



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

**OPOTŘEBENÍ KOLEJNIC V ÚSECÍCH
SE SMĚROVÝMI OBLOUKY MALÉHO POLOMĚRU**

THE RAIL WEAR IN RAILWAY TRACK CURVES OF SMALL RADII

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ludmila Chudějová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. OTTO PLÁŠEK, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav železničních konstrukcí a staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Ludmila Chudějová
Název	Opotřebenění kolejnic v úsecích se směrovými oblouky malého poloměru
Vedoucí práce	doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2020
Datum odevzdání	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

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

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ESVELD, C., Modern Railway Track. Second Edition. Delft, MRT – Production, 2001, 2nd ed. 654 p. ISBN 90-800324-3-3

LICHTBERGER, B. Handbuch gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. Hamburg: Tetzlaff, 2003. ISBN 38-781-4803-8

Funke, Heinz. Broušení kolejnic. Praha: Elka Press. 1992. 122 str.

PLÁŠEK, O., ZVĚŘINA, P., SVOBODA, R., MOCKOVČIAK, M.: Železniční stavby. Železniční spodek a svršek. 1. vyd., Brno: CERM, 2004. 291 str. ISBN 80-214-2621-7

Předpis SŽDC S3 Železniční svršek

Správa železnic, státní organizace: údaje o ojetí kolejnic ve vybraných úsecích, výstupy měření z diagnostického vozu.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Diplomová práce je zaměřené na opotřebení kolejnic v úsecích se směrovými oblouky malého poloměru v závislosti na zátěži, poloze hnacích vozů či náprav, sklonu trati, poloměrech, atd.

Jedná se o zkoumání vlivu tlačných souprav Railjet ve vybraném úseku Brno – Svitavy, kde bylo ojetí po spádu koleje díky brždění souprav pouze hnacími stroji na začátku soupravy z důvodu rekuperace po 20ti letech mezní, zatímco v koleji 2 ve stoupání prakticky nulové. Pro porovnání bude vyhodnoceno ojetí kolejnic ve vybraném úseku Ústí nad Orlicí - Česká Třebová. Diplomová práce bude obsahovat:

- přehled současného stavu v oblasti ojíždění kolejnic v obloucích malého poloměru;
- zpracování výstupů měření diagnostického vozu ve zvoleném časovém období;
- porovnání vývoje ojetí kolejnic ve vybraných úsecích;
- závěrečné zhodnocení.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá opotřebením kolejí v obloucích malého poloměru a možným vlivem souprav RailJet na zvýšení opotřebení v úseku Brno-Maloměřice – Blansko. V rámci diplomové práce byla provedena rešerše použitých metod pro vyhodnocení ojetí kolejnic. Těmito metodami jsou Vogelova metoda, Heumannova metoda a teorie ojždění kolejnic. Následně byly tyto metody aplikovány na vytipované úseky a bylo provedeno celkové vyhodnocení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ojetí kolejnic, souprava RailJet, Vogelova metoda, Heumannova metoda

ABSTRACT

The thesis deals with the wear of rails in small radius curves and the possible influence of RailJet sets on the increase of wear in the section Brno-Maloměřice – Blansko. As part of the thesis, a search was made of the methods used to evaluate the use of rails. These methods are Vogel's method, Heumann's method and rail wear theory. Subsequently, these methods were applied to the selected sections and an overall evaluation was performed.

KEYWORDS

Rail wear, RailJet set, Vogel method, Heumann method

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Ludmila Chudějová *Opotřebení kolejnic v úsecích se směrovými oblouky malého poloměru*. Brno, 2020. 102 s., 24 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Opotřebení kolejnic v úsecích se směrovými oblouky malého poloměru* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 1. 2021

Bc. Ludmila Chudějová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Opotřebení kolejnic v úsecích se směrovými oblouky malého poloměru* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2021

Bc. Ludmila Chudějová
autor práce

Poděkování

Ráda bych zde poděkovala mému vedoucímu práce docentu Otto Pláškoví, který mi byl velkou oporou při zpracování diplomové práce i v této těžké době.

Poděkování patří také panu Ing. Petru Szabó a Ing. Janu Březinovi za poskytnuté materiály a informace a také panu Ing. Tomáši Říhovi za cenné rady.

Dále bych chtěla poděkovat svojí rodině, která mi umožnila vysokoškolské studium.

Obsah

1	Úvod	11
2	Důvod zkoumání ojetí kolejnic	11
3	Cíl práce	12
4	Zkoumané úseky	13
4.1	Úsek č. 1	14
4.2	Úsek č. 2	15
4.3	Úsek č. 3	16
4.4	Úsek č. 4	17
4.5	Úsek č. 5	18
4.6	Úsek č. 6	19
5	Vogelova metoda stanovení polohy podvozku ve směrovém oblouku	20
5.1	Úvod	20
5.2	Příčná vůle podvozku vozidla	20
5.3	Polohy vozidla ve směrovém oblouku	21
6	Heumannova metoda stanovení řídicí síly v oblouku	23
6.1	Úvod	23
6.2	Pohyb vozidla v oblouku	23
6.3	Poučka o minimu řídicí síly	24
6.4	Grafická metoda	26
6.4.1	Statická poloha vozidla	27
6.4.2	Statická poloha vozidla s vnější silou	29
6.4.3	Vzpříčená poloha vozidla s přidanou vnější silou	30
7	Heumannova metoda – výpočty příčných sil	32
7.1	Úvod	32
7.2	Síla od nevyrovnaného bočního zrychlení	33
7.3	Boční síla vlivem tažení nebo sunutí soupravy	34
7.3.1	Odpory jízdy	35
7.3.1.1	Traťové odpory O_t	35
7.3.1.2	Jízdní odpory O_j	35

Opotřebení kolejnic v úsecích se směrovými oblouky malého poloměru

7.3.2	Boční síla na podvozek.....	36
7.4	Součinitel tření f	36
7.5	Jednotky Railjet	37
7.6	Výsledky	38
7.6.1	Úsek č. 1	39
7.6.1.1	Postup výpočtu, jmenovitá hodnota normálního rozchodu.....	40
7.6.1.2	Výpočet dle nejmenší naměřené hodnoty rozchodu.....	41
7.6.2	Úsek č. 2	42
7.6.3	Úsek č. 3	44
7.6.4	Úsek č. 4	46
7.6.5	Úsek č. 5	48
7.6.6	Úsek č. 6	50
8	Ojetí kolejnic.....	52
8.1	Teorie.....	52
8.2	Měření ojetí kolejnic.....	53
9	Ojetí kolejnic – naměřená data	53
9.1	Regresní statistika	56
9.2	Výsledky	57
9.2.1	Úsek č. 1	59
9.2.1.1	Kolej č. 1.....	59
9.2.1.2	Kolej č. 2.....	61
9.2.2	Úsek č. 2	63
9.2.2.1	Kolej č. 1, úsek 2a	63
9.2.2.2	Kolej č. 2, úsek 2a	65
9.2.2.3	Kolej č. 1, úsek 2b.....	67
9.2.2.4	Kolej č. 2, úsek 2b.....	69
9.2.3	Úsek č. 3	71
9.2.3.1	Kolej č. 1	71
9.2.3.2	Kolej č. 2.....	73
9.2.4	Úsek č. 4	75
9.2.4.1	Kolej č. 1	75

Opotřebení kolejnic v úsecích se směrovými oblouky malého poloměru

9.2.4.2	Kolej č. 2.....	77
9.2.5	Úsek č. 5	79
9.2.5.1	Kolej č. 1.....	79
9.2.5.2	Kolej č. 2, úsek 5a	81
9.2.5.3	Kolej č. 2, úsek 5b.....	83
9.2.6	Úsek č. 6	85
9.2.6.1	Kolej č. 1.....	85
9.2.6.2	Kolej č. 2.....	87
10	Porovnání výsledků.....	89
10.1	Úsek č. 1	89
10.2	Úsek č. 2a.....	89
10.3	Úsek č. 2b.....	90
10.4	Úsek č. 3.....	90
10.5	Úsek č. 4.....	90
10.6	Úsek č. 5.....	91
10.7	Úsek č. 6.....	91
10.8	Vztah mezi řídicí silou o ojetím.....	92
11	Závěr.....	93
	Použitá literatura	95
	Seznam obrázků.....	97
	Seznam tabulek.....	100
	Přílohy.....	103

1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá ojetím kolejnic v obloucích malého poloměru ve vybraném úseku Brno-Maloměřice – Blansko. Na části trati dlouhé cca 17 km bylo vytipováno šest úseků, čili šest oblouků malého poloměru, na kterých se ověřovalo ojetí kolejnic.

Jako podklad k této práci byly k dispozici nákrešné přehledy železničního svršku pro trasu Brno-Maloměřice st.6 – Česká Třebová a naměřená data z měřicího vozu pro dané úseky za časové období březen 2014 až srpen 2020. Podklady poskytla Správa železnic, státní organizace. Tyto materiály byly využity pro analýzu určených úseků, a to zejména pro zjištění geometrických parametrů, informací týkajících se sestavy železničního svršku a analýzu ojetí kolejnic. Jako nástroj pro analýzu ojetí kolejnic bylo použito lineární regrese pro určení trendu ojíždění kolejnic. Pro každý úsek byla použita Vogelova a Heumannova metoda k určení příčných sil v koleji, tyto síly byly porovnány se zjištěným ojetím.

Součástí zadání byl také průzkum kontrolního úseku Ústí nad Orlicí – Česká Třebová, který se nakonec ukázal jako nevhodný s ohledem na způsob uspořádání vlakových souprav.

2 Důvod zkoumání ojetí kolejnic

Ve vybraném úseku jsou nasazeny jednotky Railjet, které obsluhují 1. tranzitní koridor mezi stanicemi Praha hl.n. – Pardubice hl.n. – Česká Třebová – Brno hl.n. – Břeclav na území České republiky, soupravy dále pokračují až do stanice Graz Hbf (Busbahnhof) (Štýrský Hradec), jednou denně jezdí také z Bratislavy do Prahy a zpět, a také ze Štýrského Hradce přes Prahu až do Berlína a zpět. Přibližnou trasu zobrazuje obr. 2.1.

Soupravy Railjet jsou tvořeny většinou sedmi vozy a jednou lokomotivou. Jelikož je souprava pevně navzájem spojená, bylo by pro otočení soupravy nutné mít v cílové stanici smyčku, nebo triangel, obojí je velice náročné na prostor, proto jsou soupravy Railjet vybaveny na druhém konci soupravy řídicím vozem. Dojde tedy k tomu, že souprava při opačném směru jízdy již není tažená, jako je to u běžných vlaků skládajících se z lokomotivy a jednotlivých vagónů, ale je tlačaná (sunuta). Informace získány z literatury [1].

Na trase ze Štýrského Hradce přes Brno do Prahy jsou soupravy tlačené (sunuté) a zpět přes Brno jsou soupravy tažené. Důvod, proč jsou soupravy právě ze Štýrského Hradce do Prahy tlačené je ten, že je výhodnější, aby soupravy na části trati přes stanici Semmering ve směru z Vídně byly tažené z důvodu malých poloměrů tratě na stoupací rampě ze stanice Glognitz.



Obr. 2.1 – Trasa souprav Railjet, zdroj [18]

Po nasazení souprav Railjet se na koleji číslo 2 (kolej směrem z Brna do Prahy) začalo projevovat velké ojetí kolejnic. Toto ojetí se přisuzováno právě soupravám Railjet, kterou jsou na této koleji tlačeny.

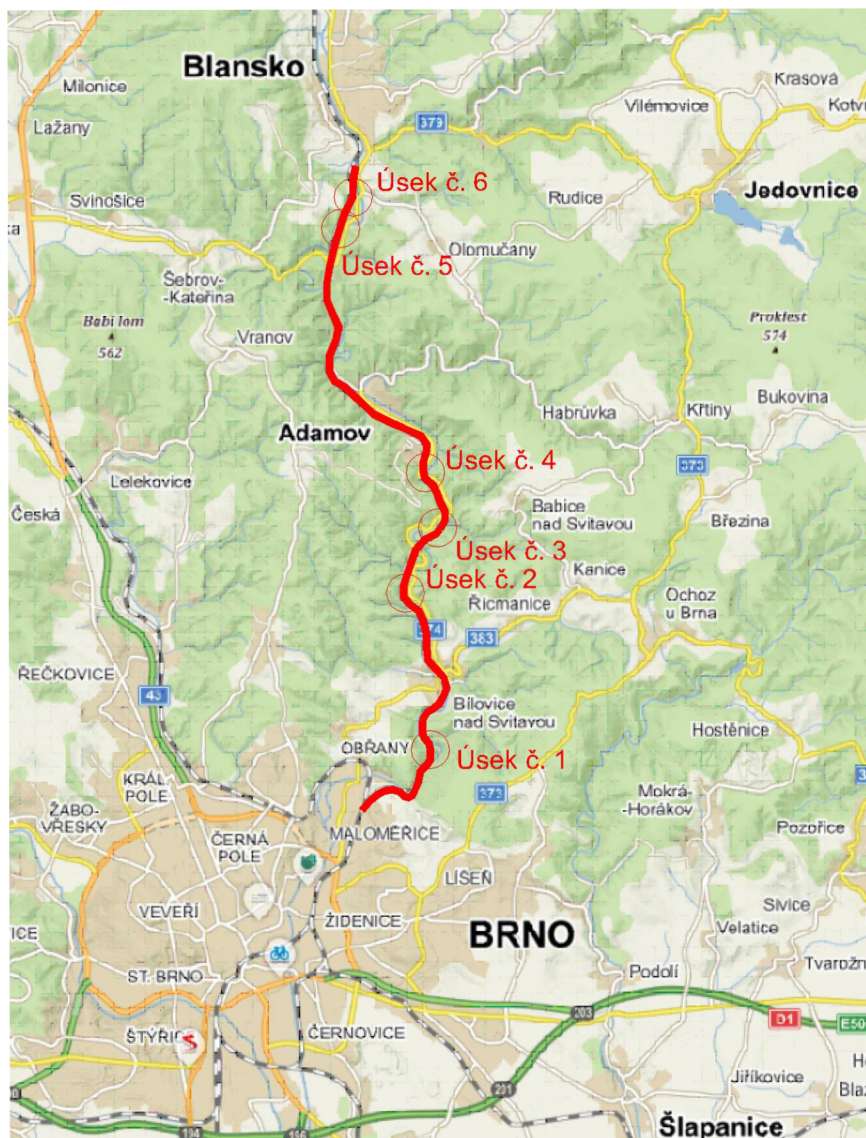
3 Cíl práce

V této diplomové práci je analyzováno tvrzení o možném vlivu jednotek Railjet na zvýšení ojíždění kolejnic. Pro toto zkoumání jsou vyšetřovány polohy a příčné síly vozidla ve směrovém oblouku pomocí Vogelovy a Heumannovy metody. Také jsou sestaveny lineární regrese ojetí kolejnic pro každý ze stanovených úseků trati.

Nejprve jsou shromážděny informace o zadaných úsecích nezbytné pro další zkoumání vlivu nadměrného ojíždění. Dále jsou shromážděny a vytvořeny pomocí rešerše informace týkající se Vogelovy metody, Heumannovy metody a teorie ojíždění kolejnic. Poté jsou získané informace aplikovány přímo na jednotlivé úseky a výsledky jsou porovnávány.

4 Zkoumané úseky

Na trati bylo vybráno šest úseků, na kterých bylo zkoumáno ojetí kolejnic. Úseky tvoří vždy část směrového oblouku.



Obr. 4.1 - Zobrazení úseků na mapě, zdroj [14]

4.1 Úsek č. 1



Obr. 4.2 – Zobrazení úseku č. 1 na mapě, zdroj [14]

Úsek číslo 1 má staničení km 162,880 – 163,000. Nachází se v levostranném směrovém oblouku o poloměrech $R_1 = 261$ m v koleji č. 1 a $R_2 = 265$ m v koleji č. 2. Tento úsek se jako jediný z vybraných nachází v tunelu. Jedná se o dvoukolejný tunel č. 2. Další specifikace jsou zobrazeny v tabulce 4.1 a 4.2.

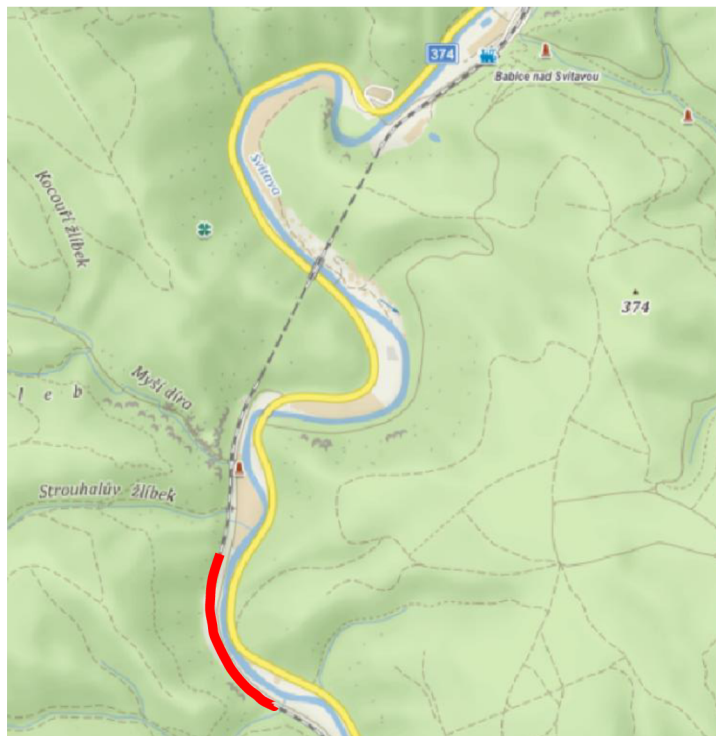
Tabulka 4.1 – Informace o úseku č. 1 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]	Sklon s ve směru staničení [‰]
1	162,880 - 163,000	120	A (1)	261	L	123	+3,85
			B (2)	265	L	121	+3,79

Tabulka 4.3 – Informace o úseku č. 1 – 2. část

Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Pražce	Rozdělení pražců	Rok vložení pražců	Rok vložení kolejnic
V	V_{130}	V_{150}	V_k						
70	75	-	90	60E2	R350 HT	B91S	u	1996	2015
70	75	-	90	60E1	R 260	B91S	u	1997	2017

4.2 Úsek č. 2



Obr. 4.3 – Zobrazení úseku č. 2 na mapě, zdroj [14]

Úsek č. 2 se nachází ve staničení km 166,750 – 167,030 mezi zastávkami Bílovice nad Svitavou a Babice nad Svitavou. Tento oblouk je složený bez mezilehlé přechodnice, svým smyslem je pravostranný, složený z těchto poloměrů $R_1 = 275/302$ m v koleji č. 1 a $R_2 = 271/298$ m v koleji č. 2. V kilometru 166,829 se nachází most s průběžným kolejovým ložem, staničení je určeno ke středu mostu. O 6 m dále, tzn. v km 166,835, dochází ke změně poloměru směrového složeného oblouku v koleji č. 1, změna poloměru oblouku v koleji č. 2 se nachází v km 166,846. Úsek se také nachází ve výškovém lomu, který má staničení v koleji č. 1 km 166,863 a v koleji č. 2 km 166,873. Další specifikace jsou zobrazeny v tabulce 4.3 a 4.4.

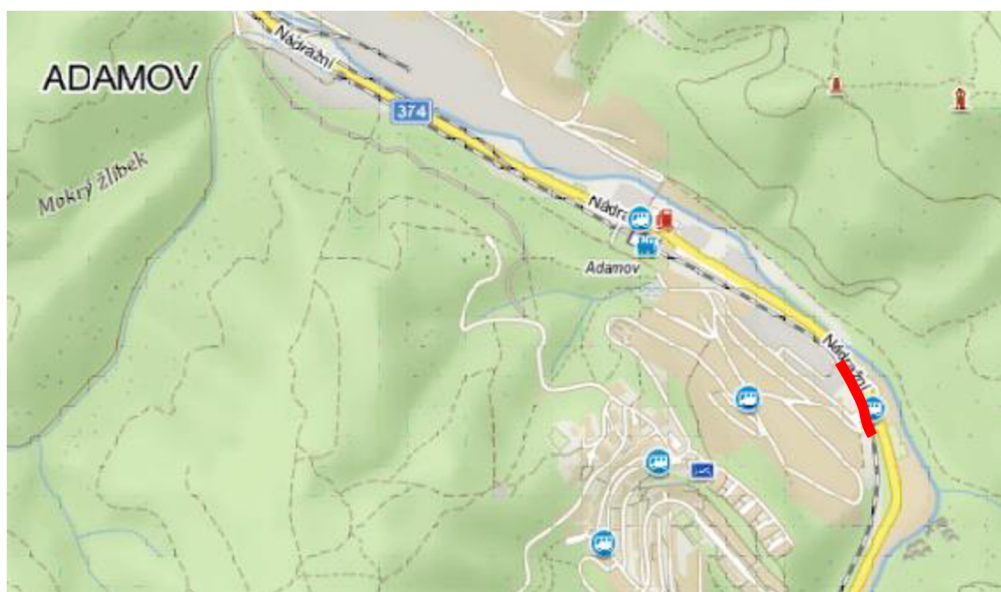
Tabulka 4.4 – Informace o úseku č. 2 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]	Sklon s ve směru staničení [%o]
2	166,750 - 167,030	280	A (1)	275/302	P	130	+1,63/+2,42
			B (2)	271/298	P	130	+1,64/+2,44

Tabulka 4.5 – Informace o úseku č. 2 – 2. část

Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Pražce	Rozdělení pražců	Rok vložení pražců	Rok vložení kolejnic
V	V_{130}	V_{150}	V_k						
70	75	-	90	60E2	R350 HT	B91S	u	1996	2016
70	75	-	90	60E1	R350 HT	B91P/S	u	1997	2017

4.3 Úsek č. 3



Obr. 4.4 – Zobrazení úseku č. 3 na mapě, zdroj [14]

Úsek č. 3 se nachází ve staničení km 170,710 – 170,760 před stanicí Adamov. Úsek je součástí složeného oblouku, který je složený ze tří poloměrů s vloženou přechodnicí mezi 2. a 3. poloměrem, přechodnice je s rostoucí křivostí. Vyšetřovaný úsek je tedy posledním ze tří poloměrů složeného oblouku, s poloměry $R_1 = 299$ m v koleji č. 1 a $R_2 = 304$ m v koleji č. 2. Další specifikace jsou zobrazeny v tabulce 4.5 a 4.6 .

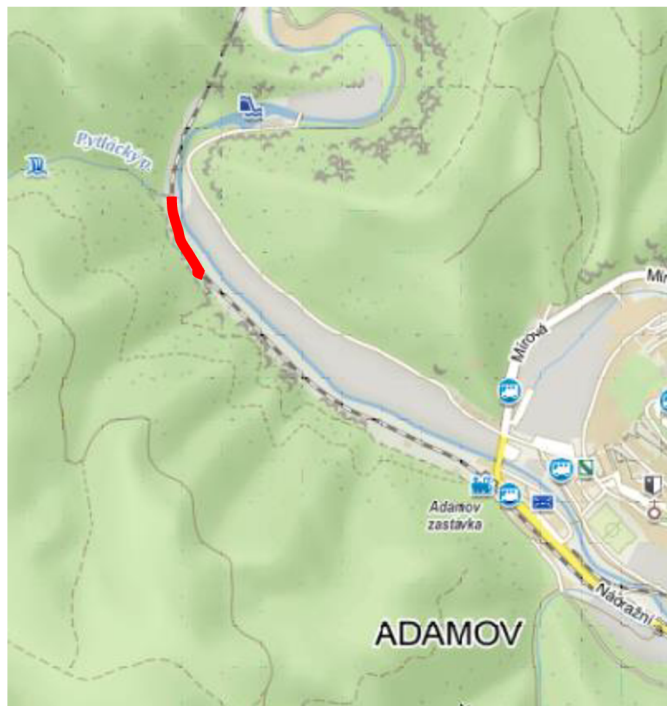
Tabulka 4.6 – Informace o úseku č. 3 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]	Sklon s ve směru staničení [%]
3	170,710 - 170,760	50	A (1)	299	L	122	+1,82
			B (2)	304	L	122	+1,82

Tabulka 4.7 – Informace o úseku č. 3 – 2. část

Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Pražce	Rozdělení pražců	Rok vložení pražců	Rok vložení kolejnic
V	V_{130}	V_{150}	V_k						
75	80	-	95	60E1	R 260	B9S1	u	2012	2012
75	80	-	95	60E1	R 260	B9S1	u	1997	1997

4.4 Úsek č. 4



Obr. 4.5 – Zobrazení úseku č. 4 na mapě, zdroj [14]

Úsek č. 4 se nachází ve staničení km 173,200 – 173,300, za zastávkou Adamov. Nachází se v pravostranném oblouku o poloměrech $R_1 = 279$ m v koleji č. 1 a $R_2 = 275$ m v koleji č. 2. V úseku se nachází výškový lom tratě v km 173,214 pro kolej č. 1 a km 173,227 v koleji č. 2. Další specifikace jsou zobrazeny v tabulce 4.7 a 4.8.

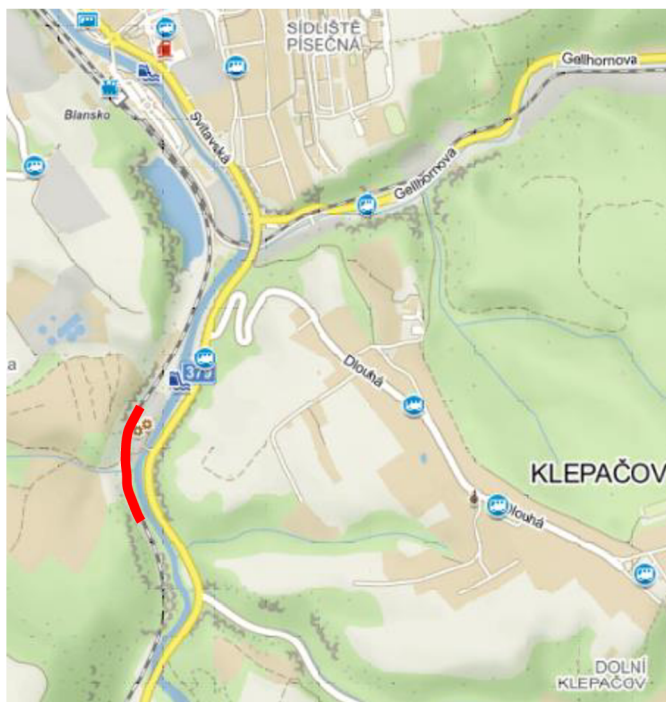
Tabulka 4.8 – Informace o úseku č. 4 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]	Sklon s ve směru staničení [%]
4	173,200 - 173,300	100	A (1)	279	P	148	+5,13/+1,19
			B (2)	275	P	143	+4,38/+1,35

Tabulka 4.9 – Informace o úseku č. 4 – 2. část

Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Pražce	Rozdělení pražců	Rok vložení pražců	Rok vložení kolejnic
V	V_{130}	V_{150}	V_k						
75	80	-	95	60E1	R 260	B91S	u	1997	1997
75	80	-	95	60E1	R 260	B91S	u	1996	1996

4.5 Úsek č. 5



Obr. 4.6 – Zobrazení úseku č. 5 na mapě, zdroj [14]

Úsek č. 5 se nachází v pravostranném směrovém oblouku před stanicí Blansko ve staničení km 177,660 – 177,800. Směrový oblouk je o poloměrech $R_1 = 280$ m v koleji č. 1 a $R_2 = 277$ m v koleji č. 2. V km 177,678 se nachází výškový lom v koleji č. 1 a v km 177,710 v koleji č. 2. Ve staničích km 177,699 a km 177,734 se nachází most s průběžným kolejovým ložem. Další specifikace jsou zobrazeny v tabulce 4.9 a 4.10.

Tabulka 4.10 – Informace o úseku č. 5 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]	Sklon s ve směru staničení [‰]
5	177,660 - 177,800	140	A (1)	280	P	115	+5,80/+4,62
			B (2)	277	P	124	+5,45/+4,52

Tabulka 4.11 – Informace o úseku č. 5 – 2. část

Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Pražce	Rozdělení pražců	Rok vložení pražců	Rok vložení kolejnic
V	V_{130}	V_{150}	V_k						
70	75	-	90	60E1	R 260	B91S	u	1997	2020
70	-	-	90	49E1	R260	SB8	d	1993	2014

4.6 Úsek č. 6



Obr. 4.7 – Zobrazení úseku č. 6 na mapě, zdroj [14]

Tento úsek má staničení km 178,300 – 178,400, je v levostranném směrovém oblouku před stanicí Blansko s poloměrem $R_1 = 265$ m v koleji č. 1 a $R_2 = 271$ m v koleji č. 2. Další specifikace jsou zobrazeny v tabulce 4.11 a 4.12.

Tabulka 4.12 – Informace o úseku č. 6 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]	Sklon s ve směru staničení [‰]
6	178,300 - 178,400	100	A (1)	265	L	120	+4,62
			B (2)	271	L	128	+4,52

Tabulka 4.13 – Informace o úseku č. 6 – 2. část

Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Pražce	Rozdělení pražců	Rok vložení pražců	Rok vložení kolejnic
V	V_{130}	V_{150}	V_k						
70	75	-	90	60E1	R 260	B91S	u	1997	2020
70	-	-	85	49E1	R 260	SB8	d	1993	2014

5 Vogelova metoda stanovení polohy podvozku ve směrovém oblouku

5.1 Úvod

Pohyb vozidla ve směrovém oblouku je vázán na pohyb jednotlivých dvojkolí v koleji. Vozidlo je pomocí okolků směrově vedeno kolejí a také nesenó kolejí. Vyšetřování pohybu vozidla ve směrovém oblouku je velmi složitá úloha, dochází v ní k dynamickému pohybu, proto budeme vycházet ze zjednodušení na kvazistatické vedení vozidla v koleji. To znamená, že budeme uvažovat, že vozidlo se pohybuje ve směrovém oblouku v neměnné poloze, velikost sil je neměnná v čase a závisí na parametrech koleje a podvozků vozidla.

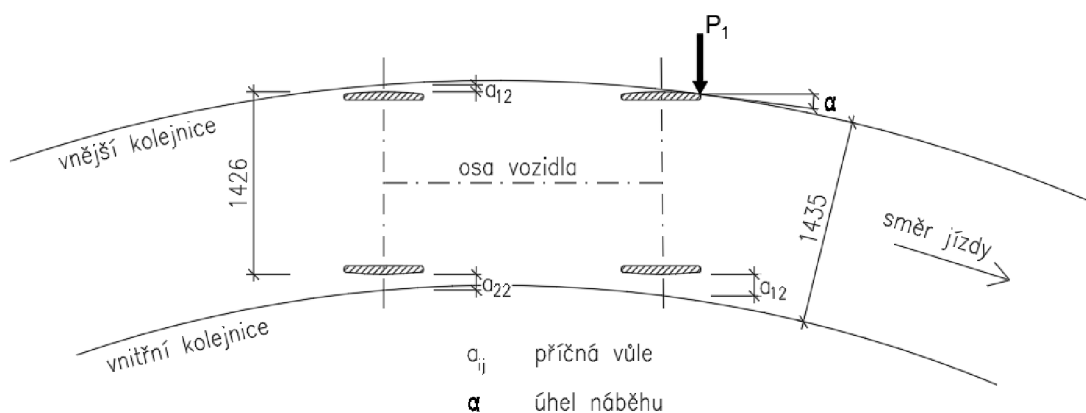
Cílem tohoto vyšetřování bylo zjištění příčných silových účinků mezi vozidlem a kolejí, které budeme dále zkoumat a porovnávat s možným opotřebením kolejnic.

5.2 Příčná vůle podvozku vozidla

Kolejové vozidlo může ve směrovém oblouku zaujmout určité polohy. K vyšetřování těchto poloh slouží Vogelova metoda. Abychom mohli vyšetřovat polohu vozidla, budeme muset přijmout některá zjednodušení:

- kolej a vozidlo jsou absolutně tuhé a geometricky idealizované,
- dvojkolí má válcové jízdní plochy,
- vyšetřování bude prováděno ve vodorovné rovině na styku dvojkolí s kolejnicí.

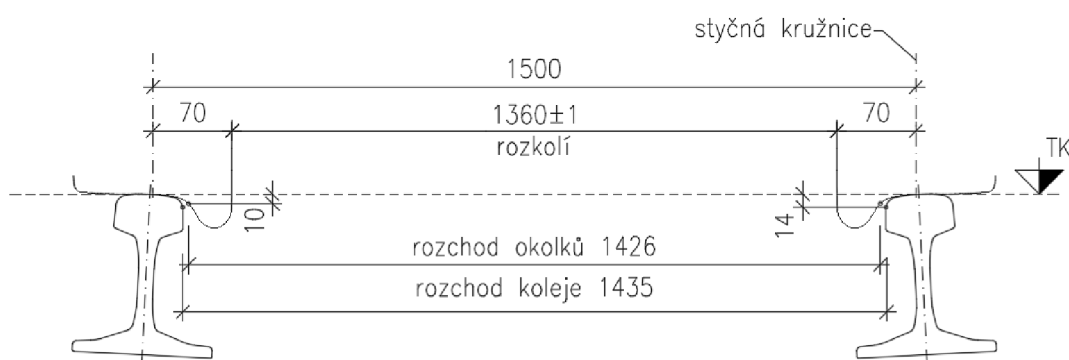
Zobrazením úlohy ve vodorovné rovině se promítne poloha vozidla v koleji pouze dotykovými body, které mohou být na temeni kolejnicových pásu – v místě styčných kružnic nebo na vnitřní straně hlav kolejnic – body dotyku na okolků kola s kolejnicí (obr. 5.1).



Obr. 5.1 – Zobrazení vodorovného řezu dvounápravovým podvozkem

Předpokládáme, že kolo u vnějšího pásu na prvním dvojkolí nabíhá na kolejnici, zde vzniká řídicí síla, která řídí podvozek do příslušné polohy odpovídající poloměru směrového oblouku, vozidlo zároveň svírá v bodu dotyku s kolejnicí, respektive s její tečnou v bodě dotyku, nevelký úhel α . Více o příčných silových účincích je pojednáno v další kapitole 6 Heumannova metoda stanovení řídicí síly v oblouku.

V dalším kroku nás pro zjednodušení bude zajímat jen poloha v příčném směru daná příčnou vůlí podvozku ve směrovém oblouku. Pro znázornění si převedeme rozchod okolků dvojkolí z hodnoty 1 426 mm na 0 mm. Rozchod bude mít tedy nulovou hodnotu, tím pádem z něj zbude pouze bod, spojením těchto bodů v ose dvojkolí získáme úsečku. Rozchod koleje 1 435 mm přejde v tzv. volný pás, ve kterém se může dvojkolí příčně pohybovat, příčná vůle. Volný pás se označuje číselným a písmenným spojením $2a$, do volného pásu se započítává i případné rozšíření ve směrovém oblouku.



Obr. 5.2 – Příčný řez kolejí

Před samotným vyšetřováním polohy podvozku v koleji je důležité určit velikost volného pásu pro každý jednotlivý příklad.

Pro neopotřebované kolejnice a kola podvozku:

$$2a_{\min} = 1435 - 1426 + 1 + 1 = 11 \text{ mm}$$

Opotřebování kolejnic a kol podvozku je nevyhnutelným jevem poježdění vozidel po trati. Největší možný rozchod na koleji je 1 470 mm, způsobený mezním ojetím kolejnic, a zároveň mezní rozchod okolků může být 1 410 mm. Volný pás pro tuto dvojici mezních stavů kolejnic a kol bude tedy:

$$2a_{\max} = 1470 - 1410 + 1 + 1 = 62 \text{ mm}$$

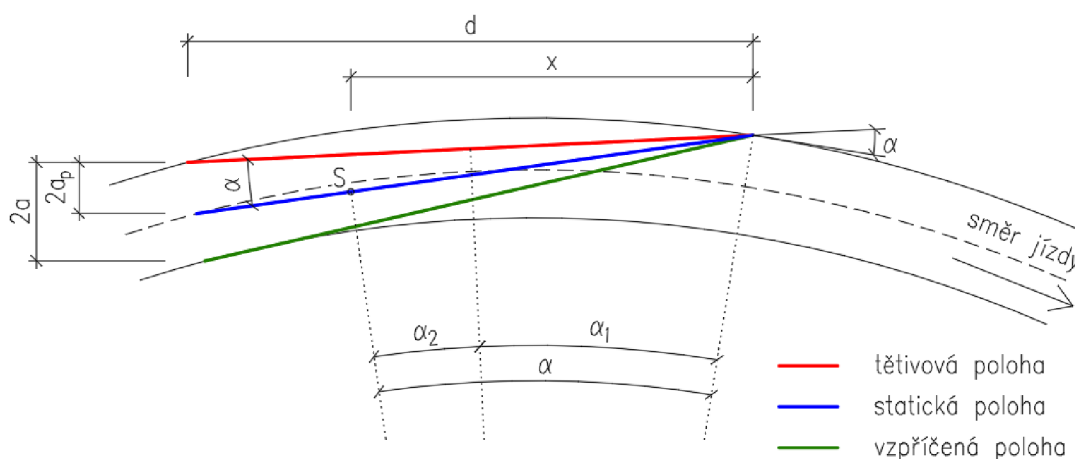
5.3 Polohy vozidla ve směrovém oblouku

Podvozek může ve směrovém oblouku zaujmout tři stabilní polohy, (obr. 5.3). Statickou polohu a dvě krajní polohy, vzpříčenou a tětiovou. Krajní polohy jsou určeny geometrií koleje, proto se obecně nazývají geometrické. Díky dynamickému působení je možné, aby podvozek zaujal ve směrovém oblouku i jiné polohy, tyto

polohy jsou ovšem nestabilní, trvají pouze krátkou chvílí a postupně se ustálí v jedné ze tří kvazistatických poloh.

Všechny polohy mají společné to, že vnější kolo prvního dvojkolí nabíhá na vnější kolejnici, pod nevelkým úhlem α . Rozdílem jednotlivých poloh je poloha druhého dvojkolí. U vzpříčené polohy se vnitřní kolo druhého dvojkolí dotýká vnitřní kolejnice, v tomto místě vzniká nepravá řídící síla P_2 . U těťivové polohy nabíhá druhé dvojkolí na vnější kolejnici. Statická poloha je tedy mezi vzpříčenou a těťivovou polohou, druhé dvojkolí nenabíhá na vnitřní ani na vnější kolejnici.

Polohu podvozku můžeme určit z geometrických poměrů, úhel náběhu α a vzdálenost x od prvního dvojkolí, která určuje střed otáčení S , viz kapitola 6 Heumannova metoda stanovení řídící síly v oblouku nebo odlehlostí druhého dvojkolí podvozku od vnější kolejnice, to znamená, jak velkou vzdálenost potřebuje podvozek, aby mohl zaujmout statickou polohu, označováno $2a_p$.



Obr. 5.3 – Polohy podvozku

kde α je úhel náběhu, α_1 je úhel náběhu odpovídající těťivové poloze, α_2 je úhel náběhu odpovídající vzpříčené poloze, $2a_p$ je příčná vůle posledního dvojkolí od vnější kolejnice ve statické poloze, x je vzdálenost prvního dvojkolí od středu otáčení S a d je rozvor podvozku.

Z obr. 5.3 můžeme napsat:

$$\alpha = \frac{x}{R}; \alpha_1 = \frac{d}{2R}; \alpha_2 = \frac{2a_p}{d} \quad [5.1]$$

ze znalosti:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad [5.2]$$

můžeme napsat:

$$\frac{x}{R} = \frac{d}{2R} + \frac{2a_p}{d}; 2a_p = \frac{xd}{R} - \frac{d^2}{2R} \quad [5.3]$$

Pokud zjistíme, že platí $2a < 2a_p$, tak podvozek nemůže zaujmout stabilní polohu, zaujme tedy polohu vzpříčenou. Příslušná vzdálenost středu otáčení S od prvního dvojkolí pro vzpříčenou polohu se vypočítá jako:

$$x_v = \frac{d}{2} + \frac{2a_p R}{d} \quad [5.4]$$

V této kapitole jsme si ukázali, jaké jsou možné polohy vozidla ve směrovém oblouku určené zjednodušeně geometricky pomocí Vogelovy metody. Informace byly získány z literatury [2] a [3].

6 Heumannova metoda stanovení řídicí síly v oblouku

6.1 Úvod

Mezi vozidlem a kolejí vznikají při jízdě směrovým obloukem příčné síly. Tyto příčné síly jsou jedním z kritérií posuzování a hodnocení pojezdu vozidla a jsou ovlivňovány spousty různými faktory, které jsou většinou velmi proměnlivé. Těmito faktory jsou například poloměr oblouku R , rozvor podvozku d , svislá kolová síla Q , součinitel tření f , rychlost vozidla V , atd.

Základním předpokladem pro Heumannovu metodu je, že vozidlo ve směrovém oblouku zaujme určitou a stálou polohu. Vyšetřování děje dvojkolí při jízdě obloukem lze brát jako kvazistatický případ a řešit tedy pouze statickou rovnováhu sil a momentů.

Pro toto řešení je potřeba vycházet z následujících zjednodušujících předpokladů:

- dvojkolí má válcové jízdní plochy,
- součinitel tření f je konstantní pro všechna kola,
- vozidlo jede ustálenou rychlostí, ani netáhne ani nebrzdí,
- vozidlo i kolej jsou příčně tuhé,
- dvojkolí je k rámu vázáno ve vodorovné rovině tuhou vazbou.

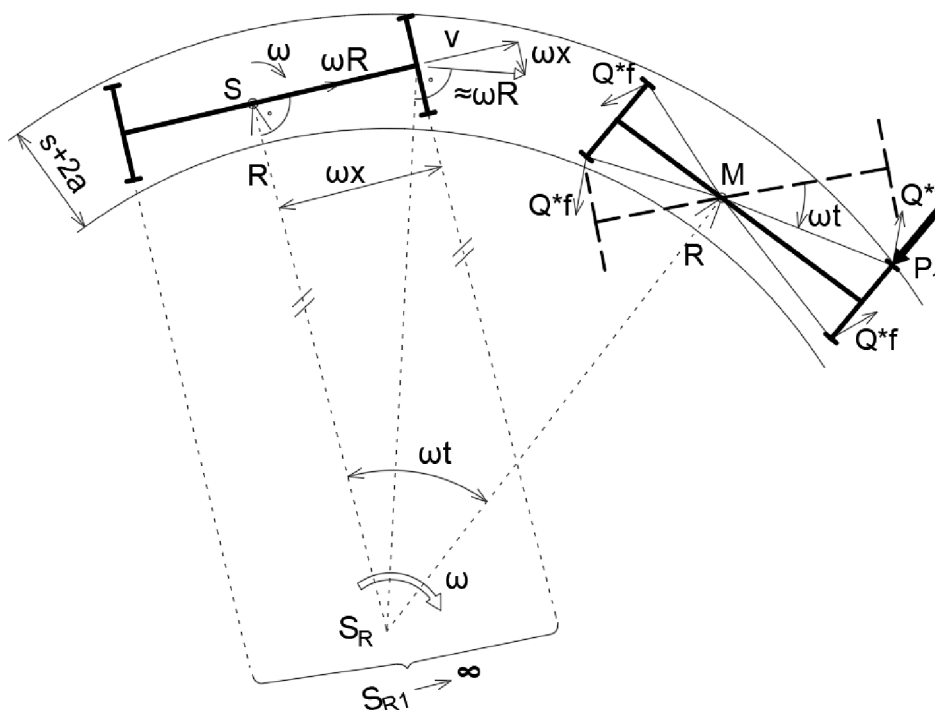
6.2 Pohyb vozidla v oblouku

Vozidlo ve směrovém oblouku koná ve vodorovné rovině dva pohyby, translační a rotační, jejímž složením získáme výsledný pohyb vozidla. Tyto oba pohyby lze charakterizovat okamžitými rychlostmi, obr. 6.1.

Translační pohyb vozidla o rychlosti $V = R \cdot \omega$ působící ve směru podélné osy vozidla. Tento pohyb můžeme popsat úhlovou rychlostí $\omega_t = 0$, kolem středu křivosti dráhy, který leží v nekonečnu, dvojkolí s válcovými plochami kol se chce valit kolmo na osu nápravy.

Rotační pohyb vozidla o úhlové rychlosti $\omega = V/R$ kolem bodu S , který se nazývá střed otáčení. Střed otáčení S leží na ose vozidla (podvozku). Tento pohyb odpovídá postupnému natáčení vozidla jedoucím ve směrovém oblouku. Natáčení vozidla se děje kolem svislé osy ležící právě ve středu otáčení S .

Vektory úhlových rychlostí všech pohybů musí ležet v jedné rovině, střed otáčení bude tedy na rovnoběžce s osou dvojkolí procházející středem oblouku a osou vozidla, obr. 6.1. Tento pohyb vozidlo vykonává nuceně silou P_1 , která se nazývá řídicí síla. Tato síla je na nabíhající kole, kolo na předním dvojkolí na vnějším kolejnicovém pásu.



Obr. 6.1 – Znárodnění pohybů vozidla ve směrovém oblouku koleje a vznikajících sil

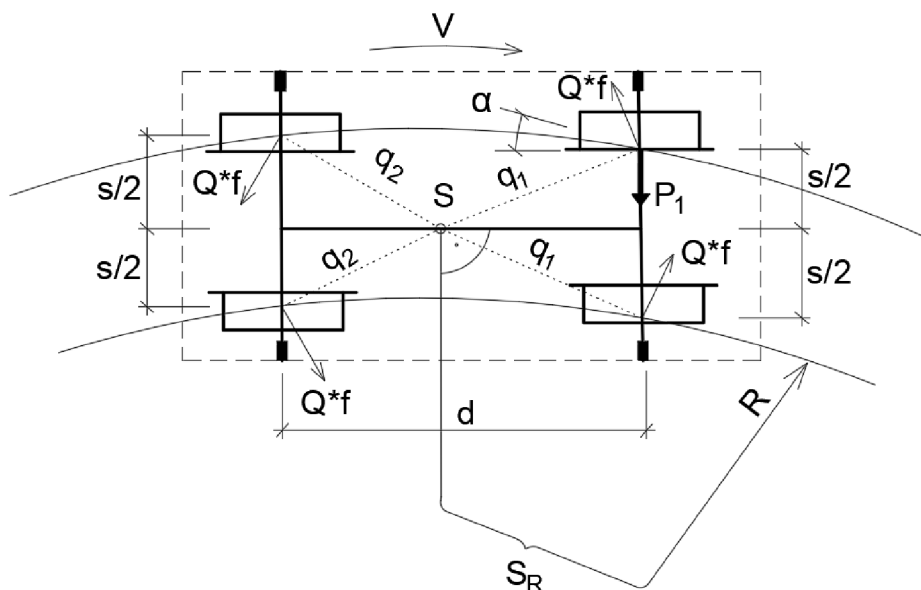
Proti rotačnímu pohybu vozidla působí třecí síly, které mají velikost součinu svislé kolové síly Q a součinitele tření f . Tyto síly jsou kolmé na své průvodiče q_i , spojnice bodu působení těchto sil a středu otáčení S . Všechny čtyři třecí síly vytvářejí moment třecích sil $M_T = 2 \cdot Q \cdot f \cdot (q_1 + q_2)$, který působí proti smyslu natáčení vozidla a tím pádem přitlačuje první dvojkolí na vnější kolejnici, kde jsme si již popsali, že vzniká řídicí síla P_1 . Řídicí síla P_1 musí tedy tento účinek třecích sil překonat.

Poloha vozidla vzhledem k oblouku a poloha středu otáčení S je dána buď statickou rovnováhou sil působících na vozidlo, nebo postavením vozidla do tzv. vzpříčené polohy, kdy je pro statickou rovnováhu sil na vozidle nutné přidat nepravou řídicí sílu P_2 , která působí na zadním dvojkolí na kole u vnitřního kolejnicového pásu. Podmínky vzniku vzpříčené polohy byly objasněny v kapitole 5 pojednávající o Vogelově metodě.

6.3 Poučka o minimu řídicí síly

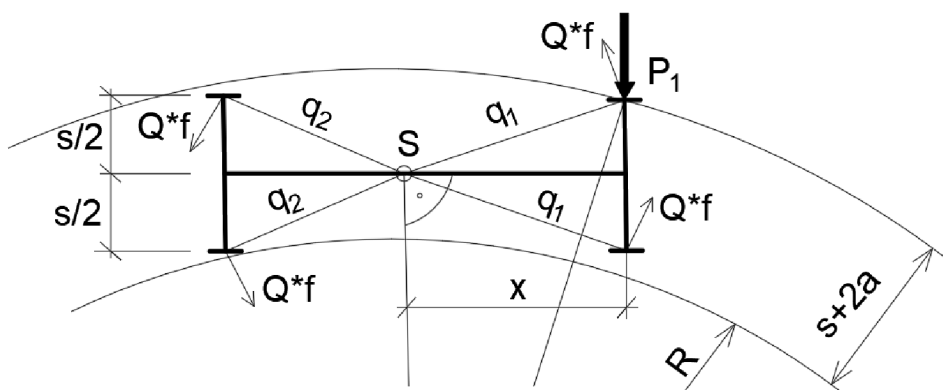
Vozidlo zaujme takovou polohu ve směrovém oblouku, při níž je řídicí síla P_1 minimální, toto platí však pouze při uvažování výše uvedených předpokladů. Na obr. 6.2, můžeme vidět zjednodušený příklad vozidla s příčně i podélně

vedenými dvojkolími. Směrový oblouk je zde znázorněn pomocí dvou kružnic, které představují kolejnicové pásy o nulové šířce. Střed otáčení S jsme našli jako průsečík osy podvozku a paty kolmice k ose podvozku vedené ze středu směrového oblouku.



Obr. 6.2 – Síly působící na vozidlo při jízdě směrovým obloukem

V dalších příkladech budeme používat další zjednodušení vozidla ve směrovém oblouku, které ovšem nebude mít na model či výpočet závažný vliv, obr. 6.3.



Obr. 6.3 – Zjednodušený model vozidla

kde $2a$ je vůle dvojkolí, popsáno v předchozí kapitole.

Předpokládejme, že na vozidlo nepůsobí žádná vnější síla. Vozidlo na obrázku je ve statické poloze vůči oblouku. Pro vzdálenost středu otáčení S musí tedy platit:

$$\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2} + \frac{2a * R}{d} \quad [6.1]$$

Nyní sestavíme rovnice statické rovnováhy:

složková rovnice:

$$P_1 - 2Q * f * \frac{x}{q_1} + 2Q * f * \frac{d-x}{q_2} = 0 \quad [6.2]$$

momentová rovnice:

$$P_1 * x - 2Q * f * q_1 - 2Q * f * q_2 = 0 \quad [6.3]$$

úpravou momentové rovnice získáme vztah [6.4]:

$$P_1 * x - 2Q * f * \sum_1^2 q_i = 0 \quad [6.4]$$

zavedením označení M_T pro moment třecích sil získáme:

$$P_1 * x - M_T = 0 \quad [6.5]$$

velikosti průvodičů můžeme snadno získat aplikováním Pythagorovy věty:

$$q_1 = \sqrt{\left(\frac{S}{2}\right)^2 + x^2}; \quad q_2 = \sqrt{\left(\frac{S}{2}\right)^2 + (d-x)^2} \quad [6.6]$$

dosazením získáme rovnici:

$$\frac{\partial}{\partial x} M_T = 2Q * f * \frac{x}{\sqrt{\left(\frac{S}{2}\right)^2 + x^2}} + 2Q * f * \frac{d-x}{\sqrt{\left(\frac{S}{2}\right)^2 + (d-x)^2}} \quad [6.7]$$

porovnáním se složkovou rovnicí rovnováhy zjistíme, že:

$$\frac{\partial}{\partial x} M_T = P_1 \quad [6.8]$$

derivací zjednodušené momentové rovnice plyne:

$$x * \frac{\partial P_1}{\partial x} + P_1 - \frac{\partial}{\partial x} M_T = 0 \quad [6.9]$$

a dále:

$$\frac{\partial P_1}{\partial x} = 0 \quad [6.10]$$

tímto je poučka o minimu řídící síly P_1 dokázána.

Kombinací vztahů [6.8] a [6.5] dostaneme:

$$P_1 * x = M_T = x * \frac{\partial M_T}{\partial x} \quad [6.11]$$

Pro rovnováhu sil budeme muset získat řídící sílu P_1 a vzdálenost řídící síly od prvního dvojkolí x .

6.4 Grafická metoda

Podstatou metody je grafické vyjádření matematických vztahů popsaných výše.

V následujících kapitolách je prezentován grafický postup získání potřebné řídící síly P_1 a vzdálenosti x k určení středu otáčení S pro statickou polohu vozidla bez přidané vnější síly, pro případ s přidanou vnější silou vozidla ve statické poloze a pro případ s přidanou vnější silou vozidla ve vzpříčené poloze.

