

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra Fyziky

**Opakovatelnost měření geometrických
parametrů železniční koleje**

Diplomová práce

Autor:	Alena Havlová
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Fyzikální měření a modelování
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Jan Kříž, PhD.
Odborný konzultant:	
Pracoviště:	
Oponent:	doc. RNDr. Jan Šlégr, PhD.

Hradec Králové

leden 2020

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedla všechny prameny, z kterých jsem vycházela.

V Hradci Králové dne 15. 12. 2019

Alena Havlová

Anotace práce:

HAVLOVÁ, A., *Opakovatelnost měření geometrických parametrů železniční koleje*. Hradec Králové, 2020. Diplomová práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Jan Kříž, PhD.

Diplomová práce se zaměřuje na statistické zkoumání dat za účelem zjištění míry opakovatelnosti měření geometrických parametrů koleje pomocí ručního měřicího vozíku KRAB. V práci je zahrnuto základní seznámení s vozíkem a procesem měření a následně je pracováno se získanými daty tak, aby byla vhodně připravena pro statistické vyhodnocení. Pomocí statistických metod byla experimentálně prokázána opakovatelnost měření. Vozík KRAB je tedy možné používat k opakovanému sběru dat v delším časovém horizontu.

Klíčová slova:

Geometrické parametry koleje, opakovatelnost měření, statistické vyhodnocení dat

Annotation:

HAVLOVÁ, A., *Repeatability of measurement of track geometry parameters*. Hradec Králové, 2020. Thesis at Fakulty of science, University of Hradec Králové. Supervisor of thesis doc. RNDr. Jan Kříž, PhD.

The thesis is focused on statistical processing of measured data to find out the measure of the repeatability of measurement of track geometry parameters using manual measuring trolley KRAB. A basic introduction to the trolley and the process of measurement it is involved, the obtained data are then preprocessed, so they are ready for statistical evaluation. Using statistical methods, it was experimentally shown that the measured data are repeatable. Thus, it is possible to use the trolley for repeated data collecting in wider time horizon in praxis.

Keywords:

Track geometry parameters, repeatability of measurement, statistical data evaluation

Poděkování:

Tímto bych chtěla poděkovat za vedení práce doc. RNDr. Janu Křížovi, PhD., za všechny udělené rady a čas, který nad mou prací strávil. Dále všem svým bývalým kolegům z TÚDC při SŽDC, s. o., kteří mi vznik práce umožnili, byli velmi nápomocní, vždy ochotni poradit a při tvorbě práce mě podporovali. Také ing. Josefu Turkovi, který nikdy neváhal zodpovědět mé mnohé dotazy. V neposlední řadě bych pak chtěla poděkovat mému manželovi, který mi vytvořil patřičné podmínky, abych práci mohla dokončit.

Obsah

Úvod	7
2 Geometrické parametry koleje a jejich měření.....	8
2.1 Geometrické parametry koleje.....	8
2.2 Měřicí vozík KRAB.....	9
3 Princip měření a výpočet sledovaných veličin.....	11
3.1 Rozchod a převýšení koleje.....	11
3.2 Podélný směr koleje a výška koleje	12
3.3 Nepřímé měření skutečné geometrie	12
4 Postup a průběh měření	18
5 Výsledky měření	20
5.1 Zpracování surových dat pomocí grafického znázornění	20
5.2 Zpracování dat pro statistické vyhodnocení.....	28
Závěr.....	44
Použitá literatura a zdroje:.....	45
Seznam použitých zkratk:.....	46
Seznam obrázků:	46
Seznam tabulek:.....	47

Úvod

Diplomová práce se zabývá vyhodnocením měření geometrických parametrů koleje (dále jen GPK) pomocí ručního vozíku KRAB. Toto téma jsem zvolila proto, že jsem byla v době vzniku práce zaměstnána na Technické ústředně Správy železniční dopravní cesty, s. o. a mou náplní práce bylo právě vyhodnocování a třídění dat nasbíraných při měření GPK.

GPK je nutné sledovat z toho důvodu, že přímo ovlivňují jednak kvalitu, ale především bezpečnost provozu železniční dopravní cesty. Pravidelné každoroční (často i opakované) měření celé sítě kolejí v ČR pak může pomoci při odhalení vad v koleji a při realizaci včasné nápravy, aby bylo možné udržovat sledované parametry v povolených mezích. K měření těchto parametrů slouží různé prostředky, které pracují různým způsobem. V současné době se na území ČR jedná se o měřicí vůz, tři měřicí drezíny a vozíky KRAB. Měřicí vůz slouží především k měření železničních koridorů a významnějších meziměstských úseků. Měřicí drezíny měří ostatní meziměstské úseky a důležité staniční koleje. Ruční vozíky KRAB slouží především k doměřování méně významných staničních kolejí, ale také při nutnosti přeměřit nějaký úsek koleje vzhledem k nečekané události či podezření na vadu v případě, že není k dispozici větší měřicí prostředek.

V této práci chci pomocí metod statistické matematiky ověřit, zda je možné říci, že měření realizovaná ručním měřicím vozíkem KRAB jsou opakovatelná. Opakovatelnost měření je totiž zásadní při dlouholetém sběru dat na stejných úsecích kolejí a při sledování vývoje jejich stavu a kvality v čase. Zaměřím se na veličiny směr koleje, výška koleje, rozchod koleje a převýšení koleje. Je možné sledovat i další veličiny GPK, např. zborcení koleje, ale těmi se v této práci zabývat nebudu.



Obr. č. 1 – práce s měřicím vozíkem KRAB. [Zdroj: archiv SŽDC, s.o.]

2 Geometrické parametry koleje a jejich měření

2.1 Geometrické parametry koleje

Geometrie koleje je dána jednak veličinami geometrického uspořádání koleje (směrová a výšková poloha koleje) a jednak veličinami konstrukčního uspořádání koleje (rozchod a převýšení). Tyto veličiny jsou definovány na základě následujících pojmů:

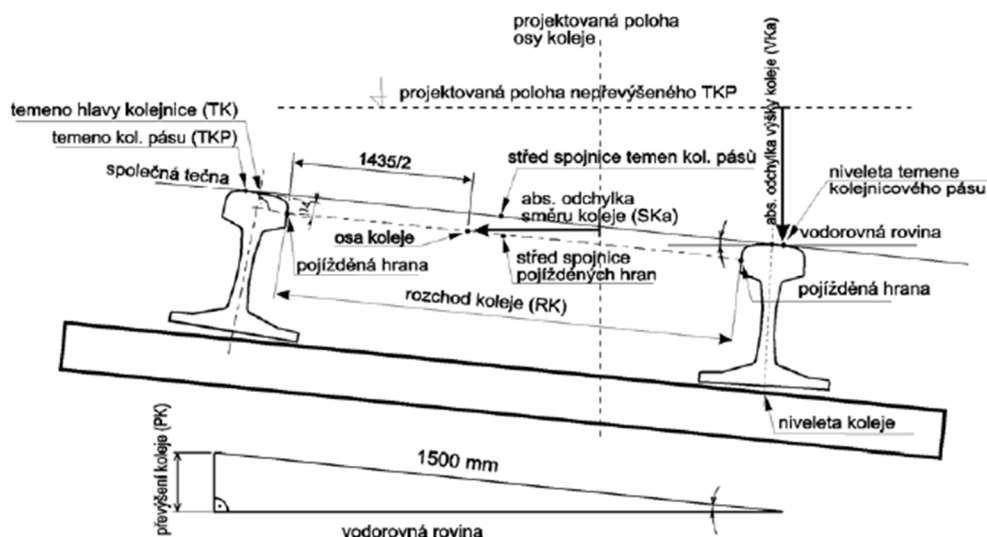
Rovina příčného řezu: svislá rovina, v půdorysu kolmá k ose koleje,

pravý (levý) kolejnicový pás: kolejnicový pás ležící vpravo (vlevo) od osy koleje ve směru stoupající kilometrické polohy koleje,

temena kolejnicových pásů: body dotyku společné tečny k plochám obou hlav protilehlých kolejnicových pásů, ležící v rovině příčného řezu,

temeno hlavy kolejnice: průřez horní pojížděné plochy hlavy kolejnice s osou symetrie kolejnicového profilu,

pojížděná hrana kolejnicových pásů: je geometrické místo průřezů (prostorová čára) vnitřní plochy hlavy kolejnice s rovinou vedenou ve vzdálenosti 14 mm pod temenem kolejnice kolmo k ose symetrie kolejnicového profilu.



Obr. č. 2 – Základní pojmy geometrie koleje. [Zdroj: 1]

Geometrické uspořádání koleje

je určeno tzv. vytvářejícími křivkami, což jsou prostorové křivky definované následovně:

směr koleje: (geometrická osa koleje) je prostorová křivka tvořená středy příčných spojnic pojížděných hran protilehlých kolejnicových pásů,

výška koleje v ose: je prostorová křivka tvořená středy spojnice temen kolejnicových pásů.

Konstrukční uspořádání koleje

je definováno na základě následujících měř:

rozchod: je příčná vzdálenost pojížděných hran protilehlých kolejnicových pásů,

převýšení koleje: určuje úhel, který svírá společná příčná tečna k plochám hlav protilehlých kolejnicových pásů a vodorovná rovina. Je dáno délkou kratší odvěsny pravoúhlého trojúhelníka, jehož přepona má délku 1500 mm.

Uvedené veličiny lze také rozdělit z hlediska směru, ve kterém se sledují. Toto rozdělení v kombinaci s rozdělením podle typu uspořádání koleje je zobrazeno v následující tabulce:

Tab. č. 1 - rozdělení geometrických parametrů koleje [Zdroj: 2].

	Geometrické uspořádání koleje (odchylky od projektované polohy)	Konstrukční uspořádání koleje (přímé míry na koleji)
příčný směr	Směr (SK)	Rozchod (RK)
svislý směr	Výška (VK)	Převýšení (PK)

2.2 Měřicí vozík KRAB

Měřicí vozík KRAB-Light je zařízení, které měří rozchod, směr, převýšení a výšku železniční koleje metodou tříbodové tětiny délky 2,1 m. Všechny geometrické signály se vzorkují v konstantním dráhovém kroku 0,25 m. Vozík je obvykle vybaven odnímatelným ramenem zborcení, které měří tzv. kvasizborcení. Tento pomocný geometrický signál slouží ke zlepšení kvality měření převýšení koleje. Obsluhu vozíku obvykle tvoří dvě osoby, aby bylo možné s vozíkem snadno manipulovat.

Měření je řízeno palubním počítačem (dále jen PDA), který ukládá naměřené hodnoty do své paměti ve formě datového souboru *.krk. Kromě toho PDA zobrazuje během měření aktuální hodnoty kilometráže, rozchodu, změny rozchodu na metr, převýšení, zborcení na zvolené bázi, výšky a směru, resp. poloměru oblouku. Během měření je možné zvolit způsob zobrazení, a to ze tří možností: číselné hodnoty, sloupcového grafu nebo grafické znázornění linie signálů na displeji. Počítač rovněž signalizuje překročení dovolených hodnot pro každou veličinu.

Naměřená data je možné vyhodnocovat ihned on-line, nebo později off-line v kanceláři. Off-line vyhodnocení naměřených signálů (tzv. primárních hodnot) umožňuje vypočítat řadu dalších geometrických veličin: zborcení na libovolné bázi, křivost oblouku, změnu rozchodu, směr a výšku koleje na libovolně dlouhé tětivě nebo tzv. skutečnou geometrii.

Technické parametry měřícího vozíku

Hmotnost.....	cca 36 kg
Provozní rychlost při měření	max. 7 km/h
Délka měřicí tětivy.....	2,1 m
Doba měření bez nutnosti dobíjet akumulátory	min 12 h
Maximální délka jednotlivého měření.....	> 500 km
Vzorkovací krok.....	25 cm
On-line vizualizace měřených geom. veličin.....	grafická.

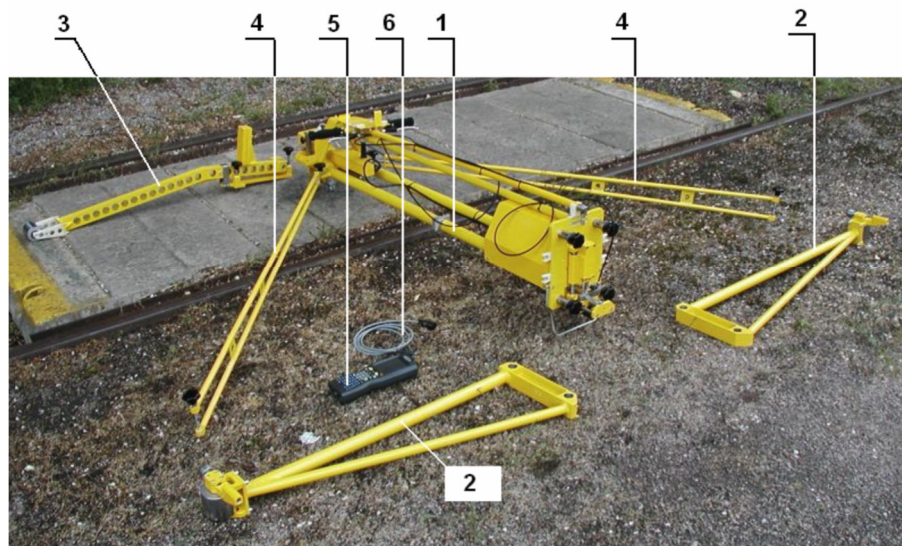
Vozík KRAB-Light se používá dvěma základními způsoby:

- Pro okamžitou informaci o stavu geometrických veličin v koleji
- Pro sběr geometrických dat s následným vyhodnocením v kanceláři

PDA zobrazuje hodnoty, které odpovídají místu 12,5 cm za aktuální pozicí osy vozíku. Tento posun je způsoben tím, že primární vzorkování probíhá v časové doméně 100x za sekundu (tj. 100 Hz, což při rychlosti 1 m.s⁻¹ dává dráhový krok 1 cm). Převzorkování do dráhové domény se děje průměrováním časových vzorků přes délku okna, která je shodná s velikostí nastaveného dráhového vzorkovacího kroku. Ten se nastavuje v konfiguračním souboru měřícího programu a lze ho nastavit libovolně, nejčastěji 5 cm, 12,5 cm a 25 cm. V našem případě je dráhový vzorkovací krok 25 cm. Zobrazené hodnoty geometrických veličin se tedy vztahují

k již projetímu místu na koleji, vzdálenému $\frac{1}{2}$ nastaveného vzorkovacího kroku za pozicí osy vozíku (např. 12,5 cm při kroku 25 cm).

