Rakouska, které jezdí v opačném směru méně naložené nebo prázdné. V grafu je rovněž zachycen pokles provozního zatížení v úseku Brno – Blansko v důsledku modernizace v roce 2022. U všech tří tratí můžeme pozorovat zřetelný pokles zatížení během pandemie v letech 2020 a 2021.



Obr. 4.5 – Provozní zatížení vybraných tratí v období 2009–2023

#### 4.1.3. ČTENÍ DAT S RŮZNÝMI FORMÁTY

Veškerá data z měřicího vozu byla získána od Centra techniky a diagnostiky (CTD) Správy železnic. V rámci zpracování byla data nejdříve převedena do souborů ve formátu CSV s jednotlivými měřeními. Pro větší přehlednost a vyšší výkon byla data načtena ve formě tabulky, kde jsou na rozdíl od obyčejné matice jednotlivé sloupce pojmenovány

přímo podle názvů parametrů. Aby nemusela být data při každém hodnocení načítána z několika různých souborů, byly uloženy do bitových souborů s příponou MAT.

## 1. řada dat ve formátu TXT (2009–2018)

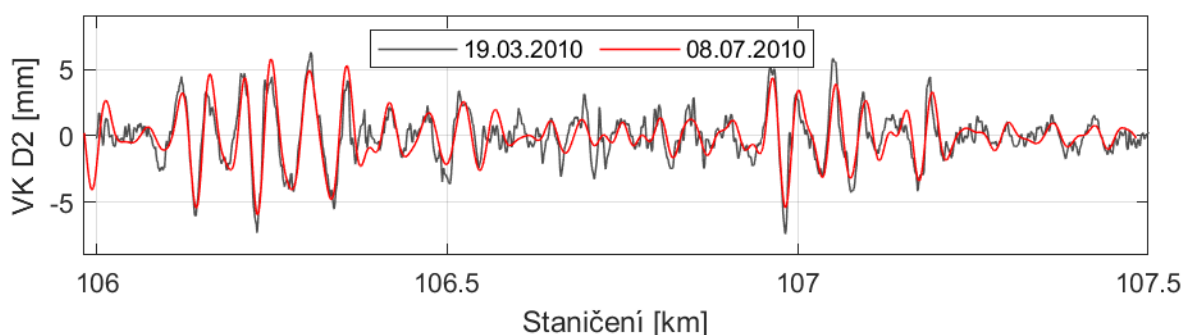
Naměřená data z let 2009 až 2018 zahrnují GPK ve formátu TXT měřené po 25 cm spolu s doprovodnými soubory ve formátech DAT a VPS, které obsahují informace o provedených opravách staničení v průběhu měření a vyhodnocené známky kvality (ZKV).

Při čtení dat z různých měření bylo zjištěno, že se v půlce roku 2010 změnil jejich formát v souvislosti s nasazením nového MVŽSv od italské firmy Mermec. Avšak až od začátku roku 2011 se změnil i názvy některých parametrů v souboru TXT viz Tab. 4.1. Došlo k rozdělení směru koleje (SK\_D1) na směr levého (SL\_D1) a pravého kolejnicového pásu (SP\_D1). RK začal být měřen ve vlnovém pásmu od 1 m místo od 3 m.

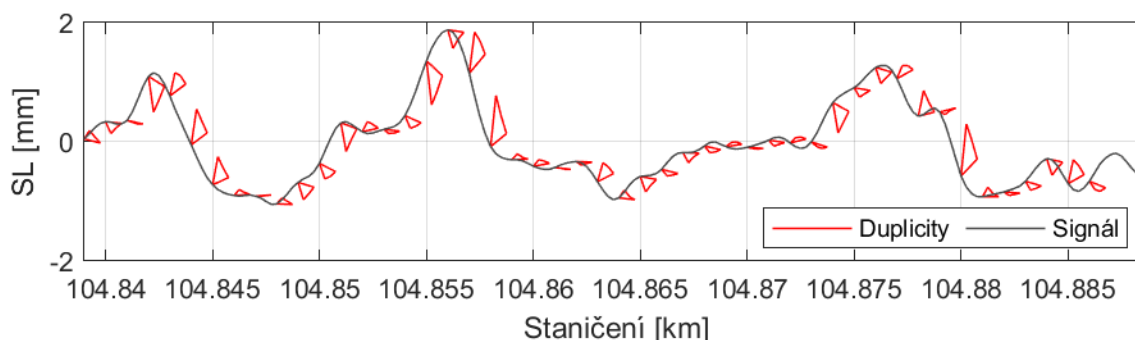
KM.M	RK3-i	RYCH	SK_D1	S1-70	K70-i	PKcel	ZKS_%	ZKS_b	V1-70	VL_D1	VP_D1	
KM.M	RK1-i	RYCH	SL_D1	SP_D1	SK_D2	K70-i	PKcel	ZKS_%	ZKS_b	VK_D2	VL_D1	VP_D1

Tab. 4.1 – Názvy sloupců v souboru TXT do roku 2010 a po něm

Na Obr. 4.6 můžeme vidět změnu filtrace signálu SK a VK ve vlnovém pásmu D2 (červená), které se dříve filtrovaly od 1 do 70 m (černá), tj. jako by se měřila pásma D0, D1 a D2 dohromady. Změna parametrů byla provedena kvůli uvedení do souladu s ČSN 73 6360-2 [15].



Obr. 4.6 – Změna filtrace u dlouhovlnné VK, Hodonín – Rohatec, K1, 2010



Obr. 4.7 – Ukázka duplicitních hodnot, Hodonín – Rohatec, K1, 2010

Při vyhodnocení dat ze souborů ve formátu TXT bylo zjištěno, že některá měření obsahují velké množství duplicitních řádků se staničením posunutým o 1 m viz Obr. 4.7. Do čtecího skriptu tedy muselo být doplněno jejich mazání. Nejvyšší počet duplicitních řádků obsahovala měření z léta a podzimu roku 2010 a to kolem 22–23 tisíc. Tyto chyby byly nejspíše vytvořeny při exportu z tehdejší databáze CTD.

## 2. řada dat ve formátu XLSX (2014–2020)

Všechna naměřená data z let 2014 až 2020 byla uložena do jednoho velkého souboru ve formátu XLSX. Na prvním listě je popis vybraného úseku trati a měření, jež byla exportována z databáze CTD. Na druhém listu je seznam měření spolu se sloupcem, kam je možné zadat ruční opravu jejich staničení.

Ostatní listy tvoří data z jednotlivých měření. Kromě GPK jsou zde i data z měření příčného profilu kolejnic (ojetí) a informace o poloze měřeného bodu ve formě GCS souřadnic. Všechny GPK mají v tabulce hodnoty po 1 m i po 25 cm, s výjimkou SK D2 a VK D2, které mají hodnoty pouze po 1 m. Například RK má v tabulce sloupce RK\_1, RK\_2, RK\_3 a RK\_0, jež obsahují hodnoty po 25 cm, a sloupec RK s hodnotami po 1 m. Na konci léta roku 2020 došlo ke změně pořadí sloupců s hodnotami po 25 cm z 1-2-3-0 na 0-1-2-3 kvůli větší pochopitelnosti, jak zjistila Ing. Nejezchlebová ve své diplomové práci [34].

## 3. řada dat ve formátu XLSX (2014–2024)

Všechna naměřená data z let 2014 až 2024 byla uložena opět do jednoho velkého souboru ve formátu XLSX. Jednotlivé listy však obsahují pouze sloupce s vyžádanými GPK, které jsou v řádcích po 25 cm. Kvazistatická křivost, SK D2 a VK D2 jsou zjevně vyhodnocovány pouze po 1 m, protože mají vždy 4 po sobě jdoucí hodnoty stejné. Pro účely hodnocení byly čteny pouze hodnoty po 1 m.

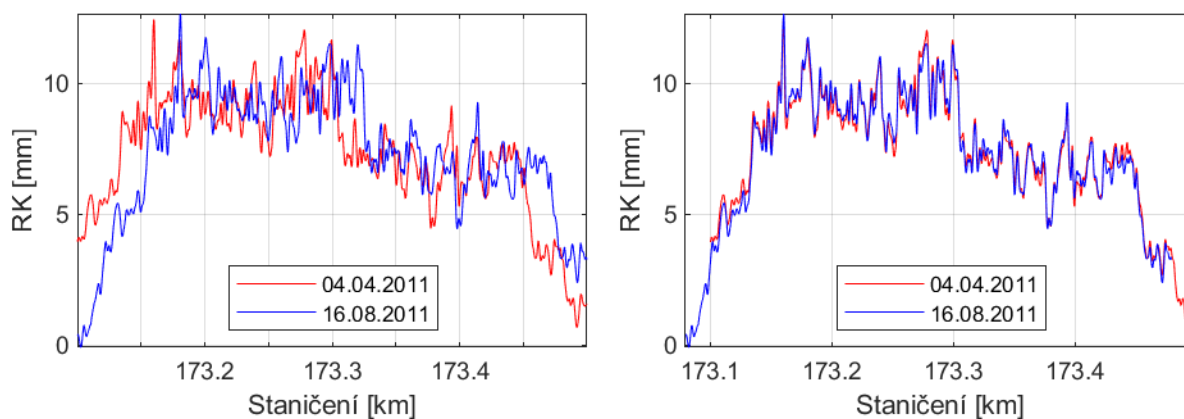
## 4. řada dat ve formátu XLSM (2008–2014)

Data z let 2008 až 2014 byla získána od CTD. Všechna naměřená data jsou v téměř stejném formátu jako 2. řada dat. Všechna jsou v jednom velkém souboru ve formátu XLSM. Od čtvrtého listu jsou jednotlivá měření GPK, která jsou uspořádaná v řádcích po 25 cm, stejně jako u souborů 3. řady dat. Vzhledem k tomu, že se až do roku 2010 měřil pouze SK D1, jsou hodnoty ve sloupcích SL a SP ve starších měřeních prázdné. Exportovány byly totiž pouze některé sloupce. Stejně jako u 3. řady dat jsou 4 po sobě jdoucí hodnoty parametrů KR KS, SK D2 a VK D2 stejné.

### 4.1.4. OPRAVA STANIČENÍ POMOCÍ KORELACE

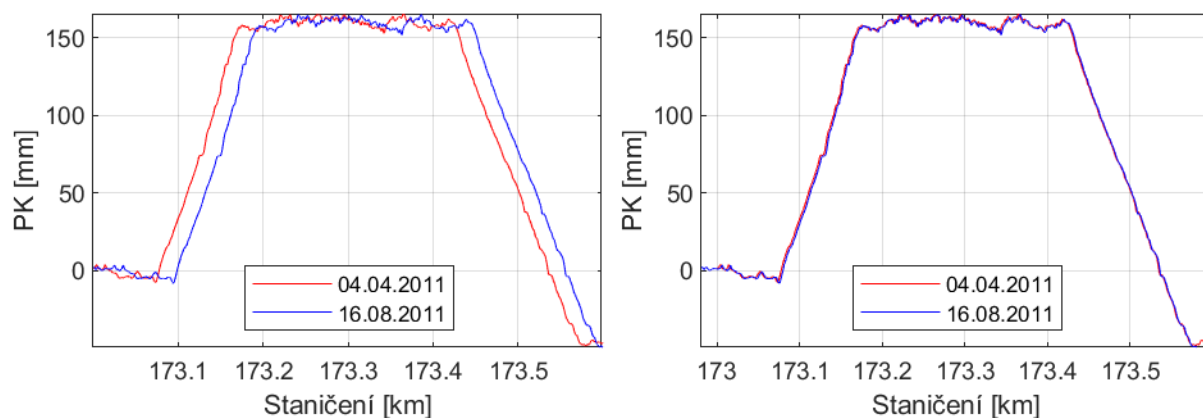
Oprava staničení jednotlivých měření byla prováděna pomocí funkce *alignsignals*, která odhaduje zpoždění mezi dvěma signály pomocí vzájemné korelace. Získané zpoždění je třeba ještě opravit rozdílem počátečního staničení z obou měření, které se téměř vždy trochu liší. Funkce *alignsignals* se ukázala jako přesnější než obyčejná funkce pro vzájemnou korelaci *xcorr*, nejspíš protože je lépe optimalizovaná pro zpracování signálů. Funkce *alignsignals* však funguje pouze, existuje-li mezi dvěma signály statisticky významná korelace. Je-li tedy úsek příliš krátký nebo data příliš odlišná, k žádné opravě staničení nedojde.

Jako nejlepší parametr pro hledání posunu staničení mezi měřeními se ukázal být RK, který se ale může měnit vlivem broušení či výměny kolejnic. Jako dobrý kandidát se zpočátku jeví i PK, které však nelze využít pro přímé úseky jako Hodonín – Rohatec. Prověřována byla i KR KS, ale její použití je problematické, protože je měřena po 1 m, a navíc se v průběhu času mění vlivem podbíjení a změn filtrace při zpracování signálu.



Obr. 4.8 – RK bez opravy (vlevo) a s opravou staničení (vpravo), Adamov – Blansko, K1

Na Obr. 4.8 můžeme vidět RK ze dvou měření z traťového úseku Adamov – Blansko, kde je řada oblouků malých poloměrů, v nichž se RK mění sice poměrně rychle, ale výrazné vrcholy zůstávají na stejném místě. Problém však nastává při modernizaci, která byla provedena v roce 2022, kdy se signál výrazně změnil.



Obr. 4.9 – PK bez opravy (vlevo) a s opravou staničení (vpravo), Adamov – Blansko, K1

Výsledkem korelační analýzy je, že neexistuje žádný automatický způsob opravy staničení, který by fungoval vždy a všude. U některých úseků je lepší použít převýšení, jinde zase rozchod koleje. I tak ale zůstává problém, že úsek může projít celkovou obnovou a oprava pomocí vzájemné korelace tím pádem nefunguje. Čím kratší je navíc řešený úsek, tím menší přesnost má vzájemná korelace signálů. Nakonec ještě celou situaci komplikuje fakt, že posun nemusí být jednotný ani po celé délce traťového úseku, k čemuž dochází vlivem nepřesnosti měření délky při jízdě měřicího zařízení. Naštěstí v posledních letech došlo k výraznému zvýšení přesnosti staničení, a to díky algoritmu pro detekci výhybek a porovnávání GCS souřadnic měřených bodů.

## 4.2. HODNOCENÍ KVALITY GEOMETRIE KOLEJE

Pro vyhodnocení byly použity již dříve vytvořené binární soubory s příponou MAT, ve kterých byly uloženy jednotlivé proměnné a matice s hodnotami naměřených GPK až po údaje o traťovém úseku.

Pro výpočet veličin pro hodnocení kvality geometrie koleje (SD, TQI, FD a ID) byly vytvořeny samostatné funkce, do nichž se formou argumentů vloží tabulka s hodnotami staničení a GPK, počáteční staničení a délka segmentu koleje, číslo měření a název parametru. U parametrů se vzorkovací frekvencí 1 m (SK D2, VK D2 a KR KS) musí být

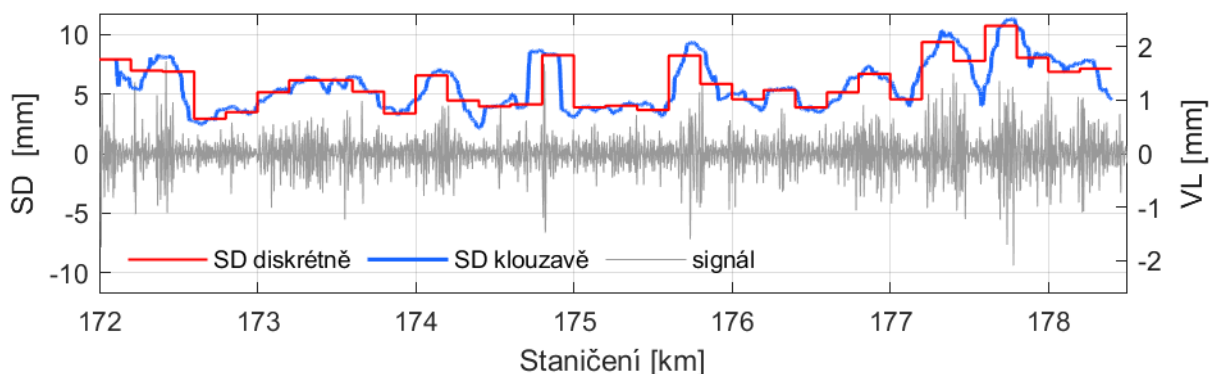
upraven vektor staničení tak, aby měl stejný počet hodnot jako zvolený parametr. Následně se z vektoru s hodnotami parametru vyberou pouze řádky odpovídající staničení vybraného úseku. Kód v programu MATLAB je uveden v příloze B.

Funkce pro výpočet jednotlivých veličin byly poté aplikovány na získaná data pro účely hodnocení jejich průběhu po délce koleje a vývoje v čase. Toto zkoumání probíhalo zejména s pomocí různých 2D i 3D grafů.

## 4.2.1. PŘÍSTUPY PRO HODNOCENÍ

### Diskrétní vs. klouzavá metoda

Jak už bylo napsáno na začátku podkapitoly 2.4, máme dvě metody výpočtu veličin pro hodnocení kvality geometrie koleje, a to diskrétní a klouzavou. Diskrétní metoda spočívá ve výpočtu pro každý hodnotící segment koleje zvlášť. Tato metoda je vhodná pro posouzení, jestli daný segment vyžaduje opravu či ne. U klouzavé metody se výpočet provádí v každém měřeném místě a výsledný graf tak více kopíruje hodnocený signál.

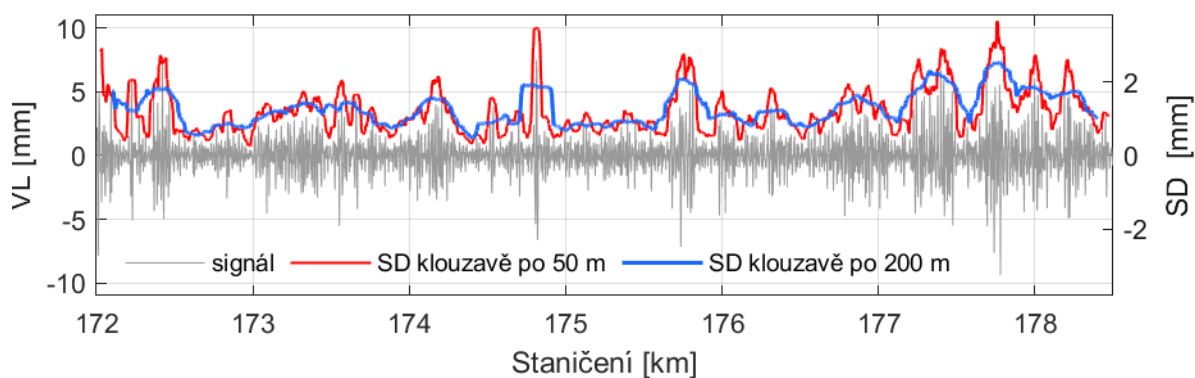


Obr. 4.10 – Srovnání diskretní a klouzavé metody hodnocení kvality pomocí SD

Z Obr. 4.10 je patrné, že klouzavá metoda je vhodnější pro detailní posouzení kvality zvoleného úseku, protože lépe zachycuje lokální závady. Oproti tomu diskretní metoda jednodušeji posuzuje celkovou kvalitu hodnoceného segmentu, ale zase je náchylná na výkyvy vlivem lokálních závad na okrajích segmentů, jak je vidět na Obr. 4.10 v km 174,8. Při používání diskretní metody je tedy důležité, aby byla nepřesnost v určení staničení měřících bodů co nejvyšší, jinak může dojít k přesunu lokální závady z jednoho segmentu do druhého. Alternativou je použití klouzavé metody, která nemá polohu segmentů pevně danou a tím pádem nám drobné chyby v určení staničení nevadí.

## Vliv délky hodnotících segmentů

Na začátku podkapitoly 2.4 bylo také uvedeno, že větší délka hodnotících segmentů rozmazává vliv lokálních závad, ale umožňuje jednodušší hodnocení stavu trati. Kratší délka zvyšuje citlivost na lokální závady, čímž dochází rovněž ke zvyšování extrémních hodnot, což je dobře vidět na Obr. 4.11, kde je porovnání délky 50 a 200 m.



Obr. 4.11 – Vliv různé délky segmentu na hodnocení kvality geometrie koleje

Délka hodnotícího segmentu by měla odpovídat rychlosti, protože tratě s nižší rychlostí mají většinou častější změny směrových poměrů. Důležitá je ale také strategie údržby, ve které si délku segmentu nastavujeme. Kratší délka znamená, nižší náklady na opravu kvalitních úseků, ale zároveň zvětšující se rozdíly v kvalitě geometrie jednotlivých segmentů trati. Nejčastěji používaná délka hodnotícího segmentu je 200 m [8][19][22].

## Lineární regrese a údržbové zásahy

V rámci hodnocení vývoje geometrie koleje v čase byla použita lineární regrese metodou nejmenších čtverců. K tomu byly využity vestavěné funkce *Polyfit* pro výpočet regresních parametrů přímkové funkce a *Polyval* pro výpočet hodnot pro vykreslení lineární regrese do grafu.

Lineární regrese byla prováděna skrz hodnoty dané veličiny mezi opravnými zásahy, které byly určeny buď na základě informací od správce trati nebo na základě algoritické detekce dle náhlého poklesu veličiny, jenž indikuje zlepšení kvality geometrie koleje. Informace o provedených podbitích se však podařilo získat pouze pro traťový úsek Hodonín – Rohatec v období 2009 až 2018.

#### 4.2.2. LOKÁLNÍ ZÁVADY (ID)

Pro výpočet počtu lokálních závad byla vytvořena samostatná funkce *ID*, jejíž zdrojový kód je uveden v příloze B.1.1. Tato funkce počítá hodnoty vybraného parametru, které přesahují zvolenou hladinu mezních odchylek.

#### 4.2.3. SMĚRODATNÁ ODCHYLKA (SD)

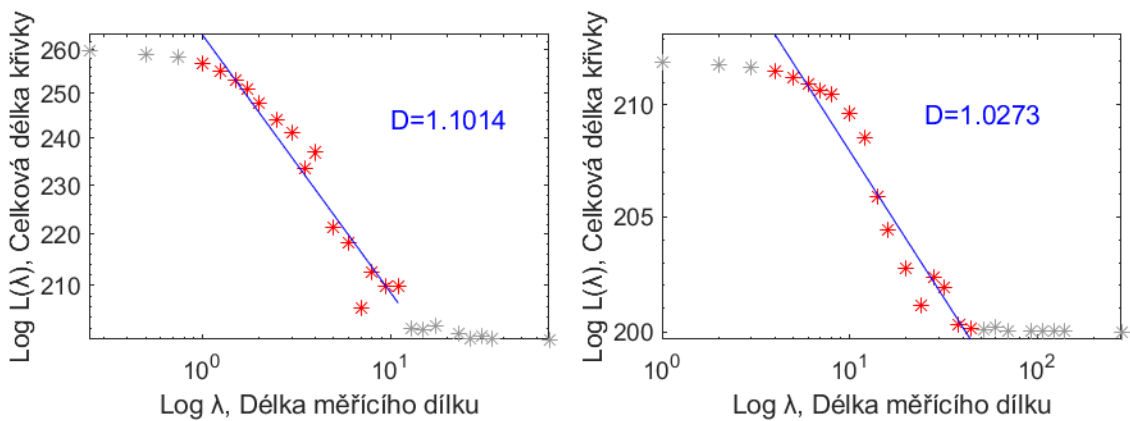
Pro výpočet směrodatné odchylky byla vytvořena samostatná funkce *SDO*, která počítá veličinu podle rovnice (2.2), jak je patrné z přílohy B.1.2. Alternativně lze využít i vestavěnou funkci MATLABu *std*, jež počítá SD s pomocí vztahu (2.1).

#### 4.2.4. INDEX KVALITY KOLEJE (TQI)

Pro výpočet Indexu kvality koleje byla vytvořena vlastní funkce s názvem *TQI*, jejíž zdrojový kód je v příloze B.1.3. Před výpočtem délky prostorové křivky je třeba staničení v kilometrech a délku segmentu koleje v metrech převést na milimetry. Rovněž se musí provést kontrola, jestli není rozdíl počátečního a koncového staničení blízký nule, což by mohlo způsobit vrácení nesmyslně vysoké hodnoty TQI. Délka prostorové křivky se spočítá podle rovnice (2.4). Pro vyšší efektivitu je rozdíl hodnot staničení a parametru proveden vektorově, a nikoliv pomocí cyklu, jenž by rozdíl prováděl postupně. Nakonec se z délky prostorové křivky vypočítá TQI podle rovnice (2.3).

#### 4.2.5. FRAKTÁLNÍ DIMENZE (FD)

Pro výpočet fraktální dimenze byla vytvořena vlastní funkce s názvem *FD*, jejíž zdrojový kód je v příloze B.1.4. Před výpočtem FD je třeba staničení v kilometrech převést na metry. Hodnoty parametru zůstávají v milimetrech, což odpovídá postupu [26]. Velký vliv na výslednou FD má volba kroků přírůstku délky dílků (pravítek) na ose x, tzn. o kolik hodnot se postupuje při výpočtu délky křivky. Na základě zkušeností [26] a [34] byly nakonec zvoleny kroky 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 24, 28, 32, 38 a 44. Stejná řada kroků vyhovuje jak pro vlnové pásmo D1, tak i pro pásmo D2, jen se liší jejich délka v metrech, jak je vidět na Obr. 4.12 níže.

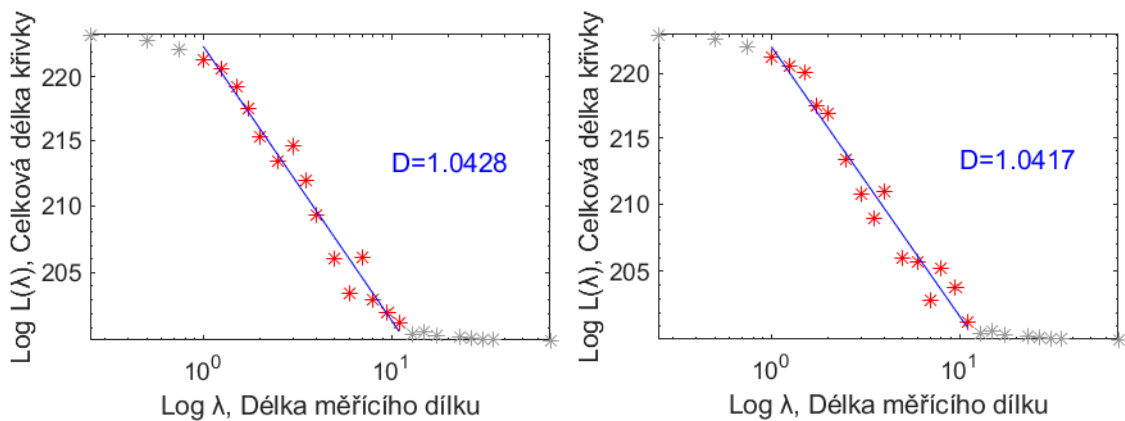


Obr. 4.12 – Log-log graf VL (vlevo) a VK D2 (vpravo) s lineární regresí pro výpočet FD

Pro ilustraci byly do grafů na Obr. 4.12 přidány i kroky 1 až 4 a větší než 44, kde se ale celková délka křivky už příliš nemění, a tak by jejich započítání do lineární regrese pouze zkreslovalo hodnotu FD. Tento přístup se liší od ostatních výzkumníků [26][14][34], kteří se snažili v Richardsonově grafu hledat multifraktální průběh. Využitelnost FD z krajních částí grafu je však problematická, protože mají velmi podobné hodnoty i v úsecích s velmi odlišnou SD. Proto se lineární regrese v této práci bude provádět pouze ve střední části grafu. Lineární regrese byla vypočítána funkcemi *polyfit* a *polyval*.

### Klasická obvodová metoda vs. zjednodušená obvodová metoda

Ještě předtím, než byl doladěn způsob výpočtu FD, bylo třeba otestovat, jestli se významně liší výsledky klasické a zjednodušené obvodové metody, jejichž srovnání můžeme vidět na Obr. 4.13. Při programování klasické obvodové metody byl využit postup dle [34], kdy se hledá průsečík mezi kružnicí s poloměrem rovným délce dílku (pravítka) a segmentem křivky signálu s využitím funkce *polyxpoly*. Toto hledání probíhá uvnitř smyčky, dokud není nalezen průsečík. Postup je opakován pro všechny kroky, dokud se nedojde na konec segmentu.



Obr. 4.13 – Log-log graf VL – Zjednodušená (vlevo) a klasická obvodová metoda (vpravo)

Na základě extensivního testování se zdá, že rozdíly mezi klasickou a zjednodušenou obvodovou metodou jsou do 10 %. Zjednodušená metoda je však výrazně rychlejší, což je velmi důležité, pokud vyhodnocujeme několikakilometrový úsek klouzavě a máme několik desítek měření. Jeden výpočet FD pomocí zjednodušené metody trvá přibližně 0,004 s, což je velmi podobná doba jako u SD a TQI. Zatímco u klasické metody zabere výpočet téměř 1 s. Čím více se algoritmus svými výsledky blíží klasické metodě, tím je zároveň pomalejší. Proto opakované snahy o hledání jiného algoritmu zatím skončily neúspěšně.

### 4.3. VÝKONOVÁ SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA (PSD)

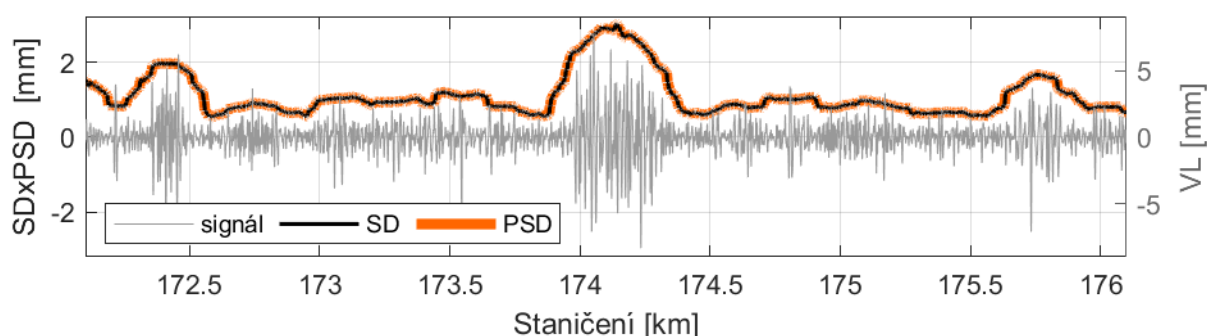
Pro výpočet výkonové spektrální hustoty byla vytvořena vlastní funkce s názvem *PSD* (zdrojový kód viz příloha B.1.5). Samotný výpočet PSD byl inspirován [48]. Na začátku se vypočítá (délková) vzorkovací frekvence jako inverzní hodnota vzdálenosti naměřených hodnot. Její výsledná hodnota je  $1/0,25 = 4 \text{ m}^{-1}$  pro vlnové pásmo D1 a  $1/1 = 1 \text{ m}^{-1}$  pro pásmo D2. Poté zjistíme počet hodnot parametru, který musí být vždy sudý.

Potom provedeme Fourierovu transformaci funkcí *FFT* (*Fast Fourier Transform*). Pro výpočet PSD potřebujeme pouze první polovinu transformovaného vektoru, kterou v kombinaci s absolutní hodnotou umocníme na druhou a vynásobíme inverzní hodnotou vzorkovací frekvence vynásobené počtem hodnot parametru. Protože používáme pouze kladnou část výkonového spektra, musíme zdvojnásobit všechny délkové frekvence PSD s výjimkou první (nulové) a poslední (Nyquistovy) frekvence, aby celkový výkon zůstal zachován. Pomocí vestavěné funkce *periodogram* lze vykreslit graf Výkonové spektrální

hustoty nebo Výkonového spektra. Pro lepší pochopitelnost budou v práci prezentovány pouze grafy PSD v závislosti na vlnové délce místo délkové frekvence.

### 4.3.1. VZTAH MEZI PSD A SD

Jak již bylo uvedeno v části 2.4.4, odmocnina plochy pod PSD je rovna SD, je-li střední hodnota parametru 0. Plocha pod PSD byla zjištěna numerickou integrací pomocí funkce *trapz*. Z Obr. 4.14 je patrné, že korelace odmocniny plochy pod PSD a SD je prakticky 100 %. Tento vztah ale funguje jen u filtrovaných parametrů, kde je střední hodnota 0.



Obr. 4.14 – Porovnání průběhu SD a odmocniny plochy pod PSD

### 4.3.1. MEZNÍ KŘIVKY PSD

Aby bylo možné provádět komplexní analýzu geometrie kolejí pomocí PSD, byly v několika zemích navrženy analytické vztahy na základě naměřených hodnot. [36]

#### Spojené státy americké (USA)

FRA rozlišuje 9 traťových tříd, z nichž 1 až 6 jsou běžné a 7 až 9 jsou vysokorychlostní tratě (VRT). FRA používá jednostrannou PSD ve vlnovém pásmu 1,524 až 304,8 m. [36]

PSD výšky koleje se spočítá podle rovnice:

$$S_{av}(\Omega) = \frac{k \cdot A_v \cdot \Omega_c^2}{\Omega^2 \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (4.1)$$

PSD směru koleje se vypočítá dle vztahu:

$$S_{al}(\Omega) = \frac{k \cdot A_a \cdot \Omega_c^2}{\Omega^2 \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (4.2)$$

PSD rozchodu a převýšení koleje získáme pomocí rovnice:

$$S_{gauge/cl}(\Omega) = \frac{4 \cdot k \cdot A_v \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_c^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_s^2)} \quad (4.3)$$

kde  $S_{av/al/gauge/cl}(\Omega)$  je PSD zvoleného parametru [ $\text{cm}^2 / (\text{rad}/\text{m})$ ],

$\Omega$  je vlnové číslo (délková frekvence), jež získáme z vlnové délky  $2\pi/\lambda$  [rad/m],  
 $\Omega_c, \Omega_s$  je kritické vlnové číslo (délková frekvence) [rad/m],  
 $A_v, A_a$  je délkové vlnové číslo (délková frekvence) [rad/m],  
 $k$  je konstanta (0,25).

Traťová třída	Maximální rychlost		$A_v$ [cm <sup>2</sup> ·rad/m]	$A_a$ [cm <sup>2</sup> ·rad/m]	$\Omega_c$ [rad/m]	$\Omega_s$ [rad/m]
	Nákladní [km/h]	Osobní [km/h]				
1	16	24	1,2107	3,3634	0,8245	0,6046
2	40	48	1,0181	1,2107	0,8245	0,9308
3	64	97	0,6816	0,4128	0,8245	0,852
4	97	129	0,5376	0,3027	0,8245	1,1312
5	129	145	0,2095	0,0762	0,8245	0,8209
6	177		0,0339	0,0339	0,8245	0,438

Tab. 4.2 – Koeficienty mezní křivky PSD z USA (přeloženo z [36])

V Tab. 4.2 jsou uvedeny koeficienty pro výpočet křivky PSD dle FRA. Pro traťové třídy 7 až 9 zatím nebyly stanoveny vzhledem k tomu, že v USA zatím žádné VRT nejsou.

