

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta

Ing. Jakub Chromčák

Autoreferát dizertačnej práce

**ANALÝZA POSUNOV A PRETVORENÍ PEVNEJ JAZDNEJ
DRÁHY VPLYVOM PREVÁDZKOVÉHO ZAŤAŽENIA**

na získanie akademického titulu Philosophiae doctor (PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

3636 geodézia a kartografia

v študijnom odbore:

geodézia a kartografia

Forma štúdia:

externá forma

Miesto a dátum:

Bratislava, apríl 2021

Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre geodézie Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Jakub Chromčák
Katedra geodézie
Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Školiteľ: prof. Ing. Alojz Kopáček, PhD.
Katedra geodézie
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Konzultantka: doc. Dr. Ing. Jana Ižvoltová
Katedra geodézie
Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Oponenti: prof. Ing. Otakar Švábenský, Csc.
Ústav geodézie
Fakulta stavební VUT Brno
Veveří 331/95, 602 37 Brno

doc. Ing. Hana Staňková, Ph.D.
Institut geodézie a důlního měřictví
Hornicko-geologická fakulta, VŠB- TU Ostrava
17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava

doc. Ing. Janka Šestáková, PhD.
Katedra železničního stavitelství a traťového hospodářstva
Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný:
(dátum rozoslania)

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa **o**.....**h**
Na

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
dekan stavebnej fakulty STU v Bratislave

STU

ÚVOD

Jedným z overených a najpoužívanějších spôsobov na prepravu tovarov a osôb je železničná doprava. Na rozdiel od iných typov dopravy sa jedná o pozemný (vo výnimočných prípadoch nadzemný) druh dopravy, ktorý sa odlišuje používaním umelej dopravnej cesty, nazývanej tiež železničná trať alebo koľaj. Táto je adekvátne vybavená technickým a prevádzkovým zariadením na zabezpečenie jej plynulého chodu. Predpis ŽSR [70] definuje, že dopravná cesta je súčasťou priestoru vybaveného na vykonávanie železničnej dopravy.

Podľa predpisu [71] je železničný zvršok jednou zo základných častí železničnej dopravnej cesty. Železničný zvršok tvorí jazdnú dráhu, ktorá nesie a vedie koľajové vozidlá. Skladá sa zo základnej konštrukcie tvorenej koľajami, výhybkami a výhybkovými konštrukciami a zo zvláštnych (účelových) konštrukcií alebo konštrukčných článkov, ktoré ju dopĺňajú. Klasická konštrukcia železničného zvršku je reprezentovaná tvarom, kedy je koľajový rošt uložený v klasickom štrkovom lôžku. Táto konštrukcia obstála vo viacerých požiadavkách kladených na dopravu, má nesporné výhody spojené s prepravou v smeroch ako prevádzková spôsobilosť, či únosnosť. Rovnaký typ konštrukcie však naráža aj na problémy. Najväčším problémom je strata priestorovej polohy koľaje. Z tohto titulu vyplýva nutnosť pravidelnej údržby trate, obmedzená hodnota priečneho odporu, pravidelné poškodzovanie jazdných plôch koľajníc zrnami koľajového lôžka spojené s nutnou rekonštrukciou a opravou spojenou s výmenou týchto častí. Zrná koľajového lôžka deformujú tvar kolies náprav. Fyzikálne požiadavky na klasickú konštrukciu železničného zvršku vplyvajú aj na jeho celkový tvar. Tento typ zvršku je charakteristický veľkou výškou konštrukcie, z čoho priamo vyplývajú vyššie požiadavky na podložie z hľadiska záťaže. Vyššie uvedené skutočnosti charakterizujú technické, prevádzkové a ekonomické limity pri využívaní tohto typu konštrukcie. Požiadavky na prepracovanie a posúvanie týchto limit viedli k vytvoreniu nových koncepcií nosných konštrukcií. Túto skutočnosť zdôrazňujú aj nové požiadavky, ako je zníženie prepravného času, zvýšenie objemov prepraveného materiálu a celkové presmerovanie toku prepravovaného materiálu z cestnej dopravy na železničnú.

Postupným skúmaním a analýzou koľajového zvršku sa ako najslabšia zložka ukázal prvok koľajového štrku. Bolo preukázané, že zmenou nosnej vrstvy, zmenou uloženia železničných podvalov a upevnenia železničnej koľaje je možné zabrániť plastickému správaniu konštrukčnej vrstvy. Aplikáciou inovatívnych postupov v oblasti železničného staviteľstva je zreteľný trend prechodu od zaužívaného plastického zvršku k pevnému. V súčasnosti je vo svete používaných prinajmenšom 34 rôznych druhov systémov železničných dráh s použitím pevnej konštrukčnej vrstvy. Tie je možné zotriediť do dvoch hlavných skupín, monolitické a prefabrikované. Podľa konštrukcie rozoznávame konštrukcie s podvalmi resp. bez podvalov a kontinuálne podopreté koľajnice. Podvaly môžu byť zabetónované alebo uložené na betónovej alebo asfaltovej doske. Konštrukcia podvalov môže byť monolitická alebo prefabrikovaná. Kontinuálne podopreté koľaje sú buď zaliate alebo len stabilizované profilmi (priamo alebo nepriamo). Jazdné dráhy s použitím tejto koncepcie vošli do povedomia a sú označované ako pevná jazdná dráha (ďalej PJD).

Podľa publikácie [56] je možné PJD nazvať konštrukciu železničného zvršku, v ktorej je roznášacia funkcia koľajového lôžka nahrádzaná spevnenými materiálmi a je uložená na betónovej alebo na asfaltovej nosnej vrstve. V porovnaní s klasickou konštrukciou má vyššiu stabilitu dráhy s dlhšou prevádzkovou spôsobilosťou, nízku potrebu údržby, dosahuje vyššiu životnosť. Medzi ďalšie výhody patrí aj dobrá dostupnosť a prakticky žiadne výluky na trati či neobmedzené použitie elektromagnetického brzdenia. Toto sú hlavné atribúty, prečo sa PJD začala používať a prirodzene nahrádzať klasickú konštrukciu. Jej použitie sa uplatňuje na vysokorýchlostných tratiach a tratiach s vysokým prevádzkovým zaťažením. Najmä vďaka konštrukčným vlastnostiam ako zníženie hmotnosti konštrukcie a výška dráhy bola zvolená PJD aj na území Slovenska a bola použitá ako náhrada v niektorých tunelových a mostných úsekoch modernizovaných úsekov štandardných železničných tratí.

Hlavnou úlohou železničnej dopravy Slovenska je konkurencieschopnosť apelujúca na plynulú prevádzku tratí, čo v technickom ponímaní predstavuje bezpečný pohyb vozidiel po koľaji. Overenie a skvalitnenie technických parametrov PJD môže v dlhšom časovom horizonte zabezpečiť kvalitu geometrických parametrov koľaje (GPK) a tým znížiť náklady na obnovu a údržbu a tak predĺžiť životnosť tratí. Sledovanie GPK sa teda stáva primárnou požiadavkou kladenou nielen na samotnú konštrukciu PJD, ale i prechodovej oblasti, slúžiacej na plynulé spojenie klasickej konštrukcie s PJD. Sledovať postupnú degradáciu koľaje je možné pomocou rôznych vzájomne nezávislých metód. Správne zvolenou metódou a interpretáciou výsledkov je možné včas identifikovať kritické zmeny a predísť výraznému poškodeniu alebo degradácii koľajového zvršku ďalším užívaním.