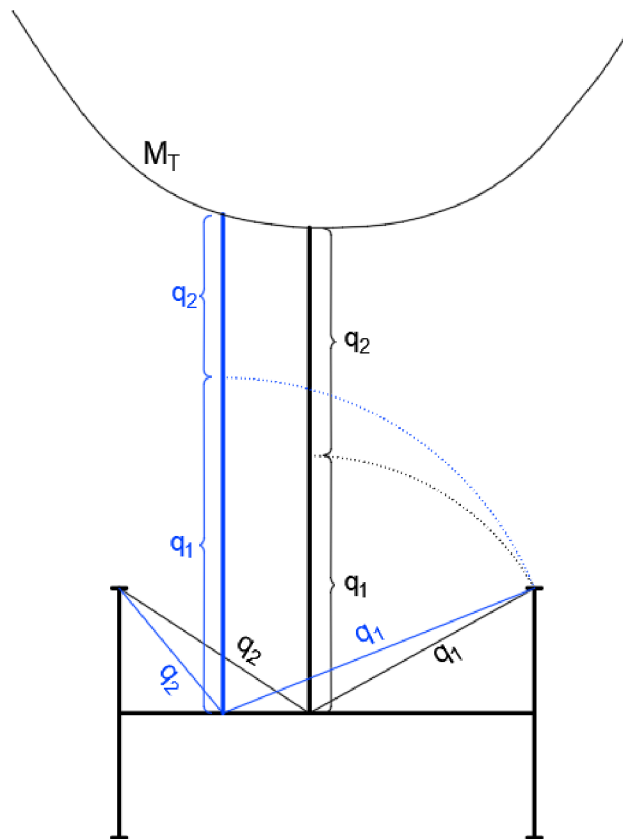
6.4.1 Statická poloha vozidla

Pro řešení příkladu budeme řešit rovnici:

$$P_1 * x = M_T = x * \frac{\partial M_T}{\partial x} \quad [6.12]$$

Postup řešení (obr. 6.5):

1. Nakreslíme si vozidlo ve zvoleném měřítku, v dnešní době je nejvýhodnější zvolit pro rýsování jeden z grafických programů, vyhneme se tak problémy s případným jiným měřítkem.
2. Nakreslíme čáru třecích momentů M_T . Tuto čáru zkonstruujeme tak, že budeme postupně volit jednotlivé body na ose vozidla (podvozku) a od těchto bodů budeme kolmo na osu vozidla vynášet součet obou průvodičů (q_1 a q_2). Takto vyneseme potřebný počet bodů, které spojíme v křivku, která představuje čáru třecích momentů. Názorný postup je ukázán na obr. 6.4.



Obr. 6.4 – Vykreslení čáry třecích momentů M_T

3. Pro názornost je naznačena poloha řídící síly P_1 , obr. 6.5.
4. Dále si zvolíme náhodný bod na ose vozidla za střed otáčení S a budeme ověřovat, zda jsou splněny řešené vztahy. Náhodný bod označíme písmenem E_1 . Z bodu E_1 vedeme kolmici a protne čáru třecích momentů M_T , vzniklý bod označíme jako bod D_1 . V bodě D_1 sestrojíme tečnu k čáře M_T . V místě, kde tečna protne prodlouženou osu prvního dvojkolí,

vznikne bod B_1 . Kolmicí na spojnici bodů E_1 a D_1 vedenou z bodu B_1 získáme bod C_1 .

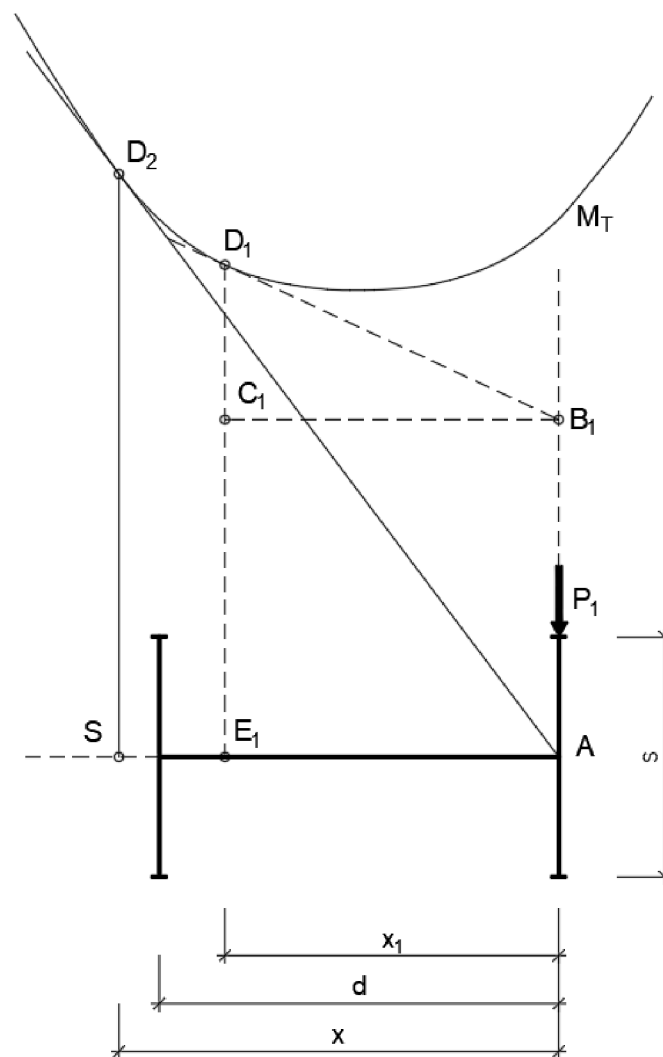
Nyní ověříme podmínky rovnice:

$$|AE_1| = x_1; |D_1E_1| = M_T; |D_1C_1| = x_1 * \frac{\partial M_T}{\partial x}(x_1) \quad [6.13]$$

Protože není splněna podmínka $|D_1E_1| = |D_1C_1|$, není také splněna řešená rovnice.

5. Aby byla podmínka splněna, je potřeba, aby byl bod B_1 v místě bodu A , tím pádem se bod C_1 přesune na osu vozidla.

Pro nalezení námi hledaného bodu S (střed otáčení) budeme rovnou z bodu A vést tečnu k čáře M_T . Bod dotyku označíme jako D_2 , v tomto bodě spustíme kolmici na osu vozidla, v patě kolice nalezneme střed otáčení S .



Obr. 6.5 – Grafická metoda pro statickou polohu

6. Nyní vzdálenost $x = |AS|$ je hledanou vzdáleností středu otáčení od první nápravy.

Řídící sílu P_1 získáme z naší rovnice:

$$P_1 = \frac{M_T}{x} = \frac{|SD_2| * 2Q * f}{|AS|} = 2Q * f * \frac{|SD_2|}{|AS|} \quad [6.14]$$

6.4.2 Statická poloha vozidla s vnější silou

Na vozidlo, respektive na podvozek vozidla může působit vnější síla, např. od nevyrovnaného převýšení, od spojení vozidla s jiným vozidlem či podvozkem, atd. Řešení bude velice podobné jako u případu bez vnější přidané síly, jen se rovnice rovnováhy upraví o účinky vnější síly, v tomto příkladu označené písmenem F . Síla F působí v ose vozidla na vzdálenosti x_F od první nápravy.

K řešení příkladu budeme potřebovat 2 rovnice, složkovou a momentovou:

1. Složková rovnice:

$$P_1 - F - 2Q * f * \frac{x}{q_1} + 2Q * f * \frac{(d - x)}{q_2} = 0 \quad [6.15]$$

2. Momentová rovnice:

$$P_1 * x - F * (x - x_F) - 2Q * f * (q_1 + q_2) = 0 \quad [6.16]$$

Pro moment $F * (x - x_F)$ zavedeme označení M_F , potom bude momentová rovnice spolu s označením M_T pro moment třecích sil vypadat:

$$P_1 * x - M_F - M_T = 0 \quad [6.17]$$

Derivací M_T a M_F získáme výraz:

$$\frac{\partial}{\partial x} (M_F + M_T) = P_1 \quad [6.18]$$

a to znamená, že vznikne výraz, který budeme potřebovat k vlastnímu řešení:

$$M_T + M_F = x \frac{\partial}{\partial x} (M_T + M_F) = P_1 * x \quad [6.19]$$

Postup řešení (obr. 6.6):

1. Nakreslíme si vozidlo a polohu vnější síly F .
2. Nakreslíme čáru třecích momentů M_T . Postup viz příklad výše, obr. 6.4.
3. Sestrojíme momentovou čáru $-M_F$ vnější známé síly F . V místě působitě síly F bude mít nulový moment, což nám určuje první bod této přímky. Druhý bod najdeme vypočítáním pořadnice jako moment síly F k první nápravě:

$$y = |AB_1| = \frac{F * x_F}{2Q * f} \quad [6.20]$$

4. Ze získaného bodu B_1 vedeme tečku k čáře M_T , v bodě dotyku vznikne bod D_1 .
5. Na svislici z bodu D_1 najdeme body S jako průsečík s osou vozidla, bod E_1 jako průsečík s čarou $-M_F$ a bod C_1 jako průsečík rovnoběžky osy vozidla procházející bodem B_1 .
6. Ověříme podmínky rovnice rovnováhy:

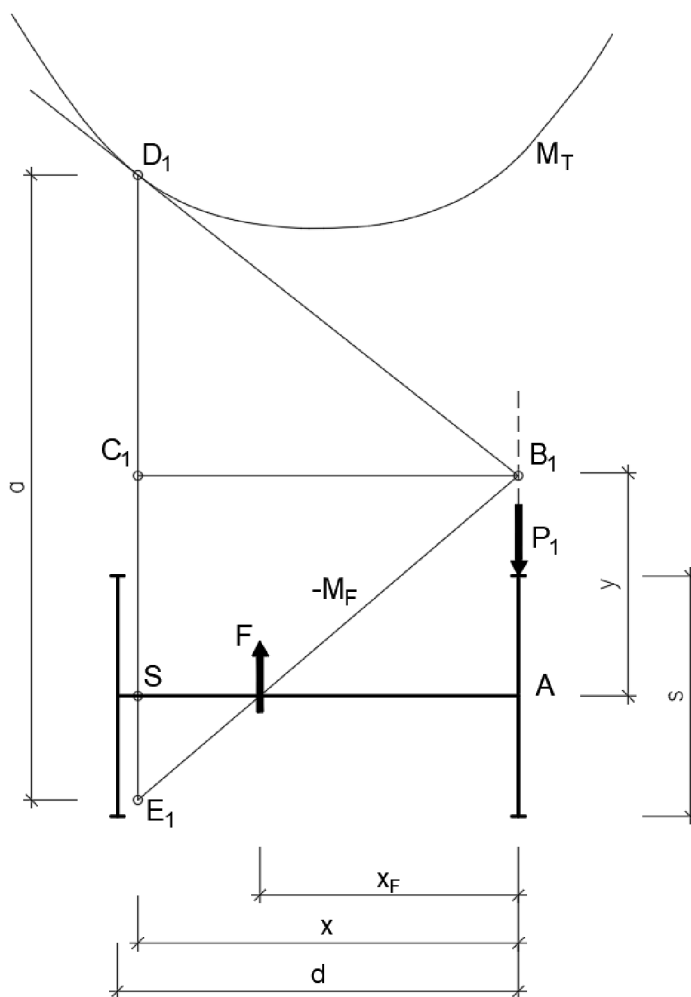
$$|D_1E_1| = M_T + M_F = x \frac{\partial}{\partial x} (M_T + M_F) = |D_1C_1| + |C_1E_1| = P_1 * x \quad [6.21]$$

7. Nyní vzdálenost $x = |AS|$ je hledanou vzdáleností středu otáčení od první nápravy.
8. Řídící sílu P_1 získáme z naší rovnice:

$$a = |D_1E_1| \quad [6.22]$$

$$P_1 = \frac{|D_1E_1|}{|AS|} * 2Q * f = \frac{a}{x} * 2Q * f \quad [6.23]$$

Čára $-M_F$ směřuje stejným směrem, jako síla F . Směřuje-li síla F ven z oblouku je řídící síla P_1 větší a směřuje-li síla F do oblouku je síla P_1 menší.



Obr. 6.6 – Grafická metoda pro statickou polohu s vnější silou F

6.4.3 Vzpříčená poloha vozidla s přidanou vnější silou

Pokud vozidlo nemůže zaujmout statickou polohu, ale nachází se v poloze vzpříčené, dochází ke vzniku nepravé řídící síly P_2 . Znovu sestavíme 2 rovnice rovnováhy:

1. Složková rovnice:

$$P_1 - P_2 - F - 2Q * f * \frac{x}{q_1} + 2Q * f * \frac{(d - x)}{q_2} = 0 \quad [6.24]$$

2. Momentová rovnice:

$$P_1 * x + P_2 * (d - x) - F * (x - x_F) - 2Q * f * (q_1 + q_2) = 0 \quad [6.25]$$

Pokud označíme $P_2 * (d-x)$ jako M_{T2} poté bude momentová rovnice vypadat:

$$P_1 * x + M_{T2} - M_F - M_T = 0 \quad [6.26]$$

A vznikne výraz:

$$M_T + M_{T2} + M_F = x \frac{\partial}{\partial x} (M_T + M_{T2} + M_F) = P_1 * x \quad [6.27]$$

Postup řešení (obr. 6.7):

1. Nakreslíme si vozidlo a polohu vnější síly F .
2. Nakreslíme čáru třecích momentů M_T . Postup viz příklad výše, obr. 6.4.
3. Vypočteme polohu středu otáčení S délkou x_v podle vzorce [5.4]:

$$x_v = \frac{d}{2} + \frac{2a_p R}{d}$$

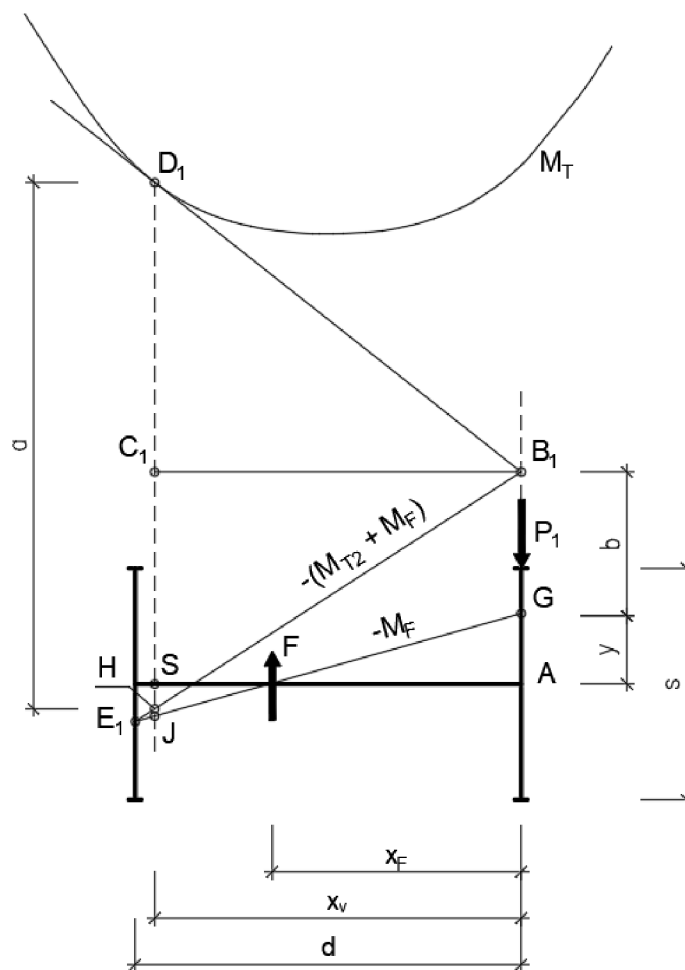
4. Z bodu S vedeme kolmici na osu vozidla, protnutím čáry třecích momentů získáme bod D_1 .
5. Z bodu D_1 vedeme tečnu ke křivce M_T , která protne prodlouženou osu první nápravy. Vznikne bod B_1 .
6. Vypočítáme velikost momentu síly F k první nápravě podle vzorce [6.20], vzdálenost nanese od bodu A a vznikne bod G :

$$y = |AG| = \frac{F * x_F}{2Q * f}$$

7. Nakreslíme čáru $-M_F$ jako spojnicí bodu G a bodem působíště síly F .
8. Průsečík čáry $-M_F$ s druhou nápravou označíme jako E_1 .
9. Z bodu E_1 musí vycházet momentová přímka nepravé řídicí síly P_2 (v bodě E_1 má síla P_2 nulový moment). Velikost momentu M_{T2} nepravé řídicí síly P_2 bude měřena od přímky $-M_F$ proto spojnice $|E_1 B_1|$ je čárou $-(M_{T2} + M_F)$. To znamená, že pro každé x bude svíslá vzdálenost mezi čárou M_T a $-(M_{T2} + M_F)$ rovna součtu $M_T + M_{T2} + M_F$.
10. Řešením pak je:

$$P_1 = \frac{|D_1 H|}{|AS|} * 2Q * f = \frac{a}{x_v} * 2Q * f \quad [6.28]$$

$$P_2 = \frac{|B_1 G|}{d} * 2Q * f = \frac{b}{d} * 2Q * f \quad [6.29]$$



Obr. 6.7 – Grafická metoda pro vzpříčenou polohu s vnější silou F
Informace byly získány z literatury [3] a [4].

7 Heumannova metoda – výpočty příčných sil

7.1 Úvod

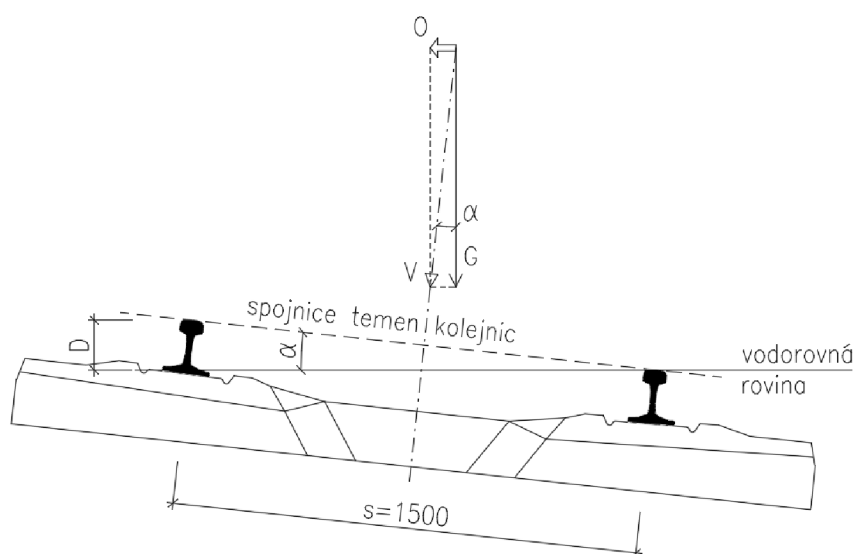
Základní myšlenkou této práce je, že soupravy, které jsou sunuty (tlačeny) by měly způsobovat větší opotřebování kolejnic. Pro dokázání této myšlenky se budou úseky zkoumat pomocí Heumannovy metody, kdy na vozidlo (podvozek) působí vnější síla.

Tato vnější síla se skládá ze síly, která působí, pokud vozidlo projíždí obloukem s nedostatkem převýšení a ze síly, která vyplývá z geometrických parametrů koleje v oblouku a je závislá na velikosti odporu, resp. síle, kterou musí lokomotiva vyvinout, aby celá souprava mohla jet ustálenou rychlostí.

7.2 Síla od nevyrovnaného bočního zrychlení

Síla od nevyrovnaného bočního zrychlení, čili síla, která vzniká při průjezdu vlaku obloukem s nedostatkem (přebytkem) převýšení, se jednoduše odvodí ze základních vzorců pro výpočet převýšení ve směrovém oblouku.

Na vozidlo ve směrovém oblouku působí odstředivá a gravitační síla. Ideálním (teoretickým) převýšením je stav, kdy výslednice svislého zrychlení od odstředivé a gravitační síly působí kolmo ke spojnici temen kolejnicových pásů. Pokud tato podmínka není splněna, působí na vozidlo vnější síla. Informace byly získány z literatury [5] a [13].



Obr. 7.1 - Převýšení

kde O je odstředivá síla [N], G je gravitační síla [N], V je rychlost [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$], D je převýšení [mm], s je vzdálenost styčných kružnic [mm].

Jednotlivé síly lze vypočítat:

$$G = g * m; O = m * \frac{v^2}{R} \quad [7.1]$$

z geometrie:

$$\text{tg}\alpha = \frac{O}{G}; \sin\alpha = \frac{D_{EQ}}{s}; \text{tg}\alpha \approx \sin\alpha; v = \frac{V}{3,6} \quad [7.2]$$

po dosazení:

$$\frac{m * \frac{12,96}{R} \frac{V^2}{3,6^2}}{m * g} = \frac{D_{EQ}}{s} \Leftrightarrow D_{EQ} = \frac{11,8 * V^2}{R} \quad [7.3]$$

od teoretického převýšení D_{EQ} odečteme hodnotu převýšení navrženou D a získáme velikost nedostatku převýšení (přebytku převýšení):

$$I = D_{EQ} - D; E = D - D_{EQ} \quad [7.4]$$

ani jedna z hodnot I nebo E nesmí nabývat záporných hodnot.

Nedostatku (přebytku) odpovídá hodnota nevyrovnaného příčného zrychlení:

$$a_q = \frac{V^2}{12,96 R} - \frac{D * g}{s} \quad [7.5]$$

úpravami vznikne:

$$\frac{a_q}{g} = \frac{l}{s}; a_q = \frac{l}{153} \quad [7.6]$$

z těchto vědomostí lze jednoduše sestavit rovnice pro boční sílu:

$$A = \frac{m * a_q}{g} \quad [7.7]$$

pro přesnější hodnotu lze a_q vynechat a použít přímo hodnotu nedostatku převýšení:

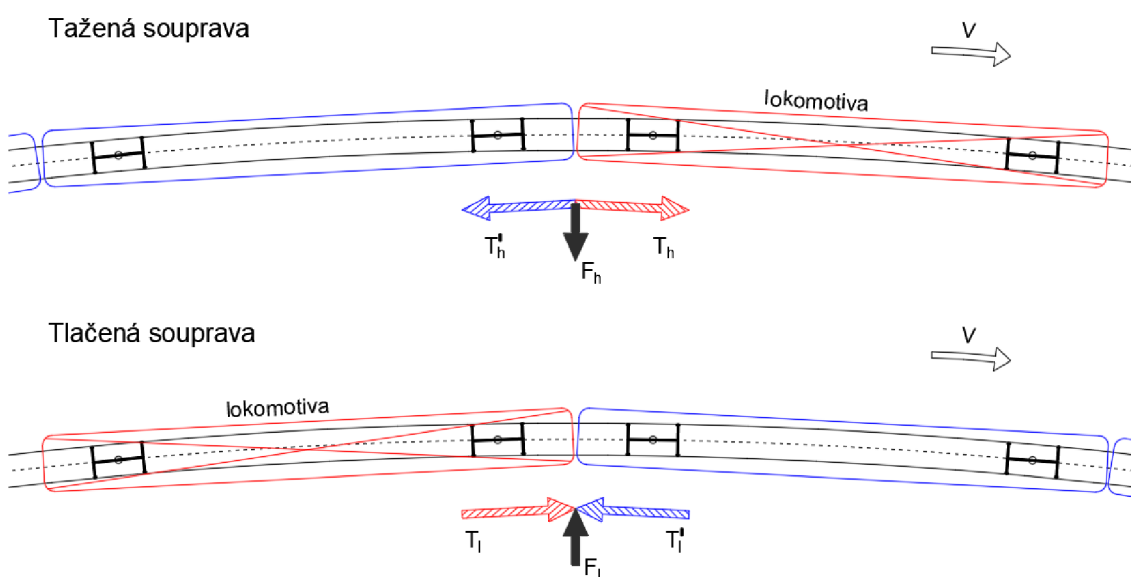
$$A = \frac{m * l}{s} \quad [7.8]$$

hmotnost v tomto případě představuje kolovou sílu pro celý podvozek, čili $m = 4 * Q$.
Výsledný vzorec:

$$A = \frac{4Q * l}{s} \quad [7.9]$$

7.3 Boční síla vlivem tažení nebo sunutí soupravy

Druhou složkou vnější síly působící na podvozek je síla, která vzniká ve směrovém oblouku od tažné nebo tlačné síly lokomotivy, své působíště má v otočném čepu podvozku. Tato síla působí do středu oblouku, pokud je souprava lokomotivou tažena a ze středu, pokud je souprava sunuta (tlačena), obr. 7.2. Jak již bylo řečeno v kapitole 6.4.2, pokud vnější síla působí ven z oblouku, hodnota řídicí síly P_1 se zvětší.



Obr. 7.2 – Silový rozdíl mezi taženou a tlačnou soupravou

7.3.1 Odpory jízdy

Pro zjištění velikosti boční síly je nejprve nutné vyčíslit tažnou (tlačnou) sílu samotné lokomotivy. Tato síla se vypočítá jako součet všech odporů, které je nutné, aby vlak překonal pro ustálenou rychlost. Odpory se rozlišují na dvě skupiny, traťové a jízdní. Nejprve se vypočítají tzv. měrné odpory, které mají jednotku $[\text{N} \cdot \text{kN}^{-1}]$ nebo $[\text{‰}]$, teprve ty se převedou na odpor s jednotkou v $[\text{N}]$.

$$O = O_t + O_j = g * m * (o_t + o_j) \quad [7.10]$$

kde g je gravitační konstanta $9,81 [\text{m/s}^2]$, m je hmotnost soupravy bez lokomotivy $[\text{t}]$.

7.3.1.1 Traťové odpory O_t

Traťové odpory jsou způsobené vlastnostmi dané trati, jako je odpor ze zakřivení koleje, odpor z jízdy tunelem a odpor ze sklonu tratě.

- **Měrný odpor ze zakřivení koleje o_R**

Odpor ze zakřivení koleje je souhrn všech možných třecích sil působících na styku koleje a kola, sil způsobujících změnu směru pohybu a vlastního odporu vozidla. Zjednodušeně se dá tento měrný odpor spočítat jako:

$$o_R = \frac{600}{R} \quad [7.11]$$

kde R je poloměr oblouku v $[\text{m}]$.

- **Měrný odpor ze stoupání o_s**

Odpor ze stoupání lze odvodit z tíhy vlaku a úhlu sklonu. Postupným řešením této úlohy však zjistíme, že měrný odpor ze sklonu trati je přímo hodnota stoupání nebo klesání trati v promilích. Při výpočtu je velice důležité nezapomenou na znaménko. Pokud kolej klesá, je odpor záporný a vlaku vlastně pomáhá v jízdě, čili zmenšuje potřebnou tažnou (tlačnou) sílu pro ustálenou rychlost soupravy.

- **Měrný odpor z jízdy tunelem o_T**

Odpor z jízdy tunelem je způsoben zejména zvýšeným odporem vzduchu. Do rychlosti 200 km/h je možné tento měrný odpor uvažovat $1 - 5 \text{ ‰}$.

7.3.1.2 Jízdní odpory O_j

Jízdní odpory vznikají při jízdě na přímé a vodorovné trati. Hlavními složkami jsou valivé tření mezi kolem a kolejnicí, tření čepů náprav v ložiscích a odpor prostředí. Každá jednotlivá složka se dá vypočítat samostatně, ovšem v literatuře [6] lze nalézt vzorce pro zjištění celkového měrného jízdního odporu pomocí vzorce:

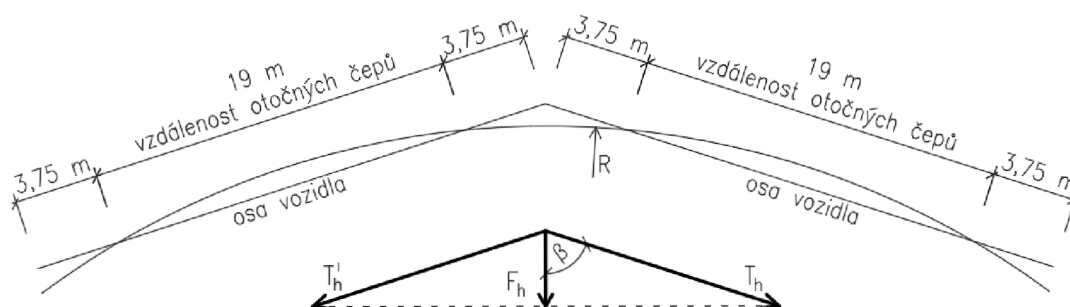
$$o_j = 1,35 + 0,0008 \cdot V + 0,00033 \cdot V^2 \quad [7.12]$$

kde V je rychlost v $[\text{km} \cdot \text{h}^{-1}]$.

Informace byly získány z literatury [3] a [13].

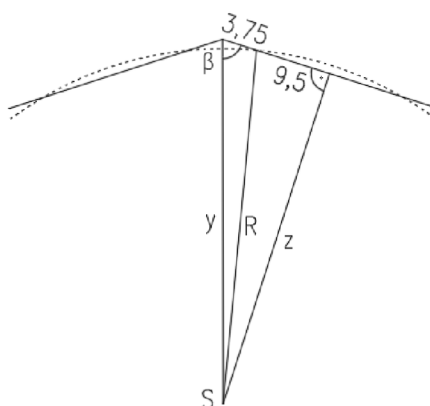
7.3.2 Boční síla na podvozek

Po zjištění tažné (tlačné) síly jednoduše geometricky převedeme tuto sílu na hledanou boční sílu, viz obr. 7.3.



Obr. 7.3 – Rozklad síly

Úhel β je pro každý poloměr oblouku jiný, dá se vypočítat pomocí Pythagorovy věty, obr. 7.4.



Obr. 7.4 – Výpočet úhlu β

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{R^2 - 9,5^2}}{9,5 + 3,75}\right) \quad [7.13]$$

Při uvažování:

$$T_h \approx T'_h \quad [7.14]$$

výslednou boční sílu lze vypočítat:

$$F_h = \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) T_h \quad [7.15]$$

7.4 Součinitel tření f

Součinitel tření je pro výpočet velice důležitý. Pro výpočet byl použit vztah Curtiuse a Knifflera, informace byly získány z literatury [7]:

$$f' = \frac{7,5}{V + 44} + 0,161 \quad [7.16]$$

kde V je rychlost v $[\text{km}\cdot\text{h}^{-1}]$.

Tento součinitel bude dále redukován pomocí podélného prokluzu:

$$s_x = [1 - \cos(\alpha)] * 50\,000 \quad [7.17]$$

s_x je podélný prokluzu a α je úhel náběhu.

Výsledný součinitel tření f bude tedy:

$$f = f' * \left[\arctg(s_x) + \frac{s_x}{1 + s_x^2} \right] * \frac{2}{\pi} \quad [7.18]$$

7.5 Jednotky RailJet

RailJet je označení pro vysokorychlostní vlakové soupravy Viaggio Comfort provozované Českými drahami (ČD) a Rakouskými spolkovými drahami (ÖBB). Soupravy RailJet se pohybují i na tratích v Maďarsku, Německu či ve Švýcarsku, ovšem nejsou vlastněny tamními provozovateli drah. Výrobcem souprav je společnost Siemens, soupravy jsou vyráběny ve Vídni. Jednotky RailJet se zkráceně označují spojením písmen RJ, toto označení lze nalézt například v jízdním řádu. Rozdíl mezi jednotkami RailJet vlastněnými ČD a ÖBB je v barvě vozů, ČD vlastní 7 souprav modré barvy a ÖBB přibližně 60 souprav červené barvy. Dalšími rozdíly jsou například počet sedadel atd. Soupravy mají standardně sedm vagonů a lokomotivu. Na trase Praha hl.n. – Štýrský Hradec se využívá všech sedm souprav vlastněných ČD a tři soupravy z řad ÖBB.

Ve zkoumaném úseku jsou v provozu soupravy se sedmi vagóny s celkovým počtem 442 sedadel, délka soupravy bez lokomotivy je přibližně 185 m. Tyto soupravy mají hmotnost 350 tun, s připočítáním váhy cestujících, kdy se na jednoho cestujícího uvažuje 80 kg je váha soupravy bez lokomotivy pak 385,36 tun, s lokomotivou 472,36 tun. Hnané vozy osobní přepravy mají dva vzduchově vypružené vysokorychlostní podvozky typu FS400 s rozvorem 2,5 m, celková délka jednoho vozidla je 26,5 m, vzdálenost otočných čepů podvozku je 19 m.

Z hmotnosti vozu lze vypočítat kolovou sílu:

$$Q = \frac{\frac{m}{n} * g}{k} \quad [7.19]$$

kde Q je kolová síla [kN], m je hmotnost soupravy bez lokomotivy [t], g je gravitační konstanta 9,81 [m/s²], n je počet vozů v soupravě a k je počet kol na vozidle. Kolová síla pro jedno kolo vozidla je tedy 67,51 kN.

Jednotky RailJet využívají rychlosti pro nedostatek převýšení 130 mm, V_{130} . Jejich maximální provozní rychlost je 230 km/h, vozové skříně jsou tlakotěsné s odlehčenou ocelovou konstrukcí.

Ačkoliv soupravy RailJet začaly provoz na zkoumaném úseku, až v červenci roku 2014 poprvé se v České republice objevily v květnu roku 2009, kdy se prováděly typové zkoušky na Železničním zkušebním okruhu u Cerhenic na Kolínsku. Informace získány z literatury [1], [8], [9] a [10].



Obr. 7.5 – Souprava Railjet (modrá), zdroj [15]



Obr. 7.6 – Souprava Railjet (červená), zdroj [16]

7.6 Výsledky

V této kapitole jsou shrnuty všechny výsledky získané pomocí Heumannovy a Vogelovy metody z jednotlivých úseků a kolejí v přehledných tabulkách. Pro výpočet volného pásu $2a$ byla použita data z daného úseku pro rozchod koleje. Volný pás přímo souvisí s hodnotou rozchodu, čili s ojetím kolejnic. Výpočty byly tedy provedeny pro nejmenší hodnotu rozchodu za celé sledované časové období pro jednotlivé úseky a pro normální rozchod jmenovité hodnoty 1 435 mm s uvažováním teoretického rozšíření rozchodu podle vzorce [7.20], který platí pro poloměry oblouku menší než 275 m.

$$\Delta u_1 = \frac{7150}{R} - 26 \quad [7.20]$$

Jelikož se mnoho vybraných úseků nachází ve složeném směrovém úseku nebo ve výškovém oblouku, byl výpočet pro jeden úsek rozdělen na více jednotlivých výpočtů s rozdílnými parametry. Podmínkou pro rozdělení bylo, aby výsledný úsek

byl alespoň 50 m dlouhý s konstantními parametry, jako jsou poloměr oblouku R a sklon koleje s .

Pro kolej číslo 2, kde jsou soupravy Railjet sunuty, byly provedeny pro porovnání i výpočty pro tažené soupravy.

Všechny výpočty, až na uvedené výjimky, byly počítány pro rychlost V_{130} .

7.6.1 Úsek č. 1

Na prvním příkladu je ukázán postupně celý výpočet řídicí síly podle Heumannovy metody pro kolej č. 1. Jako první je potřeba zjistit boční sílu na podvozek F_h/F_i , toho dosáhneme spočítáním jízdních a traťových odporů pomocí vzorců z kapitoly 7.3.1 a pomocí dopočtu boční síly pomocí vzorců z kapitoly 7.3.2.

Tabulka 7.1 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 1 – 1. část

Číslo úseku	Kolej	Rychlosti				Převýšení D [mm]	Měrný jízdní odpor σ_j [N/kN]	Poloměr oblouku R [m]
		V	V_{130}	V_{150}	V_k			
1	A (1)	70	75	-	90	123	3,27	261
	B (2)	70	75	-	90	121	3,27	265

Tabulka 7.2 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 1 – 2. část

Číslo úseku	Sklon s ve směru jízdy [%o]	Projíždí vlak v úseku tunelem?	Měrný traťový odpor σ_t [N/kN]		
			Od směrového oblouku σ_R	Od sklonu trati σ_s	Od průjezdu tunelem σ_T
1	-3,85	ano	2,30	-3,85	2
	3,79	ano	2,26	3,79	2

Tabulka 7.3 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 1 – 3. část

Číslo úseku	Jízdní odpor σ_j [kN]	Taťový odpor σ_t [kN]	Tažná/tlačná síla T_h/T_l [kN]	Úhel β [°]	Boční síla F_h/F_l [kN]	Boční síla A [kN]
1	12,35	1,70	14,04	87,09	0,71	-23,76
	12,35	30,45	42,80	87,14	-2,14	-23,40

Nyní je důležité zjistit hodnotu volného pásu $2a$, která je nezbytnou pro určení polohy podvozku ve směrovém oblouku. Budou zde prezentovány oba výpočty, jeden pro jmenovitou hodnotu normálního rozchodu s teoretickým rozšířením rozchodu a druhý pro minimální hodnotu rozchodu zjištěnou z naměřených dat měřícím vozem.

7.6.1.1 Postup výpočtu, jmenovitá hodnota normálního rozchodu

Jmenovitá hodnota normálního rozchodu je 1 435 mm, příčná vůle dvojkolí se uvažuje 11 mm. Rozšíření rozchodu je:

$$\Delta u_1 = \frac{7150}{261} - 26 = 1,39 \doteq 2 \text{ mm}$$

Volný pás $2a$ je tedy:

$$2a = 11 + 2 = 13 \text{ mm}$$

Spočítá se boční síla na podvozek od nevyrovnaného zrychlení pomocí vzorce [7.9]:

$$A = \frac{4Q * I}{s} = \frac{4 * 67,51 * 132}{1500} = 23,76 \text{ kN}$$

Nedostatek převýšení dle vzorce [7.4]:

$$l = \frac{11,8 * V^2}{R} - D = \frac{11,8 * 75^2}{261} - 123 = 132 \text{ mm}$$

Pro výchozí bod výpočtu si určíme vzdálenost středu otáčení x od první nápravy. Víme, že vzdálenost x musí splňovat tyto zásady, dle rovnice [6.1]:

$$\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2} + \frac{2a * R}{d}$$

$$\frac{2,5}{2} < x < \frac{2,5}{2} + \frac{0,013 * 261}{2,5}$$

$$1,25 < x < 2,6072$$

Výchozí vzdálenost zvolíme například 2,4 m.

Nyní se stanoví součinitel tření f podle kapitoly 7.4.

$$f' = \frac{7,5}{V + 44} + 0,161 = \frac{7,5}{75 + 44} + 0,161 = 0,224$$

$$\alpha = \frac{x}{R} = \frac{2,4}{261} = 0,527^\circ$$

$$s_x = [1 - \cos(\alpha)] * 1000 = [1 - \cos(0,527)] * 50\,000 = 2,115$$

$$f = f' * \left[\arctg(s_x) + \frac{s_x}{1 + s_x^2} \right] * \frac{2}{\pi} = 0,224 * \left[\arctg(2,115) + \frac{2,115}{1 + 2,115^2} \right] * \frac{2}{\pi} = 0,216$$

Nyní se sestrojí rovnice rovnováhy.

Složková:

$$P_1 - A + F_h - 2Q * f * \frac{x}{q_1} + 2Q * f * \frac{(d - x)}{q_2} = 0$$

Momentová:

$$P_1 * x - A * \left(x - \frac{d}{2} \right) + F_h * \left(x - \frac{d}{2} \right) - 2Q * f * (q_1 + q_2) = 0$$

Pomocí numerické iterační metody, kdy měníme neznámé P_1 a x , se dosáhne platnosti těchto dvou rovnic rovnováhy. Vhodné je použití programu, např. MS Excel, využita byla gradientní metoda řešení soustavy nelineárních rovnic.

Zpětně po získání vzdálenosti x můžeme potvrdit, že se skutečně jedná o statickou polohu podvozku ve směrovém oblouku:

$$2a > 2a_p = \frac{xd}{R} - \frac{d^2}{2R}$$

7.6.1.2 Výpočet dle nejmenší naměřené hodnoty rozchodu

Nejmenší hodnota rozchodu v oblouku je 1 435,41 mm. Volný pás $2a$ je tedy 11,41 mm. Podvozek se dostane do vzpříčené polohy. Postup výpočtu bude přibližně stejný. Vypočítáme boční sílu na podvozek, součinitel tření a vzdálenost x_v vypočítáme podle vzorce:

$$x_v = \frac{d}{2} + \frac{2aR}{d} = \frac{2,5}{2} + \frac{0,01141 * 261}{2,5} = 2,441 \text{ m}$$

Do rovnic rovnováhy se přidá nepřímá řídící síla P_2 .

Složková:

$$P_1 - P_2 - A + F_h - 2Q * f * \frac{x}{q_1} + 2Q * f * \frac{(d - x)}{q_2} = 0$$

Momentová:

$$P_1 * x_v + P_2 * (d - x_v) - A * \left(x_v - \frac{d}{2}\right) + F_h * \left(x - \frac{d}{2}\right) - 2Q * f * (q_1 + q_2) = 0$$

Pomocí postupných iterací, kdy měníme neznámé P_1 a P_2 se dosáhne platnosti těchto dvou rovnic rovnováhy.

Konečné výsledky jsou uvedeny v tabulce.

Tabulka 7.4 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 1

Číslo úseku	Poloha podvozku	Volný pás $2a$ [mm]	Potřebný volný pás $2a_p$ [mm]	Součinitel tření f [-]	Řídící síla P_1 [kN]	Střed otáčení x [m]	Nepravá řídící síla P_2 [kN]
1	Statická	13,00	11,90	0,217	50,98	2,495	-
	Vzpříčená	11,41	-	0,217	50,82	2,441	2,09
	Statická	12,00	11,40	0,217	52,06	2,463	-

Tabulka 7.5 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 1, kolej č. 2, tažená souprava

Číslo úseku	Poloha podvozku	Volný pás $2a$ [mm]	Potřebný volný pás $2a_p$ [mm]	Součinitel tření f [-]	Řídící síla P_1 [kN]	Střed otáčení x [m]	Nepravá řídící síla P_2 [kN]
1	Statická	12,00	12,00	0,217	50,07	2,517	-

Pro kolej č. 1 byly provedeny oba výpočty, pro teoretickou hodnotu rozchodu koleje (statická poloha) i pro nejmenší naměřenou hodnotu rozchodu koleje (vzpříčená poloha). Pro kolej č. 2 byl proveden pouze výpočet, a to pro teoretický rozchod koleje (statická poloha), protože v úseku v koleji je po celou délku úseku naměřená hodnota rozchodu větší než teoretická, z tohoto důvodu je zbytečné výpočet opakovat, dosáhli bychom stejného výsledku. Byl také proveden teoretický výpočet pro tažené soupravy, ve výpočtu se změní pouze orientace (znaménko) boční síly F_r/F_i .

Pro posouzení byla vybrána jako referenční hodnota řídící síla P_1 koleje č. 1 pro statickou polohu, s ní jsou pak ostatní výsledky porovnávány. Můžeme vidět,

že pro vzpříčenou polohu těže koleje se řídicí síla P_1 zmenšila, a to díky přerozdělení do řídicí síly a nepravé řídicí síly P_2 .

V tabulce 7.6 lze vidět, že rozdíl mezi kolejí č. 1 a č. 2 je kolem 2,12 % (rozdíl mezi taženou a tlačenu soupravou). Možná zajímavější porovnání je samotné koleje č. 2 mezi tlačenu a taženou soupravou, které je rozdíl řídicích sil 2,01 kN. Na rozdíl od tažené soupravy vyvolává sunutá souprava větší řídicí sílu o 4,02 %.

Tabulka 7.6 – Porovnání výsledků, úsek 1

Číslo úseku	Kolej	Řídicí síla P_1 [kN]	[%]	Rozdíl [%]	Rozdíl [kN]	Rozdíl [%]
1	A (1)	50,98	100	-	-	-
		50,82	99,69	-0,31		
	B (2)	52,06	102,12	2,12	2,01	4,02
		50,05	98,18	-1,82		

7.6.2 Úsek č. 2

Úsek č. 2 se nachází ve složeném směrovém oblouku, proto je výpočet rozdělen na dva výpočty pro každou kolej. Taktéž se úsek nachází ve výškovém oblouku, ale jelikož rozdělení výpočtu i pro jednotlivé sklony tratě s jednotným poloměrem oblouku by nevedl na úseky délky minimálně 50 m, nebylo další rozdělení provedeno.

Pro kolej č. 1 a úsek s poloměrem 275 m (v tabulce 7.12 označen jako úsek 2a) je jednotný sklon +1,63 ‰ (délka úseku 85 m), pro poloměr 302 m (v tabulce 7.13 označen jako úsek 2b) je uvažován jednotný sklon +2,42 ‰ (délka úseku 195 m), přestože na část tohoto úseku zasahuje sklon +1,63 ‰ (cca 28 m bez uvažování výškového oblouku) je tato délka s porovnáním celkové délky úseku zanedbávající.

Pro kolej č. 2 je rozdělení obdobné. Pro poloměr 271 m (označen jako úsek 2a) je uvažován sklon tratě +1,64 ‰ (délka úseku 96 m), pro poloměr 298 m (označen jako úsek 2b) sklon +2,44 ‰ (délka úseku 184 m), opět do úseku zasahuje v délce 27 m sklon z předchozího úseku a je zanedbán.

Tabulka 7.7 – Výpočet jízdních a tratových odporů pro úsek č. 2 – 1. část

Číslo úseku	Kolej	Rychlosti				Převýšení D [mm]	Měrný jízdní odpor σ_j [N/kN]	Poloměr oblouku R [m]
		V	V_{130}	V_{150}	V_k			
2	A (1)	70	75	-	90	130	3,27	275
								302
	B (2)	70	75	-	90	130	3,27	271
								298

Tabulka 7.8 – Výpočet jízdnicích a traťových odporů pro úsek č. 2 – 2. část

Číslo úseku	Průměrný sklon s ve směru jízdy [%o]	Projíždí vlak v úseku tunelem?	Měrný traťový odpor σ_t [N/kN]		
			Od směrového oblouku σ_R	Od sklonu trati σ_s	Od průjezdu tunelem σ_T
2	-1,63	ne	2,18	-1,63	0
	-2,42	ne	1,99	-2,42	0
	1,64	ne	2,21	1,64	0
	2,44	ne	2,01	2,44	0

Tabulka 7.9 – Výpočet jízdnicích a traťových odporů pro úsek č. 2 – 3. část

Číslo úseku	Jízdnicí odpor O_j [kN]	Traťový odpor O_t [kN]	Tažná/tlačná síla T_n/T_i [kN]	Úhel β [°]	Boční síla F_n/F_i [kN]	Boční síla A [kN]
2	12,35	2,09	14,43	87,24	0,70	-20,16
	12,35	-1,64	10,71	87,49	0,47	-16,20
	12,35	14,57	26,92	87,20	-1,32	-20,70
	12,35	16,84	29,18	87,45	-1,30	-16,74

Pro celý úsek 2 bylo provedeno 8 výpočtů. Pro kolej č. 1 a úsek 2a byly provedeny oba výpočty, jeden pro teoretickou hodnotu rozchodu koleje (vzpříčená poloha) i pro nejmenší naměřenou hodnotu rozchodu koleje (statická poloha). Pro ostatní úseky v tabulce 7.10 byly provedeny pouze výpočty pro teoretickou hodnotu rozchodu koleje, jelikož i tak je poloha vozidla v oblouku statická nebylo nutné provádět další výpočty.

V tabulce 7.11 jsou uvedeny teoretické výpočty pro tažené soupravy v koleji č. 2.

Tabulka 7.10 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 2

Číslo úseku	Poloha podvozku	Volný pás $2a$ [mm]	Potřebný volný pás $2a_p$ [mm]	Součinitel tření f [-]	Řídící síla P_1 [kN]	Střed otáčení x [m]	Nepravá řídící síla P_2 [kN]
2	Statická	12,1	11,7	0,216	48,94	2,538	-
	Vzpříčená	11,0	-	0,215	48,7	2,46	3,04
	Statická	11,0	11,0	0,213	46,38	2,581	-
	Statická	12,0	11,6	0,216	50,27	2,507	-
	Statická	11,0	10,9	0,213	47,58	2,552	-

Tabulka 7.11 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 2, kolej č. 2, tažená souprava

Číslo úseku	Poloha podvozku	Volný pás $2a$ [mm]	Potřebný volný pás $2a_p$ [mm]	Součinitel tření f [-]	Řídící síla P_1 [kN]	Střed otáčení x [m]	Nepravá řídící síla P_2 [kN]
2	Statická	12,0	11,9	0,217	49,01	2,540	-
	Statická	15,4	11,2	0,213	46,37	2,586	-
	Vzpříčená	11,0	-	0,213	46,31	2,561	0,96

Tabulka 7.12 ukazuje porovnání úseku 2a. Jako referenční hodnota pro porovnávání byla vybraná síla P_1 pro kolej č. 1 pro vozidlo ve statické poloze, protože skutečně v tomto úseku soupravy tuto polohu zaujímají. Lze vidět, že řídící síla je pro sunuté soupravy v koleji č. 2 o 2,72 % větší síla referenční. Lze si také povšimnout rozdílu v koleji č. 2 pro tažené a sunuté soupravy. Zde je rozdíl 2,57 %.

Tabulka 7.12 – Porovnání výsledků, úsek 2a

Číslo úseku	Kolej	Řídící síla P_1 [kN]	[%]	Rozdíl [%]	Rozdíl [kN]	Rozdíl [%]
2a	A (1)	48,94	100	-	-	-
		48,70	99,51	-0,49		
	B (2)	50,27	102,72	2,72	1,26	2,57
		49,01	97,49	0,14		

V tabulce 7.13 jsou porovnány výsledky pro úsek 2b. Rozdíl mezi taženou a sunutou soupravou je 2,59 %. Z porovnání samotné koleje č. 2 vychází, že teoreticky tažené soupravy mají o 2,61 % menší řídící sílu než soupravy sunuté.

Tabulka 7.13 – Porovnání výsledků, úsek 2b

Číslo úseku	Kolej	Řídící síla P_1 [kN]	[%]	Rozdíl [%]	Rozdíl [kN]	Rozdíl [%]
2b	A (1)	46,38	100	-	-	-
	B (2)	47,58	102,59	2,59	1,21	2,61
		46,37	99,98	-0,02		

7.6.3 Úsek č. 3

V úseku č. 3 se nachází směrový oblouk, který je součástí složeného směrového oblouku. Jelikož rozsah zvoleného úseku zasahuje pouze do oblouku s konstantní křivostí, byly provedeny výpočty jen pro jediný úsek bez dalšího dělení.

Tabulka 7.14 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 3 – 1. část

Číslo úseku	Kolej	Rychlosti				Převýšení D [mm]	Měrný jízdní odpor σ_j [N/kN]	Poloměr oblouku R [m]
		V	V_{130}	V_{150}	V_k			
3	A (1)	75	80	-	95	122	3,53	299
	B (2)	75	80	-	95	122	3,53	304

Tabulka 7.15 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 3 – 2. část

Číslo úseku	Průměrný sklon s ve směru jízdy [%o]	Projíždí vlak v úseku tunelem?	Měrný traťový odpor σ_t [N/kN]		
			Od směrového oblouku σ_R	Od sklonu trati σ_s	Od průjezdu tunelem σ_T
3	-1,82	ne	2,01	-1,82	0
	1,82	ne	1,97	1,82	0

Tabulka 7.16 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 3 – 3. část

Číslo úseku	Jízdní odpor σ_j [kN]	Traťový odpor σ_t [kN]	Tažná/tlačná síla T_T/T_L [kN]	Úhel β [°]	Boční síla F_T/F_L [kN]	Boční síla A [kN]
3	13,33	0,71	14,04	87,46	0,62	-23,58
	13,33	14,34	27,67	87,50	-1,21	-22,86

Výpočty pro tento úsek byly provedeny celkem 3, a to všechny pro teoretický rozchod koleje bez rozšíření (statické polohy). Opět byl proveden i výpočet pro teoreticky taženou soupravu v koleji č. 2, tabulka 7.18.

Tabulka 7.17 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 3

Číslo úseku	Poloha podvozku	Volný pás $2a$ [mm]	Potřebný volný pás $2a_p$ [mm]	Součinitel tření f [-]	Řídící síla P_1 [kN]	Střed otáčení x [m]	Nepravá řídící síla P_2 [kN]
3	Statická	11	10,3	0,208	49,31	2,484	-
	Statická	11	10	0,207	49,58	2,467	-

Tabulka 7.18 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 3, kolej č. 2, tažená souprava

Číslo úseku	Poloha podvozku	Volný pás $2a$ [mm]	Potřebný volný pás $2a_p$ [mm]	Součinitel tření f [-]	Řídící síla P_1 [kN]	Střed otáčení x [m]	Nepravá řídící síla P_2 [kN]
3	Statická	11	10,3	0,208	48,54	2,5	-

Při porovnání výsledků řídící síly mezi kolejemi se může zdát, že nejsou moc rozdílné, ovšem je potřeba brát vždy v úvahu i rozdílné poloměry směrových oblouků. Poloměry v tomto úseku mají již vyšší hodnotu než v jiných úsecích, kolej

Opotřebení kolejnic v úsecích se směrovými oblouky malého poloměru

klade vozidlu menší odpor v zakřivení, proto nemají řídicí síly mezi sebou velký rozdíl. Lze ovšem znovu sledovat rozdíl mezi sunutou a taženou soupravou v samotné koleji č. 2, kde je rozdíl řídicích sil 2,14 %.