## Německo

Německé spektrum PSD se široce používá pro dynamické simulace železničních vozidel v evropských zemích. Model používá jednostranné spektrum délkové frekvence od  $0,01 \cdot 2\pi$  do  $0,4 \cdot 2\pi$  rad·m<sup>-1</sup>, což odpovídá pásmu vlnových délek 2,5 až 100 m. [36]

PSD výšky koleje se spočítá podle rovnice:

$$S_v(\Omega) = \frac{A_p \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_\gamma^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (4.4)$$

PSD směru koleje se vypočítá dle vztahu:

$$S_{al}(\Omega) = \frac{A_a \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_\gamma^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (4.5)$$

PSD rozchodu a převýšení koleje získáme pomocí rovnice:

$$S_{cl}(\Omega) = \frac{(A_p \cdot \Omega_c^2/a^2) \cdot \Omega^2}{(\Omega^2 + \Omega_\gamma^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_s^2)} \quad (4.6)$$

kde  $S_{v/al/cl}(\Omega)$  je PSD zvoleného parametru [m<sup>2</sup>/ (rad/m)],

$\Omega$  je vlnové číslo (délková frekvence), jež získáme z vlnové délky  $2\pi/\lambda$  [rad/m],

$\Omega_c, \Omega_\gamma, \Omega_s$  je kritické vlnové číslo (délková frekvence) [rad/m],

$A_p, A_a$  je měřítko pro VK, respektive SK [m<sup>2</sup>·rad/m],

$a$  je konstanta odpovídající polovině vzdálenosti styčných kružnic (0,75 m).

Parametr	$A_a$ [ $10^{-7} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad/m}$ ]	$A_p$ [ $10^{-7} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad/m}$ ]	$\Omega_c$ [rad/m]
Málo poruch	2,119	4,032	0,820
Hodně poruch	6,125	10,80	0,820
Parametr	$\Omega_v$ [rad/m]	$\Omega_s$ [rad/m]	
Málo poruch	0,0206	0,438	
Hodně poruch	0,0206	0,438	

Tab. 4.3 – Koeficienty mezní křivky PSD z Německa (přeloženo z [36])

V Tab. 4.3 jsou uvedeny koeficienty pro výpočet křivky PSD z Německa pro málo a hodně poruch geometrie koleje.

## Čína

Čínská akademie železničních věd publikovala předpisy pro účely hodnocení a diagnostiky kvality koleje určené pro tři různé provozní rychlostní třídy: 120, 160 a 200 km·h<sup>-1</sup>. Pro každou z nich jsou předepsaná tři různá spektra: horní, obecné a dolní. Čím blíže je PSD dané trati ke dolní mezní úrovni, tím je kvalita její geometrie koleje vyšší, a naopak čím blíže je PSD trati k horní úrovni, tím je její kvalita nižší. [36]

Čínská funkce PSD používá jednostranné spektrum a spočítá se podle rovnice: [49]

$$S(f) = \frac{af^2 + b}{cf^6 + df^4 + ef^2 + k} \quad (4.7)$$

kde  $S(f)$  je PSD zvoleného parametru [ $\text{mm}^2 / (1/\text{m})$ ],

$f$  je vlnové číslo (délková frekvence) [ $1/\text{m}$ ],

$a, b, c, d, e, k$  jsou koeficienty, jejichž hodnoty jsou v Tab. 4.4 a Tab. 4.5.

Z tabulek byla vypuštěna obecná úroveň kvality.

Traťová nerovnost		$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$k$
Rozchod	Horní	640,74	0,4233	6524,507	289,1726	4,3582	-0,0003
	Dolní	325,929	0,2151	28425,14	1261,602	18,9956	-0,0015
Převýšení	Horní	1830,68	7,3882	20908,35	1028,226	30,9382	0,008
	Dolní	1077,07	4,3434	70234,04	3460,22	103,9562	0,027
Směr	Horní	0	0,02622	0	1	0,01893	0,00003
	Dolní	0	0,00306	0	1	0,01893	0,00003
Podélná výška	Horní	0	0,01351	0	1	0,00687	0
	Dolní	0	0,00166	0	1	0,00721	0

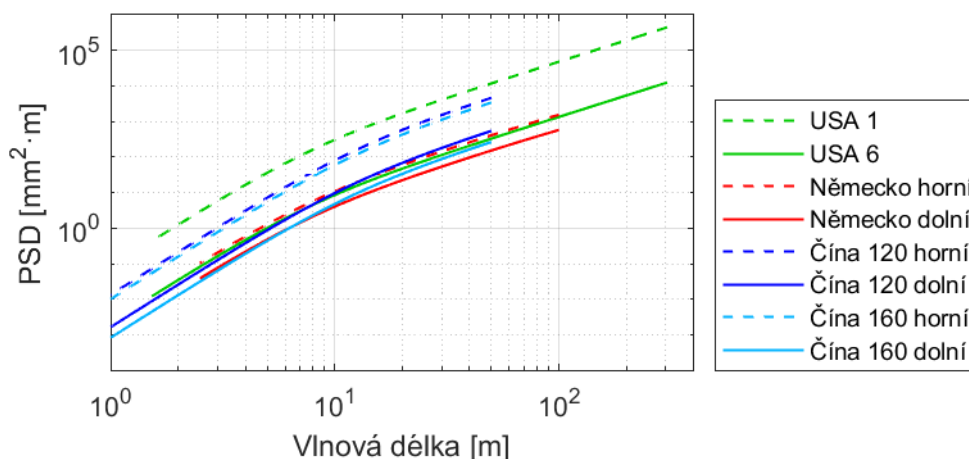
Tab. 4.4 – Koeficienty mezní křivky PSD z Číny pro 120 km/h (přeloženo z [36][49])

Traťová nerovnost		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>k</i>
Rozchod	Horní	612,3768	0,4046	8660,944	383,8376	5,7852	-0,0004
	Dolní	187,2267	0,1238	31792,31	1407,659	21,23	-0,0015
Převýšení	Horní	1890,022	4,2158	19981,09	984,2226	18,5928	0,0011
	Dolní	511,6737	1,1433	65036,82	3191,977	60,4676	0,0036
Směr	Horní	0	0,01751	0	1	0,01893	0,00003
	Dolní	0	0,00146	0	1	0,01893	0,00003
Podélná výška	Horní	0	0,01016	0	1	0,00704	0
	Dolní	0	0,00084	0	1	0,0075	0

Tab. 4.5 – Koefficienty mezní křivky PSD z Číny pro 160 km/h (přeloženo z [36][49])

### Vzájemné porovnání mezních křivek PSD

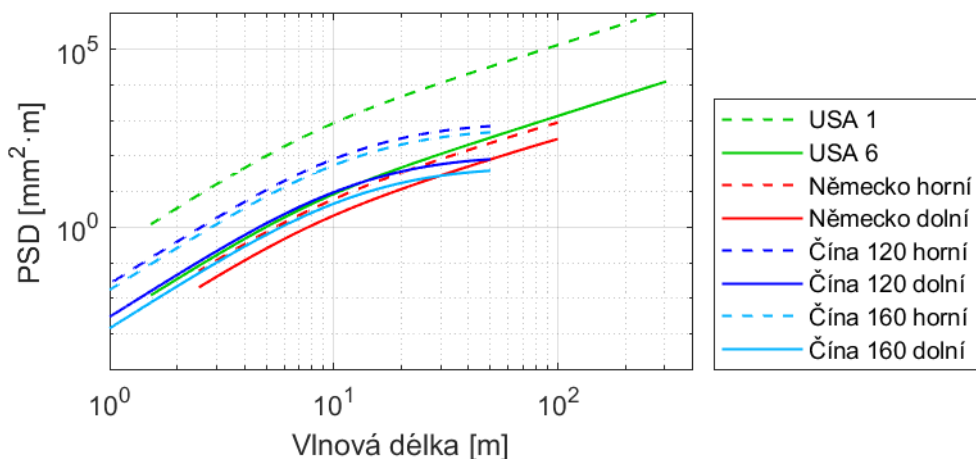
Aby bylo možné vynést mezní křivky PSD do společného grafu, bylo nutné nejdříve převést koeficienty z USA a Německa z rad/m na 1/m, aby měly všechny stejné jednotky. Nejširší spektrum vlnových délek pokrývá americká křivka PSD. Naproti tomu čínská funkce řeší zejména krátkovlnné iregularity do 50 m. Mezní křivky byly vykresleny do grafů pomocí samostatné funkce *PSDlim*, jejíž zdrojový kód je v příloze B.1.6.



Obr. 4.15 – Porovnání mezních křivek PSD VK

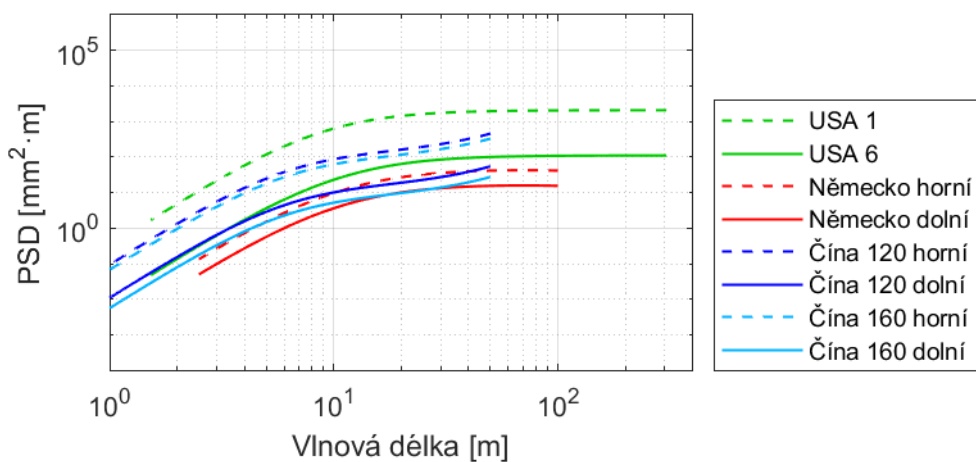
Z Obr. 4.15 je patrné, že spodní mezní křivka PSD z Německa (červená) pro výšku koleje je ve většině své délky nejpřísnější, protože se v grafu nachází nejniž, což odpovídá nejlepší kvalitě geometrie koleje. Horní křivka z USA (zelená) je naopak nejméně přísná, protože odpovídá nejnižší rychlosti 24 km·h<sup>-1</sup>. Dále je jasně vidět, že německé a americké křivky jsou rovnoběžné, protože je jejich výpočet velmi podobný.

Na Obr. 4.16 je vidět, že průběh mezních funkcí PSD pro směr koleje se velmi podobá průběhu křivek pro VK. Hlavní rozdíl je ve tvaru křivek z Číny (modrá), které jsou více zaoblené. Pro většinu vlnových délek jsou tedy méně přísné než dolní křivka z Německa.

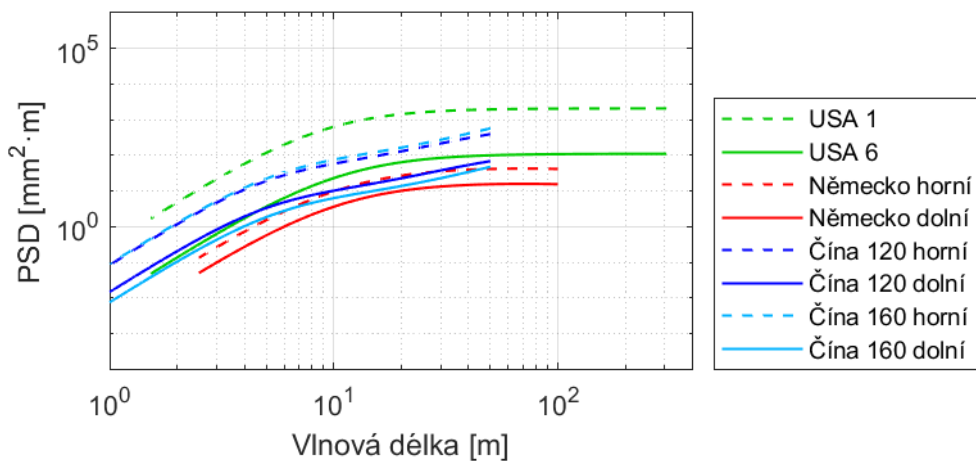


Obr. 4.16 – Porovnání mezních křivek PSD SK

Obr. 4.17 a Obr. 4.18 ukazují průběh mezních křivek RK a PK. Americké a německé křivky jsou rovnoběžné, protože se počítají podle stejné rovnice. Na rozdíl od křivek SK a VK jsou pro vlnové délky od 30 m téměř konstantní. Čínské křivky PSD jsou v kratších vlnových délkách podobné jako americké a německé, ale potom se mírně odkloní dolů.



Obr. 4.17 – Porovnání mezních křivek PSD RK



Obr. 4.18 – Porovnání mezních křivek PSD PK

Z porovnání je zřejmé, že mezní křivky z Německa jsou pro všechny GPK nejpřísnější, možná protože se v Německu praktikuje lepší kontrola kvality geometrie koleje ve srovnání s USA a Čínou.

## 4.4. KORELAČNÍ ANALÝZA

### 4.4.1. VZÁJEMNÁ KORELACE

Vzájemnou korelaci dvou veličin je v MATLABu možné provést pomocí funkce *xcorr*, která přijímá dvojici vektorů a případně další volitelné argumenty, jimiž lze nastavit maximální zpoždění (posun) mezi oběma vektory a také normalizaci hodnot. Pokud do funkce vložíme pouze jeden vektor, získáme jeho autokorelaci. Funkce vrací jeden či dva vektory, přičemž první obsahuje hodnoty vzájemné korelace či autokorelace a druhý obsahuje indexy zpoždění, o které je potřeba posunout druhý vektor vůči prvnímu, abychom dostali odpovídající hodnoty korelace. [50]

Na základě vlastního testování bylo zjištěno, že se normalizovaná hodnota vzájemné korelace liší od Pearsonova korelačního koeficientu, což odpovídá jejich odlišnému účelu i způsobu výpočtu.

### 4.4.2. PEARSONŮV KORELAČNÍ KOEFICIENT

Pearsonův lineární korelační koeficient lze v MATLABu vypočítat pomocí funkcí *corrcoef* a *corr*. V práci byla použita funkce *corr*, protože pro dvojici vektorů vrací pouze jednu hodnotu korelačního koeficientu, na rozdíl od *corrcoef*, která vrací matici 4 hodnot, z nichž 2 jsou korelační koeficient a 2 se rovnají 1 (korelace vektoru se sebou samým). [51]

Funkce *corr* navíc umožňuje vypočítat i další druhy korelačních koeficientů jako je *Spearmanovo Rho* a *Kendallovo Tau*. Funkce *corr* přijímá dvojici korelovaných vektorů spolu s dalšími volitelnými argumenty jako např. již zmíněný druh koeficientu. Funkce vrací jeden nebo dva výsledky, kdy první obsahuje hodnotu korelačního koeficientu a druhý P-hodnotu pro posouzení statistické významnosti. [51]

## 5. PŘEHLED A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Vzhledem k velkému množství získaných dat a vytvořených výstupů v disertační práci jsou prezentovány pouze grafy a tabulky, které nejlépe ilustrují popisované jevy. Ostatní výstupy byly pro lepší přehlednost textu přesunuty do příloh.

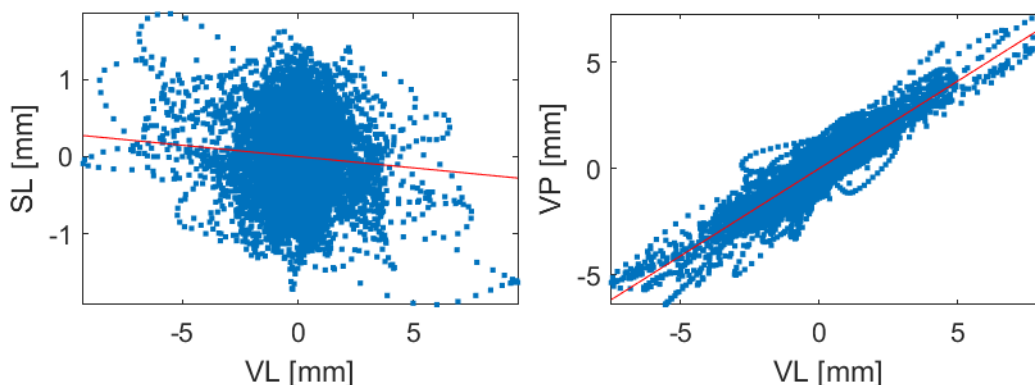
### 5.1. KORELAČNÍ ANALÝZA

#### 5.1.1. KORELACE GPK

Pro lepší pochopení vztahu mezi jednotlivými GPK byla provedena korelační analýza s pomocí Pearsonova korelačního koeficientu, jenž byl vypočítán z hodnot parametrů ze všech zájmových úseků a ze všech měření. Statisticky významná korelace byla nalezena pouze mezi SL a SP, VL a VP a také mezi PK a KR KS, jak je vidět v tabulce Tab. 5.1 níže, kde tmavší barva značí silnější korelaci, zelená značí přímou a červená nepřímou úměru. Nejsilnější korelace je mezi převýšením a křivostí. Tento vztah pochopitelně neplatí v úseku Hodonín – Rohatec, který je celý v přímé, a tak jsou KR KS i PK velmi nízké.

Pearsonův korelační koeficient GPK	kolej	VL x VP		SL x SP		VL x SL		PK x KR KS	
		min	max	min	max	min	max	min	max
Hodonín – Rohatec	1	0.49	0.92	0.46	0.81	-0.20	0.65	-0.31	0.10
	2	0.51	0.87	0.54	0.87	-0.33	0.66	-0.30	0.11
Adamov – Blansko	1	0.57	0.79	0.46	0.72	-0.25	0.06	0.91	0.97
	2	0.53	0.79	0.30	0.68	-0.18	0.04	0.97	0.98
Brno – Adamov	1	0.52	0.74	0.42	0.73	-0.17	0.07	0.97	0.99
	2	0.55	0.73	0.41	0.71	-0.13	0.16	0.97	0.99
Dobšice n. C. – Choťovice	1	0.78	0.93	0.67	0.90	-0.22	0.03	0.98	0.99
Choťovice – Převýšov		0.62	0.75	0.76	0.94	-0.37	0.05	0.98	0.98
Převýšov – Chlumeck n. C.		0.75	0.84	0.44	0.78	-0.23	0.09	0.98	0.99

Tab. 5.1 – Minimální a maximální lineární korelace GPK



Obr. 5.1 – Korelační diagram s nejslabší (vlevo) a nejsilnější korelací GPK (vpravo)

Silná až střední korelace je mezi směry a výškami obou kolejnicových pásů. Naopak mezi směrem a výškou žádná statisticky významná korelace není. Příklady nejsilnější a nejslabší korelace dvojic parametrů jsou v korelačních diagramech na Obr. 5.1.

## 5.1.2. KORELACE VELIČIN

Pro účely korelační analýzy zkoumaných veličin pro hodnocení kvality geometrie koleje (SD, TQI, FD a ID) byl využit Pearsonův korelační koeficient. Veličiny byly počítány pro 200m segmenty klouzavě po 10 m (kratší krok na výsledky nemá vliv). Poté byly vypočítány korelační koeficienty pro každé měření, z nichž byly vybrány maximální a minimální koeficienty pro každý zájmový úsek. Tento postup byl opakován pro všechny dvojice veličin. Výsledné lineární korelační koeficienty pro čtyři parametry jsou v tabulkách níže. Pro lepší porovnání jednotlivých tabulek byly hodnoty vyznačeny barevně, kdy zelená značí silnou, bílá střední a červená velmi nízkou až statisticky nevýznamnou korelaci.

Pearsonův korelační koeficient SD x TQI	kolej	VL		SL		VK D2		SK D2	
		min	max	min	max	min	max	min	max
Hodonín - Rohatec	1	0.68	0.97	0.37	0.92	0.88	0.98	0.91	0.97
	2	0.75	0.98	0.70	0.96	0.88	0.96	0.88	0.98
Adamov - Blansko	1	0.82	0.96	0.71	0.95	0.90	0.95	0.86	0.96
	2	0.81	0.97	0.65	0.90	0.72	0.95	0.90	0.97
Brno - Adamov	1	0.86	0.96	0.76	0.95	0.80	0.95	0.54	0.96
	2	0.86	0.96	0.77	0.92	0.89	0.95	0.89	0.94
Dobšice n. C. - Choťovice	1	0.87	0.98	0.75	0.93	0.88	0.97	0.91	0.97
Choťovice - Převýšov		0.80	0.97	0.87	0.98	0.82	0.98	0.88	0.98
Převýšov - Chlumec n. C.		0.82	0.96	0.45	0.95	0.91	0.97	0.72	0.96

Tab. 5.2 - Minimální a maximální lineární korelace mezi SD a TQI

Pearsonův korelační koeficient SD x FD	kolej	VL		SL		VK D2		SK D2	
		min	max	min	max	min	max	min	max
Hodonín - Rohatec	1	0.66	0.95	0.31	0.85	0.88	0.97	0.89	0.96
	2	0.71	0.98	0.64	0.91	0.87	0.96	0.85	0.97
Adamov - Blansko	1	0.78	0.97	0.66	0.96	0.88	0.95	0.90	0.97
	2	0.77	0.94	0.56	0.87	0.87	0.95	0.92	0.96
Brno - Adamov	1	0.83	0.94	0.68	0.90	0.87	0.94	0.90	0.95
	2	0.80	0.95	0.74	0.91	0.87	0.94	0.88	0.93
Dobšice n. C. - Choťovice	1	0.78	0.97	0.70	0.95	0.85	0.96	0.88	0.97
Choťovice - Převýšov		0.64	0.92	0.71	0.95	0.75	0.97	0.90	0.95
Převýšov - Chlumec n. C.		0.72	0.93	0.29	0.85	0.90	0.96	0.61	0.93

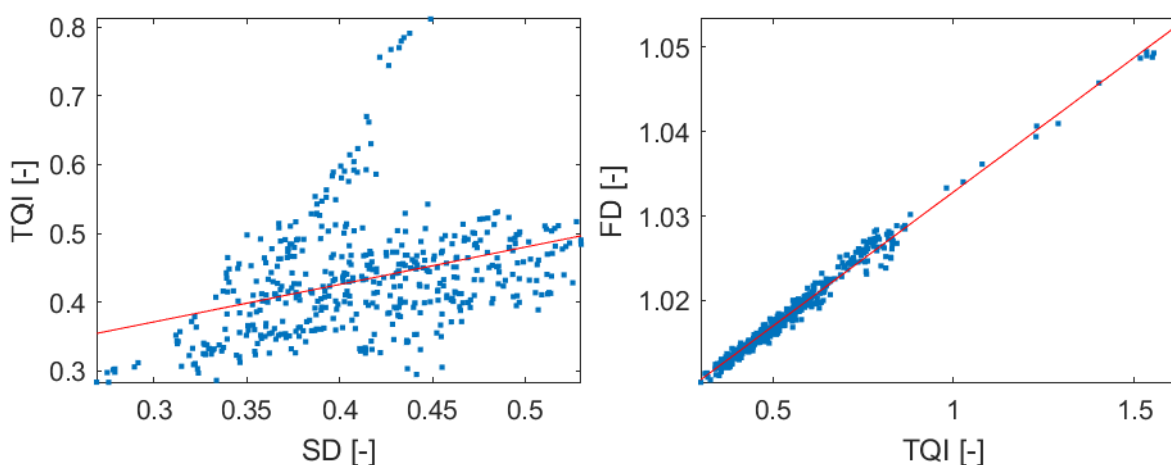
Tab. 5.3 - Minimální a maximální lineární korelace mezi SD a FD

Z porovnání Tab. 5.2 a Tab. 5.3 vyplývá, že jsou minimální a maximální hodnoty korelačního koeficientu v obou tabulkách velmi podobné, což značí, že TQI i FD jsou podobně silně korelované se SD. V Tab. 5.4 je velmi dobře vidět, že mezi TQI a FD panuje velmi silná korelace pro vybrané GPK. Není tedy divu, že mají také velmi podobný průběh po délce koleje, jak ilustrují grafy v oddílu 5.2. Na korelaci překvapivě nemá vliv výrazná oscilace FD, což bylo ověřeno korelací s FD vyhlazenou pomocí klouzavého průměru.

Pearsonův korelační koeficient TQI x FD	kolej	VL		SL		VK D2		SK D2	
		min	max	min	max	min	max	min	max
Hodonín - Rohatec	1	0.95	0.99	0.89	0.99	0.99	1.00	0.95	1.00
	2	0.94	0.99	0.95	0.99	0.93	1.00	0.99	1.00
Adamov - Blansko	1	0.94	0.99	0.96	0.99	0.98	1.00	0.97	0.99
	2	0.92	0.99	0.95	0.99	0.80	0.99	0.96	0.99
Brno - Adamov	1	0.93	0.99	0.93	0.99	0.89	0.99	0.78	0.99
	2	0.94	0.99	0.94	0.99	0.98	0.99	0.97	0.99
Dobšice n. C. - Choťovice	1	0.92	0.98	0.96	0.99	0.96	0.99	0.99	1.00
Choťovice - Převýšov		0.92	0.98	0.92	0.97	0.97	0.99	0.96	0.99
Převýšov - Chlumec n. C.		0.92	0.97	0.86	0.99	0.98	0.99	0.76	0.99

Tab. 5.4 – Minimální a maximální lineární korelace mezi TQI a FD

Na Obr. 5.2 byl vyobrazen korelační diagram nejslabší korelace mezi SD a TQI počítané pro SL a nejsilnější korelace mezi FD a TQI počítané pro VL. Dle předpokladů jsou hodnoty v levém diagramu mnohem více rozptýlené kolem regresní přímky.



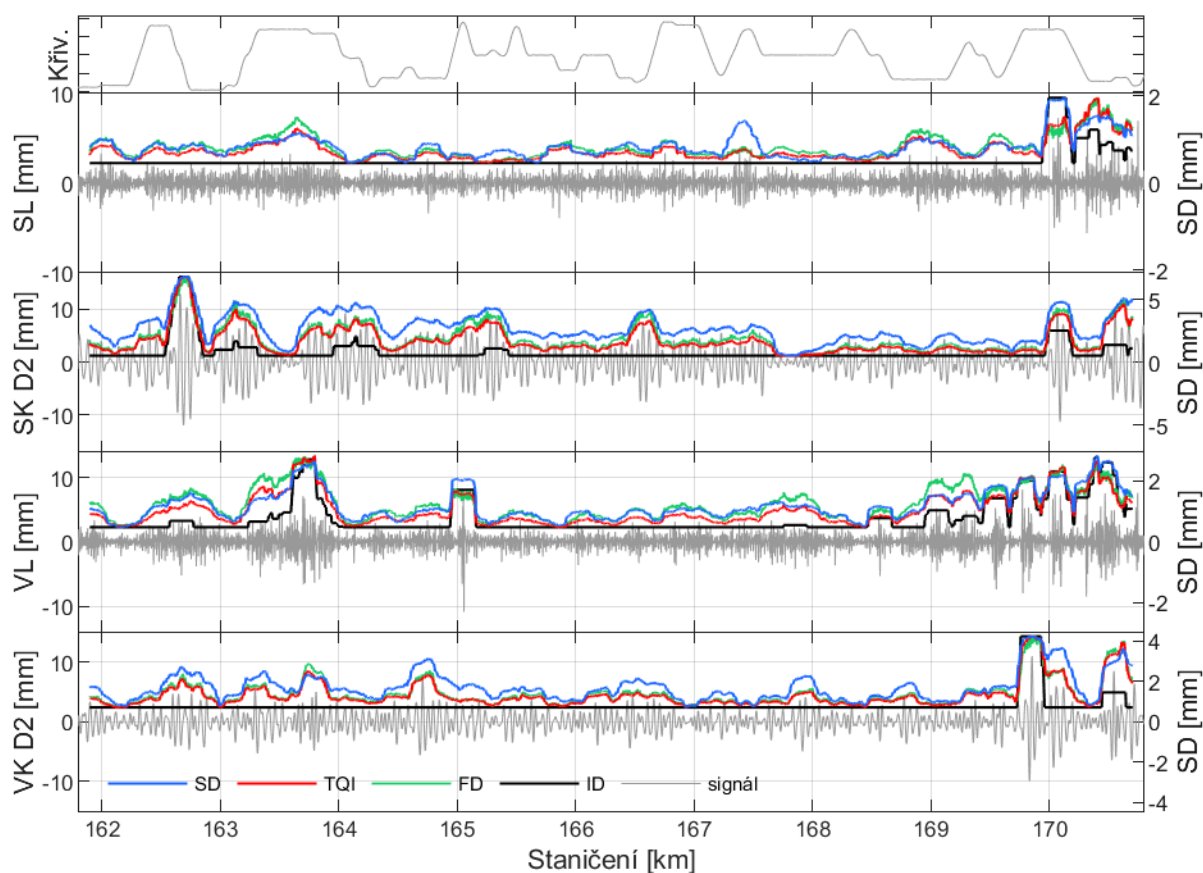
Obr. 5.2 – Korelační diagram s nejslabší (vlevo) a nejsilnější korelací veličin (vpravo)

Mezi korelačním koeficientem SD a TQI a maximálními hodnotami SD existuje u směru a výšky kolejnicových pásů ve vlnovém pásmu D1 v některých úsecích střední až

silná korelace. Data z měření s nejslabší a nejsilnější korelací veličin by si ovšem zasloužila podrobnější zkoumání.

## 5.2. PRŮBĚH PO DÉLCE KOLEJE

Hodnoty veličin (SD, TQI, FD a ID) byly přeškálovány pomocí funkce *rescale* tak, aby jejich minimální a maximální hodnoty byly stejné. Díky tomu je lze vynést do společného grafu a porovnávat jejich průběh. Všechny veličiny byly počítány klouzavou metodou s délkou hodnotících segmentů 200 m. Do vytvořených grafů byl přidán také signál příslušného parametru, aby bylo možné posuzovat, jak na něj veličiny reagují. Pro lepší pochopení chování GPK a veličin byla do grafů také přidána křivost.

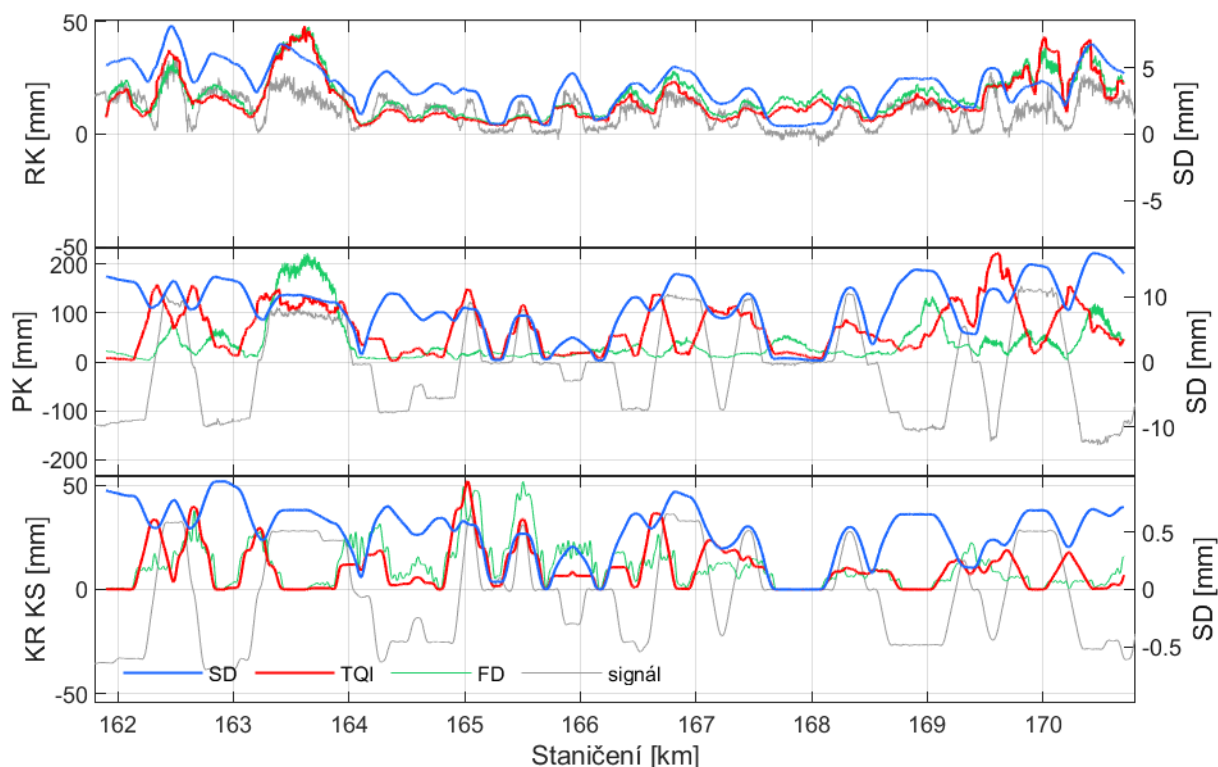


Obr. 5.3 – Průběh veličin po délce, směr a výška koleje, Brno – Adamov, K1, 5. 8. 2020

Na Obr. 5.3 je vyobrazen průběh veličin pro směr a výšku koleje ve vlnových pásmech D1 a D2. Průběh FD (v grafu zeleně) je velmi podobný TQI (v grafu červeně) zejména u VK D2. FD má tendenci mírně oscilovat, což může být způsobeno větší citlivostí nebo menší přesností. Tvar TQI se podobá SD (v grafu modře), ale TQI má odlišně vysoké

hodnoty v jednotlivých částech úseku. V průběhu VL se od km 169 vyskytuje série závad, které jsou od sebe vzdálené přibližně 250 m. Průběh lokálních závad (v grafu černě) je v nejhroších částech úseku podobný jako u ostatních parametrů. Mimo tato místa však mají lokální závady nulovou hodnotu a to, přestože byly použity provozní odchylky pro mez sledování a nejvyšší rychlostní pásmo. V úseku se totiž nenacházejí žádné lokální závady, což značí, že je trať v dobrém stavu a údržba je prováděna dříve než se vady stihnou vytvořit.

Na Obr. 5.4 můžeme vidět průběh veličin (SD, TQI a FD) a nefiltrovaných parametrů (RK, PK). Na první pohled je jasné, že každá veličina reaguje na celkový signál odlišně. SD vypadá nejméně citlivě, protože má nejhladší průběh, který také nejvíce připomíná zdrojový signál v absolutní hodnotě. Lokální závady nemají pro PK a KR KS definované mezní hladiny, takže do grafů nebyly vůbec vyneseny (je zde jen průběh PK, nikoliv odchylky od projektované hodnoty). Navíc by muselo dojít k odečtení navržených hodnot, což však není jednoduché a také je musíme mít k dispozici.