Hlavní dílčí celky, z kterých měřicí vozík KRAB-Light sestává jsou vyobrazeny na obrázku č. 3:



Obr. č. 3 – součásti měřicího vozíku KRAB: 1 - příčný díl, 2 - trojúhelníková ramena podélného nosníku, 3 - přídatné rameno zborcení, 4 - šikmé dvoutrubkové vzpěry, 5- měřicí počítač, 6 - kabel propojující vozík a měřicí počítač. [Zdroj: 2]

3 Princip měření a výpočet sledovaných veličin

3.1 Rozchod a převýšení koleje

Získání hodnot převýšení a rozchodu koleje je poměrně snadné, neboť se jedná o přímo měřené veličiny a není nutné je jakkoli přepočítávat. Údaje o rozchodu koleje se získají odečtením rozdílu mezi středním kolečkem na jedné straně vozíku a protilehlým kolečkem na druhé kolejnici. Mezi kolečky není pevná vzdálenost, ale kolečka jsou pohyblivá. Jak se jejich vzdálenost mění, do PDA jsou zaznamenány rozdíly mezi nimi, a tak jsou získána data o změnách v rozchodu koleje.

K získání údajů o převýšení koleje slouží u měřicího vozíku inklinometr, který zaznamenává aktuální náklon vozíku proti vodorovné rovině.

3.2 Podélný směr koleje a výška koleje

Získání hodnot u těchto dvou veličin je složitější. Směr a výšku lze hodnotit na základě odchylky od projektované polohy koleje, kterou udávají pořadnice (nezávislá proměnná y) vytvářejících křivek směru a výšky. Prostředky pro měření provozní geometrie koleje ovšem projektovanou polohu koleje obvykle neznají, a proto mohou měřit a hodnotit pouze "hladkost" vytvářejících křivek vzhledem ke střednici těchto křivek.

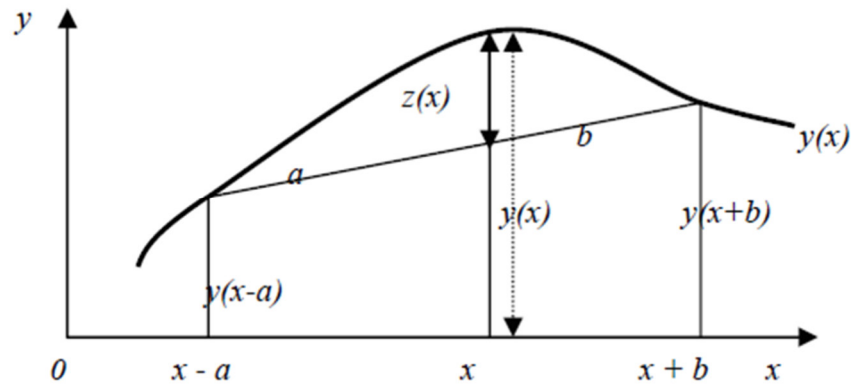
Střednice geometrické veličiny je myšlena jako průběh hodnot, jež by vznikly filtrací geometrické veličiny měřené v celém vlnovém rozsahu $\lambda = 1 - \infty$ m dolnofrekvenční propustí s hraniční hodnotou největší vlnové délky v daném pásmu. Pro pásmo s rozsahem vlnových délek $3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$ je to tedy křivka tvořená pouze největší (hraniční) vlnovou délkou 25 m. Tato křivka tvoří nulovou čáru pro dynamické geometrické veličiny. Od této nulové čáry jsou hodnoceny lokální závady geometrické veličiny a k této nulové čáře jsou vztaženy stavební, provozní a mezní provozní odchylky.

V zásadě jsou dvě cesty, jak tuto hladkost hodnotit. První je založena na měření vzepětí na tětivě, druhá se nazývá měření tzv. skutečné geometrie. K přímému měření skutečné geometrie se využívají akcelerometry. Aby toto měření mohlo fungovat, je však nutné dosáhnout vyšších rychlostí, než je možné dosáhnout s ručním měřicím vozíkem. Tuto metodu využívají větší měřicí prostředky. Při měření ručním vozíkem KRAB je nutné skutečnou geometrii změřit nepřímo, a to pomocí měření vzepětí na tětivě měřicího vozíku.

3.3 Nepřímé měření skutečné geometrie

Vzepětí na tříbodové asymetrické tětivě a přenosová funkce

Pokud se nerovnosti vytvářejících křivek směru a výšky měří a posuzují pomocí vzepětí na tětivě, záleží výsledek na délce tětivy a její asymetrii. Z praktického názoru je zřejmé, že čím kratší je délka tětivy, tím více se podceňují dlouhé nerovnosti. Tento známý vztah lze účelně popsat tzv. přenosovou funkcí. Jde o funkci, která charakterizuje operaci výpočtu vzepětí $z(x)$ ze vstupního signálu $y(x)$ – viz. obr. č. 4. Jedná se v podstatě o odezvu tětivy na různé vlnové délky. Každý měřicí prostředek a každá tětiva má vlastní, charakteristickou přenosovou funkci.



Obr. č. 4 – grafické znázornění vzepětí na tříbodové asymetrické tětivě. [Zdroj: 2]

Přičemž

$$z(x) = y(x) - \left[\frac{b}{a+b} \cdot y(x-a) + \frac{a}{a+b} \cdot y(x+b) \right]$$

(1)[Zdroj: 2]

Kde:

a, b délky asymetrické tětiny dané konstrukcí měřicího prostředku

$y(x)$vstupní signál získaný měřením

$z(x)$vzepětí na tětivě

Nezávisle proměnná v aplikaci měření GPK je dráha, a proto je značena x .

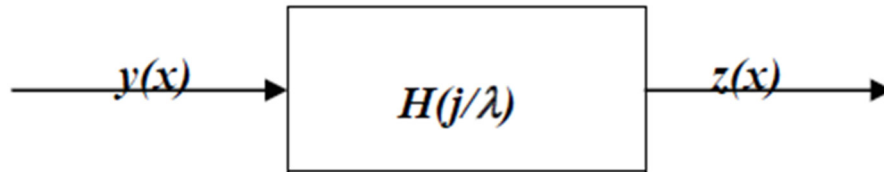
Aby bylo možné na získaný signál aplikovat přenosovou funkci, je nejprve nutné převést jej z dráhové domény (x) do domény vlnčtové – tedy počet vln na jeden metr ($1/\lambda$). To provedeme použitím rychlé Fourierovy transformace, aplikované na rovnici č. 1:

$$Z\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\right) = Y\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot \left[1 - \frac{b}{a+b} e^{-j\frac{2\pi a}{\lambda}} - \frac{a}{a+b} e^{j\frac{2\pi b}{\lambda}} \right]$$

(2)[Zdroj: 2]

Nyní je rovnice v komplexním tvaru, kde j značí imaginární jednotku.

Výstupem z měření je signál $y(x)$, který vstupuje do systému plně popsaného přenosovou funkcí $H(j/\lambda)$. Odezva systému je výstupní signál $z(x)$:



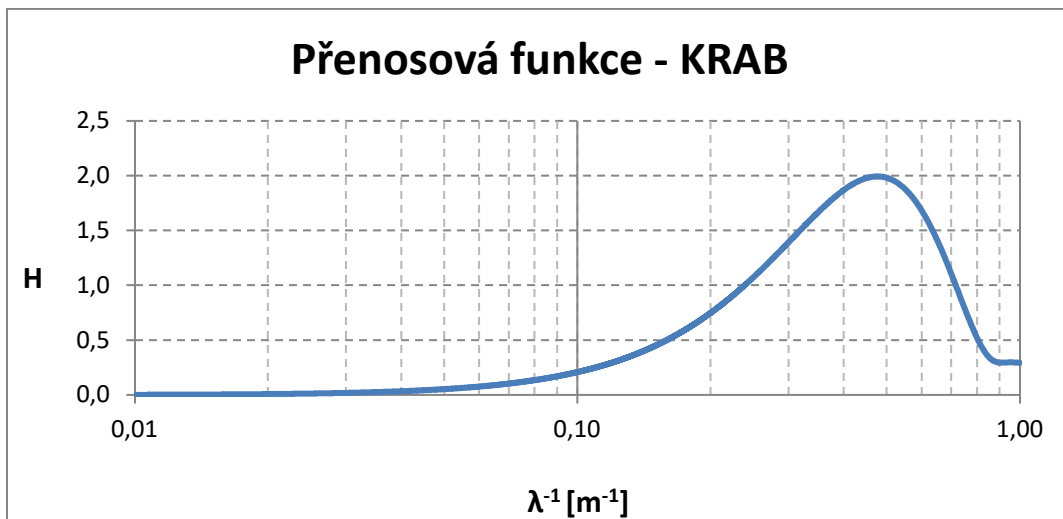
Obr. č. 5 – použití přenosové funkce. [Zdroj: 2]

Přenosová funkce vzepětí měřeného na třibodové asymetrické těživě má pak tento tvar:

$$H\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\right) = 1 - \frac{b}{a+b} e^{-j\frac{2\pi a}{\lambda}} - \frac{a}{a+b} e^{j\frac{2\pi b}{\lambda}}$$

(3)[Zdroj: 2]

Tvar přenosové funkce pro měřicí vozík KRAB s těživou o délce 2,1 m je vyobrazen v grafu č. 1. Protože se jedná o komplexní funkci, je v grafu na obrázku č. 6 vykreslen pouze průběh absolutní hodnoty této funkce.



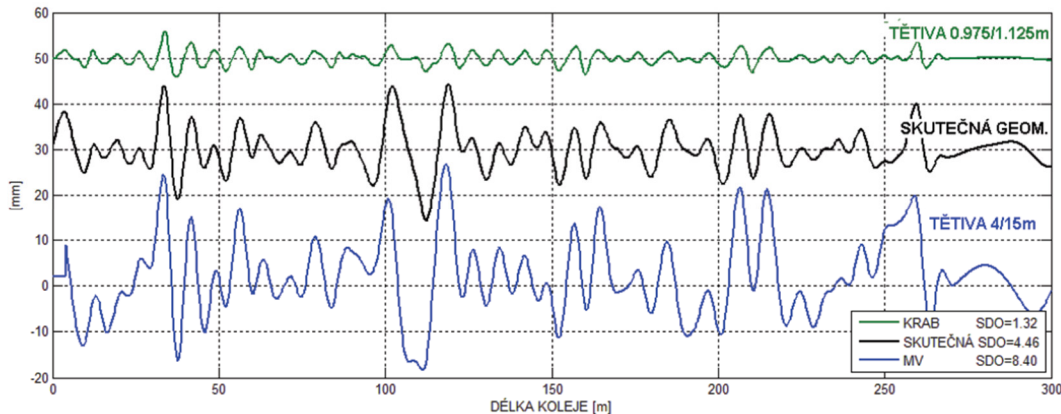
Obr. č. 6 – přenosová funkce měřicího vozíku KRAB s těživou o délce 2,1 m. [Zdroj: archiv SŽDC, s.o.]

Na vodorovné ose je zobrazena převrácená hodnota délky vlny λ v m^{-1} . Na svislé ose je vynesena rozsah hodnot, kterých může dosahovat absolutní hodnota $|H(\lambda)|$ přenosové funkce, které se pohybují mezi 0 až 2. Prakticky přenosová funkce zobrazuje, jaký je v závislosti na měřených vlnových délkách poměr mezi amplitudou zaznamenanou měřicím systémem a skutečnou amplitudou signálu geometrické veličiny. Ideální hodnota přenosové funkce je 1. To značí, že měřicí systém zaznamenává nezkresleně (z hlediska amplitud) to co je v trati. Toto splňuje za určitých podmínek přímo pouze měřicí vůz pro železniční svršek, (dále jen MVŽSv). Měřicí vozík KRAB provádí přepočítání naměřeného vzepětí (směru koleje a podélné výšky koleje) na skutečnou geometrii tak, že matematickou metodou opraví svou nejednotkovou přenosovou funkci, aby byla rovná jedné.

Přepočítání na skutečnou geometrii

Různé měřicí metody na různých prostředcích neposkytují vzájemně porovnatelné výsledky z důvodu rozdílnosti přenosových funkcí měřicího systému. Proto byl zaveden pojem skutečná geometrie v určeném vlnovém pásmu, pro které je výsledná přenosová funkce (co nejlépe) rovna jednotkové funkci (systém má identické zesílení a nulový fázový posun pro všechny vlnové délky pásma).

Z obrázku č. 7 je patrné, že bez aplikace matematické metody na vyloučení vlivu nejednotkové přenosové funkce by vozík KRAB měřil příliš malé amplitudy, MVŽSv naopak příliš velké, a navíc v obou případech tvarově zkreslené.