Tabulka 7.19 – Porovnání výsledků, úsek 3

Číslo úseku	Kolej	Řídicí síla P_1 [kN]	[%]	Rozdíl [%]	Rozdíl [kN]	Rozdíl [%]
3	A (1)	49,31	100	-	-	-
	B (2)	49,58	100,55	0,55	1,04	2,14
		48,54	98,44	-1,56		

7.6.4 Úsek č. 4

Úsek č. 4 se nachází ve výškovém oblouku. Výškový lom je ovšem jen krátkou vzdáleností za začátkem úseku, proto je v celém úseku uvažován pouze jediný sklon koleje.

Tabulka 7.20 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 4 – 1. část

Číslo úseku	Kolej	Rychlosti				Převýšení D [mm]	Měrný jízdní odpor σ_j [N/kN]	Poloměr oblouku R [m]
		V	V_{130}	V_{150}	V_k			
4	A (1)	75	80	-	95	148	3,53	279
	B (2)	75	80	-	95	143	3,53	275

Tabulka 7.21 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 4 – 2. část

Číslo úseku	Průměrný sklon s ve směru jízdy [%]	Projíždí vlak v úseku tunelem?	Měrný traťový odpor σ_t [N/kN]		
			Od směrového oblouku σ_R	Od sklonu trati σ_s	Od průjezdu tunelem σ_T
4	-1,19	ne	2,15	-1,19	0
	1,35	ne	2,18	1,35	0

Tabulka 7.22 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 4 – 3. část

Číslo úseku	Jízdní odpor O_j [kN]	Traťový odpor O_t [kN]	Tažná/tlačná síla T_T/T_L [kN]	Úhel β [°]	Boční síla F_T/F_L [kN]	Boční síla A [kN]
4	13,33	3,63	16,96	87,28	0,81	-22,14
	13,33	13,35	26,68	87,24	-1,28	-23,76

Pro tento úsek bylo provedeno celkem 5 výpočtů. Pro kolej č. 1 jsou v tabulce 7.23 oba výpočty, teoretický rozchod (vzpříčená poloha) a nejmenší

naměřený rozchod (statická poloha). Opět byl proveden i výpočet pro teoreticky taženou soupravu v koleji č. 2, tabulce 7.24, zde byly provedeny také oba výpočty pro teoretický rozchod (vzpříčená poloha) a nejmenší naměřený rozchod (statická poloha).

Tabulka 7.23 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 4

Číslo úseku	Poloha podvozku	Volný pás $2a$ [mm]	Potřebný volný pás $2a_p$ [mm]	Součinitel tření f [-]	Řídící síla P_1 [kN]	Střed otáčení x [m]	Nepravá řídící síla P_2 [kN]
4	Statická	16,8	11,3	0,213	49,25	2,511	-
	Vzpříčená	11	-	0,212	49,14	2,478	1,26
	Statická	11	11	0,213	51,08	2,463	-

Tabulka 7.24 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 4, kolej č. 2, tažená souprava

Číslo úseku	Poloha podvozku	Volný pás $2a$ [mm]	Potřebný volný pás $2a_p$ [mm]	Součinitel tření f [-]	Řídící síla P_1 [kN]	Střed otáčení x [m]	Nepravá řídící síla P_2 [kN]
4	Vzpříčená	11	-	0,212	49,77	2,46	1,39
	Statická	16,2	11,3	0,213	49,9	2,497	-

Referenční hodnota pro porovnání výsledků řídící síly byla opět vybrána hodnota odpovídající statické poloze vozidla. Rozdíl mezi kolejemi je 3,72 %. Rozdíl mezi taženou a sunutou soupravou na koleji č. 2 je 2,36 %. Pro porovnání teoreticky tažené soupravy v koleji č. 2 byly vybrána opět hodnota odpovídající statické poloze, neboť nejvíce odpovídá skutečnosti.

Tabulka 7.25 – Porovnání výsledků, úsek 4

Číslo úseku	Kolej	Řídící síla P_1 [kN]	[%]	Rozdíl [%]	Rozdíl [kN]	Rozdíl [%]
4	A (1)	49,25	100	-	-	-
		49,14	99,78	-0,22		
	B (2)	51,08	103,72	3,72	1,18	2,36
		49,90	101,32	1,32		

7.6.5 Úsek č. 5

V úseku č. 5 se nachází výškový lom, proto se úsek dále dělí na více úseků. Dělení se ovšem týká jen koleje č. 2, neboť v koleji č. 1 by jeden z úseků měřil pouze 18 m což je pro výpočet zcela nedostačující. V koleji č. 2 již úsek s jiným sklonem koleje měří 50 m, což je hraniční délka pro uvažování samostatného úseku ve výpočtu. V dalším textu jsou jednotlivé úseky pro kolej č. 2 označeny jako 5a a 5b.

Tabulka 7.26 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 5 – 1. část

Číslo úseku	Kolej	Rychlosti				Převýšení D [mm]	Měrný jízdní odpor σ_j [N/kN]	Poloměr oblouku R [m]
		V	V_{130}	V_{150}	V_k			
5	A (1)	70	75	-	90	115	3,02	280
	B (2)	70	-	-	90	124	3,02	277

Tabulka 7.27 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 5 – 2. část

Číslo úseku	Označení	Průměrný sklon s ve směru jízdy [%o]	Projíždí vlak v úseku tunelem?	Měrný traťový odpor σ_t [N/kN]		
				Od směrového oblouku σ_R	Od sklonu trati σ_s	Od průjezdu tunelem σ_T
5	-	-4,77	ne	2,14	-4,77	0
	5a	5,45	ne	2,17	5,45	0
	5b	4,52	ne	2,17	4,52	0

Tabulka 7.28 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 5 – 3. část

Číslo úseku	Jízdní odpor σ_j [kN]	Traťový odpor σ_t [kN]	Tažná/tlačná síla T_T/T_L [kN]	Úhel β [°]	Boční síla F_T/F_L [kN]	Boční síla A [kN]
5	11,43	-9,94	1,49	87,29	0,07	-16,56
	11,43	28,79	40,22	87,26	-1,92	-15,3
	11,43	25,28	36,70	87,26	-1,75	-15,3

V tomto úseku bylo provedeno celkem deset základních výpočtů, protože při každém uvažování teoretického rozchodu koleje je vozidlo ve zpříčené poloze, naproti tomu při počítání s nejmenší naměřenou hodnotou rozchodu jsou všechny výpočty ve statické poloze. Soupravy Railjet využívají rychlost V_{130} , v koleji č. 2 ovšem tato rychlost není navržena, proto bylo ve výpočtu uvažováno s rychlosti V i pro kolej č. 1, aby mohly být výsledky mezi sebou porovnány (výsledky pro rychlost V_{130} pro kolej č. 1 jsou v tabulce 7.32).

Tabulka 7.29 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 5

Číslo úseku	Poloha podvozku	Volný pás $2a$ [mm]	Potřebný volný pás $2a_p$ [mm]	Součinitel tření f [-]	Řídící síla P_1 [kN]	Střed otáčení x [m]	Nepravá řídící síla P_2 [kN]
5	Statická	16,2	11,9	0,219	47,88	2,578	-
	Vzpříčená	11	-	0,217	47,63	2,482	3,79
	Statická	19,5	11,9	0,219	48,32	2,569	-
	Vzpříčená	11	-	0,217	48,04	2,469	3,97
	Statická	20,1	11,9	0,219	48,23	2,571	-
	Vzpříčená	11	-	0,217	47,96	2,469	4,05

Tabulka 7.30 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 5, kolej č. 2, tažená souprava

Číslo úseku	Poloha podvozku	Volný pás $2a$ [mm]	Potřebný volný pás $2a_p$ [mm]	Součinitel tření f [-]	Řídící síla P_1 [kN]	Střed otáčení x [m]	Nepravá řídící síla P_2 [kN]
5	Statická	19,5	12,3	0,22	46,44	2,616	-
	Vzpříčená	11	-	0,217	46,12	2,469	5,89
	Statická	20,1	12,3	0,22	46,53	2,614	-
	Vzpříčená	11	-	0,217	46,21	2,469	5,8

Porovnány byly mezi sebou výpočty pro kolej č. 1 a kolej č. 2 pro úsek 5b, jelikož jsou si tyto dva úseky parametry podobnější. Rozdíly mezi kolejemi nejsou opět příliš velké, větší rozdíly lze pozorovat na porovnání koleje č. 2 pro taženou a sunutou soupravu, kde je rozdíl 3,65 %.

Tabulka 7.31 – Porovnání výsledků, úsek 5

Číslo úseku	Kolej	Řídící síla P_1 [kN]	[%]	Rozdíl [%]	Rozdíl [kN]	Rozdíl [%]
5	A (1)	47,88	100	-	-	-
		47,63	99,48	-0,52		
	B (2)	48,23	100,73	0,73	1,70	3,65
		46,53	97,18	-2,82		

Tabulka 7.32 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 5, kolej č. 1, V_{130}

Číslo úseku	Poloha podvozku	Volný pás $2a$ [mm]	Potřebný volný pás $2a_p$ [mm]	Součinitel tření f [-]	Řídící síla P_1 [kN]	Střed otáčení x [m]	Nepravá řídící síla P_2 [kN]
5	Statická	16,2	11,2	0,215	50,01	2,505	-
	Vzpříčená	11	-	0,214	49,93	2,482	0,87

7.6.6 Úsek č. 6

Poslední úsek se nachází ve směrovém oblouku s konstantní křivostí a konstantním sklonem koleje.

Tabulka 7.33 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 6 – 1. část

Číslo úseku	Kolej	Rychlosti				Převýšení D [mm]	Měrný jízdní odpor σ_j [N/kN]	Poloměr oblouku R [m]
		V	V_{130}	V_{150}	V_k			
6	A (1)	70	75	-	90	120	3,27	265
	B (2)	70	-	-	85	128	3,02	271

Tabulka 7.34 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 6 – 2. část

Číslo úseku	Průměrný sklon s ve směru jízdy [%]	Projíždí vlak v úseku tunelem?	Měrný traťový odpor σ_t [N/kN]		
			Od směrového oblouku σ_R	Od sklonu trati σ_s	Od průjezdu tunelem σ_T
6	-4,62	ne	2,26	-4,62	0
	4,52	ne	2,21	4,52	0

Tabulka 7.35 – Výpočet jízdních a traťových odporů pro úsek č. 6 – 3. část

Číslo úseku	Jízdní odpor σ_j [kN]	Taťový odpor σ_t [kN]	Tažná/tlačná síla T_T/T_I [kN]	Úhel β [°]	Boční síla F_T/F_I [kN]	Boční síla A [kN]
6	12,35	-8,91	3,44	87,14	0,17	17,82
	11,43	25,46	36,89	87,20	-1,80	15,48

V úseku č. 6 je stejný problém s rychlostí jako v úseku č. 5, proto byly výpočty počítány s rychlostí V a pro kolej č. 1 je v tabulce 7.39 uveden výsledek pro rychlost V_{130} . Celkem bylo provedeno 6 výpočtů pro rychlost V s teoretickou hodnotou rozchodu (vzpříčená poloha) a s minimální neměřenou hodnotou (statická poloha).

Tabulka 7.36 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 6

Číslo úseku	Poloha podvozku	Volný pás $2a$ [mm]	Potřebný volný pás $2a_p$ [mm]	Součinitel tření f [-]	Řídící síla P_1 [kN]	Střed otáčení x [m]	Nepravá řídící síla P_2 [kN]
6	Statická	15,5	12,4	0,221	48,84	2,565	-
	Vzpříčená	12	-	0,22	49,24	2,522	1,25
	Statická	16,9	12,2	0,22	48,5	2,569	-
	Vzpříčená	12	-	0,22	48,48	2,551	0,74

Tabulka 7.37 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 6, kolej č. 2, tažená souprava

Číslo úseku	Poloha podvozku	Volný pás $2a$ [mm]	Potřebný volný pás $2a_p$ [mm]	Součinitel tření f [-]	Řídící síla P_1 [kN]	Střed otáčení x [m]	Nepravá řídící síla P_2 [kN]
6	Statická	16,9	12,6	0,22	46,73	2,613	-
	Vzpříčená	12	-	0,22	46,67	2,551	2,54

Porovnání výsledků v tabulce 7.38 se od jiných úseku liší, protože zde lze poprvé vidět, že řídící síla je větší v koleji č. 1 pro tažené soupravy. Tento jev může být způsobený menším poloměrem v koleji č. 1, čili větším odporem v křivosti koleje a zejména ve velikosti boční síly A , její velikost je závislá na velikosti navrženého převýšení D . Opět lze vidět na porovnání koleje č. 2 mezi sunutou a taženou soupravou je rozdíl 3,79 %.

Tabulka 7.38 – Porovnání výsledků, úsek 6

Číslo úseku	Kolej	Řídící síla P_1 [kN]	[%]	Rozdíl [%]	Rozdíl [kN]	Rozdíl [%]
6	A (1)	48,84	100	-	-	-
		49,24	100,82	0,82		
	B (2)	48,50	99,30	-0,70	1,77	3,79
		46,73	95,68	-4,32		

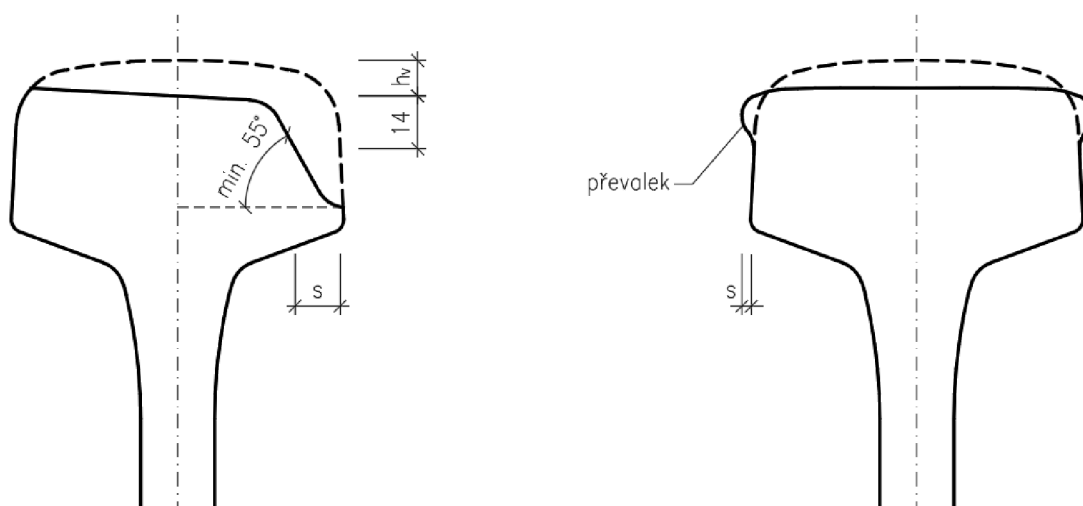
Tabulka 7.39 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 6, kolej č. 1, V_{130}

Číslo úseku	Poloha podvozku	Volný pás $2a$ [mm]	Potřebný volný pás $2a_p$ [mm]	Součinitel tření f [-]	Řídící síla P_1 [kN]	Střed otáčení x [m]	Nepravá řídící síla P_2 [kN]
6	Statická	12	11,7	0,217	51,08	2,49	-

8 Ojetí kolejnic

8.1 Teorie

Každá kolejnice se časem opotřebovává, hlavními faktory jsou ojíždění a koroze. Ojížděním se opotřebovává hlava kolejnice neboli pojížděná hrana. Tvar ojetí je závislý na geometrickém a konstrukčním uspořádání koleje. Ojetí můžeme rozlišit na svislé a boční. Boční ojetí je typické pro směrové oblouky. Pokud směrovým obloukem projíždí těžké soupravy (nákladní vlaky) s přebytkem převýšení dochází na vnitřní kolejnici k roztlačování hlavy kolejnice a mohou se vytvořit převalky, viz obr. 8.1. Pokud směrovým obloukem projíždí soupravy s nedostatkem převýšení, projeví se větší boční ojetí na vnější kolejnici a větší svislé ojetí na vnitřní kolejnici. Informace byly získány z literatury [11].



Obr. 8.1 – Příklad ojetí hlavy kolejnic

Ojetí závisí na intenzitě pojíždění kolejnic, na geometrických parametrech koleje, především na poloměru směrového oblouku, obecně můžeme říct, že čím je poloměr menší, tím je ojetí větší. Další důležitým faktorem pro ojíždění je materiál, resp. tvrdost materiálu kolejnic a kol železničního vozidla. Může se sledovat poměr tvrdosti kol a kolejnic, za optimální poměr se považuje 1,2. Základními materiály kolejnic používané u nás na většině tratí jsou perlitické oceli, nejběžněji ocel R 260. Používá se i ocel R350 HT, která má dvojnásobně větší otěruvzdornost než R 260, používá se tedy pro hodně zatížené úseky.

Svislé a boční ojetí můžeme sloučit do tzv. srovnaného ojetí přepočtením podle následujícího vzorce:

$$h = h_v + 0,5 * s \quad [8.1]$$

kde h je srovnané ojetí, h_v je svislé ojetí měření v ose kolejnice a s je boční ojetí měřené 14 mm pod úrovní temene kolejnice. Vypočítaná hodnota se poté zaokrouhlí na celé milimetry.

8.2 Měření ojetí kolejnic

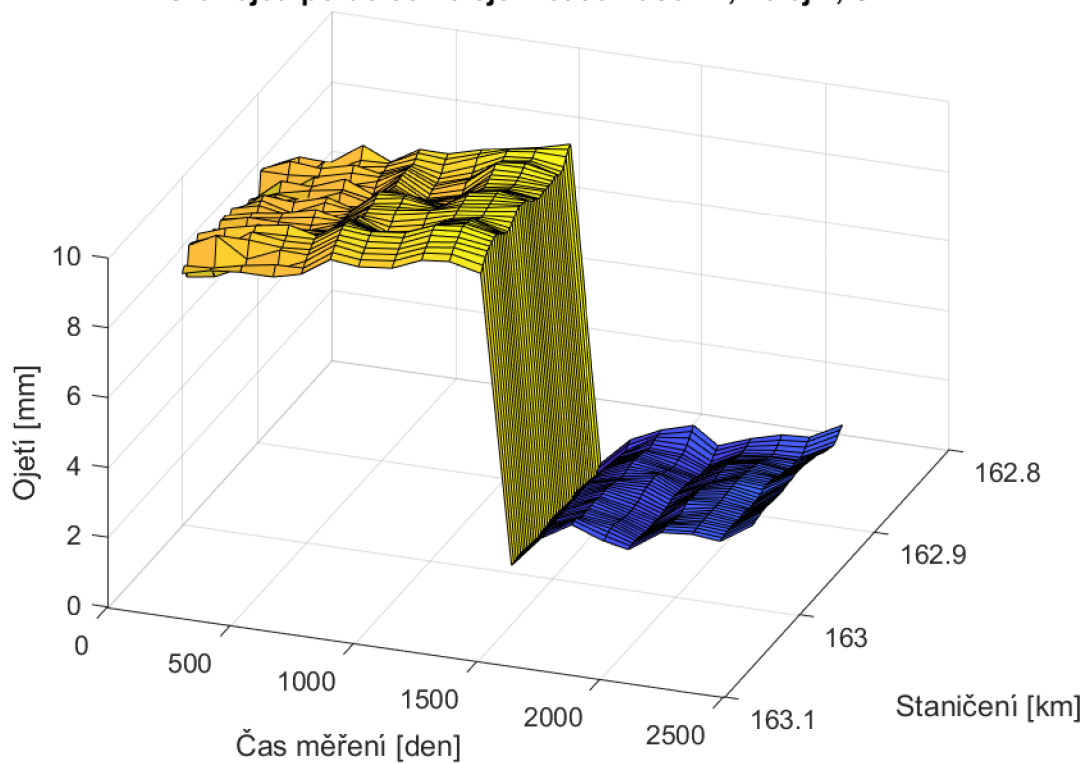
Ojetí se měří měřícím vozem nebo ručními měřidly. Měřící vůz si pomocí laseru naskenuje kolejnici, z rozměru mezi snímanými body určí, o jakou kolejnici se jedná. Porovnáním odchylek od předepsaného profilu neopotřebované kolejnice určí velikost svislého a bočního ojetí. Tato detekce probíhá zcela automaticky, není tedy nutné např. profil kolejnice ručně přepínat. Měřící vůz snímá profily v minimálním kroku 1 m. Výsledky jsou zaznamenávány v milimetrech na 2 desetinná místa, přesnost měření je ovšem 1 mm. Měřící vůz neměří a nehodnotí kolejnice v místě přídržnice a všude tam, kde je zastíněná stojina kolejnice, např. v bezprostřední blízkosti překážky (absorbéry hluku apod.).

9 Ojetí kolejnic – naměřená data

V této kapitole budou prezentována naměřená data ojetí kolejnic. Tato data jsou výsledkem měření měřícího vozu z obou kolejí ve vybraných úsecích. Z těchto dat byly vypracovány 3D grafy, kdy na ose x je zaznamenaný čas ve dnech, na ose y je staničení v kilometrech a za ose z jsou jednotlivá ojetí v milimetrech, viz obr. 9.1. Kladné ojetí znamená u bočního i svislého ojetí úbytek hmoty kolejnice, zatímco záporné hodnoty znamenají u bočního ojetí přírůstek hmoty, např. vznik převalků. Naměřená data pomocí měřícího vozu, mohou být zatížena chybou až 1 mm, proto je nutné k této skutečnosti přihlížet.

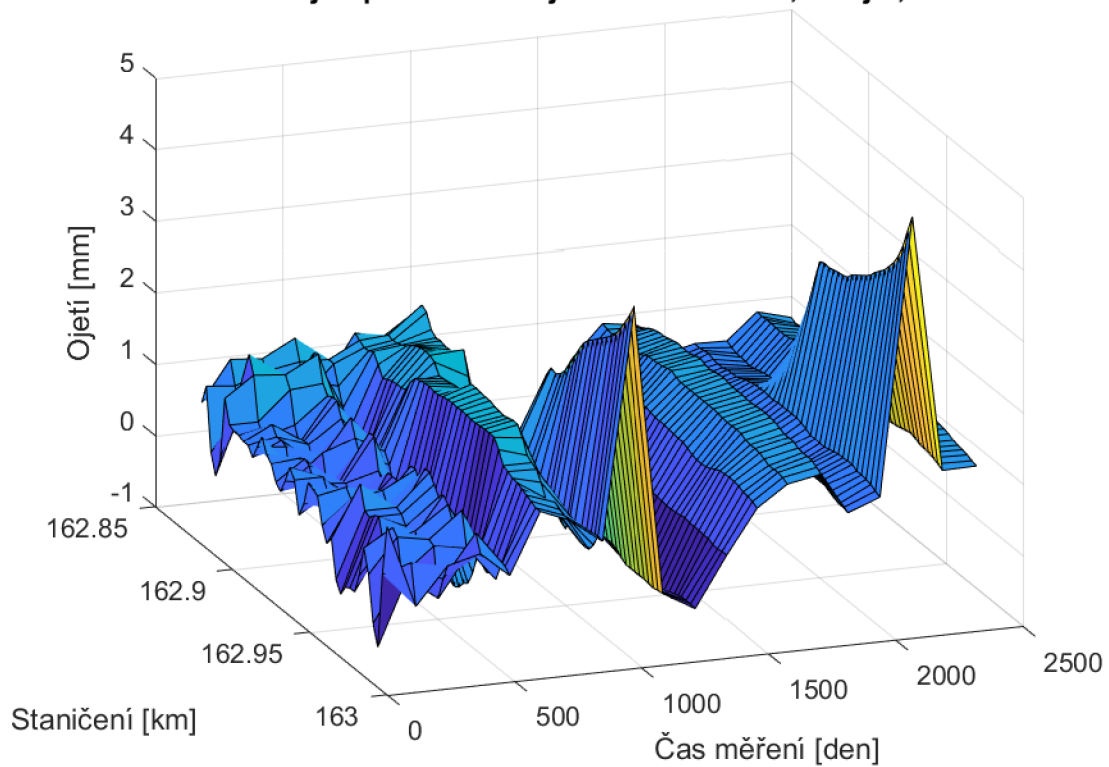
Na obr. 9.1 můžeme vidět 3D graf svislého ojetí levé kolejnice (označeno zkratkou SL) koleje č. 2 v úseku č. 1. Z tohoto grafu můžeme na první pohled určit, mezi kterými měřeními proběhla výměna kolejnic v úseku, například v úseku č. 1 proběhla výměna kolejnic v druhé koleji v roce 2017 mezi měřeními 21. 3. 2017 a 27. 7. 2017. V modré části grafu lze vidět mírná fluktuace hodnot ojetí, tzn. mírné zvlnění grafu. Ojetí se v některých měřeních zmenšuje, což není u svislého ojetí možné bez výměny kolejnic. Tato chyba může být způsobena špatnou detekcí kolejnice, v kolejovém roštu mohou být nečistoty, které způsobí například špatnou detekci kolejnice, tím pádem i ojetí samotného. Špatná měření by měla být z dalšího hodnocení vyřazena, ovšem je nutné přihlídnout k přesnosti. Pokud se hodnoty výrazně neliší od ostatních, jsou v hodnocení ponechána, ostatní statisticky vychýlená měření jsou vyřazena.

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 1, kolej 2, SL



Obr. 9.1 – 3D graf svislého levého ojetí koleje č. 2 v úseku 1

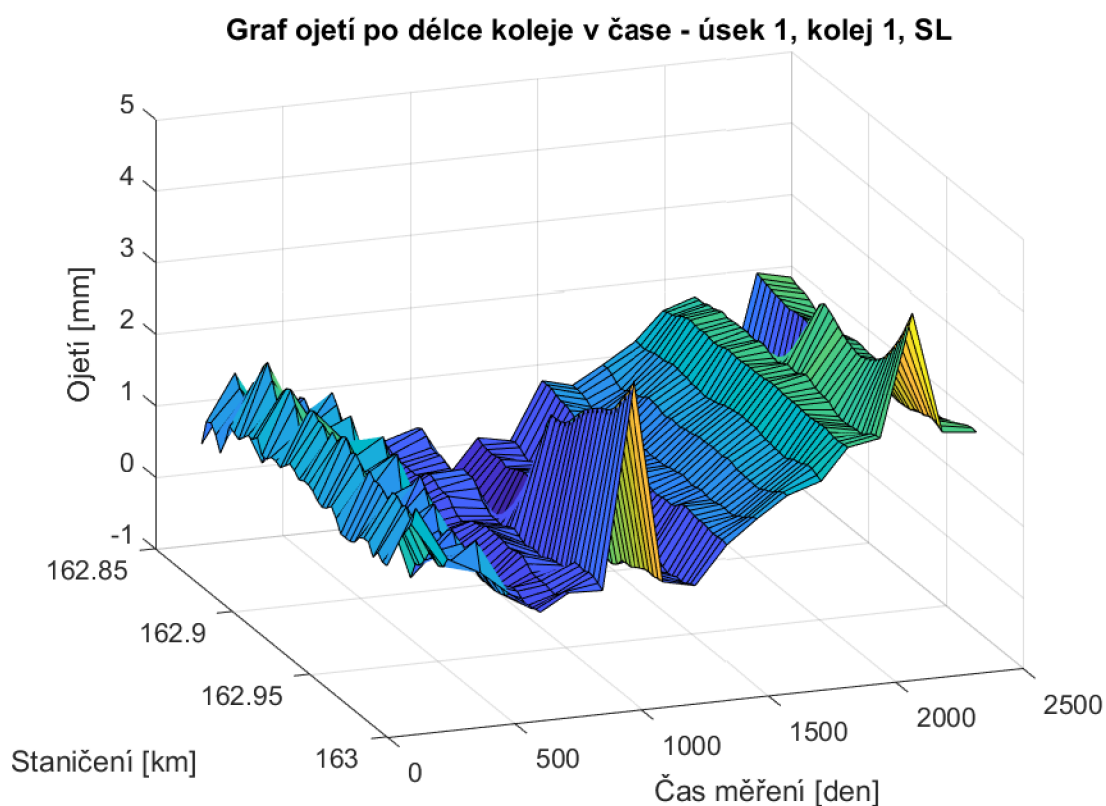
Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 1, kolej 1, SP



Obr. 9.2 – 3D graf svislého pravého ojetí koleje č. 1 v úseku 1

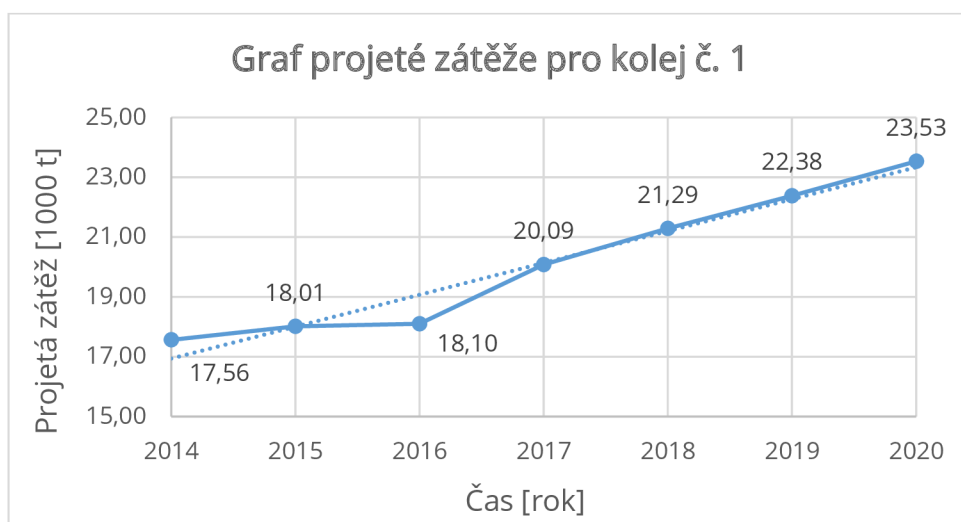
Na obr. 9.2 je 3D graf průběhu svislého ojetí pravé kolejnice (SP) koleje č. 1 v úseku č. 1. V tomto grafu lze vidět dvě měření se značně vychýlenými hodnotami. Tato měření jsou také označena jako statisticky vychýlená a jsou z dalších grafů a vyhodnocení vyřazena. Tak velké vychýlení lze pozorovat i na dalších grafech ze stejné koleje ve stejném úseku na obr. 9.3, který znázorňuje průběh svislého ojetí na levé kolejnici (SL) téhož úseku a koleje.

Ze všech tří obrázků 9.1–9.3 (také z většiny ostatních 3D grafů v příloze) si lze všimnout poněkud nepravidelných měření od začátku poskytnutých dat do roku 2015. Je možné tedy usuzovat, že mezi měřeními v dubnu a v červenci roku 2015 byla vyměněna technologie měřícího vozu a také konstatovat, že změna vedla ke kvalitnějším záznamům dat z koleje.

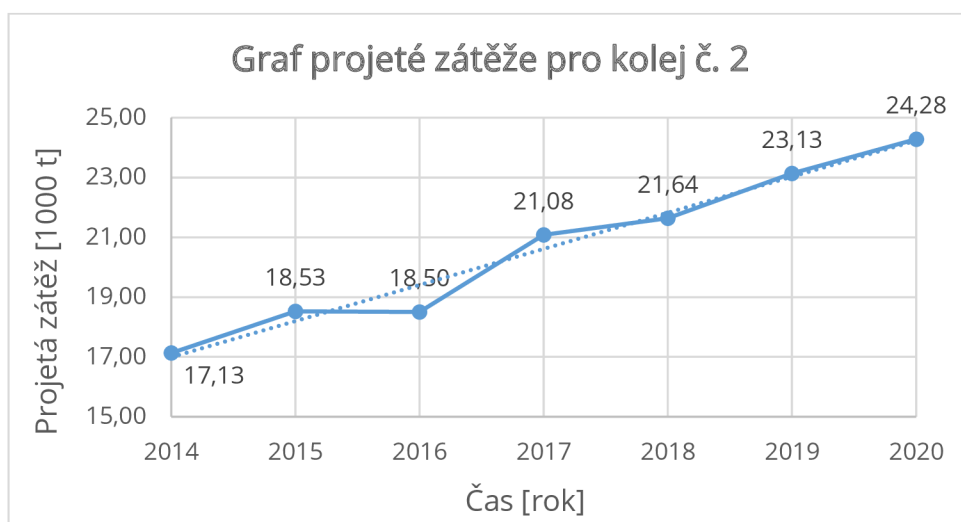


Obr. 9.3 – 3D graf svislého levého ojetí koleje č. 1 v úseku 1

3D grafy jsou dobrým pomocníkem při hledání očividně vychýlených měření, ale pro samotné hodnocení nejsou dobrým nástrojem, proto byla jednotlivá měření zprůměrována a byly vytvořeny 2D grafy. Na ose x ovšem není časová linka, ale projetá zátěž. Pro každý rok se zaznamenává celková projetá zátěž každé koleje. Tato zátěž byla lineárně rozdělena mezi jednotlivá měření. Celková projetá zátěž pro rok 2020 není zatím známa, ovšem každý rok lze sledovat trend přírůstu zátěže, proto byla určena jako zátěž z roku 2019 plus 1 150 tun jako přírůstek, grafy pro jednotlivé koleje jsou vidět na obr. 9.4 a 9.5 i s hodnotami zátěže pro jednotlivé roky.



Obr. 9.4 – Graf projeté zátěže pro kolej č. 1



Obr. 9.5 – Graf projeté zátěže pro kolej č. 2

Grafy jsou stejně jako výpočty z předchozí kapitoly rozděleny také podle rozdílných poloměrů ve složeném oblouku nebo podle rozdílných sklonu, aby mohly být později porovnávány. Pro každý z grafů byla provedena regresní statistika, pro zjištění směrnice spojnice trendů, koeficient korelace, koeficient determinace a pro posouzení statistické významnosti.

9.1 Regresní statistika

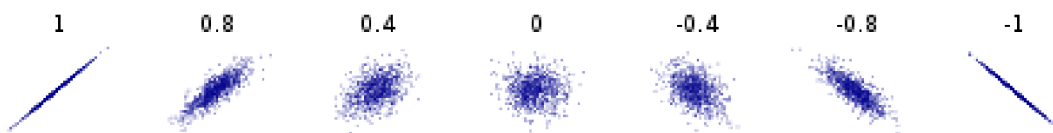
Směrnice přímky spojnice trendů slouží jako ukazatel rychlosti ojíždění na projeté zátěži. Čím přímka více roste, tím více se dané ojetí zvětšuje. Přímka ve směrníkovém tvaru při použití lineární regrese se zapisuje podle vzorce:

$$y = kx + q \quad [9.1]$$

kde x znázorňuje nezávislé veličiny, v našem případě projetou zátěž, y je závislá veličina, v našem případě velikost ojetí kolejnice, q je konstanta a k je směrnice přímky.

Směrnice přímky k definuje, jak moc je přímka odchýlená od kladné poloosy x . Pokud nabývá směrnice kladné hodnoty, znamená to, že přímka je stoupající, pokud záporné, přímka klesá a čím je hodnota čísla k vyšší, přímka má větší sklon. Unikátní případ je, když se k rovná nule, znamená to, že přímka není ani klesající ani stoupající, je rovnoběžná s osou x . Informace byly získány z literatury [12].

Korelační koeficient R ukazuje vztah mezi nezávislou a závislou veličinou. Může nabývat hodnot od -1 do $+1$. Hodnota -1 znamená, že veličiny mají zcela nepřímou závislost, čím více se zvětší hodnoty v jedné skupině, tím více se zmenší hodnoty v druhé skupině. Naopak hodnota korelačního koeficientu $+1$ značí zcela přímou závislost jedné skupině na druhé. Při hodnotě 0 může koeficient značit, že mezi veličinami není lineární závislost, to ovšem neznamená, že mezi veličinami není žádná závislost. Na obr. 9.6 lze vidět přibližné rozdělení bodů při určité hodnotě R .



Obr. 9.6 – Vyjádření hodnot korelačních koeficientů, zdroj [17]

Koeficient determinace R^2 vypovídá, jak přesný je model, v našem případě rovnice přímky spojnice trendů, který pro výpočet používáme. R^2 může nabývat hodnot od 0 do $+1$. Hodnota $+1$ značí dokonalou predikci výpočtu hodnot závislé veličiny a naopak 0 znamená, že model nedokáže hodnoty predikovat, je tedy pro výpočet neúčinný.

Statistická významnost F určuje, zda jsou výsledky regresní statistiky průkazné či nikoliv. To lze posoudit jednoduše, pokud je významnost F menší, než $0,05$ lze výsledky považovat za statisticky významné.

Další možnou kontrolou statistiky je výpočet tzv. reziduí. Rezidua se počítají jako rozdíl hodnot závislé veličiny y , které máme k dispozici a hodnot, které jsou vypočítány z určené rovnice pro směrnici přímky. Dostaneme tedy chybu, které se dopouštíme při převedení souboru dat na lineární přímku. Měřící vůz má chybu svého měření ojetí 1 mm, pokud tedy budou rezidua menší než 1 mm, lze předpokládat, že lineární regrese dobře postihuje zkoumaný jev. Informace byly získány z literatury [12].

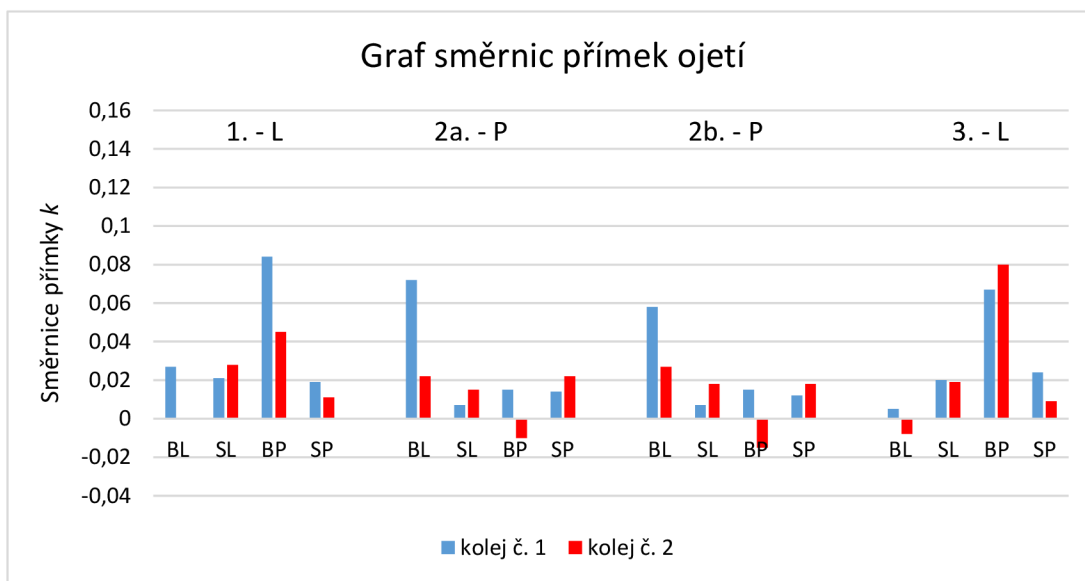
9.2 Výsledky

V následujících kapitolách bude zobrazeno vyhodnocení ojetí jednotlivých úseků. Každý úsek je rozdělený na kolej č. 1 a č. 2, dále se každá kolej rozděluje na ojetí obou svých kolejnicových pásů a na svislé a boční ojetí. Jsou používány tyto zkratky:

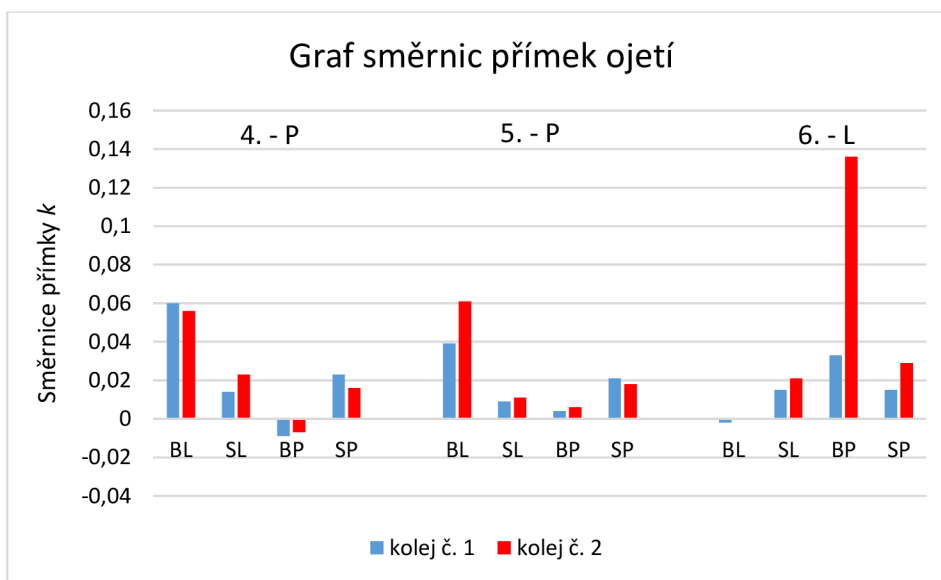
Opotřebení kolejnic v úsecích se směrovými oblouky malého poloměru

- SL svislé ojetí levé kolejnice
- BL boční ojetí levé kolejnice
- SP svislé ojetí pravé kolejnice
- BP boční ojetí pravé kolejnice

V grafech na obr. 9.7 a 9.8 jsou zobrazeny souhrnné výsledky směrnice pro jednotlivé úseky a koleje. Nad každou sérií sloupců je napsáno číslo úseku a smysl oblouku, L – levostranný a P – pravostranný. Podrobnější výsledky jednotlivých úseků jsou zobrazeny v kapitolách 9.2.1-9.2.6.



Obr. 9.7 – Graf směrnic přímků ojetí pro úseky č. 1, 2a, 2b a 3



Obr. 9.8 – Graf směrnic přímků ojetí pro úseky č. 4, 5 a 6

9.2.1 Úsek č. 1

9.2.1.1 Kolej č. 1

Tabulka 9.1 – Základní údaje o úseku č. 1, kolej 1 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
1	162,880 - 163,000	120	A (1)	261	L	123

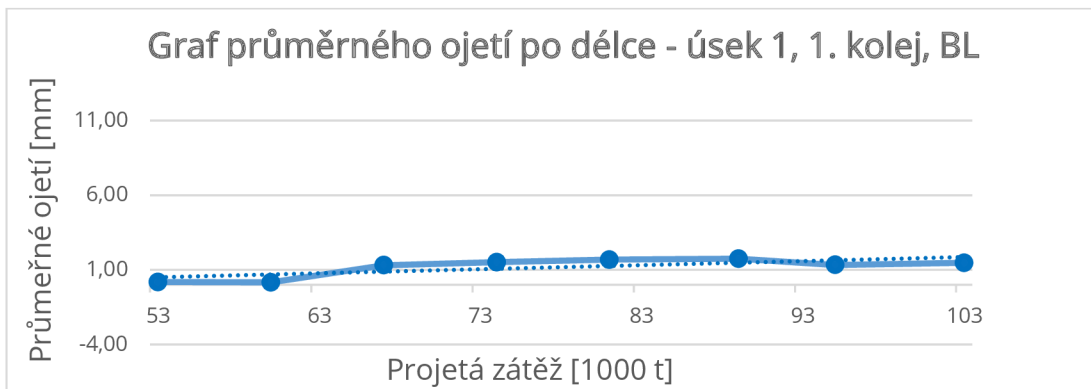
Tabulka 9.2 – Základní údaje o úseku č. 1, kolej 1 – 2. část

Sklon s ve směru staničení [‰]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+3,85	70	75	-	90	60E2	R350 HT	2015

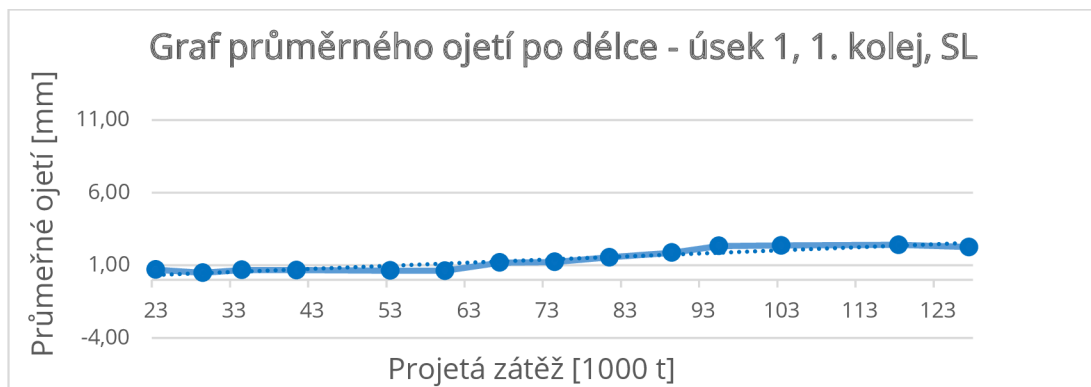
Tabulka 9.3 – Výsledky regresní statistiky, úsek 1, kolej č. 1

Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = 0,027x - 0,968$	0,743	0,552	0,03471	-0,533
SL	$y = 0,021x - 0,173$	0,931	0,867	1,32E-06	-0,501
BP	$y = 0,084x - 1,826$	0,963	0,928	3,27E-08	-1,163
SP	$y = 0,019x - 0,712$	0,745	0,555	0,01344	0,665

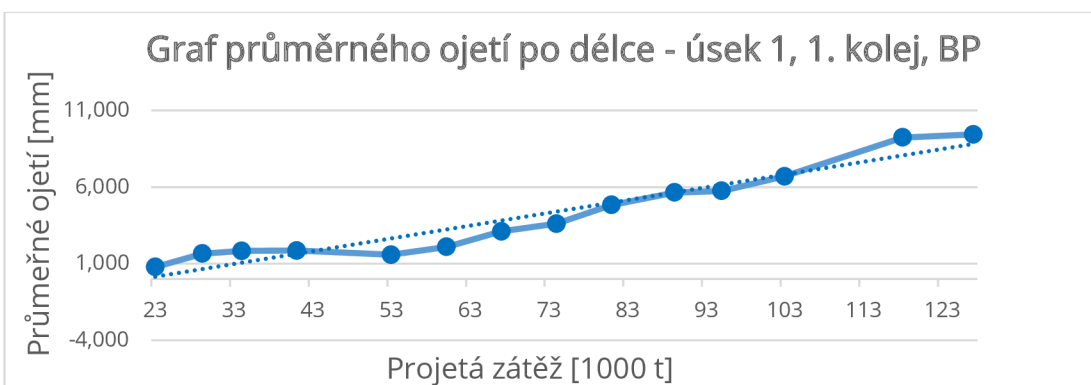
Z tabulky 9.3 vyplývá, že všechny přímky spojnic trendů mají stoupající smysl, to znamená, že ojetí se se zvyšující se zátěží zvětšuje. Ve sloupečku „Největší rezidua“ jsou největší odchylky naměřených dat od vytvořené lineární aproximace. U bočního pravého ojetí přesahuje hodnota rezidua přes 1 mm, to je ovšem překročeno jen v jediné hodnotě, proto lze stále předpokládat, že aproximace lineární přímkou je dostačující.



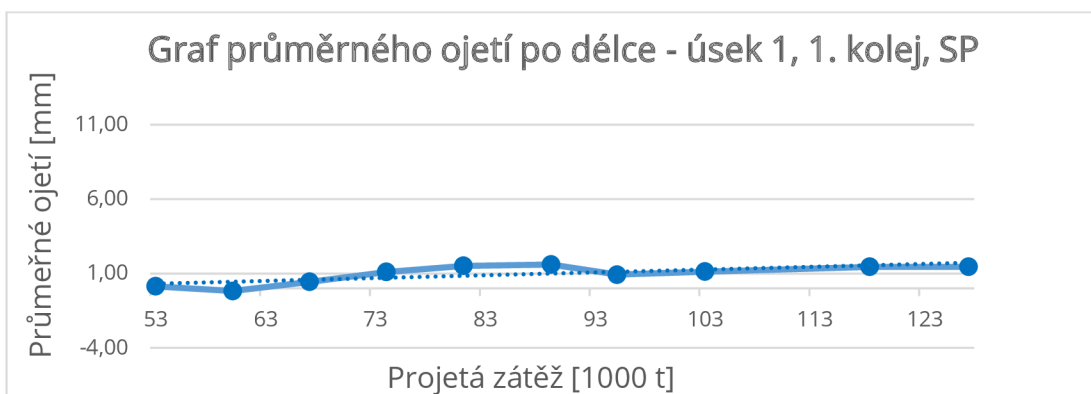
Obr. 9.9 – Graf průměrného ojetí – úsek 1, kolej č. 1, BL



Obr. 9.10 – Graf průměrného ojetí – úsek 1, kolej č. 1, SL



Obr. 9.11 – Graf průměrného ojetí – úsek 1, kolej č. 1, BP



Obr. 9.12 – Graf průměrného ojetí – úsek 1, kolej č. 1, SP

9.2.1.2 Kolej č. 2

Tabulka 9.4 – Základní údaje o úseku č. 1, kolej 2 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
1	162,880 - 163,000	120	B (2)	265	L	121

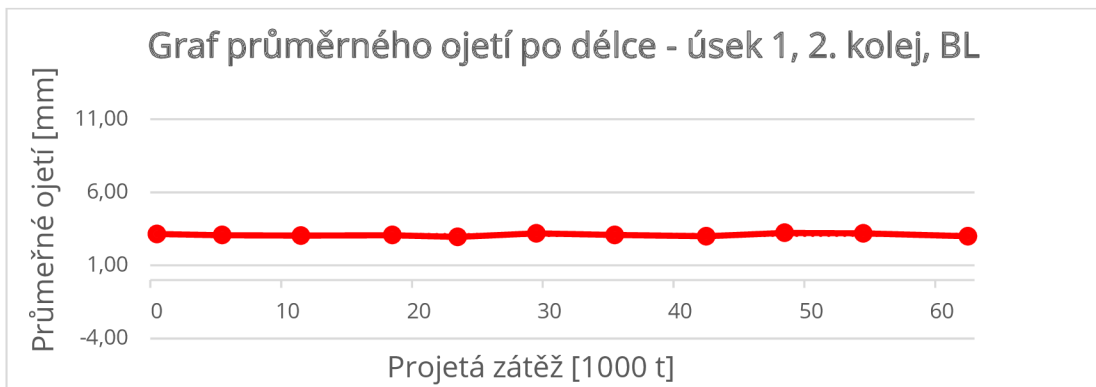
Tabulka 9.5 – Základní údaje o úseku č. 1, kolej 2 – 2. část

Sklon s ve směru staničení [‰]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+3,79	70	75	-	90	60E1	R 260	2017

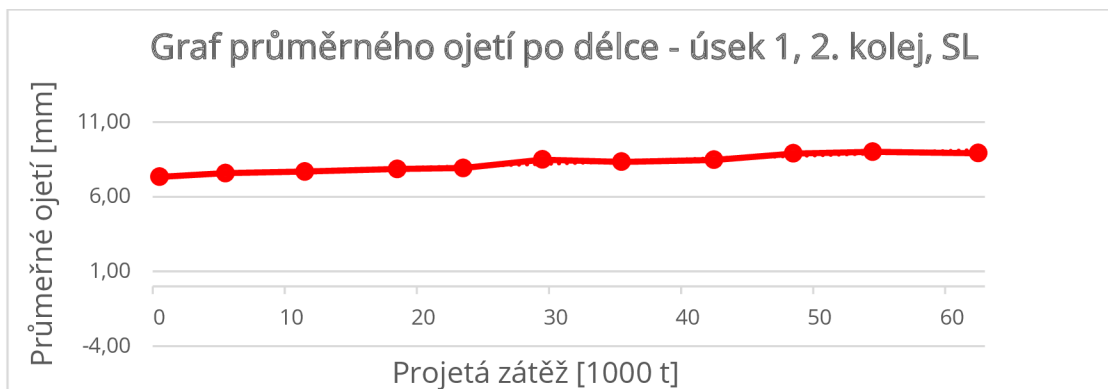
Tabulka 9.6 – Výsledky regresní statistiky, úsek 1, kolej č. 2

Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = 0,0003x + 3,073$	0,076	0,006	0,82485	-0,004
SL	$y = 0,028x + 7,388$	0,973	0,947	4,65E-07	0,268
BP	$y = 0,045x + 1,715$	0,959	0,920	3,18E-06	0,522
SP	$y = 0,011x - 0,409$	0,893	0,797	0,00681	-0,232

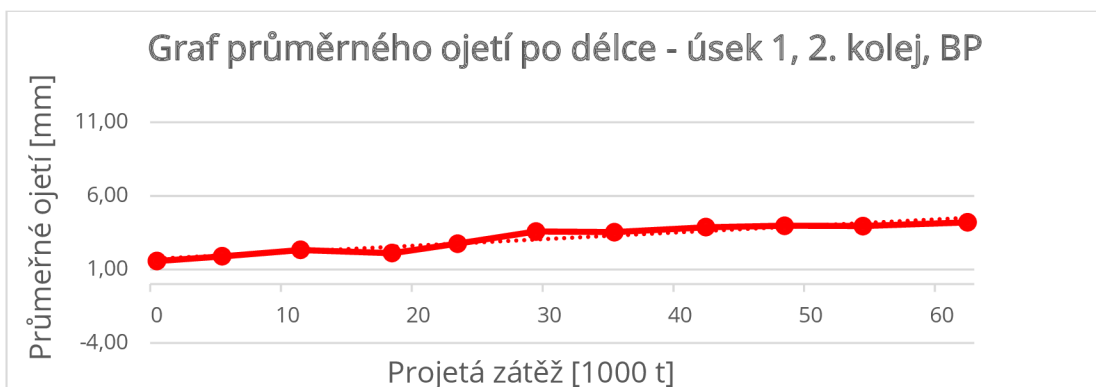
Všechny přímky kladnou vzrůstající tendenci, viz tabulka 9.6. U bočního ojetí na levé kolejnici (obr. 9.13) si můžeme všimnout, že nám parametry R , R^2 a F napovídají, že vytvořená přímka spojnice trendů a sestavená rovnice přímky nejsou dobrých modelem pro výpočet a posuzování, to je ovšem způsobeno tím, že se kolejnice téměř bočně neobjíždí (soupravy projíždějící s nedostatkem převýšení ojíždí bočně více vnější kolejnici, v tomto případě pravou) a přímka je téměř vodorovná.