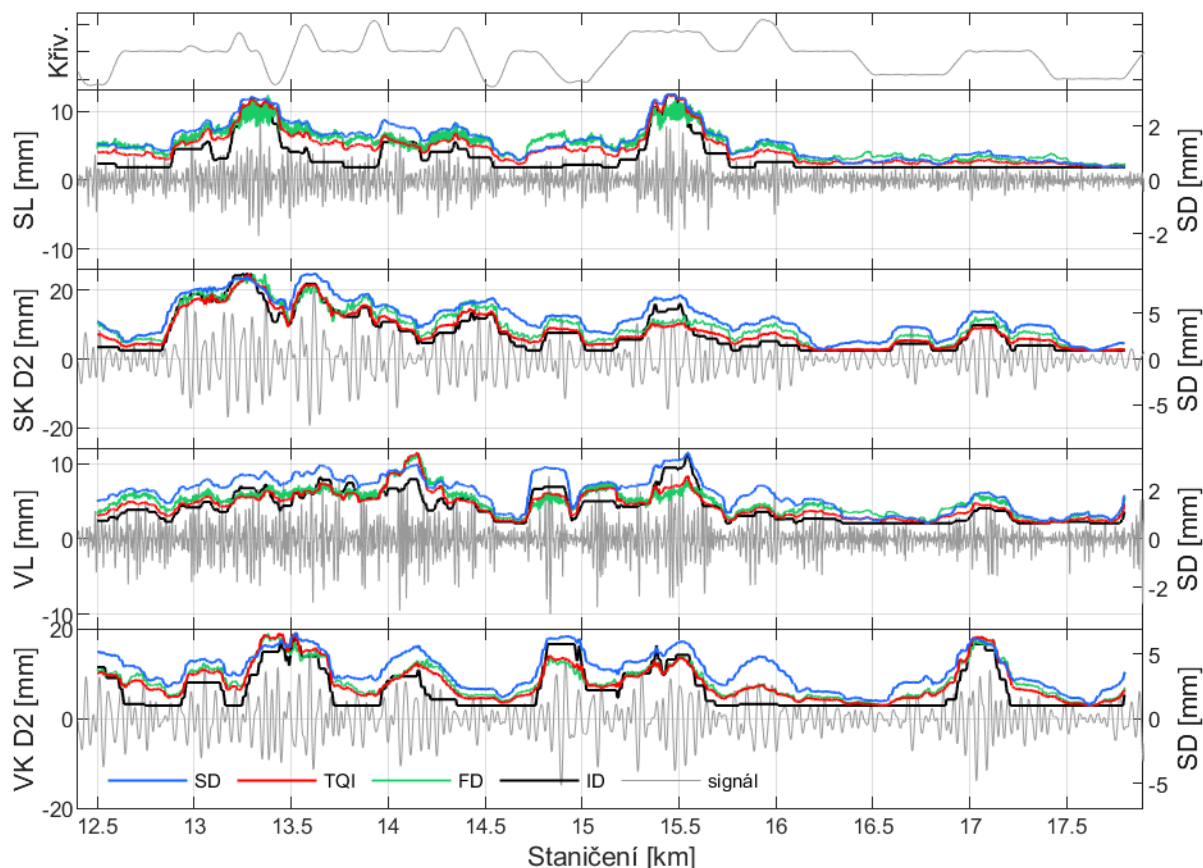


Obr. 5.4 – Průběh veličin po délce, RK a PK, Brno – Adamov, K1, 5. 8. 2020

Z grafu PK na Obr. 5.4 je zjevné, že TQI je nejvyšší v místě vzesupnic, zatímco v kružnicové části oblouků, je nejnižší. FD reaguje na tato místa přesně opačně.

Z grafu KR KS, kde je průběh TQI a FD více podobný, to vypadá, že FD reaguje více na vyšší drsnost (rozlámanost) než na délku signálu. Ze všech grafů je patrné, že SD nejvíce kopíruje tvar signálu.

Pro smysluplné hodnocení celkových parametrů pomocí SD by bylo potřeba je filtrovat do vlnových pásem D1 a D2.



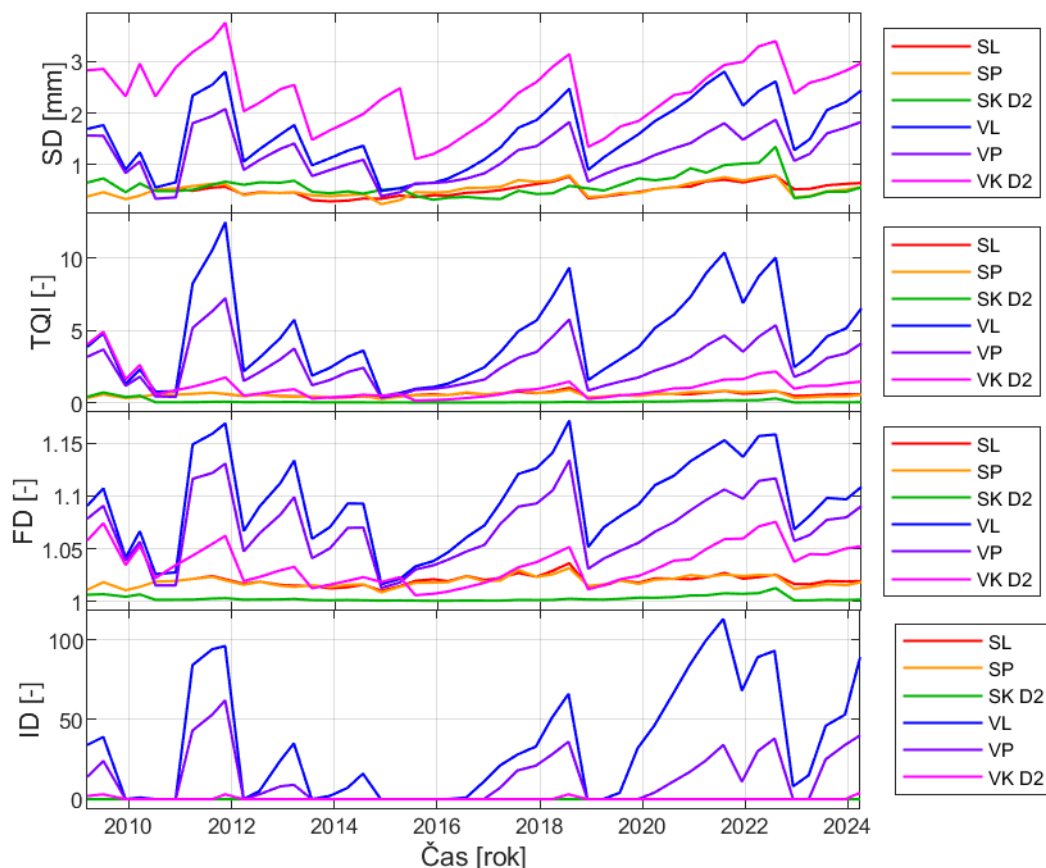
Obr. 5.5 – Průběh veličin po délce, směr a výška koleje, Choťovice – Převýšov, K1, 14. 9. 2022

Na Obr. 5.5 je průběh veličin a signálů z úseku Choťovice – Převýšov, kde je dobře viditelná oscilace FD po délce koleje, která je závislá na vlnové délce signálu. Tato oscilace zhoršuje porovnatelnost s TQI a SD. Oscilace je nejspíše způsobená vlivem nepřesnosti při odhadu FD pomocí zjednodušené obvodové metody. Z grafů je také zřejmé, že pokud jsou velké výchylky vzdálené do 200 m, maximální hodnota veličin je mezi nimi např. u VL v km 13,4; 14,2 a 15,55. Oproti Obr. 5.3 se průběh lokálních závad více podobá ostatním veličinám. Opět byly použity nejpřísnější provozní odchylky. Velké množství lokálních závad u všech parametrů poukazuje na obecně nižší kvalitu geometrie koleje v tomto úseku.

Grafy průběhu po délce pro ostatní sledované úseky jsou v příloze A.

## 5.3. VÝVOJ V ČASE

Pro lepší pochopení vývoje jednotlivých veličin byly vytvořeny také grafy vývoje v čase, z nichž je patrné cyklické (degradace a opravy) či chaotické chování kvality jednotlivých parametrů.

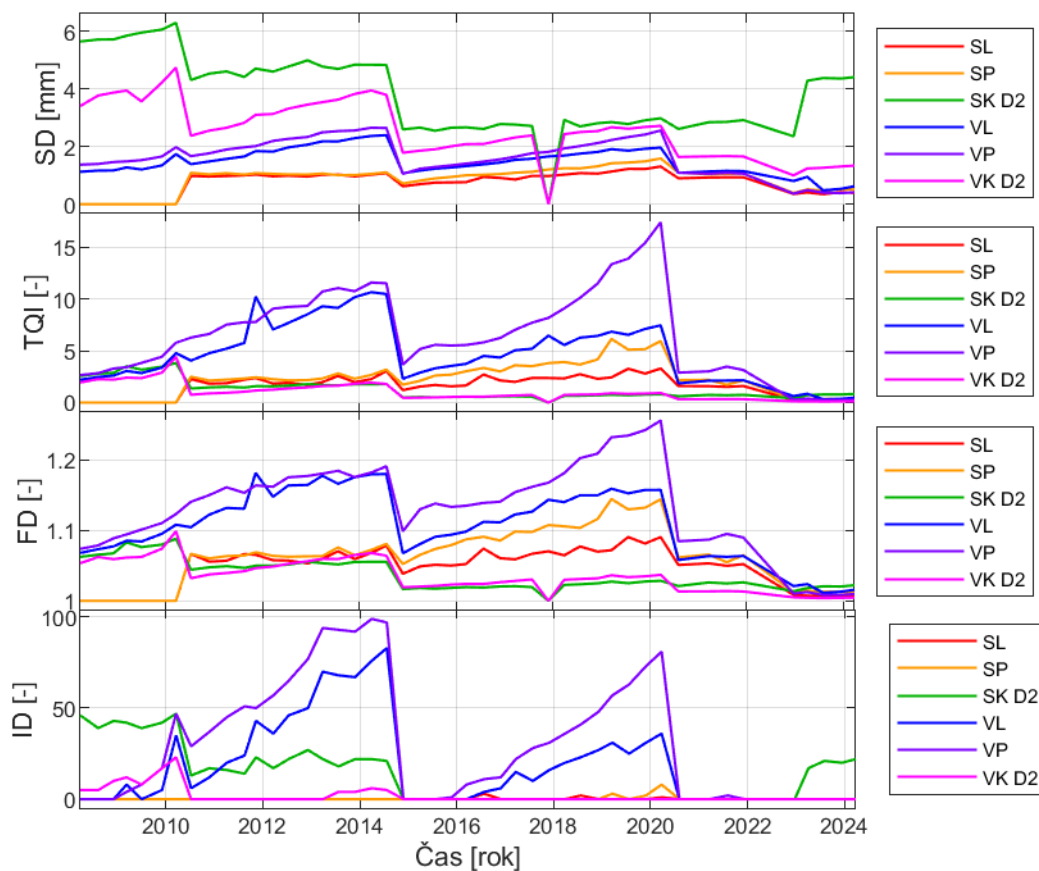


Obr. 5.6 – Vývoj veličin v čase, Hodonín – Rohatec, K1, km 105,8 – 106,0

Na Obr. 5.6 je vykreslen typický vývoj veličin v přímém úseku, kde je jasně viditelné cyklické chování (tzv. pilový průběh) výšky koleje (modrá, fialová a růžová) a trochu i směru koleje (červená, oranžová a zelená), který ale má oproti výšce výrazně nižší hodnoty. Ač mají SD, TQI a FD podobný průběh, lze vidět, že SD má v pásmu D2 znatelně vyšší hodnoty než TQI a FD. To je pravděpodobně způsobeno tím, že SD reaguje na vyšší amplitudu signálu, zatímco zbylé dvě veličiny měří jeho délku a drsnost, které jsou u delších vlnových délek menší, což ilustrují grafy v části 5.2. U všech veličin je vidět výrazný pokles VL a VP v roce 2010, kde bylo při importu dat odstraněno velké množství duplicitních řádků.

Lokální závady nejsou z principu pro sledování vývoje v čase příliš vhodné, protože měří počet závad na zvoleném segmentu koleje. V případě VL a VP je však vývoj překvapivě

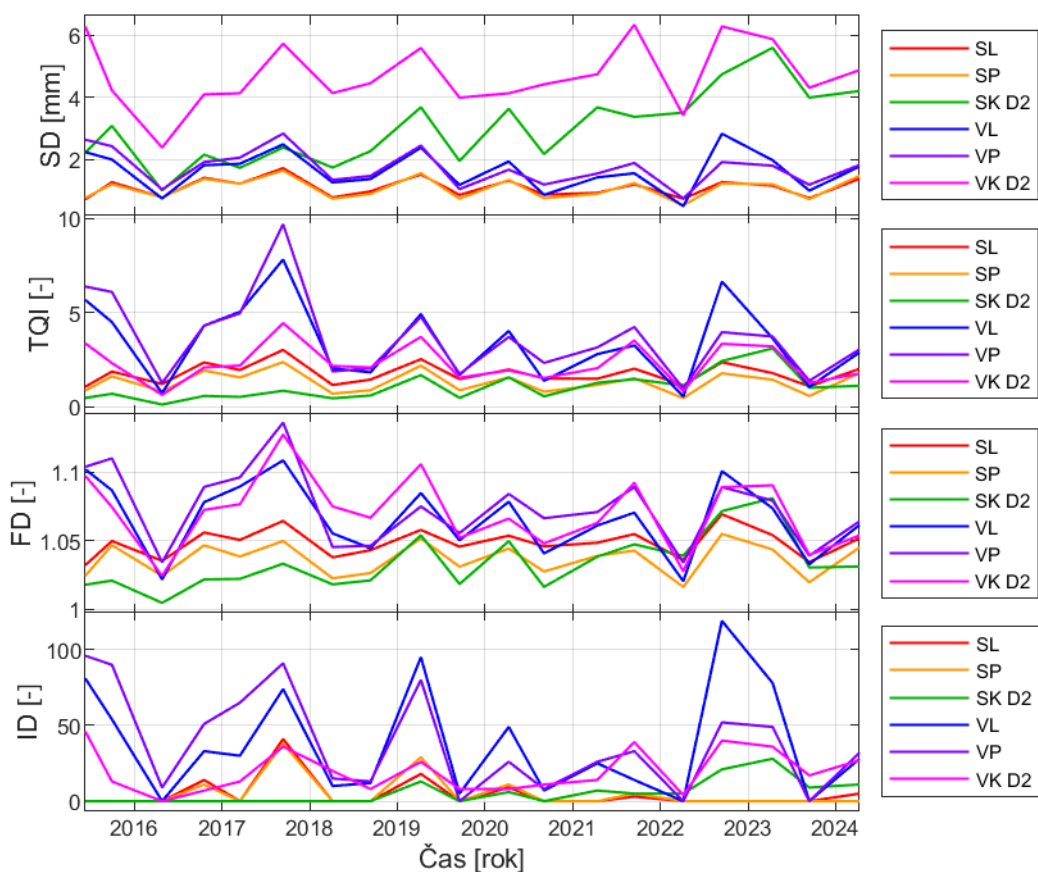
podobný jako u ostatních veličin, takže je stále zřetelné cyklické chování. U ostatních parametrů však nejsou téměř žádné lokální závady, a tak vývoj kvality nelze sledovat.



Obr. 5.7 – Vývoj veličin v čase, Adamov – Blansko, K1, km 177,6 – 177,8

Na Obr. 5.7 je zachycen vývoj veličin v úseku s oblouky malých poloměrů, kvůli čemuž hodnoty směru dosahují mnohem vyšších hodnot, což platí zejména pro SK D2. Ta je v čase poměrně konstantní a na podbití reaguje většinou poklesem, stejně jako ostatní parametry. V roce 2017 v tomto segmentu trati nebyly změřeny SK D2 a VK D2. U VL a VP je zřejmá postupná degradace až do podbití v roce 2014 a 2020, kdy se kvalita zlepšila.

Je zjevné, že SD má oproti TQI a FD mnohem hladší průběh u všech parametrů, což může být způsobeno menší citlivostí na drobné změny signálu. TQI a FD mají velmi podobný průběh u všech parametrů. Lokální závady jsou nejlépe použitelné u VL a VP a částečně také pro SK D2, u nichž se vývoj podobá SD. U ostatních parametrů je příliš málo lokálních závad, takže se žádný vývoj sledovat nedá.



Obr. 5.8 – Vývoj veličin v čase, Choťovice – Převýšov, K1, km 14,8 – 15,0

Na Obr. 5.8 je vývoj veličin v čase v úseku Choťovice – Převýšov, kde se kvalita velmi často mění vlivem velkého množství změn GPK a častých opravných zásahů. Vzhledem k tomu, že svršek byl obnoven v roce 2015 a podbíjení probíhá téměř každý rok, lze usuzovat, že problémy mohou být způsobeny špatnou kvalitou pražcového podloží.

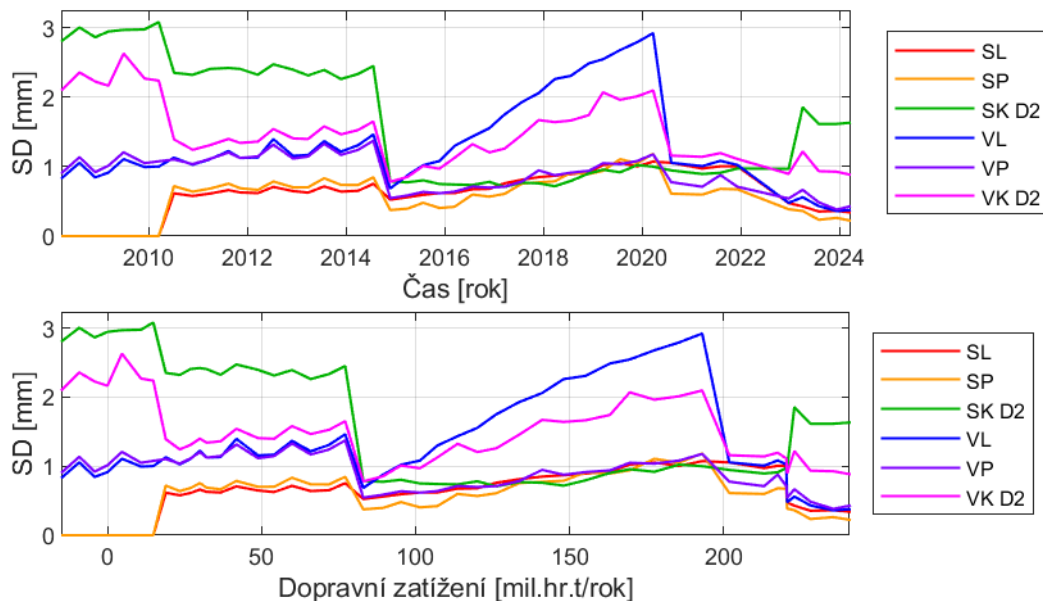
Na Obr. A.8 v příloze je vyobrazen segment trati s nízkými hodnotami veličin, což značí dobrou kvalitu geometrie koleje. Vlivem toho je výrazně více vidět drobná oscilace parametrů ve vlnovém pásmu D1 zejména u TQI a FD. Vývoj VK D2 je u všech veličin podobný, s tím rozdílem, že TQI a FD méně reagují na změnu filtrace po roce 2023. Tento efekt lze vidět i u vývoje SK D2. Zajímavé je, že FD postrádá pokles hodnot v roce 2010, kdy došlo ke změně rozsahu vlnových délek z 1 až 70 m na 25 až 70 m. SD a TQI na tuto změnu reagují a jejich reakce je podobná.

Na Obr. A.10 v příloze vidíme ukázkový cyklický vývoj výšky koleje v čase, kde jsou zřejmá 4 podbití v letech 2016, 2019, 2021 a 2023, mezi nimiž probíhá postupná degradace. SD směru koleje se v tomto segmentu v čase příliš nemění.

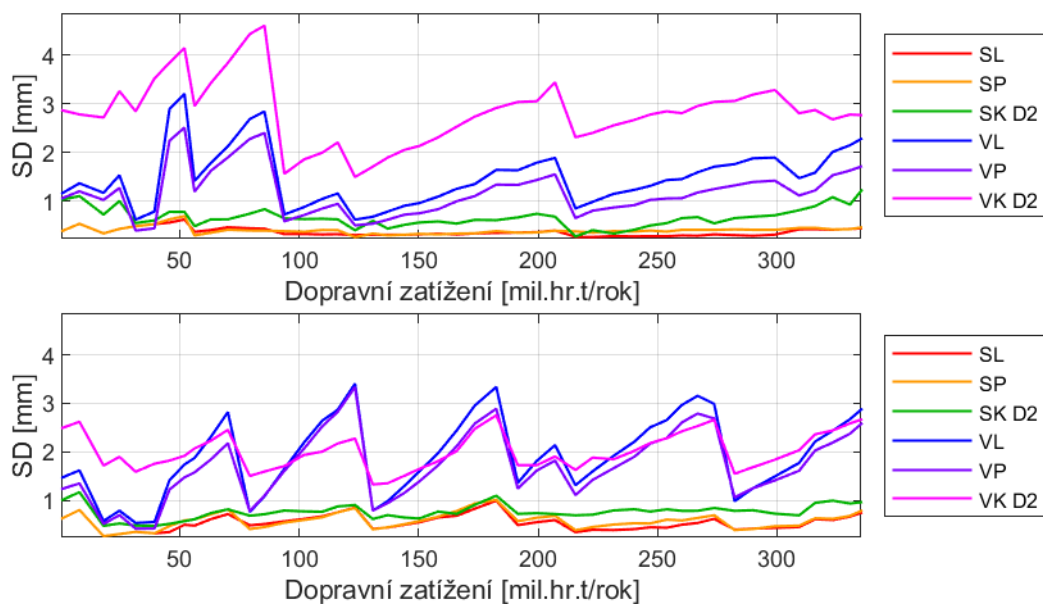
Další ukázkové grafy vývoje v čase jsou v příloze A.

### 5.3.1. SROVNÁNÍ VÝVOJE V ČASE A PODLE ZATÍŽENÍ

Na Obr. 5.9 jsou 2 grafy vývoje SD na stejném segmentu trati. V horním grafu je vývoj SD v čase a v dolním je vývoj podle přírůstku dopravního zatížení. Zejména v pravé části grafů lze velmi dobře vidět zkrácení vlivem minimálního přírůstku zatížení během obnovy trati v roce 2022, kdy současně došlo k poklesu SD u většiny parametrů. Na vývoji VL v období 2015 až 2020 dobře vidíme značný rozdíl v délce cyklu v obou grafech.



Obr. 5.9 – Vývoj SD v čase a podle zatížení, Adamov – Blansko, K1, km 174,0 – 174,2



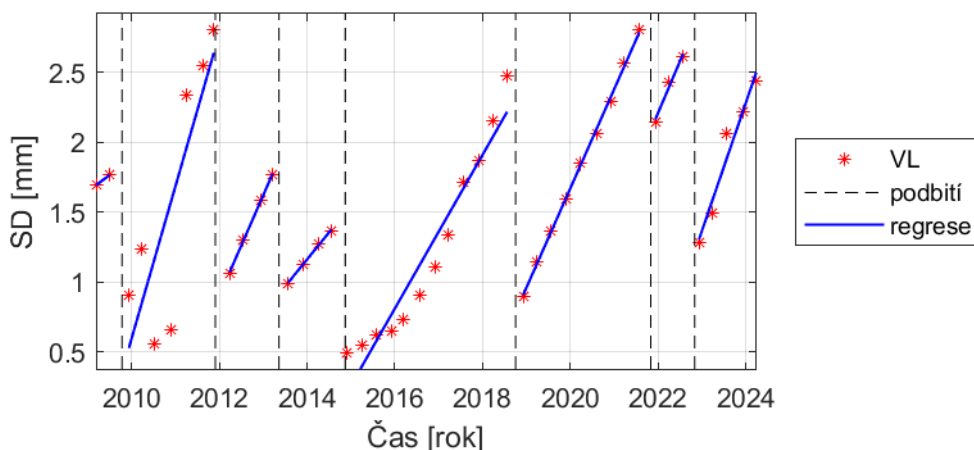
Obr. 5.10 – Vývoj SD dle zatížení, Hodonín – Rohatec, K1 (nahore), K2 (dole), km 109,0 – 109,2

Na Obr. 5.10 je porovnání vývoje SD v obou kolejích úseku Hodonín – Rohatec. Podle vývoje všech parametrů s výjimkou VK D2 je patrné, že degradace je rychlejší v koleji č. 2 s vyšším provozním zatížením (viz Obr. 4.5), kde zároveň SD dosahuje vyšších hodnot. Tomuto tvrzení se však vymyká vývoj VK D2, jejíž SD je vyšší v koleji č. 1. Porovnání ztěžuje různá délka podbíjecích cyklů a také odlišné chování obou kolejí ve stejném staničení.

Kvůli nedostatku dat o vývoji zatížení od Správy železnic (hodnoty jsou k dispozici pouze jednou ročně) bylo nutné interpolovat zatížení v časech jednotlivých měření. Proto nejsou rozdíly mezi grafy příliš zřetelné. Ve zbytku práce jsou pouze grafy vývoje v čase.

### 5.3.2. LINEÁRNÍ REGRESE

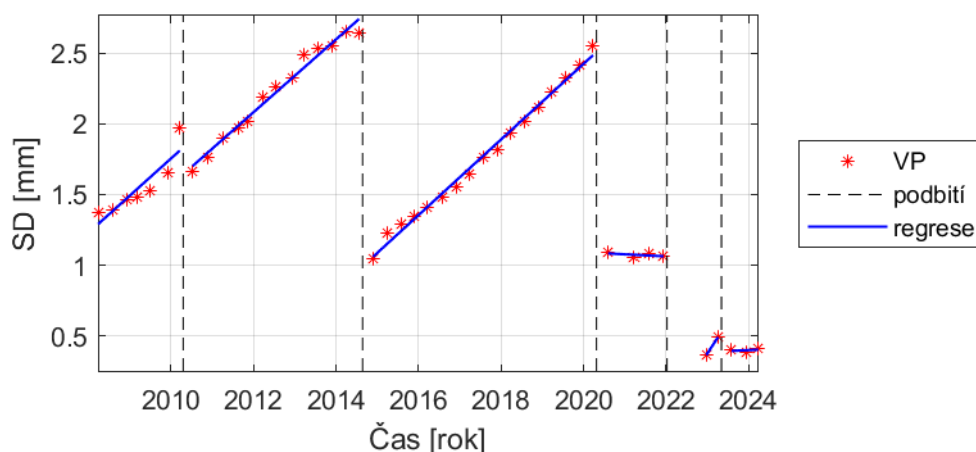
Rychlost degradace lze jednoduše sledovat za pomoci lineární regrese metodou nejmenších čtverců. Je však třeba znát časy, kdy došlo k opravám. V současnosti bohužel neexistuje jednotná databáze historie údržby, a tak je třeba se spoléhat na správce tratí. Opravy lze vyčíst i z grafů vývoje kvality. To však ztěžuje mírná oscilace veličin v čase.



Obr. 5.11 – Lineární regrese SD VL v čase, Hodonín – Rohatec, km 105,8 – 106,0

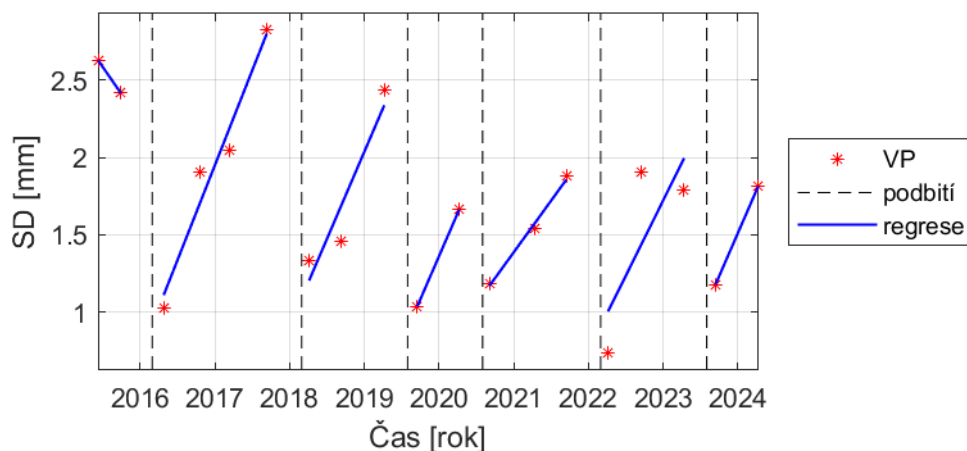
Na Obr. 5.11 vidíme lineární regrese SD VL mezi podbíjenými, jejichž termíny do 2018 byly zjištěny od správce trati a zbytek byl určen dle vývoje SD v čase. Nejpřesnější regrese je v letech 2012 až 2015 a 2018 až 2022. Nejhorší je naopak v období 2009 až 2011, kdy byla data poškozena množstvím duplicitních řádků, a 2014 až 2018, kdy došlo ke zvýšení rychlosti degradace na začátku roku 2016, aniž by se výrazně změnilo provozní zatížení. Pro dlouhé časové úseky mezi podbíjenými by možná bylo lepší regresi provádět jen z několika posledních měření, čímž by se zmenšil vliv odchylek a změn v rychlosti degradace.

Na Obr. 5.12 je vyobrazena lineární regrese SD VP v čase. Data podbití byla automaticky určena algoritmem dle poklesů SD. Všechny regrese poměrně dobře sledují SD, jen v prvním podbíjecím cyklu do roku 2014 dochází k mírnému odchylení SD od regresní přímky a k výchylce na začátku roku 2010. Podobné výchyly, kdy se kvalita skokově zlepší a pak se zase vrátí na podobné hodnoty, je třeba odfiltrovat při snaze o softwarovou detekci opravných zásahů.



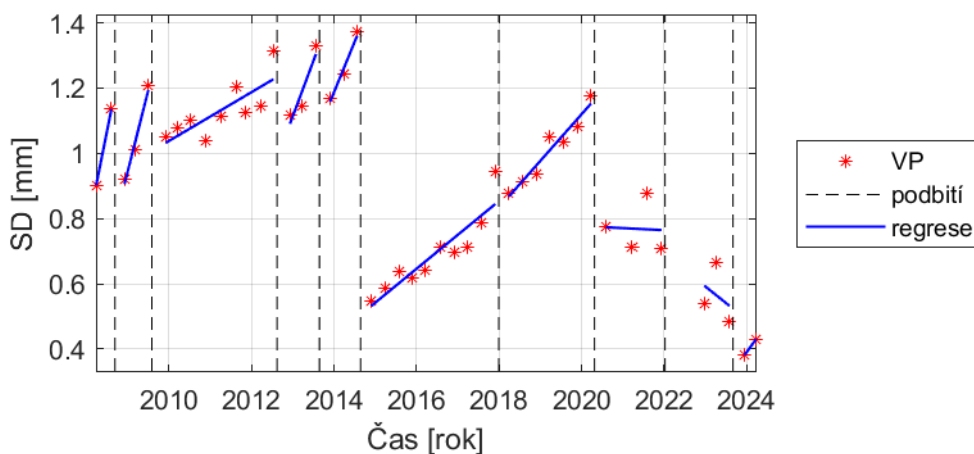
Obr. 5.12 – Lineární regrese SD VL v čase, Adamov – Blansko, K1, km 177,6 – 177,8

Na Obr. 5.13 můžeme vidět lineární regresi SD VP v čase. Termíny podbití byly automaticky určeny algoritmem dle poklesů SD. Na první pohled je viditelné, že máme k dispozici nejen kratší časovou řadu, ale také méně měření za rok, protože oproti koridorům zde MVŽSv projíždí pouze dvakrát ročně. Podbíjecí cykly v tomto úseku jsou navíc zjevně kratší než v ostatních sledovaných úsecích. Obojí snižuje přesnost regrese.



Obr. 5.13 – Lineární regrese SD VL v čase, Choťovice – Převýšov, K1, km 14,8 – 15,0

Z porovnání vývoje VL ve 3 různých úsecích to vypadá, že správci tratí plánují podbití při překonání  $SD = 2,5 \text{ mm}$ , což je hodnota, jež odpovídá mezním hodnotám pro rychlost  $80 \text{ až } 120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a traťovou třídu D viz Tab. 2.3. To znamená, že jednotliví správci tratí se snaží, aby kvalita ve sledovaných úsecích neklesla na úroveň evropských tratí s podprůměrnou úrovní kvality.

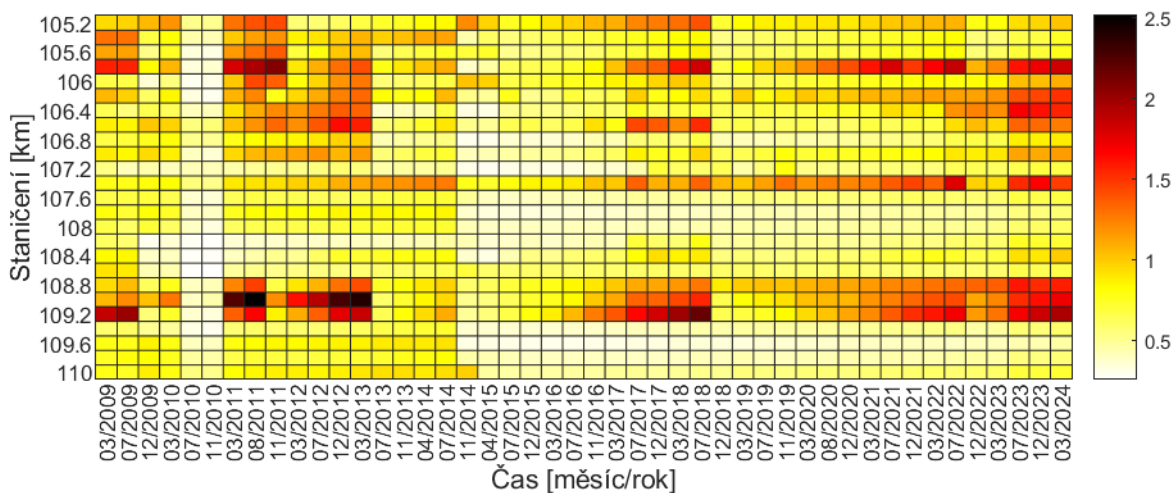


Obr. 5.14 – Lineární regrese SD VL v čase, Adamov – Blansko, K1, km 174,0 – 174,2

Na Obr. 5.14 je ukázka segmentu automaticky detekovanými časy podbíjení pomocí algoritmu, který hledá poklesy SD, které jsou buď větší než  $0,25 \text{ mm}$  nebo je rozdíl mezi okolními hodnotami větší než  $0,07 \text{ mm}$ , čímž se ověřuje, že nejde pouze o lokální oscilaci. Je však velmi těžké navrhnout soustavu kritérií, která neomylně odhalí všechna podbití a nebudou při hledání hyperaktivní nebo naopak málo aktivní. Obecně je ale lepší použít trochu hyperaktivnější algoritmus, protože nadbytečná "podbití" zvyšují přesnost regrese.