Súčasťou obnovy aktualizácie platnej legislatívy, ktorá reaguje na technický pokrok, je aj aktualizácia legislatívnych a technických predpisov, ktorých predmetom je návrh, stavba, rekonštrukcia, prevádzka, kontrola a údržba železničných dráh. Od 01.07.2015 vošli do platnosti normy STN 73 6360-1 (Železnice. Koľaj. Časť 1: Geometrická poloha a usporiadanie koľaje železničných dráh rozchodu 1 435 mm) a norma STN 73 6360-2 (Železnice. Koľaj. Časť 2: Preberanie stavebných prác, udržiavacích prác a hodnotenie prevádzkového stavu koľaje rozchodu 1 435 mm), ktoré nahradili dovtedy platnú normu STN 73 6360. Normy sa zaoberajú požiadavkami na navrhovanie, stavbu, rekonštrukciu a modernizáciu železničných dráh normálneho rozchodu do rýchlosti 300 km/h vrátane, určujú požiadavky na stavebné a technické parametre konštrukčného a geometrického usporiadania koľaje, koľajových rozvetvení a ich priestorovú polohu, preberanie stavebných a udržiavacích prác, hodnotenie prevádzkového stavu koľaje železničných dráh. [63] a [64]

Modernizácia teda podnecuje k zmene pohľadu a prístupu k problematike zamerania konštrukčného a geometrického usporiadania koľaje. Aktuálnosť problematiky naráža nielen na zmenu pohľadu, ale taktiež na zmenu softwarového a hardwarového vybavenia použitého na meranie. Z ekonomického hľadiska je tlak na vytvorenie nových technológií, ktoré si musia udržať parametre ako presnosť či spoľahlivosť, merania však musia byť tiež rýchle a bezpečné. Pri hodnotení stavu tratí je možné priestorovú polohu koľaje kontrolovať aj geodetickými prostriedkami s kontinuálnym (kvázi-kontinuálnym) záznamom. Norma STN 736360-2 [64] určuje, že meranie sprostredkované zabezpečí polohové určenie súradníc osi koľaje a výškové súradnice neprevýšeného temena koľajnicového pásu. Vo výnimočných, odôvodnených prípadoch je možné priestorovú polohu kontrolovať konvenčnými geodetickými metódami. V odôvodnených prípadoch je možné kontrolovať rozchod a prevýšenie koľaje ručnými meracími prostriedkami bez kontinuálneho záznamu.

1 MOTIVÁCIA

Už z úvodu je jasné, že modernizácia prístrojového vybavenia a technológií, použitých vo všetkých oblastiach merania sa priamo premietla i do problematiky merania a monitorovania priestorovej polohy koľaje. Inovácia prístupu sa priamo odrazila v aktualizácii normy STN 73 6360. V aktualizovaných častiach došlo k doplneniu častí, ktoré sa týkajú prístupu k monitorovaniu priestorovej polohy koľaje a analýze jej pretvorenia v priestore a čase.

Tento fakt má za následok spektrum zmien, ktoré sa odrážajú v pohľade na stabilizáciu a signalizáciu pozorovaných bodov, na zmenu technológie a spôsobu ich merania, či na zmenu z pohľadu analýzy, spracovania a interpretácie meraných dát. Súbežne s tlakom, vyplývajúcim z legislatívnych zmien došlo k modernizácii hardvérového a softvérového vybavenia, ktoré sa tiež priamo odráža v záujmovej oblasti problematiky, spôsoby merania a spracovania teda musia reflektovať aj túto oblasť modernizácie.

Z hľadiska prevádzky a možností užívania jazdnej dráhy je potrebné dbať na rýchlosť merania, keďže skutočnosť, že počas merania je nutná prítomnosť v koľajovej dráhe, sa odráža na možnosti jej okamžitého používania. Každá nutná výluka koľajovej dráhy sa výraznou mierou odráža na finančnom zaťažení prebiehajúceho merania. Konštrukčný systém PJD bol aplikovaný v dvojkoľajových úsekoch hlavných železničných koridorov Slovenskej republiky, výluka oboch koľají neprichádza do úvahy

a spravidla prevádzková koľaj je v okamihu merania zaťažená v o to výraznejšej miere. Z tohto dôvodu je nutné dbať i na bezpečnosť všetkých zainteresovaných častí počas merania. Preto je potrebné klásť dôraz na urýchlenie samotných meračských prác v predmetnom koľajisku. V súlade s aktuálnymi trendmi v oblasti ekológie je taktiež potrebné dbať na ekologickosť merania a jeho dopad na životné prostredie.

Z vyššie uvedených dôvodov je prirodzeným riešením aplikácia kontinuálneho merania pre potreby určenia priestorového priebehu PJD. V prístupe k meraniu je dôležité rozlíšiť pojmy technickej diagnostiky a merania posunov a pretvorení. Faktom zostáva, že pri analýze posunov a pretvorení jazdnej dráhy spôsobených dopravným zaťažením nie je možné tieto pretvorenia interpretovať ako zmenu priestorovej polohy diskretných bodov stabilizovaných na samotnom železničnom telese, či v jeho blízkosti. Pri interpretácii tohto typu deformácií sa jedná o porovnanie prepočítaných bodov, ktoré reprezentujú priebeh priestorovej polohy koľaje. Práve na túto skutočnosť treba dbať pri voľbe metodiky spracovania, rozbor presnosti, interpretácia výsledkov a ich spoľahlivosť. Hlavné otázky motivácie práce je teda možné zhrnúť do nasledovných konceptov:

- Ako správne nahradiť diskretné meranie kontinuálnym, bez dopadu na spoľahlivosť a hodnovernosť výsledkov merania?
- Aké sú technické možnosti aplikácie kontinuálneho merania pretvorení PJD vplyvom prevádzkového zaťaženia?
- Sú implementované metódy efektívne na tento typ merania?
- Spĺňa spôsob merania a jeho spracovanie požiadavky kladené na presnosť a je možné ho korektne interpretovať?

