

Porovnání metod hodnocení kvality geometrie koleje

Studentská vědecká konference, Praha 2025

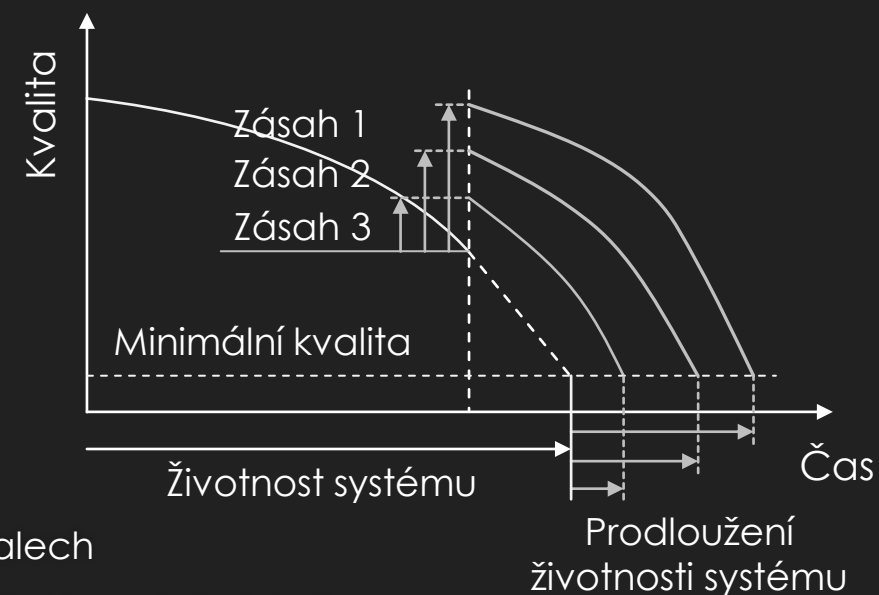


Ing. Erik Dušek

Úvod

Údržba:

- Plánování údržby je složitý optimalizační problém
- Efektivita údržbových zásahů se postupem času snižuje
- **Prioritizace** – hodnocení infrastruktury pro rozdělení financí
- **Metody plánování údržby:**
 - **Preventivní (cyklická) údržba** – údržba systému ve zvolených intervalech
 - **Prediktivní údržba** – prováděna (nepravidelně) podle stavu, složitější plánování výdajů
 - **Korektivní údržba** – prováděna reaktivně po vzniku poruch, ignoruje LCCA => náklady na údržbu stoupají
- **Hodnocení** kvality geometrie koleje => hlavní **podklad** pro plánování údržby



Teorie

Degradace koleje:

- Problém je **nerovnoměrné sedání koleje** po délce
- **Začíná** pozvolna vlivem drobných **vad v materiálu** a při **výrobě**
- **Další faktory:** chyby při **návrhu** a **výstavbě**, chyby při **měření** a **údržbě**, **podloží**, **počasí** atd.
- **Vliv svršku:** znečištěné **kolejové lože**, obroušené hrany **pražců** -> **podpražcové podložky** (USP)
- **Vliv spodku:** nedostatečná deformační odolnost, špatné **odvodnění**
- **Rychlost degradace**
 - závisí na **provozním zatížení** = součet hmotnosti projetých vlaků v milionech hrubých tun za rok
 - je **náhodná** – množství působících faktorů, které se vzájemně ovlivňují

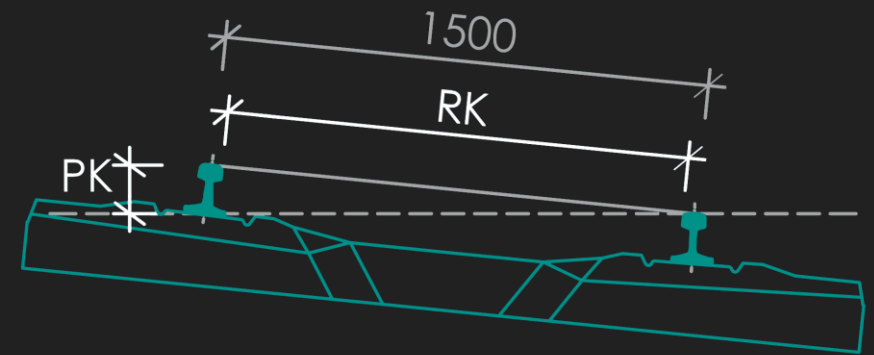
Teorie

Geometrické parametry koleje (GPK):

- **Rozchod koleje (RK)** – odchylka od normálního rozchodu
- **Převýšení koleje (PK)** – výškový rozdíl kolejnicových pásů
- **Směr kolejnice levá (SL) / pravá (SP)** – vodorovná odchylka pojížděné hrany kolejnice od vyhlazené referenční linie
- **Výška kolejnice levá (VL) / pravá (VP)** – svislá odchylka temene kolejnice od vyhlazené referenční linie
- **Směr (SK)/ výška koleje v ose (VK)** – průměr směru/ výšky kolejnic

Pásmo vlnových délek ve skutečné geometrii:

- D1: $3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$ (pro všechny rychlosti)
- D2: $25 \text{ m} < \lambda \leq 70 \text{ m}$ (pro rychlost 120 až 160 km/h)



Teorie

Hodnocení kvality geometrie koleje:

○ Provozní odchylky:

- **Mez sledování** (AL = Alert Limit) – je-li překročena, je třeba **vzít v úvahu** při plánování údržby
- **Mez zásahu** (IL = Intervention Limit) – při překročení, je třeba **provést údržbu**, aby nedošlo k překročení IAL
- **Mez bezodkladného zásahu** (IAL = Immediate Action Limit) – musí se provést **opatření k zajištění bezpečnosti**

○ Měřicí vůz pro železniční svršek (MVŽSv):

- Měřicí prostředek pro kontinuální měření pod zatížením
- Měří celostátní a vybrané regionální tratě s rychlostí nad 60 km/h
- GPK jsou měřeny v kroku po 0,25 m do rychlosti 200 km/h
- Bezkontaktní inerčně-optický systém pro měření GPK
- V roce 2023 začal měřit nový MVŽSv2



Metodika

Veličiny pro hodnocení kvality geometrie koleje:

○ Lokální závady (ID = Isolated Defects):

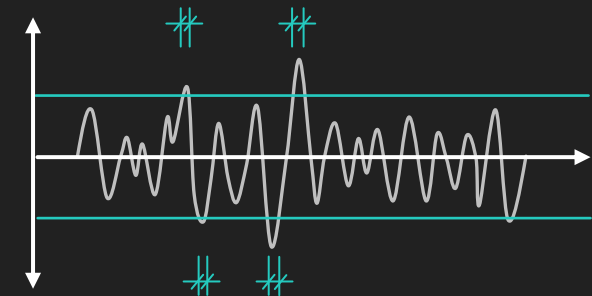
- Počet odchylek, které překračují mezní hladinu na délce koleje