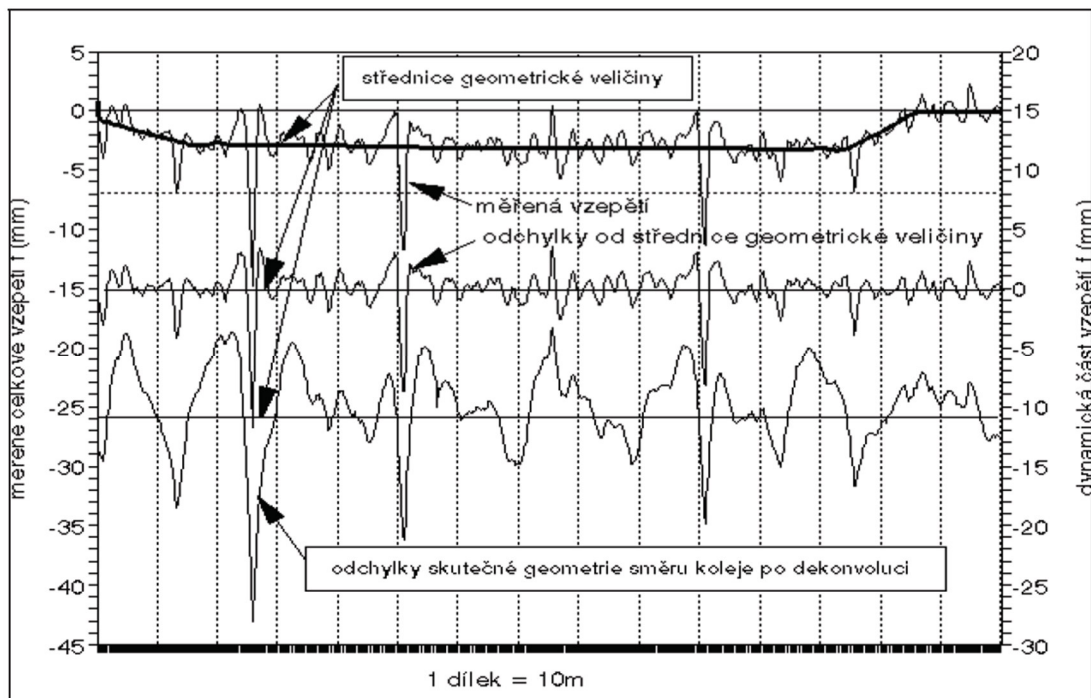


Obr. č. 7 – porovnání vlivu přenosových funkcí na naměřené hodnoty: zeleně – měřicí vozík KRAB; černě – skutečná geometrie; modře - MVŽSv. [Zdroj: 1]

Přepočítání změřeného vzepětí měřicím vozíkem KRAB ve směru koleje na skutečnou geometrii lze velice zjednodušeně sledovat na obrázku č. 8. Na vodorovné ose je zaznamenána ujetá vzdálenost (m) měřená na temeni kolejnicového pasu. Na levé svislé ose je měřítko pro změřené vzepětí směru koleje. První graf od shora zobrazuje naměřený průběh celkového vzepětí směru koleje zatíženého přenosovou funkcí měřicí asymetrické tětivy. Tento graf obsahuje vlnové délky $\lambda = 1 - \infty$ m, tedy krátkovlnnou (odchylky od projektované hodnoty vzepětí) i dlouhovlnnou (projektovanou hodnotu vzepětí v kružnicových obloucích a v

přechodnicích) složku vzepětí směru koleje. Tímto celkovým vzepětím směru koleje je při zpracování dat počítačem proložena střednice geometrické veličiny.

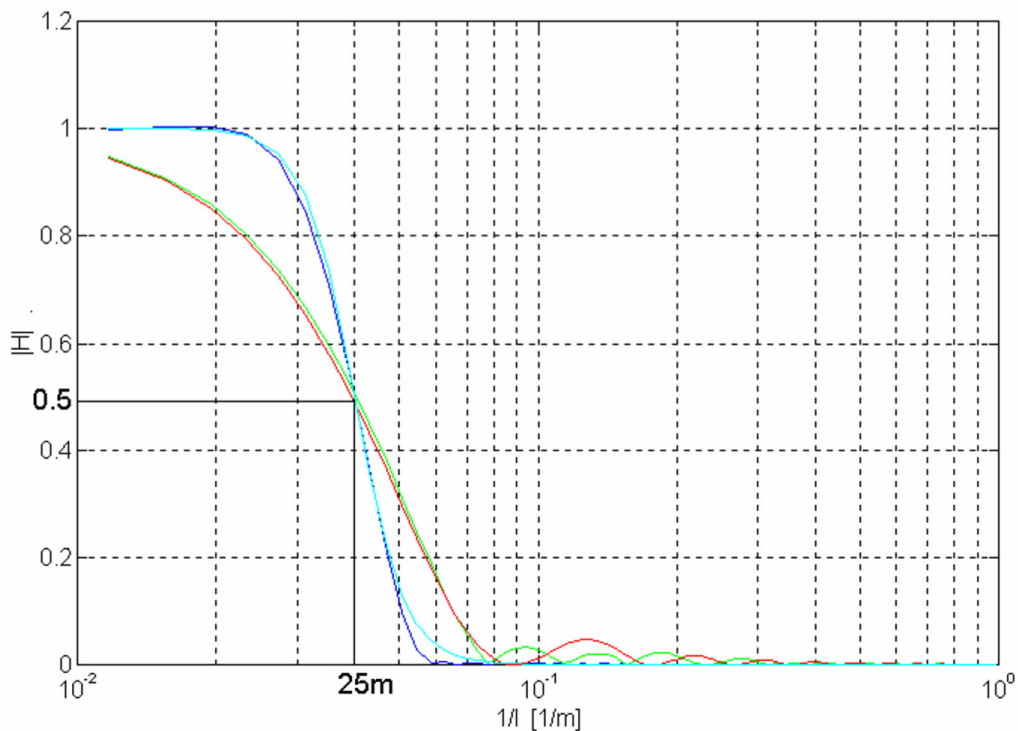
Na druhém grafu od shora je změřené vzepětí směru koleje již zbaveno dlouhovlnné složky (projektovaného vzepětí v kružnicových obloucích a v přechodnicích) a střednice geometrické veličiny je rovna nule. Posledním krokem, jehož výsledek je zobrazen na třetím grafu od shora je přepočet dynamického vzepětí (pro vlnové délky $\lambda = 1 - 25$ m) na skutečnou geometrii směru koleje. Rozdíl v amplitudách dynamického vzepětí směru koleje a skutečné geometrie směru koleje je zachycen pomocí osy na pravé straně grafu.



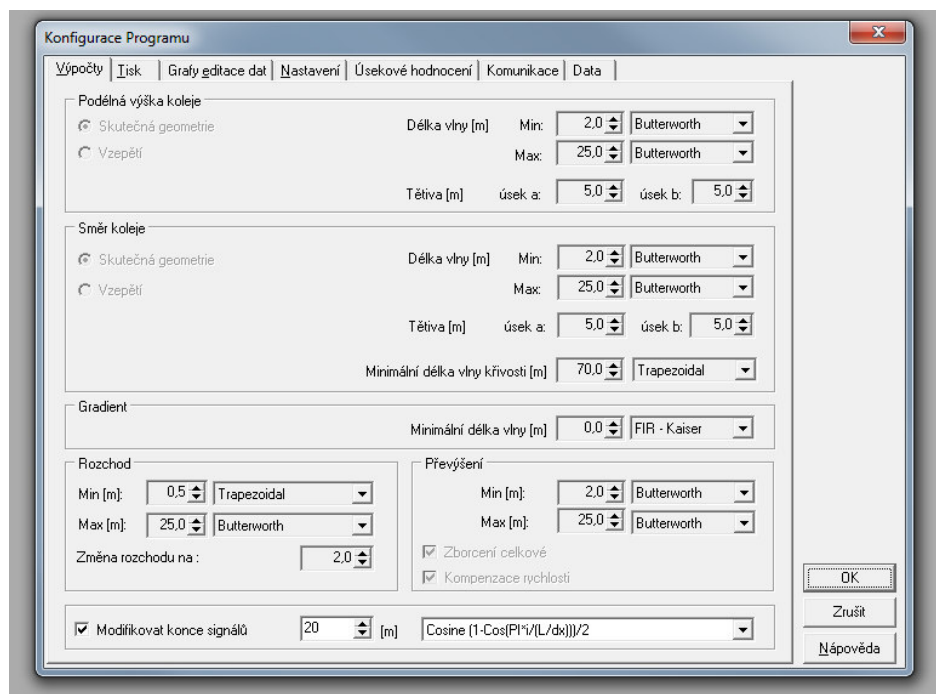
Obr. č. 8 – grafické znázornění přepočtu na skutečnou geometrii. [Zdroj: 1]

Filtrace dat

Filtrací se rozumí metoda, jak ze vstupního signálu odstranit některé vlnové složky. U měřicího vozíku KRAB jsou důležité vlnové délky v rozmezí od 3 do 25 metrů. Při sběru dat použitých v této diplomové práci byly využity dva filtry – Butterworthův a Lichoběžníkový, viz. obrázky č. 9 a 10. K odfiltrování krátkovlnné složky signálu je využívána dolnofrekvenční propust a k filtraci dlouhovlnné složky je použita hornofrekvenční propust.



Obr. č. 9 – filtry používané měřicím vozíkem KRAB. Modře FIR-Kaiser filtr, zeleně lichoběžníkový filtr, červeně Trojúhelníkový filtr, tyrkysově Butterworth filtr.
[Zdroj: 2]



Obr. č. 10 – nastavení použitých filtrů v programu. Při měření byly využity Butterworthův filtr a lichoběžníkový filtr. [Zdroj: archiv SŽDC, s. o.]

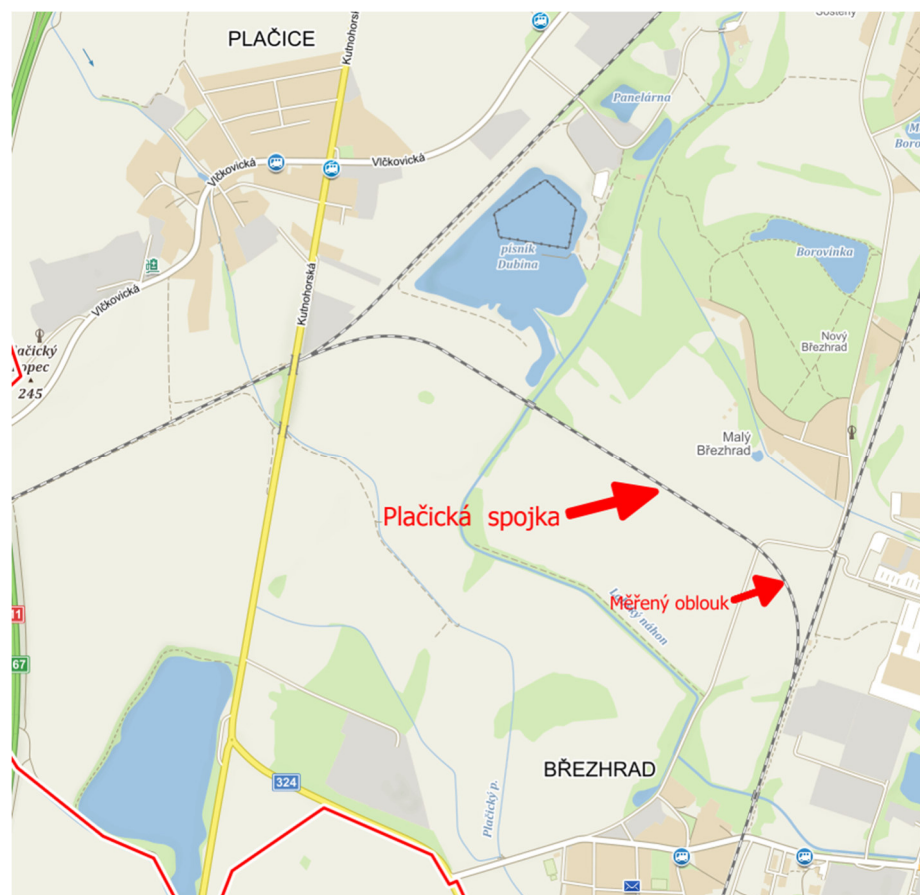
4 Postup a průběh měření

Datum měření a klimatické podmínky

Měření probíhalo dne 10. 7. 2018. Všechna data byla nasbírána během jednoho dne, tedy za stejných klimatických podmínek. V den měření bylo 22 °C, oblačno, bez srážek. Vzhledem k tomu, že měření probíhalo za srovnatelných teplotních podmínek, můžeme jejich vliv na výsledná data zanedbat.

Lokace měření

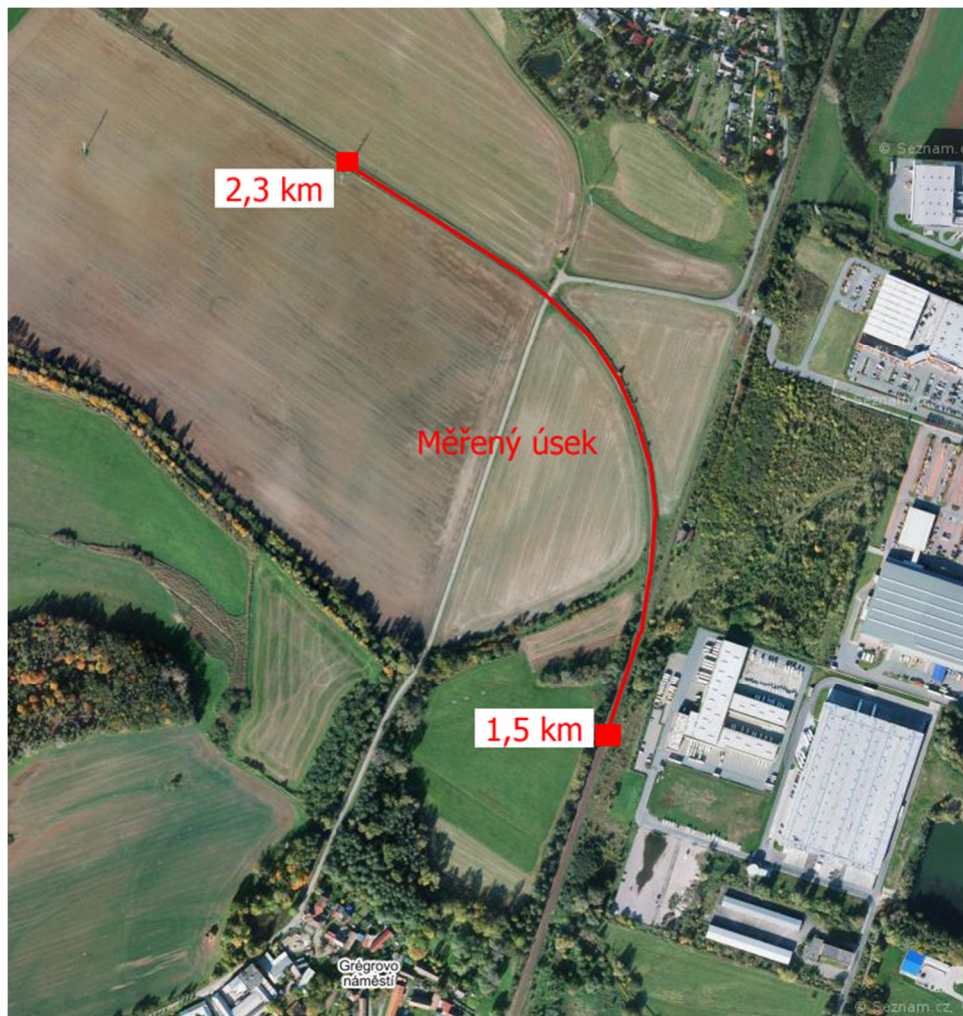
Ke srovnávacímu měření byl vybrán úsek mezi obcemi Praskačka a Pohřebačka, tzv. „Plačická spojka“. Tato trať není běžně využívána pro osobní dopravu, a proto bylo vhodné měření provádět zde, neboť díky nízkému vytížení trati bylo možné celé měření uskutečnit během jednoho dne.