V rámci riešenia problematiky došlo k spolupráci katedier Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity s aplikáciou pre Železnice Slovenskej republiky, ktoré na nové výzvy vyplývajúce z novej konštrukcie reagovali vytvorením sledu výskumných projektov, zameraných na problematiku. Medzi schválené, realizované projekty, do ktorých bol zapojený samotný riešiteľ patria projekty HZ 6-3/51/SvF/2011 s názvom Monitoring časti úseku nekonvenčnej konštrukcie železničného zvršku a jej prechodových oblastí na modernizovanej trati ŽSR, Nové Mesto nad Váhom – Púchov žkm 100,500-159,100, objekt 24-32-01 Nové mesto nad Váhom – Trenčianske Bohuslavice, projekt 6-3/6/SvF/15 Monitoring prechodových oblastí PJD v Bratislavskom tuneli na koľaji č. 1 trate Devínska Nová Ves – Štúrovo, projekt HZ 6-3/52/SvF/2017 Vedecko-výskumný projekt ŽSR „Technická diagnostika konštrukcie PJD, prechodových oblastí a nadväzujúcich úsekov koľaje č. 1 a 2 trenčianskeho mosta“, projekt VEGA 1/0275/17 Aplikácia numerických metód pri definovaní zmeny geometrickej polohy koľaje, projekt HZ 6-3/8/SvF/2018 Technická diagnostika konštrukcie PJD, prechodových oblastí a nadväzujúcich úsekov koľaje č. 1 a č. 2 trenčianskeho tunela (III. a IV. epochové meranie), projekt HZ 6-3/59/SvF/2018 Zriadenie bezstykovej koľaje na tatranských elektrických železničiach v medzistaničných úsekoch ŽST Poprad- Tatry – ŽST Starý Smokovec a ŽST Starý Smokovec – ŽST Tatranská Lomnica (I. epochové meranie), projekt HZ 6-3/12/SvF/2019 Teoreticko-experimentálne overenie možnosti zriadenia bezstykovej koľaje na reálne prevádzkové zaťaženie, projekt HZ 6-3/8/SvF/2020 Teoreticko-experimentálne overenie možnosti zriadenia bezstykovej koľaje na tatranských elektrických železničiach, projekt HZ 6-3/7/SvF/2020 Experimentálny výskum geometrie koľaje PJD, jej prechodových oblastí a nadväzujúcich úsekov koľaje č. 1 a 2 trenčianskeho mosta vo vzťahu na reálne prevádzkové zaťaženie a projekt HZ 6-3/9/SvF/2020 Experimentálny výskum aplikácie oceľových podvalov tvaru Y pre náročné stavebné prevádzkové podmienky železničných tratí ŽSR. Jednalo sa o projekty zamerané na tvorbu komplexnej technológie a metodológie na určenie relatívnej a absolútnej polohy koľaje PJD, označenej ako nekonvenčnej konštrukcie železničného zvršku. Geodetická časť projektov sa zameriava na metódy GNSS, terestrické merania a 3D skenovanie a ich porovnanie v závislosti od použitej technológie a spracovania. Hlavným výstupom projektov, bolo overenie a analýza moderných geodetických meraní na meranie deformácií a železničných technológií na meranie technickej diagnostiky použitých pri meraní nekonvenčnej železničnej dráhy z pohľadu presnosti, objektívnosti a spoľahlivosti. Ďalším výstupom bolo objektívne odôvodnenie použitia komplexnej meracej technológie, založenej na geodetických a železničných meraniach na získanie presnej geometrickej polohy koľaje, parametrov ako rozchod,

prevýšenie smerovej polohy a pod. definovaných v národnom geodetickom systéme. Podľa [27] v prípade opakovaných periodických meraní bola ďalším výstupom diagnostika prípadnej priestorovej deformácie konkrétneho úseku trate.

Na základe uvedených faktov je možné formulovať hlavné ciele dizertačnej práce, s dôrazom na porovnanie meraní s použitím rôznych metód, na návrh vhodnej metodiky merania, spôsobu spracovania a inováciu hardvérového vybavenia, nutného na aplikáciu počas merania.

Práca popisuje a v jednotlivých kapitolách súčasný stav riešenej problematiky, prináša možné riešenia inováciou existujúcich, resp. vytvorením nových prístupov. V úvode sú načrtnuté problémy vyplývajúce zo osobitosti železničnej koľaje, nemožnosťou trvalej stabilizácie pozorovaných bodov na samotnej koľajnici, na výzvy spojené s unikátnosťou tohto typu stavebnej konštrukcie. Práca priamo poukazuje na potrebu aplikácie nových poznatkov v železničnom inžinierstve a nutnosť implementácie novej schémy monitorovania pre obdobný typ projektu. V súčasnosti je PJD aplikovaná len na vybraných úsekoch na území Slovenskej republiky, úsek Turecký Vrch je lokalitou, ktorá spĺňa požiadavky na monitorovania a poskytuje atraktívne prípadové štúdie svojou výraznou diverzitou na relatívne malom sledovanom úseku. Práca sa taktiež zameriava na súčasný hardvérový stav techniky, vhodnej na aplikáciu na technickú diagnostiku a monitorovanie deformácií. Opisuje tradičné, osvedčené princípy merania ako aplikácia univerzálnych meracích staníc či digitálnych nivelačných prístrojov. Taktiež rozoberá aplikáciu meračských princípov aplikáciou kontinuálneho záznamu či laserového skenovania, ktoré sa v čoraz väčšej miere začínajú uplatňovať pri monitorovaní deformácií a vytvárajú tak nové výzvy. Práca pojednáva o rôznych možnostiach spracovania a analýzy takýchto dát. V závere dochádza k sumarizácii experimentov vykonaných na meracích lokalitách a sú uvedené možnosti ďalšieho smerovania výskumu v kontexte praktických aplikácií v praxi.

2 Turecký vrch

PJD bola na území Slovenskej republiky aplikovaná vo viacerých úsekoch. Všetky tieto úseky vyplývajú z prestavby transeurópskych železničných koridorov. Meranie a pozorovanie pretvorení a deformácií bolo vykonané na všetkých dokončených úsekoch PJD, jedná sa o tunel Lamač, tunel Turecký vrch a most ponad rieku Váh v meste Trenčín. Z hľadiska zaujímavosti a významnosti je najzaujímavejší práve úsek Turecký vrch, nie len kvôli svojej výraznej diverzite smerových a sklonových pomerov, či traťových pomerov a charakteru konštrukcie. Na predmetnom úseku trate bolo vyhotovených najviac epochových meraní a úsek je taktiež najdlhšie sledovaným úsekom, ktorého monitoring trvá až do súčasnosti.



Obrázok 2-1 Tunel Turecký vrch (červenou) v úseku Nové Mesto nad Váhom - Trenčianske Bohuslavice

Tunel Turecký vrch je tunelom prechádzajúci popod vrch Turecký vrch, neďaleko Nového Mesta nad Váhom. Samotný tunel je prvým vybudovaným tunelom na území republiky v novodobej histórii Slovenska. Bol dokončený v roku 2012 a je súčasťou Transeurópskeho dopravného koridoru č. V, definovaného na Európskej konferencii ministrov dopravy CEMT, Benátky- Terst/ Koper- L'ubľana- Budapešť- Užhorod- L'vov, pričom samotný úsek je treťou vetvou koridoru Bratislava- Žilina- Užhorod. Jedná sa o kombinovaný železnično-cestný koridor s celkovou dĺžkou železníc 3270 km a dĺžkou ciest 2850 km. Zdroj [79] uvádza, že sa jedná o jednorúrovňový dvojkoľajný tunel s dĺžkou razeného úseku 1740 m, na ktorý nadväzujú úseky budované vo výkope z južného portálu v dĺžke 25 m a severného portálu v dĺžke 10 m. V celej dĺžke dvojkoľajného tunela je použitý jednotný prierez 80,75 m², uprostred tunela je rozšírený prierez na 126,65 m² pre dve 10 m dlhé napínacie komory pre trolejové vedenie. Modernizácia, prebiehajúca v rokoch 2009-2013 zasiahla 17,7 km jestvujúcej dvojkoľajovej železničnej trate na dopravnú rýchlosť 160 km/hod, resp. 200 km/hod (pre vozne s výkyvnými skriňami). Podľa [79] rekonštrukcia prebiehala v piatich stavebných úsekoch:

- UČS 24: medzistaničný úsek Nové Mesto nad Váhom – Trenčianske Bohuslavice,
- UČS 25: železničná stanica Trenčianske Bohuslavice,
- UČS 26: medzistaničný úsek Trenčianske Bohuslavice – Melčice,
- UČS 27: železničná stanica Melčice,
- UČS 28: medzistaničný úsek Melčice – Zlatovce.