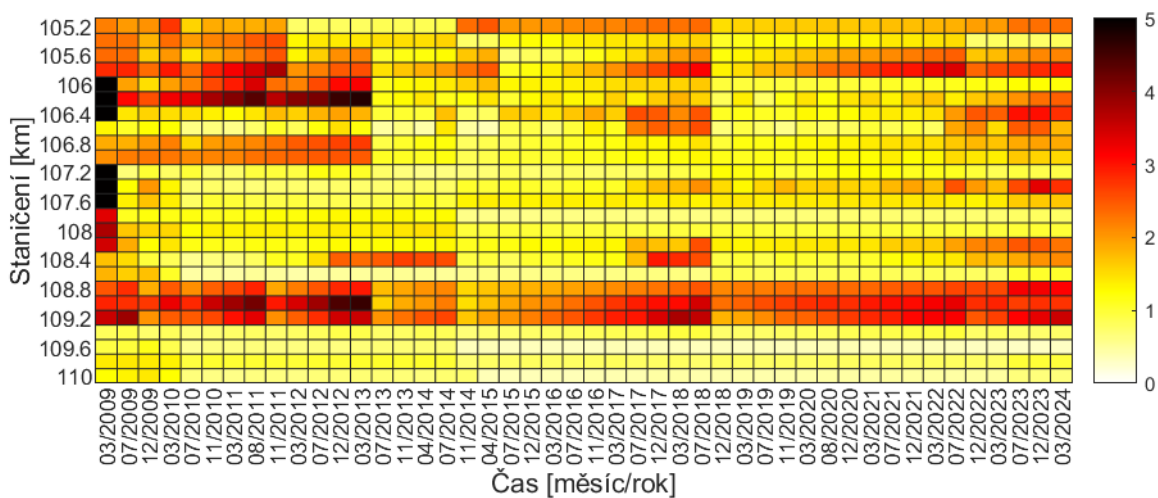
## 5.4. VÝVOJ PO DÉLCE I V ČASE

Pro získání komplexního přehledu o vývoji kvality geometrie koleje ve sledovaných úsecích, byly vytvořeny tzv. teplotní mapy, kde tmavší barva znamená vyšší SD a světlejší barva nižší SD. Na vodorovné ose je datum měření a na svislé počáteční staničení segmentů.



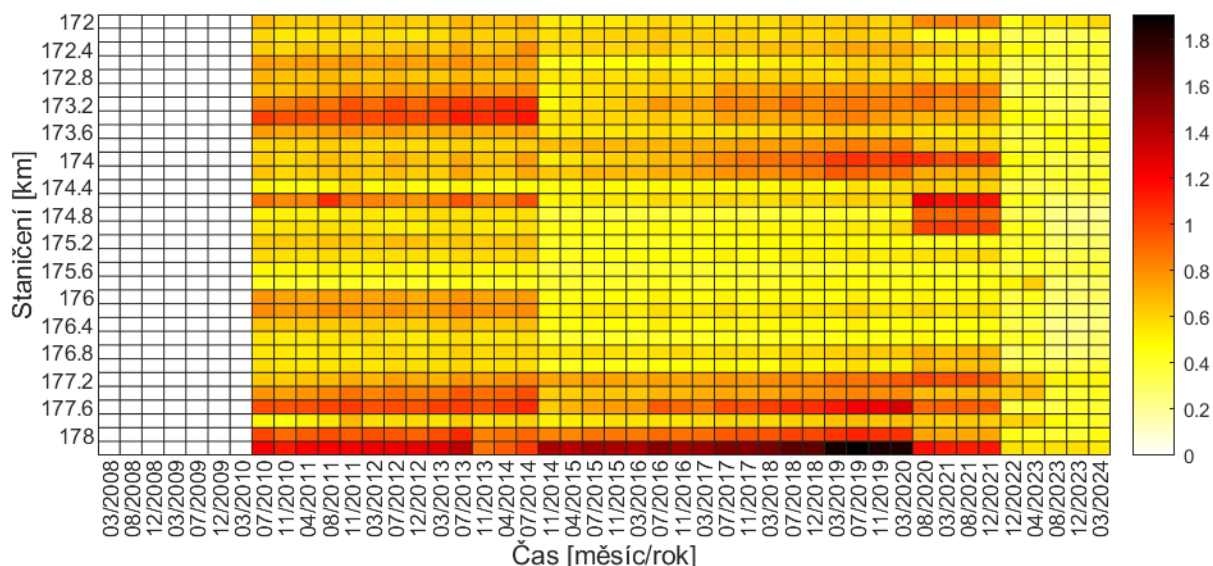
Obr. 5.15 - Vývoj SD po délce i v čase, VP, Hodonín - Rohatec, K1

Na Obr. 5.15 je vyobrazena teplotní mapa vývoje SD. Docela jednoduše lze rozeznat pravděpodobná podbití v letech 2009, 2011, 2013, 2014, 2018 a 2022. Zároveň je zřejmé, že segmenty s nižší kvalitou degradují rychleji (např. km 105,8; 107,4 a 109), zatímco u kvalitnějších segmentů se SD v čase tolik nemění (např. km 107,2; 108,2 a 109,6).



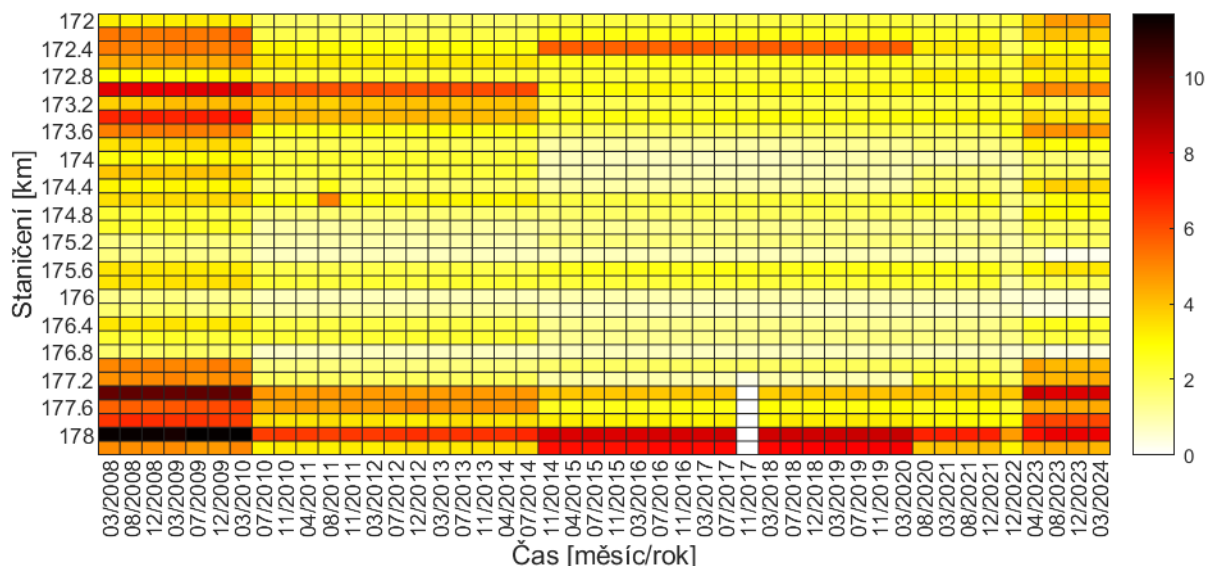
Obr. 5.16 - Vývoj SD po délce i v čase, VK D2, Hodonín - Rohatec, K1

Na Obr. 5.16 můžeme vidět vývoj SD VK D2 po délce i v čase. Podobně jako u VL jsou zřejmá pravděpodobná podbití v letech 2009, 2011, 2013, 2014, 2018 a 2022. Dále můžeme pozorovat segmenty s nízkou kvalitou ve vlnových pásmech D1 i D2 v km 105,8 a 109. Naopak v km 107,4 je kvalita ve vlnovém pásmu dobrá D2, ale špatná v pásmu D1. Kvůli vysokým hodnotám z 1. měření v roce 2009 byl rozsah barev upraven tak, aby byly lépe patrné změny SD i ve zbytku teplotní mapy.



Obr. 5.17 – Vývoj SD po délce i v čase, SL, Adamov – Blansko, K1

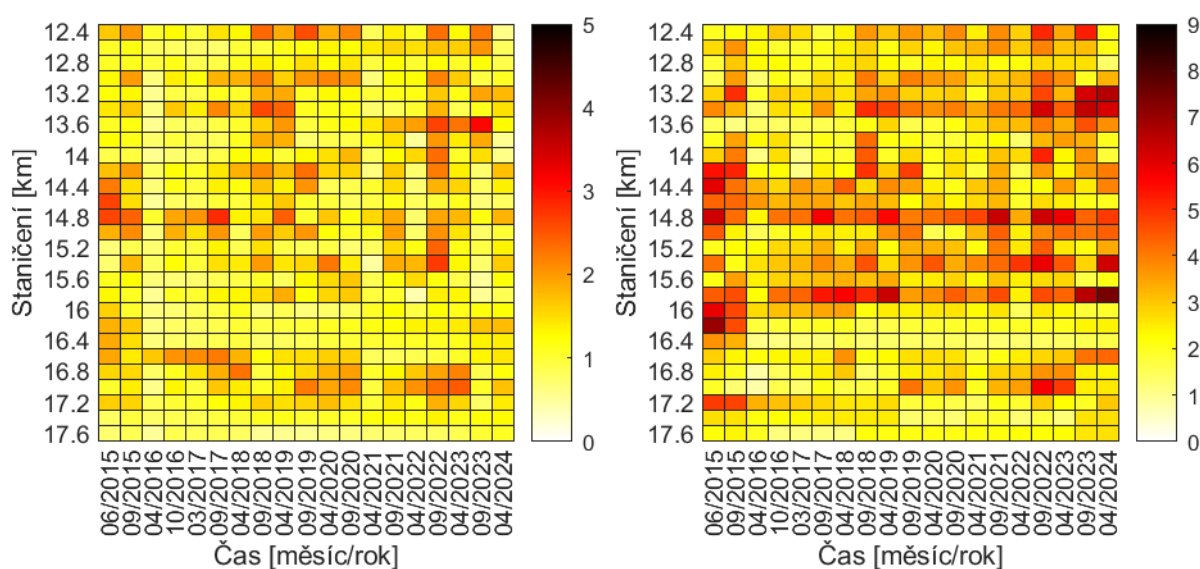
Na Obr. 5.17 můžeme vidět vývoj SD v čase i po délce. Vlivem přejmenování parametrů VL a VP nebyly získány hodnoty do března 2010. Do roku 2014 jsou hodnoty SD poměrně konstantní, načež se po pravděpodobném podbití sníží a potom pomalu stoupají až do roku 2020, kdy zřejmě došlo k dalšímu podbití. Další 4 měření se SD opět téměř nemění až do obnovy trati v roce 2022, po níž došlo k výraznému zlepšení kvality.



Obr. 5.18 – Vývoj SD po délce i v čase, SK D2, Adamov – Blansko, K1

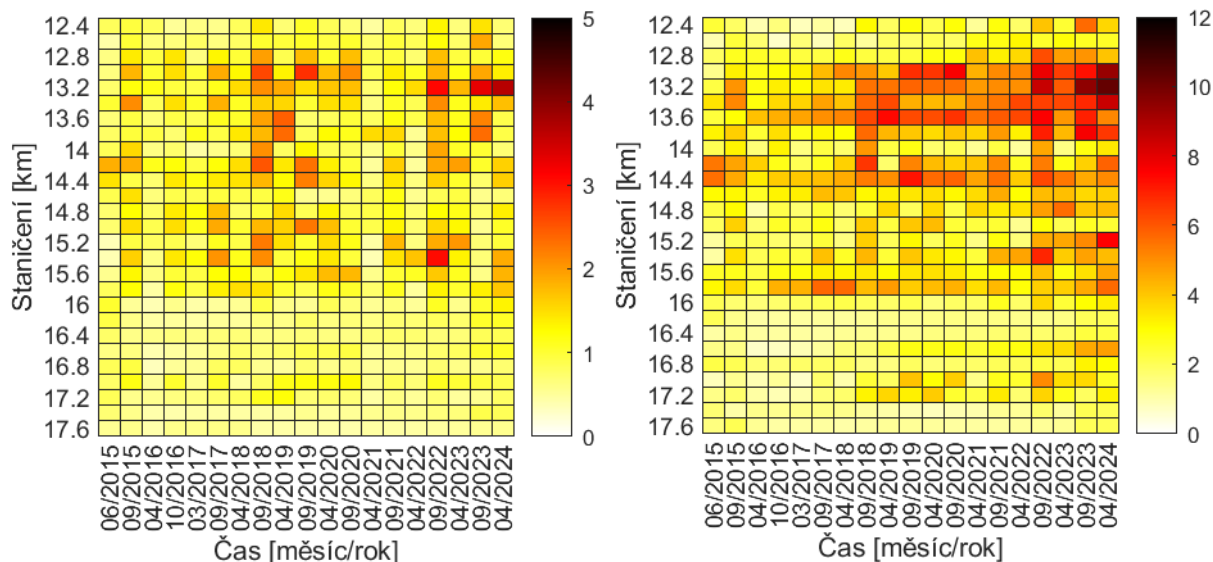
Z Obr. 5.18 je patrné, že se SK D2 na rozdíl od VL a VP v čase příliš nemění. Z teplotní mapy jsou také zřetelné pravděpodobné údržbové zásahy v letech 2010, 2014, 2020 a 2022, kdy skončila celková obnova úseku. Je zajímavé, že se kvalita může po podbití

dokonce i zhoršit, jako je tomu např. v km 172,4 a 177,6. Za zmínku stojí také skokové zhoršení kvality v km 174,6 pouze v jednom měření z léta 2011. Detailní porovnání změny signálu SK D2 z tohoto místa je na Obr. 5.23. Zároveň je dobře viditelná výrazná změna zbarvení v roce 2010, do kterého probíhalo měření ve vlnovém pásmu 1 až 70 m. Podobná změna proběhla i v roce 2023, kdy došlo ke zvýšení amplitudy signálu vlivem změny filtrace v novém MVŽSv2. V listopadu roku 2017 nebyla změřena část úseku od km 177,2, v důsledku při snížení rychlosti před vjezdem do stanice, což vyústilo v nulové hodnoty SD ve vlnovém pásmu D2, které se měří inerciálními snímači, které při nízké rychlosti nepracují.



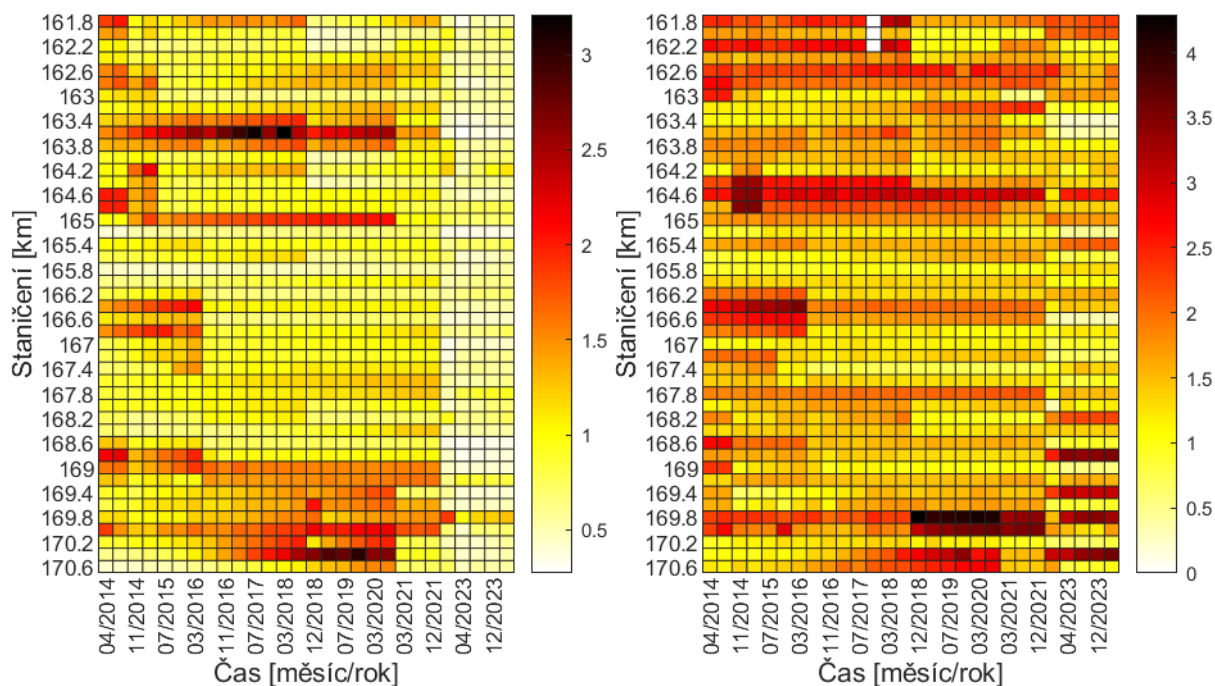
Obr. 5.19 – Vývoj SD po délce i v čase, VP (vlevo) a VK D2 (vpravo), Choťovice – Převýšov

Z Obr. 5.19 je zřejmá značná proměnlivost SD v úseku Choťovice – Převýšov a to, jak po délce, tak i v čase. Tato proměnlivost může souviset s problémy v pražcovém podloží, pravděpodobně způsobenými tím, že první část úseku leží na břehu rybníka. Skutečnost, že zde muselo být během pouhých devíti let provedeno velké množství podbití, pak potvrzuje nízkou kvalitu železničního spodku v tomto úseku. Z teplotní mapy jsou patrná pravděpodobná podbití v letech 2016, 2018, 2021, 2022, 2023 a 2024, jež byly ověřeny i v jiných grafech. .



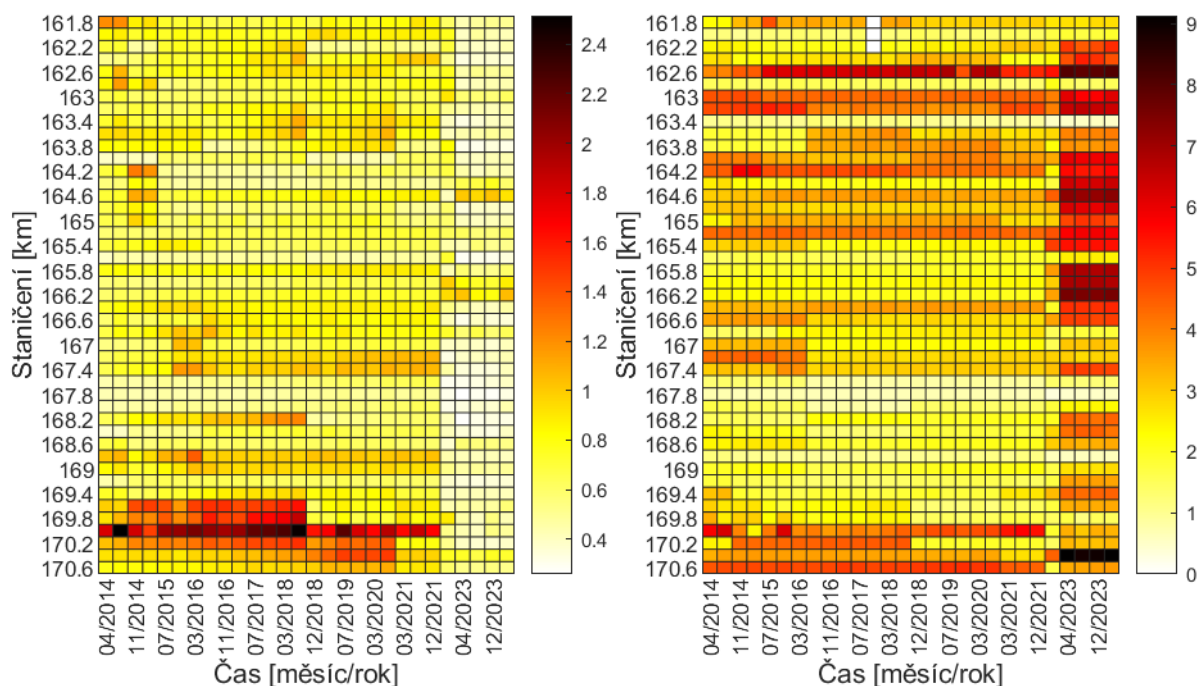
Obr. 5.20 – Vývoj SD po délce i v čase, SL (vlevo) a SK D2 (vpravo), Choťovice – Převýšov

Na Obr. 5.20 je taktéž viditelná velká proměnlivost SD po délce i v čase. Směr koleje může být ovlivněn častými změnami GPK v sérii krátkých směrových oblouků. Ve zbytku úseku od km 16,2 jsou pouze 2 delší směrové oblouky, a tak je kvalita SK mnohem vyšší.



Obr. 5.21 – Vývoj SD výšky koleje po délce i v čase, VL (vlevo) a VK D2 (vpravo), Brno – Adamov, K1

Na Obr. 5.21 je vývoj SD výšky koleje po délce i v čase v úseku Brno – Adamov, kde je množství směrových oblouků s malými poloměry a několik mostů a tunelů, díky čemuž je kvalita geometrie poměrně proměnlivá, což se projeví zejména ve vlnovém pásmu D2. U obou parametrů je zřetelná změna zbarvení po modernizaci úseku v roce 2022.



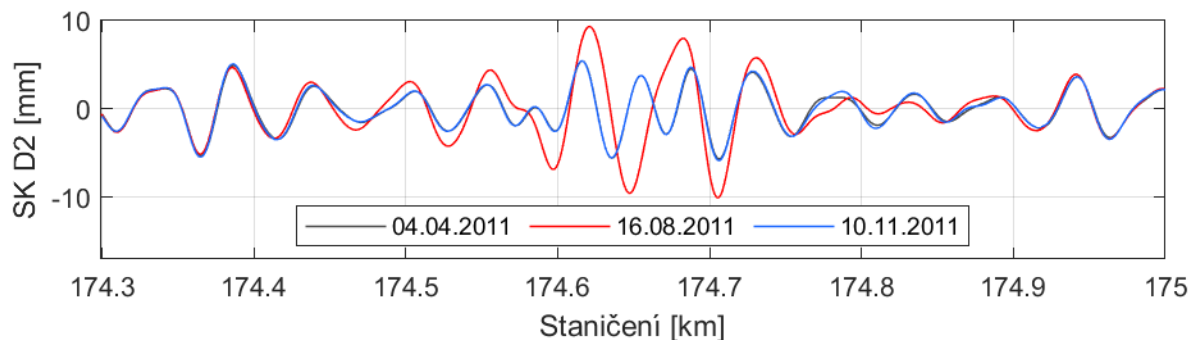
Obr. 5.22 – Vývoj SD po délce i v čase, SL (vlevo) a SK D2 (vpravo), Brno – Adamov, K1

Na Obr. 5.22 je vyobrazen vývoj SD po délce i v čase směru koleje, kde je rovněž patrné zlepšení kvality po modernizaci trati v roce 2022, které je však ihned následované skokovým zhoršením vlivem změny filtrace ve vlnovém pásmu D2. Z průběhu všech 4 parametrů je patrné, že nejhorší kvalita geometrie koleje je v posledním kilometru úseku.

Mapy vývoje SD po délce i v čase pro ostatní úseky jsou v příloze A.

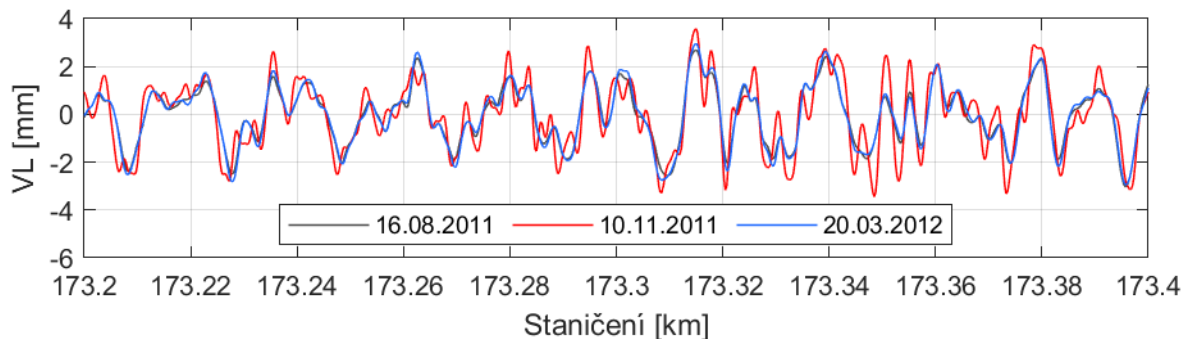
## 5.5. POROVNÁNÍ ZMĚN GPK MEZI MĚŘENÍMI

Při hodnocení kvality geometrie koleje byla objevena řada zajímavých změn signálu mezi jednotlivými měřeními. Nejzajímavější změny jsou popsány níže.



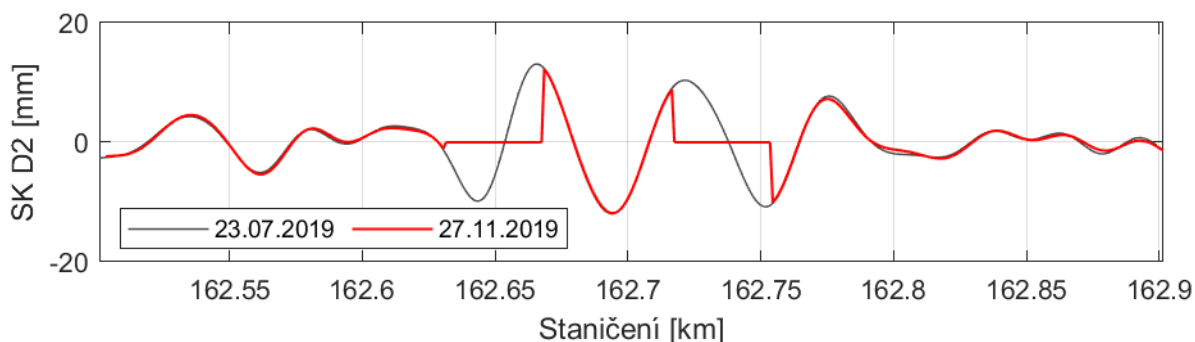
Obr. 5.23 – Porovnání 3 měření SK D2, Adamov – Blansko, K1, 2011

Na Obr. 5.23 je vyobrazeno skokové zvýšení amplitudy signálu SK D2 (červená). Signál z předchozího i následujícího měření má téměř identický průběh (černá a modrá). Pravděpodobně šlo o lokální závadu, která byla před dalším měřením opravena.



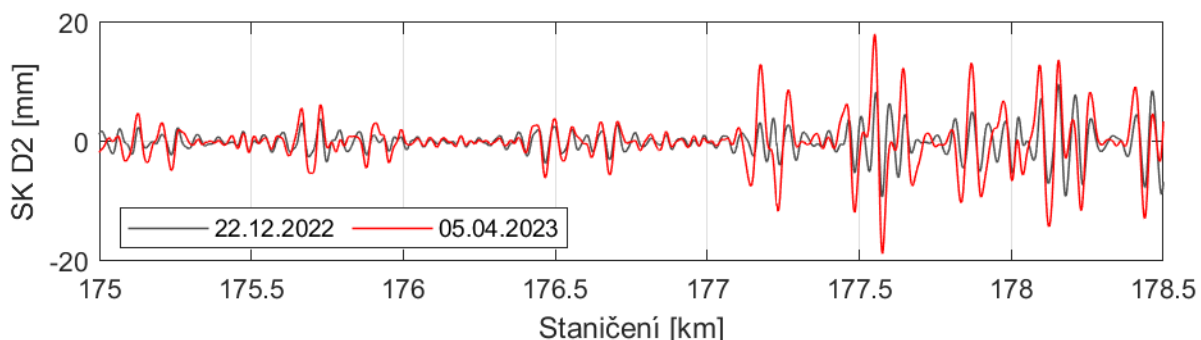
Obr. 5.24 – Porovnání 3 měření VL, Adamov – Blansko, K1, 2011–2012

Na Obr. 5.24 je přiblížen segment, kde došlo ke skokovému zhoršení SD VL (viditelné na Obr. A.9 v příloze) vlivem kombinace mírného zvýšení amplitudy signálu a přidání vlnění s krátkou vlnovou délkou. Zajímavý je návrat signálu takřka do původního tvaru.



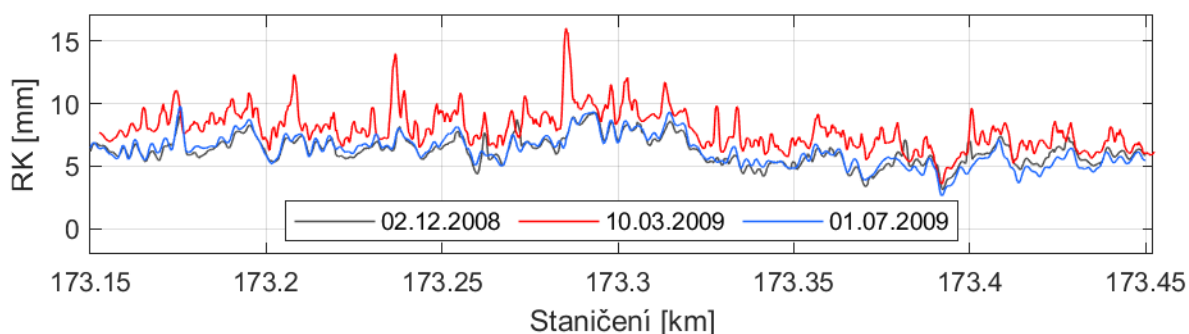
Obr. 5.25 – Porovnání 2 měření SK D2, Brno – Adamov, K1, 27. 11. 2019

Na Obr. 5.25 můžeme vidět krátký výpadek měření, který se vyskytuje v jednom měření z listopadu 2019 jak u SK D2, tak i VK D2. Podobné výpadky, způsobené nejspíše přerušením měření při snížení rychlosti MVŽSv, mají značný vliv na hodnocení pomocí TQI, který vzroste kvůli vyšší délce hranaté křivky, jak je vidět na Obr. A.4 v příloze.



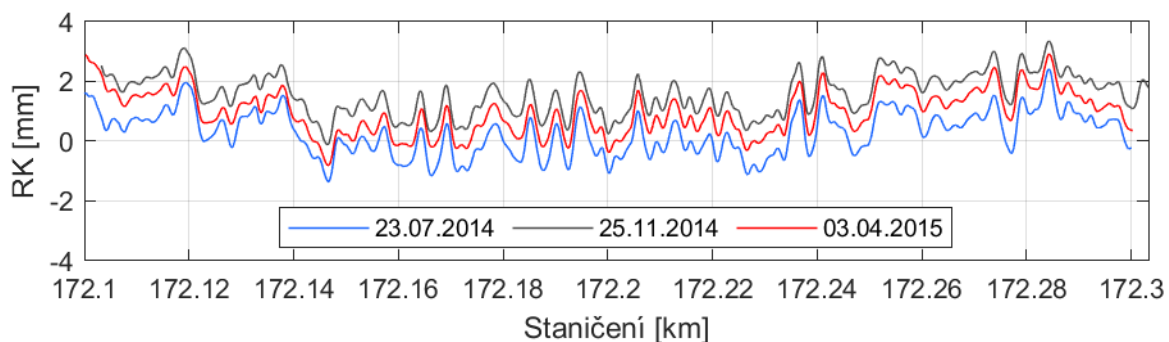
Obr. 5.26 – Porovnání 2 měření SK D2, Adamov – Blansko, K1, 2022–2023

Z Obr. 5.26 je patrné výrazné zvýšení amplitudy signálu SK D2, ke kterému došlo v roce 2023. Tato změna, která se projevuje ve všech zájmových úsecích, byla způsobena změnou filtrace v souvislosti s nasazením nového MVŽSv2 tak, aby filtry odpovídaly evropské normě [17]. Změna je nejvíce viditelná u SK D2 a o něco méně i u VK D2.



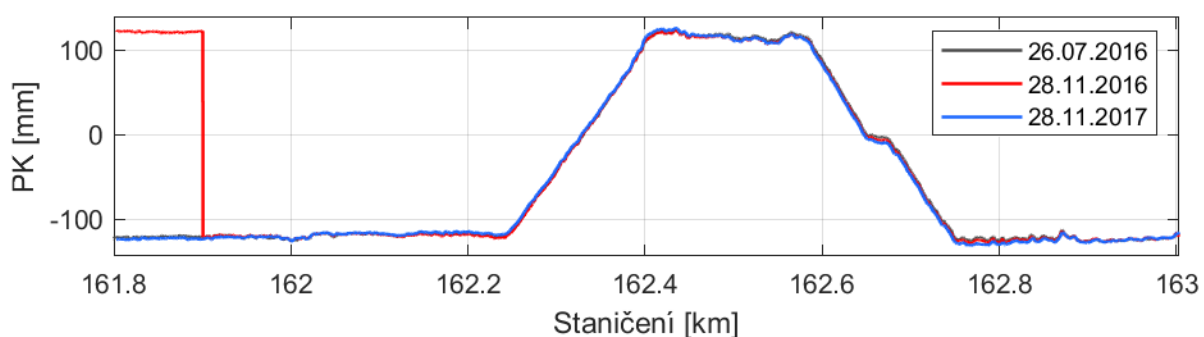
Obr. 5.27 – Porovnání 3 měření RK, Adamov – Blansko, K1, 2008–2009

Obr. 5.27 ukazuje skokový nárůst amplitudy signálu RK (červená). Signál z předchozího a následujícího měření přitom vypadá velmi podobně (černá a modrá). Je tedy nepravděpodobné, že by k opětovnému snížení amplitudy došlo v důsledku údržbového zásahu. Tento jev může být způsobený chybou měření kvůli sněhu či vlivem špatného namíření paprsku pro měření rozchodu, který se používal u staršího MVŽSv.



Obr. 5.28 – Porovnání 3 měření RK, Adamov – Blansko, K1, 2014–2015

Na Obr. 5.28 je vidět, že se signál RK posouvá mezi měřeními nahoru a dolů o necelý milimetr. Stejně se chovají i PK a KR KS. Protože jsou signály téměř stejné, jedná se nejspíš o nepřesnost měření. Toto chování nebylo způsobeno rozdíly v důsledku odlišného postavení MVŽSv (směru měření), protože všechna 3 měření byla provedena ve správném postavení. Obdobné chování signálů není příliš časté, ale ani neobvyklé. Malým změnám signálu s nízkou amplitudou nepřikládá CTD velkou důležitost, protože nedochází k překročení mezních hladin. Tento jev se neprojevuje u filtrovaných parametrů, takže nedochází k ovlivnění úsekového hodnocení, které bylo prováděno i v této práci. I tak by se však nepřesnostem měření měla do budoucna věnovat pozornost.



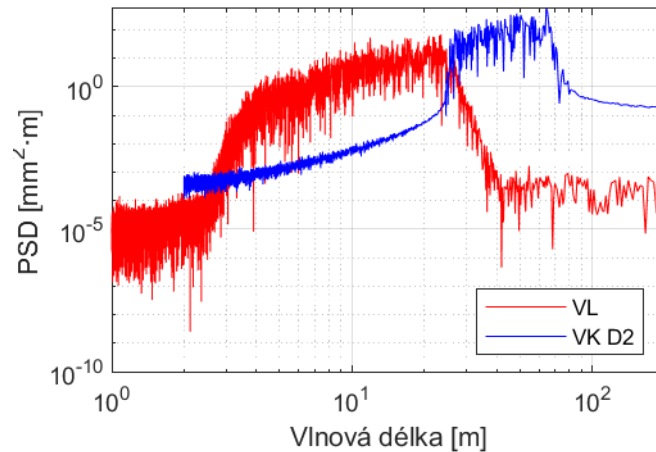
Obr. 5.29 – Porovnání 3 měření PK, Brno – Adamov, K1, 2016–2017

Na Obr. 5.29 je vyobrazena zjevná chyba v měření PK, která se vyskytuje ve třech měřeních v úseku Brno – Adamov z let 2016 a 2017. Při těchto měřeních došlo k převrácení znaménka vlivem špatného určení kolejnicových pásů, k němuž může dojít na začátku či konci traťového úseku. Tento jev byl objeven díky grafům PSD, jejichž průběh se vlivem ostrého skoku v km 161,9 úplně změnil, jak je vidět na Obr. A.15 v příloze.