Obr. 9.13 - Graf průměrného ojetí - úsek 1, kolej č. 2, BL



Obr. 9.14 - Graf průměrného ojetí - úsek 1, kolej č. 2, SL



Obr. 9.15 - Graf průměrného ojetí - úsek 1, kolej č. 2, BP



Obr. 9.16 - Graf průměrného ojetí - úsek 1, kolej č. 2, SP

9.2.2 Úsek č. 2

Úsek č. 2 je rozdělený na více dílčích úseků, viz kapitola 7.6.2.

9.2.2.1 Kolej č. 1, úsek 2a

Tabulka 9.7 – Základní údaje o úseku č. 2a, kolej 1 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
2a	166,750 - 166,835	85	A (1)	275	P	130

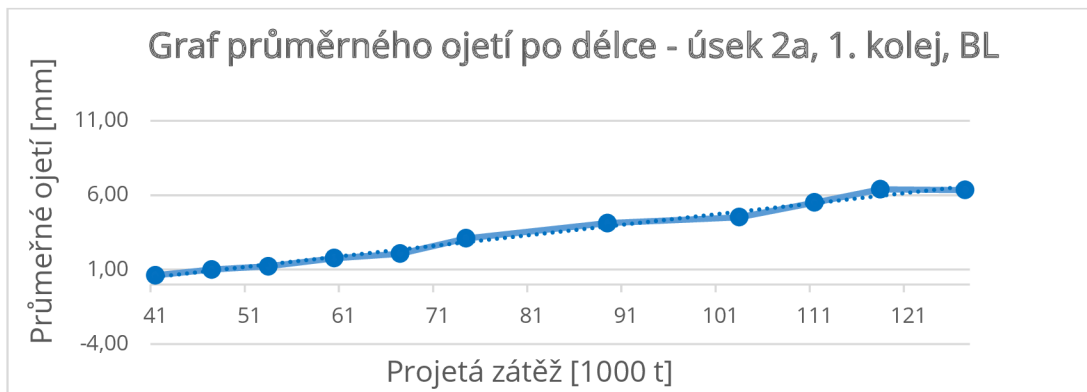
Tabulka 9.8 – Základní údaje o úseku č. 2a, kolej 1 – 2. část

Sklon s ve směru staničení [%]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+1,63	70	75	-	90	60E2	R350 HT	2016

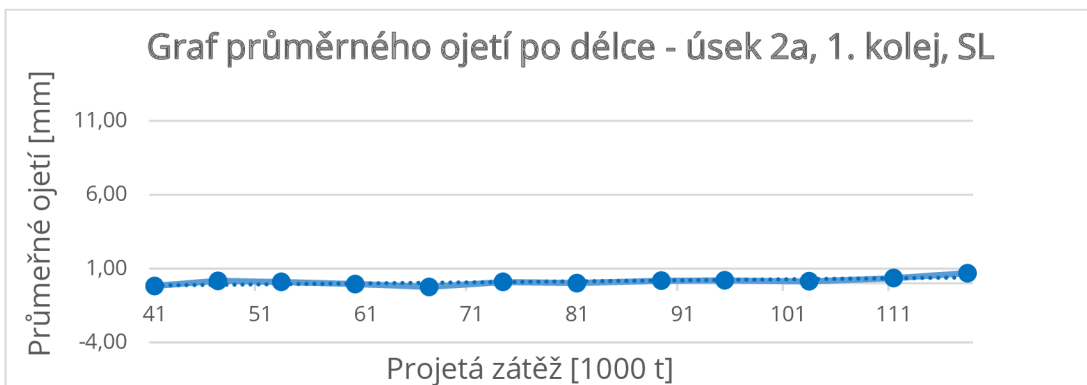
Tabulka 9.9 – Výsledky regresní statistiky, úsek 2a, kolej č. 1

Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = 0,072x - 2,480$	0,993	0,987	1,002E-09	0,413
SL	$y = 0,007x - 0,438$	0,732	0,536	0,00678	0,291
BP	$y = 0,015x - 0,609$	0,814	0,663	0,00002	0,725
SP	$y = 0,014x + 0,321$	0,814	0,428	0,04012	-0,536

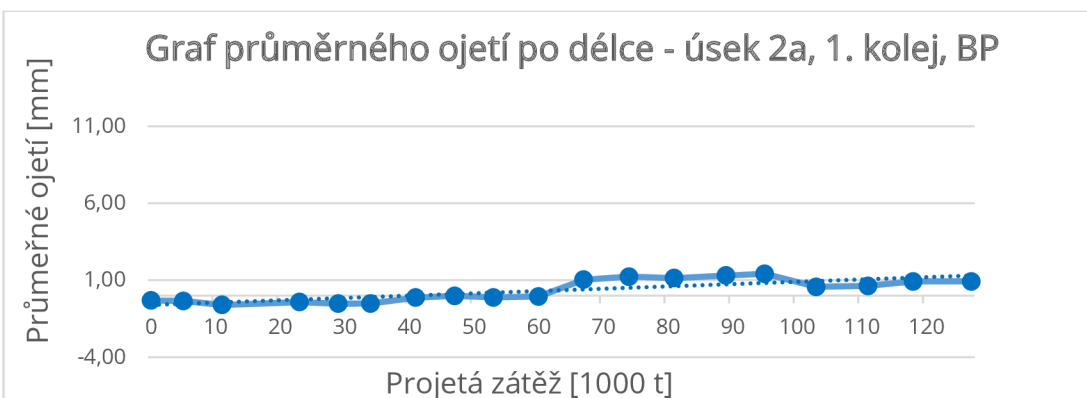
V tomto úseku se opět ukazuje, že všechna ojetí v projeté zátěži stoupají. Tento směrový oblouk je pravostranný, proto by měly být směrnice přímky větší u ojetí BL a SP, což tabulka 9.9 potvrzuje. Také si lze všimnout, že největší rezidua nepřekračují hodnotu 1 mm, čili lze konstatovat, že model lineární regrese je spolehlivým modelem. Jednotlivé grafy jsou na obr. 9.17 – 9.20.



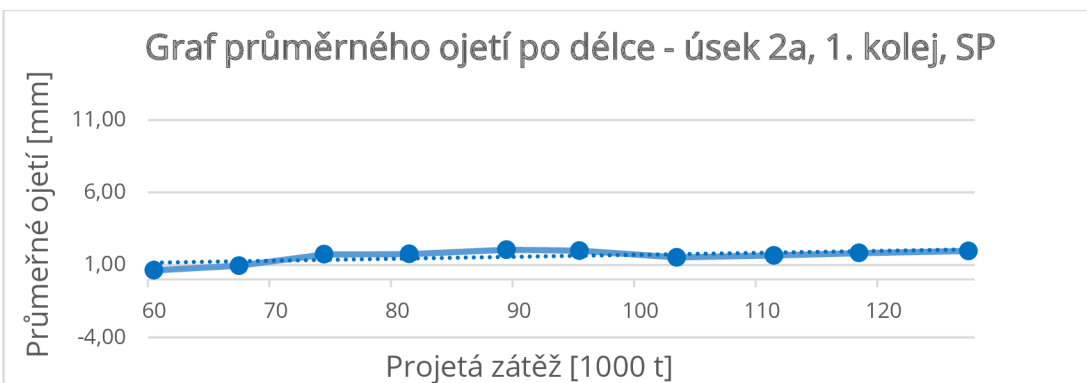
Obr. 9.17 - Graf průměrného ojetí - úsek 2a, kolej č. 1, BL



Obr. 9.18 - Graf průměrného ojetí - úsek 2a, kolej č. 1, SL



Obr. 9.19 - Graf průměrného ojetí - úsek 2a, kolej č. 1, BP



Obr. 9.20 - Graf průměrného ojetí - úsek 2a, kolej č. 1, SP

9.2.2.2 Kolej č. 2, úsek 2a

Tabulka 9.10 – Základní údaje o úseku č. 2a, kolej 2 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
2a	166,750 - 166,846	96	B (2)	271	P	130

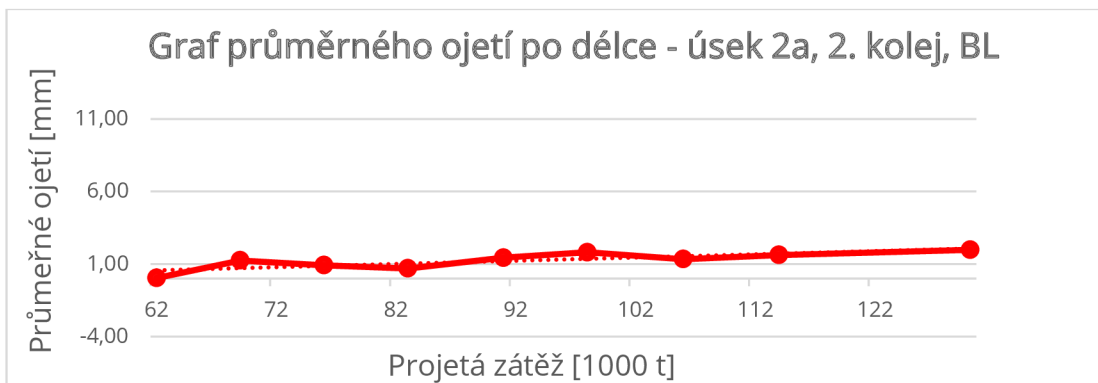
Tabulka 9.11 – Základní údaje o úseku č. 2a, kolej 2 – 2. část

Sklon s ve směru staničení [%]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+1,64	70	75	-	90	60E1	R350 HT	2017

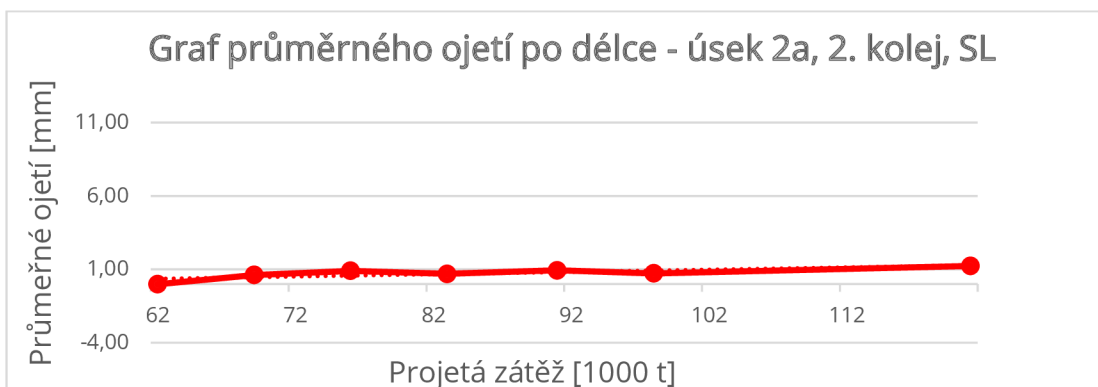
Tabulka 9.12 – Výsledky regresní statistiky, úsek 2a, kolej č. 2

Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = 0,022x - 0,826$	0,812	0,660	0,00783	0,532
SL	$y = 0,015x - 0,620$	0,807	0,652	0,02817	-0,368
BP	$y = -0,010x - 2,284$	0,600	0,360	0,08771	-0,580
SP	$y = 0,022x - 0,737$	0,950	0,902	0,00009	-0,276

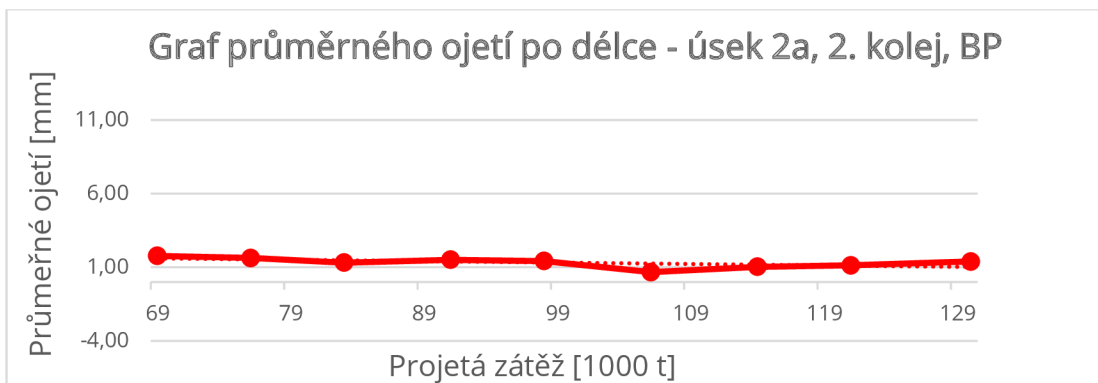
Ojetí BP má klesající smysl, to znamená, že se zřejmě začíná tvořit převalek na kolejnici, obr. 9.23, jakmile hodnoty ojetí začnou nabývat záporných hodnot je jisté, že se převalek již vytvořil. U ostatních ojetí je trend stoupající, čili dochází ke stále většímu ojetí kolejnic. U žádného z reziduí nepřekračuje hodnota 1 mm.



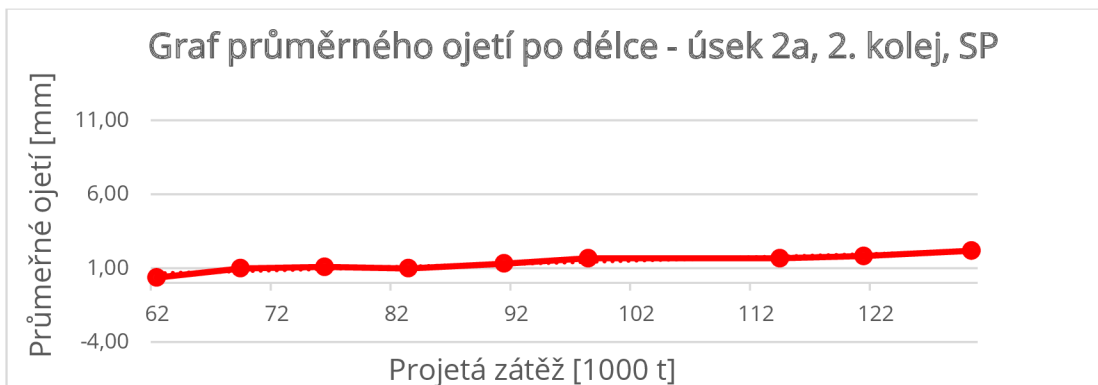
Obr. 9.21- Graf průměrného ojetí - úsek 2a, kolej č. 2, BL



Obr. 9.22 - Graf průměrného ojetí - úsek 2a, kolej č. 2, SL



Obr. 9.23 - Graf průměrného ojetí - úsek 2a, kolej č. 2, BP



Obr. 9.24 - Graf průměrného ojetí - úsek 2a, kolej č. 2, SP

9.2.2.3 Kolej č. 1, úsek 2b

Tabulka 9.13 – Základní údaje o úseku č. 2b, kolej 1 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
2b	166,835 - 167,030	195	A (1)	302	P	130

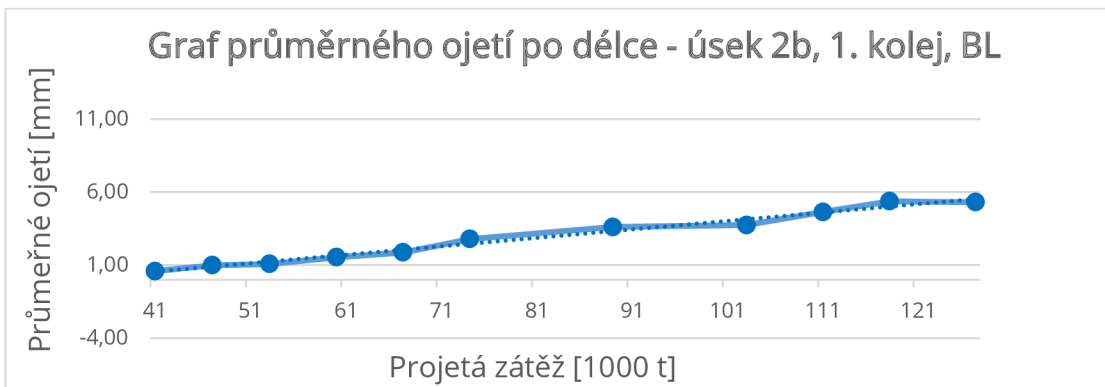
Tabulka 9.14 – Základní údaje o úseku č. 2b, kolej 1 – 2. část

Sklon s ve směru staničení [%o]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+2,42	70	75	-	90	60E2	R350 HT	2016

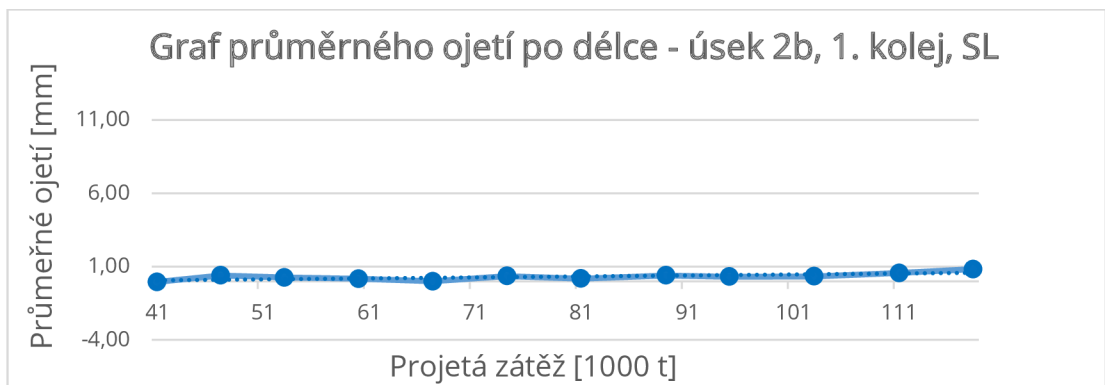
Tabulka 9.15 – Výsledky regresní statistiky, úsek 2b, kolej č. 1

Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = 0,058x - 1,888$	0,990	0,981	4,88E-09	-0,404
SL	$y = 0,007x - 0,221$	0,724	0,524	0,00774	0,296
BP	$y = 0,015x - 0,539$	0,819	0,671	0,00002	0,734
SP	$y = 0,012x + 0,522$	0,575	0,330	0,08231	-0,517

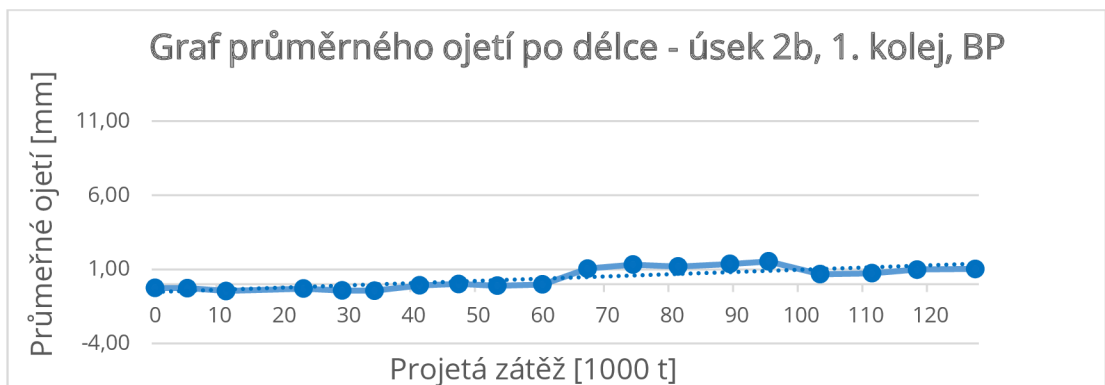
Všechna ojetí mají stále stoupající trend. Opět se potvrdilo, že v pravostranném oblouku se více ojíždí bočně levá kolejnice a svisle pravá kolejnice. Přesto, že ojetí SP má větší hodnotu směrnice, tak významnost F je větší než 0,05, což znamená, že výsledky nemusí být statisticky významné. Tato skutečnost je způsobena čtyřmi anomálními hodnotami, které jsou nad regresní přímkou. U svislého ojetí by nemělo být možné snižování hodnot ojetí bez zjevné výměny kolejnice, lze tedy předpokládat, že tato měření nejsou zcela správná, ovšem nejsou natolik statisticky vychýlená, aby je bylo možné ze statistiky vyřadit. Bez těchto vychýlených hodnot by pravděpodobně byla směrnice přímka o malou hodnotu vyšší, ovšem tento výsledek je stále uspokojivý.



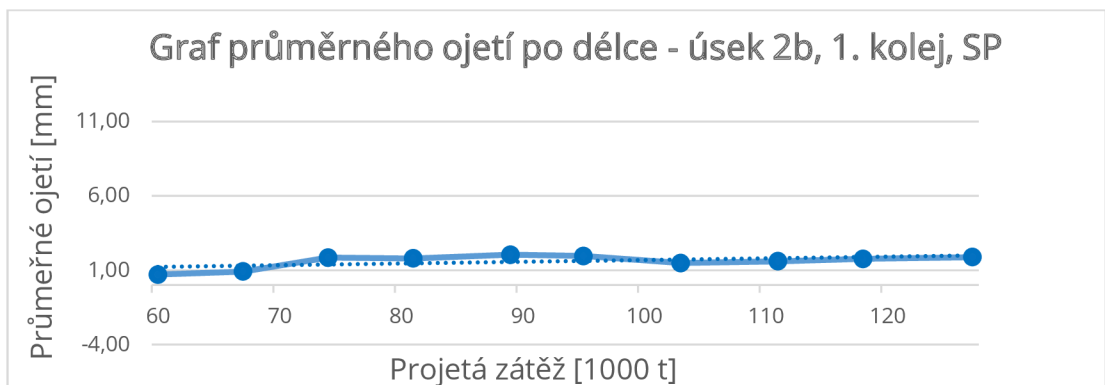
Obr. 9.25 - Graf průměrného ojetí - úsek 2b, kolej č. 1, BL



Obr. 9.26 - Graf průměrného ojetí - úsek 2b, kolej č. 1, SL



Obr. 9.27 - Graf průměrného ojetí - úsek 2b, kolej č. 1, BP



Obr. 9.28 - Graf průměrného ojetí - úsek 2b, kolej č. 1, SP

9.2.2.4 Kolej č. 2, úsek 2b

Tabulka 9.16 – Základní údaje o úseku č. 2b, kolej 2 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
2b	166,846 - 167,030	184	B (2)	298	P	130

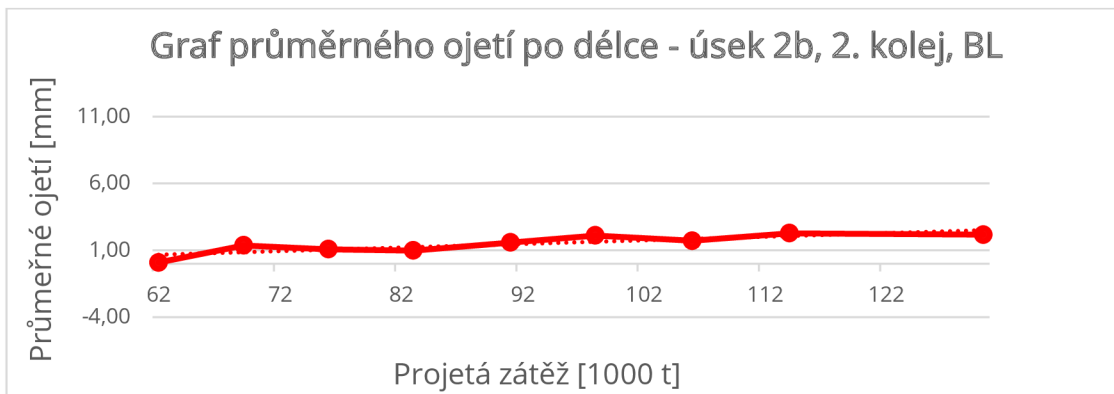
Tabulka 9.17 – Základní údaje o úseku č. 2b, kolej 2 – 2. část

Sklon s ve směru staničení [‰]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+2,44	70	75	-	90	60E1	R350 HT	2017

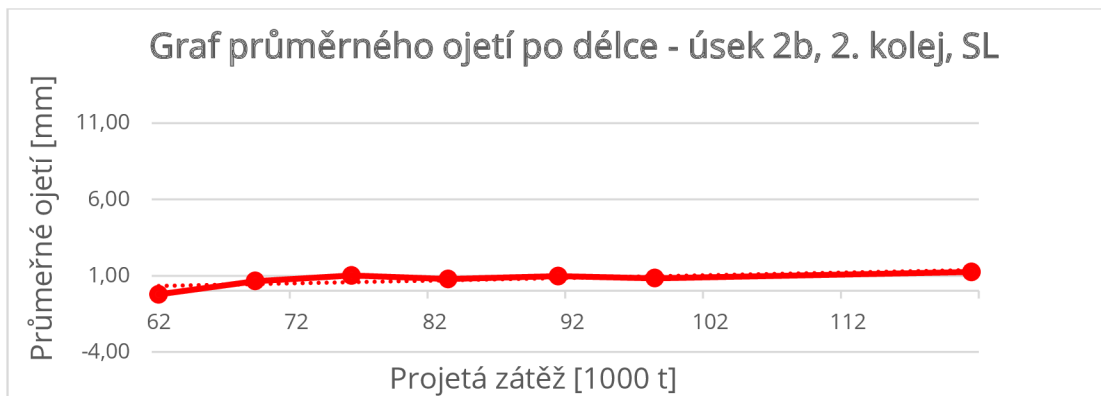
Tabulka 9.18 – Výsledky regresní statistiky, úsek 2b, kolej č. 2

Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = 0,027x - 1,014$	0,852	0,726	0,00356	-0,580
SL	$y = 0,018x - 0,778$	0,750	0,562	0,05221	-0,551
BP	$y = -0,015x + 2,724$	0,845	0,714	0,00415	-0,037
SP	$y = 0,018x - 0,416$	0,908	0,825	0,00070	-0,390

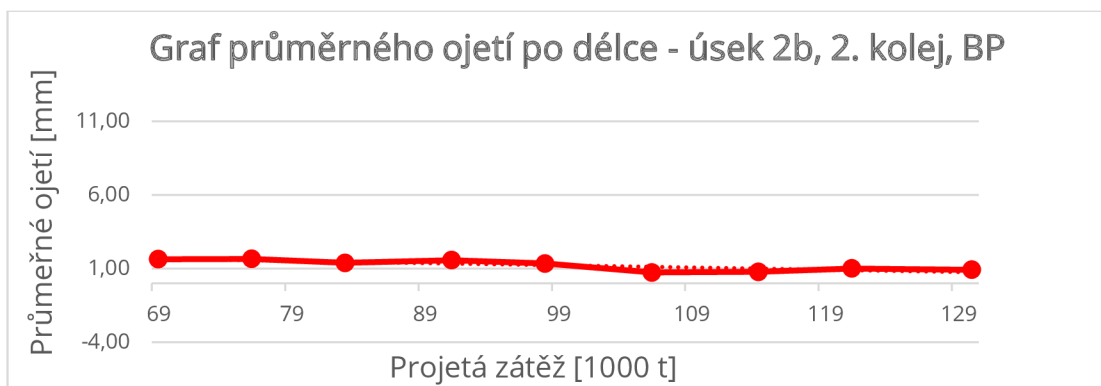
Opět, stejně jako v úseku 2a, si lze všimnout, že ojetí BP má klesající trend, čili lze předpokládat vytvoření převalku v budoucnu. Obě svislá ojetí mají přibližně stejnou hodnotu směrnice přímky, ovšem ojetí SL má vyšší významnost F , to může být způsobeno nutným odebráním statisticky vychýlených hodnot v období roku 2019.



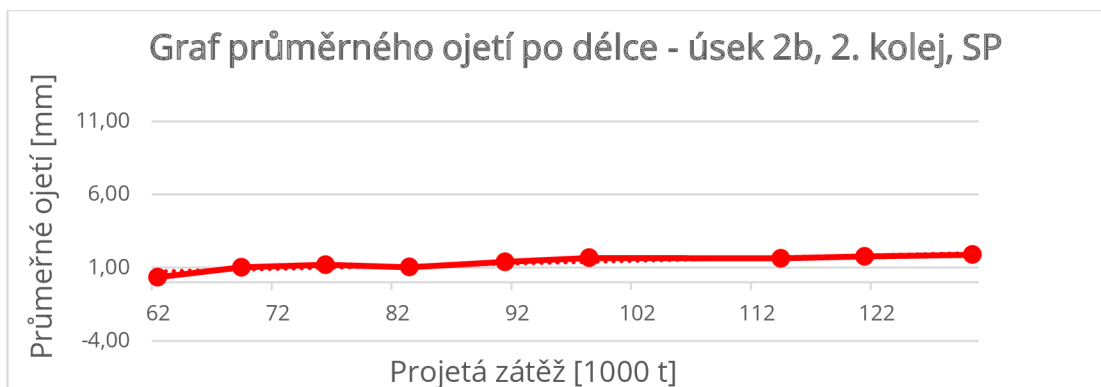
Obr. 9.29 – Graf průměrného ojetí – úsek 2b, kolej č. 2, BL



Obr. 9.30 – Graf průměrného ojetí – úsek 2b, kolej č. 2, SL



Obr. 9.31 – Graf průměrného ojetí – úsek 2b, kolej č. 2, BP



Obr. 9.32 – Graf průměrného ojetí – úsek 2b, kolej č. 2, SP

9.2.3 Úsek č. 3

9.2.3.1 Kolej č. 1

Tabulka 9.19 – Základní údaje o úseku č. 3, kolej 1 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
3	170,710 - 170,760	50	A (1)	299	L	122

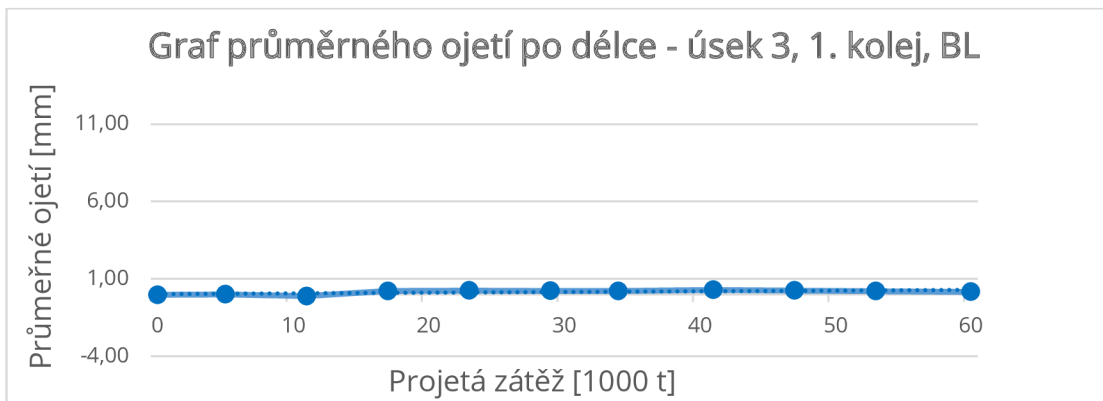
Tabulka 9.20 – Základní údaje o úseku č. 3, kolej 1 – 2. část

Sklon s ve směru staničení [% ₀₀]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+1,82	75	80	-	95	60E1	R 260	2012

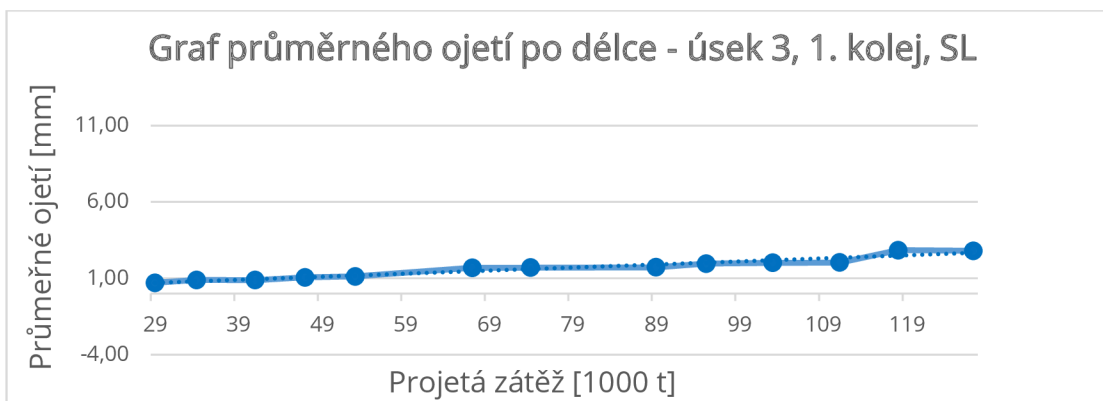
Tabulka 9.21 – Výsledky regresní statistiky, úsek 3, kolej č. 1

Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = 0,005x + 0,058$	0,669	0,447	0,02452	-0,183
SL	$y = 0,020x + 0,095$	0,967	0,935	7,244E-08	0,346
BP	$y = 0,067x - 0,281$	0,980	0,961	2,28E-13	0,828
SP	$y = 0,024x - 1,228$	0,978	0,956	4,304E-08	0,087

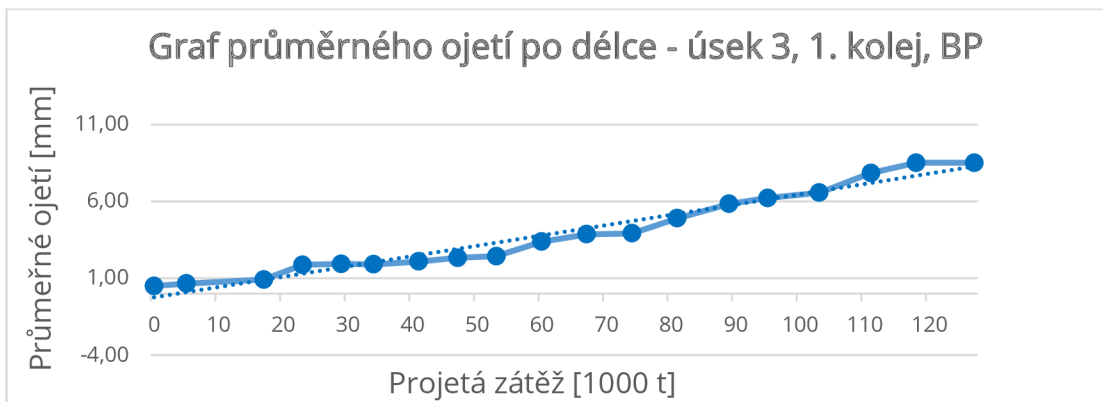
V tomto levostranném oblouku by mělo být vyšší boční ojetí na pravé kolejnici a svislé na levé kolejnici, ovšem z tabulky 9.21 vyplývá, že je rychleji svisle ojížděná kolejnice pravá, zde se tedy tento předpoklad nepotvrdil. Všechny výpočty reziduí nepřekračují hodnotu 1 mm.



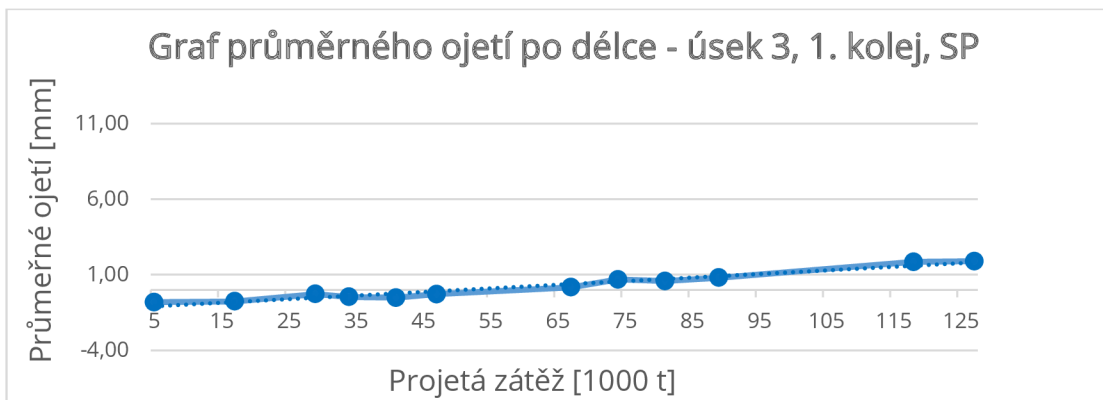
Obr. 9.33 – Graf průměrného ojetí – úsek 3, kolej č. 1, BL



Obr. 9.34 – Graf průměrného ojetí – úsek 3, kolej č. 1, SL



Obr. 9.35 – Graf průměrného ojetí – úsek 3, kolej č. 1, BP



Obr. 9.36 – Graf průměrného ojetí – úsek 3, kolej č. 1, SP

9.2.3.2 Kolej č. 2

Tabulka 9.22 – Základní údaje o úseku č. 3, kolej 2 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
3	170,710 - 170,760	50	B (2)	304	L	122

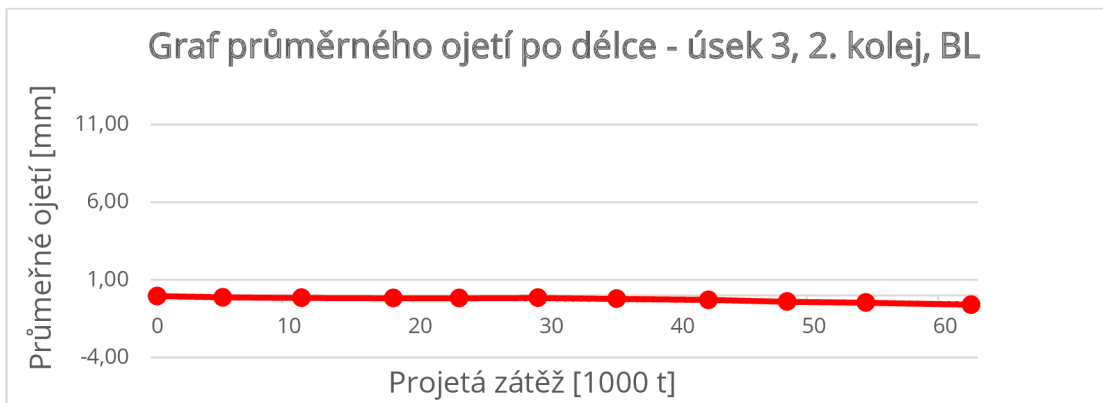
Tabulka 9.23 – Základní údaje o úseku č. 3, kolej 2 – 2. část

Sklon s ve směru staničení [‰]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+1,82	75	80	-	95	60E1	R 260	1997

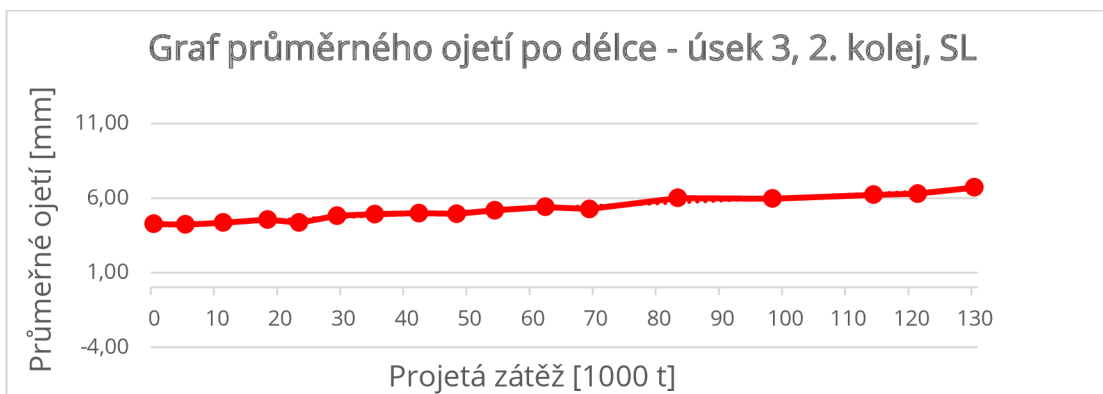
Tabulka 9.24 – Výsledky regresní statistiky, úsek 3, kolej č. 2

Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = -0,008x - 0,038$	0,933	0,870	2,81E-05	-0,104
SL	$y = 0,019x + 4,159$	0,986	0,972	4,731E-13	0,274
BP	$y = 0,080x - 3,491$	0,979	0,958	1,214E-09	1,321
SP	$y = 0,009x + 1,949$	0,819	0,670	0,00113	0,380

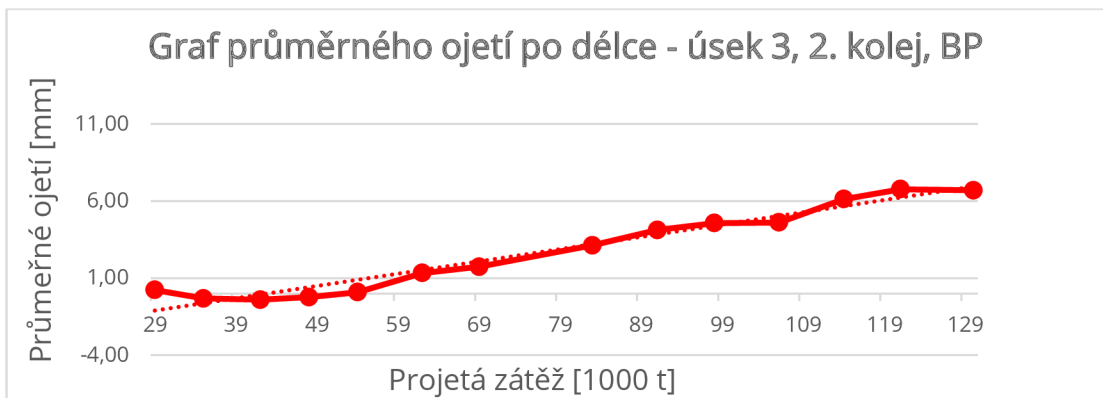
V této koleji problém se svislým ojetím, jako to mu je u koleje č. 1, není. Zde se potvrdil předpoklad, BP a SL se ojíždí více než ostatní dva parametry. Na ojetí BL lze z obr. 9.37 vidět, že po celou dobu zaznamenání tohoto grafu je na kolejnici převalek. Také na grafu ojetí BP, obr. 9.39, lze vidět, že byl vytvořen převalek, který se ovšem později začal ojíždět, ztráta materiálu. Na výpočtu ojetí SP si lze všimnout, že největší reziduum překročilo hodnotu 1 mm. Stále lze ovšem konstatovat, že lineární regrese je v tomto případě správná.



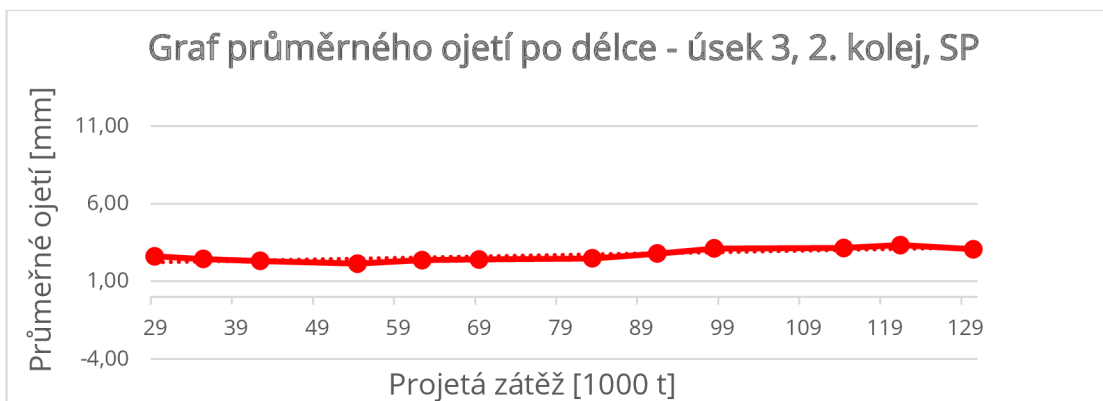
Obr. 9.37 - Graf průměrného ojetí - úsek 3, kolej č. 2, BL



Obr. 9.38 - Graf průměrného ojetí - úsek 3, kolej č. 2, SL



Obr. 9.39 - Graf průměrného ojetí - úsek 3, kolej č. 2, BP



Obr. 9.40 - Graf průměrného ojetí - úsek 3, kolej č. 2, SP

9.2.4 Úsek č. 4

9.2.4.1 Kolej č. 1

Tabulka 9.25 – Základní údaje o úseku č. 4, kolej 1 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
4	173,200 -173,300	100	A (1)	279	P	148

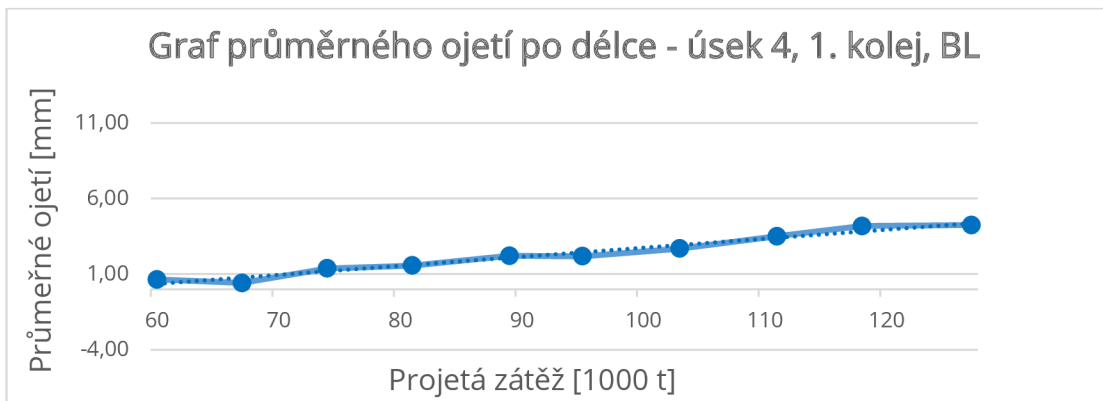
Tabulka 9.26 – Základní údaje o úseku č. 4, kolej 1 – 2. část

Sklon s ve směru staničení [%]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+1,19	75	80	-	95	60E1	R 260	2017

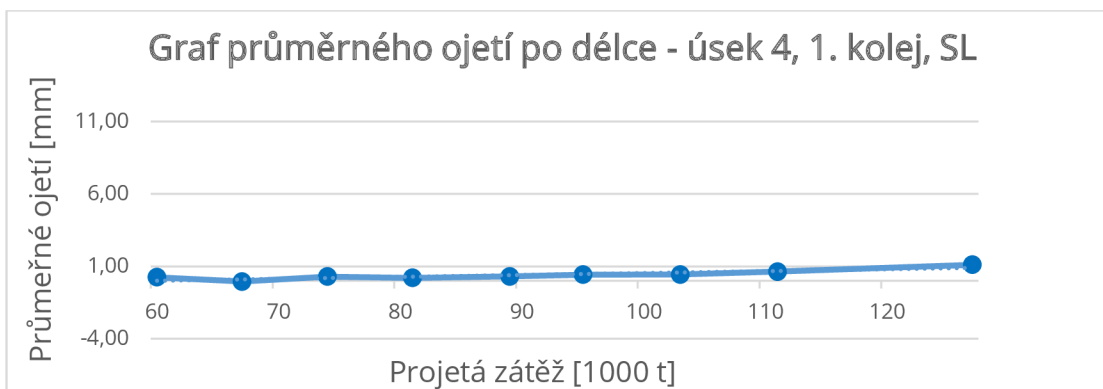
Tabulka 9.27 – Výsledky regresní statistiky, úsek 4, kolej č. 1

Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = 0,060x - 3,317$	0,984	0,968	3,088E-07	-0,363
SL	$y = 0,014x - 0,811$	0,889	0,790	0,00136	0,244
BP	$y = - 0,009x + 2,027$	0,667	0,444	0,04988	-0,331
SP	$y = 0,023x - 0,592$	0,857	0,734	0,00655	-0,485

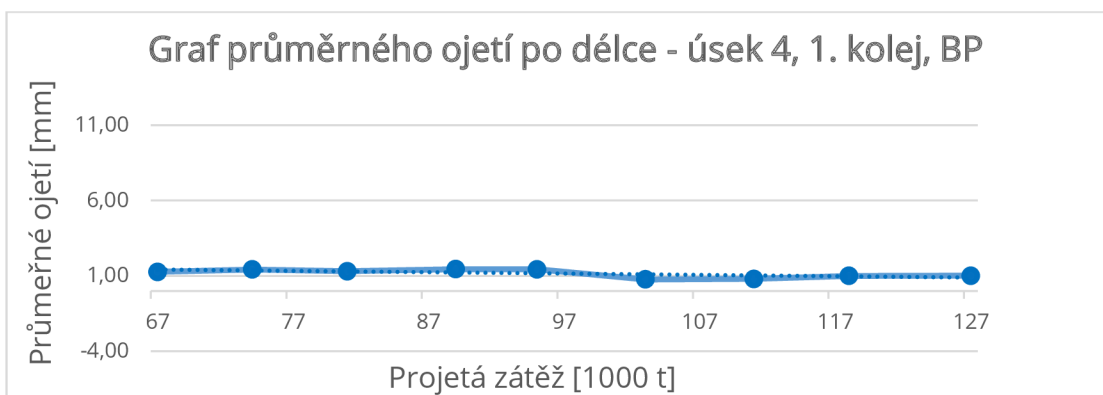
Tento oblouk je pravostranný a znovu se potvrdil předpoklad vyššího ojetí BL a SP. U ojetí BP je klesající trend, lze předpokládat vytvoření převalku v budoucnu, viz obr. 9.43. U všech výpočtů nepřesahují hodnoty reziduí 1 mm.