Stavebné úseky UČS 24- UČS 28 pozostávajú z hlavných stavebných objektov:

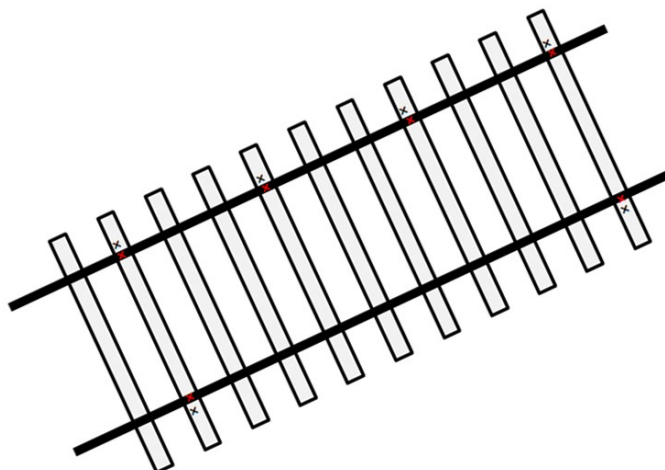
- jednorúrovňový dvojkoľajový tunel dĺžky 1775 m,
- dva železničné mosty,
- šesť cestných mostov,
- desať železničných mostov,
- tri podchody pre cestujúcich v železničných staniciach,
- štrnásť priepustov- nové a rekonštruované pôvodné,
- tri podchody pre verejnosť.

Podľa [80] sa výstavba začala v januári 2010. Prerazenie samotného tunela trvalo takmer rok a tunel sa podarilo preraziť 25. novembra 2010. [80] uvádza, že zhotoviteľom bolo združenie tvorené spoločnosťami OHL ŽS, a.s. Brno, Skanska SK, a.s., Váhostav – SK, Doprastav, a.s. a Eltra, s.r.o.. Osadenie PJD trvalo dva roky a tunel je v užívaní od 13. júla 2012. Variant vytvorenia tunelu dostal prednosť pred modernizáciou pôvodnej trate, pri ktorom by bolo nutné vytvorenie mnohých zárezov v chránenej krajinej oblasti, ďalším zavrnutým variantom bola výstavba trate mimo Trenčianskych Bohuslavíc spojenej s preložením cesty prvej triedy a železničnej stanice. Hlavnými dôvodmi výberu tunelového variantu bolo zníženie nákladov na údržbu trate v tuneli, eliminácia zásahov ovplyvňujúcich chránenú krajinnú oblasť, skrátenie jazdného času a dĺžky trasy a zníženie prevádzkových nákladov. Celková konštrukčná výška PJD RHEDA 2000® tiež priamo ovplyvnila veľkosť prierezu a s tým súvisiaci nutný objem vyrazeného materiálu. Celková dĺžka trate skrátila prejazdový čas o 7 minút.

staničenie	charakter konštrukcie	traťové pomery	úseky merania	smerové pomery	sklonové pomery		
102,321 000	klasická konštrukcia železničného zvršku	zemné teleso	meraný úsek č. 1	priamy úsek	+4,887‰-0,236‰		
102,350 250							
102,360 000							
102,380 000							
102,398 888							
102,460 500							
102,480 500	pevná jazdná dráha	prechod KKŽZ/PJD	meraný úsek č. 1	priamy úsek	+4,887‰-0,236‰		
102,485 500							
102,487 286							
102,514 000							
102,527 000							
102,535 000							
102,537 250		tunel dĺžka 1775m		oblúk s prechodnicou R=1995,800m p=84mm			
104,190 000							
104,199 750							
104,259 250							
104,275 000							
104,291 000							
104,307 750		prechod tunel/most	most	meraný úsek č. 2	oblúk s prechodnicou R=2004,200 m p=84mm		
104,460 000							
104,589 000							
104,594 000							
104,599 000							
104,630 000							
104,717 785		zemné teleso	most	meraný úsek č. 2	oblúk s prechodnicou R=2004,200 m p=84mm		
104,720 500							
104,740 500							
104,761 908							
104,793 688							
104,837 500							
104,840 000	klasická konštrukcia železničného zvršku	zemné teleso	meraný úsek č. 2	priamy úsek	+0,516‰-4,721‰		
104,841 750							

Obrázok 2-2 Schematické zobrazenie pomerov v meranom úseku "Turecký vrch"

V tabuľke sú schematicky zobrazené zmeny v charaktere konštrukcie, zmeny v traťových pomeroch, smerových a sklonových pomeroch, poloha vybraných stavebných objektov a merané úseky nachádzajúce sa v oblasti južného portálu a severného portálu.



Obrázok 2-3 Schéma umiestnenia pozorovaných bodov v lokalite Turecký vrch - pôdorys

Na obrázku vyššie je schematicky zobrazené osadenie pozorovaných bodov v lokalite Turecký vrch. V staničení s klasickou konštrukciou železničného zvršku a v prechodovej oblasti, kde je pár koľajníc uchytený na železničné podvaly, sú trvalo stabilizované pozorované body na týchto podvaloch tak, aby nezmenili a nenarušili funkčnosť konštrukcie (čierné krížiky). Na koľajniciach je naznačená poloha pozorovaných bodov bez možnosti stabilizácie (červené krížiky), ktorých určenie je potrebné na čo najpresnejší odhad matematického modelu priebehu koľaje. Z dôvodu zrýchlenia merania došlo k redukcii meraných bodov na jednej z dvojice koľajníc. Zníženie počtu pozorovaných bodov na jednej z koľajníc má za následok zníženie pozícií, v ktorých je možné určiť geometrické parametre ako rozchod či prevýšenie koľaje. Zníženie počtu pozorovaných bodov však bolo nutné z časových možností výluky na trati. V úsekoch s osadenou PJD bola vykonaná stabilizácia pozorovaných bodov rovnako, v rovnakej konštelácii a rozstupe, body však neboli stabilizované na podvaloch ale na pevnej doske.

3 Meracie systémy na kontinuálne meranie pevnej jazdnej dráhy

Samotná problematika merania PJD vytvára priestor na tvorbu rôznych prístupov a riešení, ktoré by spĺňali požiadavky na hardvérové vybavenie potrebné na takýto typ merania. Jednou z možností je určenie polohy pozorovaných bodov priestorovou polárnou metódou. Ďalšou možnosťou je využitie GNSS technológie. Poslednou možnosťou je umiestnenie meracieho zariadenia (prístroja) na pohybujúce sa zariadenie, pričom priebeh dráhy je interpretovaný bodmi, ktoré sú vypočítané ako súradnice stanovísk prístroja. Počas merania sa prístroj orientuje, na statický signál.