Obr. č. 11 – Označení místa měření

Zvoleno bylo místo s obloukem, kde je pravděpodobnost získání zajímavých dat vyšší, neboť trať je v oblouku namáhána více, než v přímém směru. Měření

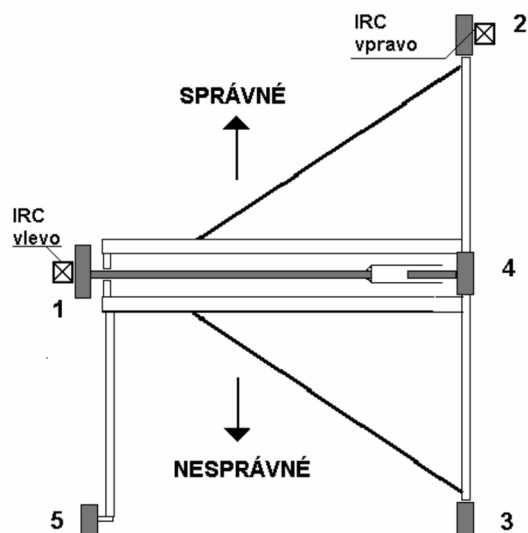
probíhalo na 800 m dlouhém úseku, a to od km 1,5 do km 2,3 trati – staničení trati. Toto staničení bylo vybráno proto, že obě místa se nacházejí v přímé trati a mezi nimi je oblouk, který tak mohl být proměřen celý.



Obr. č. 12 – Detail měřeného úseku

Postup měření

Měření bylo nutné provést celkem čtyřikrát. Měřící vozík může měřit ve dvou směrech, v tzv. „postavení správném“ a „postavení nesprávném“. Aby bylo možné důkladně porovnat měření, bylo nutné získat data ve směru rostoucího staničení v postavení správném i nesprávném a ve směru klesajícího staničení v postavení správném i nesprávném (viz. obr. č. 13).



Obr. č. 13 – Označení postavení vozíku. Číselně jsou označena jednotlivá kola.
[Zdroj: 2]

Data byla sbírána tak, že se vozík sestrojil, nasadil na koleje a propojil se s PDA, které je jeho součástí. Poté se s vozíkem najelo na místo, od kterého bylo vhodné sbírat data, tedy bylo nutné najít tzv. staniční kámen s uvedeným staničením 1,5 km. Na tomto místě bylo měření zapnuto a vozík byl tlačěn ve směru rostoucího staničení po staniční kámen s hodnotou 2,3 km, kde bylo měření ukončeno. Stejným způsobem byla nasbírána i všechna ostatní data. Pro změnu postavení vozíku je nutné jej zvednout a ručně otočit do opačného směru.

5 Výsledky měření

5.1 Zpracování surových dat pomocí grafického znázornění

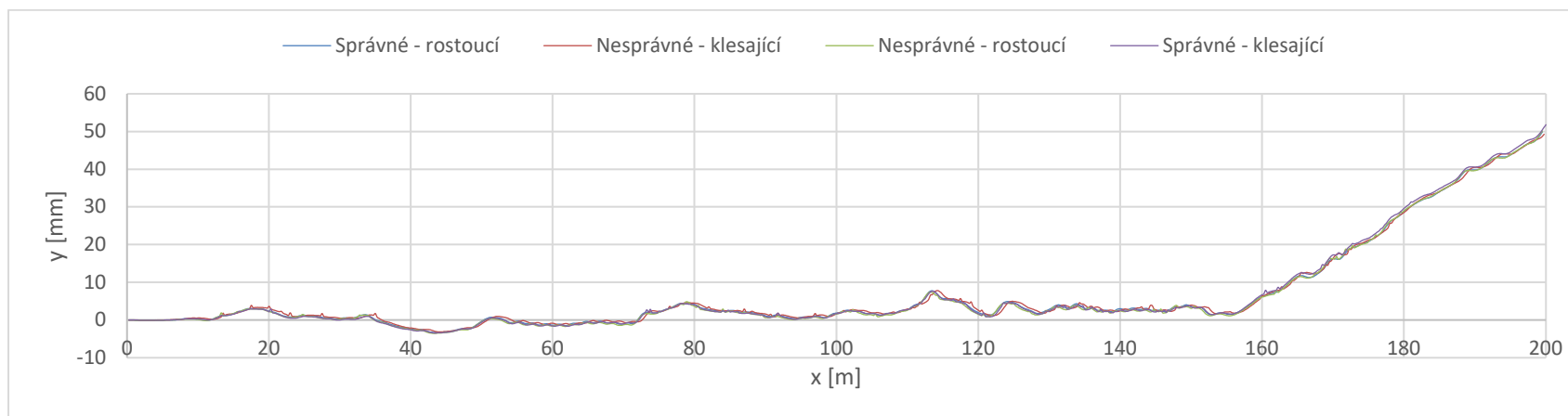
V práci jsou obsažena data získaná z měření čtyř veličin – směru (levý, pravý), výšky (levá, pravá), rozchodu a převýšení koleje. Všechny veličiny byly změřeny zároveň, a to během čtyř opakovaných měření stejného úseku. Všechna naměřená data jsou (vzhledem k jejich rozsahu) uvedena v elektronické příloze této práce, včetně všech grafů.

V této kapitole jsou všechna naměřená data vynesena do grafů, neboť ty poskytují přehledný základ pro jejich další zkoumání. Pro vynášení hodnot do grafů byly zvoleny dva délkové úseky. Celková délka měření 800 m a dále úsek 200 m, kdy je grafické znázornění naměřených dat přehlednější. V následujících grafech jsou vyneseny jednotlivé veličiny vždy ze všech čtyř měření.

Převýšení koleje:

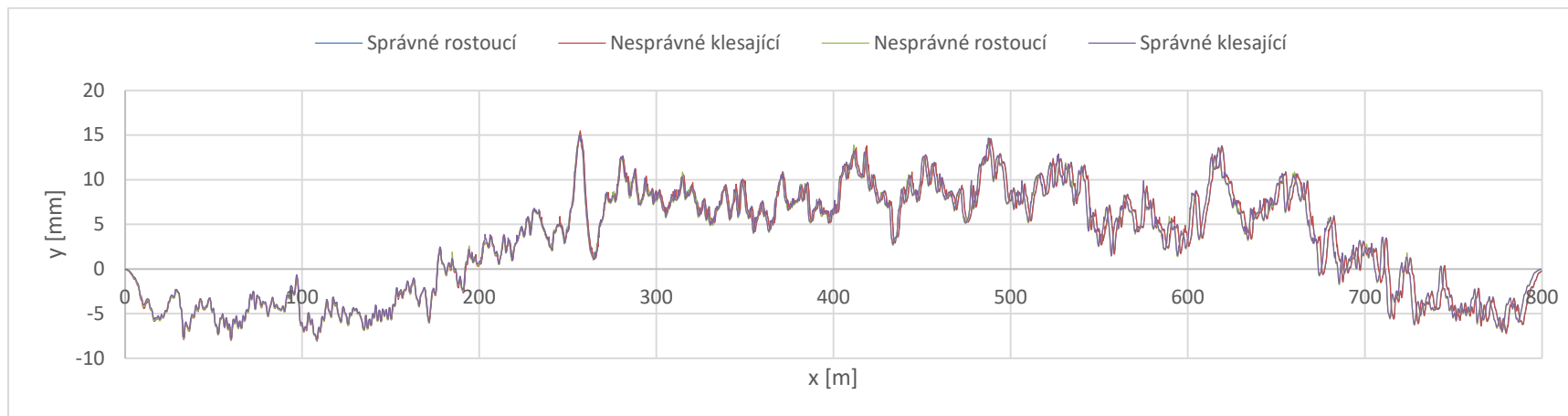


Graf č. 1 – převýšení koleje na úseku 800 m



Graf č. 2 – převýšení koleje na úseku 200 m

Rozchod koleje:



Graf č. 3 – rozchod koleje na úseku 800 m

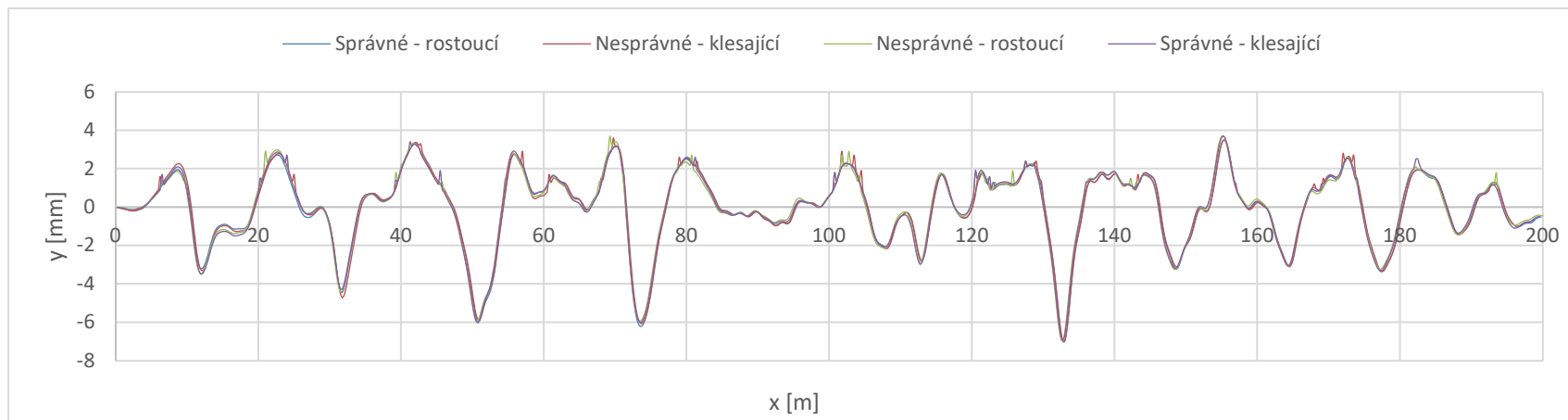


Graf č. 4 – Rozchod koleje na úseku 200 m

Výška koleje (pravá):



Graf č. 5 – výška koleje (pravá) na úseku 800 m

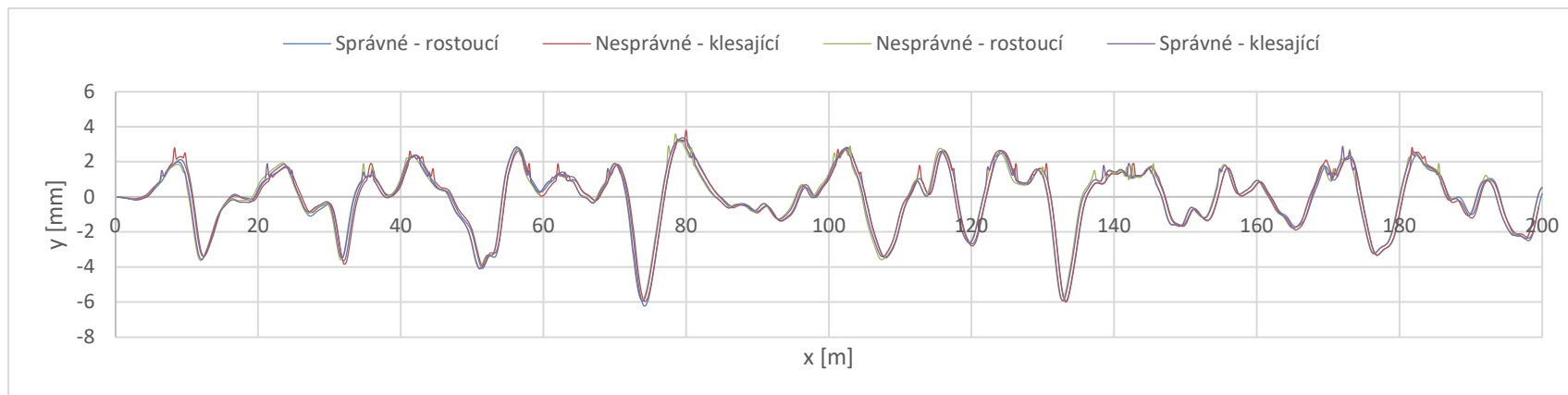


Graf č. 6 – výška koleje (pravá) na úseku 200 m

Výška koleje (levá):