## 5.6. VÝKONOVÁ SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA (PSD)

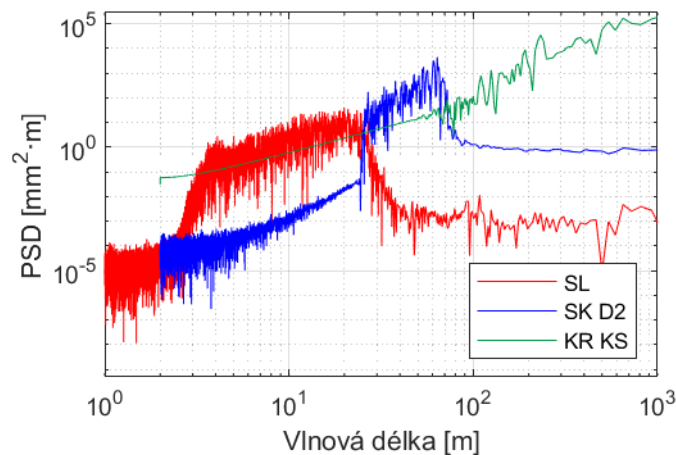
### 5.6.1. POROVNÁNÍ PARAMETRŮ

Níže prezentované log-log grafy byly vytvořeny za účelem lepšího pochopení průběhu PSD jednotlivých GPK. Dle předpokladů platí přímá úměra mezi délkou hodnoceného segmentu koleje a mírou detailnosti průběhu PSD zejména v dlouhých vlnových délkách. Vyšší detailnost PSD však ztěžuje porovnávání jejich průběhů.



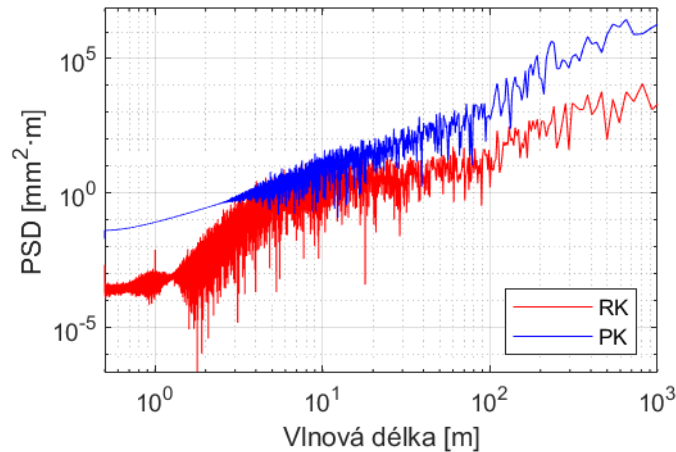
Obr. 5.30 – Log-log graf PSD VL a VK D2, Adamov – Blansko, K1, 5. 8. 2020

Na Obr. 5.30 je jasně vidět filtrace VL (vlnové pásmo D1 tj. 3 až 25 m) a VK D2 (vlnové pásmo D2 tj. 25 až 70 m) díky znatelnému poklesu PSD mimo vybrané vlnové pásmo. PSD obou parametrů na sebe ve filtrovaných vlnových délkách plynule navazuje.



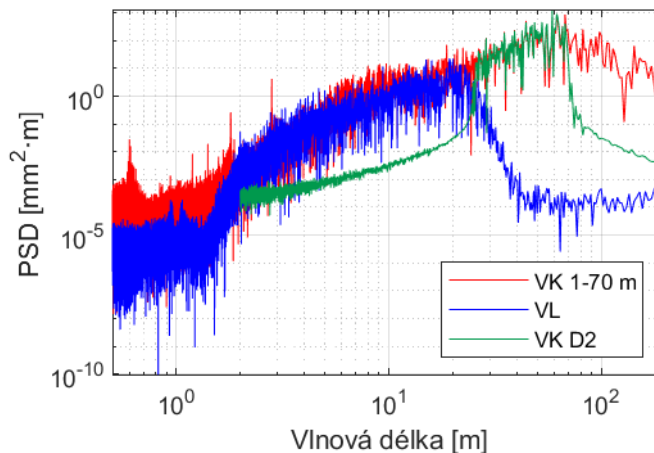
Obr. 5.31 – Log-log graf PSD SL, SK D2 a KR KS, Adamov – Blansko, K1, 5. 8. 2020

Obr. 5.31 zobrazuje průběh PSD SL a SK D2, který je velmi podobný jako VL a VK D2. Dvojice parametrů byla doplněna ještě o křivost, která je měřená jako směr koleje ve vlnovém pásmu od 70 m do nekonečna. PSD křivosti však nenavazuje na zbylé parametry.



Obr. 5.32 – Log-log graf PSD RK a PK, Adamov – Blansko, K1, 5. 8. 2020

Z Obr. 5.32 je patrné, že rozchod a převýšení koleje žádnou filtrací zjevně neprošly. Můžeme vidět, že PK se měří pro vlnové délky od 3 m, kdežto RK je měřen od 1 m. Zajímavé je zúžení PSD RK kolem vlnové délky 1,2 m, která odpovídá dvojnásobku vzdálenosti pražců. Znatelná je také malá špička (*peak*) ve vlnové délce 1 m. PSD PK má mnohem plošší průběh než RK, jenž se na začátku ohýbá dolů.



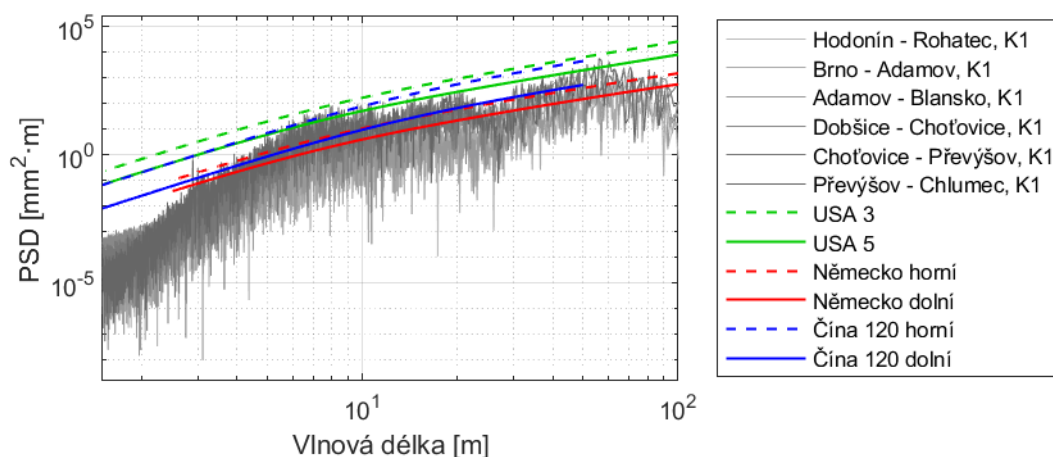
Obr. 5.33 – Log-log graf PSD VK 1-70 m, VL a VK D2, Hodonín – Rohatec, K1, 2010

Na Obr. 5.33 můžeme vidět porovnání PSD VK ve vlnovém pásmu 1 až 70 m, která se používala do roku 2010 v porovnání s VL a VK D2, jež jsou používány dnes. V rozmezí 3 až 70 m se průběh všech tří parametrů velmi podobá. Pro dlouhé vlny PSD původní VK klesá pomaleji. Zajímavá je výrazná špička u vlnové délky 0,6 m, což odpovídá rozdělení pražců.

Vzhledem k tomu, že jsou k dispozici pouze směr a výška koleje filtrované do vlnových pásem D1 a D2, bylo přistoupeno k jejich spojení do společného grafu.

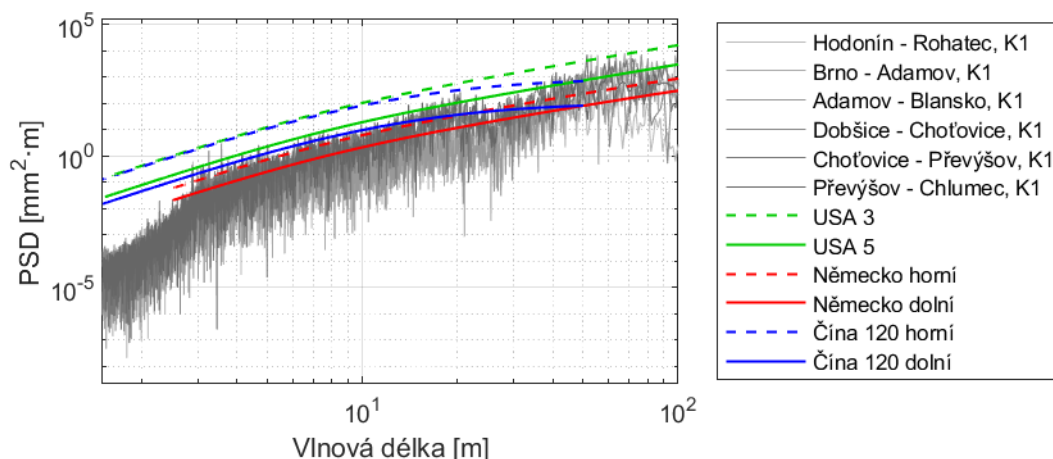
## 5.6.2. POROVNÁNÍ S MEZNÍMI KŘIVKAMI

Pro vzájemné porovnávání PSD z různých tratí a měření je užitečné vybrat mezní křivku, která co nejlépe odpovídá geometrii kolejí ze zájmových úseků. Protože nejsou k dispozici data z celé železniční sítě pro nějakou širší analýzu, bylo provedeno pouze porovnání zájmových úseků.



Obr. 5.34 – Porovnání PSD VL a VK D2 s mezními křivkami, září 2023

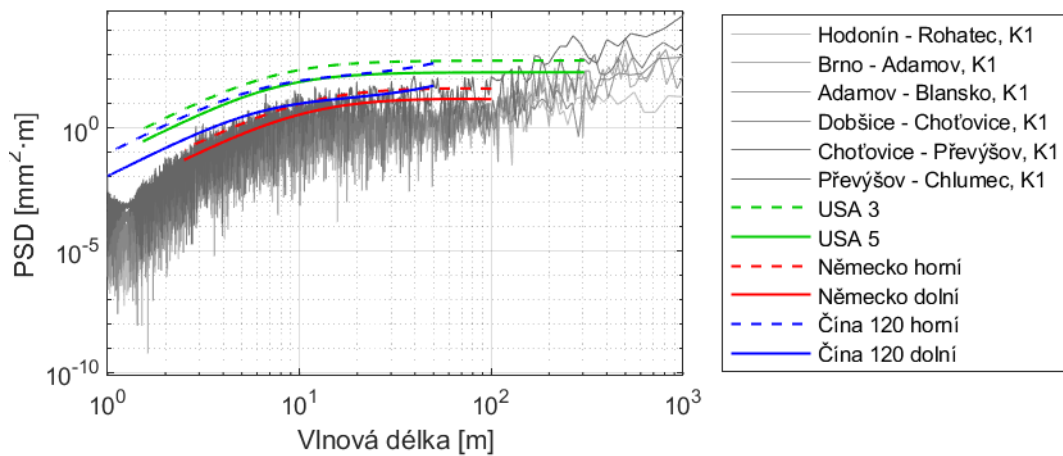
Obr. 5.34 ukazuje průběh PSD výšky koleje a mezních křivek prezentovaných v části 4.3.1. Aby byl průběh jednotlivých úseků vůbec rozeznatelný, byly jim přiřazeny různé odstíny šedé barvy. Mezní křivky poměrně dobře kopírují průběh PSD VK. Většina úseků se pohybuje pod mezními křivkami z USA.



Obr. 5.35 – Porovnání PSD SL a SK D2 s mezními křivkami, září 2023

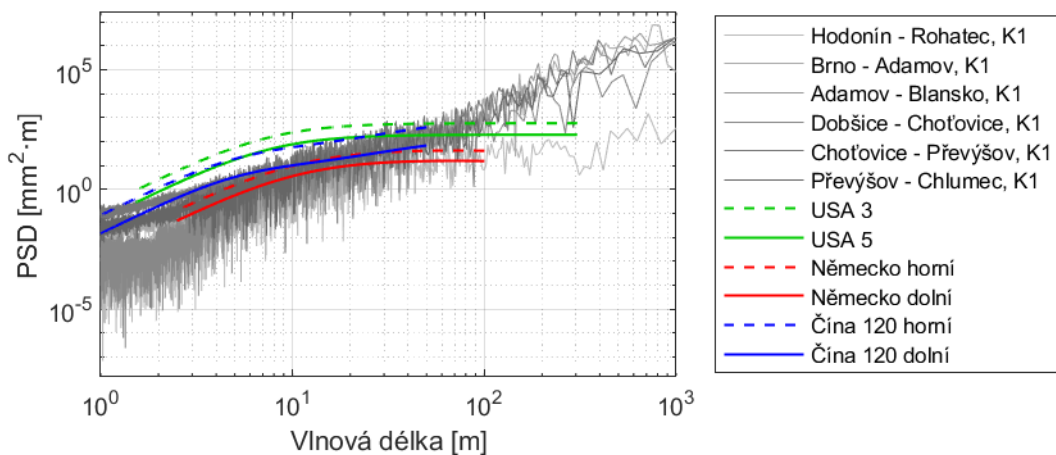
Průběh PSD směru koleje vyobrazený na Obr. 5.35 vypadá na první pohled podobně jako u výšky koleje, avšak v rozmezí vlnových délek od 3 do 10 m se PSD drží pod čínskými

mezními křivkami pro rychlost 120 km·h<sup>-1</sup> a dokonce i pod německou horní křivkou. Naproti tomu v pásmu dlouhých vln se PSD přibližuje i mezním křivkám z USA.



Obr. 5.36 – Porovnání PSD RK s mezními křivkami, září 2023

Na Obr. 5.36 vidíme průběh PSD rozchodu koleje a jednotlivých mezních křivek, z nichž české geometrii nejvíce odpovídají čínské mezní křivky pro rychlost 120 km·h<sup>-1</sup>. V rozmezí dlouhých vln se PSD odklání nahoru od mezních křivek z USA a Německa.



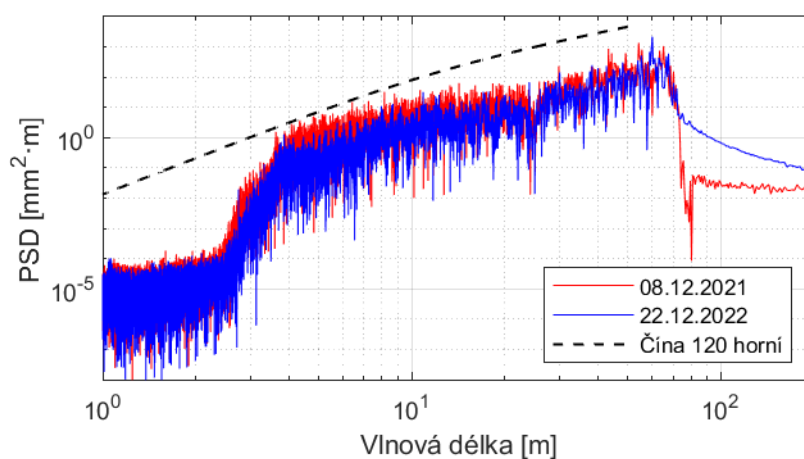
Obr. 5.37 – Porovnání PSD PK s mezními křivkami, září 2023

Z porovnání průběhu PSD a mezních křivek pro PK Obr. 5.37 se zdá, že americké a německé mezní křivky pracují s filtrovanými hodnotami, protože kopírují spíše průběh z úseku Hodonín – Rohatec (nejsvětější šedá), který je v přímé, zatímco průběh z ostatních úseků se směrovými oblouky se pro vlnové délky od 30 až 50 m odklání nahoru.

Na základě výše uvedeného porovnání byla pro další analýzu vybrána horní mezní křivka z Číny na 120 km·h<sup>-1</sup>, která svým tvarem přibližně odpovídá české geometrii a příliš se nepřekrývá s PSD u všech parametrů.

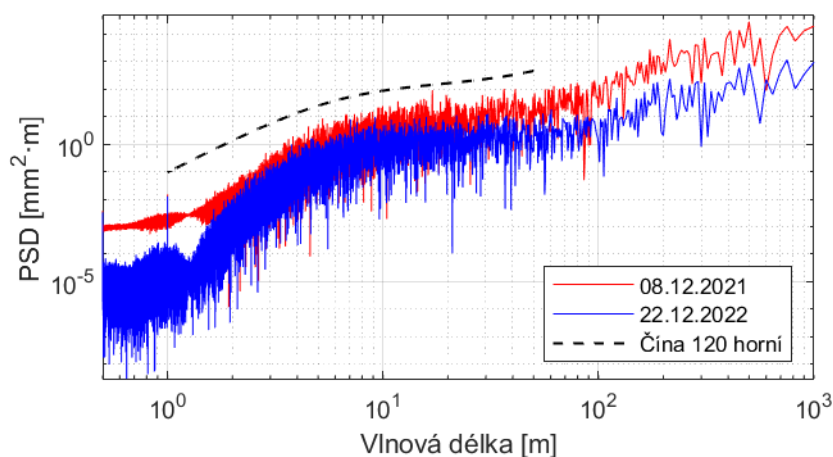
### 5.6.3. POROVNÁNÍ MĚŘENÍ

Výkonová spektrální hustota umožňuje posouzení efektivity provedené údržby či obnovy, protože díky ní vidíme, jak míru zlepšení kvality geometrie koleje, tak i zastoupení jednotlivých vlnových délek. Změny po podbití nejsou v grafu PSD příliš znatelné, a proto budou prezentovány pouze grafy před a po modernizaci úseku Brno – Blansko.



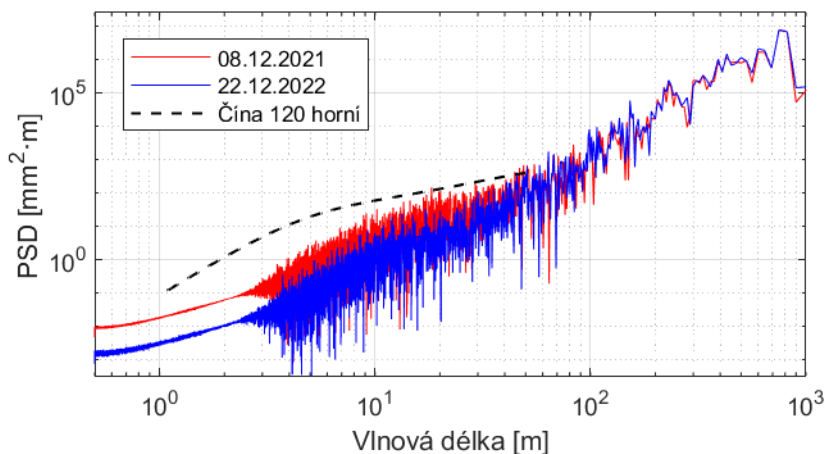
Obr. 5.38 – Změna PSD VP a VK D2 vlivem obnovy, Brno – Adamov, 2021–2022

Z Obr. 5.38 je patrné zlepšení kvality VK (pokles PSD) po celkové obnově úseku. Největší pokles PSD se odehrál ve vlnovém pásmu D1, zatímco v pásmu D2 není tak výrazný. PSD z roku 2021 vykazuje zvláštní propad u vlnové délky 80 m. Reakce PSD VK a SK na obnovu byla velmi podobná, a tak je prezentován pouze graf PSD VK.



Obr. 5.39 – Změna PSD RK vlivem obnovy, Adamov – Blansko, 2021–2022

Na Obr. 5.39 vidíme, že se RK po obnově výrazně zlepšil ve všech vlnových délkách, což je logické, protože došlo ke kompletní výměně železničního svršku, z důvodu značného opotřebení v obloucích malého poloměru.

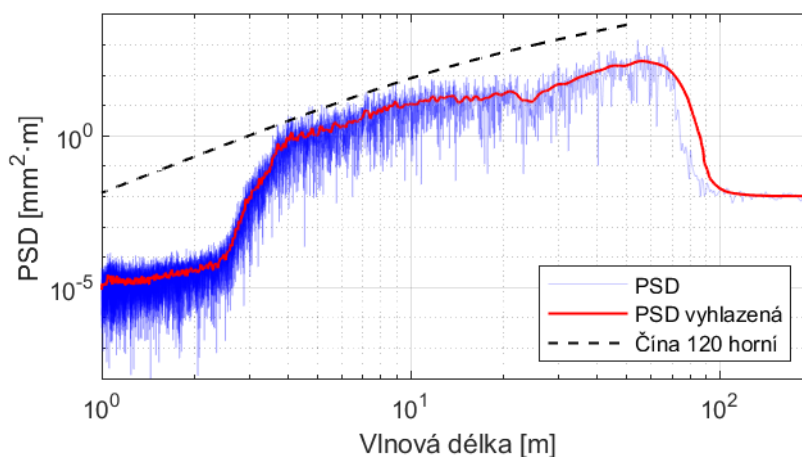


Obr. 5.40 – Změna PSD PK vlivem obnovy, Brno – Adamov, 2021–2022

Na Obr. 5.40 je zřetelný rozdíl v průběhu PSD PK před obnovou a po ní. K největší změně došlo ve vlnových délkách do 100 m. Stejně jako u RK je průběh PSD v rozmezí dlouhých vln velmi podobný, protože navržené GPK se příliš nezměnily.

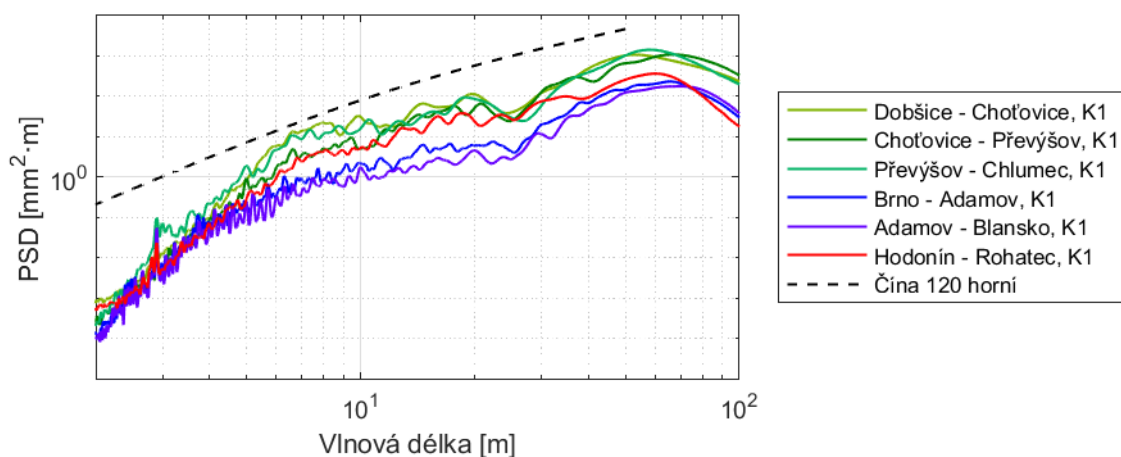
#### 5.6.4. POROVNÁNÍ TRATÍ

Cílem tohoto oddílu je porovnání průběhu PSD z různých tratí, k čemuž byla vybrána poslední dostupná měření, na nichž jsou dobře patrné odlišnosti v průběhu PSD. Výrazné zašumění PSD zejména v kratších vlnových délkách ztěžuje porovnávání více průběhů v jednom grafu. Proto byly PSD v tomto oddílu vyhlazeny pomocí funkce MATLABu *smoothdata*. Po vyhlazení však zmizí špičky a jiné drobné detaily.



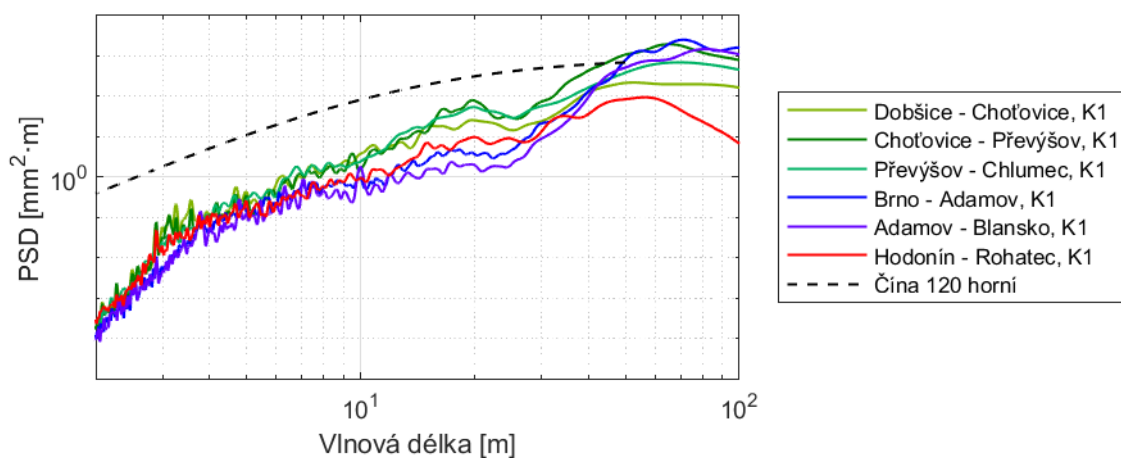
Obr. 5.41 – Vyhazení PSD VL a VK D2 vlivem obnovy, Brno – Adamov, 20. 3. 2024

Na Obr. 5.41 je ukázka vyhlazení PSD VK (červeně) spolu s původním signálem (modře). Vlivem logaritmického zobrazení je účinnost vyhlazení závislá na vlnové délce.



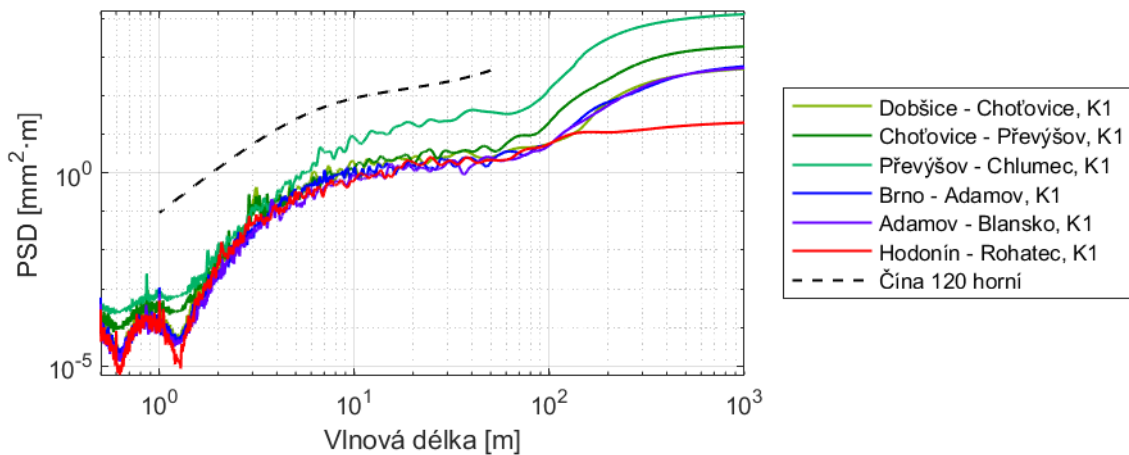
Obr. 5.42 – Porovnání PSD VL a VK D2 ze všech úseků

Z Obr. 5.42 je zřejmé, že nejvyšší kvalita VK je v nedávno modernizovaném úseku Adamov – Blansko (fialová), zatímco nejnižší kvalita VK je v úseku Dobšice – Chlumeck nad Cidlinou (zelená). I přes vyhlazení je patrná špička ve vlnové délce 2,9 m.



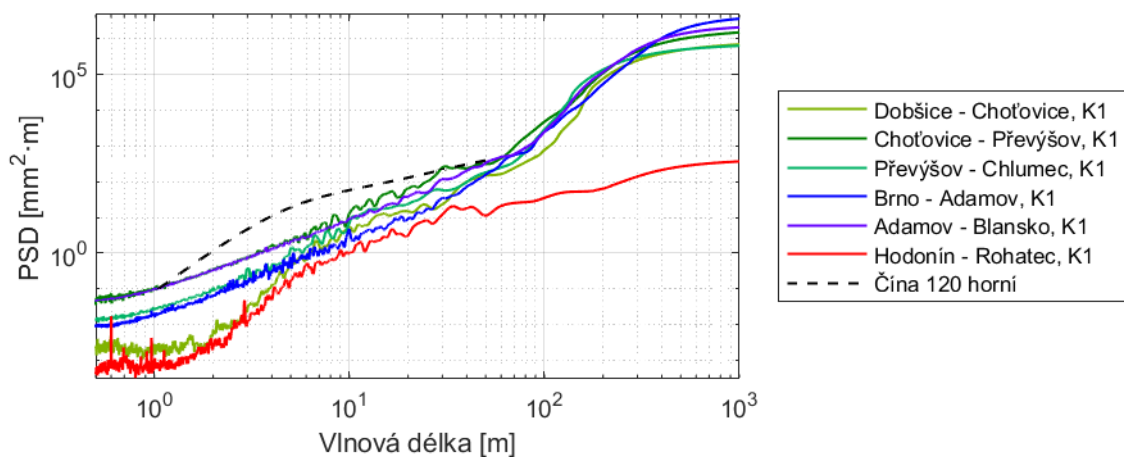
Obr. 5.43 – Porovnání PSD SL a SK D2 ze všech úseků

Na Obr. 5.43 můžeme vidět, že kvalita SK je až do vlnové délky 35 m nejlepší v úseku Adamov – Blansko, avšak v rozmezí dlouhých vln je lepší v úseku Hodonín – Rohatec, což odpovídá tomu, že jde o přímý úsek s vyšší traťovou rychlostí. Podobně jako u výšky koleje je kvalita nejhorší v úseku Dobšice – Chlumeck nad Cidlinou. Ve vlnovém pásmu D2 se však přibližuje úsek Brno – Adamov.



Obr. 5.44 – Porovnání PSD RK ze všech úseků

Na Obr. 5.44 je vyobrazen průběh PSD RK, ze kterého plyne, že nejhorší kvalita RK je v úseku Převýšov – Chlumeck nad Cidlinou a nejlepší je v úseku Hodonín – Rohatec, který je celý přímý. Rozptyl PSD všech úseků s výjimkou toho nejhoršího ve vlnovém pásmu D1 je však poměrně malý.

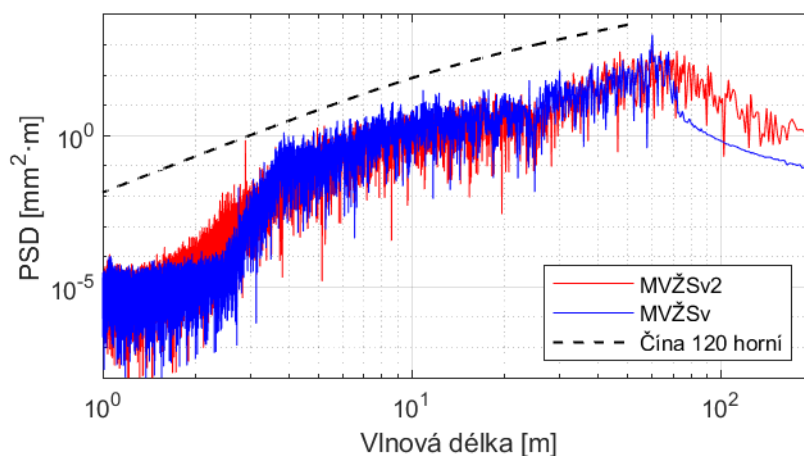


Obr. 5.45 – Porovnání PSD PK ze všech úseků

Obr. 5.45 ukazuje průběh PSD PK, z něhož plyne, že nejvyšší kvalita PK je v úseku Hodonín – Rohatec. V závislosti na zvolené vlnové délce je nejnižší kvalita v úsecích Choťovice – Převýšov, Brno – Adamov či Adamov – Blansko. Z grafu je jasně vidět výrazný rozdíl mezi přímým úsekem Hodonín – Rohatec a ostatními úseky s množstvím oblouků.

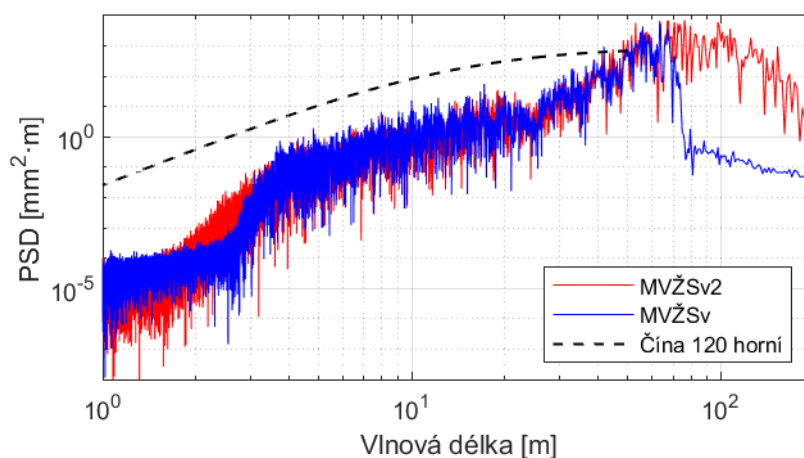
## 5.6.5. POROVNÁNÍ ZMĚN VE ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ

Od prvního získaného měření z roku 2008 došlo k několika změnám MVŽSv a také k úpravám používaných filtrů, což lze pozorovat na PSD jednotlivých parametrů v letech 2010, 2017 a 2023. V roce 2023 byl původní MVŽSv nahrazen novým MVŽSv2.



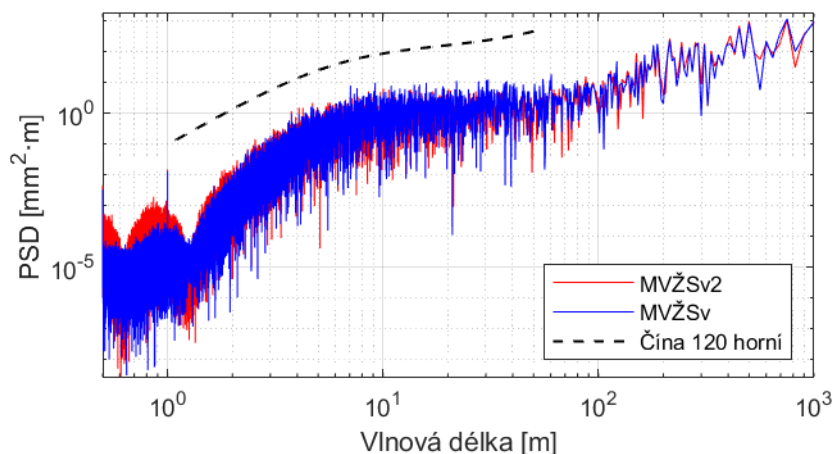
Obr. 5.46 – PSD VP a VK D2 z MVŽSv a MVŽSv2, Brno – Adamov, K1, 2022–2023

Na Obr. 5.46 je vyobrazen typický průběh PSD VP a VK D2 ze dvou měření, kde je velmi dobře vidět rozdíl ve filtraci parametrů, a to jak u krátkých, tak u dlouhých vln, díky čemuž PSD z MVŽSv2 klesá mimo vymezený rozsah pomaleji. Zajímavá je špička u vlnové délky 2,9 m, která se objevuje téměř ve všech sledovaných úsecích. Vzhledem k tomu, že se vyskytuje ve více měřeních MVŽSv2, ačkoliv ne ve všech je tak výrazná, mohlo by se jednat o systematickou chybu měření.