Komerčné či vedecké spoločnosti majú rôzne prístupy k problematike kontinuálneho merania. Jedným z prístrojov používaným na tieto merania u Železníc Slovenskej republiky je merací **systém GRP 5000** od firmy Amberg Technologies. So zorným poľom $360^\circ \times 310^\circ$ sa tento špecializovaný 3D skener používa aj na meranie prejazdového prierezu. Samotný systém má integrované viaceré snímače, vďaka ktorým je schopný merať rozchod a prevýšenie koľaje. Amberg v [81] uvádza, že systém umožňuje meranie v kinematickom móde pomocou výkonného skenera, ktorý umožňuje meranie až viac ako 500 000 bodov/s. Systém umožňuje automatický zber a spracovanie údajov o polohe trate a objektov nachádzajúcich sa v jej blízkosti. Meračský systém pozostáva z viacerých modulov, čo umožňuje flexibilnú prevádzku. Pôvodne bol tento systém zostavený pre účely kontroly prejazdového profilu a pre účely návrhu nových stavebných objektov. Hardvér však bol rozšírený, aby bolo vďaka meraniu možné vykonávanie aj iných meračských úloh. Systém teda umožňuje meranie geometrie koľaje, rozchod a prevýšenie koľaje.



Obrázok 3-1 Použitie systému GRP 5000 na železničnej trati Bratislava- Žilina, úsek Turecký Vrch

Merací systém GRP 5000 v kombinácii s univerzálnou meracou stanicou (UMS) umožňuje dosahovať presnosť súradníc osi koľaje až na úrovni 5 mm. Výsledná presnosť je priamo závislá na kvalite UMS, na vzdialenosti GRP 5000 od vzťažných pozorovaných bodov, a fyzikálnych podmienok počas merania. Presnosť merania rozchodu dosahuje 0,3 mm. Prevýšenie je určené snímačom naklonenia s presnosťou 1,0 mm. GRP 5000 je možné kombinovať aj s GNSS prijímačmi.



Obrázok 3-2 Systém GRP 5000 - Profiler 6012 od spoločnosti Amberg Technologies

Špecifickosť a originalita problematiky koľajových dráh v železničnom staviteľstve viedla k vývoju rôznych, jedinečných meracích prístrojov a pomôcok špecializovaných len na meranie koľajových dráh. Jedná sa napríklad o meracie vozíky, meracie vozne, meracie ručne či súpravy. Počas samotného merania pre účely dizertačnej práce došlo k inovácii a úprave v meranej lokalite už predtým používaného meracieho vozíka KRAB. Pri softvérových možnostiach, ktoré boli dostupné pre merania došlo za podmienky neporušenia technických a funkčných parametrov meracieho vozíka KRAB k inštalácii skrutky, pomocou ktorej je možná opakovaná identická stabilizácia meracej sústavy (anténa GPS

prístroja, odrazový hranol robotizovanej univerzálnej meracej stanice). Testovacie merania boli teda vykonané vo viacerých fázach počas jednotlivých epochových meraní. Pri aplikácii odrazového hranola robotizovanej UMS mohla diagnostika jednotlivých koľají prebiehať simultánne s kvázi-kontinuálnym záznamom univerzálnej meracej stanice s definíciou pravidelného centimetrového kroku, čo v praxi znamená, že súbežne s diagnostickým meraním vykonávaným KRABom bola zameraná priestorová poloha bodov koľaje.



Obrázok 3-3 Súbežná diagnostika absolútnej a relatívnej polohy koľaje s epochovým meraním posunov a deformácií PJD

Tieto body prezentujú odsadený priebeh osi koľaje, ktorý je nutne spôsobený polohou skrutky umiestnenej na KRABe, na ktorej je odrazový hranol osadený. Podobne prebiehalo aj meranie s GNSS anténou. Fakt, že priebeh koľaje v jednotlivých profiloch je prezentovaný len jedným bodom spôsobuje stratu možnosti výpočtu parametrov ako prevýšenie či rozchod koľaje. Týmto spôsobom sa teda absolútne meranie *stáva závislým* na meracom vozíku. Vlastnosti ako rozchod alebo prevýšenie koľaje je možné zistiť len v kombinácii s údajmi zaznamenanými z technickej diagnostiky vykonanej pomocou meracieho vozíka KRAB. Dôležitá je preto kontrola a porovnanie počiatkových a konečných staničení merania, ktoré je potrebné vedieť pre správnu referenciu dvojice meraní.

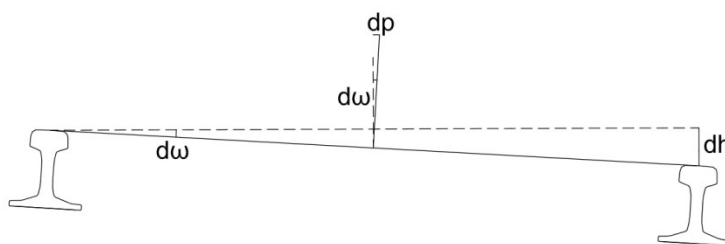
Spôsob stabilizácie odrazového hranola na merací vozík vnáša do problematiky ďalšie problémy vyplývajúce zo stabilizácie. V miestach trate, kde dochádza ku klopeniu koľaje je možné uvažovať o miernej polohovej excentricite pozorovacej sústavy. Podobný problém nastáva aj pri výškovom určení temena neprevýšenej koľaje. Tieto problémy sú však numericky riešiteľné a polohová resp. výšková excentricita by mohla byť teoreticky interpretovaná funkciou závislou od prevýšenia koľaje.

Existuje priame algebraické riešenie medzi posunom meraného stredu osi koľaje a osi koľaje ako je vidieť na obrázku 4-5.



Obrázok 3-4 Ukážka možnosti umiestnenia meracieho systému s anténou GNSS (vľavo) a s 360° aktívnym odrazovým hranolom UMS (vpravo)

Pri tomto spôsobe prepočtu súradníc v horizontálnom a vertikálnom smere vstupuje do výpočtov ďalšia požiadavka a to požiadavka na koincidenciu dvoch typov merania, pričom do výpočtu môžu vstupovať nepresnosti vyplývajúce z posunu staničenia a podobne. V prípade porovnania epochových meraní je možné chyby vyplývajúce z excentricity spôsobenej prevýšením koľaje považovať za vplyvy rovnakej veľkosti a smeru, teda s rovnakým vplyvom vo všetkých meraniach. Za predpokladu, že prevýšenie koľají sa v jednotlivých epochách nemení je teoreticky možné považovať ju za konštantnú a teda jej vplyv sa medzi porovnaním epochových meraní ruší. V opačnom prípade je nutné prihliadať na túto skutočnosť. Rozdiel však nastáva v porovnaní s projektovanou hodnotou, kedy je nutné eliminovať túto chybu spolu s rozmermi vyplývajúcimi z tvaru sústavy.