Graf č. 7 – výška koleje (levá) na úseku 800 m

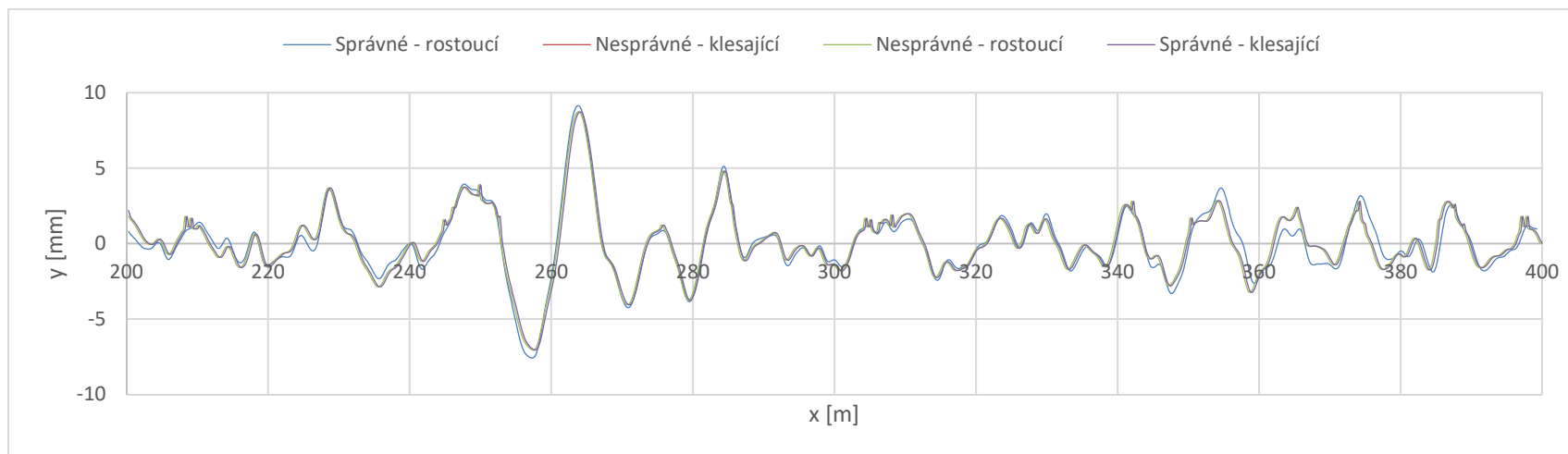


Graf č. 8 – výška koleje (levá) na úseku 200 m

Směr koleje (pravý):

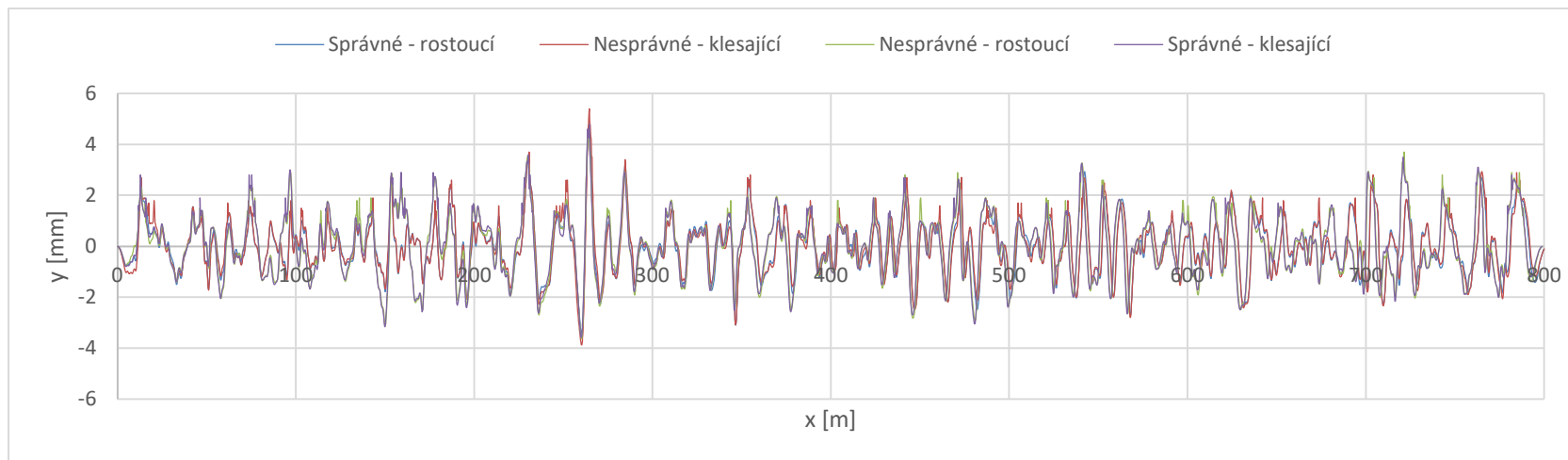


Graf č. 9 – směr koleje (pravý) na úseku 800 m

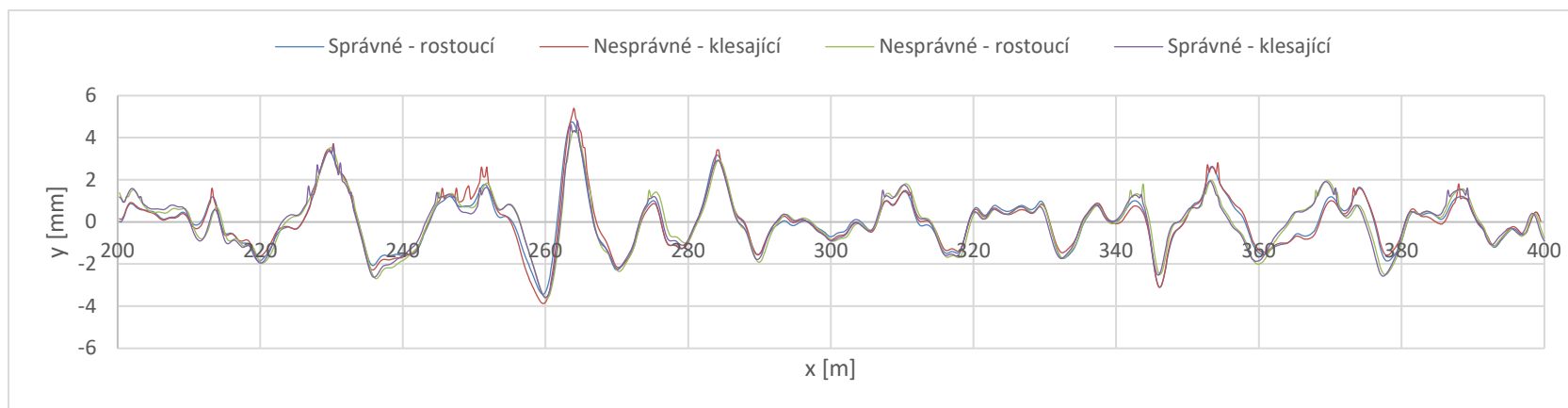


Graf č. 10 – směr koleje (levý) na úseku 200,25 – 400 m

Směr koleje (levý):



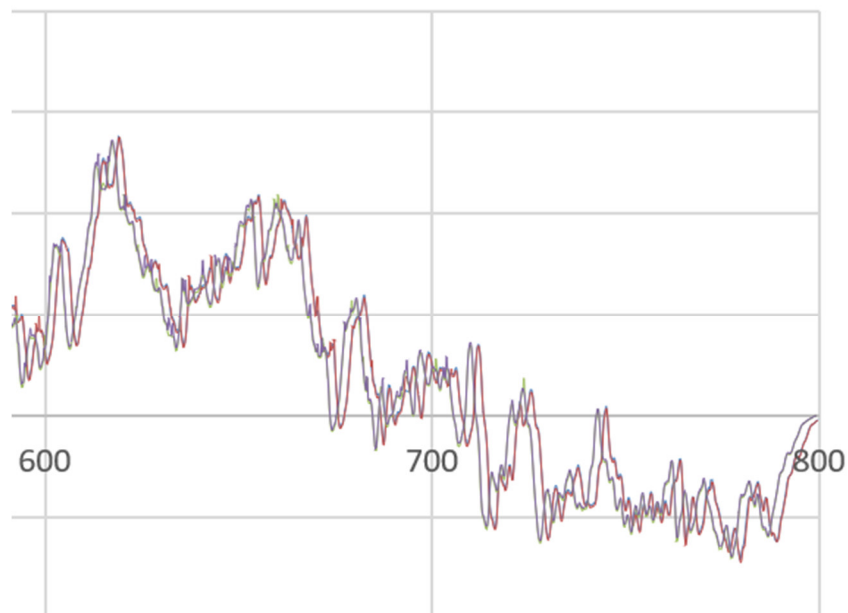
Graf č. 11 – směr koleje (pravý) na úseku 800 m



Graf č. 12 – směr koleje (levý) na úseku 200,25 – 400 m

V grafickém znázornění naměřených dat je možné si všimnout, že vždy dva soubory dat ze dvou měření spolu korespondují víc, než se soubory dat z ostatních kombinací měření. Konkrétně vždy podobné výsledky dávají soubory dat z měření v postavení správném a staničení rostoucím, a měření v postavení nesprávném a staničení klesajícím. A dále soubory dat z měření v postavení nesprávném a staničení rostoucím, a měření v postavení správném a staničení klesajícím. Tedy takové, kdy nebylo nutné vozík z koleje zvednout a otočit. Tento rozdíl mezi křivkami vykreslenými během různých kombinací měření je patrný především v grafech s úsekem 800 m, neboť se neliší tvar vykreslených křivek, ale jejich posun vůči sobě, který roste s ujetou vzdáleností.

Na obrázku č. 14 je detailní pohled na graf č. 3 sestavený z dat měření rozchodu koleje. Zde je toto posunutí dobře patrné.



Obr. č. 14 – detail posunutí křivek

Pro všechny veličiny se k sobě blíží vždy více stejné dvojice křivek. Proto jsem se rozhodla v práci neporovnávat pouze data všech měření najednou, ale rozdělit je do dvojic a porovnat zvláště data s korespondujícími měřeními vůči sobě, kdy se vozík neotáčel a poté data se soubory, jež se vůči sobě rozcházejí (nekorrespondují).

Dále je zde vidět trend, že se data začínají rozcházet (posouvat vůči sobě) přibližně po ujetí 150 m. To odpovídá místu, kdy na koleji začíná oblouk (viz. graf č. 1). Z tohoto důvodu jsem vynesla do grafů zvláště celý úsek měření a zvláště jen prvních 200 m.

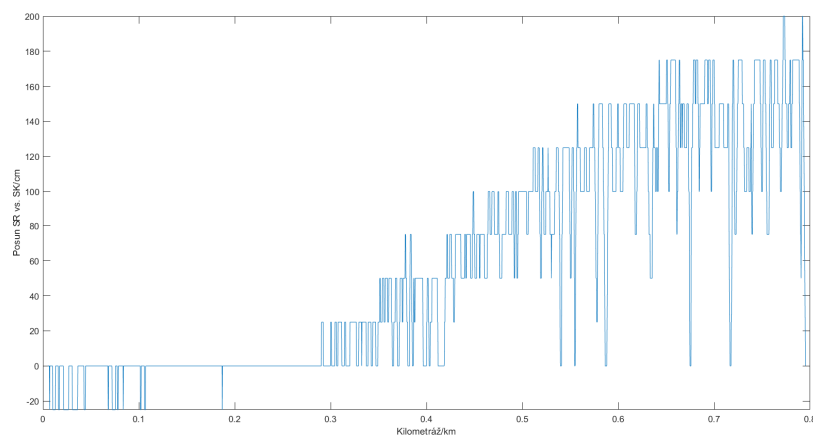
U všech veličin je možné z grafů vyčíst, že data se velmi podobají co do tvaru vykreslených křivek. Jedinou výjimku tvoří veličina Směr koleje, a to jak pravý, tak

levý. Zde je možné pozorovat (grafy č. – 9, 11), že pro prvních 200 m měření se data poměrně rozcházejí, nicméně i zde se zachovává, že opět korespondují stejné kombinace měření. Zhruba od 200 metrů měření se však hodnoty srovnají. Proto jsem se rozhodla u této veličiny vynést do grafu kratšího úseku data od 200,25 – 400 m měření a také do statistické analýzy pro kratší úsek dat.

5.2 Zpracování dat pro statistické vyhodnocení

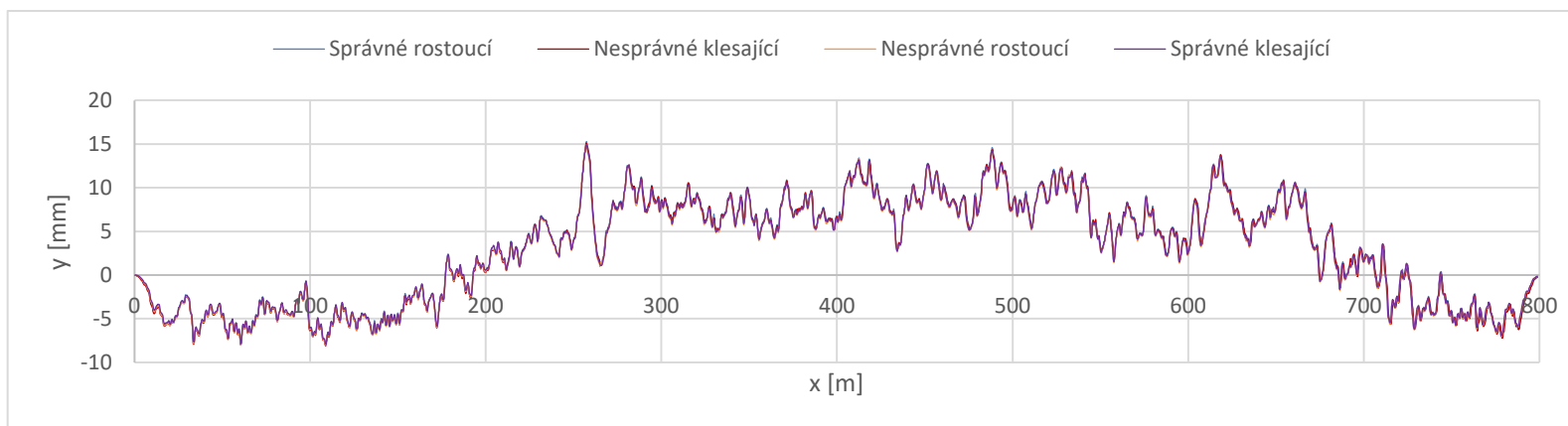
V předchozí kapitole bylo možné pozorovat, že naměřená data se začínají vůči sobě posouvat vždy ve stejném místě – cca 150 m po začátku měření, a to odpovídá začátku oblouku. Navíc se data neposouvají, pokud je vozík nasazen ve stejné poloze, pouze se mění směr měření. Je tedy možné se domnívat, že rozdíl v měření je způsoben rozdílnou délkou kolejnic v oblouku.