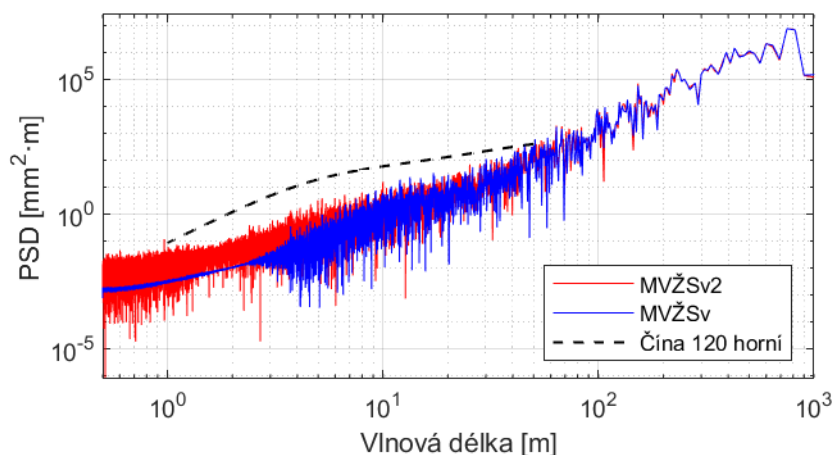
Obr. 5.47 – PSD SP a SK D2 z MVŽSv a MVŽSv2, Brno – Adamov, K1, 2022–2023

Na Obr. 5.47 vidíme porovnání PSD SP a SK D2 z MVŽSv a MVŽSv2, kde je rovněž vidět rozdíly ve filtraci krátkých i dlouhých vln. Na rozdíl od výšky koleje je odříznutí dlouhovlnných výchylek ještě výraznější. V některých zájmových úsecích se podobně jako u VK vyskytuje špička ve vlnové délce 2,9 m, ovšem většinou není tak výrazná.



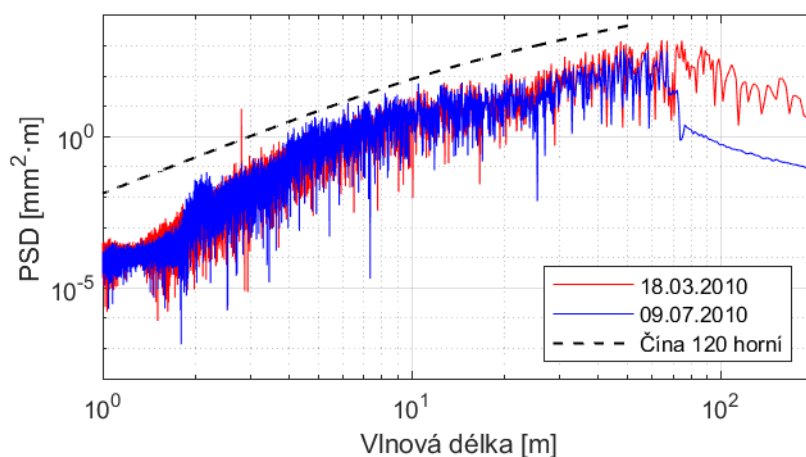
Obr. 5.48 – PSD RK z MVŽSv a MVŽSv2, Brno – Adamov, K1, 2022–2023

Na Obr. 5.48 můžeme vidět rozdíly v PSD RK z MVŽSv a MVŽSv2, které mají velmi podobný průběh a liší se pouze v rozmezí krátkých vln. PSD z obou měřicích vozů vykazují znatelný pokles u vlnových délek 0,6 a 1,2 m, což je vidět také na Obr. 5.44. Zajímavá je výrazná špička v PSD MVŽSv u vlnové délky 1 m, která se vyskytuje ve velké části měření v období 2017 až 2022.



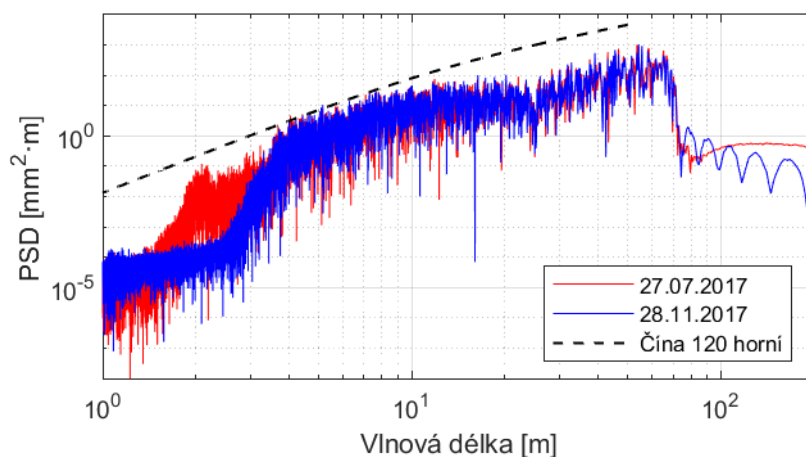
Obr. 5.49 – PSD PK z MVŽSv a MVŽSv2, Brno – Adamov, K1, 2022–2023

Z Obr. 5.49 je patrné, že PSD PK z MVŽSv a MVŽSv2 poměrně liší zejména do vlnové délky 10 m. Z průběhu PSD to vypadá, jako by MVŽSv měřil PK až od vlnové délky 2 m. Dle informací od CTD se změnil způsob měření PK, které je nyní přesnější.



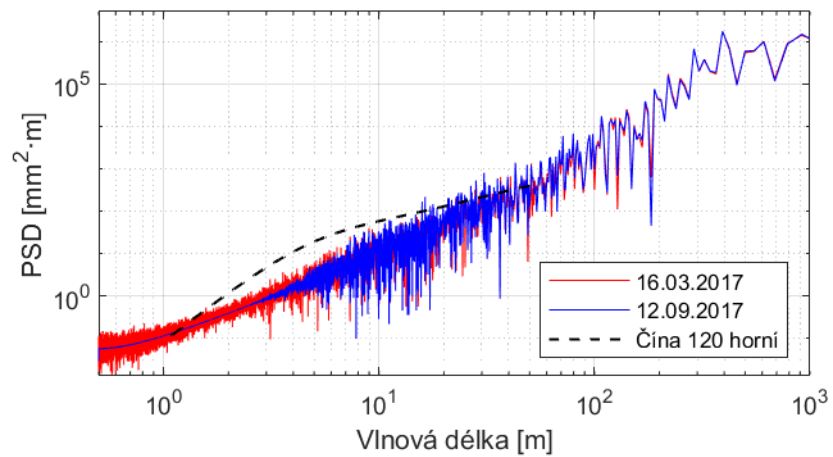
Obr. 5.50 – Porovnání PSD VL a VK D2, Adamov – Blansko, K1, 18. 3. 2010 – 9. 7. 2010

Na Obr. 5.50 je vyobrazeno porovnání PSD VL a VK D2 ze dvou měření v roce 2010, kdy došlo k úpravě filtrace směru i VK zejména v dlouhých vlnových délkách, kdy starší PSD není tolik odříznutá, podobně jako je tomu nyní u MVŽSv2. Zajímavá je výrazná špička kolem vlnové délky 2,81 m, která je přítomná ve všech měřeních směru a výšky koleje do roku 2010.



Obr. 5.51 – Porovnání PSD VL a VK D2, Brno – Adamov, K1, 27. 7. 2017 – 28. 11. 2017

Na Obr. 5.51 vidíme změnu filtrace v rozmezí krátkých vln do 3 m, která se objevuje u směru i výšky koleje. V letech 2010 až 2017 se pro filtraci do vlnového pásma D1 používal jiný filtr, do kterého se dostaly i odchylky s vlnovou délkou od 2 m. Zajímavá je oscilace PSD od vlnové délky 70 m, která se objevuje v některých měřeních z trati Brno – Blansko. Tento jev nejspíš vzniká při měření nebo zpracování signálu. Má tendenci se objevit v jednom měření a následně zmizet, načež se po několika měřeních znovu objeví a potom zase zmizí.



Obr. 5.52 – Porovnání PSD PK, Choťovice – Převýšov, 16. 3. 2017 – 12. 9. 2017

Z Obr. 5.52 je zúžení PSD PK ve vlnovém pásmu do 2 m, které lze najít ve všech měřeních v letech 2017 až 2023. Tato změna byla způsobena úpravou měřicího zařízení.

## 6. SOUHRN VÝSLEDKŮ

Disertační práce se zabývala analýzou a hodnocením kvality geometrických parametrů koleje (GPK) naměřených měřícím vozem pro železniční svršek (MVŽSv) ve vybraných traťových úsecích. Hlavním cílem bylo lepší pochopení vývoje kvality geometrie koleje a porovnání veličin pro hodnocení kvality geometrie koleje, které slouží jako hlavní podklad pro efektivní plánování údržby a obnovy.

### **Korelační analýza GPK a veličin**

Byla nalezena silná korelace mezi převýšením a křivostí koleje. Střední až silná korelace existuje mezi směry a výškami obou kolejnicových pásů. To je poměrně logické, protože odchylky směru kolejnicových pásů odpovídají změnám rozchodu koleje a odchylky výšek odpovídají změnám převýšení koleje. Statisticky významná korelace však nebyla nalezena mezi směrem a výškou koleje, což naznačuje, že vady GPK ve výšce a směru nebývají na stejném místě. To je logické, protože směrové a výškové vedení tratí spolu nesouvisí. Směrodatná odchylka (SD) vykazuje střední až silnou korelaci s indexem kvality koleje (TQI) a fraktální dimenzí (FD), které mezi sebou mají velmi silnou korelaci.

### **Průběh veličin po délce koleje**

SD má nejhladší průběh a dobře kopíruje tvar hodnoceného signálu po délce koleje. TQI je oproti SD citlivější na lokální závady a bohužel také výpadky měření. FD má velmi podobný tvar jako TQI, ale vykazuje značnou oscilaci závislou na vlnové délce signálu. Proto se i s ohledem na jejich silnou korelaci jako lepší veličina jeví TQI. Hlavní nevýhodou TQI je vyšší citlivost na lokální výchylky a výpadky měření. Lokální závady (ID) lze použít pro hodnocení kvality, ale mimo problematická místa mají nulové hodnoty. Proto se hodí spíše pro identifikaci izolovaných poruch, které ohrožují bezpečnost provozu.

Pro smysluplné hodnocení kvality rozchodu a převýšení koleje pomocí SD by bylo potřeba rozchod a převýšení koleje filtrovat do vlnových pásem D1 (3 až 25 m) a D2 (25 až 70 m). FD lze naopak použít bez problémů i pro celkové parametry, protože měří pouze drsnost signálu a nenechá se ovlivnit jeho amplitudou (jako SD) nebo délkou (jako TQI).

## **Vývoj kvality v čase**

Ve všech úsecích je dobře patrné cyklické chování kvality VK, kdy se střídá postupná degradace a zlepšení kvality vlivem podbití. Kvalita SK v přímých úsecích se v čase příliš nemění, a to zejména ve vlnovém pásmu D2. Segmenty s nižší počáteční kvalitou degradují rychleji než kvalitnější segmenty. Koleje s vyšším provozním zatížením vykazují rychlejší degradaci. Lineární regrese hodnot veličin mezi podbíjenými umožňuje sledování rychlosti degradace. Pro její efektivní stanovení je však důležité vytvoření jednotné databáze s informacemi o provozním zatížení v časech měření a o historii provedených opravných zásahů. Pokud ji neznáme, můžeme časy, kdy byla údržba provedena, odhadnout podle vývoje kvality v čase a po délce koleje. K tomu můžeme využít speciálně vytvořené algoritmy či strojové učení, které ale vyžaduje značné množství dat pro jeho natrénování.

## **Výkonová spektrální hustota (PSD)**

PSD umožňuje detailní analýzu GPK, která je velmi užitečná hlavně pro diagnostiku měřících zařízení a způsobu zpracování naměřených dat. PSD umožňuje zkoumání frekvenčního složení signálů včetně tvaru použité filtrace. Při porovnávání více než 2 měření je nutné PSD vyhladit kvůli značnému zašumění v kratších vlnových délkách. Pro porovnání průběhu PSD z různých měření byly vybrány mezní křivky PSD z Číny, protože se nejvíce blíží PSD geometrie kolejí ve sledovaných úsecích. Nasazení nového MVŽSv2 v roce 2023 vedlo k viditelným změnám v průběhu PSD, které souvisí s úpravou filtrace směru a výšky koleje do vlnových pásem D1 a D2. Podobně změny filtrace byly pozorovány i v letech 2010 a 2017. U některých parametrů byly pozorovány znatelné špičky, které by mohly indikovat chyby měření nebo jiné dosud neidentifikované problémy.

## 7. ZÁVĚR

Disertační práce se zabývala analýzou a hodnocením kvality geometrických parametrů koleje (GPK). Hlavním cílem bylo lepší pochopení vývoje kvality geometrických parametrů koleje.

V rámci řešení dizertační práce byla zpracována podrobná rešerše literatury o způsobech měření a zpracování signálu pro účely hodnocení kvality geometrie koleje. Následně bylo popsáno několik veličin pro hodnocení kvality (směrodatná odchylka, index kvality koleje, fraktální dimenze a lokální závady), které naznačilo jejich silné a slabé stránky.

V praktické části bylo provedeno hodnocení kvality vybraných traťových úseků. Byla nalezena řada souvislostí mezi průběhem GPK a hodnocených veličin. Podařilo se také identifikovat změny ve způsobu filtrace signálů a potenciální chyby měření, které je třeba zohlednit při hodnocení kvality. Analýza vývoje kvality v čase odhalila, že segmenty s nižší počáteční kvalitou degradují rychleji než segmenty s vyšší počáteční kvalitou. Velký vliv na tyto rozdíly má kvalita železničního spodku.

Na základě provedených analýz se pro hodnocení kvality koleje jeví jako nejlepší směrodatná odchylka, protože má nejplynulejší vývoj v čase, ale zároveň dobře reflektuje průběh signálu po délce. Na základě mého výzkumu tedy doporučuji směrodatnou odchylku používat i nadále. Pro stejný účel lze případně využít i index kvality koleje a fraktální dimenzi. S ohledem na jejich velmi silnou korelaci a složitější výpočet fraktální dimenze se jako alternativa ke směrodatné odchylce nabízí spíše index kvality koleje, který je však více citlivý na lokální odchylky a výpadky měření.

Jako velmi užitečná se ukázala také Výkonová spektrální hustota, která je na rozdíl od SD vhodná pro detailnější analýzu, která může zahrnovat např. frekvenční analýzu měřených signálů nebo diagnostiku měřících zařízení.

Pro efektivní plánování údržby a obnovy koleje je třeba dlouhodobé sledování vývoje kvality geometrie koleje. Je třeba vytvořit jednotnou databázi naměřených dat z měřícího vozu pro železniční svršek a také historie provedené údržby. Na základě provedených analýz je však již možné říct, že pomocí lineární regrese lze odhadovat časy překročení mezních hladin a podle toho plánovat údržbu či obnovu koleje.

Další výzkum by se mohl zaměřit na detailní analýzu problémových úseků, kde dochází k rychlé degradaci kvality geometrie koleje. Pro sledování vývoje kvality v čase by bylo přínosné také vyvinutí robustního algoritmu pro automatickou detekci údržbových zásahů, který by šlo použít pro měření z tratí, kde historii údržby nemáme k dispozici. Prozkoumat by se měly také možnosti využití strojového učení pro vyhodnocení velkého množství naměřených dat.

# SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Souhrnný přehled o přepravě cestujících a věcí po železnici. *Dopravní statistika* [online]. 2025 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.sydos.cz/cs/ctvletpr.htm>
- [2] GULER, Hakan. Optimisation of railway track maintenance and renewal works by genetic algorithms. *Građevinar* [online]. 2016, 68(12), 979-993 [cit. 2025-01-13]. Dostupné z: doi:10.14256/JCE.1458.2015
- [3] Rozpočet Státního fondu dopravní infrastruktury na rok 2025 a střednědobý výhled na roky 2026 a 2027. *Státní fond dopravní infrastruktury* [online]. 2024 [cit. 2025-01-06]. Dostupné z: <https://sfdi.gov.cz/wp-content/uploads/2024/12/rozpocet-sfdi-2025.pdf>
- [4] SÁNCHEZ-SILVA, Mauricio a Georgia-Ann KLUTKE. *Reliability and life-cycle analysis of deteriorating systems*. Cham: Springer, 2016, 355 stran : grafy. ISBN 978-3-319-20945-6.
- [5] BERGHOLD, Armin. *Track Service Life Driven by Ballast Quality: International Workshop Ballast: Issues & Challenges*. Paris, 2013.
- [6] HE, Qing, Hongfei LI, Debarun BHATTACHARJYA, Dhaivat P PARIKH a Arun HAMPAPUR. Track geometry defect rectification based on track deterioration modelling and derailment risk assessment. *Journal of the Operational Research Society* [online]. 2014, (66), 392-404 [cit. 2025-08-31]. Dostupné z: doi:10.1057/jors.2014.7
- [7] XU, Peng, Reng-Kui LIU, Feng WANG, Fu-Tian WANG a Quan-Xin SUN. Track Deterioration Characteristics Based Track Measurement Data Mining. *Mathematical Problems in Engineering* [online]. 2013 [cit. 2025-01-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2013/970573>
- [8] EVELD, Coenraad. *Modern railway track*. 2nd ed. Zaltbommel: MRT-Productions, c2001. ISBN 90-800324-3-3.
- [9] ELKHOORY, Najwa, Lalith HITIHAMILLAGE, Sara MORIDPOUR a Dilan ROBERT. Degradation Prediction of Rail Tracks: A Review of the Existing Literature. *The Open Transportation Journal* [online]. 2018, (12), 88-104 [cit. 2025-01-06]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.2174/1874447801812010088>
- [10] PELTOKANGAS, Ossi. *Evolution of railway track settlement after ballast tamping: International Workshop Ballast: Issues & Challenges*. Paris, 2013.

- [11] JOVANOVIĆ, Stanislav, Hakan GULER a Boško ČOKO. Track degradation analysis in the scope of railway. *Građevinar* [online]. 2015, 67(3), 247-257 [cit. 2025-01-06]. Dostupné z: doi:10.14256/JCE.1194.2014
- [12] ZAKERI, Jabbar Ali a Seyed Ali MOSAYEBI. Study of ballast layer stiffness in railway tracks. *Građevinar* [online]. 2016, 68(4), 311-318 [cit. 2025-01-06]. Dostupné z: doi:10.14256/JCE.1232.2015
- [13] HRUZÍKOVÁ, Miroslava. *Vliv podpražcových podložek na kvalitu jízdní dráhy*. Brno, 2012. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb.
- [14] LANDGRAF, M. a F. HANSMANN. Fractal analysis as an innovative approach for evaluating the condition of railway tracks: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. In: *Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 2019, s. 596-605 [cit. 2025-01-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0954409718795763>
- [15] ČSN 73 6360-2. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [16] ČSN EN 13848-1. *Železniční aplikace - Kolej - Kvalita geometrie koleje - Část 1: Popis geometrie koleje*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [17] ČSN EN 13848-5. *Železniční aplikace - Kolej - Kvalita geometrie koleje - Část 5: Hladiny kvality geometrie koleje - Běžná kolej a kolejová rozvětvení*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [18] ČSN EN 13848-2. *Železniční aplikace - Kolej - Kvalita geometrie koleje - Část 2: Měřicí systémy - Měřicí vozidla*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [19] PŘEDPIS SŽ S2/4. *Zajišťování diagnostiky železničního svršku a spodku měřicími prostředky s kontinuálním záznamem*. Praha: Správa železnic, státní organizace, 2025.
- [20] Měřicí drezína EM100. In: *Centrum telematiky a diagnostiky* [online]. 2022 [cit. 2025-01-20]. Dostupné z: <https://www.tudc.cz/wp-content/uploads/2022/05/EM100-1536x1152.jpg>
- [21] GAZÁREK, Ondřej. Veselí nad Moravou. In: *VagonWEB* [online]. 2012 [cit. 2025-01-16]. Dostupné z: <https://www.vagonweb.cz/fotogalerie/foto/201501/60-54-99-86-003-5-og-1-.jpg>
- [22] OFFENBACHER, Stefan, Johannes NEUHOLD, Peter VEIT a Matthias LANDGRAF. Analyzing Major Track Quality Indices and Introducing a Universally Applicable TQI. *Monitoring and*

- Maintenance Systems for Railway Infrastructure* [online]. 2020, 16 [cit. 2025-01-06].  
Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app10238490>
- [23] ČSN EN 13848-6+A1. *Železniční aplikace - Kolej - Kvalita geometrie koleje - Část 6: Stanovení kvality geometrie koleje*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [24] EL-SIBAIE, Magdy a Yu-Jiang ZHANG. Objective Track Quality Indices. *Transportation Research Record* [online]. 2004, 1863(1), 81-87 [cit. 2025-01-20]. Dostupné z: [doi:10.3141/1863-11](https://doi.org/10.3141/1863-11)
- [25] JOUDAL, Daniel. *Hodnocení kvality geometrie koleje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební.
- [26] HYSLIP, James P. Fractal Analysis of Track Geometry Data. *Transportation Research Record*. 2002, (1785), 50-57.
- [27] MANDELROT, Benoît B. *Fraktály : tvar, náhoda a dimenze*. Praha: Mladá fronta, 2003. ISBN 80-204-1009-0.
- [28] BROWN, Chas\_zzz a SHIBBOLETH. KochFlake - Koch Snowflake. In: *Wikipedia* [online]. 2025 [cit. 2025-01-22]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Koch\\_snowflake#/media/File:KochFlake.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Koch_snowflake#/media/File:KochFlake.svg)
- [29] RÖSSEL, Johannes. Sierpinski carpet 6. In: *Wikipedia* [online]. 2025 [cit. 2025-01-22]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fractal#/media/File:Sierpinski\\_carpet\\_6.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Fractal#/media/File:Sierpinski_carpet_6.svg)
- [30] CONTRIBUTOR, Simpsons. Julia 0.285 0.01 - Julia set. In: *Wikipedia* [online]. 2025 [cit. 2025-01-22]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Julia\\_set#/media/File:Julia\\_0.285\\_0.01.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Julia_set#/media/File:Julia_0.285_0.01.png)
- [31] LASS, Janek. Snowflake (lumehelves). In: *Wikipedia* [online]. 2025 [cit. 2025-01-22]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Snowflake#/media/File:Snowflake\\_\(lumehelves\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Snowflake#/media/File:Snowflake_(lumehelves).jpg)
- [32] DSP, user. Barnsley fern plotted with VisSim. In: *Wikipedia* [online]. 2025 [cit. 2025-01-22]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fern#/media/File:Barnsley\\_fern\\_plotted\\_with\\_VisSim.PNG](https://en.wikipedia.org/wiki/Fern#/media/File:Barnsley_fern_plotted_with_VisSim.PNG)
- [33] TERRA (EOS AM-1), satellite. Alps 2007-03-13 10.10.UTC 1px-250m. In: *Wikipedia* [online]. 2007 [cit. 2025-01-22]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Alps#/media/File:Alps\\_2007-03-13\\_10.10UTC\\_1px-250m.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Alps#/media/File:Alps_2007-03-13_10.10UTC_1px-250m.jpg)

- [34] NEJEZCHLEBOVÁ, Jitka. *Fraktální analýza geometrických parametrů koleje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební.
- [35] HAMID, A., K. RASMUSSEN, M. BALUJA a T.-L. YANG. *DOT-FR-32-03 Analytical Descriptions of Track Geometry Variations* [online]. Washington DC, 1983 [cit. 2025-01-30]. Dostupné z: [https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/fra\\_net/14983/DOT-FRA-ORD-83-03-2%20Analytical%20Descriptions%20of%20Track%20Geometry%20Variations%20Vol%202.pdf](https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/fra_net/14983/DOT-FRA-ORD-83-03-2%20Analytical%20Descriptions%20of%20Track%20Geometry%20Variations%20Vol%202.pdf). Technical Report. Department of Transportation.
- [36] BERAWI, Abdur Rohim Boy. *Improving Railway Track Maintenance Using Power Spectral Density (PSD)* [online]. Porto, 2013 [cit. 2025-08-31]. Dostupné z: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/70610/2/27042.pdf>. Dissertation. University of Porto. Vedoucí práce Raimundo Delgado.
- [37] Cross-correlation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2025-01-27]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-correlation>
- [38] JAROŠ, František. *Pravděpodobnost a statistika*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1994. ISBN 80-708-0208-1. Dostupné také z: <http://krameriusndk.nkp.cz/search/handle/uuid:a4fd3020-cc04-11e5-bfe7-005056827e52>
- [39] Correlation coefficients. *MathWorks Help Center* [online]. 2024 [cit. 2025-01-27]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/corrcoef.html>
- [40] NOVOVIČOVÁ, Jana. *Pravděpodobnost a matematická statistika*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-010-1980-2.
- [41] CHIVERS, Corey. P-value. In: *Bayesianbiologist* [online]. 2011 [cit. 2025-01-29]. Dostupné z: [https://bayesianbiologist.com/wp-content/uploads/2011/08/p\\_value.png](https://bayesianbiologist.com/wp-content/uploads/2011/08/p_value.png)
- [42] CHIVERS, Corey. P-value fallacy on More or Less. *Bayesianbiologist* [online]. 2011 [cit. 2025-01-29]. Dostupné z: <https://bayesianbiologist.com/2011/08/21/p-value-fallacy-on-more-or-less/>
- [43] Autocorrelation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2025-01-27]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Autocorrelation>

- [44] Označení tratí podle tabulek traťových poměrů. In: *Portál provozování dráhy* [online]. 2024 [cit. 2025-02-06]. Dostupné z: <https://provoz.spravazeleznic.cz/portal/Show.aspx?path=/Data/Mapy/TTP.pdf>
- [45] Základní topografická mapa 1:100 000. ČÚZK. *Geoprohlížeč* [online]. 2024 [cit. 2025-02-06]. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>
- [46] VALEHRACH, Jan. *Rozvoj skluzových vln v obloucích malých poloměrů* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2021 [cit. 2025-08-31]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/204623>. Disertační. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
- [47] Základní topografická mapa 1:250 000. ČÚZK. *Geoprohlížeč* [online]. 2024 [cit. 2025-02-06]. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>
- [48] Power Spectral Density Estimates Using FFT. *MathWorks Help Center* [online]. 2024 [cit. 2025-01-25]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/signal/ug/power-spectral-density-estimates-using-fft.html>
- [49] CHEN, Xianmai, Xiabin TAO, Guang-Hua CUI a L. WANG. Study on the judgment method for track regularity of the main railway lines in China. *Journal of China Railway Science* [online]. 2008, **9**(4), 21-27 [cit. 2025-01-27]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/285458345\\_Study\\_on\\_the\\_judgment\\_method\\_for\\_track\\_regularity\\_of\\_the\\_main\\_railway\\_lines\\_in\\_China](https://www.researchgate.net/publication/285458345_Study_on_the_judgment_method_for_track_regularity_of_the_main_railway_lines_in_China)
- [50] Cross-correlation. *MathWorks Help Center* [online]. 2024 [cit. 2025-01-29]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/xcorr.html>
- [51] Linear or rank correlation. *MathWorks Help Center* [online]. 2024 [cit. 2025-01-29]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/stats/corr.html>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 – Přeprava osob a věcí na železnici v ČR [1].....	10
Obr. 2.1 – Efektivita údržbových zásahů v průběhu času [4].....	13
Obr. 2.2 – Rozchod koleje při ojetí kolejnic [16] .....	21
Obr. 2.3 – Převýšení koleje [16] .....	22
Obr. 2.4 – Podélná výška [16].....	22
Obr. 2.5 – Směr koleje [16] .....	23
Obr. 2.6 – Pásmový filtr D1 a dvě možné přenosové funkce [16] .....	25
Obr. 2.7 – Relativní odchylna ve skutečné geometrii [16] .....	25
Obr. 2.8 – Příklad zkreslení měření tětivou [16] .....	26
Obr. 2.9 – Příklad přenosové funkce tětívového měření [16] .....	27
Obr. 2.10 – Měřicí vozík KRAB – schéma [19] .....	29
Obr. 2.11 – Měřicí vozík KRAB .....	30
Obr. 2.12 – Malá měřicí drezína 1 – schéma [19] .....	31
Obr. 2.13 – Malá měřicí drezína 2 – schéma [19] .....	31
Obr. 2.14 – Měřicí drezína – schéma [19] .....	32
Obr. 2.15 – Měřicí drezína – fotografie .....	33
Obr. 2.16 – Měřicí drezína EM100 – schéma [19] .....	34
Obr. 2.17 – Měřicí drezína EM100 – fotografie [20].....	35
Obr. 2.18 – Měřicí vůz železničního svršku – schéma [19] .....	35
Obr. 2.19 – Měřené parametry MVŽSv a jejich přesnost [19] .....	36
Obr. 2.20 – Měřicí vůz pro železniční svršek – fotografie [21] .....	37
Obr. 2.21 – Měřicí vůz pro železniční svršek 2 – schéma [19].....	38
Obr. 2.22 – Měřicí vůz pro železniční svršek 2 – fotografie .....	38
Obr. 2.23 – Princip délky prostorové křivky [22].....	42
Obr. 2.24 – Fraktály (Kochova vločka [28], Scierpińského koberec [29] a Juliova množina [30]) .....	44
Obr. 2.25 – Fraktály v přírodě (sněhová vločka [31], kapradina [32], pohoří Alpy [33]) .....	44
Obr. 2.26 – Měření délky pobřeží Velké Británie s různými délkami pravítka [26] .....	46
Obr. 2.27 – Richardsonův graf .....	46
Obr. 2.28 – Znázornění principu zjednodušené obvodové metody .....	47
Obr. 2.29 – P-hodnota a nulová hypotéza [41] .....	52
Obr. 4.1 – Mapa železniční sítě ČR s vyznačením sledovaných úseků [44] .....	55
Obr. 4.2 – Mapa úseku Hodonín – Rohatec [45].....	56

Obr. 4.3 – Mapa úseku Brno-Maloměřice st.6 – Blansko [47].....	57
Obr. 4.4 – Mapa úseku Dobšice nad Cidlinou – Chlumeck nad Cidlinou [47].....	57
Obr. 4.5 – Provozní zatížení vybraných tratí v období 2009–2023 .....	58
Obr. 4.6 – Změna filtrace u dlouhovlnné VK, Hodonín – Rohatec, K1, 2010 .....	59
Obr. 4.7 – Ukázka duplicitních hodnot, Hodonín – Rohatec, K1, 2010 .....	60
Obr. 4.8 – RK bez opravy (vlevo) a s opravou staničení (vpravo), Adamov – Blansko, K1 .....	61
Obr. 4.9 – PK bez opravy (vlevo) a s opravou staničení (vpravo), Adamov – Blansko, K1 .....	62
Obr. 4.10 – Srovnání diskrétní a klouzavé metody hodnocení kvality pomocí SD .....	63
Obr. 4.11 – Vliv různé délky segmentu na hodnocení kvality geometrie koleje.....	64
Obr. 4.12 – Log-log graf VL (vlevo) a VK D2 (vpravo) s lineární regresí pro výpočet FD .....	66
Obr. 4.13 – Log-log graf VL – Zjednodušená (vlevo) a klasická obvodová metoda (vpravo).....	67
Obr. 4.14 – Porovnání průběhu SD a odmocniny plochy pod PSD .....	68
Obr. 4.15 – Porovnání mezních křivek PSD VK.....	71
Obr. 4.16 – Porovnání mezních křivek PSD SK.....	72
Obr. 4.17 – Porovnání mezních křivek PSD RK .....	72
Obr. 4.18 – Porovnání mezních křivek PSD PK.....	72
Obr. 5.1 – Korelační diagram s nejslabší (vlevo) a nejsilnější korelací GPK (vpravo) .....	74
Obr. 5.2 – Korelační diagram s nejslabší (vlevo) a nejsilnější korelací veličin.....	76
Obr. 5.3 – Průběh veličin po délce, směr a výška koleje, Brno – Adamov, K1, 5. 8. 2020 .....	77
Obr. 5.4 – Průběh veličin po délce, RK a PK, Brno – Adamov, K1, 5. 8. 2020 .....	78
Obr. 5.5 – Průběh veličin po délce, směr a výška koleje, Choťovice – Převýšov, K1, 14. 9. 2022 .....	79
Obr. 5.6 – Vývoj veličin v čase, Hodonín – Rohatec, K1, km 105,8 – 106,0 .....	80
Obr. 5.7 – Vývoj veličin v čase, Adamov – Blansko, K1, km 177,6 – 177,8.....	81
Obr. 5.8 – Vývoj veličin v čase, Choťovice – Převýšov, K1, km 14,8 – 15,0 .....	82
Obr. 5.9 – Vývoj SD v čase a podle zatížení, Adamov – Blansko, K1, km 174,0 – 174,2 .....	83
Obr. 5.10 – Vývoj SD dle zatížení, Hodonín – Rohatec, K1 (nahore), K2 (dole), km 109,0 – 109,2 .....	83
Obr. 5.11 – Lineární regrese SD VL v čase, Hodonín – Rohatec, km 105,8 – 106,0 .....	84
Obr. 5.12 – Lineární regrese SD VL v čase, Adamov – Blansko, K1, km 177,6 – 177,8.....	85
Obr. 5.13 – Lineární regrese SD VL v čase, Choťovice – Převýšov, K1, km 14,8 – 15,0.....	85
Obr. 5.14 – Lineární regrese SD VL v čase, Adamov – Blansko, K1, km 174,0 – 174,2 .....	86
Obr. 5.15 – Vývoj SD po délce i v čase, VP, Hodonín – Rohatec, K1.....	87
Obr. 5.16 – Vývoj SD po délce i v čase, VK D2, Hodonín – Rohatec, K1 .....	87
Obr. 5.17 – Vývoj SD po délce i v čase, SL, Adamov – Blansko, K1 .....	88
Obr. 5.18 – Vývoj SD po délce i v čase, SK D2, Adamov – Blansko, K1 .....	88