Obrázok 3-5 Schematické znázornenie excentricity spôsobenej vplyvom prevýšenia koľaje vyjadreného pomocou uhla $d\omega$ s polohovou excentricitou meracieho systému dp a výškovým rozdielom k výške nprevýšeného koľajnicového pásu $dh/2$

Ďalšou metódou, ktorá prichádza do úvahy je metóda aplikácie terestrického laserového skenovania a vybraných druhov fotogrametrie pre tento typ úlohy. Hlavnou výhodou metódy je, že sa vyhýba signifikantnému problému aplikácie hranolového merania, resp. merania za pomoci monitorovacej konštrukcie, meranie zachytáva skutočný povrch dopravnej konštrukcie. Pri súčasných trendoch v metódach merania sa kladie veľký dôraz na ekonomickosť merania so súvisiacimi nákladmi na meranie a spracovanie, ekologickosť, bezpečnosť merania resp. potenciál budúcej automatizácie. V rámci problematiky, akou meranie geometrických parametrov koľaje je, je z finančného hľadiska najnáročnejšie zabezpečenie výluky na trati, na ktorej je meranie uskutočnené. Z tohto dôvodu je teda logicky najväčší tlak vyvíjaný na zvýšenie rýchlosti samotného merania.

Použitie monitorovacej konštrukcie má viacero negatívnych dopadov na epochové meranie. Priamym meraním povrchu konštrukcie, akou je železničná koľajnica, dochádza k eliminácii chýb vyplývajúcich z nepresnej, rozdielnej signalizácie pomocou hranola, resp. o chyby vyplývajúce z neidentického opakovaného zostavenia monitorovacej konštrukcie, napriek obrovskej snahe o ich elimináciu. U oboch metód sa jedná o bezkontaktný, neinvazívny spôsob merania. Pre možnosť aplikovania metódy na meranie pretvorení a deformácií je potrebné dbať na presnosť tohto typu úlohy, pretože presnosť metódy a výsledných modelov je značne determinovaná súčasnými možnosťami. Je potrebné uvažovať nie len o presnosti, ale tiež o možnostiach výstupu a interpretácie, ale v dobe súčasného technického rozmachu tiež o možnej automatizácii merania, resp. spracovania meraní.

Z hľadiska použitých metód signalizácie a merania je možné meranie pomocou monitorovacieho systému s prítomnosťou odrazového hranola považovať za štandardný prístup, ktorý je zároveň možné považovať za kontrolný z hľadiska skúsenosti s jeho používaním v doterajšej praxi. Podobne možno zvoliť aj inú kontrolnú metódu merania parametrov PJD, konkrétne sa jedná o metódu veľmi presnej nivelácie. Veľmi presná nivelácia je v rámci podmienok a parametrov meranej lokality ideálnou voľbou na kontrolu výšky nielen neprevýšenej, ale i druhej, prevýšenej koľajnice v meranom úseku. Pri položení meracej laty na temeno koľaje vystáva rovnaký problém ako pri podrobnom meraní polohy koľaje pomocou monitorovacej sústavy. Podobne ako pri stabilizácii bodov na účely polohového merania, nie je možná ani stabilizácia bodov na výškové meranie, preto je meranie možné len v rovnakých podmienkach, teda signalizácia bodu vyjadrená umiestnením nivelačnej laty v relatívne rovnakom úseku, umiestnenom nad stabilizovaný bod, umiestnený na železničnom podvale, resp. doske. Z pohľadu tuhosti koľajnicového pásu je identifikácia miesta merania postačujúca pre meranie priečnych posunov. Chyba pointácie sa prejaví najmä v prítomnosti transversálneho posunu (posunu v smere osi koľaje). Tomuto faktoru treba prispôbiť aj následný výpočet. Súčasťou nivelácie je zameranie kontrolných bodov umiestnených nielen mimo koľajníc, ale tiež mimo koľajiska na objektoch v blízkosti trate.

Pri použití monitorovacej sústavy s aplikáciou odrazového hranola je nutná presná signalizácia všetkých štyroch bodov profilu, ktoré sú zobrazené na Obrázok 2-3. Tento typ merania je časovo náročný z dôvodu nutnosti presunu medzi jednotlivými pozorovanými bodmi a má výrazný vplyv na dobu merania. Kvôli potrebe zrýchliť meranie je možné redukovat' počet pozorovaných bodov na oboch koľajniciach prípadne znížiť hustotu signalizovaných bodov na jednej z koľají. Samozrejme v tomto prípade dochádza k možnej zníženej hodnovernosti vyhotovených meraní a k zníženiu kvality kontroly určených parametrov, ako sú rozchod či prevýšenie koľaje.

Naopak pri meraní pomocou meracieho systému umiestneného na zariadení určenom priamo na meranie technickej diagnostiky koľaje, akou je napríklad KRAB, dochádza k efektívnemu zrýchleniu celého merania. Po určení stanoviska a orientácie je dĺžka merania vybraných geometrických parametrov koľajníc len otázkou prechodu od začiatku meraného úseku po jej koniec. Tento prístup je časovo efektívnejší, keďže hustota bodov je len na zvážení užívateľa, pričom je možná definícia dĺžkového rozstupu medzi jednotlivými bodmi, resp. definícia časového intervalu medzi jednotlivými momentmi kvázi-kontinuálneho záznamu bodov. Keďže sa jedná o signalizáciu na zariadení, ktoré je špeciálne usporiadené na meranie na železničnej dráhe, monitoring je jednoduchý a zabezpečuje jeho plynulý priebeh počas celej doby merania. Pri aplikácii technológie GNSS je rýchlosť tiež priamo závislá na rýchlosti prechodu meraným úsekom, závislým na hustote pozorovaných bodov. Pri stabilizácii signalizačnej sústavy, resp. prijímača na zariadenie usporiadené na meranie technickej diagnostiky koľaje je teda možné hovoriť o najrýchlejších spôsoboch realizácie merania posunov a deformácií.

Aj v prípade terestrického laserového skenovania je hlavnou úlohou zameranie priebehu temena koľajníc, samotný spôsob merania (voľba polohy stanovísk, ich umiestnenie a pod.) je teda priamo závislé na líniovom charaktere meranej problematiky. Po jednotlivých skúškach a testoch je pre zachytenie tvaru dôležité, aby stanoviská jednotlivých skenov boli od seba vzdialené tak, aby bol medzi jednotlivými skenmi dostatočný prekryt, pričom stanovisko by nemalo byť umiestnené príďaleko od priebehu koľajnicových pásav, aby čo najlepšie zachytilo ich tvar. Je vhodné použitie výrezov. Tvorba

výrezov má význam z časového hľadiska. Z hľadiska metodiky merania je vhodné robiť terestrické laserové observácie z vrcholov polygónového ťahu, vedeného v blízkosti trate. Pri vedení ťahu je nevyhnutná kombinácia troch stanovísk, pričom prostredné slúži ako stanovisko meracej stanice, dve krajné stanoviská sú označené cieľovými značkami, ktoré sú potrebné na následné vzájomné referencovanie jednotlivých skenov. V miestach, kde dochádza k nižšej hustote pozorovaných bodov meranej lokality, z dôvodu vyššej vzdialenosti od stanovísk skeneru, dochádza k prieniku mračen bodov dvoch susedných skenov, napriek tomu je však hustota mračna bodov nižšia, ako hustota mračna bodov v bezprostrednej blízkosti skenera. Túto skutočnosť je nutné zohľadniť v postprocessingu a má priamy dosah na predspracovanie meraných dát. Z hľadiska časovej náročnosti sa pri terestrickom laserovom skenovaní nedá hovoriť o rýchlej metóde. Z hľadiska presnosti a hustoty meraných bodov, ktorá je priamo závislá na umiestnení 3D skeneru vzhľadom ku priebehu koľaje, je nutné zvýšenie hustoty stanovísk, z ktorých je meranie uskutočnené. Jednou možnosťou urýchlenia merania za použitia 3D skeneru je meranie vo výrezoch. Umiestnenie skeneru v blízkosti líniovej stavby však smeruje k nastaveniu zorného uhla blízkeho 180°. Z vybraných metód sa jedná o najpomalšiu metódu. Za zmienku tiež stojí náročnosť, vyplývajúca z objemu meraných dát, keďže v prípade 3D skenovania dochádza k zameraniu obrovského kvanta dát, ktoré kladú vysoké požiadavky na spracovateľský softvér, taktiež časová náročnosť spojená s editáciou a spracovaním dát, ktorá je i v súčasnosti automatizovaná len čiastočne.