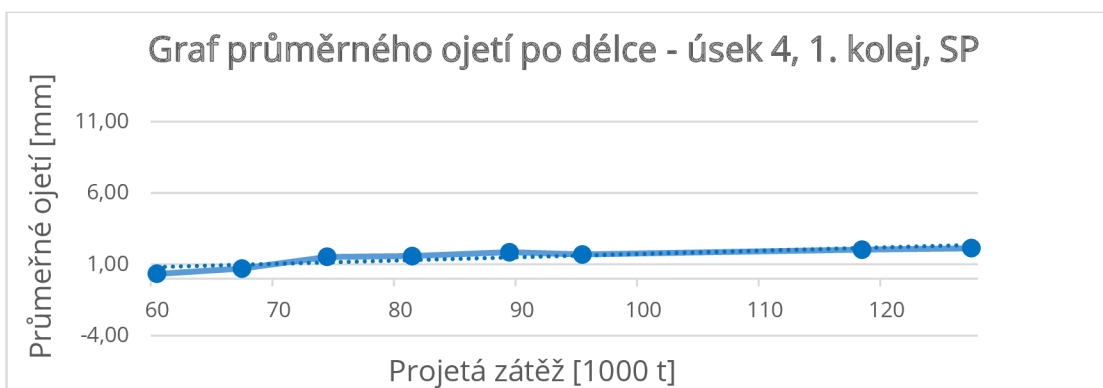
Obr. 9.41 - Graf průměrného ojetí - úsek 4, kolej č. 1, BL



Obr. 9.42 - Graf průměrného ojetí - úsek 4, kolej č. 1, SL



Obr. 9.43 - Graf průměrného ojetí - úsek 4, kolej č. 1, BP



Obr. 9.44 - Graf průměrného ojetí - úsek 4, kolej č. 1, SP

9.2.4.2 Kolej č. 2

Tabulka 9.28 – Základní údaje o úseku č. 4, kolej 2 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
4	173,200 -173,300	100	B (2)	275	P	143

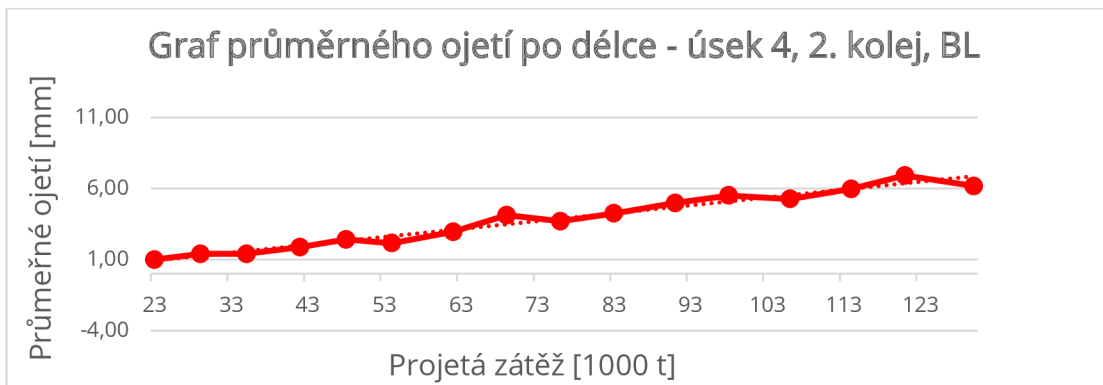
Tabulka 9.29 – Základní údaje o úseku č. 4, kolej 2 – 2. část

Sklon s ve směru staničení [‰]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+1,35	75	80	-	95	60E1	R 260	2015

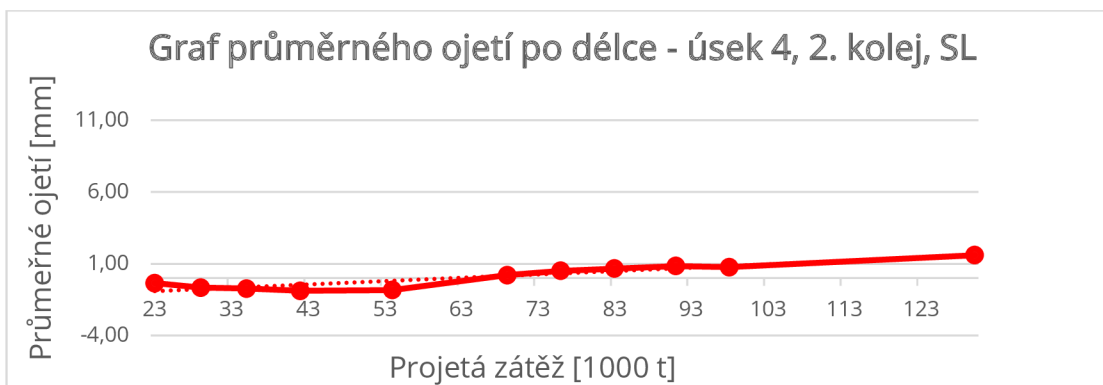
Tabulka 9.30 – Výsledky regresní statistiky, úsek 4, kolej č. 2

Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = 0,056x - 0,395$	0,983	0,966	1,234E-11	-0,694
SL	$y = 0,023x - 1,473$	0,925	0,856	4,556E-05	-0,646
BP	$y = - 0,007x + 1,069$	0,906	0,821	1,32E-06	-0,173
SP	$y = 0,016x + 5,035$	0,878	0,770	1,71E-05	0,420

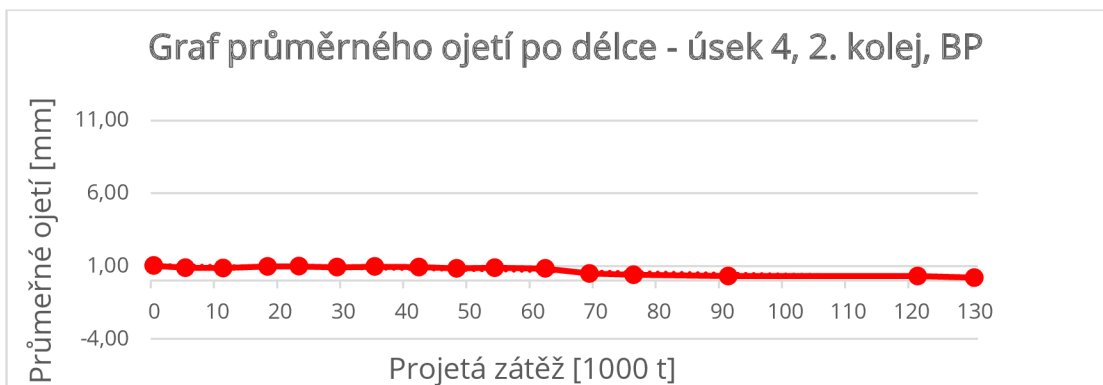
V této koleji téhož úseku jako v předešlé kapitole je předpoklad ojíždění nepotvrdil. Boční levé ojetí je sice větší, ovšem svislé pravé ojetí není větší než levé. Boční pravé ojetí má klesající trend a je velmi pravděpodobné, že ve velmi blízké budoucnosti se na kolejnici vytvoří převalok, poslední naměřená hodnota byla 0,2 mm. U všech ojetí se potvrdila správnost použití lineární regrese.



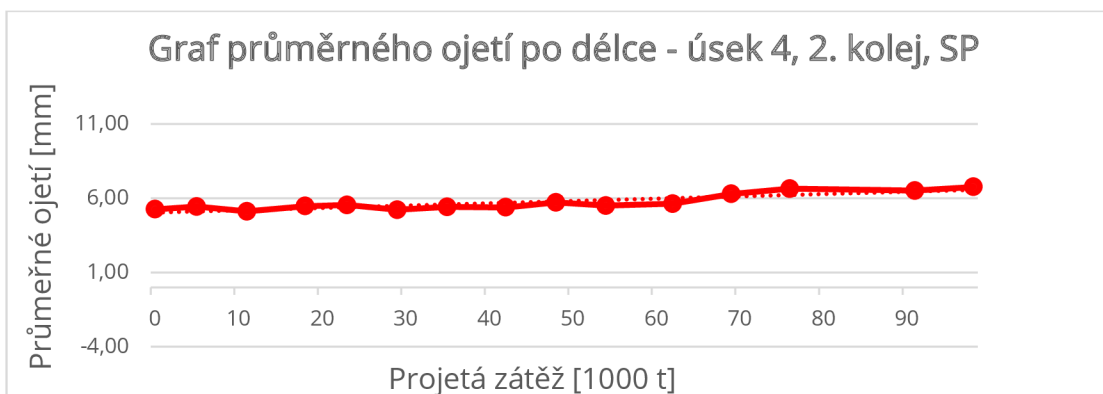
Obr. 9.45 – Graf průměrného ojetí – úsek 4, kolej č. 2, BL



Obr. 9.46 – Graf průměrného ojetí – úsek 4, kolej č. 2, SL



Obr. 9.47 – Graf průměrného ojetí – úsek 4, kolej č. 2, BP



Obr. 9.48 – Graf průměrného ojetí – úsek 4, kolej č. 2, SP

9.2.5 Úsek č. 5

9.2.5.1 Kolej č. 1

Tabulka 9.31 – Základní údaje o úseku č. 5, kolej 1 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
5	177,660 -177,800	140	A (1)	280	P	115

Tabulka 9.32 – Základní údaje o úseku č. 5, kolej 1 – 2. část

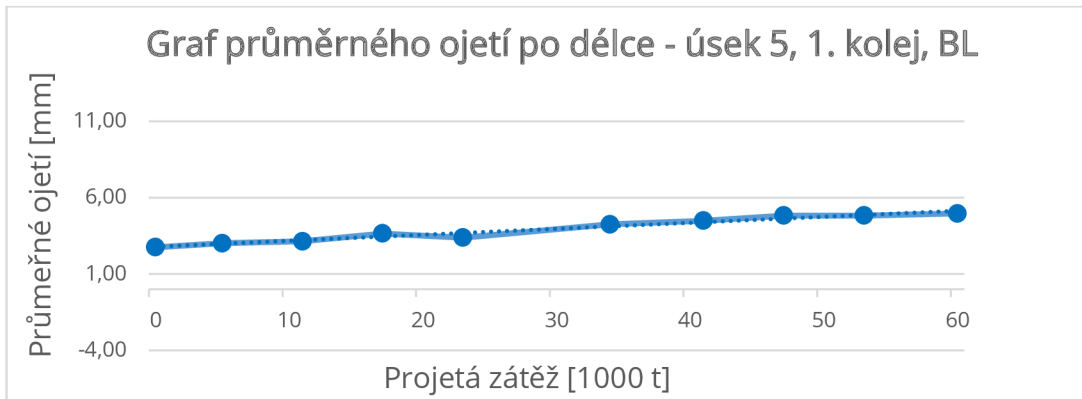
Sklon s ve směru staničení [‰]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+4,62	70	75	-	90	60E1	R 260	2020

Tabulka 9.33 – Výsledek regresní statistiky, úsek 5, kolej č. 1

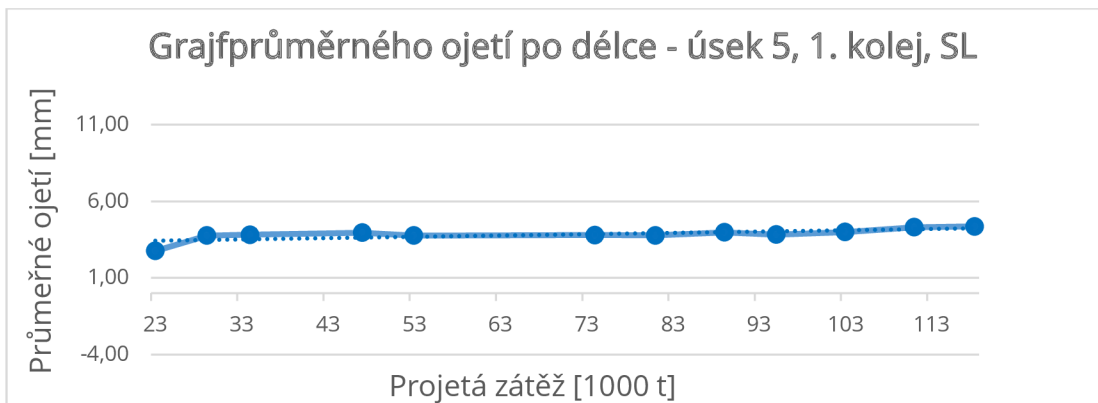
Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = 0,039x + 2,768$	0,982	0,964	4,744E-07	-0,306
SL	$y = 0,009x + 3,227$	0,718	0,515	0,00855	-0,666
BP	$y = 0,004x + 0,690$	0,192	0,037	0,67923	0,038
SP	$y = 0,021x + 4,932$	0,921	0,848	0,00002	-0,394

V tomto úseku se podle grafů ojetí velmi pravděpodobně vyměnily kolejnice v roce 2020, tahle skutečnost ovšem není vidět na grafech obr. 9.49 – 9.52, neboť by tato data velmi ovlivnila statistiku a směrnici přímky.

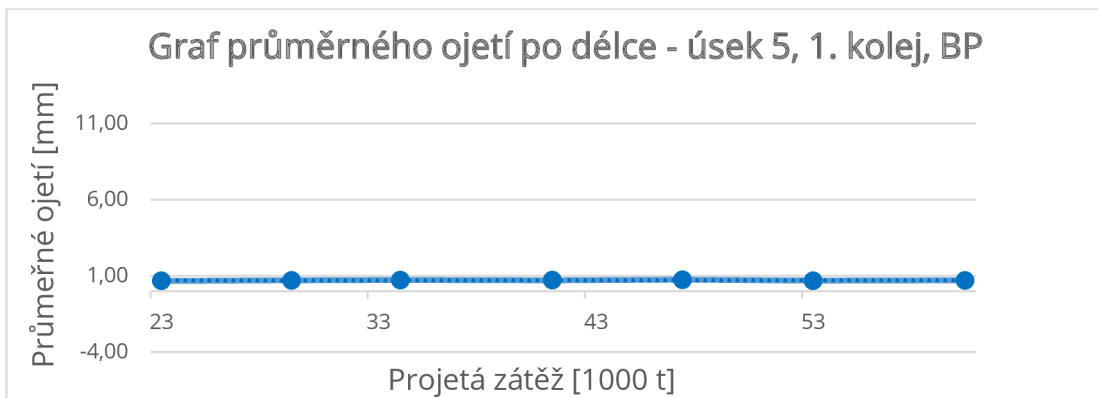
Tento směrový oblouk je pravostranný, proto by měla být vyšší hodnota směrnice u ojetí BL a SP, což se potvrdilo. U ojetí BP hodnoty R , R^2 a F napovídají, že lineární model není zcela užitečný, to je způsobeno tím, že graf je téměř vodorovný a k ojždění téměř nedochází, model tedy nemá dobrou lineární závislost, pro zvyšující se hodnoty x se dostává velmi podobných hodnot y .



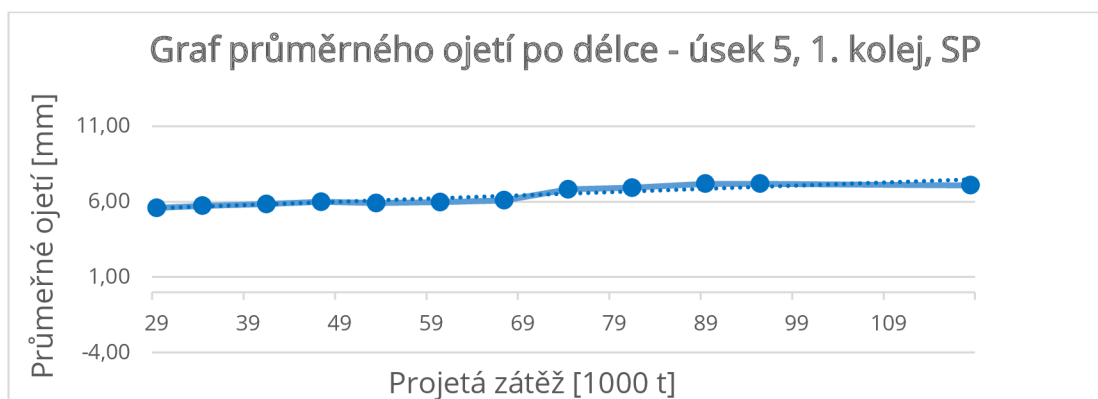
Obr. 9.49 – Graf průměrného ojetí – úsek 5, kolej č. 1, BL



Obr. 9.50 – Graf průměrného ojetí – úsek 5, kolej č. 1, SL



Obr. 9.51 – Graf průměrného ojetí – úsek 5, kolej č. 1, BP



Obr. 9.52 – Graf průměrného ojetí – úsek 5, kolej č. 1, SP

9.2.5.2 Kolej č. 2, úsek 5a

Tabulka 9.34 – Základní údaje o úseku č. 5a, kolej 2 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
5a	177,660 -177,800	140	B (2)	277	P	124

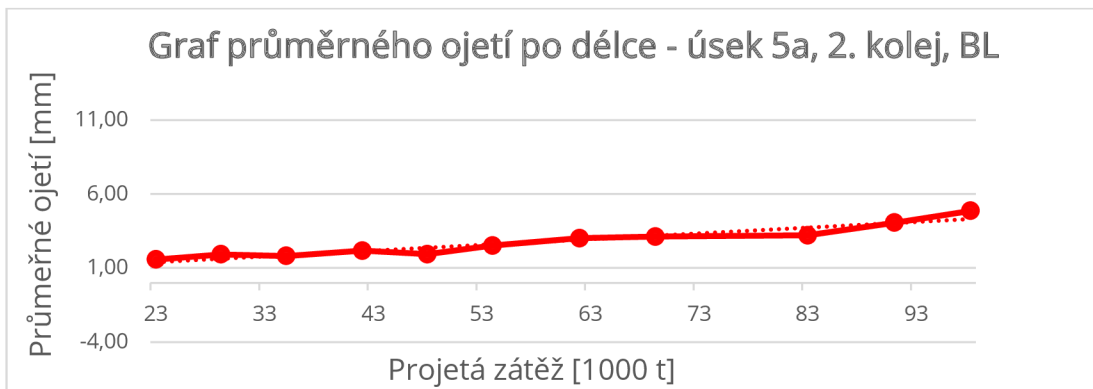
Tabulka 9.35 – Základní údaje o úseku č. 5a, kolej 2 – 2. část

Sklon s ve směru staničení [‰]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+5,45	70	-	-	90	49E1	R 260	2014

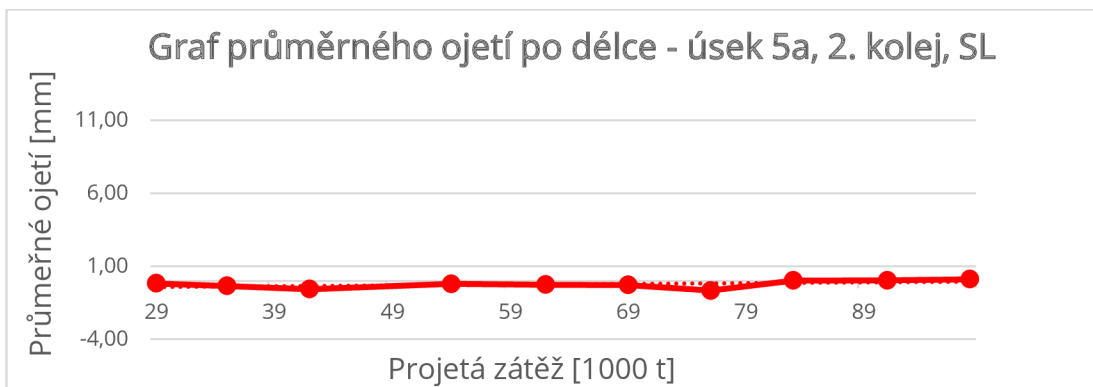
Tabulka 9.36 – Výsledky regresní statistiky, úsek 5a, kolej č. 2

Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = 0,039x + 0,473$	0,955	0,911	4,922E-06	0,567
SL	$y = 0,005x - 0,579$	0,498	0,248	0,14252	-0,495
BP	$y = 0,005x - 0,204$	0,543	0,294	0,10517	0,248
SP	$y = 0,015x + 0,022$	0,845	0,714	0,00107	0,284

Zde se opět potvrdil předpoklad ojíždění, vyšší hodnotu směrnice přímky mají ojetí BL a SP. Stejně jako tomu bylo v předchozí koleji, objevují se zde dvě ojetí, SL a BP, které se téměř neojíždí, proto i jejich parametry statistiky R , R^2 a F nejsou uspokojující. Je ale velmi zvláštní, že hodnoty svislého ojetí na levé kolejnici má ve velké části záporné hodnoty. To může být způsobeno špatnou detekcí kolejnice nebo zaznamenání nečistot na kolejnici, a tím pádem vychýlení správných hodnot. U ojetí BP došlo v pozdějších měření k vytvoření převalku. Ovšem v žádném z výpočtů se hodnoty nejvyšších reziduí nedostaly nad hodnotu 1 mm.



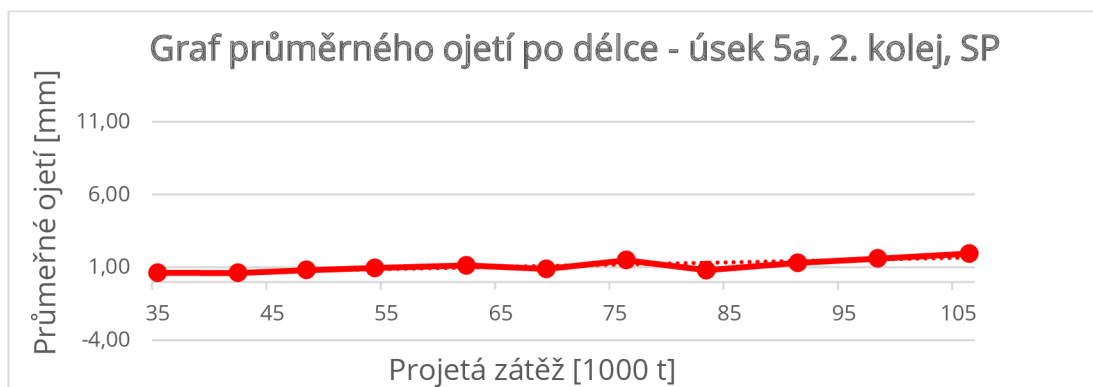
Obr. 9.53 – Graf průměrného ojetí – úsek 5a, kolej č. 2, BL



Obr. 9.54 – Graf průměrného ojetí – úsek 5a, kolej č. 2, SL



Obr. 9.55 – Graf průměrného ojetí – úsek 5a, kolej č. 2, BP



Obr. 9.56 – Graf průměrného ojetí – úsek 5a, kolej č. 2, SP

9.2.5.3 Kolej č. 2, úsek 5b

Tabulka 9.37 – Základní údaje o úseku č. 5b, kolej 2 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
5b	177,660 -177,800	140	B (2)	277	P	124

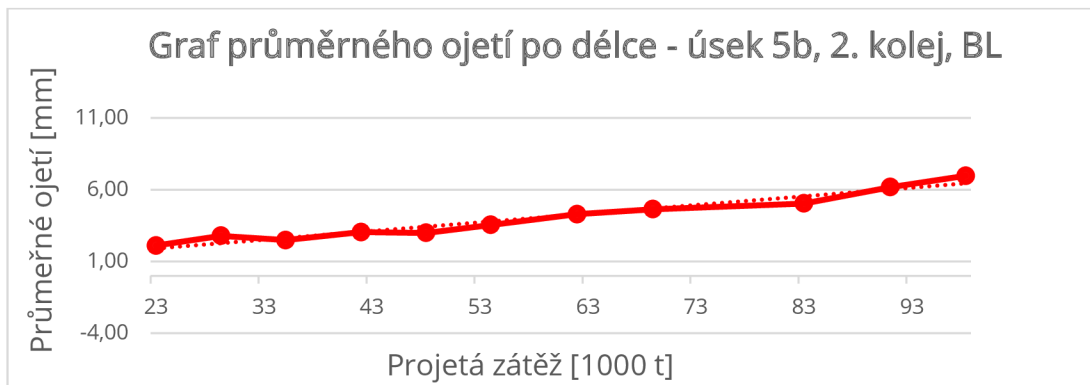
Tabulka 9.38 – Základní údaje o úseku č. 5b, kolej 2 – 2. část

Sklon s ve směru staničení [‰]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+4,52	70	-	-	90	49E1	R 260	2014

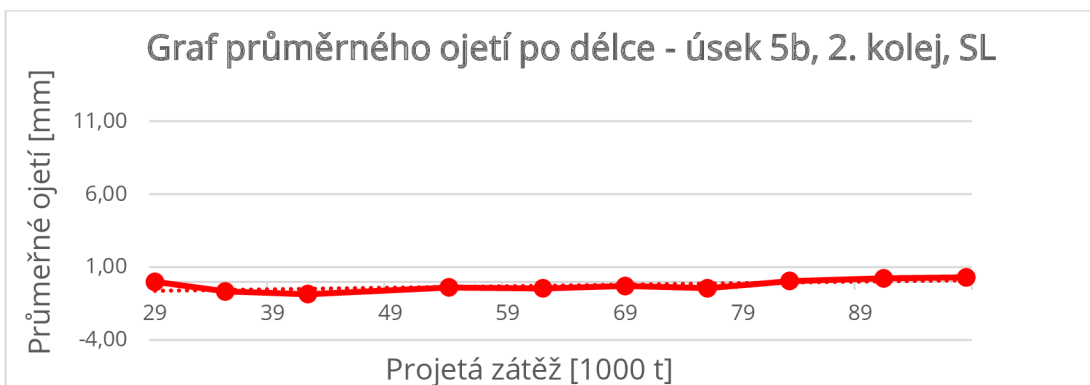
Tabulka 9.39 – Výsledky regresní statistiky, úsek 5b, kolej č. 2

Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = 0,061x + 0,464$	0,976	0,953	2,769E-07	-0,519
SL	$y = 0,011x - 0,938$	0,657	0,432	0,03891	0,611
BP	$y = 0,006x - 0,203$	0,539	0,291	0,10766	0,285
SP	$y = 0,018x + 0,187$	0,883	0,779	0,00032	-0,482

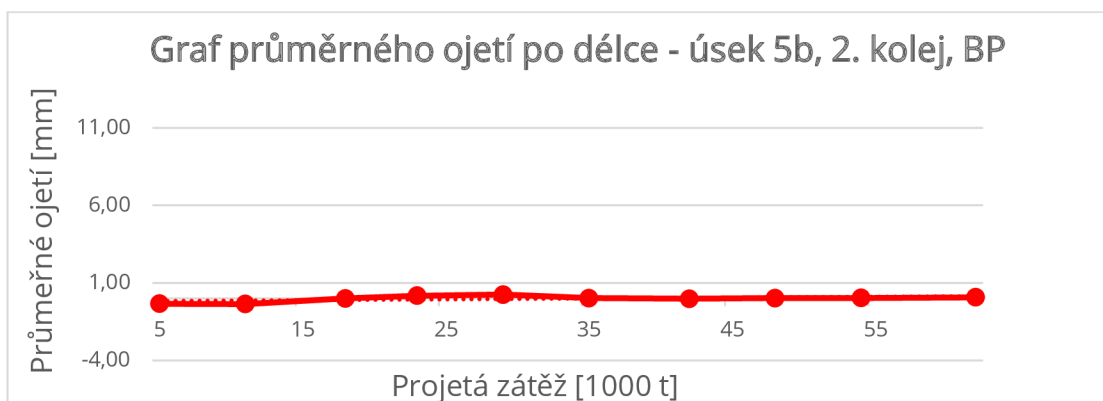
V tomto úseku vyšly výsledky velmi podobně jako v předchozí úseku 5a, viz kapitola 9.2.5.2.



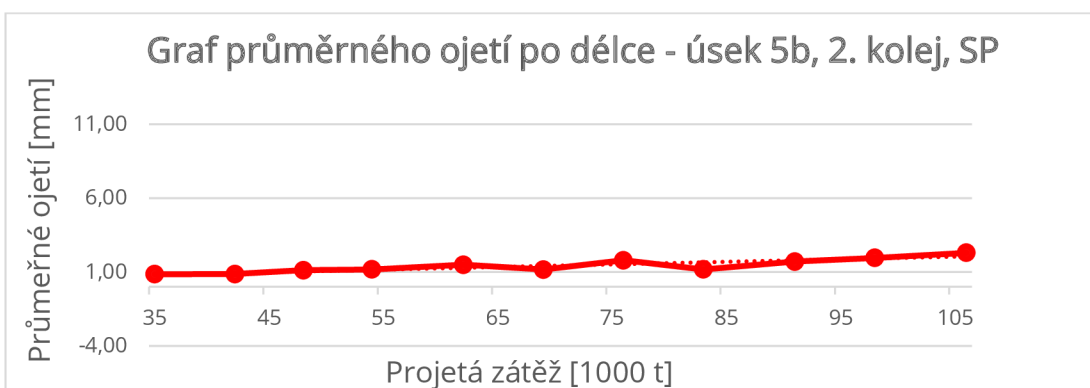
Obr. 9.57 - Graf průměrného ojetí - úsek 5b, kolej č. 2, BL



Obr. 9.58 - Graf průměrného ojetí - úsek 5b, kolej č. 2, SL



Obr. 9.59 - Graf průměrného ojetí - úsek 5b, kolej č. 2, BP



Obr. 9.60 - Graf průměrného ojetí - úsek 5b, kolej č. 2, SP

9.2.6 Úsek č. 6

9.2.6.1 Kolej č. 1

Tabulka 9.40 – Základní údaje o úseku č. 6, kolej 1 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
6	178,300 -178,400	100	A (1)	265	L	120

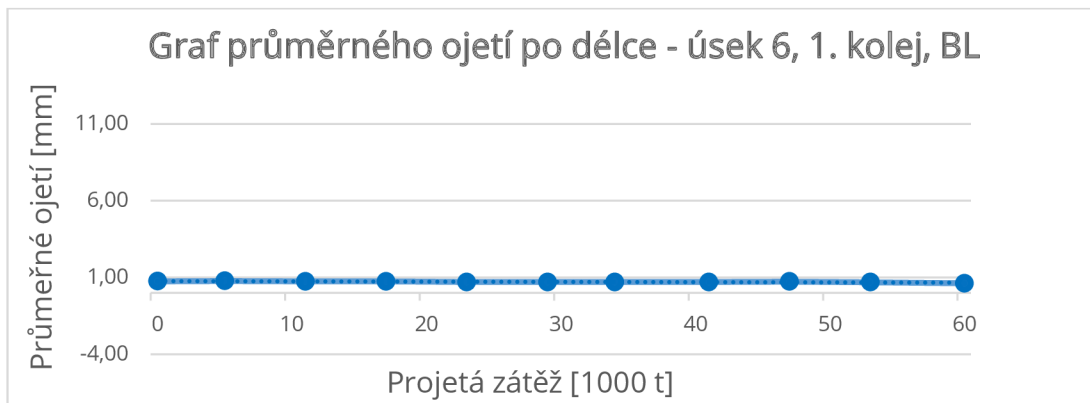
Tabulka 9.41 – Základní údaje o úseku č. 6, kolej 1 – 2. část

Sklon s ve směru staničení [%]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+4,62	70	75	-	90	60E1	R 260	2020

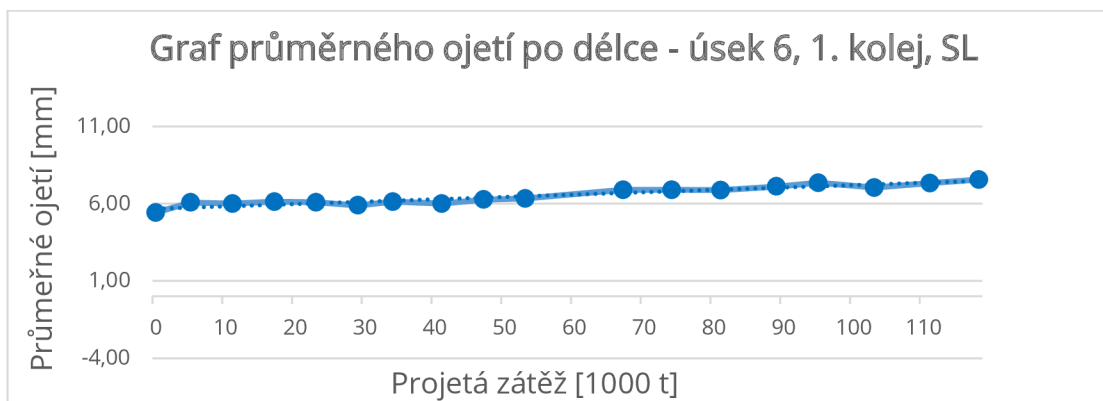
Tabulka 9.42 – Výsledky regresní statistiky, úsek 6, kolej č. 1

Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = -0,002x + 0,770$	0,792	0,627	0,00368	0,050
SL	$y = 0,015x + 5,663$	0,954	0,909	9,318E-10	-0,298
BP	$y = 0,033x + 3,922$	0,953	0,907	1,274E-08	-0,861
SP	$y = 0,015x + 2,515$	0,860	0,740	0,00016	0,551

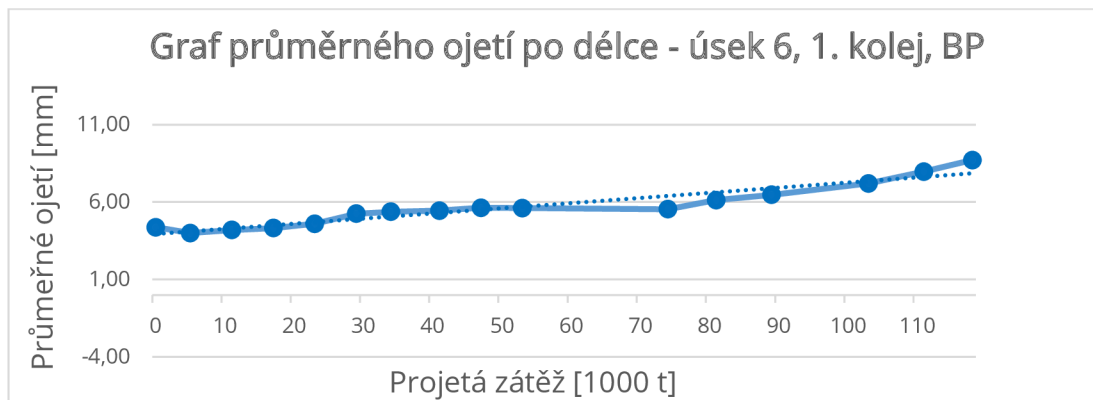
V této koleji se pravděpodobně kolejnice vyměnily v roce 2020, což není v příložených grafech vidět, ovlivnilo by to statistiku. Výměně napovídá i fakt, že má zde ojetí SL, BP a SP vysokou hodnotu, kolem 6 mm. V levostranném oblouku by měla být více ojížděná bočně pravá kolejnice, což se potvrdilo a svisle levá kolejnice. U svislého ojetí lze vidět, že levé i pravé mají stejnou hodnotu směrnice přímky. To může značit, že se v tomto oblouku svislé účinky rozdělují rovnoměrně na obě kolejnice. V žádném z výpočtů se hodnoty nejvyšších reziduí nedostaly nad hodnotu 1 mm.



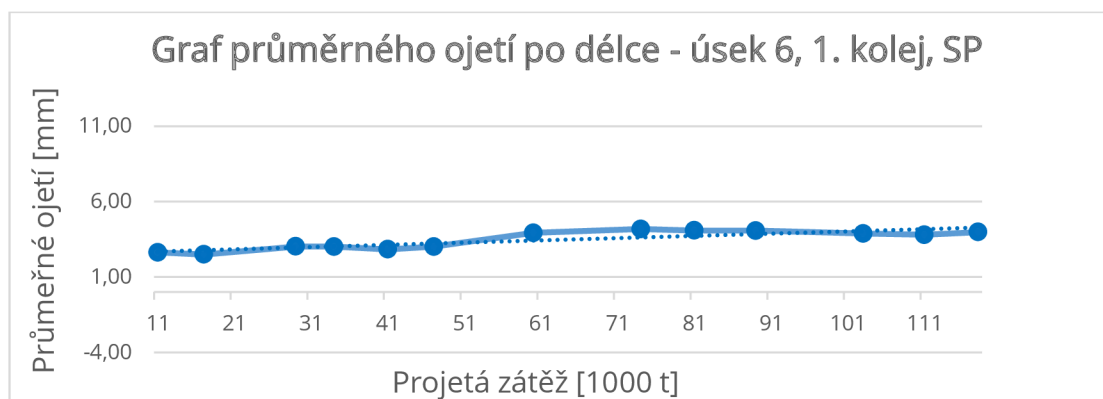
Obr. 9.61 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 1, BL



Obr. 9.62 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 1, SL



Obr. 9.63 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 1, BP



Obr. 9.64 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 1, SP

9.2.6.2 Kolej č. 2

Tabulka 9.43 – Základní údaje o úseku č. 6, kolej 2 – 1. část

Číslo úseku	Staničení	Délka úseku [m]	Kolej	Poloměr oblouku R [m]	Smysl	Převýšení D [mm]
6	178,300 -178,400	100	B (2)	271	L	128

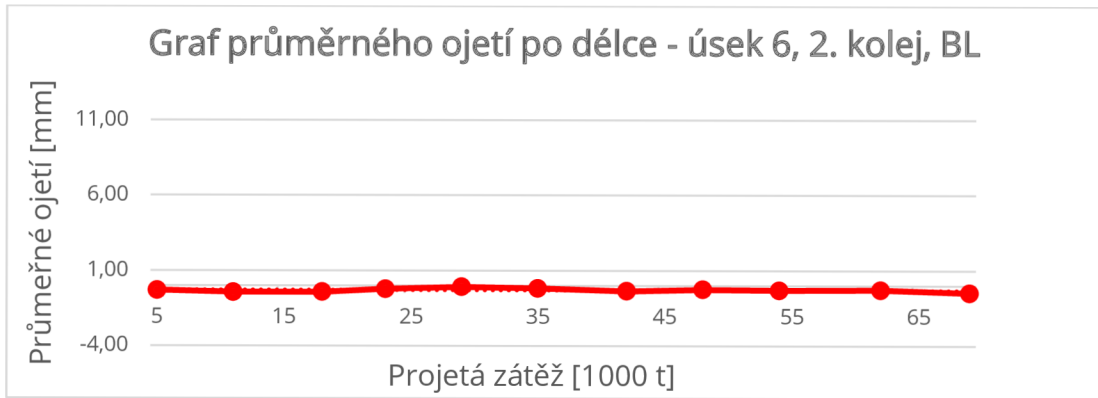
Tabulka 9.44 – Základní údaje o úseku č. 6, kolej 2 – 2. část

Sklon s ve směru staničení [%o]	Rychlosti [km/h]				Kolejnice	Materiál kolejnic	Rok vložení kolejnic
	V	V_{130}	V_{150}	V_k			
+4,52	70	-	-	85	49E1	R 260	2014

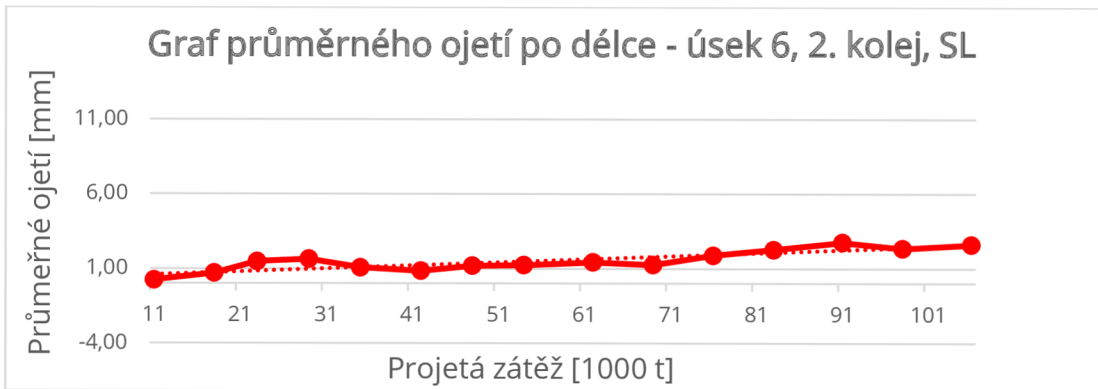
Tabulka 9.45 – Výsledky regresní statistiky, úsek 6, kolej č. 2

Ojetí	Rovnice přímky	R	R^2	Významnost F	Největší rezidua
BL	$y = -0,0004x - 0,289$	0,078	0,006	0,81863	0,212
SL	$y = 0,021x + 0,350$	0,865	0,748	3,137E-05	0,675
BP	$y = 0,136x - 1,695$	0,993	0,987	8,981E-10	-0,770
SP	$y = 0,029x - 1,380$	0,888	0,788	0,00763	-0,687

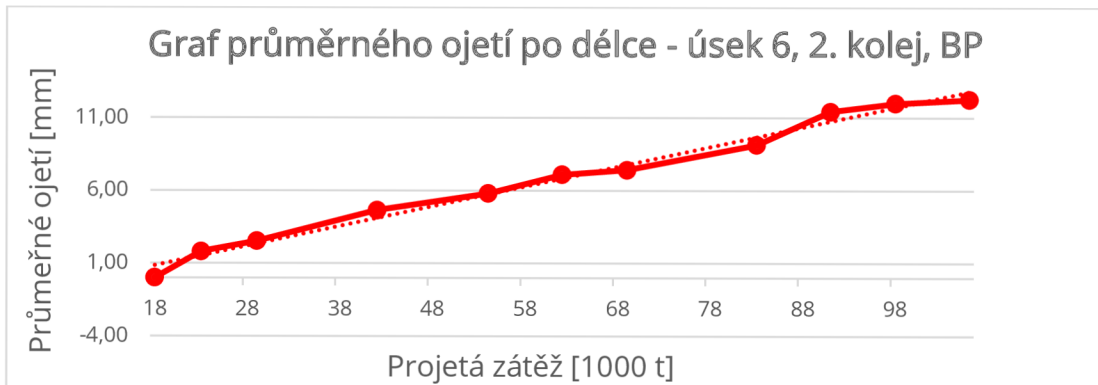
Na první pohled z grafu na obr. 9.67 vyplývá, že je v tomto úseku a koleji maximální boční ojetí ze všech vybraných úseku, které dosahuje až do hodnoty 12,26 mm. Naopak na levé kolejnici dochází k tvoření převalku, taktéž parametry statistiky nejsou zcela uspokojivé kvůli téměř vodorovnému průběhu grafu ojetí. Také si z tabulky 9.45 lze všimnout, že má vyšší hodnotu svislé ojetí na pravé kolejnici, než na levé, jak by tomu podle předpokladu mělo být. To může mít souvislost s nesrovnalostmi s tímto ojetím. Mnoho měření mělo záporné hodnoty, což by u svislého ojetí nemělo být možné. Celkové 3D grafy bez vyřazených statistický vychýlených hodnot jsou v příloze.



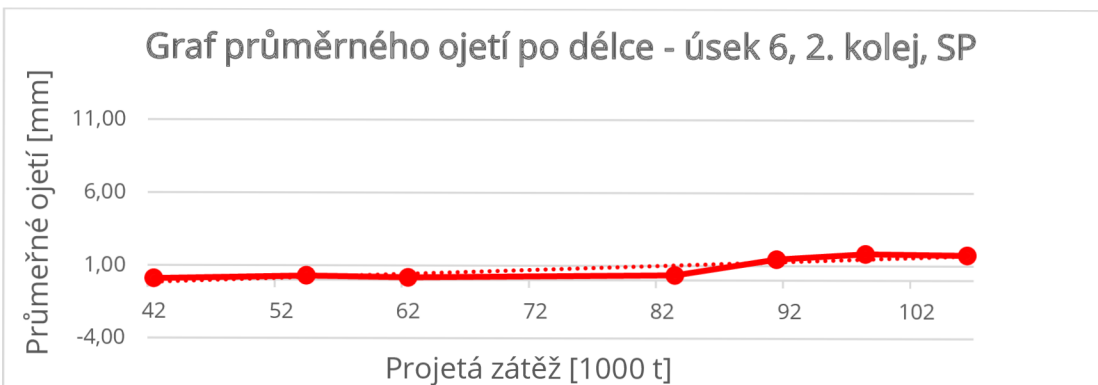
Obr. 9.65 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 2, SP



Obr. 9.66 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 2, SP



Obr. 9.67 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 2, SP



Obr. 9.68 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 2, SP

10 Porovnání výsledků

Nyní je nutné zvolit metodu pro vzájemné porovnání výsledků z Heumannovy metody a z regresní statistiky z naměřených ojetí. Hlavní myšlenkou této práce je, že velikost řídicí síly P_1 přímo souvisí s velikostí a rychlostí ojíždění kolejnic. Byla tedy porovnána velikost řídicí síly P_1 a velikost směrnice přímký k spojnice trendů ojetí kolejnic.

10.1 Úsek č. 1

Projíždí-li směrovým obloukem soupravy s nedostatkem převýšení, projeví se větší boční ojetí na vnější kolejnici a větší svislé ojetí na vnitřní kolejnici, proto bude porovnáváno, vždy jen ojetí v koleji podle této myšlenky. Směrový oblouk v prvním úseku je levostranný, bude porovnáváno svislé ojetí na levé kolejnici a boční ojetí na pravé kolejnici. Konečné výsledky jsou vyobrazeny v tabulce 10.1.

Tabulka 10.1 – Porovnání výsledku, úsek 1

Číslo úseku	Smysl oblouku	Kolej	Materiál kolejnic	Řídicí síla P_1 [kN]	[%]	k	
						SL	BP
1	L	A (1)	R350 HT	50,98	100	0,021	0,084
		B (2)	R 260	52,06	102,12	0,028	0,045

Z tabulky 10.1 lze vyčíst, že svislé ojetí je větší v koleji č. 2, $k = 0,028$, zatímco v koleji č. 1 je směrnice přímký $k = 0,021$, ale naopak boční ojetí je větší v koleji č. 1 s hodnotou směrnice $k = 0,084$ oproti $k = 0,045$ v koleji č. 2 což odpovídá téměř dvojnásobně většímu bočnímu ojíždění. Uvážíme-li, že v koleji č. 1 jsou kolejnice z pevnější oceli, musí být tato kolej extrémně namáhavá, aby dosáhla tak velkého ojíždění.

10.2 Úsek č. 2a

Tabulka 10.2 – Porovnání výsledku, úsek 2a

Číslo úseku	Smysl oblouku	Kolej	Materiál kolejnic	Řídicí síla P_1 [kN]	[%]	k	
						SP	BL
2a	P	A (1)	R350 HT	48,94	100	0,014	0,072
		B (2)	R350 HT	50,27	102,72	0,022	0,022

Tabulka 10.2 ukazuje výsledky celkového porovnání úseku 2a. Zde se ukazuje opačný problém, než byl v úseku č. 1. Svislé ojetí má větší směrnici v koleji č. 2 $k = 0,022$ než v první koleji $k = 0,014$, ovšem boční ojetí je větší v koleji č. 1 $k = 0,072$

a $k = 0,022$ pro kolej č. 2, přesto že řídicí síla je větší v koleji č. 2. V obou kolejích jsou kolejnice z pevnější oceli R350 HT, rozdíl mezi nimi by měly být minimální.

10.3 Úsek č. 2b

Tabulka 10.3 – Porovnání výsledku, úsek 2b

Číslo úseku	Smysl oblouku	Kolej	Materiál kolejnic	Řídicí síla P_1 [kN]	[%]	k	
						SP	BL
2b	P	A (1)	R350 HT	46,38	100	0,012	0,058
		B (2)	R350 HT	47,58	102,59	0,018	0,027

V tomto úseku jsou výsledky velmi podobné předešlému úseku, jediné, co se výrazně liší, jsou hodnoty řídicích sil, které jsou zhruba o 2,5 kN menší než v úseku předešlém, díky větším poloměrům směrových oblouků.

10.4 Úsek č. 3

Tabulka 10.4 – Porovnání výsledku, úsek 3

Číslo úseku	Smysl oblouku	Kolej	Materiál kolejnic	Řídicí síla P_1 [kN]	[%]	k	
						SL	BP
3	L	A (1)	R 260	49,31	100	0,020	0,067
		B (2)	R 260	49,58	100,55	0,019	0,080

V úseku č. 3 se ukázalo, že svislé ojetí je přibližně srovnatelné mezi oběma kolejemi, $k = 0,020$ pro kolej č. 1 a $k = 0,019$ pro kolej č. 2. Ovšem boční ojetí je větší u koleje č. 2, $k = 0,080$ a pro kolej č. 1 $k = 0,067$. Řídicí síla je větší pro kolej č. 2 jen o 0,27 kN. Zdá se, že při vyšších hodnotách poloměrů směrových oblouků se neprojeví ve větší míře rozdíl v tažené a sunuté soupravě, jako je tomu u menších poloměrů.

10.5 Úsek č. 4

Tabulka 10.5 – Porovnání výsledku, úsek 4

Č. úseku	Smysl	Kolej	Materiál kolejnic	Řídicí síla P_1 [kN]	[%]	k		
						SP	BL	SL
4	P	A (1)	R 260	49,25	100	0,023	0,060	0,014
		B (2)	R 260	51,08	103,72	0,016	0,056	0,023

V tomto úseku se v koleji č. 2 projevilo jako ojetí s větší hodnotou směrnice svislé ojetí na levé kolejnici, proto jsou hodnoty z toto ojetí do tabulky 10.5 přidány. Přestože je rozdíl mezi řídicími silami 3,72 % (největší ze všech vybraných úseků),

ojetí tomu zdá se nenapovídá. Boční ojetí i ojetí svislé na pravé kolejnici na koleji č. 1 je větší než na koleji č. 2, dá se všem říct, že se hodnoty směrnic k sobě blíží.

10.6 Úsek č. 5

Tabulka 10.6 – Porovnání výsledku, úsek 5

Číslo úseku	Smysl oblouku	Kolej	Materiál kolejnic	Řídící síla P_1 [kN]	[%]	k	
						SP	BL
5	P	A (1)	R 260	47,88	100	0,021	0,039
		B (2)	R 260	48,23	100,73	0,018	0,061

Úsek č. 5 byl v koleji č. 2 rozdělen na dva samostatné úseky, úsek 5b pro kolej č. 2 je tedy porovnávána s koleji č. 1 díky podobným parametrům, stejně jako tomu bylo v kapitole 7.6.5. Opět je rozdíl řídicích sil jen 0,73 %, přestože jsou hodnoty poloměrů směrových oblouků menší, než tomu bylo v č. 3. Vysvětlení se schovává v boční síle A od nevyrovnaného převýšení. Díky rozdílným převýšení D v kolejích, je výsledek síly od nevyrovnaného převýšení v kolejích rozdílný o 1,35 kN, které se součtem boční síly od lokomotivy vytváří velmi podobnou celkovou sílu, která na vozidlo působí. Tento úsek se tedy nezdá být vhodným pro tuto práci na vzájemné posuzování mezi kolejemi.

U ojíždění si lze všimnout, že opět je boční ojetí větší v koleji č. 2, $k = 0,061$, naproti koleji č. 1, kde $k = 0,039$, ale svislé ojetí je větší v koleji č. 1, kolej č. 1 $k = 0,021$, kolej č. 2 $k = 0,018$.

10.7 Úsek č. 6

Tabulka 10.7 – Porovnání výsledku, úsek 6

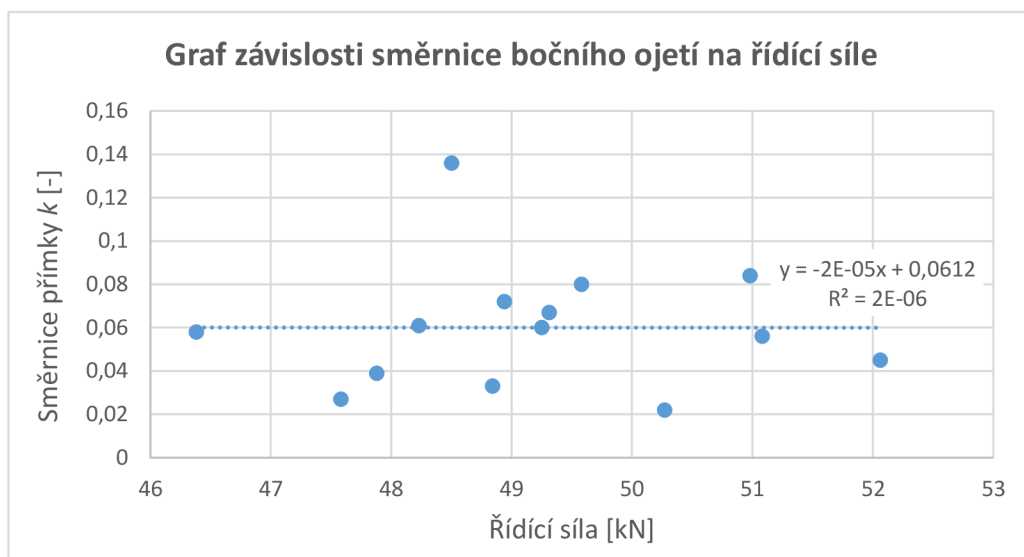
Č. úseku	Smysl	Kolej	Materiál kolejnic	Řídící síla P_1 [kN]	[%]	k		
						SL	BP	SP
6	L	A (1)	R 260	48,84	100	0,015	0,033	0,015
		B (2)	R 260	48,5	99,30	0,021	0,136	0,029

Výsledky z posledního úseku se zdají být na první pohled protichůdné. Znovu se zde objevuje problém s odlišnou boční silou od nevyrovnaného převýšení, která je v koleji č. 1 větší o 2,34 kN než v koleji č. 2. Dohromady s boční silou od lokomotivy má účinek nepříznivější vliv než v koleji č. 2. Je zvláštní, že v koleji s menším poloměrem je navrženo převýšení D menší než ve směrovém oblouku s větším poloměrem. Tento oblouk se opět nezdá být vhodným pro tuto práci na vzájemné posuzování mezi kolejemi. Ojetí kolejnic je v koleji č. 2 větší než v první koleji, boční ojetí má největší hodnotu směrnic ze všech zkoumaných, $k = 0,136$, v tomto

oblouku tedy dochází k výraznému ojíždění, není to však možné dokázat na provedených výpočtech Vogelovy a Heumannovy metody.