○ Směrodatná odchylka (SD = Standard Deviation):

- Vyjadřuje míru rozptýlení signálu kolem střední hodnoty
- Nejčastěji používaný index v Evropě i ve světě

○ Index kvality koleje (TQI = Track Quality Index):

- Založený na měření tzv. délky prostorové křivky
- Více odchylek = větší délka signálu
- Poměr délky prostorové křivky a hodnocené délky koleje



$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

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

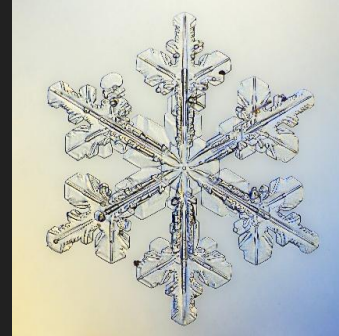
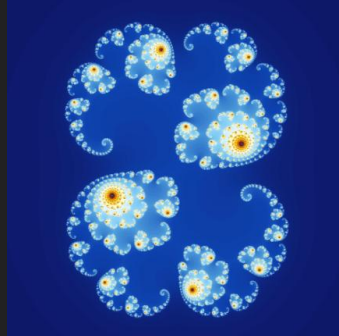
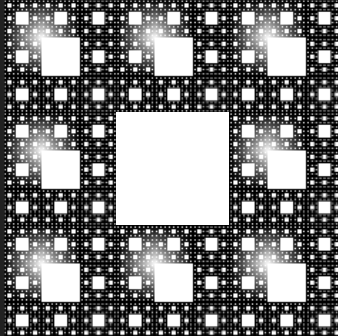
$$TQI = \left(\frac{L_s}{L_0} - 1 \right) \cdot 10^6$$

Metodika

Veličiny pro hodnocení kvality geometrie koleje:

○ Fraktální dimenze (FD):

- **Fraktální analýza** slouží pro charakteristiku **nepravidelných vzorů**, které jsou zdánlivě chaotické a náhodné
- **Fraktál** – má **drsny povrch** a **složitý tvar** bez ohledu na to, z jaké blízkosti se na něj koukáme
- **Ideální fraktály** – jsou soběpodobné – libovolná část je tvořená jedním tvarem (Kochova vločka atd.)
- **Přírodní fraktály** – nepravidelný tvar vlivem náhody (sněhové vločky, stromy, hory, mraky atd.)



Metodika

Veličiny pro hodnocení kvality geometrie koleje:

○ Fraktální dimenze (FD):

- Měří stupeň „hrubosti“ (drsnoti)
- Na rozdíl od klasické geometrie **nejsou celočíselné**
- Čím lépe křivka **vyplňuje prostor**, tím více se FD blíží 2

▪ Obvodová metoda:

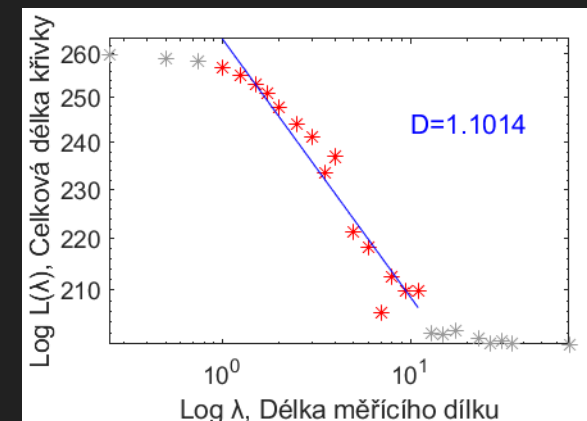
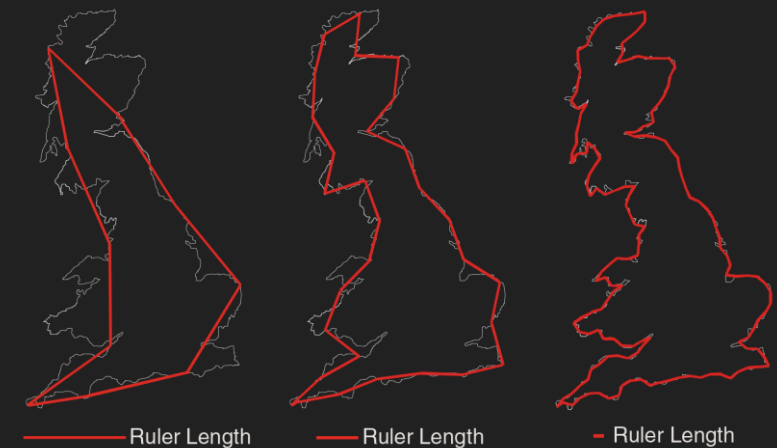
- Založená na empirických studiích obrysu pobřeží
- Délka pobřeží se zvětšuje s tím, jak se zmenšuje délka pravítka
- FD se získá ze sklonu regresní křivky

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

▪ Zjednodušená obvodová metoda:

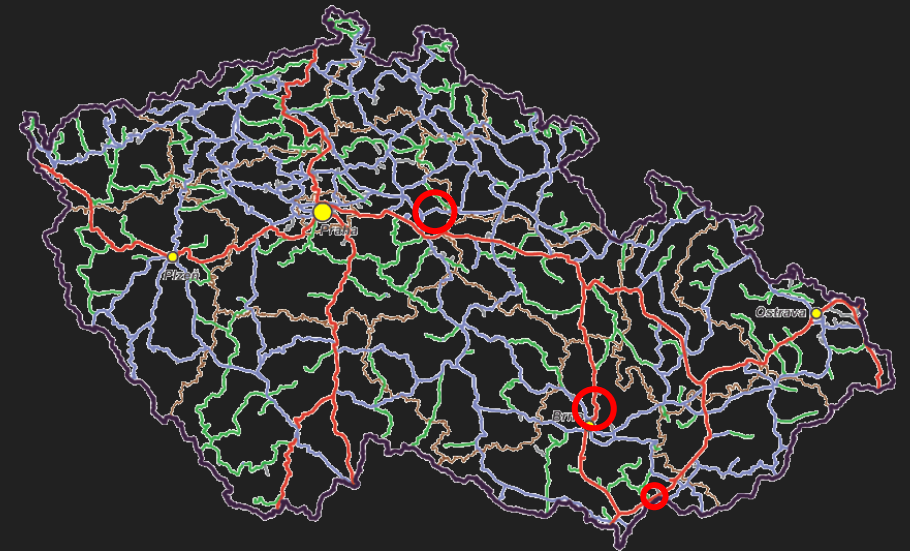
- Kroky konstantní délky na ose x (měřicí dílky)
- Výrazně rychlejší než obvodová metoda, podobné výsledky