Z hľadiska bezpečnosti merania sa jedná o spoluprácu medzi meračskou skupinou ako zabezpečovanými pracovníkmi a prítomnými pochôdzkarmi, ktorí ako zabezpečujúci pracovníci sledujú celý priebeh. Meranie je z dôvodu bezpečnosti nutné viesť za výluky koľaje, pričom je nutná výluka len tej koľaje, na ktorej sa samotné meranie uskutočňuje. Pri meraní je však nutné dbať na fakt, že v prípade dvoj a viackoľajových tratí môžu byť tzv. živé koľaje, teda koľaje v prevádzke, preto je potrebné vhodné umiestnenie prístroja mimo zóny otrasov, spôsobených prevádzkovým zaťažením v priebehu merania. Podobne je to aj so signalizáciou vzťažných bodov, ktoré sú stabilizované na opačnej strane „živej“ koľaje. Pri samotnej signalizácii meraných bodov však nedochádza k obmedzeniu bezpečnosti figuranta pri signalizácii. V prípade veľmi presnej nivelácie je nutné tiež klásť dôraz na prítomnosť trakčného vedenia, ktoré by však pri svojich stávajúcich proporciách nemalo ovplyvniť, resp. z hľadiska bezpečnosti ohroziť samotné meranie.

Použité prístrojové vybavenie	Spôsob zberu dát	Predspracovanie meraní	Príprava na spracovanie meraní	Interpretácia posunov a deformácia
UMS	meranie bodov diskrétné (na doske resp. temene koľaje)	oprava meraných dát	výpočet súradníc podrobných bodov (2D/3D) vhodných na aplikáciu matematického modelu	aplikácia a vzájomné porovnanie matematických modelov
	aplikácia hranola na merací vozík			
	aplikácia UMS na merací vozík			
GNSS	meranie podrobných bodov aplikáciou GPS antény na merací vozík	oprava meraných dát		
TLS	skenovanie temena koľaje polygónovým ťahom	Vzájomné georeferencovanie jednotlivých skenov → čistenie skenov → tvorba rezov		
Nivelácia	VPN → meranie podrobných bodov diskrétné (na doske resp. temene koľaje)	oprava meraných dát	výpočet výšok podrobných bodov	porovnanie výšok podrobných bodov diskrétné

Tabuľka 3-1 Schematické znázornenie jednotlivých krokov merania a spracovania výsledkov meraní

4 Spracovanie experimentálnych meraní

Experimentálne meranie PJD bolo vykonané na viacerých úsekoch. Epochové merania boli opakovane vykonané na všetkých úsekoch nachádzajúcich sa na Slovensku. Najviac meraní bolo vykonaných na úseku Turecký vrch, kde dochádza k meraniu severného aj južného portálu tunela. Monitoring stále prebieha a lokalita sa javí ako skvelá príležitosť na testovanie inovatívneho spôsobu spracovania a analýzy meraní PJD.

Diskrétna merania je v tomto prípade možné označiť ako klasické, konvenčné metódy merania. Jedná sa najmä o metódy používané na meranie posunov a pretvorení ako **polárnu metódu** či **presnú niveláciu**, ale i spracovanie meraní, ktoré vznikli špeciálne pre tento typ úloh. Pre meranie v železničnom staviteľstve boli vyvinuté metódy ako **metóda oblúkových súradníc**, využívajúca matematické vzťahy medzi tetivou, vzopätím a polomerom oblúka, **metóda pričných posunov**, zameraná na meranie polohy medzi dvomi epochami v smere normály, **polygónová metóda**, nahrádzajúca priebeh osi koľaje súradnicami polygónového ťahu či **metóda dlhých tetív**.

Pri epochových meraniach, spracovaných v dizertačnej práci boli použité polárna metóda a metóda presnej nivelácie.

Spracovanie polohových meraní

Spracovanie a vyrovnanie polohových meraní je možné s pohľadom na technológiu merania rozdeliť do viacerých kategórií. Pri meraní posunov a deformácii PJD bola, ako je uvedené vyššie, zameraná sústava pozorovaných bodov, trvalo stabilizovaných na doske, na ktorej je samotná PJD osadená. Pre určenie deformácií jednotlivých koľajníc bol zameraný ich priebeh pomocou špecializovaného hardvérového vybavenia diskretné, ale i spojito. Vzhľadom na rozdielne spôsoby zamerania je nutné pristupovať rozdielne aj k vyrovnaní a interpretácii výsledkov.

Vyhodnotenie posunov a pretvorení bodov stabilizovaných na doske sa deje štandardným postupom vyhodnotenia posunov. Súradnice pozorovaných bodov na doske sú porovnávané ako odchýlky súradníc bodov v smere osi x a y , polohová odchýlka je uhlopriečkou obdĺžnika posunov v jednotlivých smeroch. U samotnej dosky sa nepredpokladajú pretvorenia vplyvom prevádzky, preto body, ktoré sú trvalo osadené na doske je možné považovať za stabilné. Preto epochové merania vykonané na týchto bodoch je zároveň možné považovať za kontrolné merania. S určitosťou je možné považovať za kontrolné meranie zameranie bodov, trvalo stabilizovaných do elektrických stĺpov popri trati.

Metódy analytickej geometrie

Ďalšou z možností interpretácie meraných dát je možnosť interpretácie vďaka metódam aplikovaným v analytickej geometrii. Pri odhade a vyrovnaní meraní sa tieto metódy javia ako vhodné na spracovanie a korektnú interpretáciu.