10.8 Vztah mezi řídicí silou o ojetím

Pro ověření vztahu mezi řídicí silou P_1 a směrnici ojetí byl vytvořen bodový graf, obr. 10.1. Pro porovnání bylo vybráno příslušné boční ojetí. Z grafu je patrné, že mezi veličinami není žádná závislost, proto má spojnice trendů koeficient determinace R^2 téměř nulovou hodnotu. Nepotvrdila se myšlenka, že ojetí kolejnic je závislé na velikosti řídicí síly P_1 .



Obr. 10.1 – Graf závislosti směrnice bočního ojetí na řídicí síle

11 Závěr

V této práci byla provedena analýza úseků tratě mezi stanicí Brno – Maloměřice a stanicí Blansko. Pro jednotlivé úseky byly vybrány směrové oblouky s malými poloměry, na kterých se zkoumalo možné ovlivnění ojetí od sunutých souprav Railjet směrem do Blanska na koleji č. 2. Tato hypotéza se zkoumala pomocí výpočtu dle Vogelovy a Heumannovy metody.

Nejdříve byly získány informace o jednotlivých úsecích tratě, z nákresných přehledů železničního svršku, jsou to geometrické parametry koleje, informace o sestavě železničního svršku, údaje o stavbách v úsecích (tunely, mosty atd.).

Dále byla provedena podrobná rešerše Vogelovy metody, Heumannovy metody a teorie ojíždění kolejnic. Pomocí této rešerše byly vypočítány parametry, podle kterých se dále úseky a jednotlivé koleje posuzovaly, zejména řídicí síla P_1 . Jednotlivé výpočty byly prováděny pomocí převedené grafické metody do programu MS Excel.

Výpočty podle Heumannovy metody ukázaly ve většině úseku, že skutečně sunuté soupravy zvyšují hodnotu řídicí a následně vodící síly. Navýšení řídicí síly u přední nápravy P_1 se pohybuje mezi kolejí č. 1 a č. 2 okolo 1-2 % v závislosti na jednotlivých úsecích a jejich parametrech.

Zajímavé výsledky přinesly výpočty pro tažené soupravy v koleji č. 2 a jejich porovnání se sunutými soupravami. Tento rozdíl v řídicí síle se pohybuje z rozmezí 2-4 %. Tyto výpočty nejsou zatíženy chybou, která se při porovnávání jednotlivých kolejí vyskytuje díky rozdílným parametrům, jako jsou poloměry směrových oblouků, převýšení koleje a hlavně sklon trati, který je velkým faktorem pro výpočet odporu trati, který musí vlak překonat pro jízdu ustálenou rychlostí.

Pro posuzování ojíždění kolejnic byla k dispozici dodána měření z měřícího vozu od roku 2014 do srpna roku 2020, od Správy železnic, státní organizace. Z průběhů grafů ojetí bylo zřejmé, že některé naměřené hodnoty ojetí jsou statisticky vychýlené, a proto byly z dalšího posuzování vyřazeny. Byly vytvořeny tzv. 3D grafy, z kterých bylo jednoduché tato vychýlená měření možno odhalit. Dále se z těchto grafů dalo zjistit, mezi kterými měřeními proběhla výměna kolejnic.

Pro posuzování ojetí bylo využito lineární regrese pro jednotlivé ojetí kolejnic. Byly vypočítány jednotlivé parametry pro regresní statistiku včetně směrnice přímky, která byly proložena jednotlivými grafy ojetí, za účelem zjištění závislosti hodnot ojetí na projeté zátěži. V každém úseku a kolejnici se potvrdila hypotéza, že projíždí-li vlak směrovým obloukem s nedostatkem převýšení, je více bočně ojížděná vnější kolejnice. Hypotéza o větší svislém ojíždění vnitřní kolejnice při těžce podmínkách se potvrdila zhruba v polovině výpočtů.

Při vzájemném porovnávání výpočtu Heumannovy metody a regresní lineární statistiky se zjistilo, že přestože je hodnota řídicí síly ve většině úseku vyšší v koleji

č. 2, směrnice přímek ojetí je ve většině úseků vyšší v koleji č. 1, rozdíl těchto hodnot však není zvláště markantní a je potřeba vždy posuzovat každý úsek zvlášť. Z těchto závěrů lze usuzovat, že pokud bylo ojetí před nasazením jednotek Railjet mnohonásobně vyšší v koleji č. 1, tak nyní se zdá být ojetí v koleji č. 2 v některých úsecích poloviční než v koleji č. 1 nebo dokonce vyšší než v koleji č. 1. K nárůstu ojetí pravděpodobně došlo, ale vliv souprav Railjet se nezdá být příčinou tohoto nárůstu. Určitý rozdíl v řídicích silách mezi sunutou a taženou soupravou existuje, ale nárůst kolem 4 % by neměl mít tak velký vliv na ojždění. Dalším postupem by bylo vhodné provést stejnou analýzu na měření před rokem 2014, kdy byly na tomto úseku soupravy Railjet uvedeny do provozu, ovšem tato data nebyla k dispozici.

Je třeba dále také přihlídnout ke složení vlakové dopravy v úseku. Jednotky Railjet tvoří pouze malou část projeté zátěže v úseku.

Závěrem je nutné konstatovat, že nebyl prokázán přímý vliv sunutých souprav na vyšší ojždění kolejnic v úseku mezi stanicemi Brno – Maloměřice a Blansko. K nárůstu ojetí v koleji č. 2 pravděpodobně došlo, k zjištění příčiny by byly nutné podrobnější komplexní analýzy.

Použitá literatura

- [1] RailJet. *České dráhy, národní dopravce* [online]. České dráhy, a.s, © 2016 [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: <https://www.cd.cz/nase-vlaky/railjet/railjet/-25858/>
- [2] POHL, R. Kvazistatické hodnocení vedení vozidel v oblouku koleje: poloha podvozku v oblouku koleje. In: *Bezpečnost proti vykoľajeniu železnicných vozidiel: 1. celoštátny seminár. Zborník prednášok*. Vysoké Tatry, Starý Smokovec, hotel Bellevue: Dom techniky ČSVTS Žilina, 6.-10.11.1989, s. 5. ISBN 80-231-0018-1.
- [3] PLÁŠEK, O. *Železniční konstrukce I: modul 1, interakce vozidla a kolejové jízdní dráhy*. Brno, 2007.
- [4] POHL, R. Kvazistatické hodnocení vedení vozidel v oblouku koleje: velikost řídících sil - Heumannova metoda. In: *Bezpečnost proti vykoľajeniu železnicných vozidiel: 1. celoštátny seminár. Zborník prednášok*. Vysoké Tatry, Starý Smokovec, hotel Bellevue: Dom techniky ČSVTS Žilina, 6.-10.11.1989, s. 5. ISBN 80-231-0018-1.
- [5] PLÁŠEK, O., ZVĚŘINA, P., SVOBODA, R., MOCKOVČIAK, M. *Železniční stavby I: průvodce předmětem PO1*. Brno, 2005.
- [6] Předpis ČD V7, NADAS Praha 1982
- [7] PETZ, Michael. *Vorlesung spurführungstechnik*. 2008.
- [8] RAILJET ÖBB RAKOUSKÝ A RAILJET ČD. In: *Vysokorychlostní železnice* [online]. 2013, 30. 3. 2013 [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: <https://www.vysokorychlostni-zeleznice.cz/railjet-obb-rakousky-a-railjet-cd/>
- [9] ÖBB Railjet: The ÖBB Railjet connects Austria and Europe. *ÖBB* [online]. [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: <https://www.oebb.at/en/reiseplanung-services/im-zug/unsere-zuege/railjet>
- [10] Jezdí 230 km/h. Rakouský expres... In: *Hospodářské noviny* [online]. © 1996-2021, 10. 6. 2009 [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://domaci.ihned.cz/c1-37403980-jezdi-230-km-h-rakousky-expres-ziskal-povoleni-zastavit-v-cesku>
- [11] PLÁŠEK, O., ZVĚŘINA, P., SVOBODA, S., LANGER, V. *Železniční stavby II: modul 3, železniční svršek - kolejnice*. Brno, 2006.
- [12] Směrnice přímký. In: *Matematika pro střední školy* [online]. 2013 [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: <http://www.funkce.eu/smernice.php>
- [13] Excel – Analytické nástroje – 10. část - Regrese. In: *NaPočítači.cz* [online]. © 1997 - 2021 [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: <https://www.napocitaci.cz/33/excel-analyticke-nastroje-10-cast-regrese-uniqueidgOke4NvrWuNY54vrLeM671jKXEFQ0wsPTwVrguwZk/>
- [14] ČSN 73 6360-1. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha: část 1: Projektování*. Český normalizační institut, 2020.

- [14] Mapy. In: *Seznam.cz, a.s.* [online]. © 2021 [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: [mapy.cz](https://www.seznam.cz)
- [15] Railjet-980x300. In: *České dráhy, národní dopravce* [online]. České dráhy, a.s., © 2016 [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://www.cd.cz/images/cdosn/railjet-980x300.jpg>
- [16] Oebb-railjet_239668. In: *SalzburG* [online]. © 2020 [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: https://www.salzburg.info/deskline/infrastruktur/objekte/oebb--bahnverbindung_10581/image-thumb__103476_detail-site-header/oebb-railjet_239668.webp
- [17] 1280px-Correlation_examples2.svg.png. In: *Wikipedia* [online]. 9. května 2011 [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d4/Correlation_examples2.svg/1280px-Correlation_examples2.svg.png
- [18] Mapa-railjet-AT-SK-DE. In: *České dráhy, národní dopravce* [online]. České dráhy, a.s., © 2016 [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://www.cd.cz/images/cdosn/mapa-railjet-AT-SK-DE.svg>

Seznam obrázků

Obr. 2.1 – Trasa souprav Railjet, zdroj [18].....	12
Obr. 4.1 – Zobrazení úseků na mapě, zdroj [14].....	13
Obr. 4.2 – Zobrazení úseku č. 1 na mapě, zdroj [14].....	14
Obr. 4.3 – Zobrazení úseku č. 2 na mapě, zdroj [14].....	15
Obr. 4.4 – Zobrazení úseku č. 3 na mapě, zdroj [14].....	16
Obr. 4.5 – Zobrazení úseku č. 4 na mapě, zdroj [14].....	17
Obr. 4.6 – Zobrazení úseku č. 5 na mapě, zdroj [14].....	18
Obr. 4.7 – Zobrazení úseku č. 6 na mapě, zdroj [14].....	19
Obr. 5.1 – Zobrazení vodorovného řezu dvounápravovým podvozkem.....	20
Obr. 5.2 – Příčný řez kolejí	21
Obr. 5.3 – Polohy podvozku.....	22
Obr. 6.1 – Znázornění pohybů vozidla ve směrovém oblouku koleje a vznikajících sil	24
Obr. 6.2 – Síly působící na vozidlo při jízdě směrovým obloukem	25
Obr. 6.3 – Zjednodušený model vozidla	25
Obr. 6.4 – Vykreslení čáry třecích momentů M_T	27
Obr. 6.5 – Grafická metoda pro statickou polohu	28
Obr. 6.6 – Grafická metoda pro statickou polohu s vnější silou F	30
Obr. 6.7 – Grafická metoda pro vzpříčenou polohu s vnější silou F	32
Obr. 7.1 – Převýšení	33
Obr. 7.2 – Silový rozdíl mezi taženou a tlačnou soupravou	34
Obr. 7.3 – Rozklad síly.....	36
Obr. 7.4 – Výpočet úhlu β	36
Obr. 7.5 – Souprava Railjet (modrá), zdroj [15].....	38
Obr. 7.6 – Souprava Railjet (červená), zdroj [16].....	38
Obr. 8.1 – Příklady ojetí hlavy kolejnic.....	52
Obr. 9.1 – 3D graf svislého levého ojetí koleje č. 2 v úseku 1.....	54
Obr. 9.2 – 3D graf svislého pravého ojetí koleje č. 1 v úseku 1.....	54
Obr. 9.3 – 3D graf svislého levého ojetí koleje č. 1 v úseku 1.....	55
Obr. 9.4 – Graf projeté zátěže pro kolej č. 1	56
Obr. 9.5 – Graf projeté zátěže pro kolej č. 2	56
Obr. 9.6 – Vyjádření hodnot korelačních koeficientů, zdroj [17]	57
Obr. 9.7 – Graf směrníc přímk ojetí pro úseky č. 1, 2a, 2b a 3	58
Obr. 9.8 – Graf směrníc přímk ojetí pro úseky č. 4, 5 a 6.....	58
Obr. 9.9 – Graf průměrného ojetí – úsek 1, kolej č. 1, BL	60
Obr. 9.10 – Graf průměrného ojetí – úsek 1, kolej č. 1, SL.....	60
Obr. 9.11 – Graf průměrného ojetí – úsek 1, kolej č. 1, BP	60
Obr. 9.12 – Graf průměrného ojetí – úsek 1, kolej č. 1, SP	60
Obr. 9.13 – Graf průměrného ojetí – úsek 1, kolej č. 2, BL	62
Obr. 9.14 – Graf průměrného ojetí – úsek 1, kolej č. 2, SL.....	62
Obr. 9.15 – Graf průměrného ojetí – úsek 1, kolej č. 2, BP	62
Obr. 9.16 – Graf průměrného ojetí – úsek 1, kolej č. 2, SP	62
Obr. 9.17 – Graf průměrného ojetí – úsek 2a, kolej č. 1, BL	64
Obr. 9.18 – Graf průměrného ojetí – úsek 2a, kolej č. 1, SL	64
Obr. 9.19 – Graf průměrného ojetí – úsek 2a, kolej č. 1, BP	64
Obr. 9.20 – Graf průměrného ojetí – úsek 2a, kolej č. 1, SP	64
Obr. 9.21 – Graf průměrného ojetí – úsek 2a, kolej č. 2, BL	66
Obr. 9.22 – Graf průměrného ojetí – úsek 2a, kolej č. 2, SL	66
Obr. 9.23 – Graf průměrného ojetí – úsek 2a, kolej č. 2, BP.....	66

Obr. 9.24 – Graf průměrného ojetí – úsek 2a, kolej č. 2, SP	66
Obr. 9.25 – Graf průměrného ojetí – úsek 2b, kolej č. 1, BL	68
Obr. 9.26 – Graf průměrného ojetí – úsek 2b, kolej č. 1, SL	68
Obr. 9.27 – Graf průměrného ojetí – úsek 2b, kolej č. 1, BP	68
Obr. 9.28 – Graf průměrného ojetí – úsek 2b, kolej č. 1, SP	68
Obr. 9.29 – Graf průměrného ojetí – úsek 2b, kolej č. 2, BL	70
Obr. 9.30 – Graf průměrného ojetí – úsek 2b, kolej č. 2, SL	70
Obr. 9.31 – Graf průměrného ojetí – úsek 2b, kolej č. 2, BP	70
Obr. 9.32 – Graf průměrného ojetí – úsek 2b, kolej č. 2, SP	70
Obr. 9.33 – Graf průměrného ojetí – úsek 3, kolej č. 1, BL	72
Obr. 9.34 – Graf průměrného ojetí – úsek 3, kolej č. 1, SL	72
Obr. 9.35 – Graf průměrného ojetí – úsek 3, kolej č. 1, BP	72
Obr. 9.36 – Graf průměrného ojetí – úsek 3, kolej č. 1, SP	72
Obr. 9.37 – Graf průměrného ojetí – úsek 3, kolej č. 2, BL	74
Obr. 9.38 – Graf průměrného ojetí – úsek 3, kolej č. 2, SL	74
Obr. 9.39 – Graf průměrného ojetí – úsek 3, kolej č. 2, BP	74
Obr. 9.40 – Graf průměrného ojetí – úsek 3, kolej č. 2, SP	74
Obr. 9.41 – Graf průměrného ojetí – úsek 4, kolej č. 1, BL	76
Obr. 9.42 – Graf průměrného ojetí – úsek 4, kolej č. 1, SL	76
Obr. 9.43 – Graf průměrného ojetí – úsek 4, kolej č. 1, BP	76
Obr. 9.44 – Graf průměrného ojetí – úsek 4, kolej č. 1, SP	76
Obr. 9.45 – Graf průměrného ojetí – úsek 4, kolej č. 2, BL	78
Obr. 9.46 – Graf průměrného ojetí – úsek 4, kolej č. 2, SL	78
Obr. 9.47 – Graf průměrného ojetí – úsek 4, kolej č. 2, BP	78
Obr. 9.48 – Graf průměrného ojetí – úsek 4, kolej č. 2, SP	78
Obr. 9.49 – Graf průměrného ojetí – úsek 5, kolej č. 1, BL	80
Obr. 9.50 – Graf průměrného ojetí – úsek 5, kolej č. 1, SL	80
Obr. 9.51 – Graf průměrného ojetí – úsek 5, kolej č. 1, BP	80
Obr. 9.52 – Graf průměrného ojetí – úsek 5, kolej č. 1, SP	80
Obr. 9.53 – Graf průměrného ojetí – úsek 5a, kolej č. 2, BL	82
Obr. 9.54 – Graf průměrného ojetí – úsek 5a, kolej č. 2, SL	82
Obr. 9.55 – Graf průměrného ojetí – úsek 5a, kolej č. 2, BP	82
Obr. 9.56 – Graf průměrného ojetí – úsek 5a, kolej č. 2, SP	82
Obr. 9.57 – Graf průměrného ojetí – úsek 5b, kolej č. 2, BL	84
Obr. 9.58 – Graf průměrného ojetí – úsek 5b, kolej č. 2, SL	84
Obr. 9.59 – Graf průměrného ojetí – úsek 5b, kolej č. 2, BP	84
Obr. 9.60 – Graf průměrného ojetí – úsek 5b, kolej č. 2, SP	84
Obr. 9.61 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 1, BL	86
Obr. 9.62 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 1, SL	86
Obr. 9.63 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 1, BP	86
Obr. 9.64 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 1, SP	86
Obr. 9.65 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 2, SP	88
Obr. 9.66 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 2, SP	88
Obr. 9.67 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 2, SP	88
Obr. 9.68 – Graf průměrného ojetí – úsek 6, kolej č. 2, SP	88
Obr. 10.1 – Graf závislosti směrnice bočního ojetí na řídicí síle	92
Obr. 15.1 – 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 1, BL	104
Obr. 15.2 – 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 1, SL	104
Obr. 15.3 – 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 1, BP	105
Obr. 15.4 – 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 1, SP	105
Obr. 15.5 – 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 2, BL	106

Obr. 15.6 – 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 2, SL.....	106
Obr. 15.7– 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 2, BP.....	107
Obr. 15.8 – 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 2, SP	107
Obr. 15.9 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 1, BL	108
Obr. 15.10 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 1, SL	108
Obr. 15.11 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 1, BP.....	109
Obr. 15.12 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 1, SP	109
Obr. 15.13 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 2, BL.....	110
Obr. 15.14 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 2, SL	110
Obr. 15.15 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 2, BP.....	111
Obr. 15.16 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 2, SP	111
Obr. 15.17 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 1, BL	112
Obr. 15.18 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 1, SL	112
Obr. 15.19 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 1, BP.....	113
Obr. 15.20 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 1, SP	113
Obr. 15.21 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 2, BL.....	114
Obr. 15.22 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 2, SL	114
Obr. 15.23 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 2, BP.....	115
Obr. 15.24 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 2, SP	115
Obr. 15.25 – 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 1, BL.....	116
Obr. 15.26 – 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 1, SL	116
Obr. 15.27 – 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 1, BP.....	117
Obr. 15.28 – 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 1, SP	117
Obr. 15.29 – 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 2, BL.....	118
Obr. 15.30 – 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 2, SL	118
Obr. 15.31 – 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 2, BP.....	119
Obr. 15.32 – 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 2, SP	119
Obr. 15.33 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 1, BL.....	120
Obr. 15.34 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 1, SL	120
Obr. 15.35 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 1, BP.....	121
Obr. 15.36 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 1, SP	121
Obr. 15.37 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 2, BL.....	122
Obr. 15.38 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 2, SL	122
Obr. 15.39 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 2, BP.....	123
Obr. 15.40 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 2, SP	123
Obr. 15.41 – 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 1, BL.....	124
Obr. 15.42 – 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 1, SL	124
Obr. 15.43– 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 1, BP.....	125
Obr. 15.44 – 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 1, SP	125
Obr. 15.45 – 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 2, BL.....	126
Obr. 15.46 – 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 2, SL	126
Obr. 15.47 – 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 2, BP.....	127
Obr. 15.48 – 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 2, SP	127

Seznam tabulek

Tabulka 4.1 – Informace o úseku č. 1 – 1. část	14
Tabulka 4.2 – Informace o úseku č. 1 – 2. část	14
Tabulka 4.3 – Informace o úseku č. 2 – 1. část	15
Tabulka 4.4 – Informace o úseku č. 2 – 2. část	15
Tabulka 4.5 – Informace o úseku č. 3 – 1. část	16
Tabulka 4.6 – Informace o úseku č. 3 – 2. část	16
Tabulka 4.7 – Informace o úseku č. 4 – 1. část	17
Tabulka 4.8 – Informace o úseku č. 4 – 2. část	17
Tabulka 4.9 – Informace o úseku č. 5 – 1. část	18
Tabulka 4.10 – Informace o úseku č. 5 – 2. část	18
Tabulka 4.11 – Informace o úseku č. 6 – 1. část	19
Tabulka 4.12 – Informace o úseku č. 6 – 2. část	19
Tabulka 7.1 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 1 – 1. část	39
Tabulka 7.2 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 1 – 2. část	39
Tabulka 7.3 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 1 – 3. část	39
Tabulka 7.4 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 1	41
Tabulka 7.5 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 1, kolej č. 2, tažená souprava	41
Tabulka 7.6 – Porovnání výsledků, úsek 1	42
Tabulka 7.7 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 2 – 1. část	42
Tabulka 7.8 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 2 – 2. část	43
Tabulka 7.9 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 2 – 3. část	43
Tabulka 7.10 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 2	43
Tabulka 7.11 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 2, kolej č. 2, tažená souprava	44
Tabulka 7.12 – Porovnání výsledků, úsek 2a	44
Tabulka 7.13 – Porovnání výsledků, úsek 2b	44
Tabulka 7.14 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 3 – 1. část	45
Tabulka 7.15 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 3 – 2. část	45
Tabulka 7.16 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 3 – 3. část	45
Tabulka 7.17 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 3	45
Tabulka 7.18 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 3, kolej č. 2, tažená souprava	45
Tabulka 7.19 – Porovnání výsledků, úsek 3	46
Tabulka 7.20 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 4 – 1. část	46
Tabulka 7.21 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 4 – 2. část	46
Tabulka 7.22 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 4 – 3. část	46
Tabulka 7.23 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 4	47
Tabulka 7.24 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 4, kolej č. 2, tažená souprava	47
Tabulka 7.25 – Porovnání výsledků, úsek 4	47
Tabulka 7.26 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 5 – 1. část	48
Tabulka 7.27 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 5 – 2. část	48
Tabulka 7.28 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 5 – 3. část	48
Tabulka 7.29 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 5	49
Tabulka 7.30 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 5, kolej č. 2, tažená souprava	49
Tabulka 7.31 – Porovnání výsledků, úsek 5	49
Tabulka 7.32 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 5, kolej č. 1, V_{130}	50
Tabulka 7.33 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 6 – 1. část	50
Tabulka 7.34 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 6 – 2. část	50
Tabulka 7.35 – Výpočet jízdnic a traťových odporů pro úsek č. 6 – 3. část	50
Tabulka 7.36 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 6	51

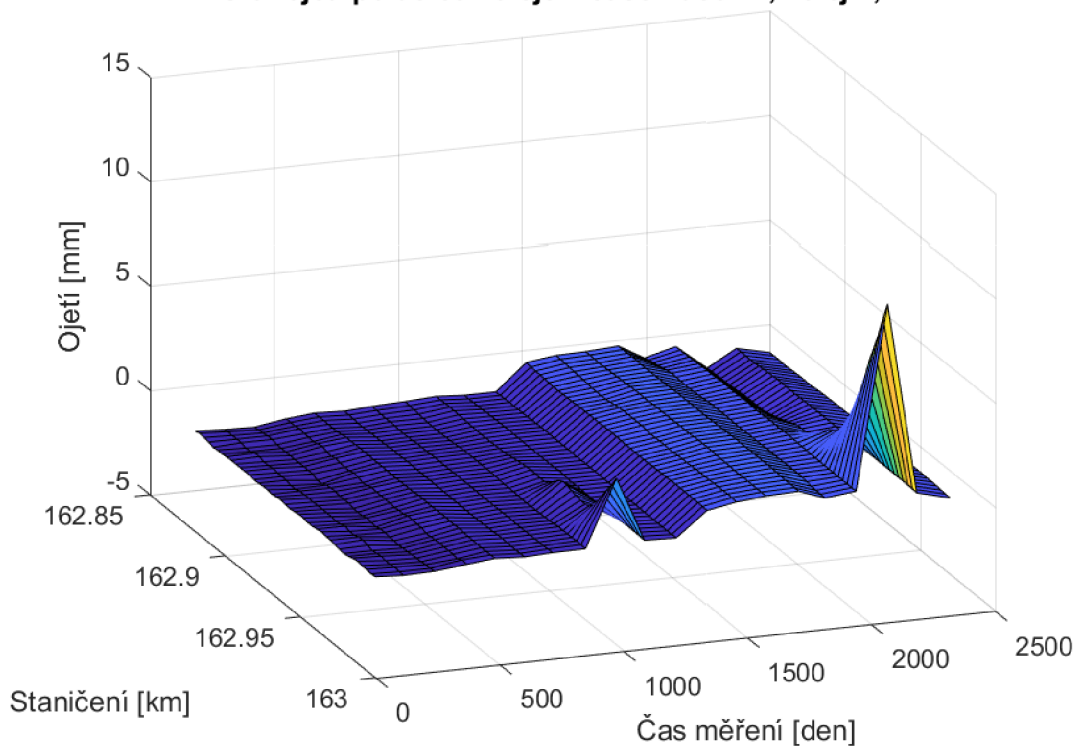
Tabulka 7.37 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 6, kolej č. 2, tažená souprava	51
Tabulka 7.38 – Porovnání výsledků, úsek 6	51
Tabulka 7.39 – Výsledky Heumannova metoda, úsek 6, kolej č. 1, V_{130}	51
Tabulka 9.1 – Základní údaje o úseku č. 1, kolej 1 – 1. část	59
Tabulka 9.2 – Základní údaje o úseku č. 1, kolej 1 – 2. část	59
Tabulka 9.3 – Výsledky regresní statistiky, úsek 1, kolej č. 1	59
Tabulka 9.4 – Základní údaje o úseku č. 1, kolej 2 – 1. část	61
Tabulka 9.5 – Základní údaje o úseku č. 1, kolej 2 – 2. část	61
Tabulka 9.6 – Výsledky regresní statistiky, úsek 1, kolej č. 2	61
Tabulka 9.7 – Základní údaje o úseku č. 2a, kolej 1 – 1. část	63
Tabulka 9.8 – Základní údaje o úseku č. 2a, kolej 1 – 2. část	63
Tabulka 9.9 – Výsledky regresní statistiky, úsek 2a, kolej č. 1	63
Tabulka 9.10 – Základní údaje o úseku č. 2a, kolej 2 – 1. část	65
Tabulka 9.11 – Základní údaje o úseku č. 2a, kolej 2 – 2. část	65
Tabulka 9.12 – Výsledky regresní statistiky, úsek 2a, kolej č. 2	65
Tabulka 9.13 – Základní údaje o úseku č. 2b, kolej 1 – 1. část	67
Tabulka 9.14 – Základní údaje o úseku č. 2b, kolej 1 – 2. část	67
Tabulka 9.15 – Výsledky regresní statistiky, úsek 2b, kolej č. 1	67
Tabulka 9.16 – Základní údaje o úseku č. 2b, kolej 2 – 1. část	69
Tabulka 9.17 – Základní údaje o úseku č. 2b, kolej 2 – 2. část	69
Tabulka 9.18 – Výsledky regresní statistiky, úsek 2b, kolej č. 2	69
Tabulka 9.19 – Základní údaje o úseku č. 3, kolej 1 – 1. část	71
Tabulka 9.20 – Základní údaje o úseku č. 3, kolej 1 – 2. část	71
Tabulka 9.21 – Výsledky regresní statistiky, úsek 3, kolej č. 1	71
Tabulka 9.22 – Základní údaje o úseku č. 3, kolej 2 – 1. část	73
Tabulka 9.23 – Základní údaje o úseku č. 3, kolej 2 – 2. část	73
Tabulka 9.24 – Výsledky regresní statistiky, úsek 3, kolej č. 2	73
Tabulka 9.25 – Základní údaje o úseku č. 4, kolej 1 – 1. část	75
Tabulka 9.26 – Základní údaje o úseku č. 4, kolej 1 – 2. část	75
Tabulka 9.27 – Výsledky regresní statistiky, úsek 4, kolej č. 1	75
Tabulka 9.28 – Základní údaje o úseku č. 4, kolej 2 – 1. část	77
Tabulka 9.29 – Základní údaje o úseku č. 4, kolej 2 – 2. část	77
Tabulka 9.30 – Výsledky regresní statistiky, úsek 4, kolej č. 2	77
Tabulka 9.31 – Základní údaje o úseku č. 5, kolej 1 – 1. část	79
Tabulka 9.32 – Základní údaje o úseku č. 5, kolej 1 – 2. část	79
Tabulka 9.33 – Výsledky regresní statistiky, úsek 5, kolej č. 1	79
Tabulka 9.34 – Základní údaje o úseku č. 5a, kolej 2 – 1. část	81
Tabulka 9.35 – Základní údaje o úseku č. 5a, kolej 2 – 2. část	81
Tabulka 9.36 – Výsledky regresní statistiky, úsek 5a, kolej č. 2	81
Tabulka 9.37 – Základní údaje o úseku č. 5b, kolej 2 – 1. část	83
Tabulka 9.38 – Základní údaje o úseku č. 5b, kolej 2 – 2. část	83
Tabulka 9.39 – Výsledky regresní statistiky, úsek 5b, kolej č. 2	83
Tabulka 9.40 – Základní údaje o úseku č. 6, kolej 1 – 1. část	85
Tabulka 9.41 – Základní údaje o úseku č. 6, kolej 1 – 2. část	85
Tabulka 9.42 – Výsledky regresní statistiky, úsek 6, kolej č. 1	85
Tabulka 9.43 – Základní údaje o úseku č. 6, kolej 2 – 1. část	87
Tabulka 9.44 – Základní údaje o úseku č. 6, kolej 2 – 2. část	87
Tabulka 9.45 – Výsledky regresní statistiky, úsek 6, kolej č. 2	87
Tabulka 10.1 – Porovnání výsledku, úsek 1	89
Tabulka 10.2 – Porovnání výsledku, úsek 2a	89
Tabulka 10.3 – Porovnání výsledku, úsek 2b	90

Opotřebení kolejnic v úsecích se směrovými oblouky malého poloměru

Tabulka 10.4 – Porovnání výsledku, úsek 3	90
Tabulka 10.5 – Porovnání výsledku, úsek 4	90
Tabulka 10.6 – Porovnání výsledku, úsek 5	91
Tabulka 10.7 – Porovnání výsledku, úsek 6	91

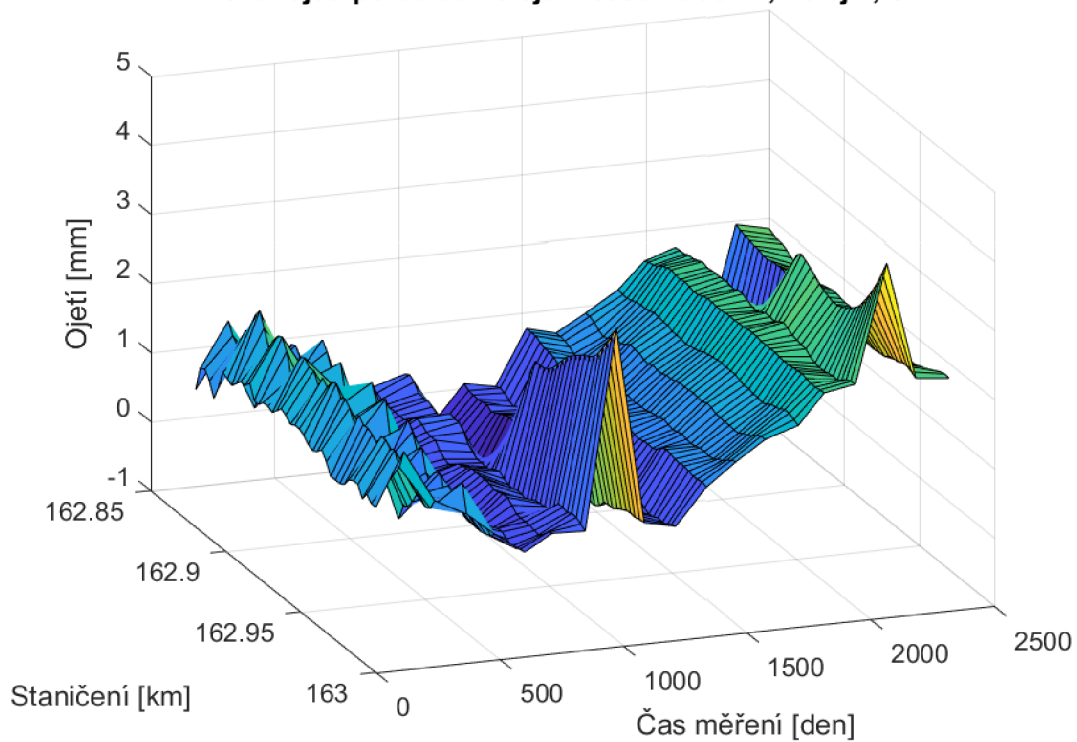
Přílohy

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 1, kolej 1, BL

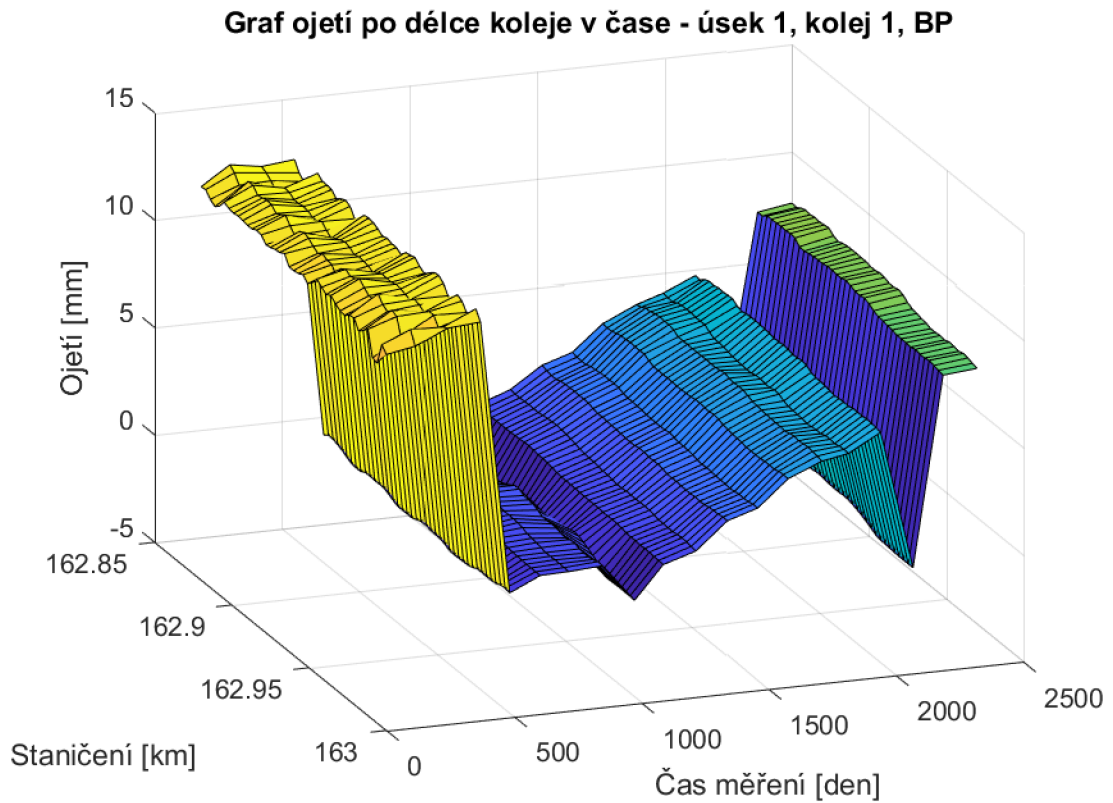


Obr. 15.1 – 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 1, BL

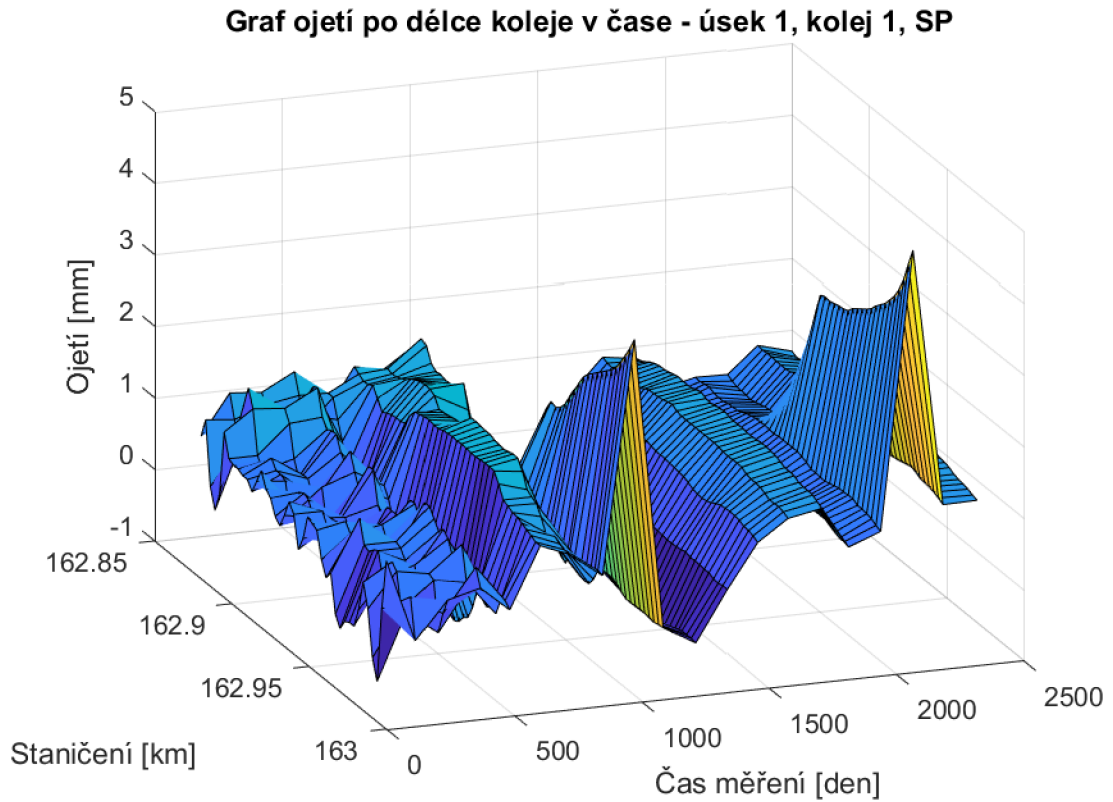
Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 1, kolej 1, SL



Obr. 15.2 – 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 1, SL

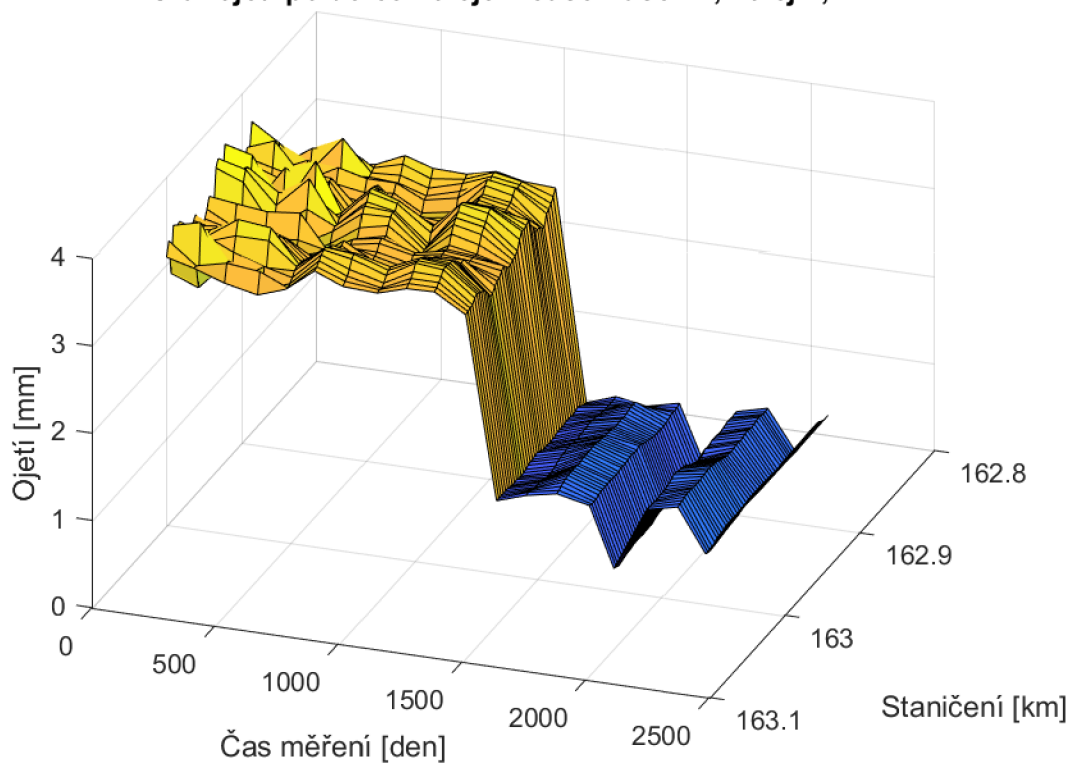


Obr. 15.3 – 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 1, BP



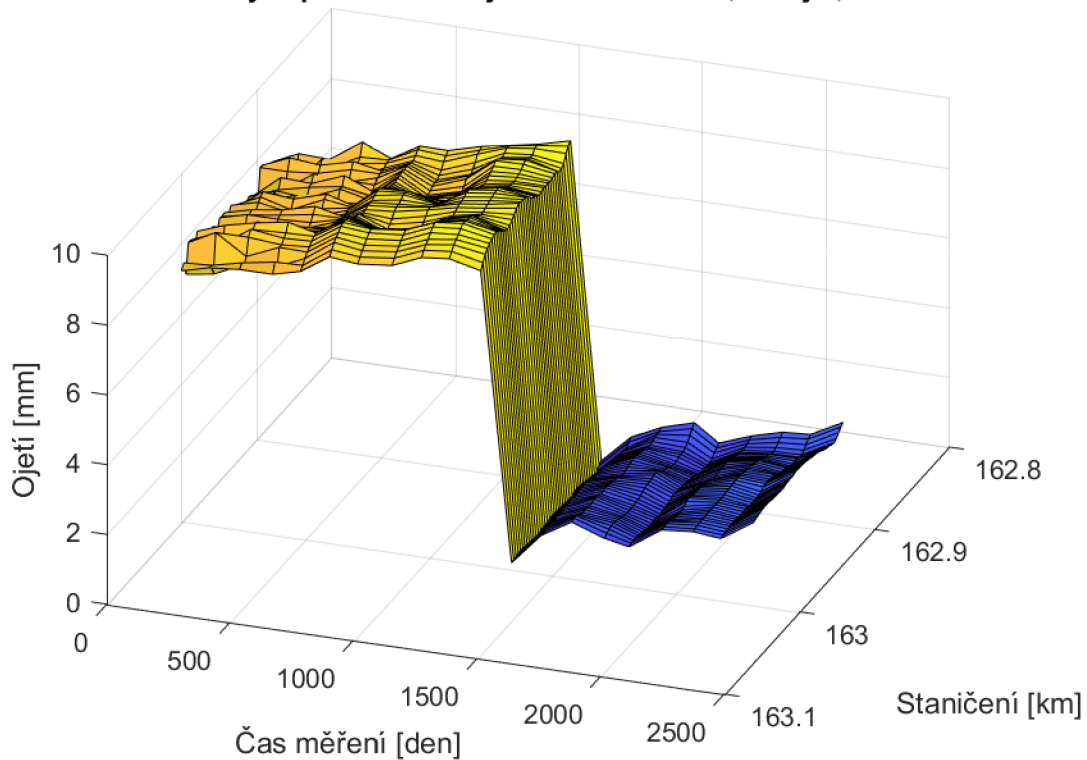
Obr. 15.4 – 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 1, SP

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 1, kolej 2, BL



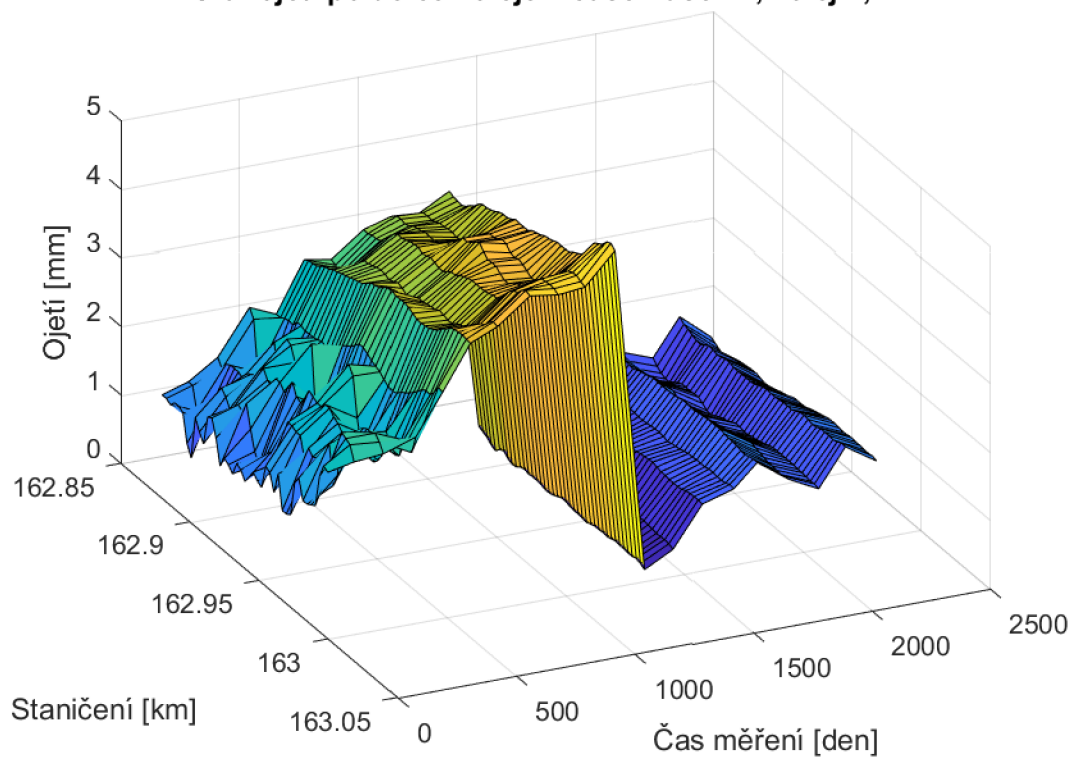
Obr. 15.5 – 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 2, BL

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 1, kolej 2, SL



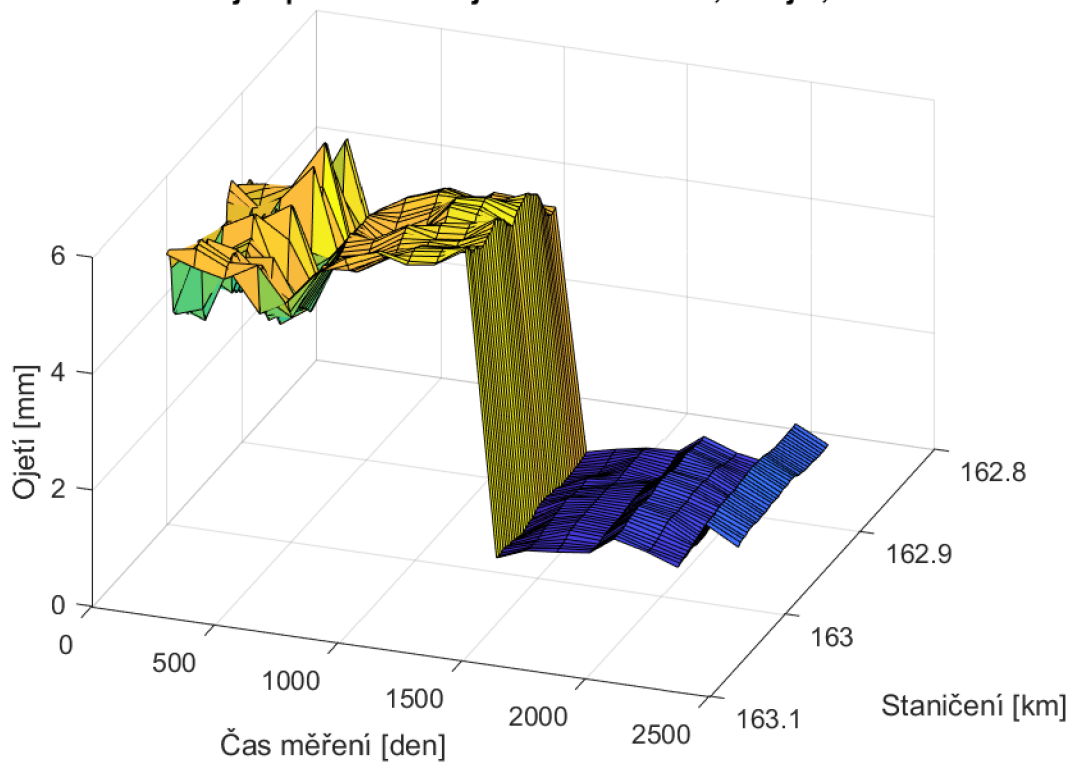
Obr. 15.6 – 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 2, SL

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 1, kolej 2, BP



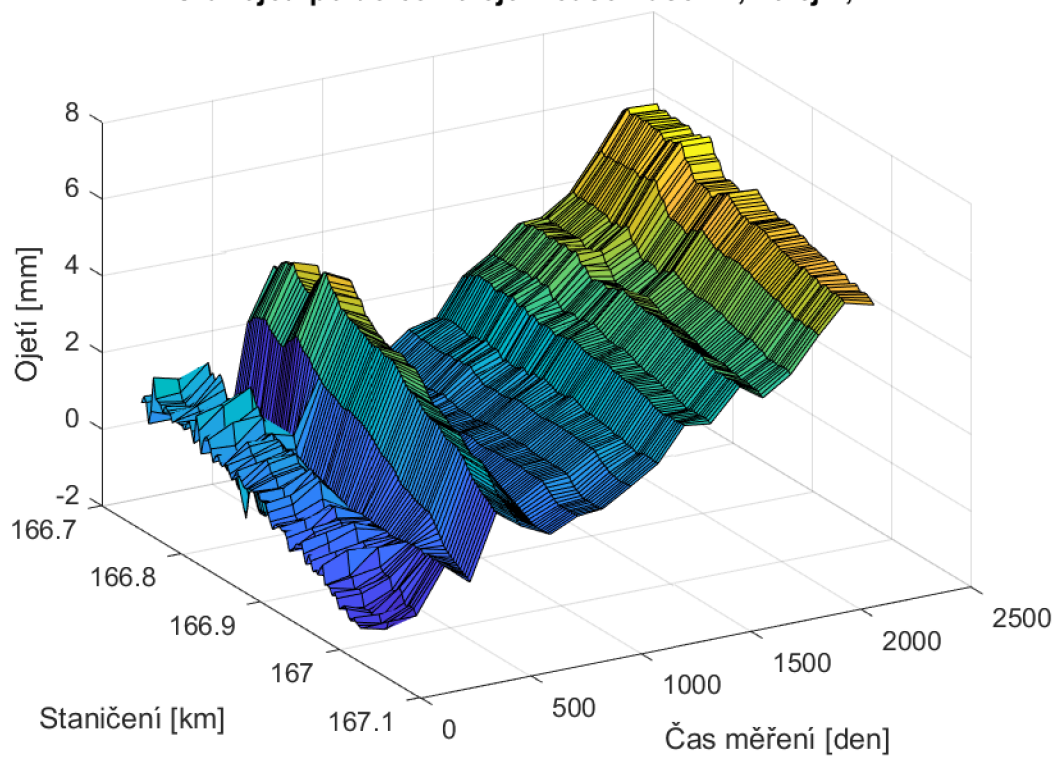
Obr. 15.7- 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 2, BP