Pro potvrzení této domněnky jsem pro vzájemně rozcházející se dvojice měření vypočítala korelace úseků o délce 20 m (tedy 80 datových bodů) s posunutými kopiemi jedné z naměřených veličin. Studovala jsem, pro jakou hodnotu posunutí vychází korelace maximální. Středů úseků jsem přitom uvažovala po celém měřeném úseku trati. Tyto výpočty byly prováděny v prostředí MatLab (pomocí funkce xcorr) a příklad výsledku je uveden na obr. č. 15.

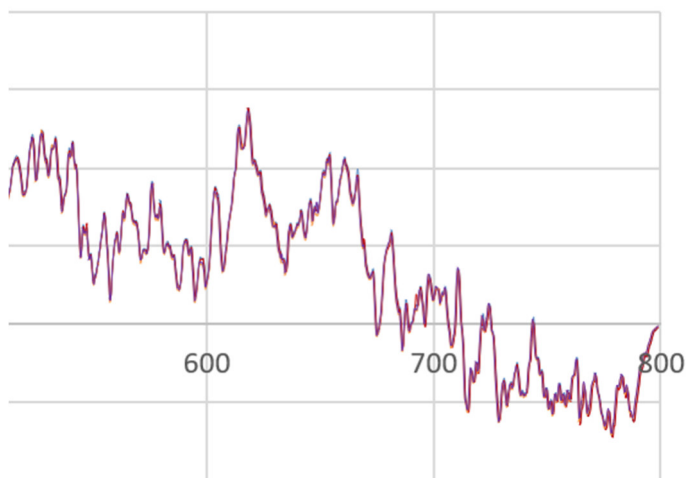


Obr. č. 15 – znázornění vzájemného posunutí dat

Je možné pozorovat, že v první části měření k žádnému posunu nedochází. S tím, jak vozík vjede do oblouku však začne narůstat. Nárůst je na sledovaném úseku celkem o šest datových bodů, tj. 150 cm. Naměřená data byla upravena tak, že se ručně z každého souboru v šesti místech odmazal vždy jeden datový bod, což by mělo eliminovat vliv oblouku. Na grafu č. 13 jsou vynesena takto upravená data pro veličinu rozchod koleje a na obr. č. 16 je detail poslední části tohoto grafu. Je zde patrné, že data se již nerozcházejí, jako před úpravou.

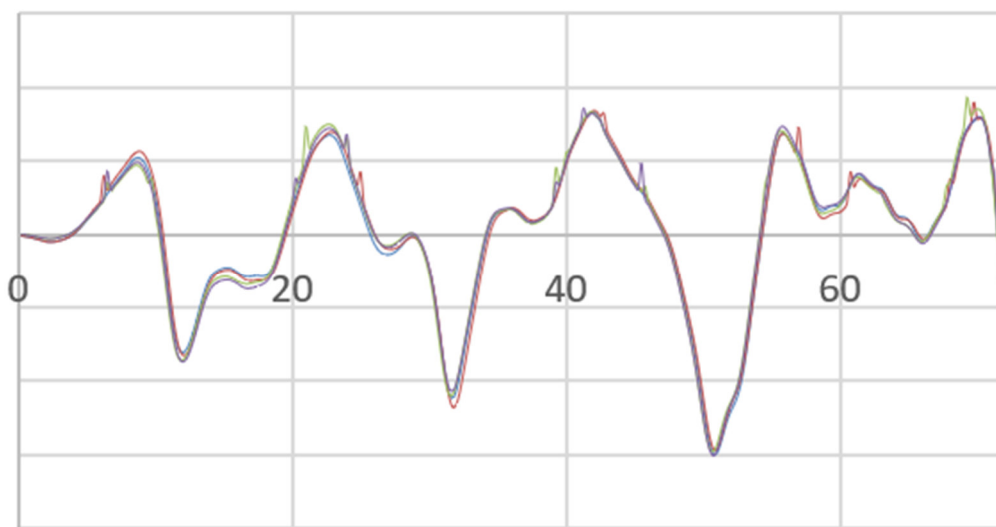


Graf č. 13 – rozchod koleje na úseku 800 m s eliminovaným posunutím

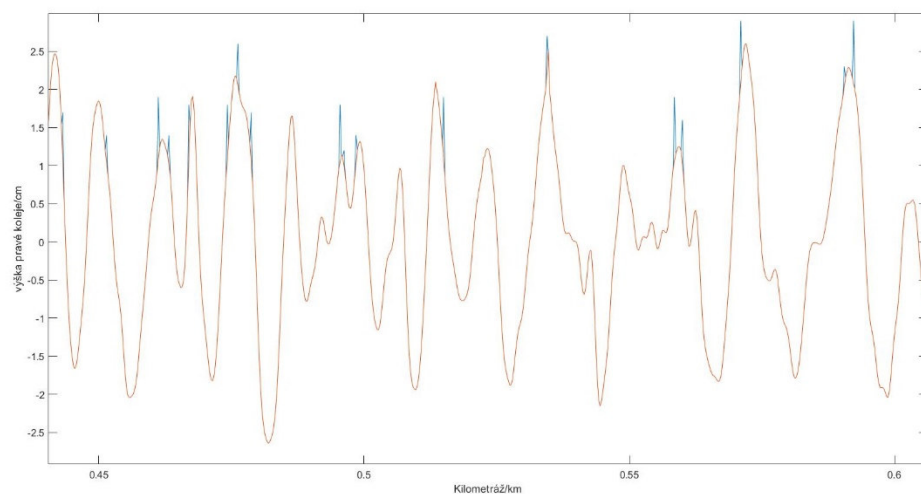


Obr. č. 16 – detail grafu č. 13

Dále je možné si všimnout, že při některých měřeních došlo ke vzniku nahodilých odchylek od měření, obvykle v místě nějakého maxima. Nejlépe jsou tyto odchylky patrné u veličin směr a výška koleje. K těmto odchylkám nedošlo při každém měření, je tedy možné, že na jejich vznik měl vliv způsob měření (odlišná rychlost, nečistoty na kolečcích vozíku apod.). Z tohoto důvodu jsou data dále upravena tak, že byly všechny odchylky překračující hodnotu 0,02 od aritmetického průměru v tomto místě nahrazeny aritmetickým průměrem. Na obrázku č. 17 je detail grafu č. 6 s patrnými odchylkami. Na obrázku č. 18 je výsledek úpravy pro měření výšky pravé kolejnice v postavení správném, kilometrůží klesající. Modrou barvou jsou znázorněna naměřená data, červenou pak přes ně data zbavená odchylek.



Obr. č. 17 – detail grafu č. 6 - výška pravá, 200 m, s patrnými odchylkami v okolí maxima



Obr. č. 18 – data zbavená odchylek. Modře je jsou znázorněna surová data, červeně data po úpravě.

6 Statistické vyhodnocení dat

Pro podrobnější studium naměřených dat jsem se rozhodla zvolit vybrané metody statistické matematiky. Všechny statistické metody jsem použila nejprve na soubory surových dat, a to jak na celý měřený úsek 800 m, tak na úsek prvních 200 m, aby bylo možné porovnat opakovatelnost dat i vzhledem k délce měřeného úseku. Poté jsem stejné metody použila také na data upravená, tedy zbavená odchylek a posunutí v oblouku. Tuto druhou část statistického vyhodnocení jsem použila pouze na celý měřený úsek za účelem porovnání opakovatelnosti se surovými daty a s eliminací vlivu oblouku.

Párový studentův T-test

První použitou metodou bylo testování hypotézy pomocí párového Studentova T-testu.

Teoretické základy:

Předpoklady:

Ze dvou normálně rozložených základních souborů byly vybrány dva výběry se stejnými rozsahy n . Přitom každému prvku prvního výběru x_{1i} odpovídá právě jeden prvek druhého výběru x_{2i} . Vznikly tedy páry $(x_{1i}; x_{2i})$, kde $i = 1, \dots, n$.

Výběr nulové hypotézy H_0 :

V tomto případě $H_0: \bar{d} = 0$, když \bar{d} je střední hodnota rozdílů $d_i = x_{1i} - x_{2i}$, tedy:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{1i} - x_{2i}}{n} = \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$$

Alternativní hypotéza:

$H_1: \bar{d} \neq 0$

Testovací kritérium:

$$t = \frac{\bar{d} \cdot \sqrt{n-1}}{s_d}$$

kde s_d je směrodatná odchylka hodnot d_i .

Veličina t má Studentovo rozložení s $n - 1$ stupni volnosti $t(n - 1)$.

[Zdroj: 7]

Postup:

Jako nulovou hypotézu jsem zvolila, že střední hodnoty naměřených dat jsou stejné, tj. že jejich rozdíly jsou nulové. Nejprve jsem vypočítala výběrový aritmetický průměr naměřených hodnot. Dále jsem u každé sledované kombinace měření vypočítala výběrovou směrodatnou odchylku aritmetického průměru. Obě hodnoty jsem poté dosadila do vzorce pro výpočet testovacího kritéria t a porovnála s kritickou hodnotou pro zvolený počet vzorků na zvolené hladině významnosti. Hladina významnosti pak byla zvolena jako 0,05, kritická hodnota pro naměřený počet vzorků byla 1,960439.

V tabulkách č. 2 - 4 jsou uvedeny výsledky výpočtu t-testu pro všechny veličiny pro úsek 800 m a 200 m se surovými daty a pro úsek 800 m s daty zpracovanými.

V tabulkách č. 2 - 10 s výsledky měření jsou použity následující zkratky:

SRpostavení správné, staničení rostoucí,

SK..... postavení správné, staničení klesající,

NR..... postavení nesprávné, staničení rostoucí,

NK..... postavení nesprávné, staničení klesající,

P..... přijetí nulové hypotézy na zvolené hladině významnosti 0,05,

Z..... zamítnutí nulové hypotézy na zvolené hladině významnosti 0,05.

Žlutou barvou jsou podbarveny kombinace měření, při kterých si data odpovídají. Modrou barvou jsou podbarveny ty kombinace, kde se data rozcházejí. Zelenou barvou jsou podbarvena políčka potvrzující opakovatelnost dat. Červená barva značí nepotvrzení opakovatelnosti dat.

Tab. č. 2 - Výsledky párového Studentova T-testu pro úsek 800 m – surová data:

Výsledky párového studentova T-testu pro úsek 800 m:					
Veličina	Zvolená kombinace měření	Aritmetický průměr	Směrodatná výběrová odchylka aritmetického průměru	Testovací kritérium	Výsledek testu
Rozchod koleje					
	SR / NK	-0,0409	1,3200	1,7488	P
	NR / SK	-0,0141	0,4465	1,7887	P
	SR / NR	0,4035	1,1410	19,9753	Z
	NK / SK	0,4303	1,6638	14,6108	Z
	NK / NR	0,4445	1,1821	21,2395	Z
	SR / SK	0,3893	1,6993	12,9431	Z
Převýšení koleje					
	SR / NK	0,0601	1,8132	1,8751	P
	NR / SK	0,0144	1,2632	0,6437	P
	SR / NR	0,1906	1,2530	8,5991	Z
	NK / SK	0,0146	1,5293	0,5411	P
	NK / NR	0,1300	1,4150	5,1941	Z
	SR / SK	0,0752	1,3784	3,0848	Z
Výška koleje (pravá)					
	SR / NK	-0,0156	0,5452	1,6160	P
	NR / SK	0,0010	0,1595	0,3430	P
	SR / NR	-0,0053	0,9106	0,3286	P
	NK / SK	0,0160	1,3849	0,6539	P
	NK / NR	0,0170	1,4273	0,6728	P
	SR / SK	-0,0063	0,8867	0,3991	P
Výška koleje (levá)					
	SR / NK	-0,0156	0,5775	1,5283	P
	NR / SK	-0,0018	0,1548	0,6690	P
	SR / NR	-0,0050	0,8827	0,3205	P
	NK / SK	0,0088	1,1820	0,4198	P
	NK / NR	0,0106	1,2281	0,4884	P
	SR / SK	-0,0068	0,8599	0,4494	P
Směr koleje (pravý)					
	SR / NK	-0,0144	0,6350	1,2766	P
	NR / SK	0,0004	0,1554	0,1297	P
	SR / NR	-0,0162	1,0380	0,8806	P
	NK / SK	-0,0015	1,3318	0,0626	P
	NK / NR	-0,0018	1,3333	0,0776	P
	SR / SK	-0,0158	1,0502	0,0562	P
Směr koleje (levý)					
	SR / NK	-0,0148	0,1828	4,5614	Z
	NR / SK	0,0009	0,1530	0,3190	P
	SR / NR	-0,0155	0,9854	0,8873	P
	NK / SK	0,0001	0,9976	0,0082	P
	NK / NR	-0,0007	1,0137	0,0401	P
	SR / SK	-0,0146	0,9705	0,5618	P

Tab. č. 3 - Výsledky párového Studentova T-testu pro úsek 200 m – surová data:

Výsledky párového studentova T-testu pro úsek 200 m:					
Veličina	Zvolená kombinace měření	Aritmetický průměr	Směrodatná výběrová odchylka aritmetického průměru	Testovací kritérium	Výsledek testu
Rozchod koleje					
	SR / NK	0,7793	0,3155	6,9812	Z
	NR / SK	-0,1242	0,0917	38,2541	Z
	SR / NR	0,0318	0,2169	4,1482	Z
	NK / SK	-0,1710	0,6558	7,3704	Z
	NK / NR	-0,0468	0,7083	7,8687	Z
	SR / SK	-0,0923	0,1569	1,8687	P
Převýšení koleje					
	SR / NK	0,0074	0,7366	0,0825	P
	NR / SK	-0,0208	0,6155	0,9564	P
	SR / NR	0,3624	0,4726	21,6335	Z
	NK / SK	0,0269	0,7670	0,9900	P
	NK / NR	0,3566	0,4443	22,6439	Z
	SR / SK	0,0327	0,3907	2,3618	Z
Výška koleje (pravá)					
	SR / NK	-0,0174	0,6518	0,7522	P
	NR / SK	0,0078	0,1500	1,4635	P
	SR / NR	-0,0222	0,7622	0,8197	P
	NK / SK	0,0015	0,7625	0,0566	P
	NK / NR	-0,0063	0,8270	0,2132	P
	SR / SK	-0,0144	0,6981	0,5806	P
Výška koleje (levá)					
	SR / NK	-0,0242	0,6073	1,1212	P
	NR / SK	0,0021	0,1676	0,3541	P
	SR / NR	-0,0245	0,4943	1,3991	P
	NK / SK	0,0019	0,4581	0,1143	P
	NK / NR	-0,0003	0,5474	0,0129	P
	SR / SK	-0,0224	0,0409	1,5463	P
Směr koleje (pravý)					
	SR / NK	-0,0032	0,4106	0,2190	P
	NR / SK	0,0078	0,1527	1,4490	P
	SR / NR	-0,0242	0,4993	1,0621	P
	NK / SK	-0,0188	0,5524	0,9600	P
	NK / NR	-0,0123	0,5496	0,6286	P
	SR / SK	-0,0308	0,5338	1,6261	P
Směr koleje (levý)					
	SR / NK	-0,0110	0,2315	1,3413	P
	NR / SK	-0,0015	0,1849	0,2279	P
	SR / NR	-0,0146	0,6267	0,3814	P
	NK / SK	-0,0085	0,0678	0,3526	P
	NK / NR	-0,0014	0,5896	0,0656	P
	SR / SK	-0,0217	0,7317	0,8385	P

Tab. č. 4 - Výsledky párového Studentova T-testu pro úsek 800 m – zpracovaná data:

Výsledky párového studentova T-testu pro úsek 800 m - zpracovaná data:					
Veličina	zvolená kombinace měření	aritmetický průměr	směrodatná výběrová odchylka aritmetického průměru	testovací kritérium	výsledek testu
Rozchod koleje					
	SR / NK	0,0872	0,0908	54,2800	Z
	NR / SK	-0,1100	0,0909	69,6700	Z
	SR / NR	0,1987	0,3238	34,6800	Z
	NK / SK	-0,0006	0,3299	0,1000	P
	NK / NR	0,1115	0,3450	18,2600	Z
	SR / SK	0,0866	0,3127	16,6500	Z
Převýšení koleje					
	SR / NK	-0,0323	0,4904	3,7211	Z
	NR / SK	-0,0100	0,5428	1,5106	P
	SR / NR	0,1696	0,2259	42,4221	Z
	NK / SK	0,1873	0,2435	43,4796	Z
	NK / NR	0,2018	0,4872	23,4158	Z
	SR / SK	0,1550	0,6190	14,1551	Z
Výška koleje (pravá)					
	SR / NK	-0,0029	0,1173	1,4087	P
	NR / SK	0,0000	0,1268	0,9552	P
	SR / NR	0,0069	0,2219	1,7668	P
	NK / SK	0,0077	0,2426	1,7976	P
	NK / NR	0,0099	0,2641	2,1100	Z
	SR / SK	0,0048	0,2129	1,2726	P
Výška koleje (levá)					
	SR / NK	-0,0026	0,1436	1,0279	P
	NR / SK	0,0000	0,1180	0,3959	P
	SR / NR	0,0053	0,2417	1,2315	P
	NK / SK	0,0087	0,2475	1,9877	Z
	NK / NR	0,0079	0,2904	1,5330	P
	SR / SK	0,0061	0,0222	1,5536	P
Směr koleje (pravý)					
	SR / NK	0,0006	0,1789	0,1750	P
	NR / SK	0,0000	0,1180	0,3682	P
	SR / NR	-0,0024	0,6040	0,2207	P
	NK / SK	-0,0021	0,6476	0,1871	P
	NK / NR	-0,0029	0,6580	0,2502	P
	SR / SK	-0,0016	0,6007	0,1496	P
Směr koleje (levý)					
	SR / NK	-0,0038	0,1608	1,3273	P
	NR / SK	0,0000	0,1197	0,2475	P
	SR / NR	-0,0067	0,5967	0,6296	P
	NK / SK	-0,0024	0,6218	0,2134	P
	NK / NR	-0,0029	0,6312	0,2571	P
	SR / SK	-0,0061	0,5884	0,5882	P

Korelační analýza

Jako druhou metodu jsem zvolila vyhodnocení pomocí Pearsonova korelačního koeficientu a ověření závislosti dat pomocí T-testu.

Nejprve jsem spočítala korelační koeficient vždy mezi dvěma vybranými soubory dat podle vzorce:

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \right) \cdot \left(\frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \right)$$

kde:

\bar{x} aritmetický průměr hodnot prvního souboru

\bar{y} aritmetický průměr hodnot druhého souboru

s_x směrodatná odchylka hodnot prvního souboru

s_y směrodatná odchylka hodnot druhého souboru

n počet hodnot výběru

Poté jsem použila vzorec pro ověření závislosti mezi vybranými soubory:

$$\frac{R}{\sqrt{1-R^2}} \cdot \sqrt{n-2}$$

kde:

Rkorelační koeficient

npočet hodnot výběru

[Zdroje: 5, 6]

Jako nulovou hypotézu jsem zvolila, že mezi vybranými soubory není žádná závislost. Výsledek ověření závislosti jsem porovnála s tabulkou hodnot pro výsledky t-testu na hladině 0,05, kritická hodnota pro $n-2$ byla: 0,1946. V případě, že testovací kritérium vyjde vyšší, než kritická hodnota, zamítám nulovou hypotézu a přijmu hypotézu alternativní, tudíž že data jsou závislá.

Výsledky korelační analýzy pro všechny veličiny jsou uvedeny v tabulkách č. 5-7, a to jak pro úsek 800 m, tak pro úsek 200 m pro surová data. Pro data zpracovaná jsou uvedeny výsledky pro celý úsek měření.

Tab. č. 5 – výsledky korelační analýzy pro úsek 800 m – surová data:

Výsledky korelační analýzy pro úsek 800 m:				
Veličina	Zvolená kombinace měření	Korelační koeficient	Výsledná hodnota pro ověření závislosti pomocí t-testu	Výsledek t-testu
Rozchod koleje				
	SR / NK	0,9529	177,63	Z
	NR / SK	0,9770	258,69	Z
	SR / NR	0,9772	260,22	Z
	NK / SK	0,9661	211,62	Z
	NK / NR	0,9710	229,69	Z
	SR / SK	0,9724	235,53	Z
Převýšení koleje				
	SR / NK	0,9997	2358,10	Z
	NR / SK	1,0000	7003,62	Z
	SR / NR	0,9453	163,69	Z
	NK / SK	0,9995	1878,43	Z
	NK / NR	0,9998	2663,00	Z
	SR / SK	0,9995	1836,90	Z
Výška koleje (pravá)				
	SR / NK	0,9379	152,57	Z
	NR / SK	0,9947	548,63	Z
	SR / NR	0,8262	82,78	Z
	NK / SK	0,6341	46,28	Z
	NK / NR	0,6101	43,46	Z
	SR / SK	0,8358	85,93	Z
Výška koleje (levá)				
	SR / NK	0,9397	155,10	Z
	NR / SK	0,9957	605,25	Z
	SR / NR	0,8577	94,18	Z
	NK / SK	0,7490	63,82	Z
	NK / NR	0,7273	59,83	Z
	SR / SK	0,8659	97,72	Z
Směr koleje (pravý)				
	SR / NK	0,9211	133,69	Z
	NR / SK	0,9948	550,96	Z
	SR / NR	0,7756	69,40	Z
	NK / SK	0,6399	47,04	Z
	NK / NR	0,6413	47,21	Z
	SR / SK	0,7688	67,92	Z
Směr koleje (levý)				
	SR / NK	0,9858	331,23	Z
	NR / SK	0,9921	447,25	Z
	SR / NR	0,6331	46,20	Z
	NK / SK	0,6295	45,77	Z
	NK / NR	0,6184	44,45	Z
	SR / SK	0,6432	47,45	Z

Tab. č. 6 – výsledky korelační analýzy pro úsek 200 m – surová data:

Výsledky korelační analýzy pro úsek 200 m:				
Veličina	Zvolená kombinace měření	Korelační koeficient	Výsledná hodnota pro ověření závislosti pomocí t-testu	Výsledek t-testu
Rozchod koleje				
	SR / NK	0,9893	191,56	Z
	NR / SK	0,9992	684,23	Z
	SR / NR	0,9952	288,09	Z
	NK / SK	0,9545	90,33	Z
	NK / NR	0,9474	83,54	Z
	SR / SK	0,9975	395,42	Z
Převýšení koleje				
	SR / NK	0,9983	490,01	Z
	NR / SK	0,9988	579,47	Z
	SR / NR	0,9993	776,89	Z
	NK / SK	0,9987	550,59	Z
	NK / NR	0,9993	755,41	Z
	SR / SK	0,9997	1106,44	Z
Výška koleje (pravá)				
	SR / NK	0,9417	78,89	Z
	NR / SK	0,9969	359,92	Z
	SR / NR	0,9199	66,10	Z
	NK / SK	0,9209	66,58	Z
	NK / NR	0,9063	60,44	Z
	SR / SK	0,9333	73,25	Z
Výška koleje (levá)				
	SR / NK	0,9383	79,55	Z
	NR / SK	0,9952	287,73	Z
	SR / NR	0,9587	95,05	Z
	NK / SK	0,9648	103,38	Z
	NK / NR	0,9496	85,45	Z
	SR / SK	0,9718	116,13	Z
Směr koleje (pravý)				
	SR / NK	0,9311	71,92	Z
	NR / SK	0,9896	193,60	Z
	SR / NR	0,9730	118,76	Z
	NK / SK	0,9697	111,83	Z
	NK / NR	0,9695	111,49	Z
	SR / SK	0,9691	110,67	Z
Směr koleje (levý)				
	SR / NK	0,9640	102,22	Z
	NR / SK	0,9883	182,28	Z
	SR / NR	0,8782	51,82	Z
	NK / SK	0,8599	47,55	Z
	NK / NR	0,8959	56,93	Z
	SR / SK	0,8301	42,02	Z

Tab. č. 7 – výsledky korelační analýzy pro úsek 800 m – zpracovaná data:

Výsledky korelační analýzy pro úsek 800 m - zpracovaná data:				
Veličina	Zvolená kombinace měření	Korelační koeficient	Výsledná hodnota pro ověření závislosti pomocí t-testu	Výsledek t-testu
Rozchod koleje				
	SR / NK	0,9999	3667,14	Z
	NR / SK	0,9999	3600,21	Z
	SR / NR	0,9986	1077,69	Z
	NK / SK	0,9986	1060,01	Z
	NK / NR	0,9984	1003,57	Z
	SR / SK	0,9987	1127,28	Z
Převýšení koleje				
	SR / NK	0,9999	6366,82	Z
	NR / SK	0,9999	5763,78	Z
	SR / NR	0,9999	14800,20	Z
	NK / SK	0,9999	13415,39	Z
	NK / NR	0,9999	6553,30	Z
	SR / SK	0,9999	5058,86	Z
Výška koleje (pravá)				
	SR / NK	0,9971	739,02	Z
	NR / SK	0,9966	686,27	Z
	SR / NR	0,9896	388,09	Z
	NK / SK	0,9876	355,79	Z
	NK / NR	0,9853	325,48	Z
	SR / SK	0,9905	406,12	Z
Výška koleje (levá)				
	SR / NK	0,9962	648,28	Z
	NR / SK	0,9974	788,75	Z
	SR / NR	0,9893	382,26	Z
	NK / SK	0,9888	373,83	Z
	NK / NR	0,9845	316,93	Z
	SR / SK	0,9910	418,09	Z
Směr koleje (pravý)				
	SR / NK	0,9938	503,15	Z
	NR / SK	0,9969	721,16	Z
	SR / NR	0,9238	136,30	Z
	NK / SK	0,9144	127,60	Z
	NK / NR	0,9117	125,40	Z
	SR / SK	0,9244	136,94	Z
Směr koleje (levý)				
	SR / NK	0,9885	369,57	Z
	NR / SK	0,9951	566,90	Z
	SR / NR	0,8693	99,35	Z
	NK / SK	0,8566	93,78	Z
	NK / NR	0,8529	92,29	Z
	SR / SK	0,8723	100,77	Z

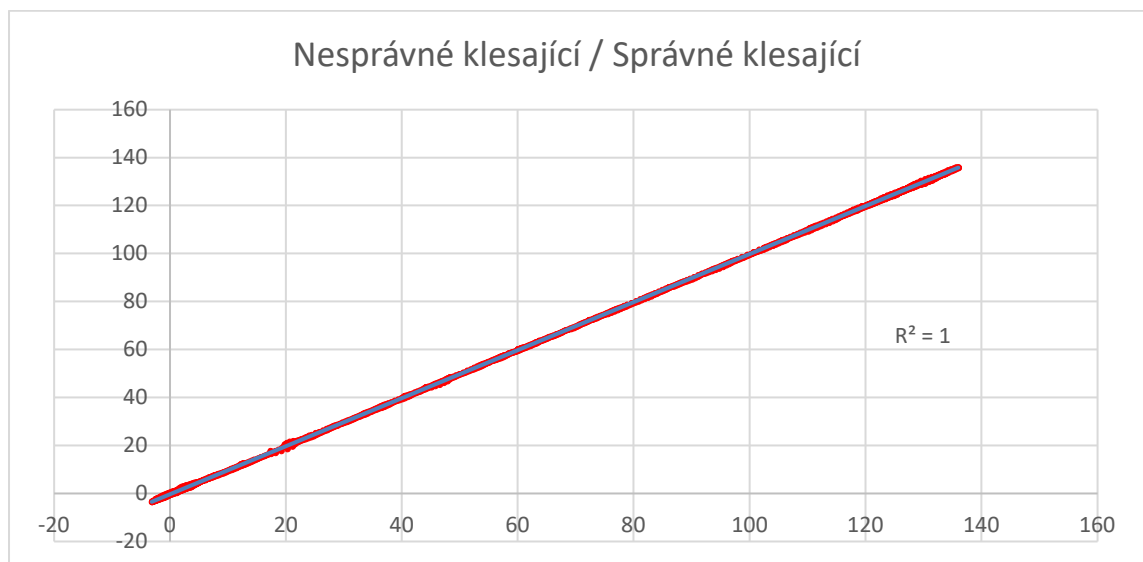
Regresní analýza

Jako poslední metodu jsem zvolila regresní analýzu a koeficient determinace.