$$D = 1 - m$$

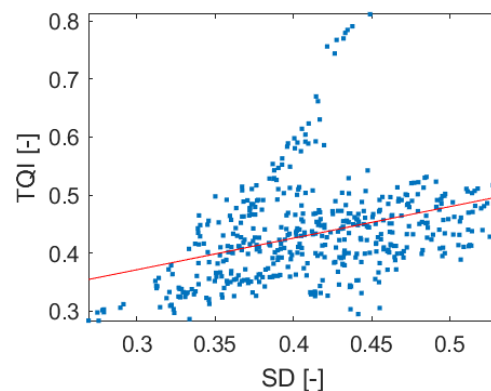


Metodika

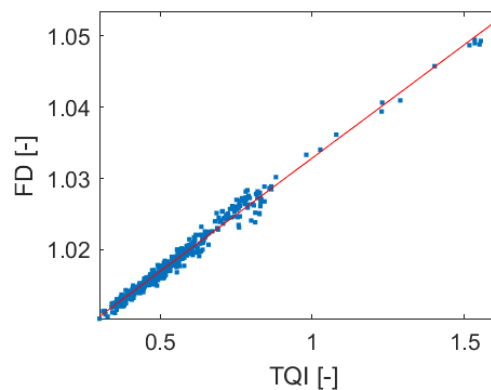
- Všechna data z MVŽŠv od **Centra techniky a diagnostiky (CTD)** Správy železnic
- **Hodonín – Rohatec** (2009 – 2024)
 - Délka 5 km, rychlost 160 km/h,
 - 2 koleje, provozní zatížení 20-25 mil. hr.t/r
 - přímý úsek
- **Brno-Maloměřice st. 6 – Blansko** (2008 – 2024)
 - Délka 9 a 6,5 km, rychlost 70-100 km/h
 - 2 koleje, provozní zatížení 20-25 mil. hr.t/r
 - malé poloměry, v údolí Svitavy
- **Dobšice nad Cidlinou – Chlumec nad Cidlinou** (2014 – 2024)
 - Délka 3,7; 5,5; 3,2 km, rychlost 80-100 km/h
 - 1 kolej, provozní zatížení 16 mil. hr.t/r
 - malé poloměry, část trati podél rybníka



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



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



Výsledky

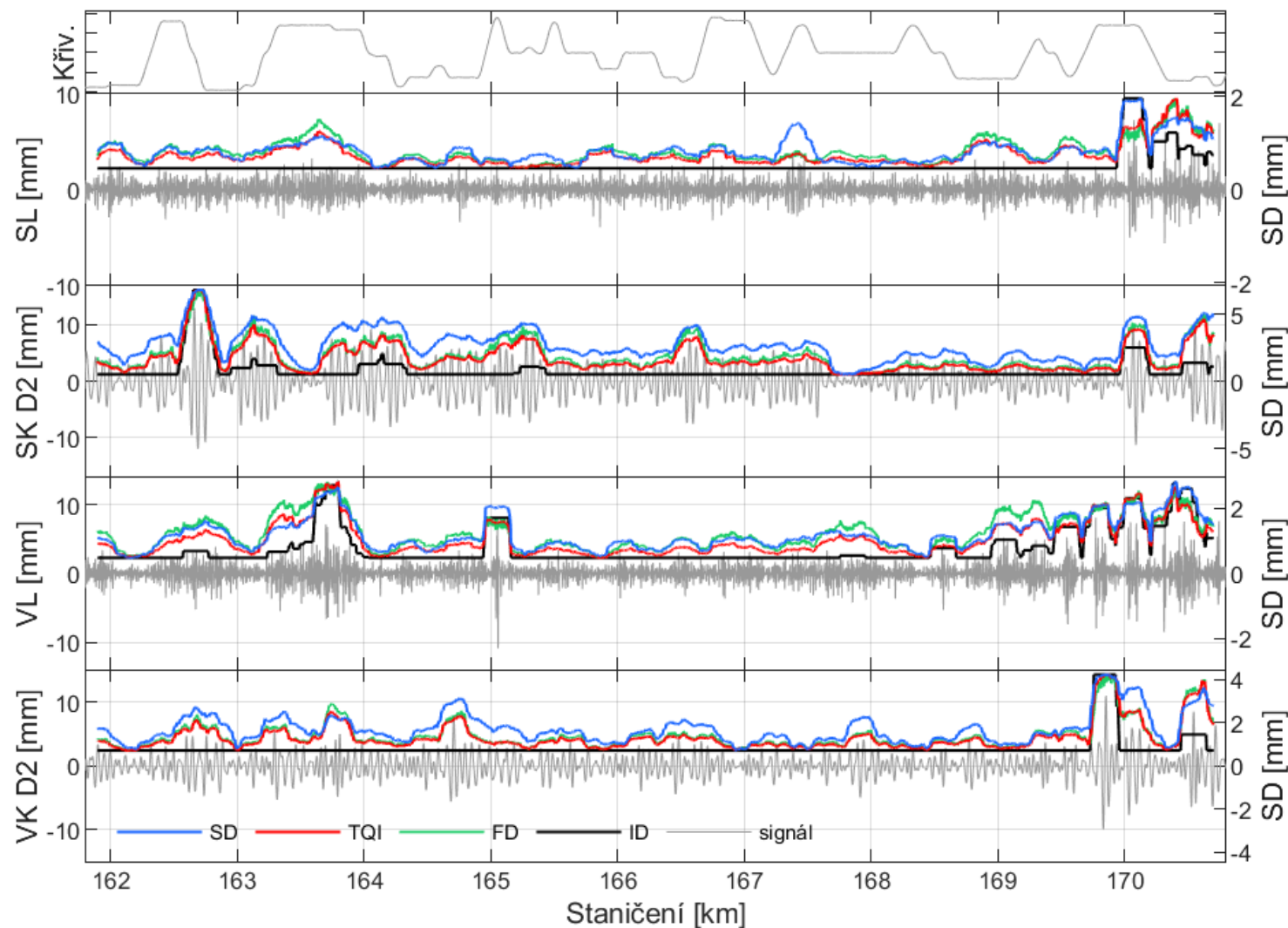
Korelační analýza veličin:

- Pearsonův korelační koeficient
- Korelace veličin ze všech úseků a měření (klouzavě po 10 m)
- Nejvyšší korelace u SK D2, VK D2
- Nejnižší korelace u SL, SP (přímá)
- Silná korelace mezi SD a TQI/FD
- Nejsilnější korelace TQI s FD

Výsledky

Průběh veličin po délce koleje:

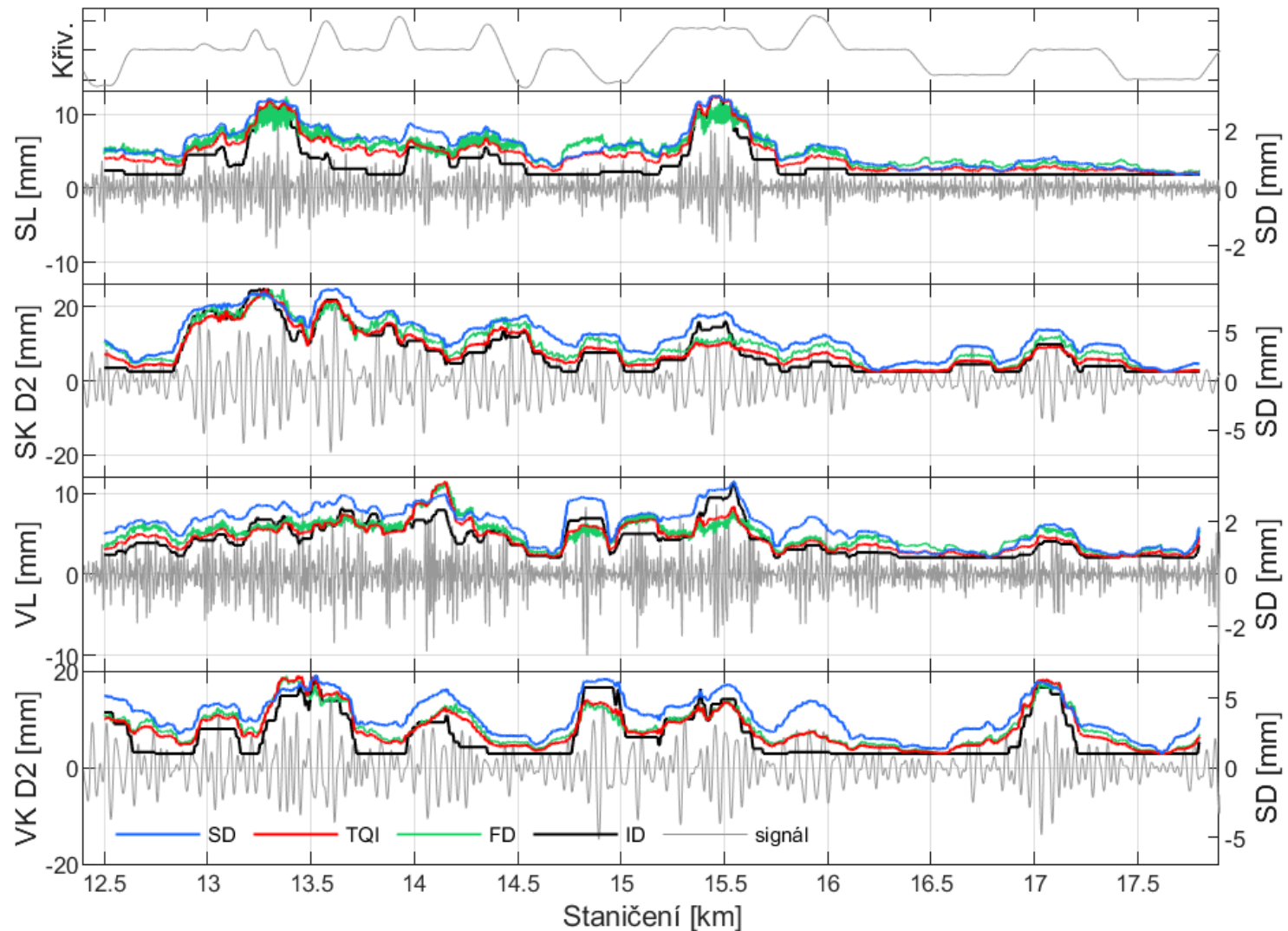
- Hodnoty upraveny, aby min. a max. hodnoty byly stejné
- Výpočet klouzavě s délkou hodnocených úseků 200 m
- SD, TQI a FD podobný průběh, odlišně vysoké hodnoty
- ID = 0 mimo lokální poruchy (odchyly pro IAL a nejvyšší V)



Výsledky

Průběh veličin po délce koleje:

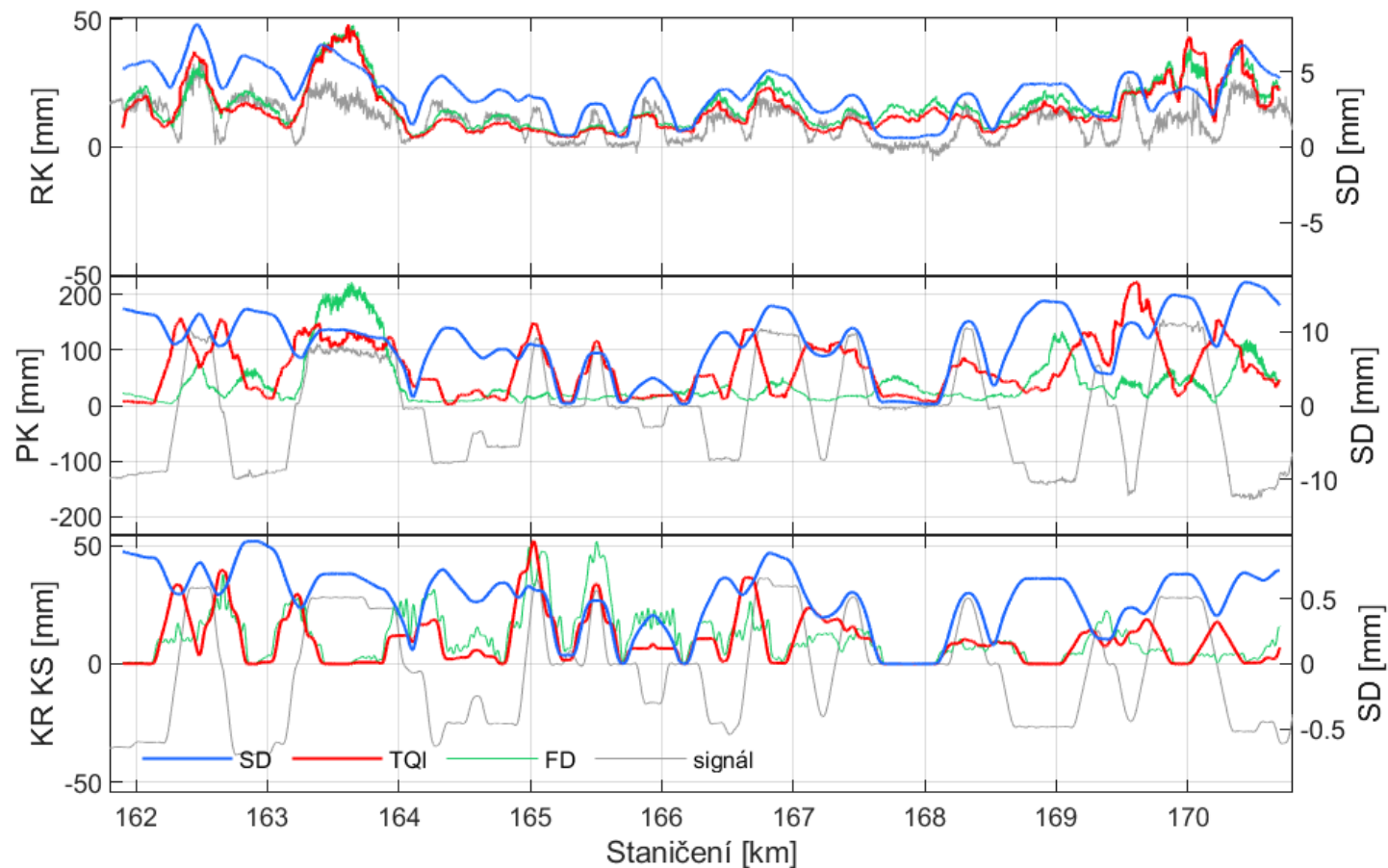
- Viditelná oscilace FD u SL = vyšší citlivost / horší přesnost
- ID více podobné ostatním => špatná kvalita úseku (trať u rybníka, časté změny GPK)
- Max. hodnota mezi 2 lokálními poruchami např. u VL km 15,5