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 1, kolej 2, SP



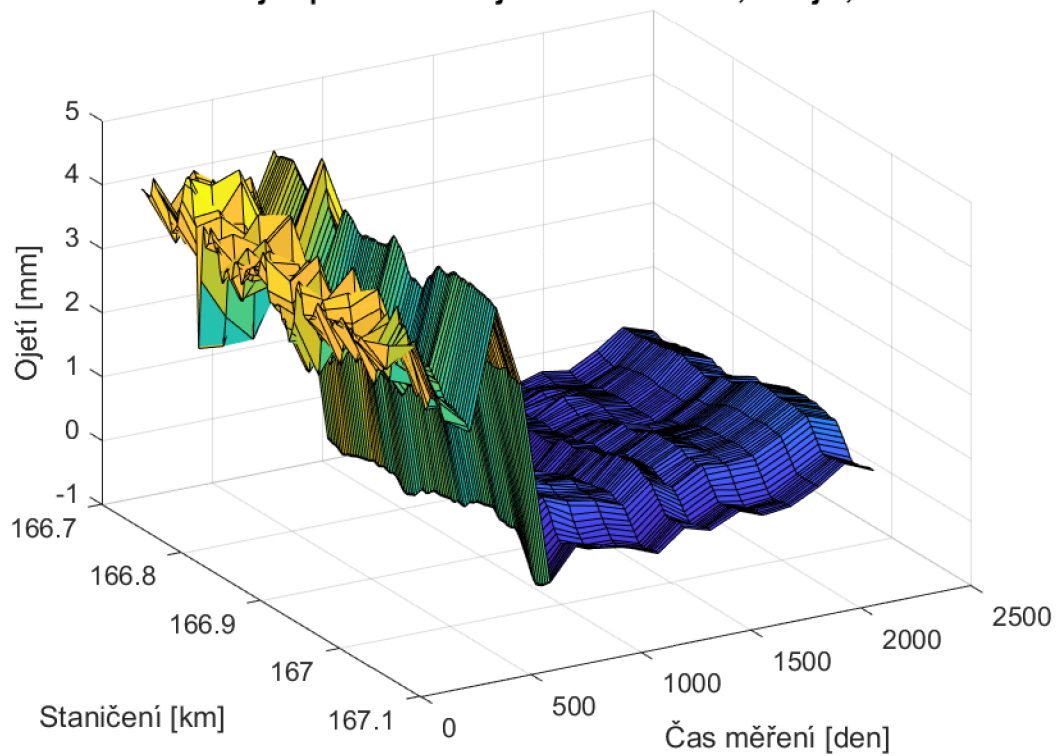
Obr. 15.8 - 3D graf ojetí, úsek 1, kolej 2, SP

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 2, kolej 1, BL



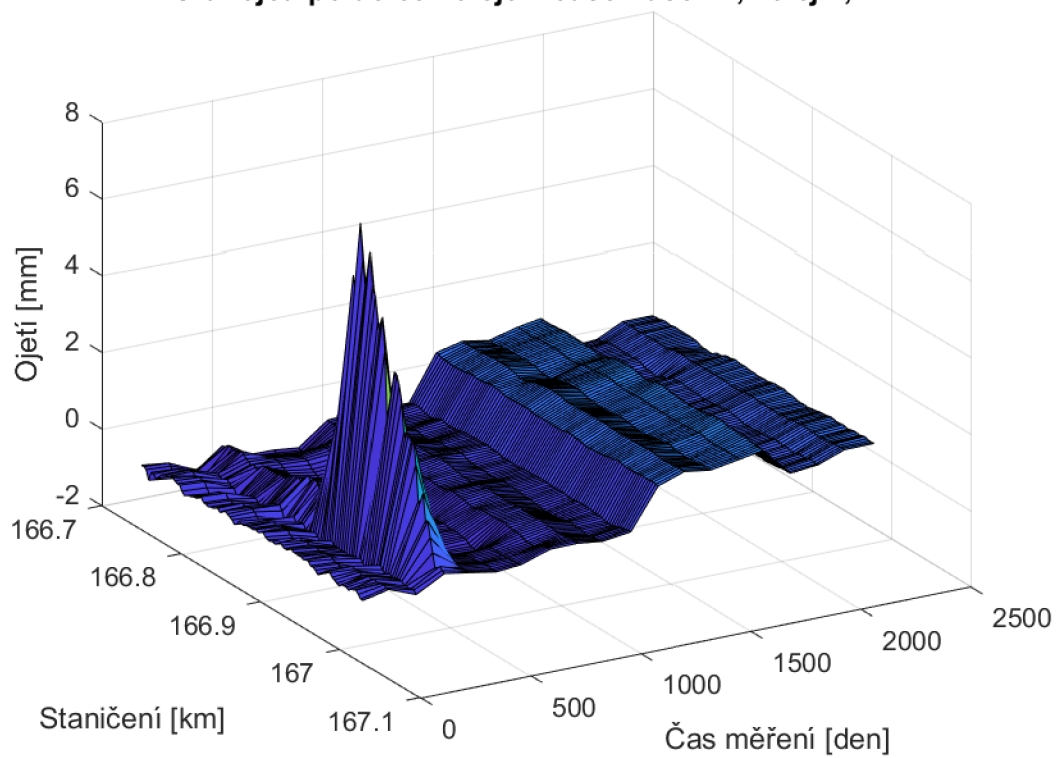
Obr. 15.9 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 1, BL

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 2, kolej 1, SL



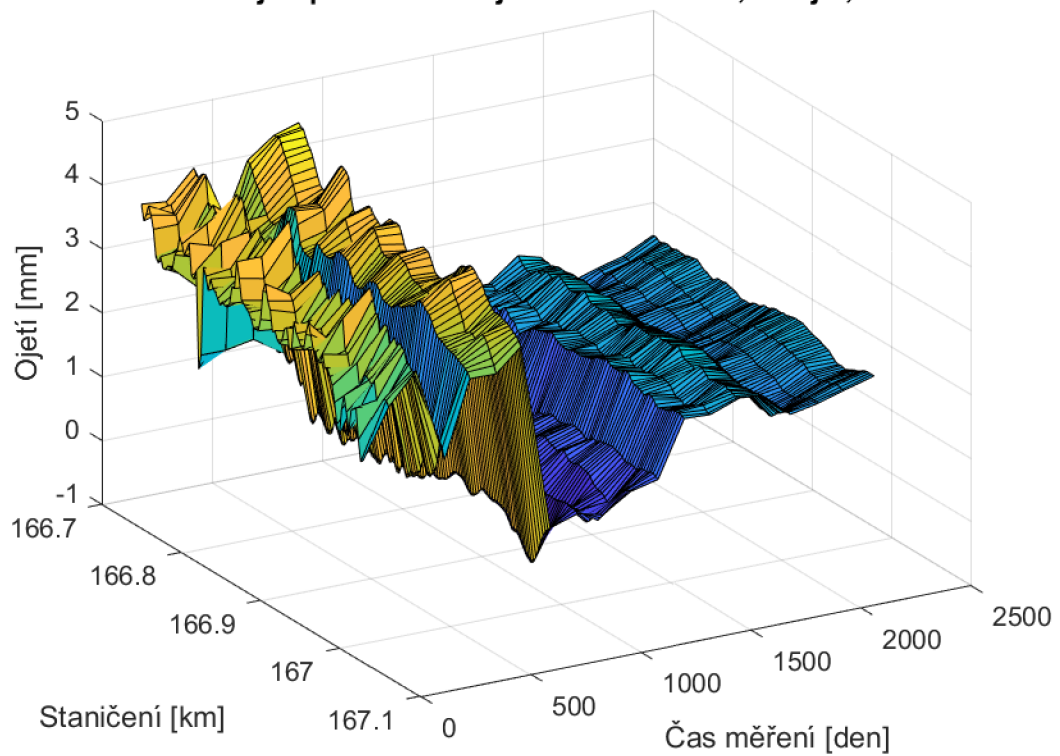
Obr. 15.10 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 1, SL

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 2, kolej 1, BP



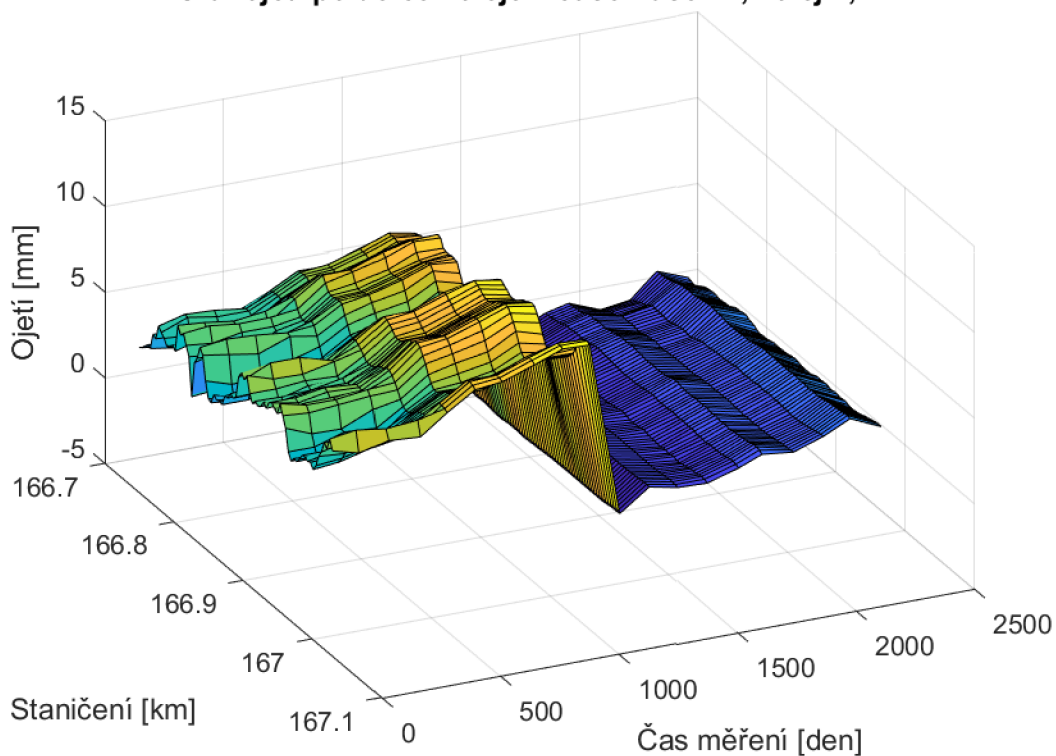
Obr. 15.11 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 1, BP

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 2, kolej 1, SP



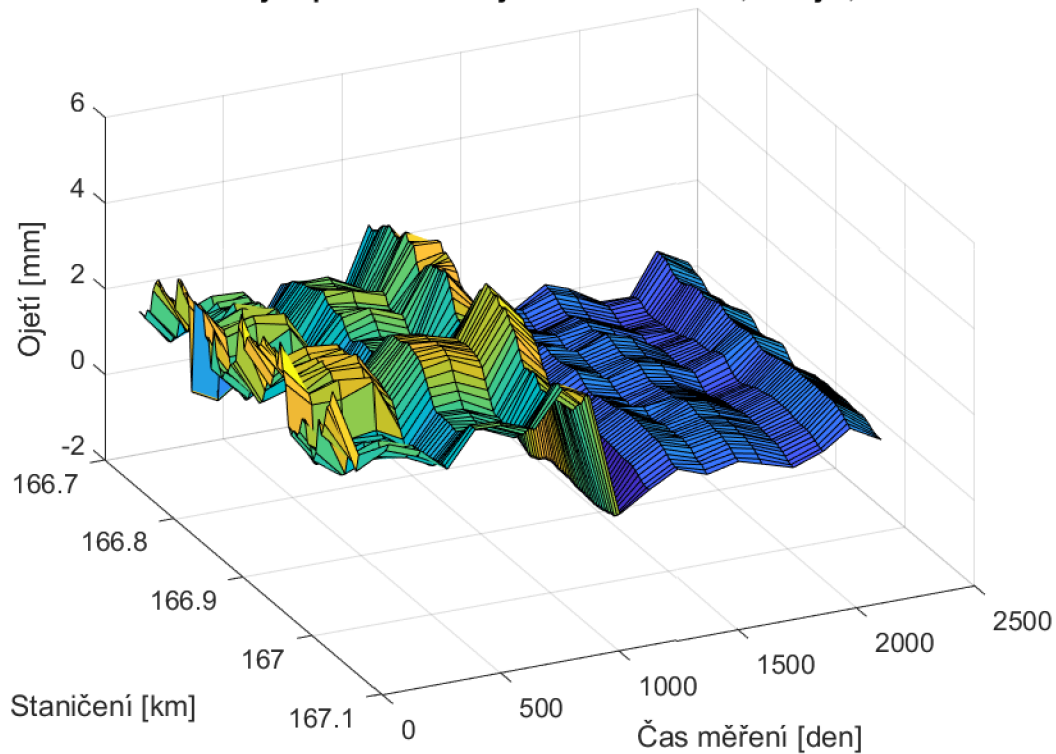
Obr. 15.12 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 1, SP

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 2, kolej 2, BL



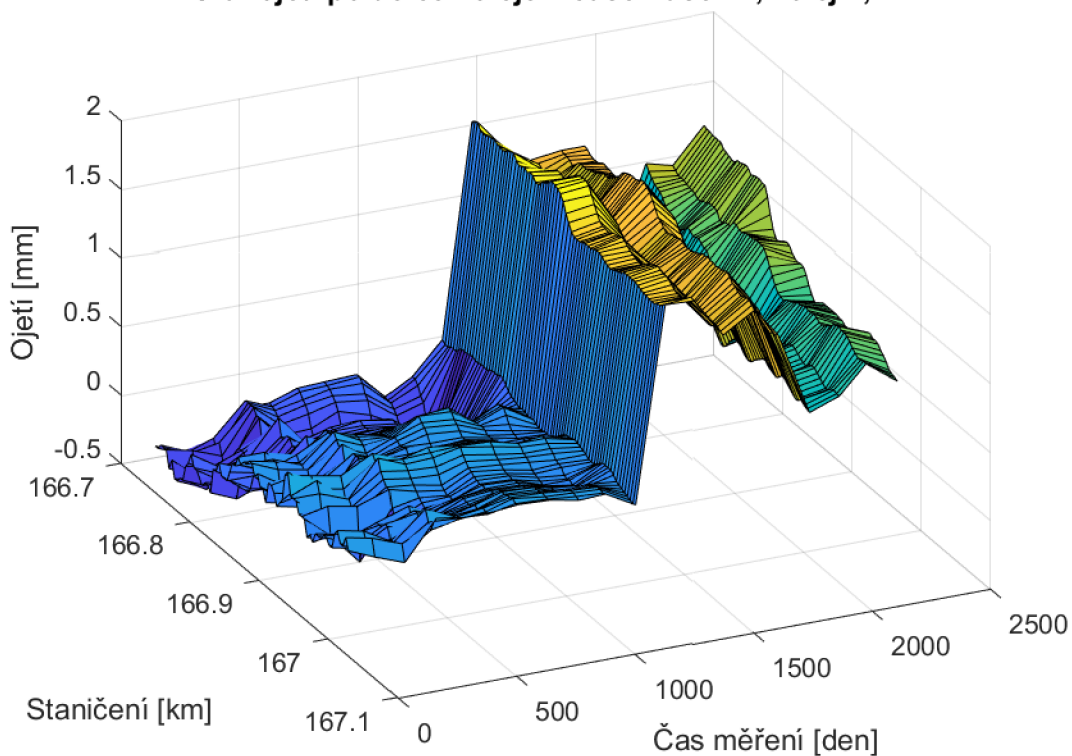
Obr. 15.13 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 2, BL

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 2, kolej 2, SL



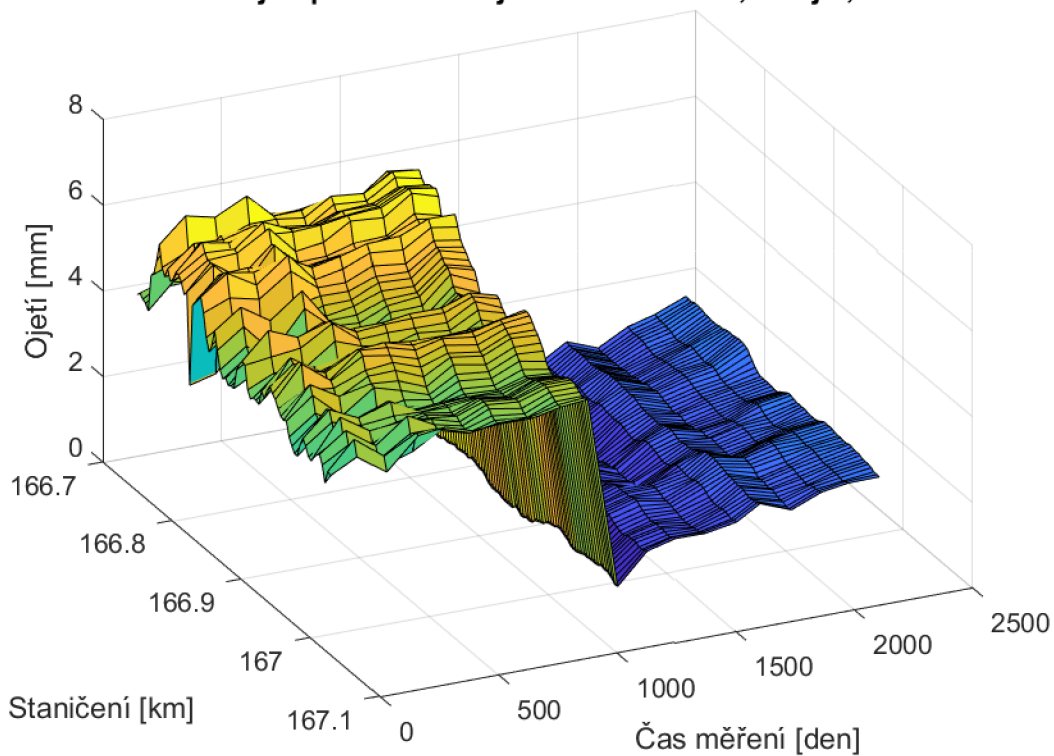
Obr. 15.14 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 2, SL

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 2, kolej 2, BP

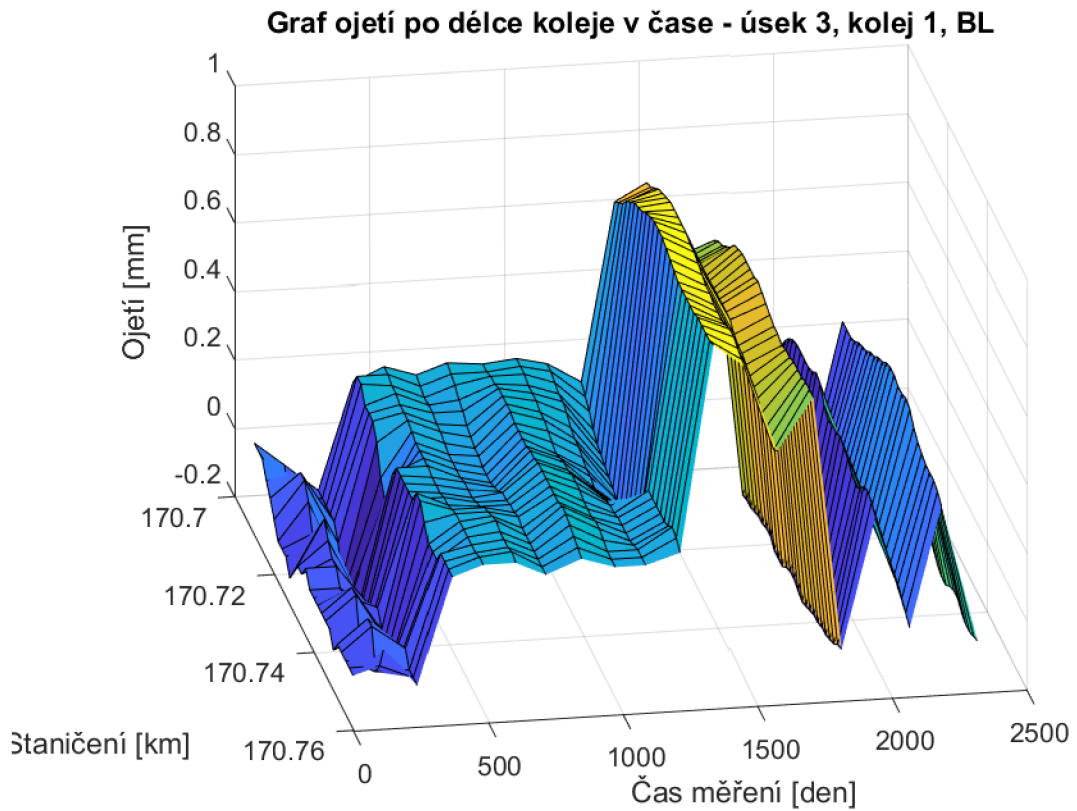


Obr. 15.15 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 2, BP

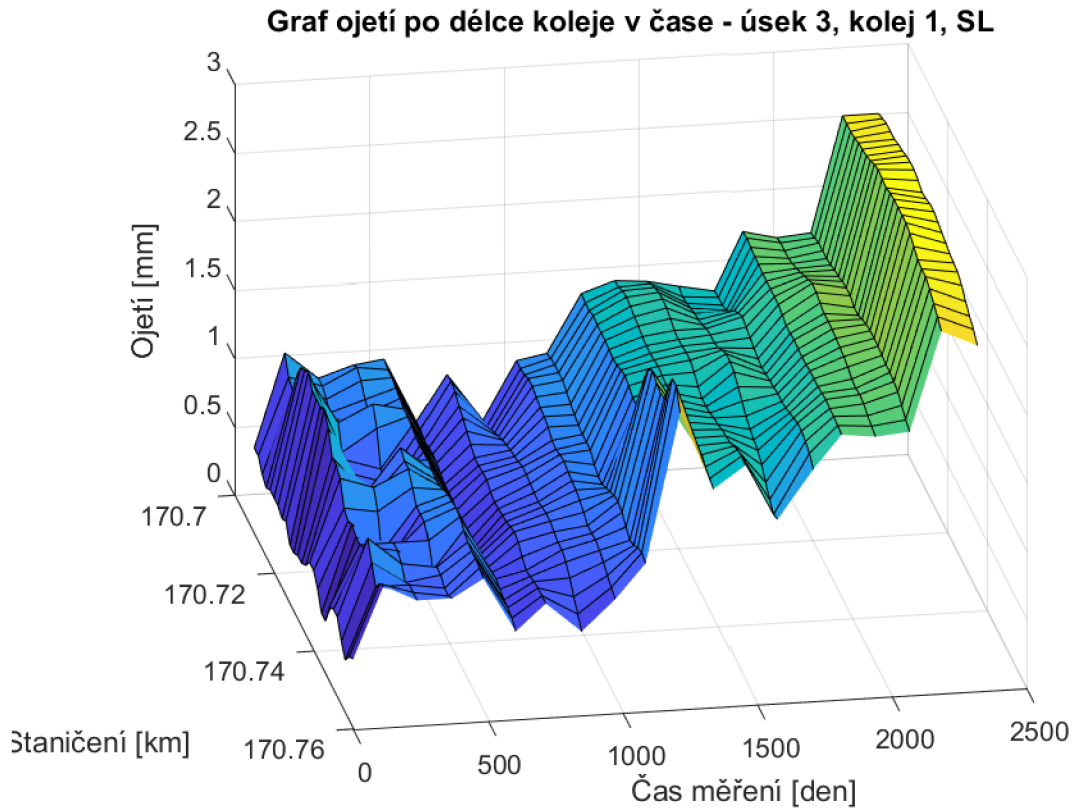
Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 2, kolej 2, SP



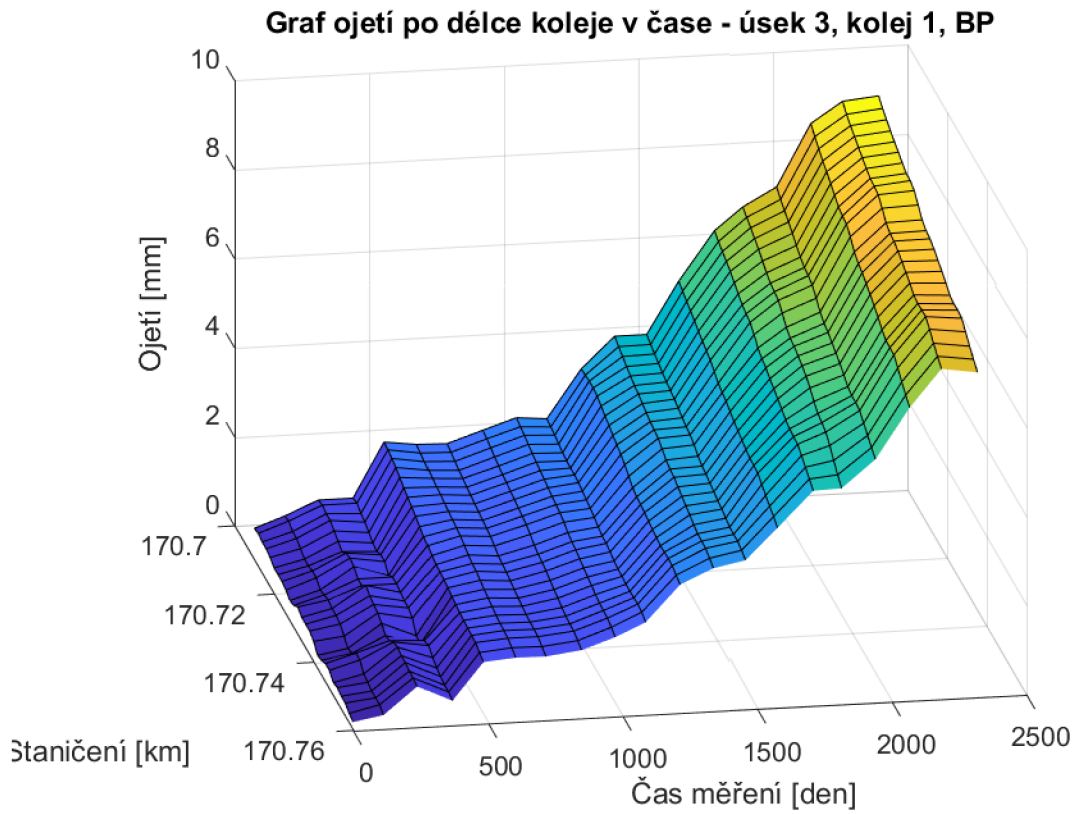
Obr. 15.16 – 3D graf ojetí, úsek 2, kolej 2, SP



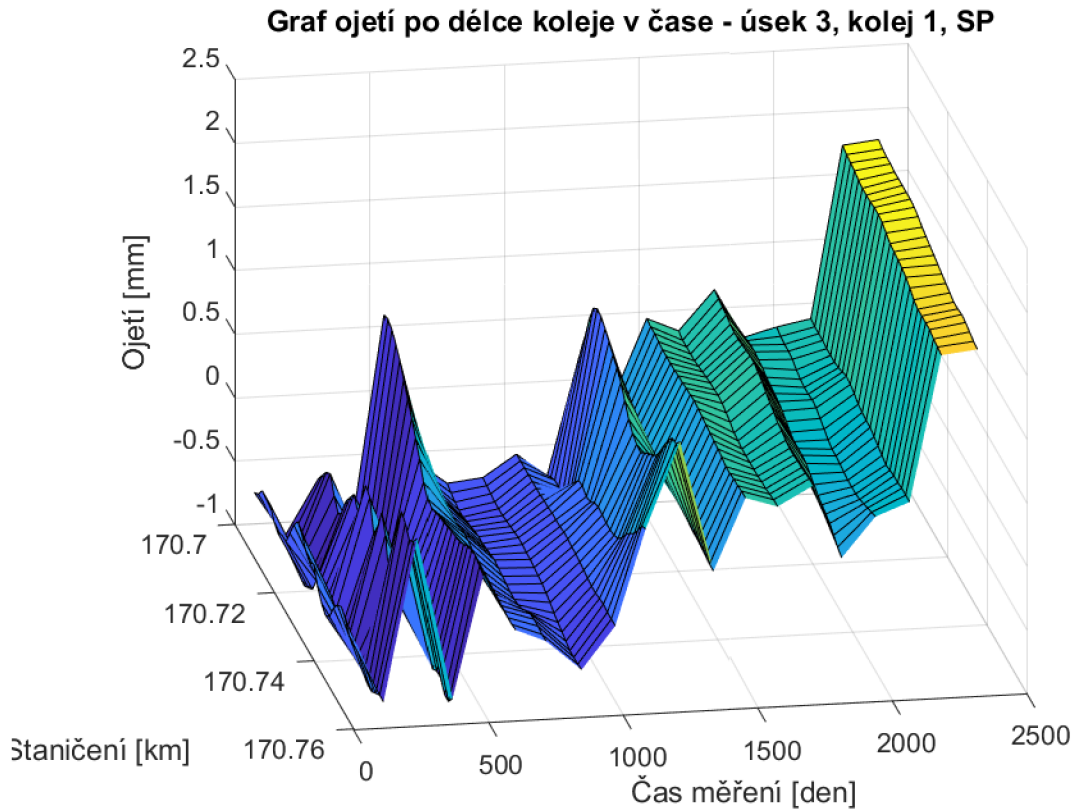
Obr. 15.17 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 1, BL



Obr. 15.18 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 1, SL

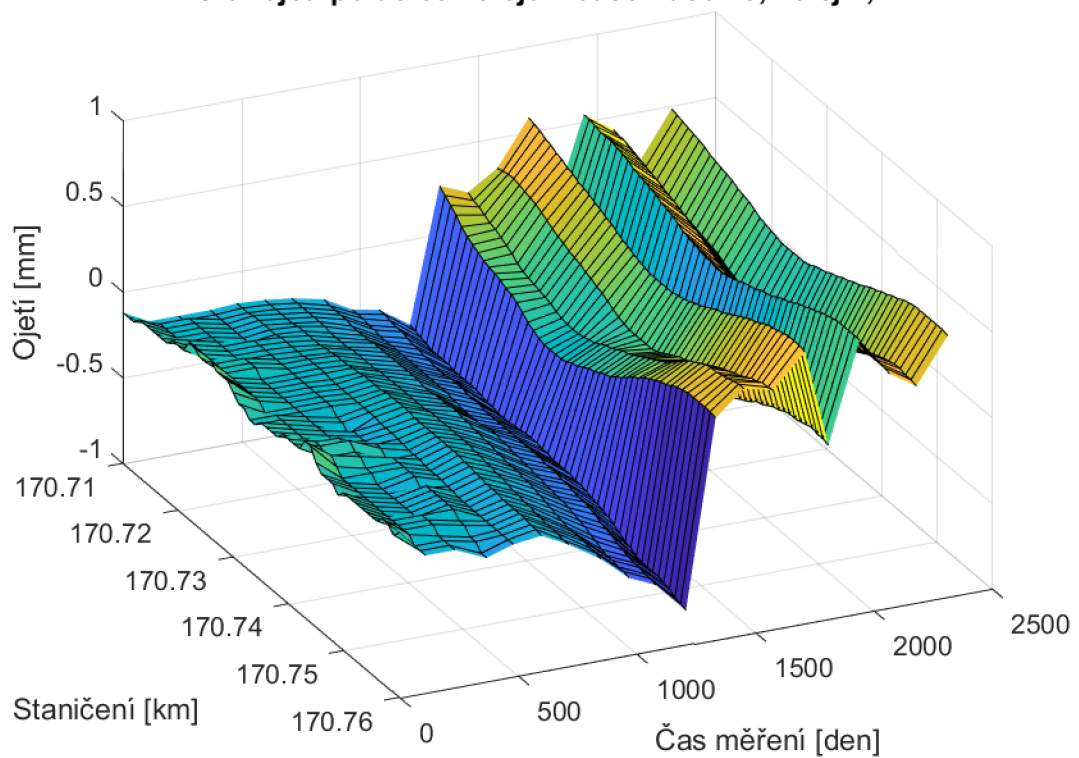


Obr. 15.19 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 1, BP



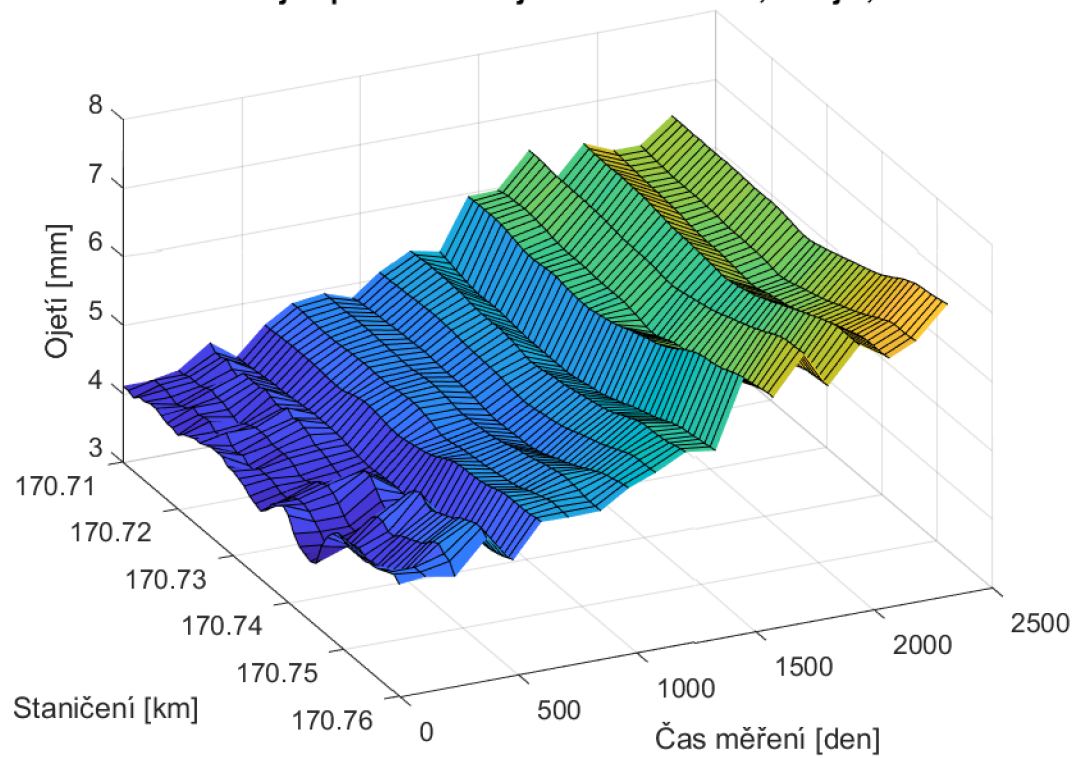
Obr. 15.20 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 1, SP

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 3, kolej 2, BL



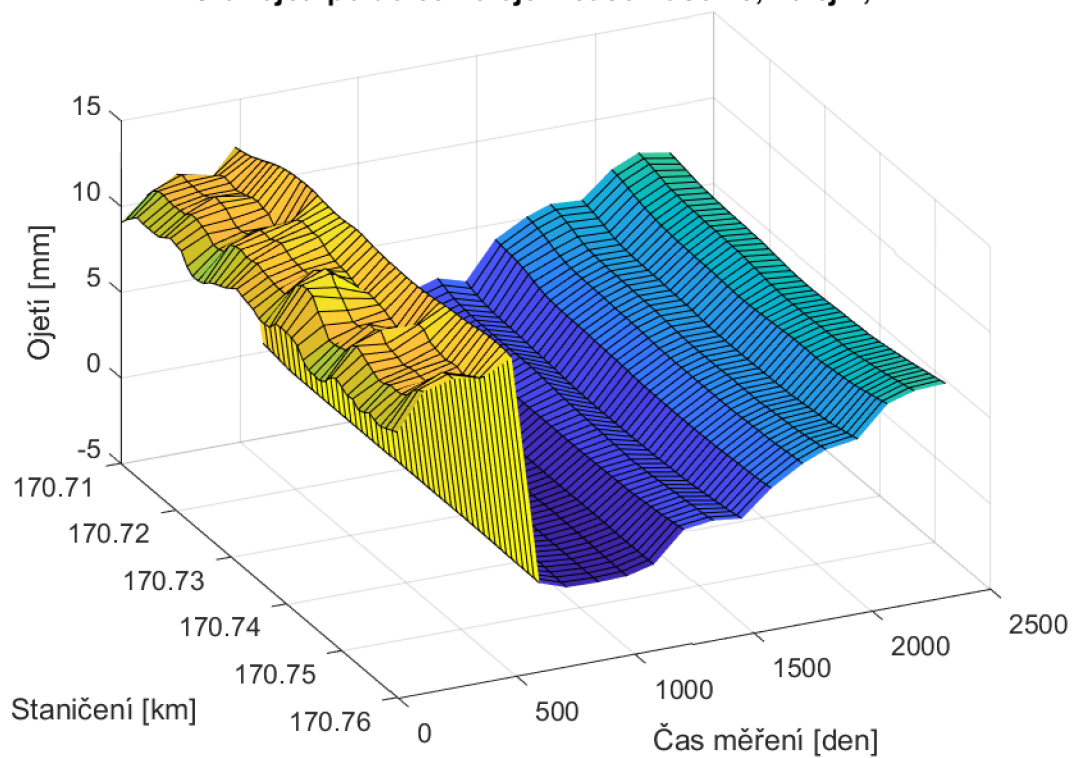
Obr. 15.21 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 2, BL

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 3, kolej 2, SL



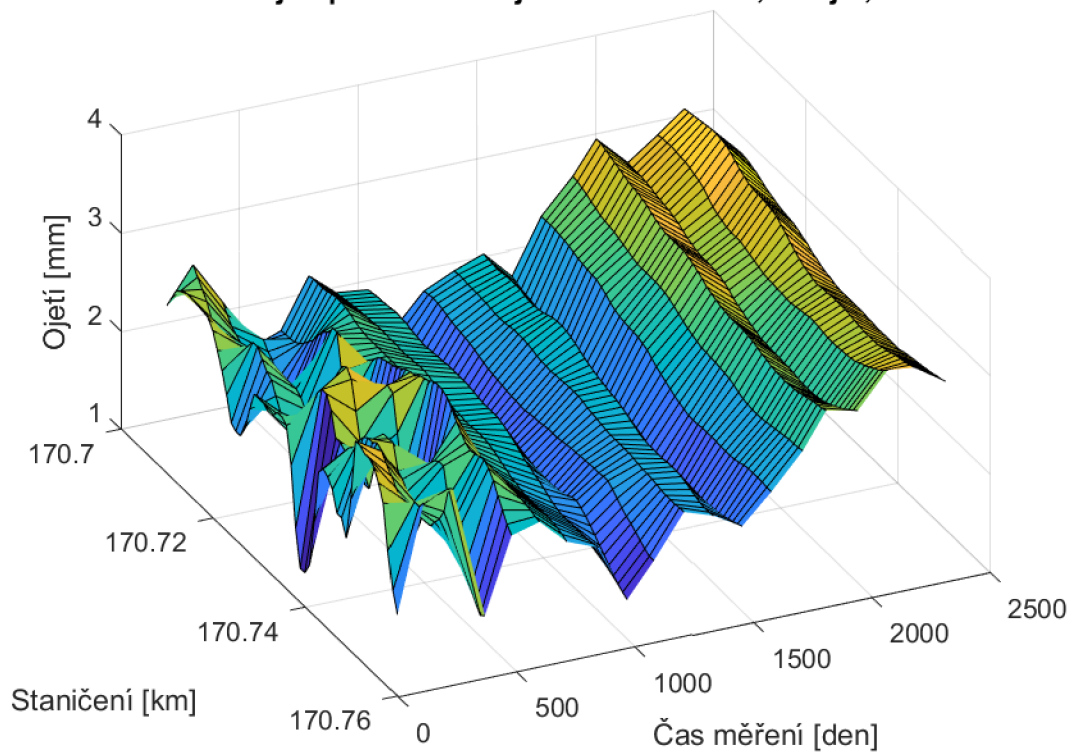
Obr. 15.22 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 2, SL

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 3, kolej 2, BP

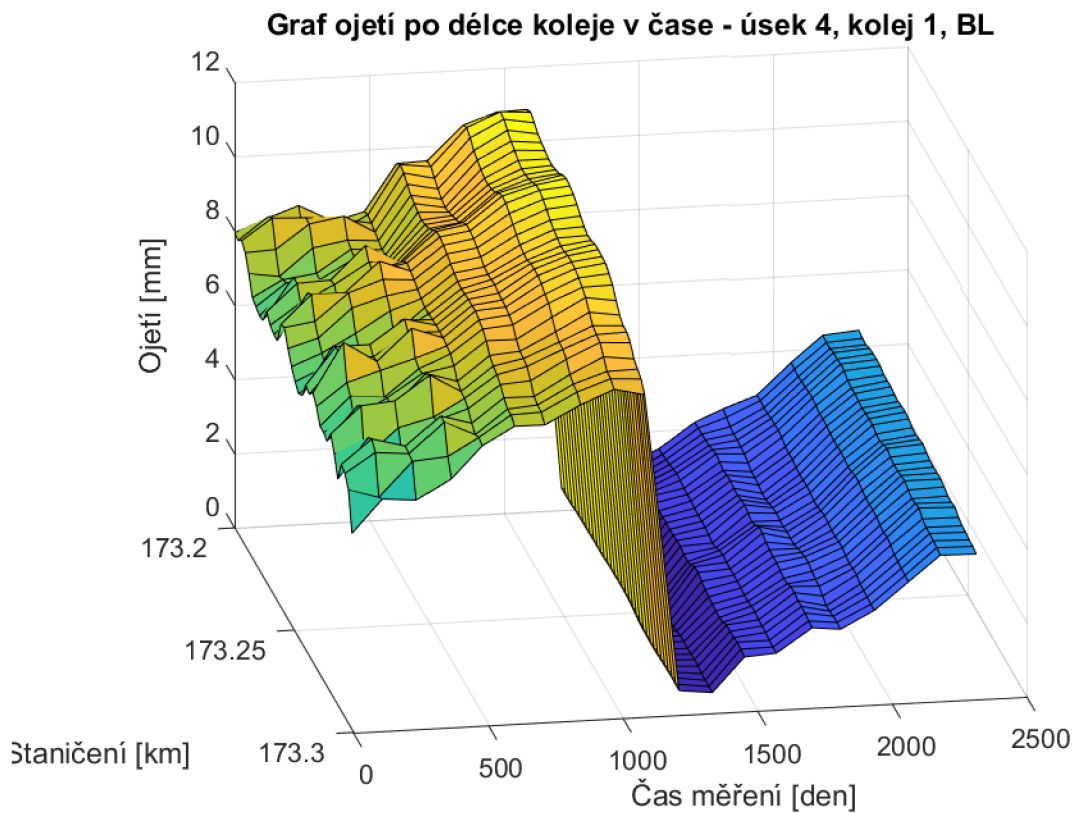


Obr. 15.23 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 2, BP

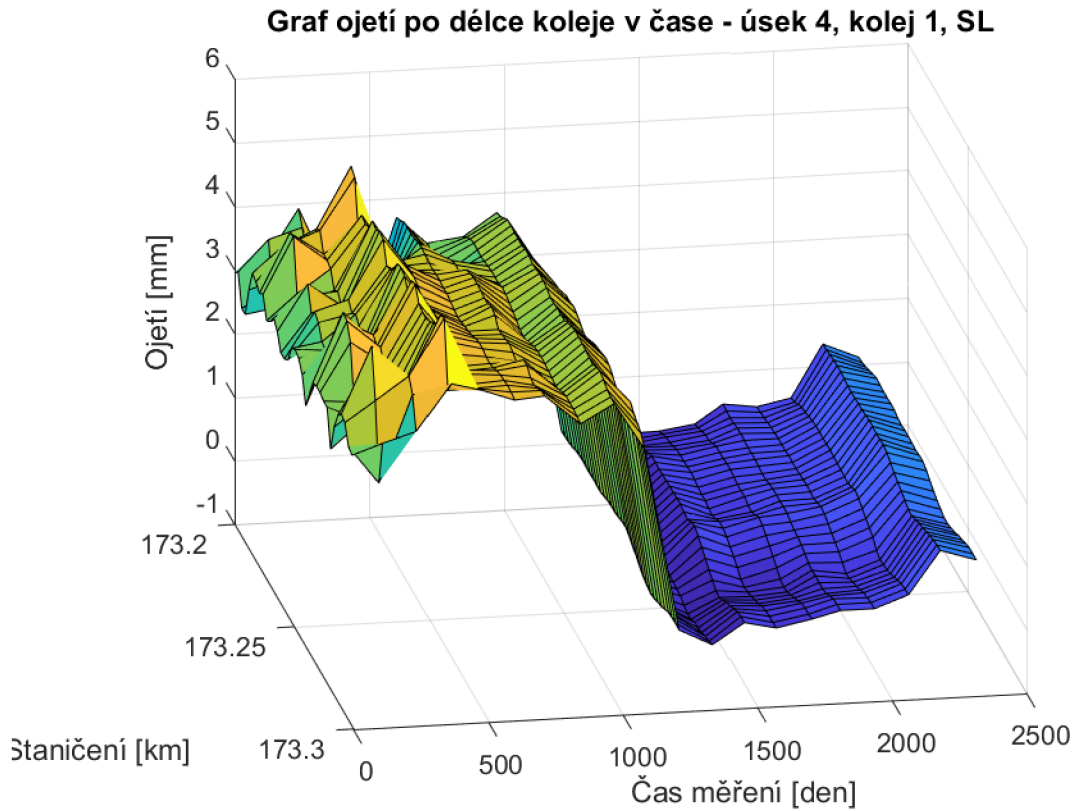
Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 3, kolej 2, SP



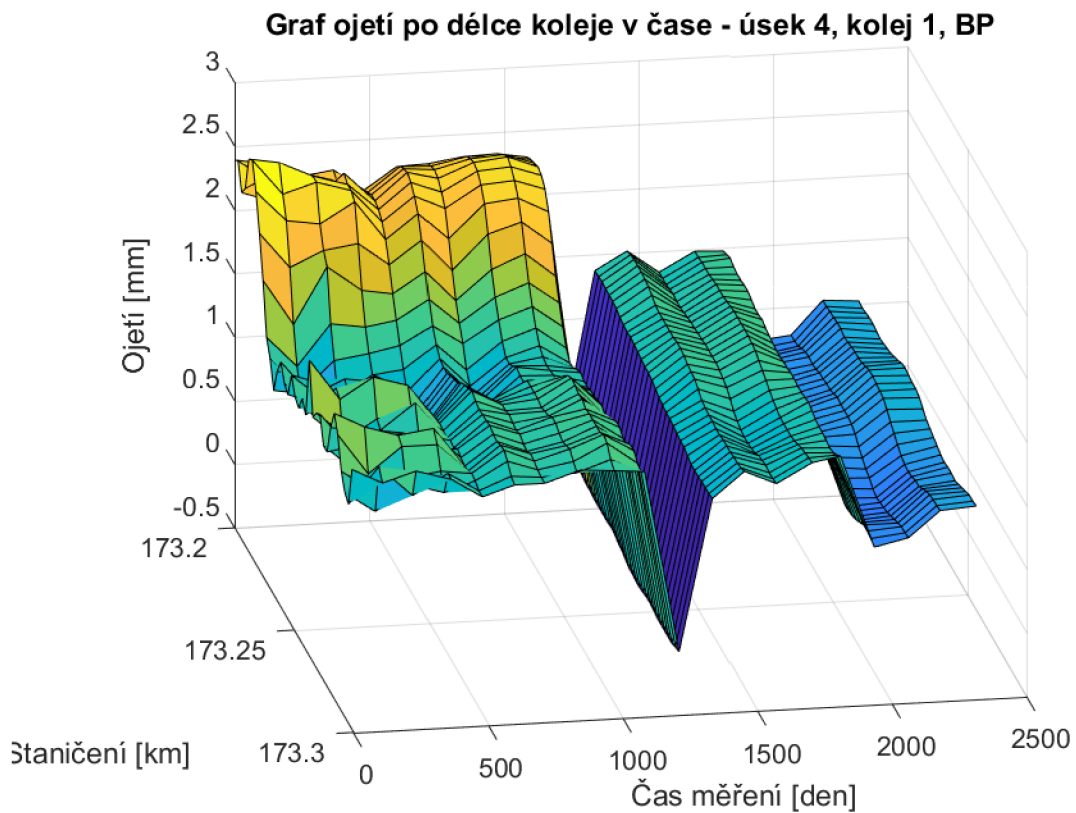
Obr. 15.24 – 3D graf ojetí, úsek 3, kolej 2, SP



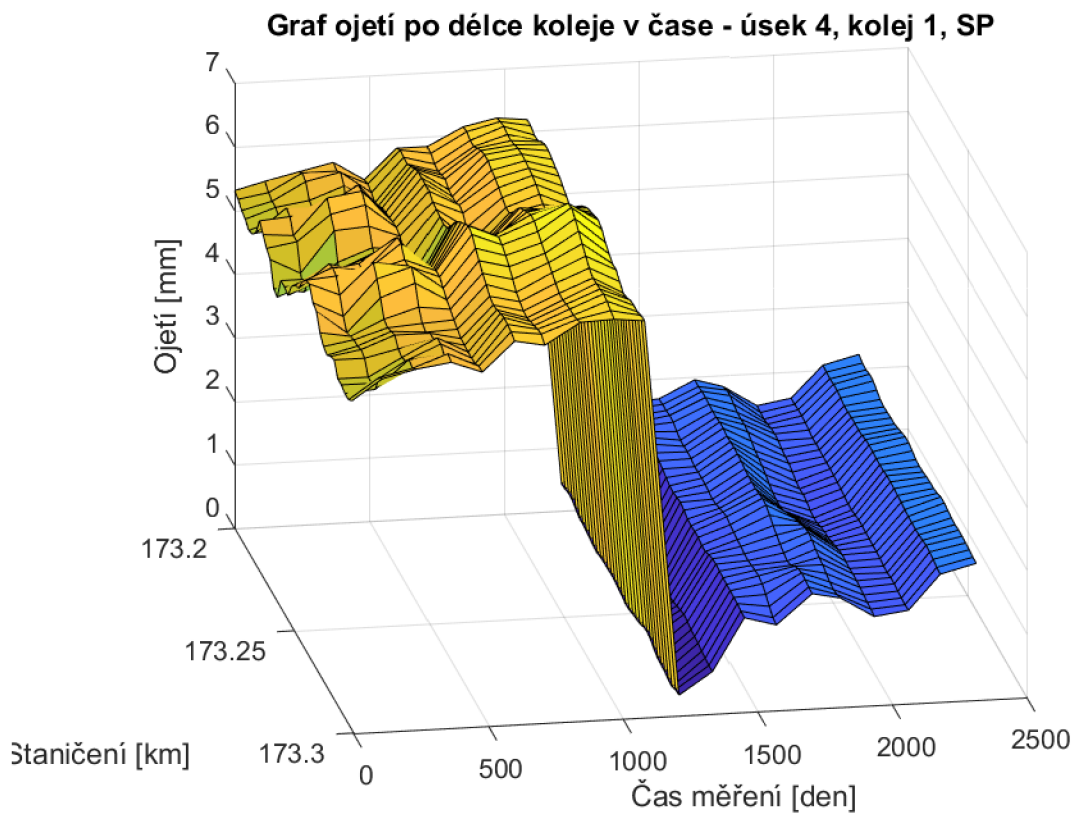
Obr. 15.25 - 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 1, BL