Jedná se o metodu prokládání křivek empirickými hodnotami za využití metody nejmenších čtverců. V našem případě předpokládáme lineární závislost. Pro potvrzení lineární závislosti hodnot je v této práci dále využíván koeficient determinace, který určuje, jak silně se zkoumaná data přibližují přímce, tj. jak úzce jsou zkoumaná data lineárně závislá.

Koeficient determinace je roven kvadrátu Pearsonova korelačního koeficientu. V minulé kapitole jsem pomocí T-testu pouze zamítala hypotézu o nezávislosti dat, zde se pokusím o porovnání síly jejich lineární závislosti. V učebnicích statistiky je upozorňováno na to, že regresní analýzu není vhodné použít pro potvrzení závislosti dat vzhledem k tomu, že odhaluje pouze lineární závislost. V tomto případě však zjevně o lineární závislost jde, proto je možné koeficient determinace použít a chápat jej jako procentuální vyjádření shody. [Zdroje: 5, 7]

V následujícím grafu je znázorněna regresní křivka spolu s koeficientem determinace pro veličinu převýšení koleje na úseku 800 m s použitím dat zpracovaných pro statistické vyhodnocení. Tento graf jsem vybrala proto, že se koeficient determinace rovná jedné. V elektronické příloze této práce jsou obsaženy grafy všech ostatních kombinací, a to jak se surovými, tak s předzpracovanými daty.



Graf č. 14 – Regrese a koeficient determinace, převýšení koleje, zpracovaná data

V tabulkách č. 8–10 jsou pro přehlednost uvedeny koeficienty determinace pro všechny veličiny, a to jak pro úsek 800 m, tak pro úsek 200 m u surových dat. U dat upravených jsou uvedeny výsledky pro celý úsek měření.

Tab. č. 8 – Koeficienty determinace pro úsek 800 m – surová data:

Výsledky regresní analýzy - koeficienty determinace pro úsek 800 m:		
Veličina	Zvolená kombinace měření	Koeficient determinace
Rozchod koleje		
	SR / NK	0,9081
	NR / SK	0,9544
	SR / NR	0,955
	NK / SK	0,9334
	NK / NR	0,09429
	SR / SK	0,9456
Převýšení koleje		
	SR / NK	0,9994
	NR / SK	0,999
	SR / NR	0,9996
	NK / SK	0,9991
	NK / NR	0,9996
	SR / SK	0,9991
Výška koleje (pravá)		
	SR / NK	0,8796
	NR / SK	0,9895
	SR / NR	0,6826
	NK / SK	0,402
	NK / NR	0,3722
	SR / SK	0,6986
Výška koleje (levá)		
	SR / NK	0,883
	NR / SK	0,9914
	SR / NR	0,7357
	NK / SK	0,561
	NK / NR	0,529
	SR / SK	0,7498
Směr koleje (pravý)		
	SR / NK	0,8485
	NR / SK	0,9896
	SR / NR	0,6015
	NK / SK	0,4095
	NK / NR	0,4112
	SR / SK	0,5911
Směr koleje (levý)		
	SR / NK	0,9717
	NR / SK	0,9843
	SR / NR	0,4008
	NK / SK	0,3963
	NK / NR	0,3824
	SR / SK	0,4137

Tab. č. 9 – Koeficienty determinace pro úsek 200 m – surová data:

Výsledky regresní analýzy - koeficienty determinace pro úsek 200 m:		
Veličina	Zvolená kombinace měření	Koeficient determinace
Rozchod koleje		
	SR / NK	0,9787
	NR / SK	0,9983
	SR / NR	0,9905
	NK / SK	0,911
	NK / NR	0,8975
	SR / SK	0,9949
Převýšení koleje		
	SR / NK	0,9967
	NR / SK	0,9976
	SR / NR	0,9987
	NK / SK	0,9974
	NK / NR	0,9986
	SR / SK	0,9994
Výška koleje (pravá)		
	SR / NK	0,8869
	NR / SK	0,9939
	SR / NR	0,8462
	NK / SK	0,8481
	NK / NR	0,8215
	SR / SK	0,8711
Výška koleje (levá)		
	SR / NK	0,8804
	NR / SK	0,9905
	SR / NR	0,9191
	NK / SK	0,9308
	NK / NR	0,9018
	SR / SK	0,9443
Směr koleje (pravý)		
	SR / NK	0,8669
	NR / SK	0,9793
	SR / NR	0,9467
	NK / SK	0,9403
	NK / NR	0,94
	SR / SK	0,9391
Směr koleje (levý)		
	SR / NK	0,9294
	NR / SK	0,9767
	SR / NR	0,7711
	NK / SK	0,7394
	NK / NR	0,8026
	SR / SK	0,689

Tab. č. 10 – Koeficienty determinace pro úsek 800 m – zpracovaná data:

Výsledky regresní analýzy - koeficienty determinace pro úsek 800 m - zpracovaná data:		
Veličina	Zvolená kombinace měření	Koeficient determinace
Rozchod koleje		
	SR / NK	0,9998
	NR / SK	0,9998
	SR / NR	0,9973
	NK / SK	0,9972
	NK / NR	0,9968
	SR / SK	0,9975
Převýšení koleje		
	SR / NK	0,9999
	NR / SK	0,9999
	SR / NR	1
	NK / SK	1
	NK / NR	0,9999
	SR / SK	0,9999
Výška koleje (pravá)		
	SR / NK	0,9942
	NR / SK	0,9933
	SR / NR	0,9792
	NK / SK	0,9754
	NK / NR	0,9707
	SR / SK	0,981
Výška koleje (levá)		
	SR / NK	0,9925
	NR / SK	0,9949
	SR / NR	0,9786
	NK / SK	0,9777
	NK / NR	0,9692
	SR / SK	0,9821
Směr koleje (pravý)		
	SR / NK	0,9875
	NR / SK	0,9939
	SR / NR	0,8534
	NK / SK	0,9361
	NK / NR	0,8313
	SR / SK	0,8545
Směr koleje (levý)		
	SR / NK	0,9772
	NR / SK	0,9902
	SR / NR	0,7556
	NK / SK	0,7337
	NK / NR	0,7274
	SR / SK	0,7608

Závěr

Na základě provedeného měření a zkoumání dat pomocí zvolených statistických metod je možné říci, že měření pomocí měřicího vozíku KRAB jsou opakovatelná. Vozík je však vhodné mezi různými měřeními neotáčet, zejména při měření oblouků. Při měřeních opakovaných po delších časových úsecích je nutné vozík nasazovat vždy ve stejném postavení.

Metody, které toto tvrzení podporují a které jsou dle mého názoru vhodné ke zkoumání tohoto typu dat jsou korelační a regresní analýza. Ty potvrzují zjištění, která jsou viditelná při pohledu na grafické znázornění, tedy které datové křivky si odpovídají a které se rozcházejí. Naopak jako metodu nevhodnou pro tuto práci hodnotím testování pomocí párového Studentova t-testu. Ten dává zcela odlišné výsledky, a to především u dat, která si nejvíce odpovídají. Je to způsobeno tím, že při měření vozíkem KRAB není v praxi běžné zcela přesně určit start a konec měření. Drobné odchylky v délce jednotlivých měření potom při použití tohoto testování dávají u velmi podobných souborů dat zamítavé výsledky.

Ze získaných statistických údajů je možné říci, že u veličin měřených přímo – tedy rozchodu a převýšení koleje je opakovatelnost měření velmi dobrá, korelační koeficient se blíží jedné. U veličin směr a výška koleje je zjištěná opakovatelnost o něco menší, nicméně v praxi stále dostačující. U všech měřených veličin se opakovatelnost zlepšila po zpracování dat, kdy se eliminoval vliv oblouku a data se „vyhladila“ tím, že byla zbavena odchylek v okolí maxim. Lepších výsledků u surových dat vozík dosahuje při měření na kratších úsecích, což je dáno posunem dat a na rovných úsecích by k němu nemělo docházet.

U měření veličiny směr koleje se data naměřená po ujetí prvních 200 m značně odlišují u měření v jednom postavení vozíku a poté po jeho ručním otočení o 180°. Je možné předpokládat, že v počátku měření došlo k náhodné chybě v měření, neboť po ujetí této vzdálenosti rozdíly mezi daty zanikají. Tento počáteční nesoulad v datech také ovlivňuje celkovou statistiku pro tuto veličinu.

Závěrem bych doporučila provést několik dalších testovacích měření na delší vzdálenosti (např. 1-2 km) a to jak v rovných úsecích, tak v úsecích s obloukem. Tato měření by měla potvrdit či vyvrátit tvrzení, že posunutí dat vůči sobě vzniká vlivem rozdílných délek kolejnic v oblouku. Dále by bylo možné zjistit, zda k rozdílům při měření veličiny směr koleje dochází opakovaně, či zda se jednalo o náhodný jev a v neposlední řadě by opakovaná měření sloužila ke zjištění, čím jsou způsobeny odchylky v okolí maxim.

Použitá literatura a zdroje:

- [1] SR 103/8(S) – Služební rukověť SŽDC s.o. Komentář ČSN 73 6360 Konstrukční a geometrické uspořádání koleje a její poloha; Praha; účinnost od 1. března 2011
- [2] Technická dokumentace, měření geometrie koleje, I. Teoretické základy; KŽV s.r.o.; Praha; 2001
- [3] ČSN 73 6360-1 (736360) Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha - Část 1: Projektování; Praha; Český normalizační institut; 2008
- [4] ČSN 73 6360-2 (736360) Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha - Část 2: Stavba a přijímka, provoz a údržba; Praha; Český normalizační institut; 2008
- [5] Kubanová J. Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi.; Bratislava; 2008.
- [6] Hoog R.V., McKean J., Craig A.T. Introduction to Mathematical Statistics; Pearson Education Ltd.; Harlow, 2012.
- [7] Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava; Petr Otipka, Vladislav Šmajstrla; Pravděpodobnost a statistika; 2019 [online]; [cit: 15. 12. 2019]

Seznam použitých zkratk:

1. GPK – geometrické parametry koleje.
2. ČR – Česká Republika.
3. SŽDC – Správa železniční dopravní cesty.
4. TÚDC – Technická ústředna dopravní cesty.
5. SK – směr koleje.
6. VK – výška koleje.
7. PK – převýšení koleje.
8. RK – rozchod koleje.
9. PDA – palubní počítač.
10. MVŽSv – měřicí vůz pro železniční svršek.

Seznam obrázků:

1. Práce s měřicím vozíkem KRAB.
2. Základní pojmy geometrie koleje.
3. Součásti měřicího vozíku KRAB.
4. Grafické znázornění vzepětí na tříbodové asymetrické tětivě.
5. Použití přenosové funkce.
6. Přenosová funkce měřicího vozíku KRAB s tětivou 2,1 m.
7. Porovnání vlivu přenosových funkcí na naměřené hodnoty.
8. Grafické znázornění přepočtu na skutečnou geometrii.
9. Filtry používané měřicím vozíkem KRAB.
10. Nastavení použitých filtrů v programu.
11. Označení místa měření.
12. Detail měřeného úseku.
13. Označení postavení vozíku.
14. Detail posunutí křivek.
15. Znázornění vzájemného posunutí dat.
16. Detail grafu č. 13.
17. Detail grafu č. 6 – výška pravá, 200 m, s patrnými odchylkami v okolí maxima.
18. Data zbavená odchylek.

Seznam tabulek:

1. Rozdělení geometrických parametrů koleje.
2. Výsledky párového Studentova T-testu pro úsek 800 m – surová data.
3. Výsledky párového Studentova T-testu pro úsek 200 m – surová data.
4. Výsledky párového Studentova T-testu pro úsek 800 m – upravená data.
5. Výsledky korelační analýzy pro úsek 800 m – surová data.
6. Výsledky korelační analýzy pro úsek 200 m – surová data.
7. Výsledky korelační analýzy pro úsek 800 m – upravená data.
8. Koeficienty determinace pro úsek 800 m – surová data.
9. Koeficienty determinace pro úsek 200 m – surová data.
10. Koeficienty determinace pro úsek 800 m – upravená data.

Seznam grafů:

1. Převýšení koleje na úseku 800 m.
2. Převýšení koleje na úseku 200 m.
3. Rozchod koleje na úseku 800 m.
4. Rozchod koleje na úseku 200 m.
5. Výška koleje (pravá) na úseku 800 m.
6. Výška koleje (pravá) na úseku 200 m.
7. Výška koleje (levá) na úseku 800 m.
8. Výška koleje (levá) na úseku 200 m.
9. Směr koleje (pravý) na úseku 800 m.
10. Směr koleje (pravý) na úseku 200 m.
11. Směr koleje (levý) na úseku 800 m.
12. Směr koleje (levý) na úseku 200 m.
13. Rozchod koleje na úseku 800 m s eliminovaným posunutím.
14. Regrese a koeficient determinace, převýšení koleje, zpracovaná data.

Přílohy:

Přílohou této práce je CD obsahující soubory se všemi naměřenými daty. Dále veškeré grafy znázorňující průběh hodnot a vzájemné porovnání různých kombinací měření, podklady pro statistické vyhodnocení – všechny dílčí výpočty, vzorce a grafy regresní analýzy. Příloha také obsahuje soubor se všemi výsledky statistické analýzy. Všechny materiály obsažené na CD jsou ve formátu .xlsx.