Výsledky

Průběh veličin po délce koleje:

- Na průběhu nefiltrovaných parametrů lze vidět rozdíly
- SD nejhladší = nejméně citlivá, kopíruje signál v abs. hodnotě
- TQI a FD pro RK podobný průběh
- TQI nejvyšší u vzestupnic => nejvyšší délka signálu (PK, KR KS)
- FD nejvyšší v kruž. části oblouků => vyjadřuje drsnost signálu (PK)

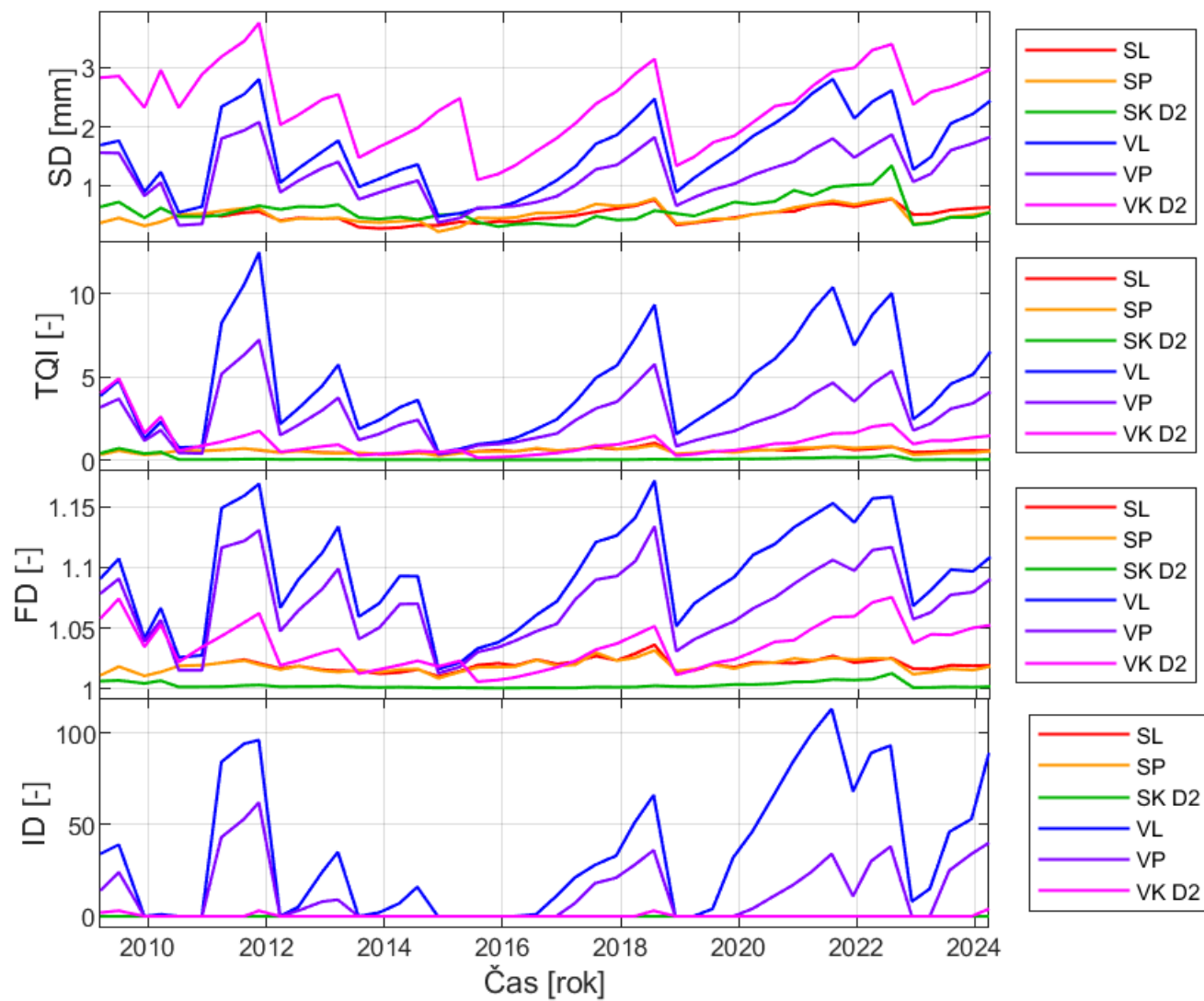


Brno – Adamov, K1, 5. 8. 2020

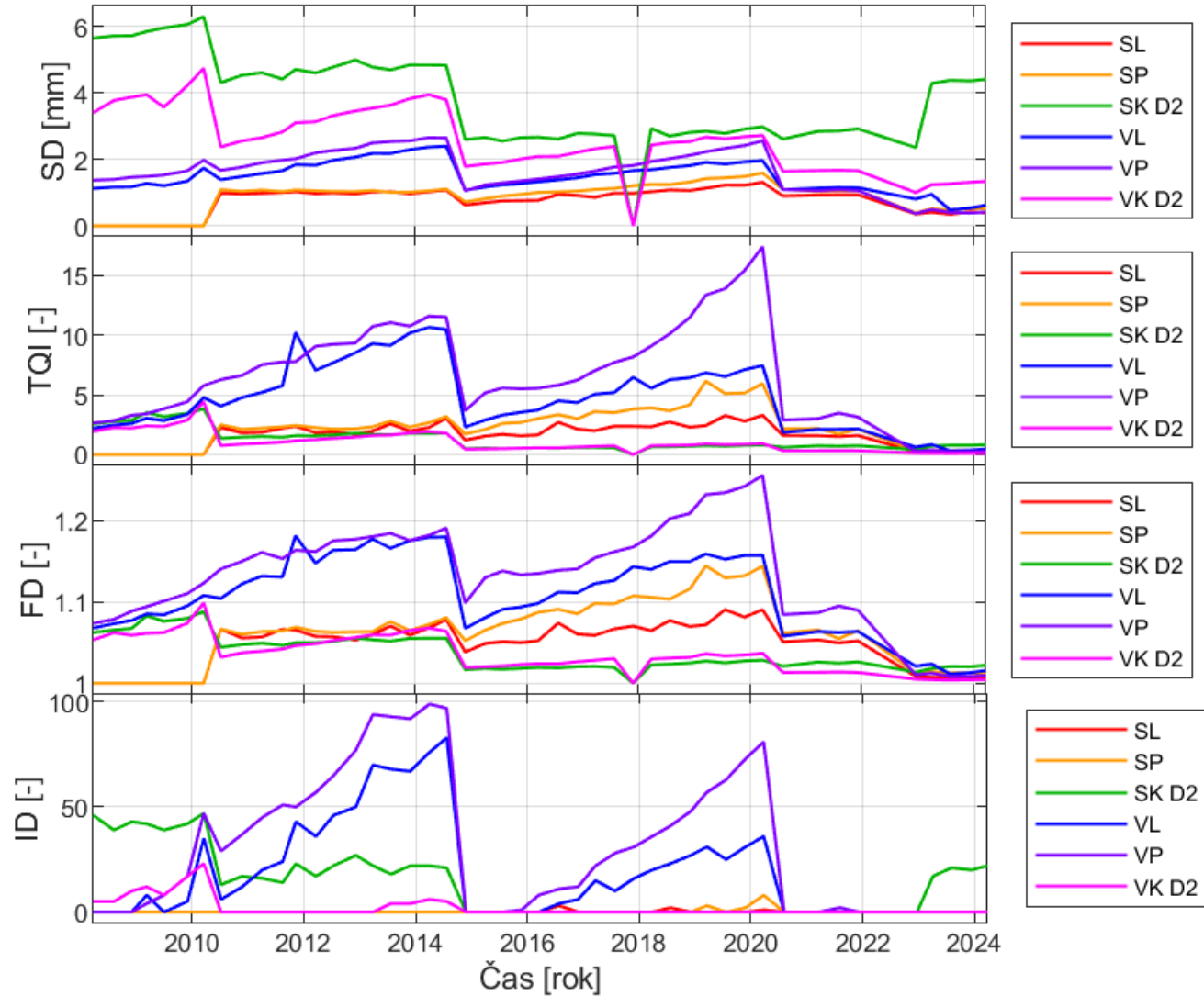