Obr. 5.19 – Vývoj SD po délce i v čase, VP (vlevo) a VK D2 (vpravo), Choťovice – Převýšov .....	89
Obr. 5.20 – Vývoj SD po délce i v čase, SL (vlevo) a SK D2 (vpravo), Choťovice – Převýšov .....	90
Obr. 5.21 – Vývoj SD po délce i v čase, VL (vlevo) a VK D2 (vpravo), Brno – Adamov, K1 .....	90
Obr. 5.22 – Vývoj SD po délce i v čase, SL (vlevo) a SK D2 (vpravo), Brno – Adamov, K1 .....	91
Obr. 5.23 – Porovnání 3 měření SK D2, Adamov – Blansko, K1, 2011 .....	91
Obr. 5.24 – Porovnání 3 měření VL, Adamov – Blansko, K1, 2011–2012.....	92
Obr. 5.25 – Porovnání 2 měření SK D2, Brno – Adamov, K1, 27. 11. 2019.....	92
Obr. 5.26 – Porovnání 2 měření SK D2, Adamov – Blansko, K1, 2022–2023.....	93
Obr. 5.27 – Porovnání 3 měření RK, Adamov – Blansko, K1, 2008–2009 .....	93
Obr. 5.28 – Porovnání 3 měření RK, Adamov – Blansko, K1, 2014–2015 .....	93
Obr. 5.29 – Porovnání 3 měření PK, Brno – Adamov, K1, 2016–2017.....	94
Obr. 5.30 – Log-log graf PSD VL a VK D2, Adamov – Blansko, K1, 5. 8. 2020 .....	95
Obr. 5.31 – Log-log graf PSD SL, SK D2 a KR KS, Adamov – Blansko, K1, 5. 8. 2020.....	95
Obr. 5.32 – Log-log graf PSD RK a PK, Adamov – Blansko, K1, 5. 8. 2020.....	96
Obr. 5.33 – Log-log graf PSD VK 1-70 m, VL a VK D2, Hodonín – Rohatec, K1, 2010.....	96
Obr. 5.34 – Porovnání PSD VL a VK D2 s mezními křivkami, září 2023.....	97
Obr. 5.35 – Porovnání PSD SL a SK D2 s mezními křivkami, září 2023 .....	97
Obr. 5.36 – Porovnání PSD RK s mezními křivkami, září 2023 .....	98
Obr. 5.37 – Porovnání PSD PK s mezními křivkami, září 2023 .....	98
Obr. 5.38 – Změna PSD VP a VK D2 vlivem obnovy, Brno – Adamov, 2021–2022.....	99
Obr. 5.39 – Změna PSD RK vlivem obnovy, Adamov – Blansko, 2021–2022.....	99
Obr. 5.40 – Změna PSD PK vlivem obnovy, Brno – Adamov, 2021–2022 .....	100
Obr. 5.41 – Vyhlazení PSD VL a VK D2 vlivem obnovy, Brno – Adamov, 20. 3. 2024.....	100
Obr. 5.42 – Porovnání PSD VL a VK D2 ze všech úseků .....	101
Obr. 5.43 – Porovnání PSD SL a SK D2 ze všech úseků.....	101
Obr. 5.44 – Porovnání PSD RK ze všech úseků .....	102
Obr. 5.45 – Porovnání PSD PK ze všech úseků .....	102
Obr. 5.46 – PSD VP a VK D2 z MVŽSv a MVŽSv2, Brno – Adamov, K1, 2022–2023 .....	103
Obr. 5.47 – PSD SP a SK D2 z MVŽSv a MVŽSv2, Brno – Adamov, K1, 2022–2023.....	103
Obr. 5.48 – PSD RK z MVŽSv a MVŽSv2, Brno – Adamov, K1, 2022–2023.....	104
Obr. 5.49 – PSD PK z MVŽSv a MVŽSv2, Brno – Adamov, K1, 2022–2023.....	104
Obr. 5.50 – Porovnání PSD VL a VK D2, Adamov – Blansko, K1, 18. 3. 2010 – 9. 7. 2010 .....	105
Obr. 5.51 – Porovnání PSD VL a VK D2, Brno – Adamov, K1, 27. 7. 2017 – 28. 11. 2017 .....	105
Obr. 5.52 – Porovnání PSD PK, Choťovice – Převýšov, 16. 3. 2017 – 12. 9. 2017 .....	106

## SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 – Provozní odchylky veličin pro stupně AL a IL [15].....	40
Tab. 2.2 – Mezní hodnoty SD dle Předpisu SŽ S2/4 [19].....	41
Tab. 2.3 – Mezní hodnoty SD VK dle ČSN EN 13848-6 (přeloženo z [23]).....	42
Tab. 2.4 – Mezní hodnoty SD SK dle ČSN EN 13848-6 (přeloženo z [23]).....	42
Tab. 4.1 – Názvy sloupců v souboru TXT do roku 2010 a po něm .....	59
Tab. 4.2 – Koeficienty mezní křivky PSD z USA (přeloženo z [36]).....	69
Tab. 4.3 – Koeficienty mezní křivky PSD z Německa (přeloženo z [36]).....	70
Tab. 4.4 – Koeficienty mezní křivky PSD z Číny pro 120 km/h (přeloženo z [36][49]).....	70
Tab. 4.5 – Koeficienty mezní křivky PSD z Číny pro 160 km/h (přeloženo z [36][49]).....	71
Tab. 5.1 – Minimální a maximální lineární korelace GPK .....	74
Tab. 5.2 – Minimální a maximální lineární korelace mezi SD a TQI .....	75
Tab. 5.3 – Minimální a maximální lineární korelace mezi SD a FD.....	75
Tab. 5.4 – Minimální a maximální lineární korelace mezi TQI a FD .....	76

# SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AL		Mez sledování ( <i>Alert Limit</i> )
CSV		Souborový formát pro tabulková data ( <i>Comma-separated Values</i> )
CTD		Centrum techniky a diagnostiky
ČR		Česká republika
ČSN		Česká státní norma
D0		Vlnové pásmo od 1 do 5 m
D1		Vlnové pásmo od 3 do 25 m
D2		Vlnové pásmo od 25 do 70 m
DM		Degradační model ( <i>Deterioration Model</i> )
EM100		Měřící hnací vozidlo
EN		Evropská norma
FD		Fraktální dimenze ( <i>Fractal Dimension</i> )
FRA		Federální železniční úřad ( <i>Federal Railroad Administration</i> )
GCS		Systém geografických souřadnic ( <i>Geographic Coordinate System</i> )
GIS		Geografický informační systém?
GNSS		Globální družicový polohový systém ( <i>Global Navigation Satellite System</i> )
GPK		Geometrické parametry koleje
CHKO		Chráněná krajinná oblast
IAL		Mez bezodkladného zásahu ( <i>Immediate Action Limit</i> )
ID		Lokální závady ( <i>Isolated Defects</i> )
IL		Mez zásahu ( <i>Intervention Limit</i> )
IMU		Inerciální měřicí jednotka
Kč		Korun českých
kg		Kilogram
km		Kilometr
km·h <sup>-1</sup>		Kilometr za hodinu
kN		Kilonewton
KR KS	[m <sup>-1</sup> ]	Křivost kvazistatická
LCA		Analýza životního cyklu ( <i>Life Cycle Analysis</i> )
LCCA		Náklady životního cyklu ( <i>Life Cycle Cost Analysis</i> )
m		Metr
MAT		Souborový formát pro uložení proměnných v MATLABu

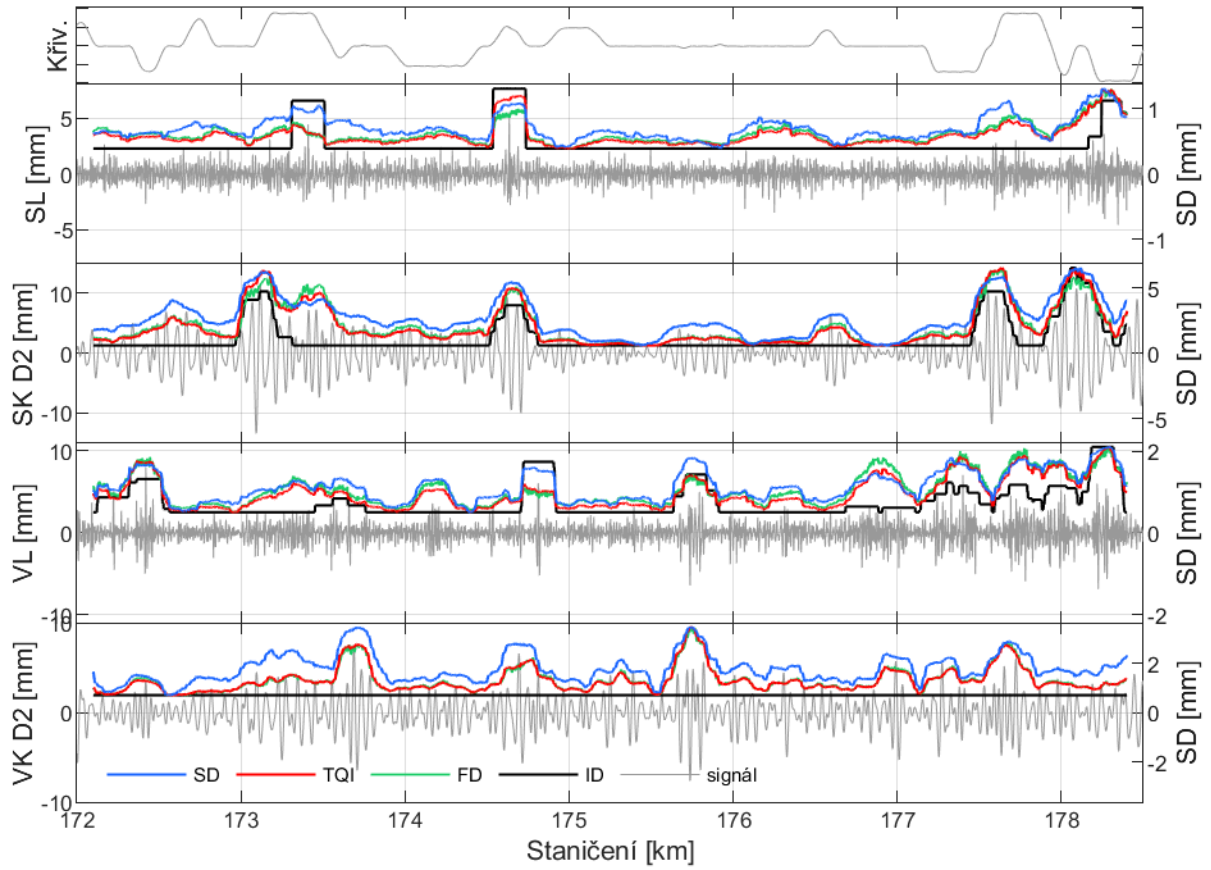
MATLAB		Interaktivní programové prostředí a skriptovací jazyk ( <i>Matrix Laboratory</i> )
MD1		Měřicí drezína 1. generace
mm		Milimetr
MMD		Malá měřicí drezína
MVŽSv		Měřicí vůz pro železniční svršek
MVŽSv2		Měřicí vůz pro železniční svršek 2. generace
Obr.		Obrázek
PK	[mm]	Převýšení koleje
PSD		Výkonová spektrální hustota ( <i>Power Spectral Density</i> )
RK	[mm]	Rozchod koleje
RP		Rychlostní pásmo
SD		Směrodatná odchylka ( <i>Standard Deviation</i> )
SFDI		Státní fond dopravní infrastruktury
SK	[mm]	Směr v ose koleje
SL	[mm]	Směr levého kolejnicového pásu
SP	[mm]	Směr pravého kolejnicového pásu
SŽ		Správa železnic, státní organizace
Tab.		Tabulka
TEN-T		Transevropská dopravní síť ( <i>Trans-European Transport Network</i> )
TQI		Index kvality koleje ( <i>Track Quality Index</i> )
TXT		Souborový formát pro textová data
USA		Spojené státy americké ( <i>United States of America</i> )
USP		Podpražcové podložky ( <i>Under Sleeper Pads</i> )
V	[km·h <sup>-1</sup> ]	Rychlost
VK	[mm]	Podélná výška v ose koleje
VL	[mm]	Podélná výška levého kolejnicového pásu
VP	[mm]	Podélná výška pravého kolejnicového pásu
VRT		Vysokorychlostní trať
XLSX		Souborový formát pro tabulková data aplikace Microsoft Excel
ZK	[mm·m <sup>-1</sup> ]	Zborcení koleje
ZKV		Známka kvality
λ	[m]	Vlnová délka
π		Číslo pí

# SEZNAM PŘÍLOH

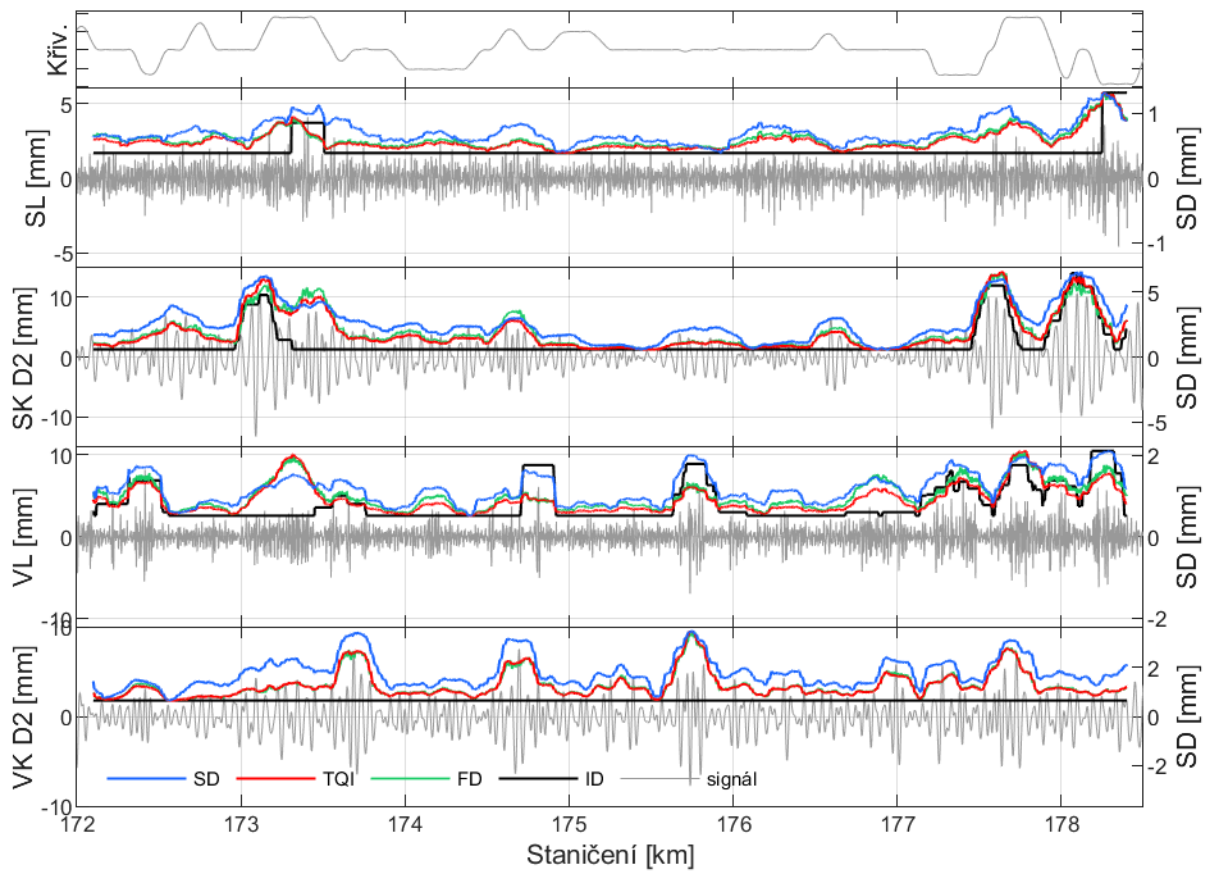
<b>A.</b>	<b>HODNOCENÍ KVALITY GEOMETRIE KOLEJE.....</b>	<b>123</b>
A.1.	GRAFY PRŮBĚHU PO DÉLCE .....	123
A.2.	GRAFY VÝVOJE V ČASE .....	128
A.3.	MAPY VÝVOJE PO DÉLCE I V ČASE .....	130
A.4.	VÝKONOVÁ SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA (PSD) .....	132
<b>B.</b>	<b>SKRIPTY A FUNKCE V MATLABU .....</b>	<b>133</b>
B.1.	FUNKCE PRO VÝPOČET VELIČIN .....	133
B.2.	SKRIPTY PRO HODNOCENÍ KVALITY GEOMETRIE KOLEJE .....	138

# A. HODNOCENÍ KVALITY GEOMETRIE KOLEJE

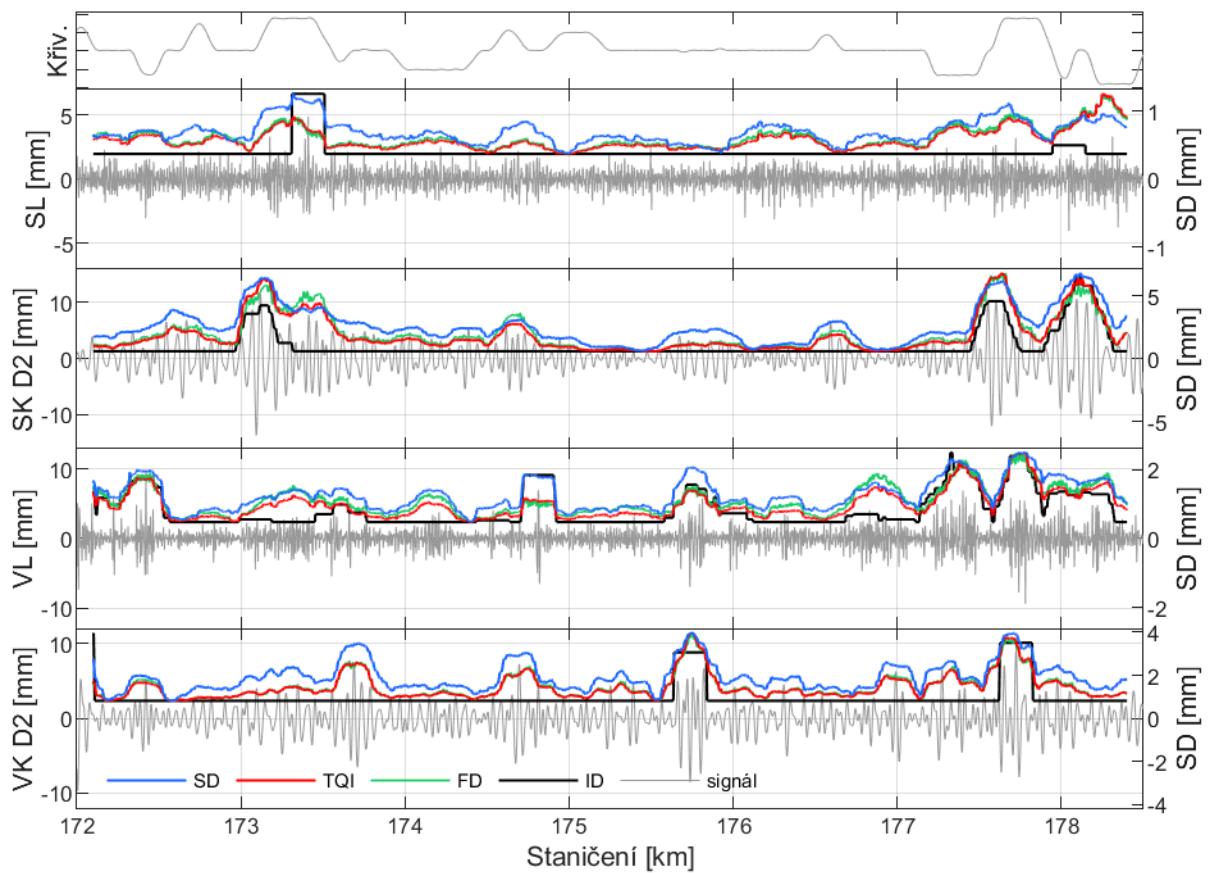
## A.1. GRAFY PRŮBĚHU PO DÉLCE



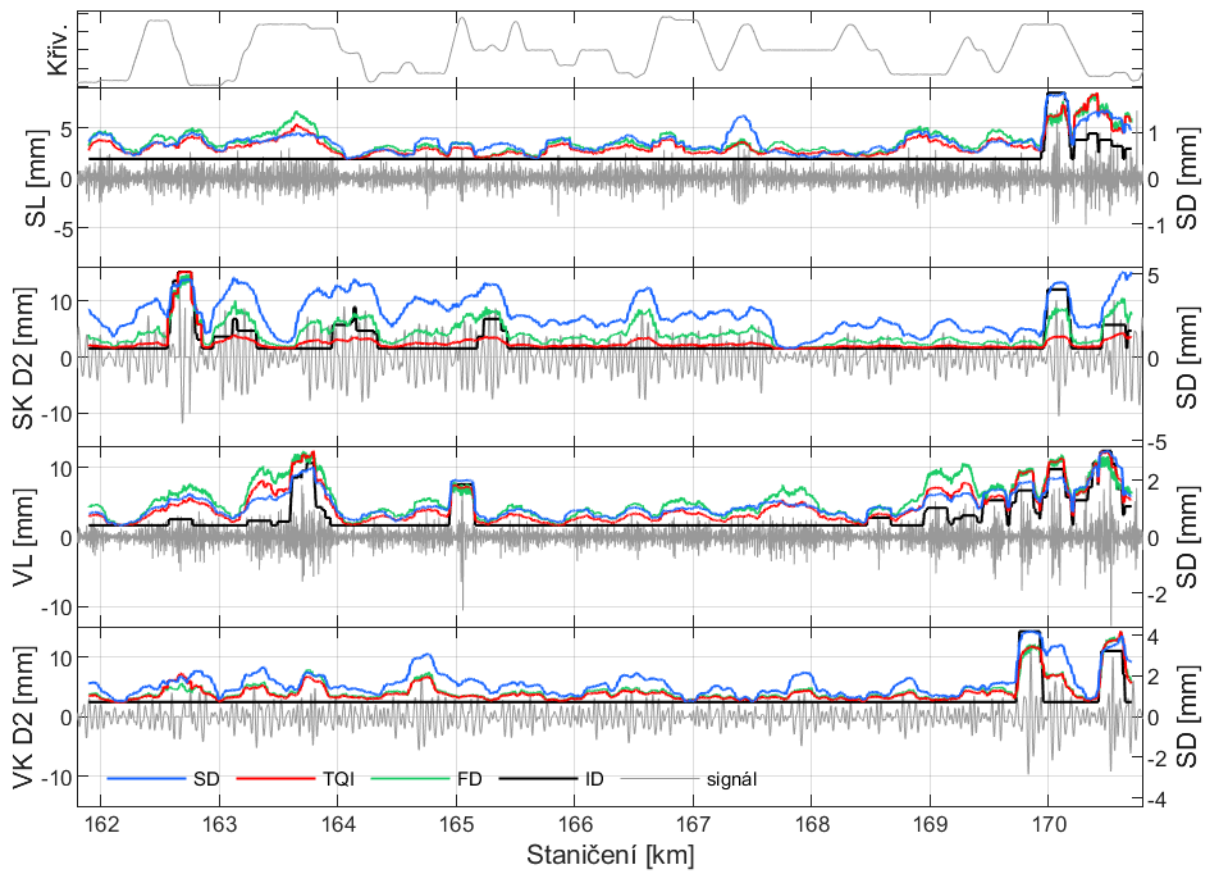
Obr. A.1 – Průběh veličin po délce, směr a výška koleje, Adamov – Blansko, K1, 16. 8. 2011



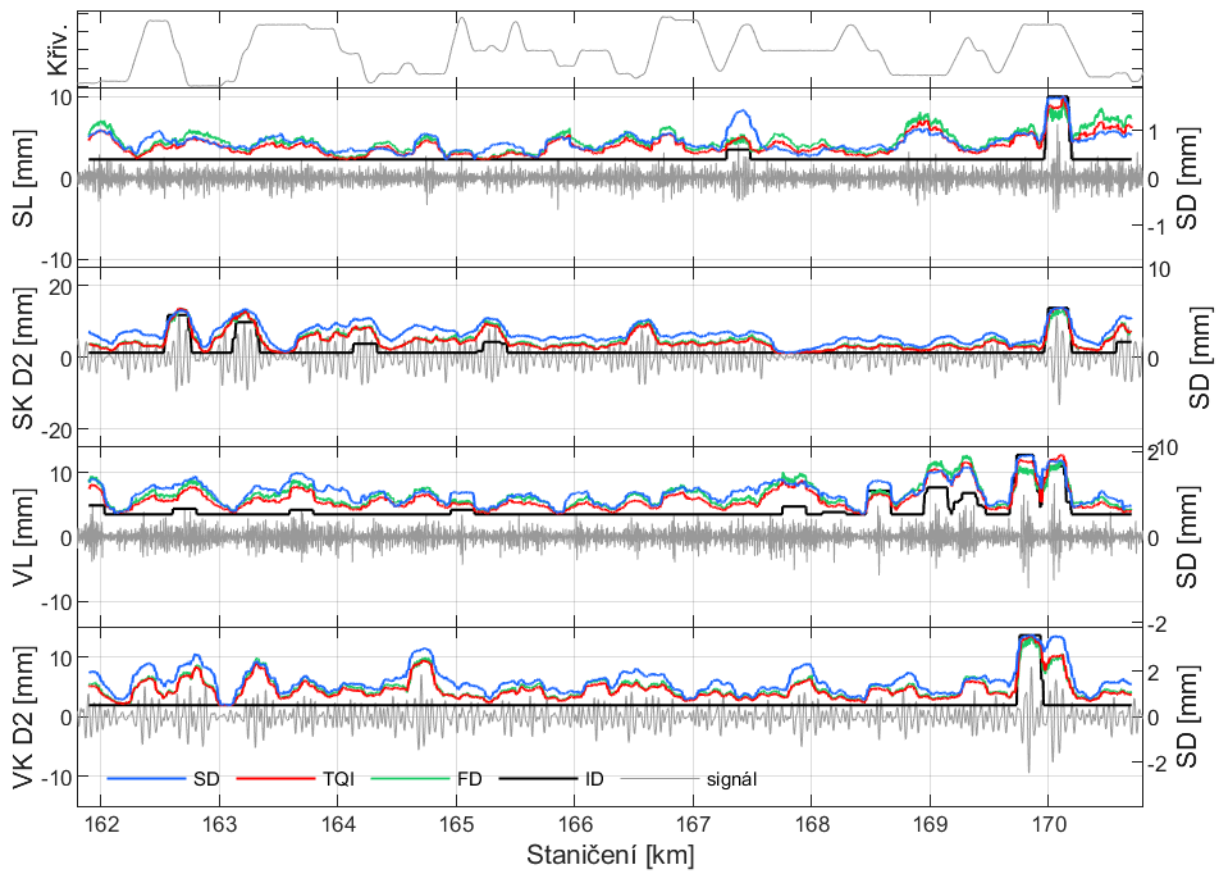
Obr. A.2 – Průběh veličin po délce, směr a výška koleje, Adamov – Blansko, K1, 11. 10. 2011



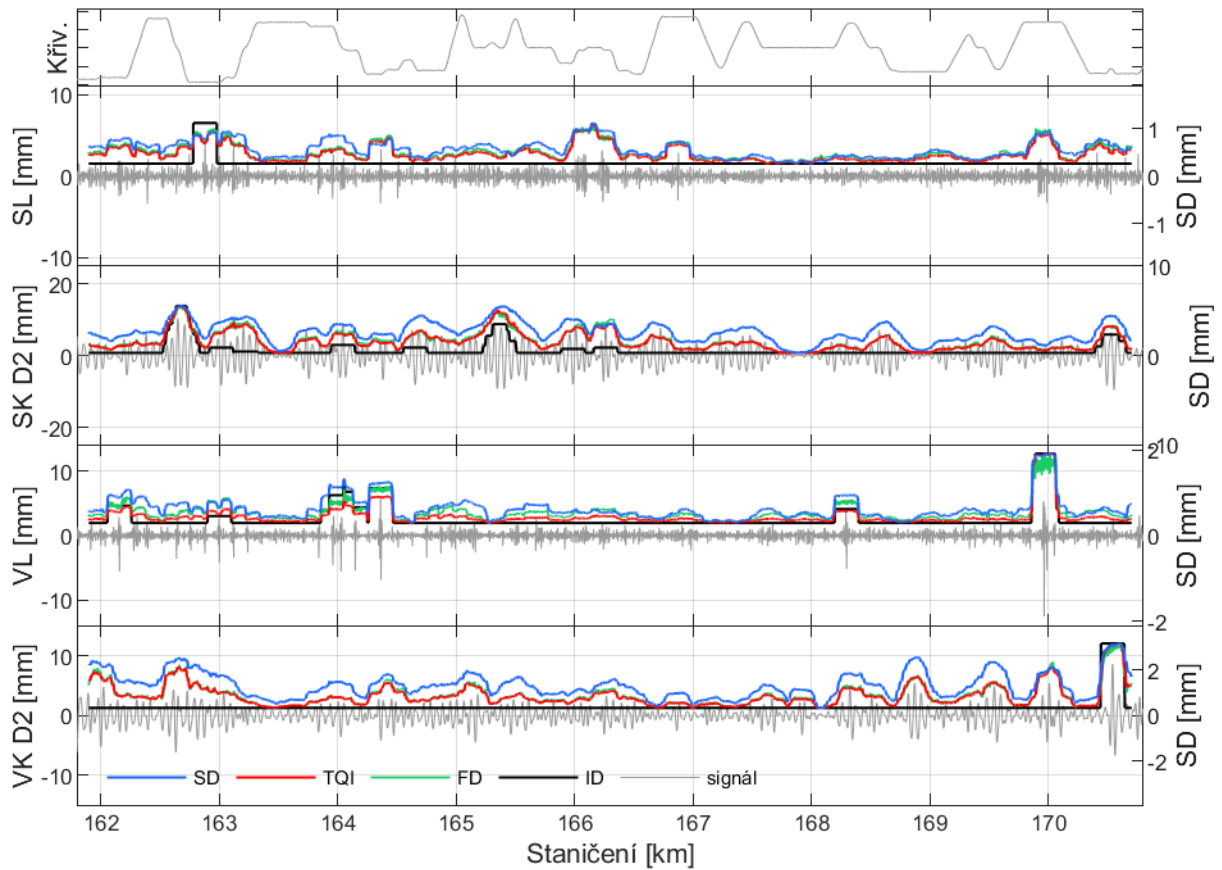
Obr. A.3 – Průběh veličin po délce, směr a výška koleje, Adamov – Blansko, K1, 1. 4. 2014



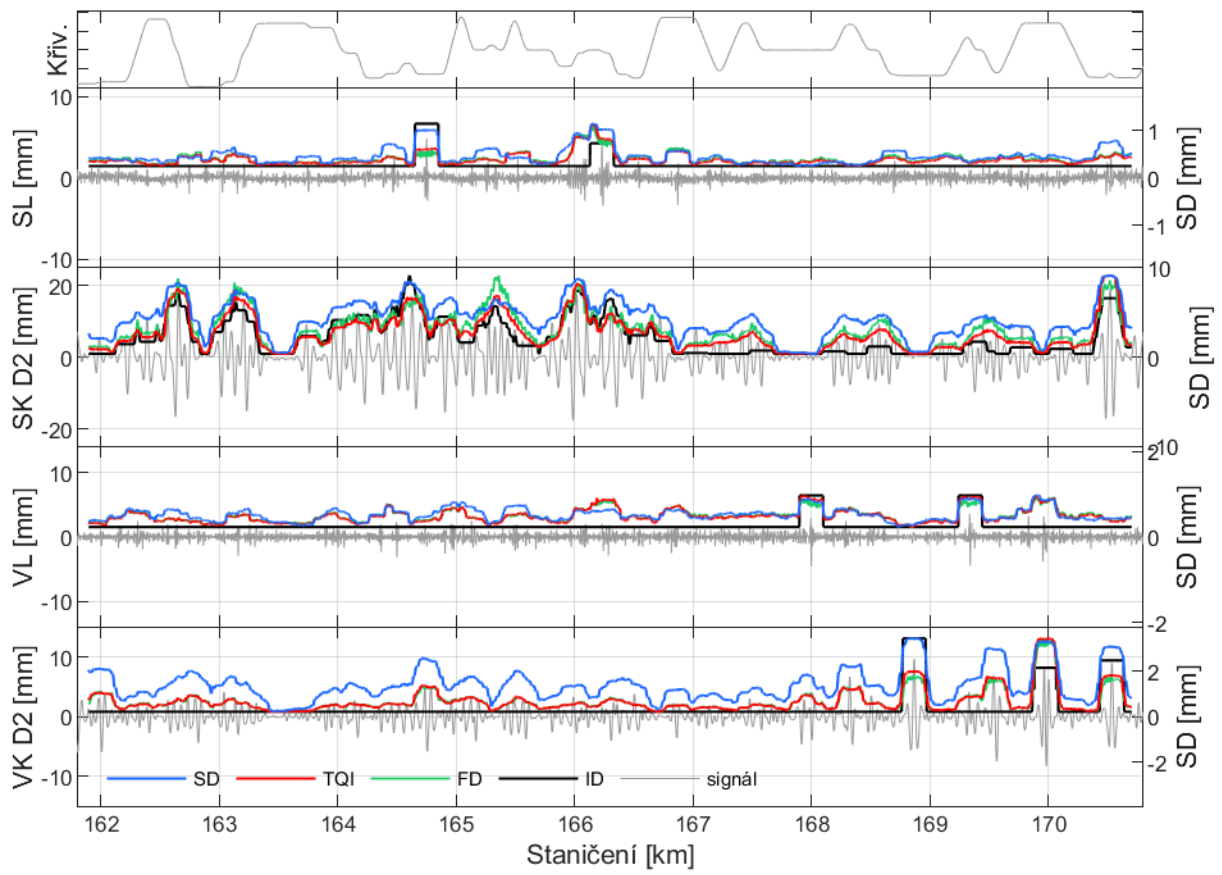
Obr. A.4 – Průběh veličin po délce, směr a výška koleje, Brno – Adamov, K1, 27. 11. 2019



Obr. A.5 - Průběh veličin po délce, směr a výška koleje, Brno - Adamov, K1, 8. 12. 2021