Obr. 15.26 - 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 1, SL

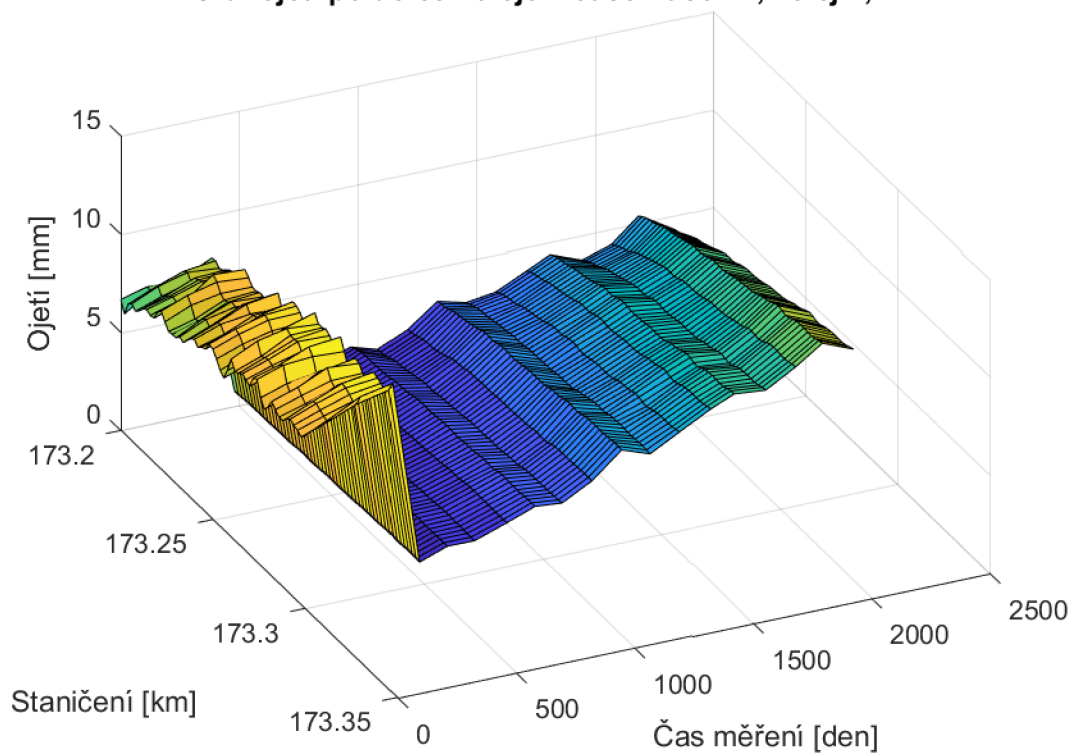


Obr. 15.27 – 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 1, BP



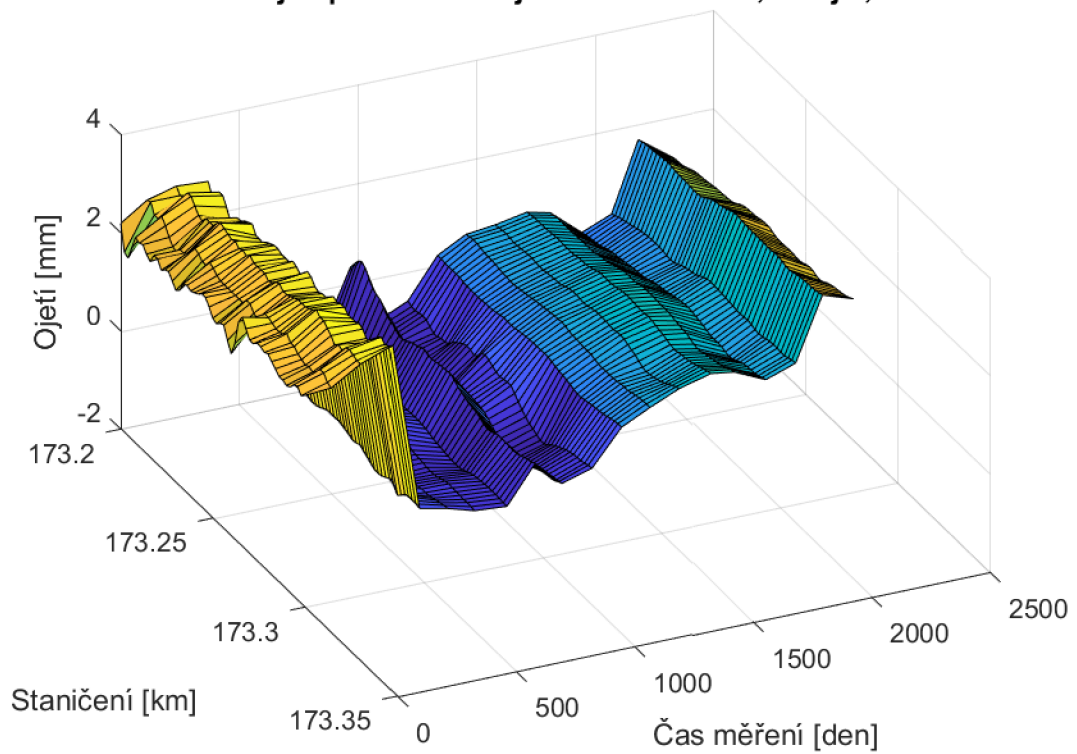
Obr. 15.28 – 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 1, SP

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 4, kolej 2, BL



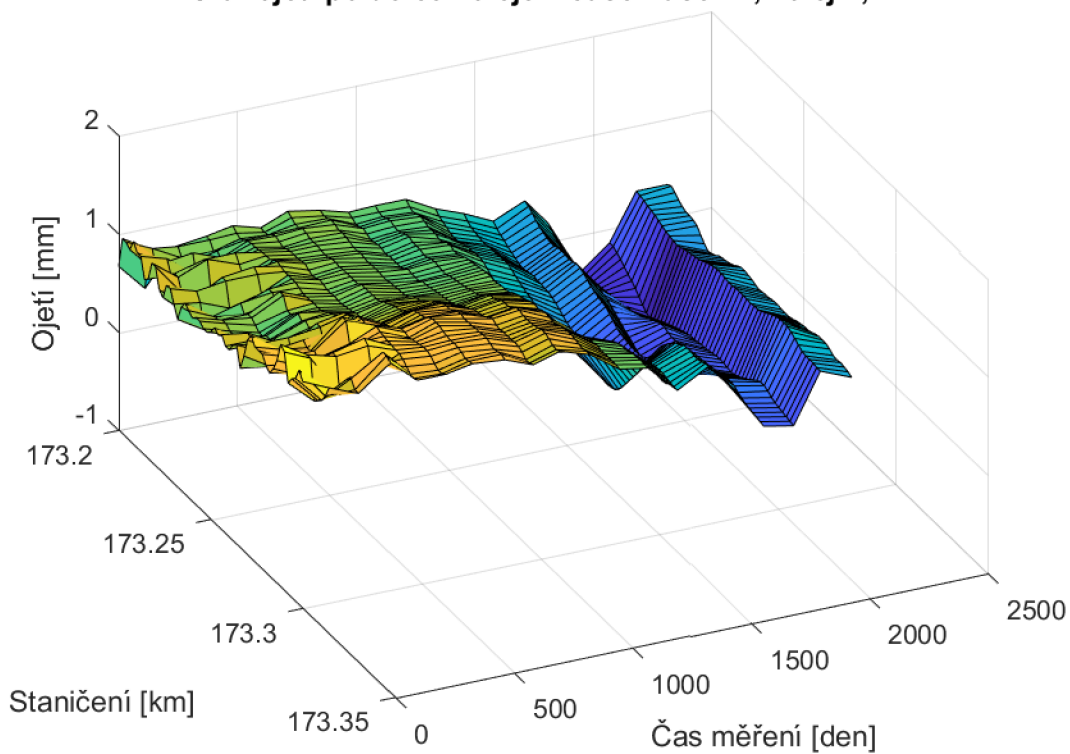
Obr. 15.29 – 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 2, BL

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 4, kolej 2, SL



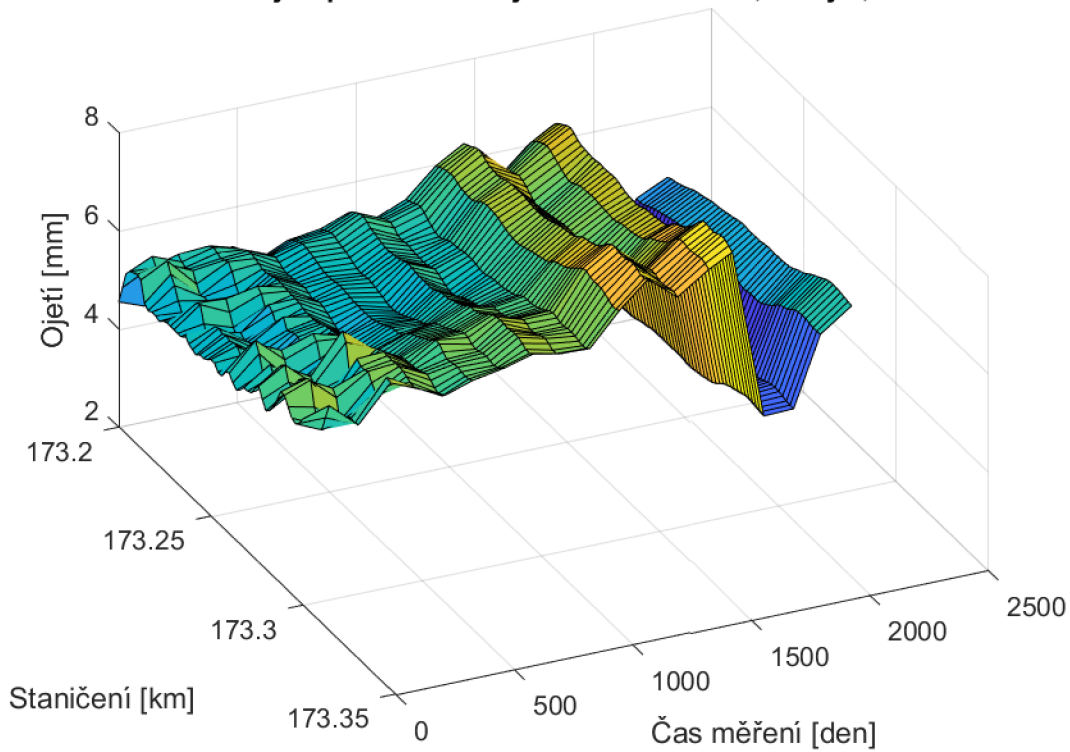
Obr. 15.30 – 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 2, SL

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 4, kolej 2, BP

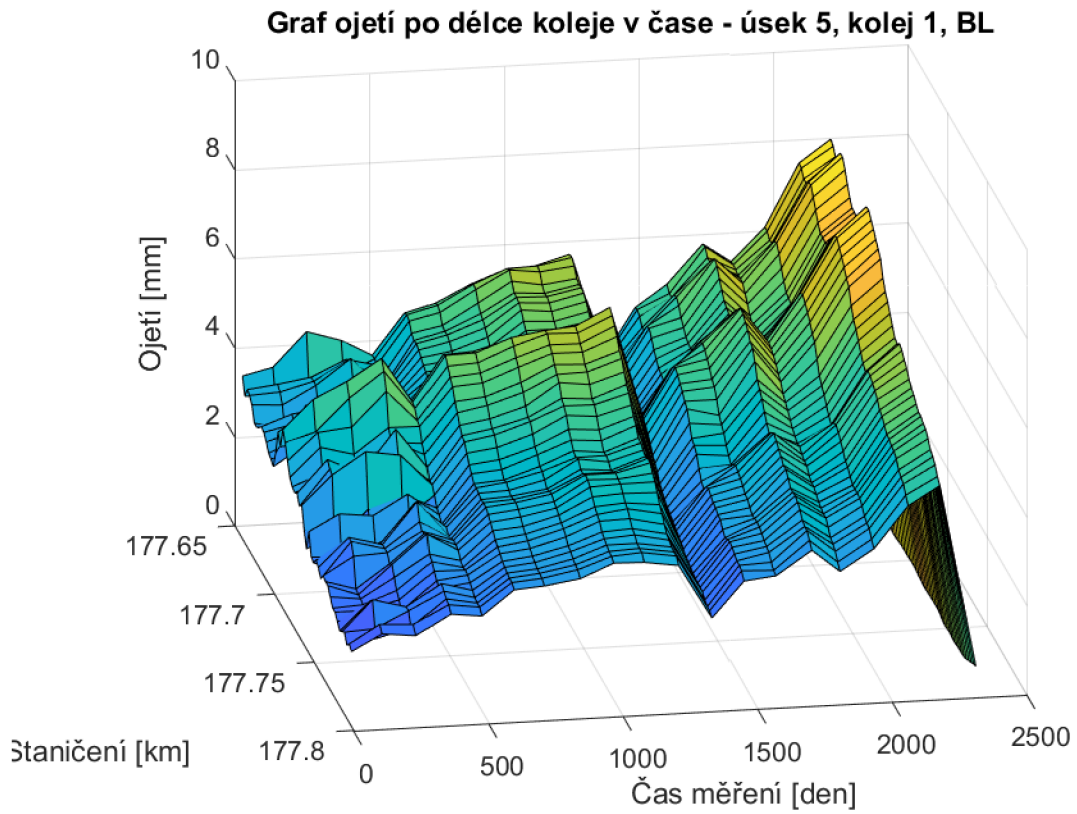


Obr. 15.31 – 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 2, BP

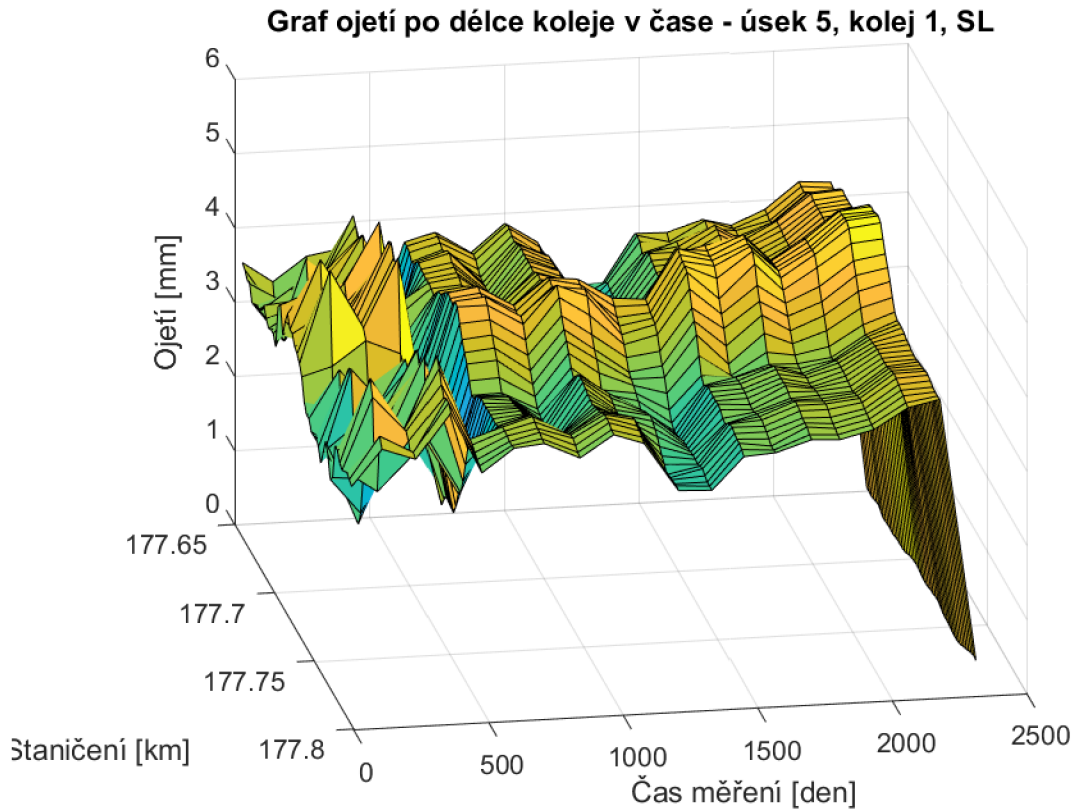
Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 4, kolej 2, SP



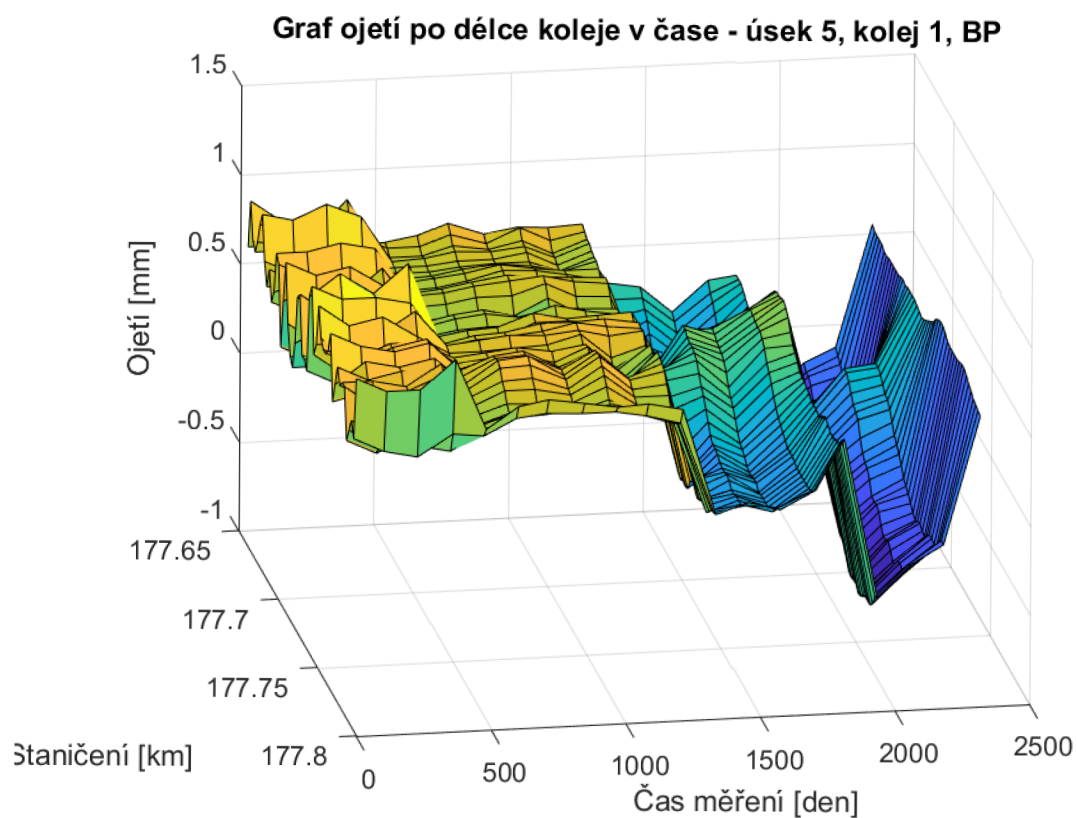
Obr. 15.32 – 3D graf ojetí, úsek 4, kolej 2, SP



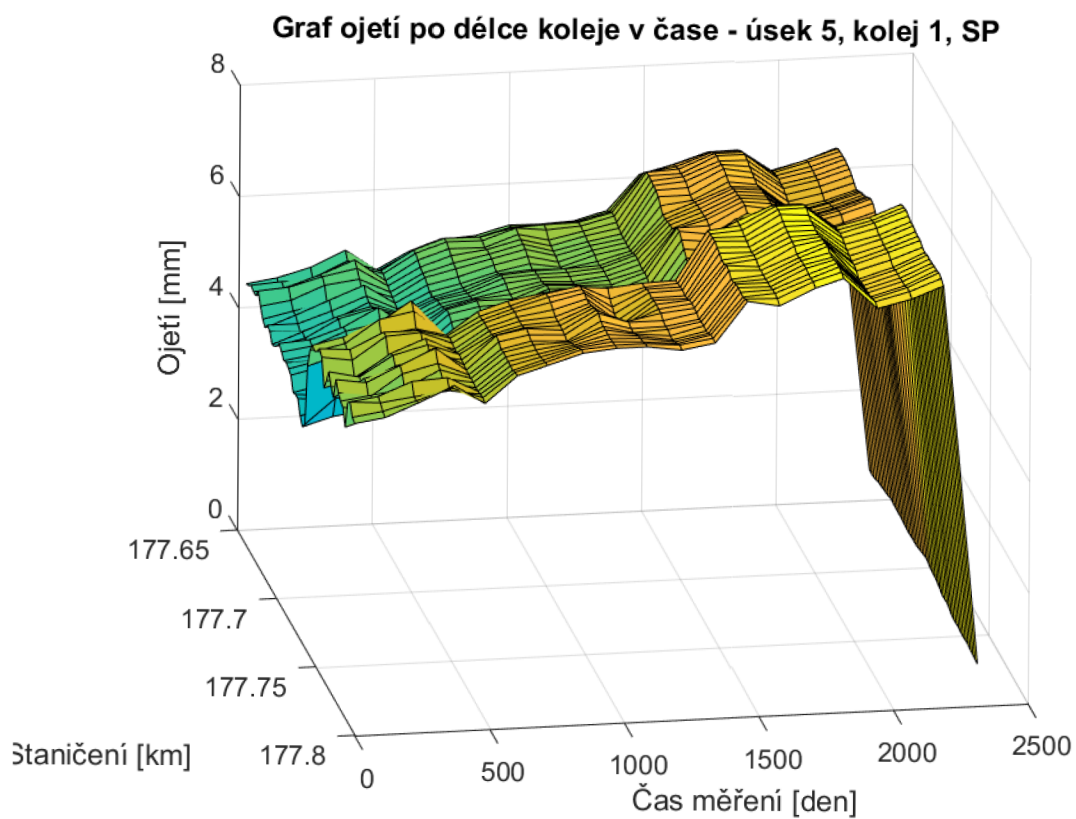
Obr. 15.33 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 1, BL



Obr. 15.34 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 1, SL

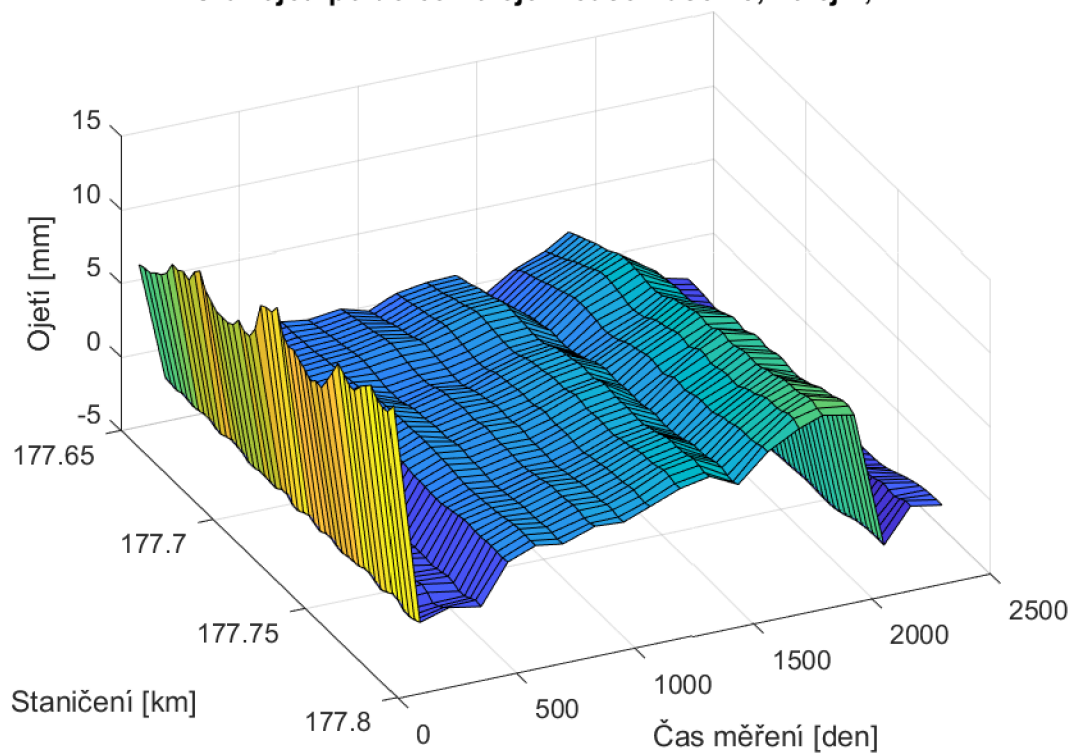


Obr. 15.35 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 1, BP



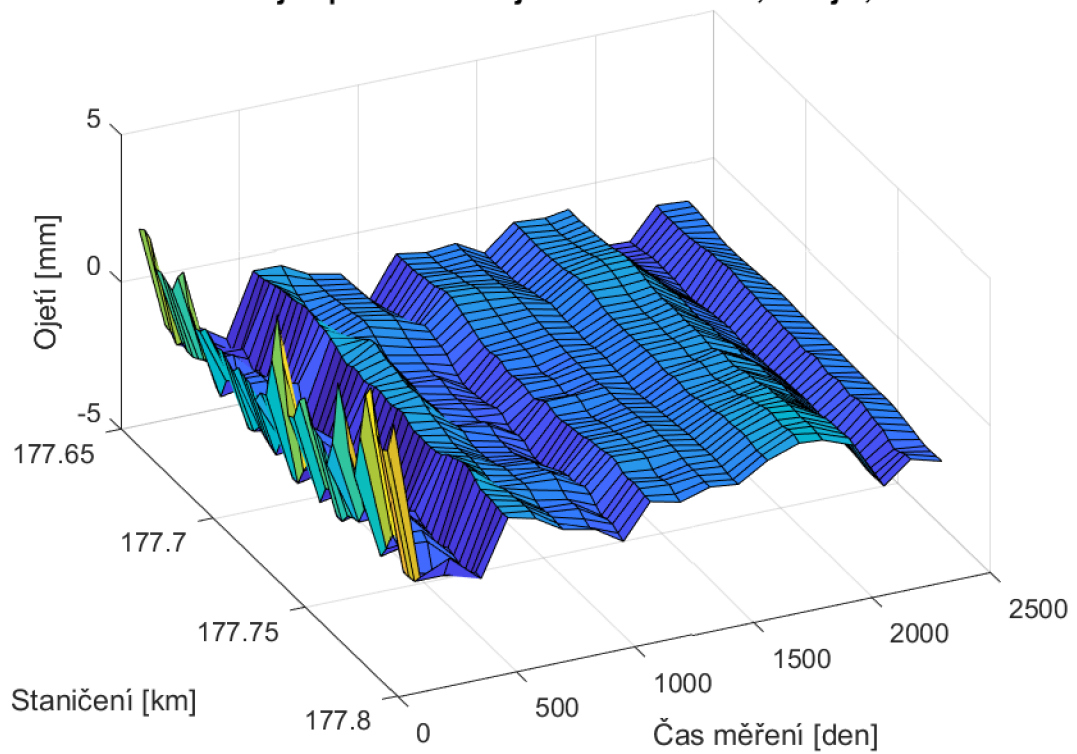
Obr. 15.36 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 1, SP

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 5, kolej 2, BL



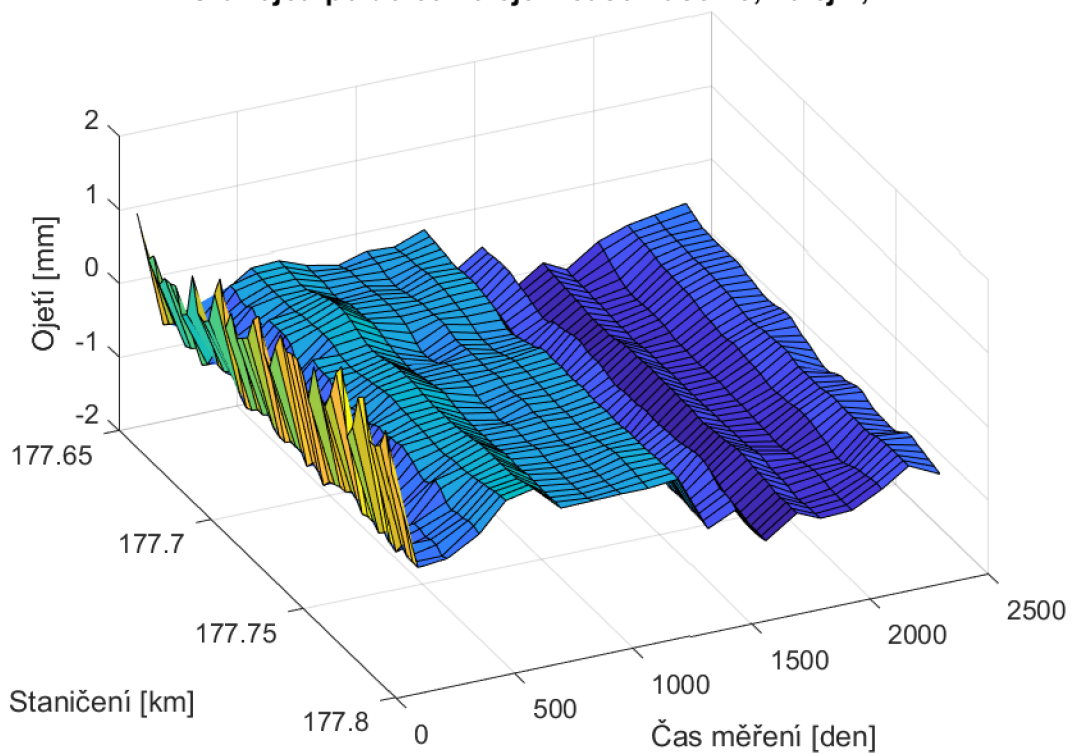
Obr. 15.37 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 2, BL

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 5, kolej 2, SL



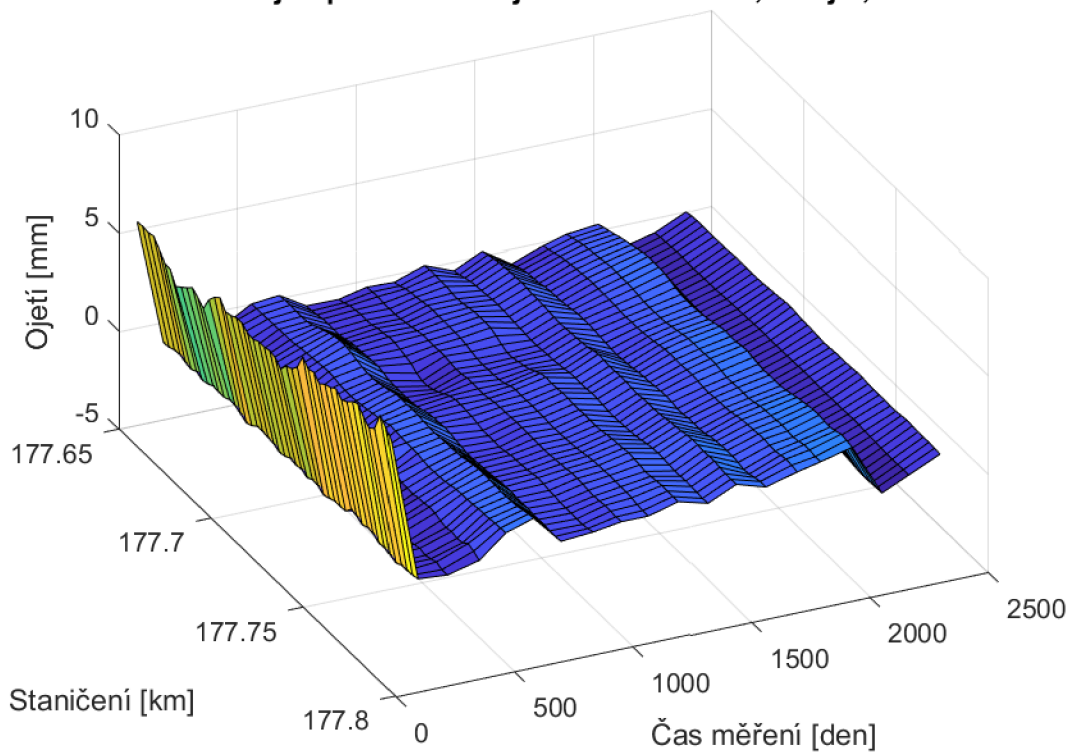
Obr. 15.38 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 2, SL

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 5, kolej 2, BP

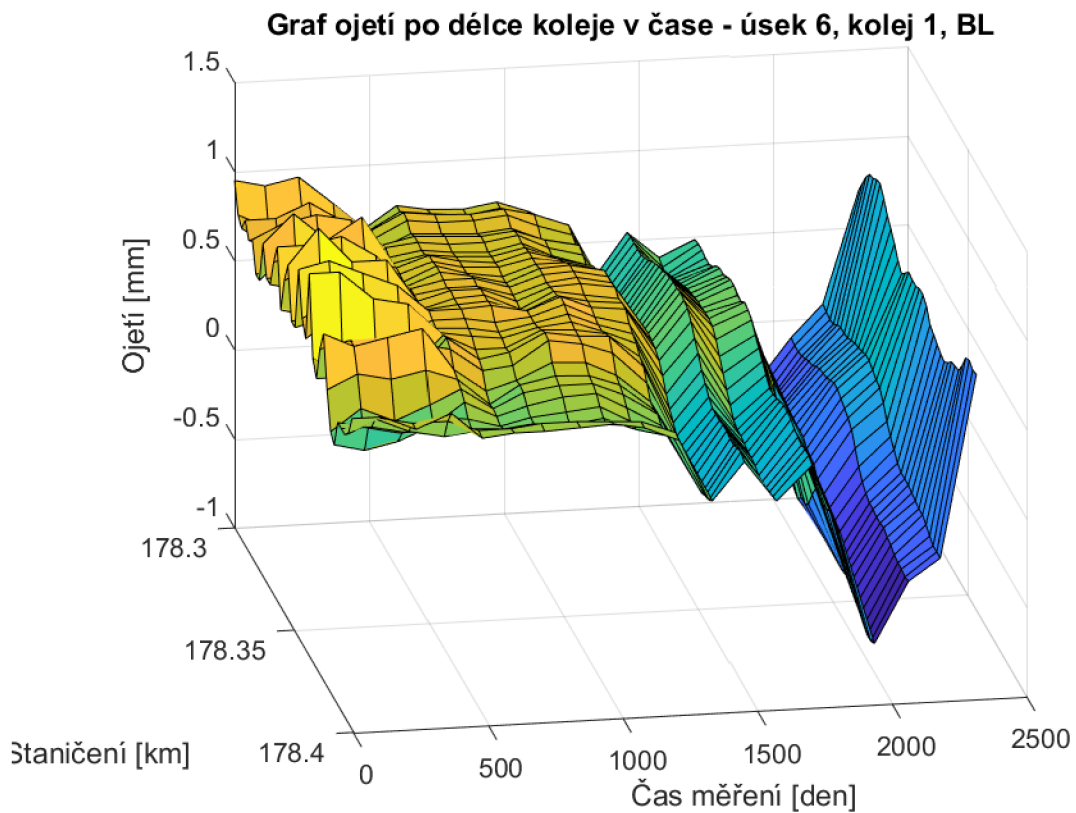


Obr. 15.39 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 2, BP

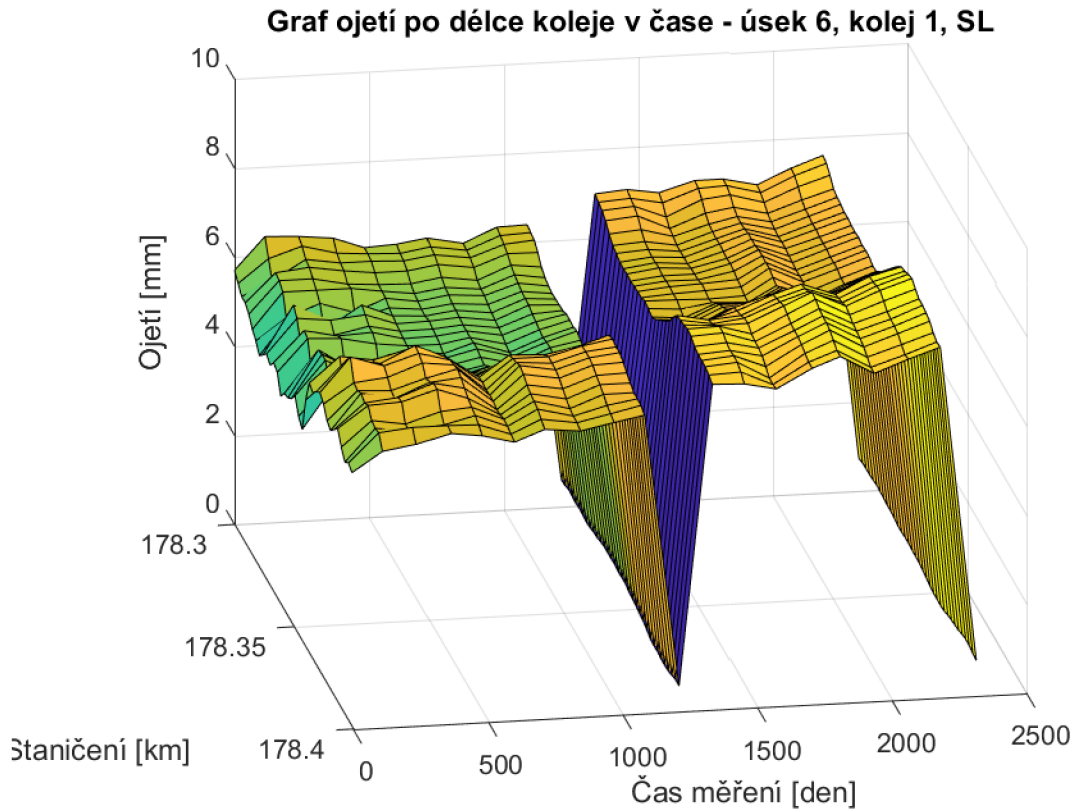
Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 5, kolej 2, SP



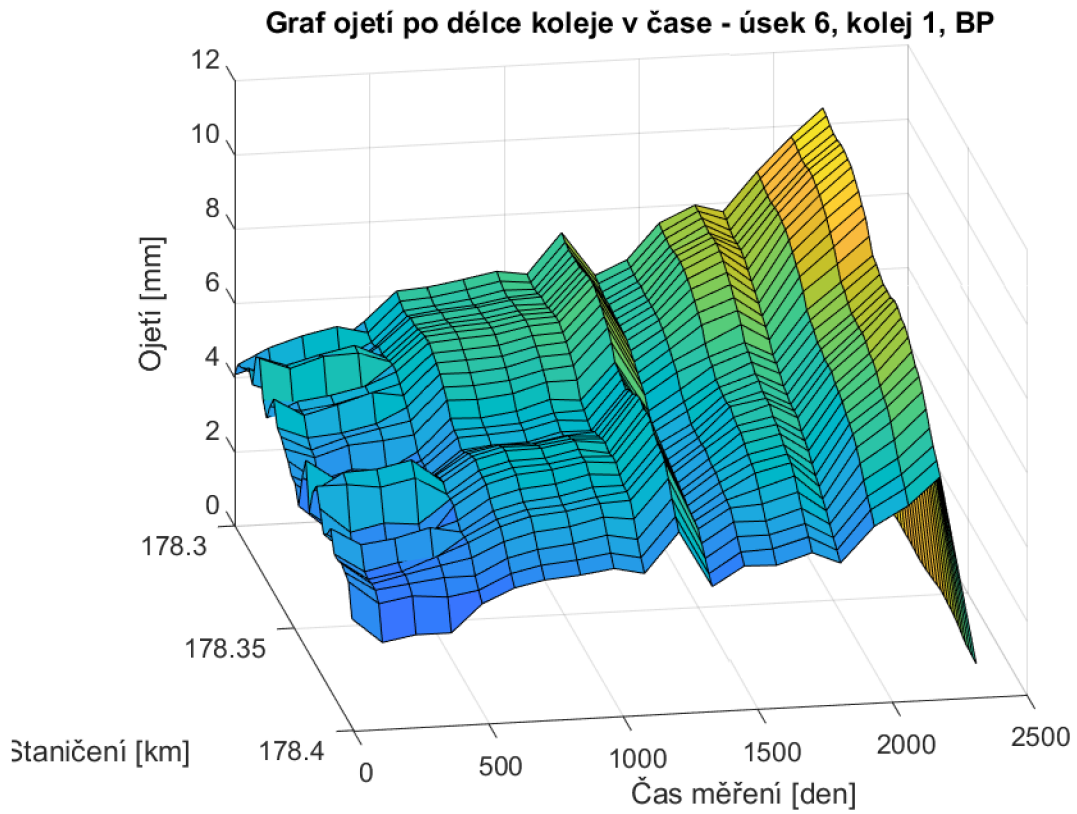
Obr. 15.40 – 3D graf ojetí, úsek 5, kolej 2, SP



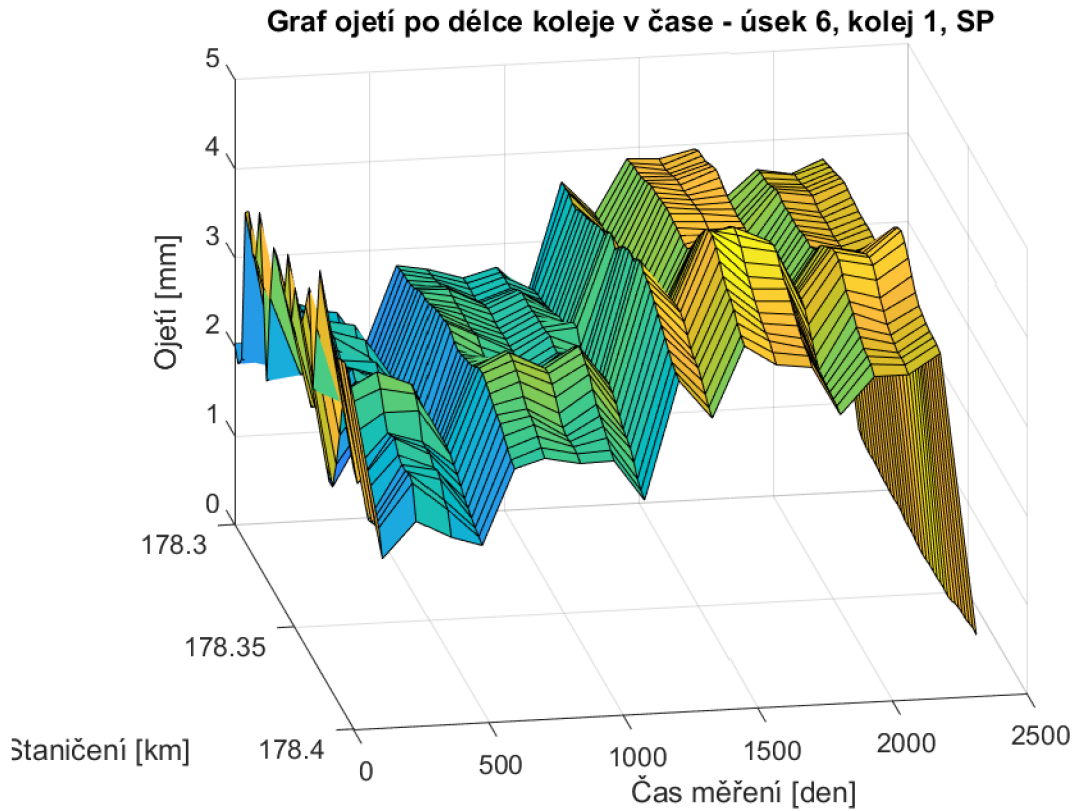
Obr. 15.41 - 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 1, BL



Obr. 15.42 - 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 1, SL

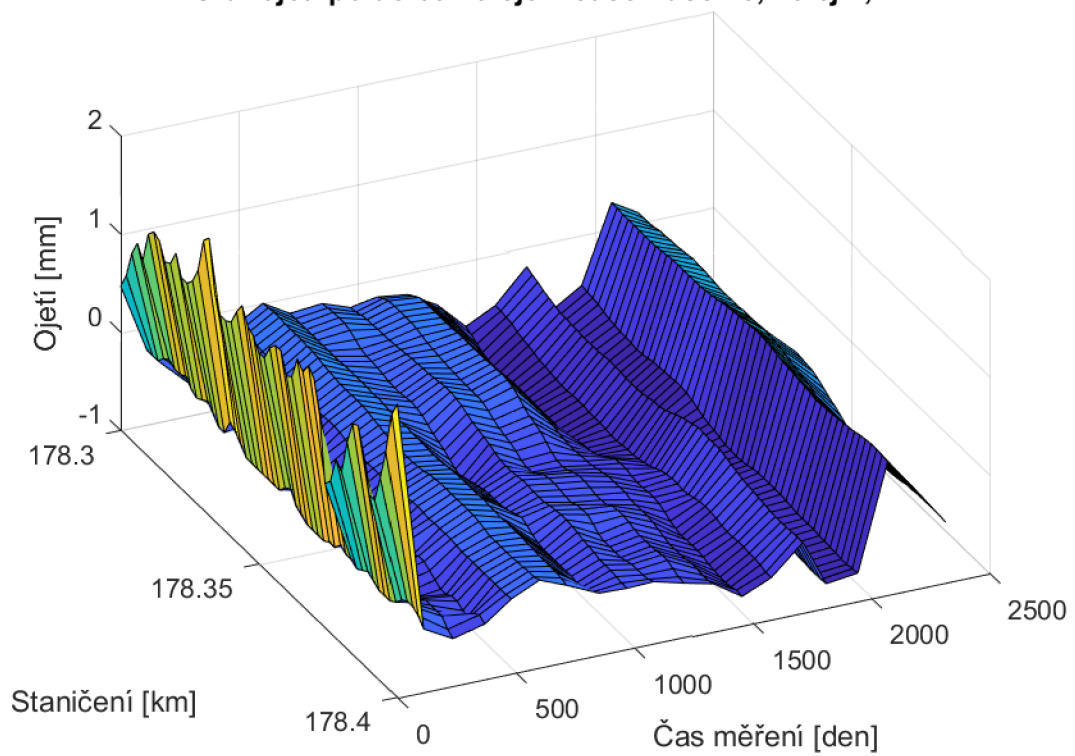


Obr. 15.43- 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 1, BP



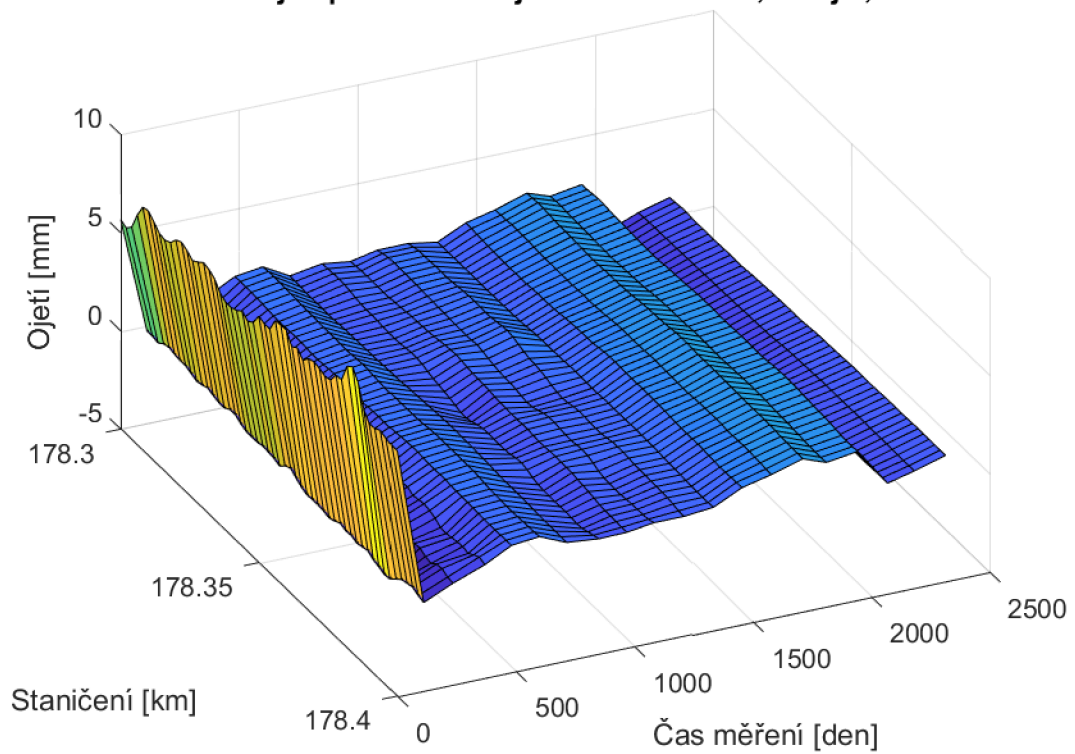
Obr. 15.44 - 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 1, SP

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 6, kolej 2, BL



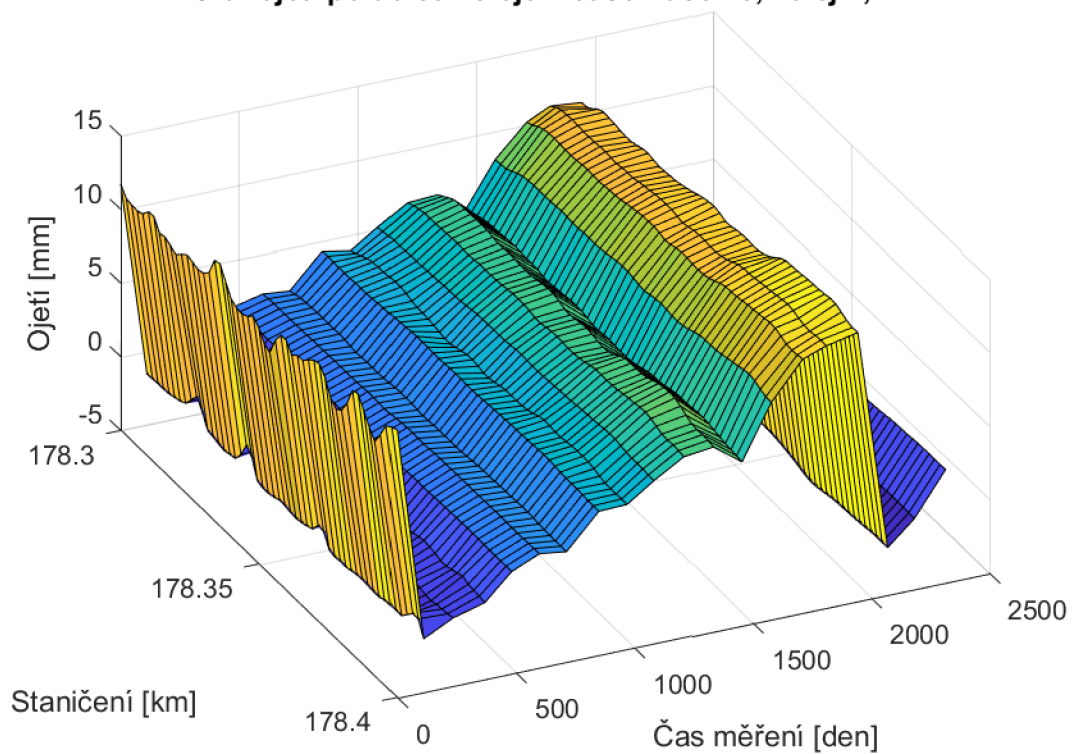
Obr. 15.45 - 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 2, BL

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 6, kolej 2, SL



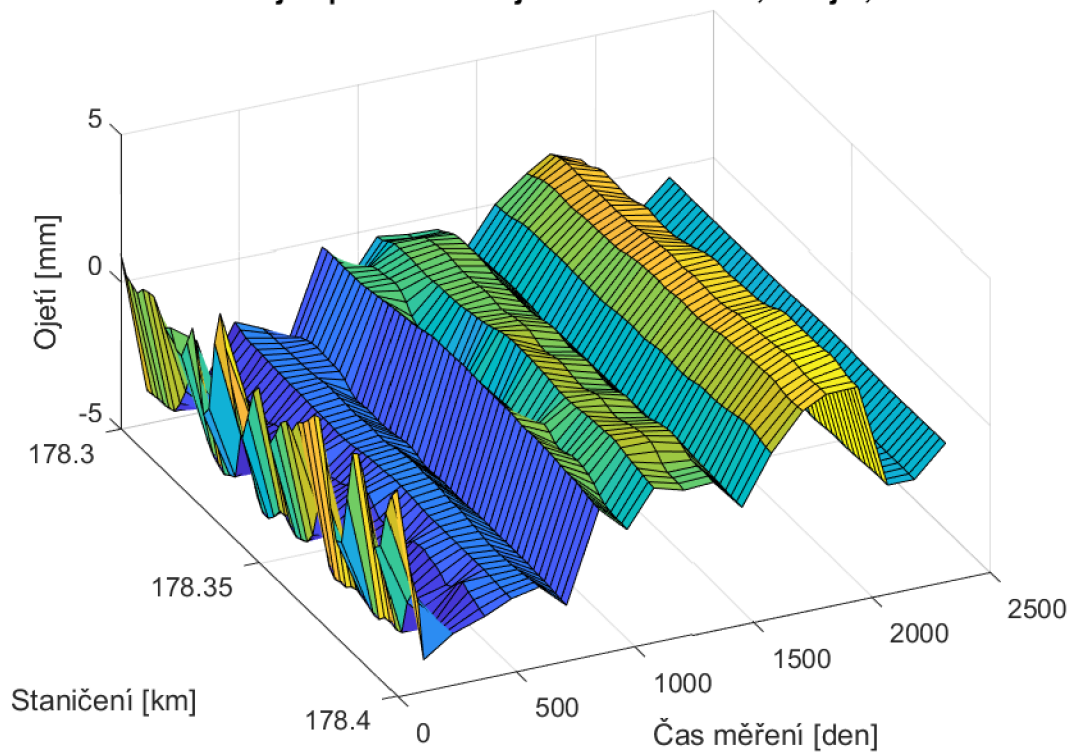
Obr. 15.46 - 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 2, SL

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 6, kolej 2, BP



Obr. 15.47 – 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 2, BP

Graf ojetí po délce koleje v čase - úsek 6, kolej 2, SP



Obr. 15.48 – 3D graf ojetí, úsek 6, kolej 2, SP