Výsledky

Vývoj veličin v čase:

- Graf pro každou veličinu, různé hodnoty a meze grafu
- Typický vývoj = cyklická degradace a opravy
- Podobný průběh SD, TQI a FD
- SD vysoké hodnoty v pásmu D2 => vyšší amplituda signálu
- TQI a FD měří délku a drsnost (klikatost) signálu
- ID špatně použitelná – málo vad
- Pokles 2010 = chybná data



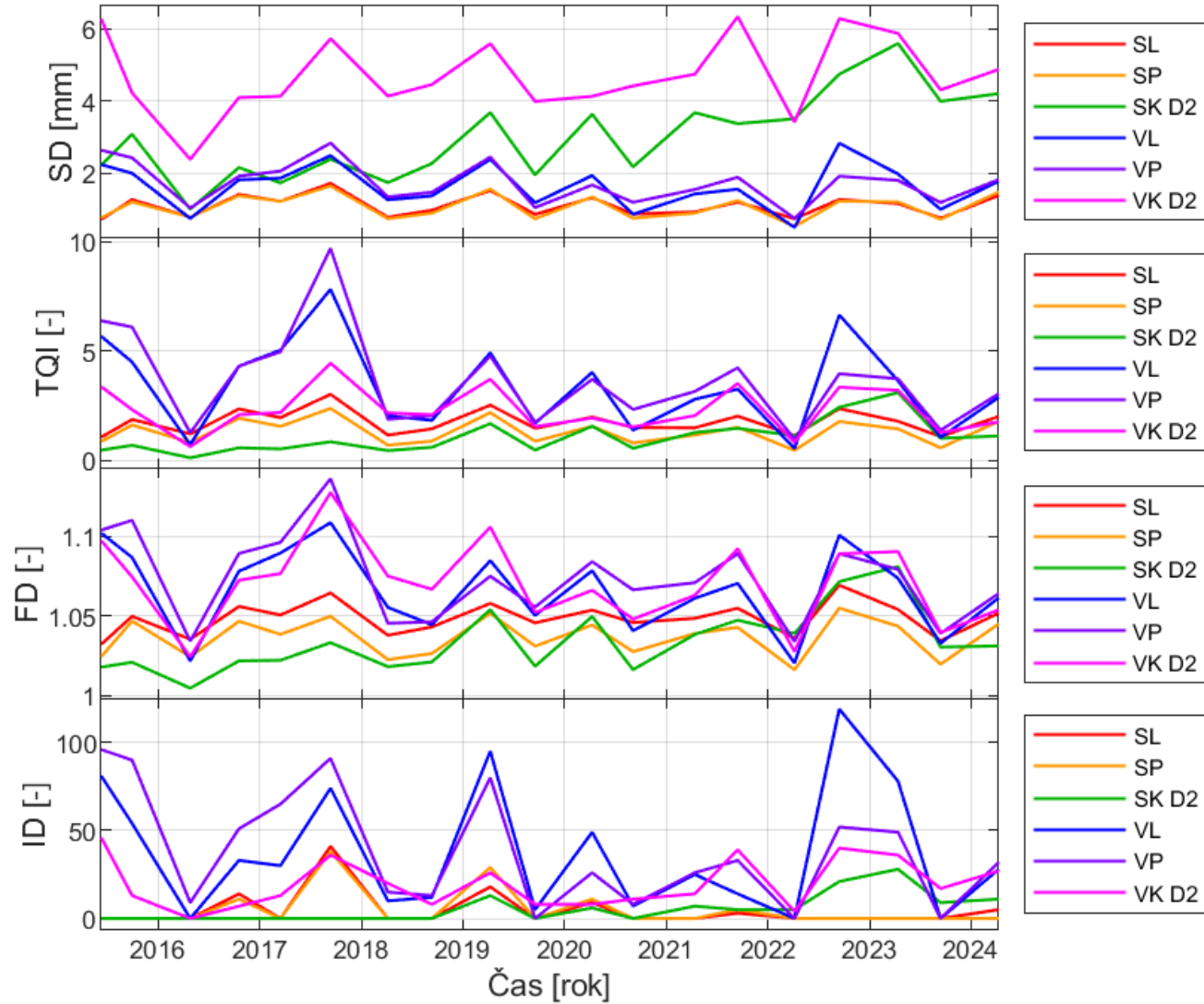
Hodonín – Rohatec, K1, km 105,8 – 106,0



Výsledky

Vývoj veličin v čase:

- Oblouk malého poloměru => vyšší hodnoty veličin (SK D2)
- Vyšší hodnoty u vnější kolejnice => SP a VP
- Rychlejší rozvoj degradace směru
- SD hladší průběh než TQI a FD
- Málo lokálních závad => ID
- SL a SP měřeny od roku 2010
- SK D2 a VK D2 nezměřeny 2017



Chořovice – Převýšov, K1, km 14,8 – 15,0

Výsledky

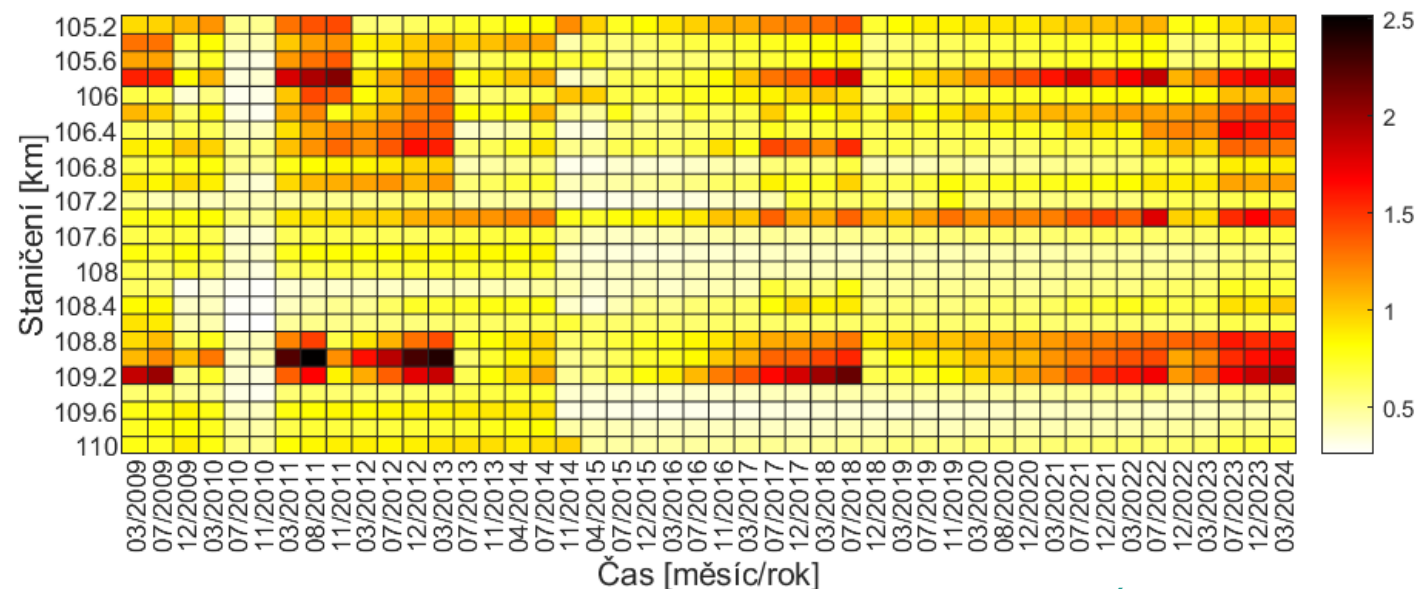
Vývoj veličin v čase:

- Úsek u rybníka, časté změny GPK
- Podbíjení každý rok => špatná kvalita žel. spodku (svršek 2015)
- Vysoké hodnoty SK D2 a VK D2
- Hodně lokálních závad => ID

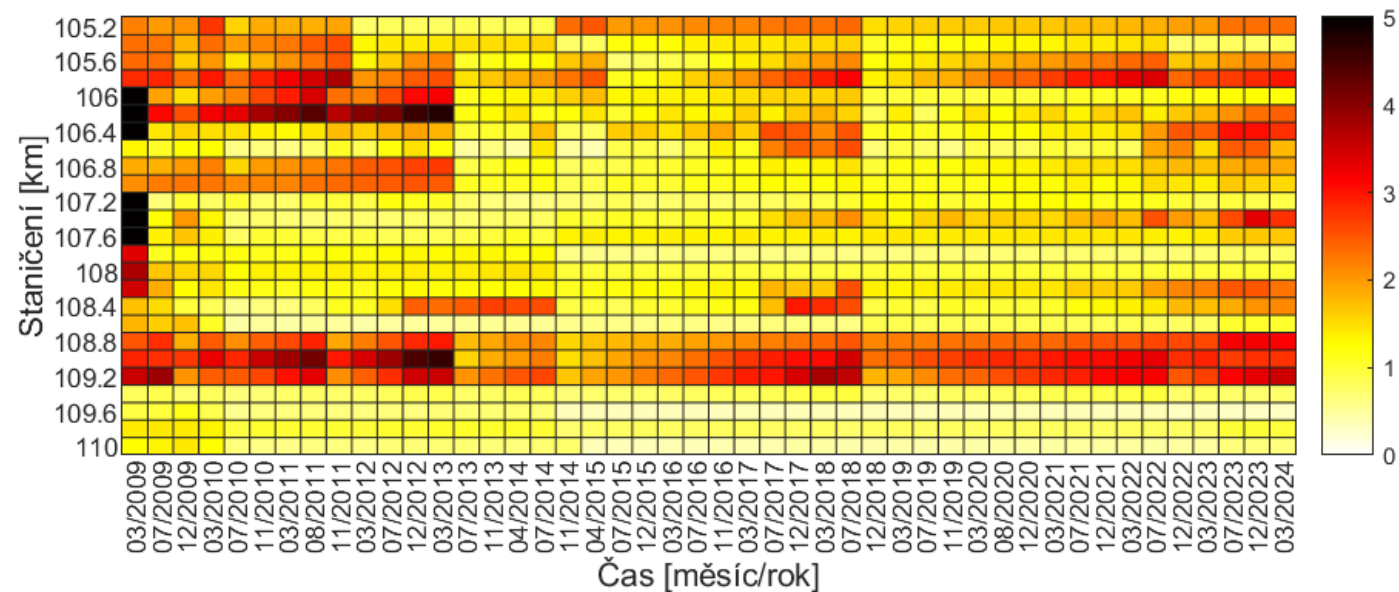
Výsledky

Vývoj veličin po délce i v čase:

- **Teplotní mapy:** vyšší hodnota => tmavší barva, nižší světlejší barva
- Dobré pro komplexní hodnocení
- Podbití: 2009, 2011, 2013, 2014, 2018 a 2022
- Úseky s nižší kvalitou degradují rychleji, kvalitní se příliš nemění
- Špatné úseky se liší pro D1 a D2
- Chybí data v roce 2010 => VP
- VK 1 – 70 m do roku 2010



VP, Hodonín – Rohatec, K1

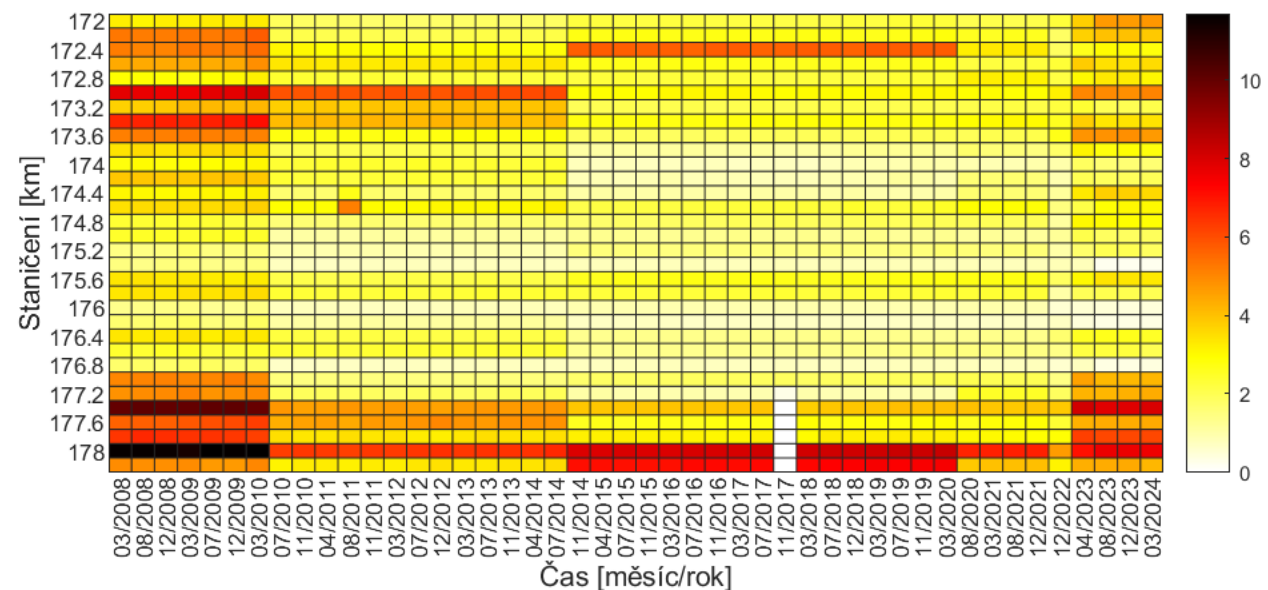
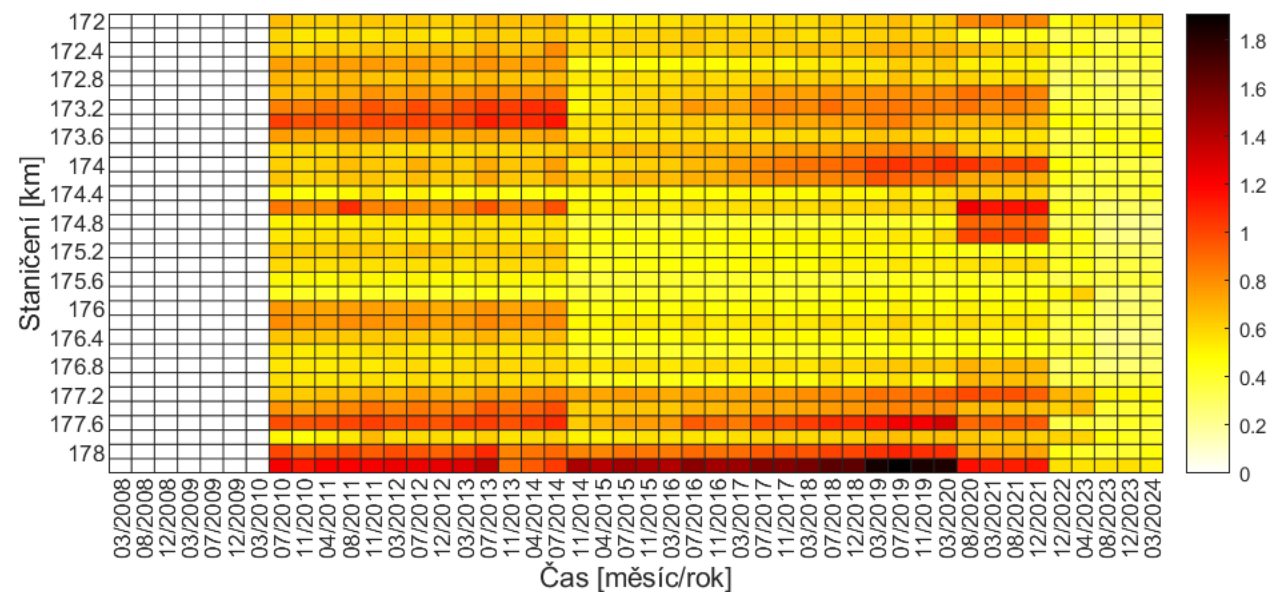


VK D2, Hodonín – Rohatec, K1

Výsledky

Vývoj veličin po délce i v čase:

- Chybí data: SL a SP do 2010
- Směr se v čase tolik nemění, po podbití může zlepšit i zhoršit
- SK 1 – 70 m do roku 2010
- Podbití: 2014 a 2020
- Modernizace: 2022
- Zvýšení amplitudy SK D2 => změna filtrace u MVŽSv2
- SK D2 nezměřen v roce 2017 => nižší V při vjezdu do stanice



Souhrn výsledků

- Silná korelace a podobný průběh SD s TQI a FD
- Velmi silná korelace a velmi podobný průběh TQI a FD
- Hladší vývoj SD v čase => nejlepší pro sledování vývoje v čase
- Oscilace FD a složitější výpočet
- Citlivost TQI na lokální závady a výpadky měření (hranatý signál)
- ID nedávají smysl pro úsekové hodnocení

Závěr



Aktuální provoz. zatížení pro každé měření



Jednotná databáze GPK a historie údržby



Odhad času překročení lineární regresí SD



Analýza vývoje kvality různých tratí



Prověření využití AI pro plánování údržby



Zkušenosti ze zahraničí



Děkuji za pozornost



FAKULTA ústav
STAVEBNÍ železničních
konstrukcí a staveb

Ing. Erik Dušek
erik.dusek@vut.cz