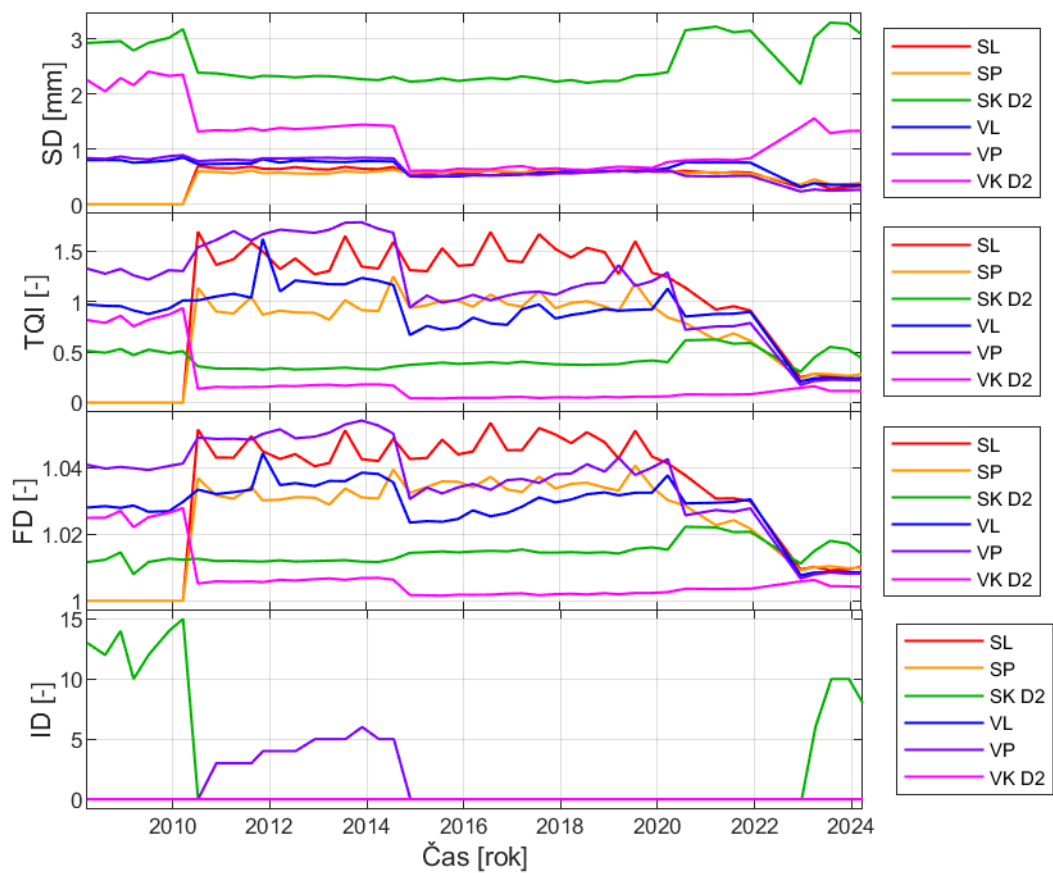


Obr. A.6 – Průběh veličin po délce, směr a výška koleje, Brno – Adamov, K1, 22. 12. 2022

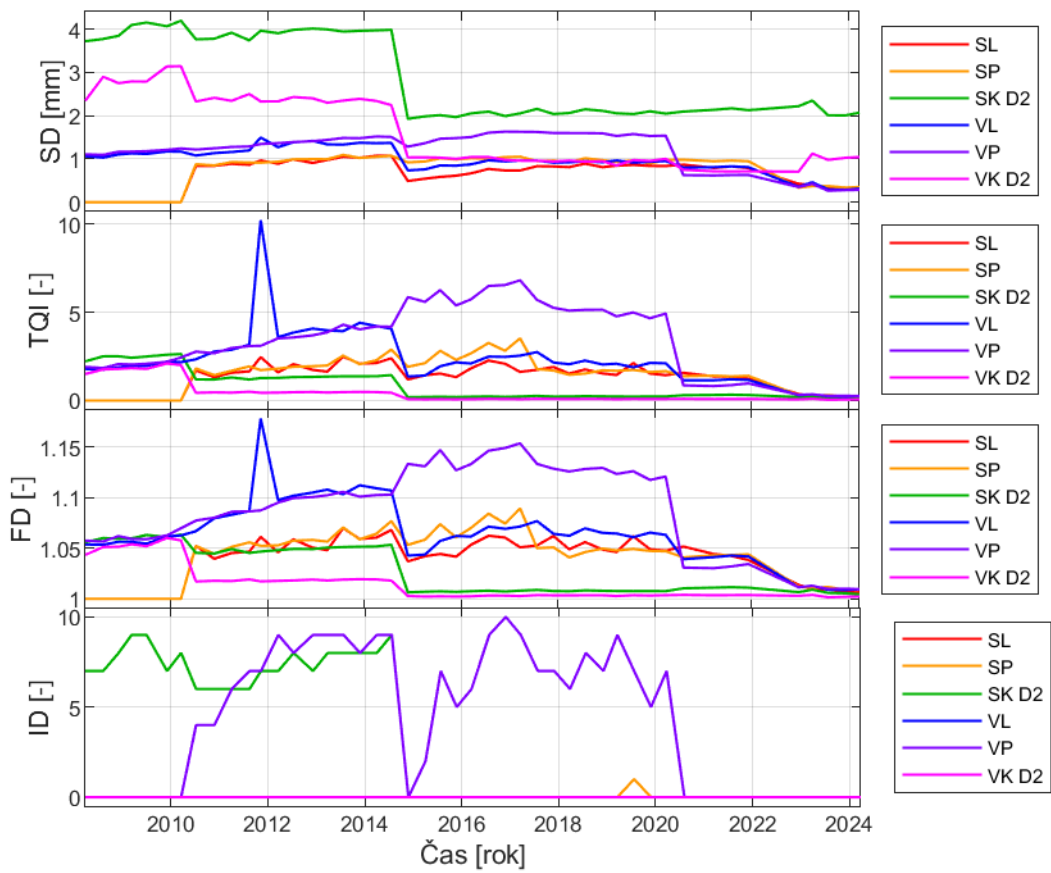


Obr. A.7 – Průběh veličin po délce, směr a výška koleje, Brno – Adamov, K1, 5. 4. 2023

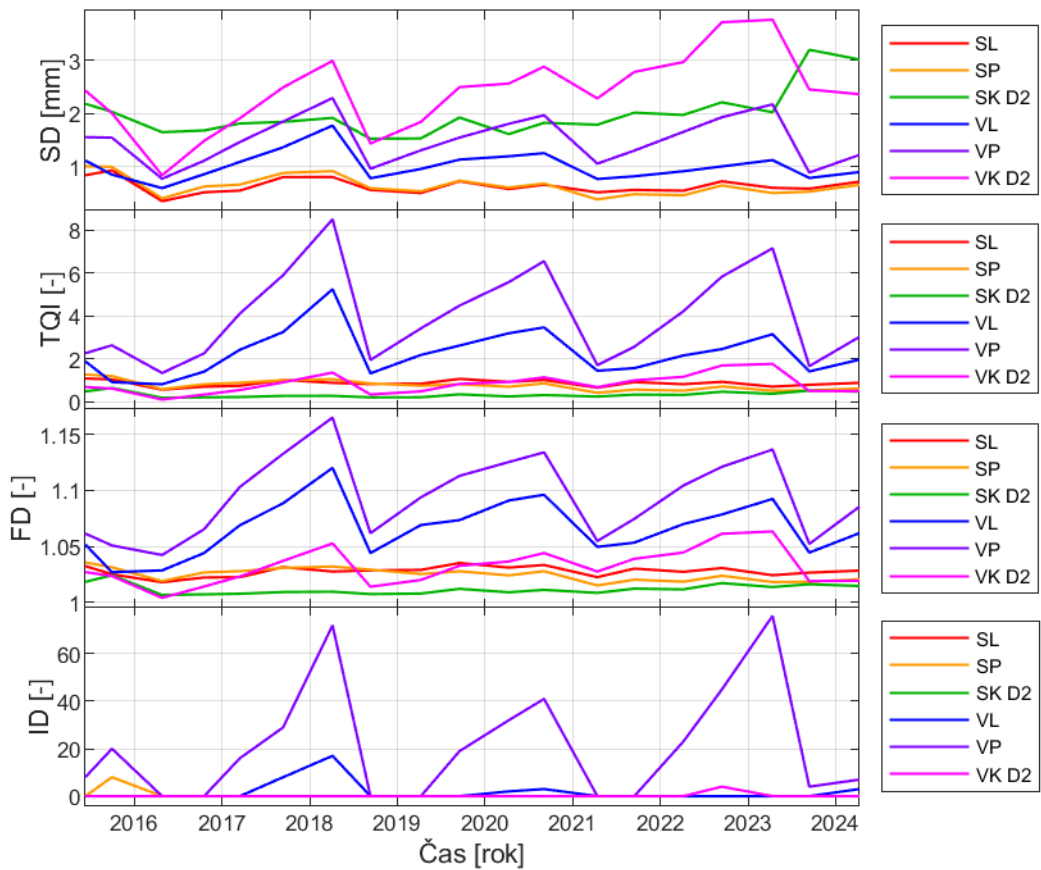
## A.2. GRAFY VÝVOJE V ČASE



Obr. A.8 - Vývoj veličin v čase, Adamov - Blansko, K1, km 172,8 - 173,0

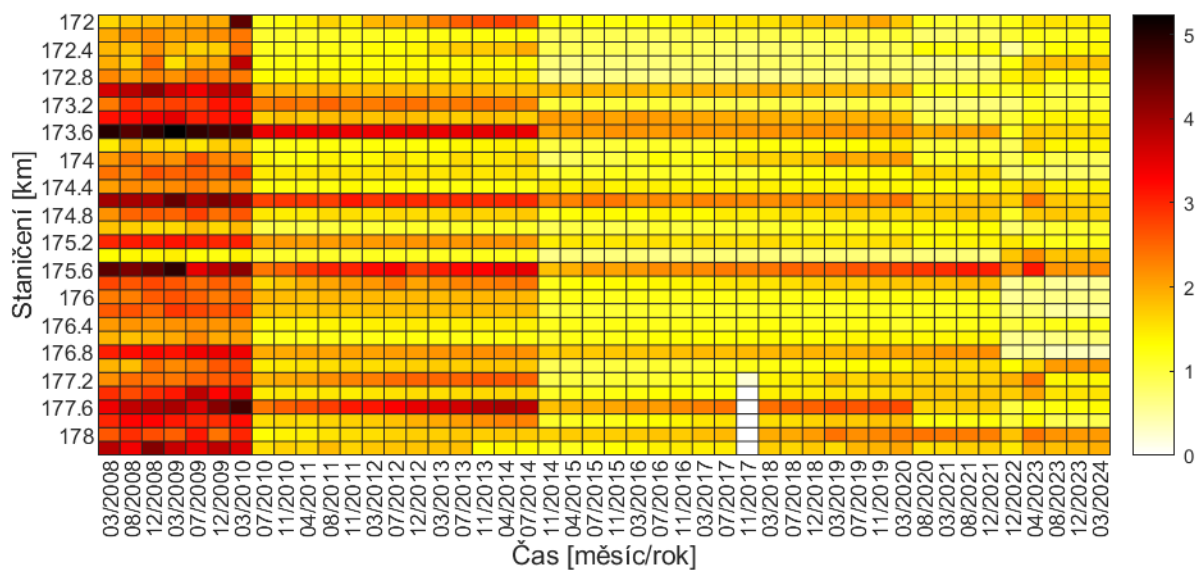


Obr. A.9 – Vývoj veličin v čase, Adamov – Blansko, K1, km 173,2 – 173,4

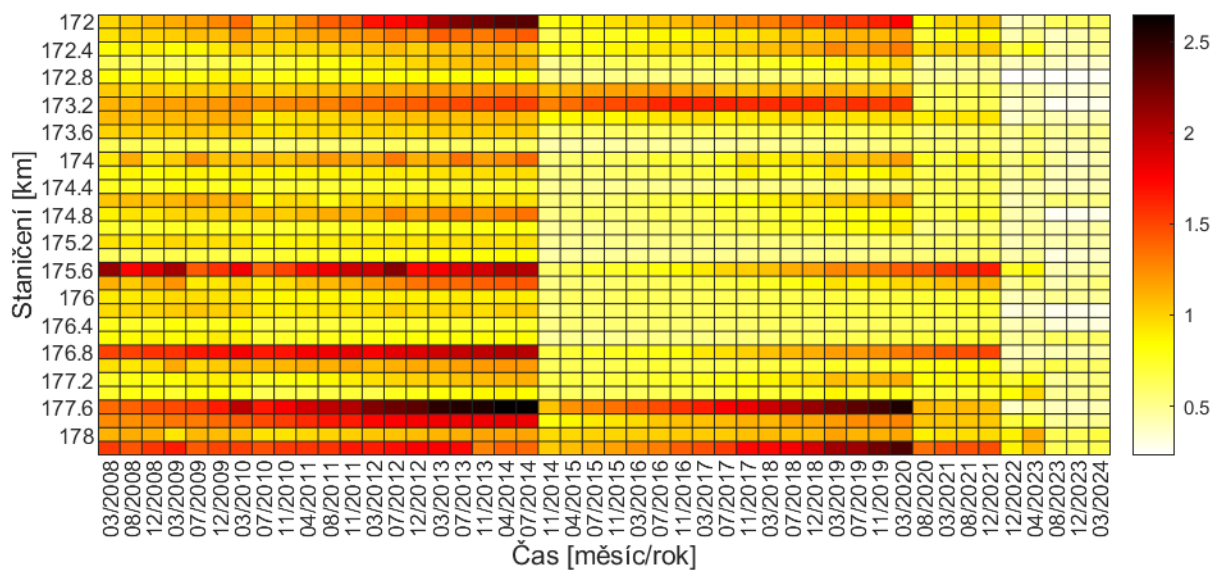


Obr. A.10 – Vývoj veličin v čase, Choťovice – Převýšov, K1, km 16,8 – 17,0

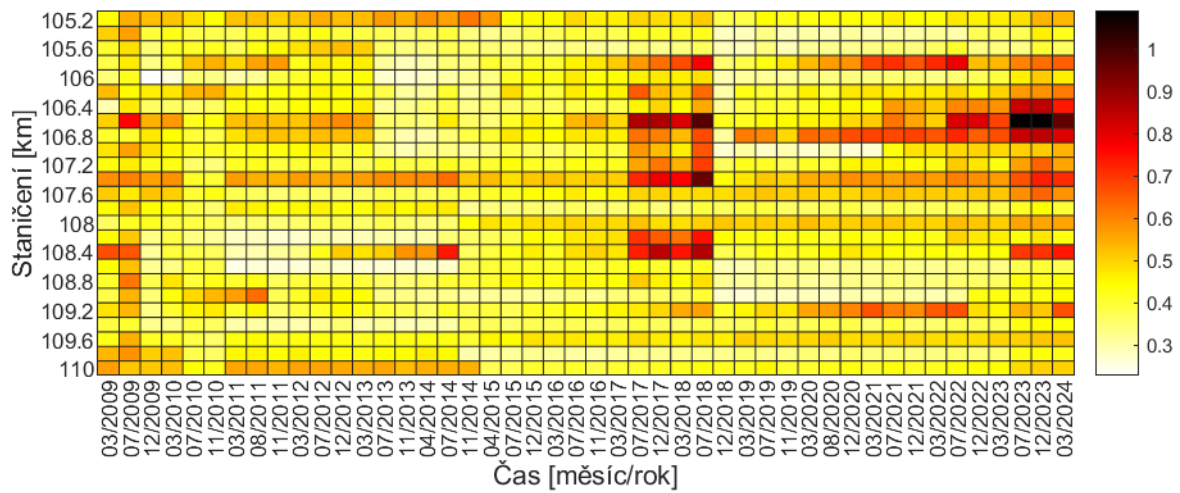
### A.3. MAPY VÝVOJE PO DÉLCE I V ČASE



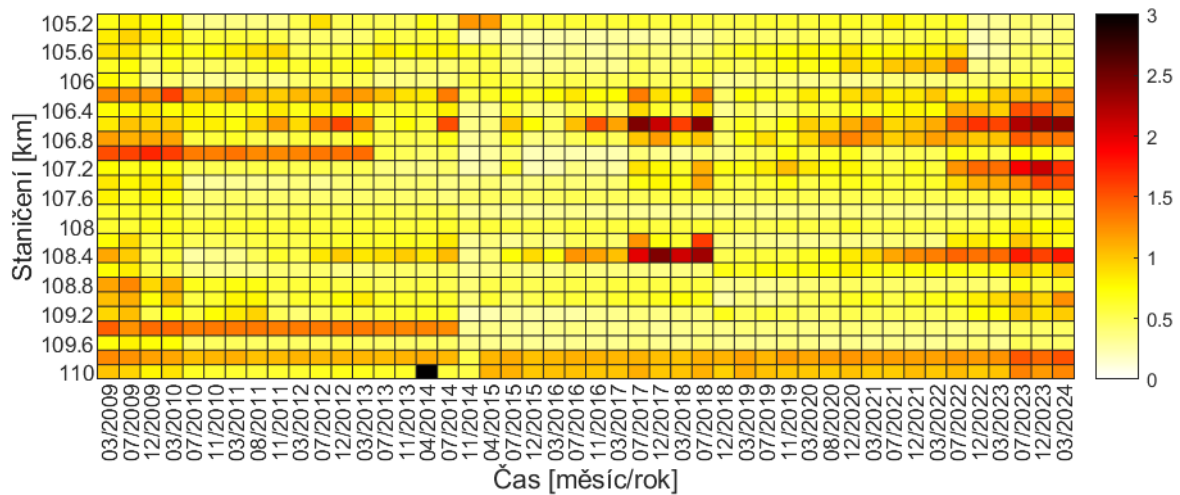
Obr. A.11 – Vývoj SD po délce i v čase, SL, Hodonín – Rohatec, K1



Obr. A.12 – Vývoj SD po délce i v čase, SK D2, Hodonín – Rohatec, K1

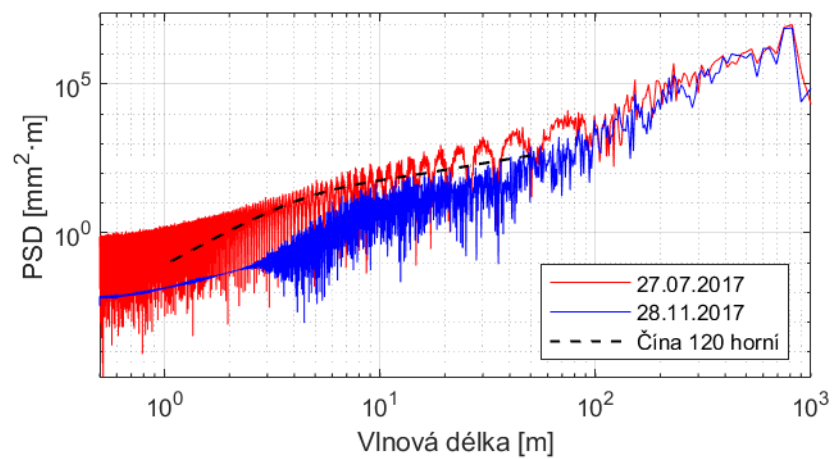


Obr. A.13 - Vývoj SD po délce i v čase, VP, Adamov - Blansko, K1



Obr. A.14 - Vývoj SD po délce i v čase, VK D2, Adamov - Blansko, K1

## A.4. VÝKONOVÁ SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA (PSD)



Obr. A.15 – Porovnání PSD PK, Brno – Adamov, K1, 27. 7. 2017 – 28. 11. 2017

## B. SKRIPTY A FUNKCE V MATLABU

### B.1. FUNKCE PRO VÝPOČET VELIČIN

#### B.1.1. LOKÁLNÍ ZÁVADY (ID)

```
function y=ID(tab,st,dist,mer,par,rp,mez)
    if par=="SK_D2" || par=="VK_D2" || par=="KR_KS"
        stanic=tab.KM_EXT(1:4:end); % ziska vektor staniceni po 1 m
    else
        stanic=tab.KM_EXT;
    end
    sel=stanic>=st-1e-6 & stanic<=st+dist/1000+1e-6; % logický vektor
    parse1=tab.(par)(sel,mer); % vektor vybraných hodnot parametru
    n=length(parse1); % počet prvků vybraného vektoru
    % provozni odchylky dle ČSN 73 6360-2
    x=1e6; % nekonečno
    if mez=="AL"
        meze=[17 x 16 inf;14 x 13 inf;11 x 9 inf;7 12 7 12;5 10 5 10;4 8 4 8];
    else % IL
        meze=[20 x 18 inf;18 x 15 inf;13 x 11 inf;10 18 8 14;9 16 7 12;8 14 6 10];
    end
    meze=array2table(meze,'VariableNames',{'VL','VK_D2','SL','SK_D2'});
    if par=="VP"
        par="VL";
    elseif par=="SP"
        par="SL";
    end
    lim=meze.(par)(rp+1);
    if n>1
        y=nnz(parse1<=-lim)+nnz(parse1>=lim);
    end
end
```

#### B.1.2. SMĚRODATNÁ ODCHYLKA (SDO)

```
function y=SDO(tab,st,dist,mer,par)
    if par=="SK_D2" || par=="VK_D2" || par=="KR_KS"
        stanic=tab.KM_EXT(1:4:end); % ziska vektor staniceni po 1 m
    else
        stanic=tab.KM_EXT;
    end
    sel=stanic>=st-1e-6 & stanic<=st+dist/1000+1e-6; % logický vektor
    parse1=tab.(par)(sel,mer); % vektor vybraných hodnot parametru
    n=length(parse1); % počet prvků vybraného vektoru
    y=sqrt((1/(n-1))*sumsqr(parse1));
end
```

#### B.1.3. INDEX KVALITY KOLEJE (TQI)

```
function y=TQI(tab,st,dist,mer,par)
    if par=="SK_D2" || par=="VK_D2" || par=="KR_KS"
        stanic=tab.KM_EXT(1:4:end); % ziska vektor staniceni po 1 m
```

```

else
    stanic=tab.KM_EXT;
end
sel=stanic>=st-1e-6 & stanic<=st+dist/1000+1e-6; % logický vektor
stanic=stanic(sel)*1e6;
dist=dist*1e3;
if abs(stanic(end)-stanic(1))>dist-1e-4
    parsel=tab.(par)(sel,mer); % vektor vybraných hodnot parametru
    delk=sum(sqrt((stanic(2:end)-stanic(1:end-1)).^2 + ...
        (parsel(2:end)-parsel(1:end-1)).^2));
    y=(delk/dist-1)*10e6;
else
    y=0;
end
end

```

## B.1.4. FRAKTÁLNÍ DIMENZE (FD)

```

function y=FD(tab,st,dist,mer,par)
if par=="SK_D2" || par=="VK_D2" || par=="KR_KS"
    stanic=tab.KM_EXT(1:4:end); % získá vektor stanicení po 1 m
else
    stanic=tab.KM_EXT;
end
sel=stanic>=st-1e-6 & stanic<=st+dist/1000+1e-6; % logický vektor
parsel=tab.(par)(sel,mer); % vektor vybraných hodnot parametru
N=length(parsel); % počet prvků vybraného vektoru
stanic=stanic(sel)*1000;
krok=abs(stanic(2)-stanic(1));
Sez=[4 5 6 7 8 10 12 14 16 20 24 28 32 38 44]; % kroky pro výpočet FD
P=length(Sez)-1;
celk=zeros(1,P+1); % definice vektoru delek krivky pro merici zakladny
k=1;
for L=Sez
    suma=0;
    for i=1:L:N
        if i+L<=N
            delk=stanic(i+L)-stanic(i);
            vysk=parsel(i+L)-parsel(i);
            vysl=sqrt(delk^2+vysk^2);
            suma=suma+vysl;
        else % zbytek do konce
            delk=stanic(end)-stanic(i);
            vysk=parsel(end)-parsel(i);
            vysl=sqrt(delk^2+vysk^2);
            suma=suma+vysl;
        end
    end
    celk(k)=suma; % ulozi celkovou delku krivky pro danou merici zakladnu
    k=k+1;
end
zakl=Sez*krok;
p=polyfit(log(zakl),log(celk),1);
y=1-p(1);
end

```

## B.1.5. VÝKONOVÁ SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA (PSD)

```
function y=PSD(tab,st,dist,mer,par)
    if par=="SK_D2" || par=="VK_D2"
        t=tab.KM_EXT(1:4:end); % ziska vektor staniceni po 1 m
        dol=25;
        hor=500;
    elseif par=="RK" || par=="PK"
        t=tab.KM_EXT;
        dol=0;
        hor=10000;
    elseif par=="KR_KS"
        t=tab.KM_EXT(1:4:end); % ziska vektor staniceni po 1 m
        dol=70;
        hor=10000;
    else
        t=tab.KM_EXT;
        dol=1;
        hor=25;
    end
    sel=t>=st-1e-6 & t<=st+dist/1000+1e-6; % logický vektor
    x=tab.(par)(sel,mer); % vektor vybraných hodnot parametru
    T=(t(2)-t(1))*1000; % vzdálenost měření [m]
    fs=1/T; % vzorkovací délková frekvence [1/m]
    N=floor(length(x)/2)*2; % počet hodnot
    xdft = fft(x);
    xdft = xdft(1:N/2+1);
    psd = (1/(fs*N)) * abs(xdft).^2;
    psd(2:end-1) = 2*psd(2:end-1);
    f = 0:fs/N:fs/2;
    y=[f' psd]; % vrátí matici vlnových délek a PSD
    sec=y(:,1)>=1/hor & y(:,1)<=1/dol;
    y=y(sec,:);
end
```

## B.1.6. MEZNÍ KŘIVKY VÝKONOVÉ SPEKTRÁLNÍ HUSTOTY (PSDLIM)

```
function y=PSDlim(par,zeme,typ)
    if zeme=="Cina"
        f=1/50:1/1000:1;
        if typ==1 || typ==2 %V==120
            if par=="RK"
                if typ==1 % upper irregularity
                    a=640.740; b=0.4233; c=6524.507; d=289.1726; e=4.3582;
                    k=-0.0003;
                elseif typ==3
                    a=255.976; b=0.1691; c=7819.645; d=346.5745; e=5.2233;
                    k=-0.0004;
                else % lower irregularity - better quality!
                    a=325.929; b=0.2151; c=28425.14; d=1261.602; e=18.9956;
                    k=-0.0015;
                end
            elseif par=="PK"
                if typ==1
                    a=1830.68; b=7.3882; c=20908.35; d=1028.226; e=30.9382;
                    k=0.008;
                elseif typ==3
```

```

        a=110.624; b=0.44649; c=2527.1; d=124.2566; e=3.73927;
        k=0.00097;
    else
        a=1077.07; b=4.3434; c=70234.04; d=3460.220; e=103.9562;
        k=0.027;
    end
elseif par=="SL" || par=="SP" || par=="SK_D2"
    if typ==1
        a=0; b=0.02622; c=0; d=1; e=0.01893; k=0.00003;
    elseif typ==3
        a=0; b=0.00874; c=0; d=1; e=0.01893; k=0.00003;
    else
        a=0; b=0.00306; c=0; d=1; e=0.01893; k=0.00003;
    end
elseif par=="VL" || par=="VP" || par=="VK_D2"
    if typ==1
        a=0; b=0.01351; c=0; d=1; e=0.00687; k=0;
    elseif typ==3
        a=0; b=0.00478; c=0; d=1; e=0.00739; k=0;
    else
        a=0; b=0.00166; c=0; d=1; e=0.00721; k=0;
    end
end
else %if V==160
    if par=="RK"
        if typ==11
            a=612.3768; b=0.4046; c=8660.944; d=383.8376; e=5.7852;
            k=-0.0004;
        elseif typ==13
            a=213.1331; b=0.1408; c=10851.220; d=480.9504; e=7.2484;
            k=-0.0005;
        else
            a=187.2267; b=0.1238; c=31792.310; d=1407.659; e=21.23;
            k=-0.0015;
        end
    elseif par=="PK"
        if typ==11
            a=1890.022; b=4.2158; c=19981.090; d=984.2226; e=18.5928;
            k=0.0011;
        elseif typ==13
            a=94.9519; b=0.2118; c=3613.811; d=178.0026; e=3.3627;
            k=0.0002;
        else
            a=511.6737; b=1.1433; c=65036.82; d=3191.977; e=60.47676;
            k=0.0036;
        end
    elseif par=="SL" || par=="SP" || par=="SK_D2"
        if typ==11
            a=0; b=0.01751; c=0; d=1; e=0.01893; k=0.00003;
        elseif typ==13
            a=0; b=0.00486; c=0; d=1; e=0.01893; k=0.00003;
        else
            a=0; b=0.00146; c=0; d=1; e=0.01893; k=0.00003;
        end
    elseif par=="VL" || par=="VP" || par=="VK_D2"
        if typ==11
            a=0; b=0.01016; c=0; d=1; e=0.00704; k=0;
        elseif typ==13
            a=0; b=0.0029; c=0; d=1; e=0.00758; k=0;
        end
    end
end

```

```

        else
            a=0; b=0.00084; c=0; d=1; e=0.0075; k=0;
        end
    end
end
y=(a*f.^2+b)/(c*f.^6+d*f.^4+e*f.^2+k);
elseif zeme=="Nemecko"
    f=1/100:1/1000:1/2.5;
    a=0.75;
    if typ==2 % low disturbance - better quality!
        Aa=2.119/(2*pi*10); Ap=4.032/(2*pi*10); Oc=0.82/(2*pi);
        Oy=0.0206/(2*pi); Os=0.438/(2*pi);
    else % high disturbance
        Aa=6.125/(2*pi*10); Ap=10.8/(2*pi*10); Oc=0.82/(2*pi);
        Oy=0.0206/(2*pi); Os=0.438/(2*pi);
    end
    if par=="VL" || par=="VP" || par=="VK_D2"
        y=(Ap*Oc^2)/((f.^2+Oy^2).*(f.^2+Oc^2));
    elseif par=="SL" || par=="SP" || par=="SK_D2"
        y=(Aa*Oc^2)/((f.^2+Oy^2).*(f.^2+Oc^2));
    elseif par=="RK" || par=="PK"
        y=((Ap*Oc^2/a).*f.^2)/((f.^2+Oy^2).*(f.^2+Oc^2).*(f.^2+Os^2));
    end
elseif zeme=="USA"
    f=1/304.8:1/1000:1/1.524;
    k=0.25;
    if typ==1 % V=16 a 24 km/h
        Av=1.2107/(2*pi*0.01); Aa=3.3634/(2*pi*0.01); Oc=0.8245/(2*pi);
        Os=0.6046/(2*pi);
    elseif typ==2 % V=40 a 48 km/h
        Av=1.0181/(2*pi*0.01); Aa=1.2107/(2*pi*0.01); Oc=0.8245/(2*pi);
        Os=0.9308/(2*pi);
    elseif typ==3 % V=64 a 97 km/h
        Av=0.6816/(2*pi*0.01); Aa=0.4128/(2*pi*0.01); Oc=0.8245/(2*pi);
        Os=0.852/(2*pi);
    elseif typ==4 % V=97 a 129 km/h
        Av=0.5376/(2*pi*0.01); Aa=0.3027/(2*pi*0.01); Oc=0.8245/(2*pi);
        Os=1.1312/(2*pi);
    elseif typ==5 % V=129 a 145 km/h
        Av=0.2095/(2*pi*0.01); Aa=0.0762/(2*pi*0.01); Oc=0.8245/(2*pi);
        Os=0.8209/(2*pi);
    else % V=177 km/h
        Av=0.0339/(2*pi*0.01); Aa=0.0339/(2*pi*0.01); Oc=0.8245/(2*pi);
        Os=0.438/(2*pi);
    end
    if par=="VL" || par=="VP" || par=="VK_D2"
        y=(k*Av*Oc^2)/(f.^2.*(f.^2+Oc^2));
    elseif par=="SL" || par=="SP" || par=="SK_D2"
        y=(k*Aa*Oc^2)/(f.^2.*(f.^2+Oc^2));
    elseif par=="RK" || par=="PK"
        y=(4*k*Av*Oc^2)/((f.^2+Oc^2).*(f.^2+Os^2));
    end
end
y=[f' y'];
end

```

## B.2. SKRIPTY PRO HODNOCENÍ KVALITY GEOMETRIE KOLEJE

### B.2.1. HODNOCENÍ GPK V ČASE S DETEKČÍ PODBÍJENÍ

```
nk=1;
dist=200;
name='Brno-Adamov_K1';
file='.\Data\data_Brno-Adamov_K1_km_161.8-170.8.mat';
par="VL";
vel='SD'; % druh hodnocené veličiny
% jmen='VL'; 'RK' 'SL' 'SP' 'SK_D2' 'PK' 'VK_D2' 'VL' 'VP'
datax=load(file); % načte data z uloženého binárního souboru
mesdist=floor(datax.mesdist/dist)*dist; % získá délku hodnoceného úseku
zat=datax.zat; % získá vektor provozního zatížení při měření
t=datax.dates; % získá vektor dat měření
m=length(t); % Spočítá prvky vektoru "t" - počet měření
data=datax.datar; % získá tabulku dat
n=mesdist/dist; % Získá počet segmentů k hodnocení
val=struct;
st0=data.KM_EXT(1);
stmax=st0+mesdist/1000;
stan=st0:dist/1000:stmax-dist/1000;
cols=[0 0 1; 1 0 0; 1 0.6 0; 0 0.7 0; 0.5 0 1; 1 0 1];
for sti=stan
    close all
    y=zeros(1,m); % definice matice hodnot 1 parametru
    udrzba=NaN(1,m-1);
    hu=zeros(1,length(udrzba));
    hr=zeros(1,length(udrzba)+1);
    nadpis=strcat(vel," Progress, K",num2str(nk)," km ");
    rozm=[13 6];
    figure('units','centimeters','position',[5 5 rozm(1) rozm(2)]);
    for j=1:m % projde jednotlivá měření
        y(j)=SDO(data,sti,dist,j,par); % výpočet SDO v úseku sti z j-tého měření
    end
    miny=min(y);
    maxy=max(y);
    delk=abs(maxy-miny);

    h=plot(gca,t,y,'color',cols(2,:), 'linestyle','none','marker','*',...
        'MarkerSize',5); % vykreslí graf SDO parametru
    hold on
    k2=1;
    % automaticka detekce podbití
    for k=2:m
        if y(k)<y(k-1) && abs(y(k)-y(k-1))>0.07 % vetsi pokles SD = udrzba
            if abs(y(k)-y(k-1))>0.25 ... % zadna dalsi kontrola
                || (k<m && abs(y(k+1)-y(k-1))>0.07) ... % dopredna kontrola
                || (k>2 && abs(y(k)-y(k-2))>0.07) % zpetna kontrola
                    udrzba(k2)=t(k-1)+calmonths(1);
                    k2=k2+1;
            end
        end
    end
    udrzba=rmmissing(udrzba);
    for k=1:length(udrzba) % vyznaceni podbiti a vypocet regrese
        hu(k)=plot(gca,[udrzba(k) udrzba(k)],[miny-0.05*delk maxy+0.05*delk], ...
```

```

'color','k','linewidth',0.5,'LineStyle','--');
if k==1
    sec=t<udrzba(k);
else
    sec=t>udrzba(k-1) & t<udrzba(k);
end
if length(t(sec))>1
    p=polyfit(denum(t(sec)),y(sec),1);
    regr=polyval(p,denum(t(sec)));
    hr(k)=plot(gca,t(sec),regr,'color',cols(1,:), 'linewidth',1.0);
end
end
if ~isempty(udrzba)
    sec=t>udrzba(end);
else
    sec=1:m;
    k=0;
end
if length(t(sec))>1
    p=polyfit(denum(t(sec)),y(sec),1);
    regr=polyval(p,denum(t(sec)));
    hr(k+1)=plot(gca,t(sec),regr,'color',cols(1,:), 'linewidth',1.0);
end
hold off
xtickformat('yyyy')
xlabel('Čas [rok]','fontsize',10) % popis osy x
ylabel(strcat(vel," [mm]'),'fontsize',10) % popis osy y
grid on
ylim([miny-0.05*delk maxy+0.05*delk])
leg=[replace(par,"_","") "podbití" "regrese"];
hr=hr(hr>0);
if sum(hu)==0
    leg2=[h hr(1)];
else
    leg2=[h hu(1) hr(1)];
end
legend(leg2,leg,'location','eastoutside')
set(gca,'units','centimeters','position',...
[1.2 1.2 rozm(1)-4.3 rozm(2)-1.3],'fontsize',10) % vykreslí graf
saveas(gcf,char(strcat(".\Grafy\Regrese_cas_",vel,"_",par,"_",name,...
"_km_",num2str(sti,'%2f'),"_",num2str(dist),"m.png")))
end

```