Vyrovnanie priameho úseku v rovine

Základný *smernicový tvar* priamky v rovine je pre merané súradnice bodov v osi resp. na koľajnicovom páse prezentovaný tvarom **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** pomocou ktorej sú naplnené jednotlivé matice, nutné pre výpočet Gauss-Markovho modelu. Pre výpočet uzáverov dôjde k úprave rovnice na tvar :

$$u_i = k_0 x_i + q_0 - y_i,$$

4-1

a z tejto rovnice je nutné vychádzať aj pri napĺňaní matice opráv a matice plánu. Matica opráv **B** vznikne deriváciou rovníc podľa meraných veličín, v tomto prípade x_i a y_i . Matica **B** má tvar:

$$\mathbf{B}_{2n,n} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(u_1)}{\partial x_1} & \frac{\partial f(u_2)}{\partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f(u_n)}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f(u_1)}{\partial y_1} & \frac{\partial f(u_2)}{\partial y_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f(u_n)}{\partial y_1} \\ \frac{\partial f(u_1)}{\partial x_2} & \frac{\partial f(u_2)}{\partial x_2} & \dots & \dots & \frac{\partial f(u_n)}{\partial x_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f(u_1)}{\partial x_n} & \frac{\partial f(u_2)}{\partial x_n} & \dots & \dots & \frac{\partial f(u_n)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f(u_1)}{\partial y_n} & \frac{\partial f(u_2)}{\partial y_n} & \dots & \dots & \frac{\partial f(u_n)}{\partial y_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ -1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & k_0 & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & -1 & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_0 & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & -1 \end{pmatrix}, \quad 4-2$$

a matica plánu $\mathbf{A}$, ktorá vznikne parciálnou deriváciou rovníc podľa neznámych má tvar:

$$\mathbf{A}_{n,2} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(u_1)}{\partial k} & \frac{\partial f(u_1)}{\partial q} \\ \frac{\partial f(u_2)}{\partial k} & \frac{\partial f(u_2)}{\partial q} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f(u_n)}{\partial k} & \frac{\partial f(u_n)}{\partial q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{pmatrix}, \quad 4-3$$

kde n je počet meraných veličín a vektor uzáverov v tvare $\mathbf{u}_{n,1}$.

Po vyrovnaní a výpočte vektora $\mathbf{dx}$ a vektora $\mathbf{v}$ boli výsledky testované na platnosť podmienok:

$$\mathbf{B}^T \mathbf{v} + \mathbf{A} \mathbf{dx} + \mathbf{u} = 0, \quad 4-4$$

a kontrole po dosadení vyrovnaných veličín do kontrolných rovníc

$$k\bar{x}_i + q - \bar{y}_i = 0, \quad 4-5$$

pričom $\bar{x}_i$ a $\bar{y}_i$ sú hodnoty meraných súradníc x_i a y_i po vyrovnaní.

Ukážka aplikácie teoretických výpočtov na meranej lokalite v úseku „Turecký vrch- Severný portál“

Testovací výpočet uvedený vyššie bol vykonaný na údajoch merania v lokalite Turecký vrch- Severný portál, v priamej časti úseku v staničení nžkm 104,710-104,810 zameraných polárnou metódou. Priamy úsek následne na základe projektovej dokumentácie plynule prebiehal do prechodnice a následne do oblúka. Jednalo sa o body merané v lokálnom súradnicovom systéme po transformácii z S-JTSK03. Súradnice jednotlivých bodov boli redukované o hodnotu $[Y_0, X_0]$.

Najväčšie polohové odchýlky jednotlivých bodov medzi jednotlivými typmi zápisu nenaberajú rozdiely väčšie ako 17 mm. Najväčšie polohové odchýlky medzi meranými hodnotami a vyrovnanými hodnotami pozorovaných bodov nepresahujú hodnotu 8 mm.

Typ zápisu priamky	Všeobecný zápis priamky	Hodnoty parametrov použitých pre zápis	Stredná kvadratická odchýlka σ [mm]
Smernicový tvar	$y_i = kx_i + q,$	$k = 1,056$ $q = -0,634$	2,48
Všeobecný tvar	$ax_i + by_i + c = 0,$	$a = 1,393$ $b = 1,674$ $c = 1$	2,48
Parametrický tvar	$x_i = x_0 + s_1 t$ $y_i = y_0 + s_2 t$	$[x_0; y_0] = [-70,617; -66,261]$ $s = (69,774; 66,051)$	2,48

Tabuľka 4-1 Zoznam jednotlivých typov zápisu priamky v rovine s výslednými hodnotami parametrov pre testovaciu lokalitu "Turecký vrch- Severný portál" v priamom úseku staničenie nžkm 104,710-104,810 (I. epocha) s hodnotami stredných kvadratických odchýlok

Vyrovnanie priameho úseku v priestore

Ako ukazujú jednotlivé metódy analytickej geometrie a rôzne riešenia problematiky priamky definovanej v 2D, vyrovnanie vedie k jednoznačnému vyrovnaní priebehu koľajnicového pásu a vyrovnaná priamka hodnoverne interpretuje priebeh koľajnice v rovine. Zmena vo vyrovnaní však nastáva po prijatí ďalšej premennej, výšky. Keďže na zápis priebehu rovnice v priestore je možné použiť parametrický zápis a smernicový zápis, je možné vyrovnať priebeh priestorovej priamky aj pomocou týchto modelov.

Ukážka aplikácie teoretických výpočtov na meranej lokalite v úseku „Turecký vrch- Severný portál“

Testovací výpočet v priestore bol rovnako vykonaný na údajoch merania v lokalite Turecký vrch- Severný portál, v priamej časti úseku v staničení nžkm 104,710-104,810 zameraných trigonometricky. Z tabuľky je vidieť, že výpočty v priestore z hľadiska porovnania veľkosti strednej kvadratickej odchýlky sú determinované.

Typ zápisu priamky	Všeobecný zápis priamky	Hodnoty parametrov použitých pre zápis	σ [mm]
Smernicový tvar	$z_i = kx_i + qy_i + w,$	$k = -4,179$ $q = 4,429$ $w = -2,941$	2,59
Všeobecný tvar	-	-	-
Parametrický tvar	$x_i = x_0 + s_1 t$ $y_i = y_0 + s_2 t$ $z_i = z_0 + s_3 t$	$[x_0, y_0, z_0] = [-70,324; -66,154; -0,602]$ $s = (69,772; 66,050; 0,279)$	2,59

Tabuľka 4-2 Zoznam jednotlivých typov zápisu priamky v priestore s výslednými hodnotami parametrov pre testovaciu lokalitu "Turecký vrch- Severný portál" v priamom úseku staničenie nžkm 104,710-104,810 (I. epocha) s hodnotami stredných kvadratických odchýlok

Odhad priebehu úseku prechodnice

Bezprostredne po priamom úseku nasleduje úsek prechodnice; krivky, ktorá umožňuje plynulý prechod medzi úsekmi trasy s rôznymi hodnotami krivosti. Najčastejšie sa to týka prechodu z priamych úsekov, kde je krivosť nulová a oblúkov, ktorých krivosť je definovaná polomerom oblúka, poprípade medziľahlá prechodnica medzi dvomi oblúkmi. Dĺžka a parametre prechodnice priamo závisia na prevýšení a rýchlosti trate, kde je použitá. Vo svete sa používa veľké množstvo prechodových kriviek, na Slovensku je na základe platných odborových noriem možné použiť prechodnicu v tvare kubickej paraboly, ktorá bola daná historicky. Snaha o zvýšenie rýchlosti v stiesnených pomeroch viedla k zavedeniu Blossovej prechodnice, ktorá je zavedená aj v STN a ČSN. ČSN navyše zaviedla v roku 2008 prechodnicu v tvare klotoidy, ktorá nahradila kubickú parabolu tým, že prechodnice tvaru kubickej paraboly sa ponechávajú do najbližšej rekonštrukcie koľaje a tam, kde to nie je možné, sú prechodnice v tvare kubickej paraboly ponechané. V súčasnosti je na území SR dovolené používať prechodnicu v tvare kubickej paraboly, Blossovej krivky a pri tratiach vysokej rýchlosti (nad 160 km/h) môže byť použitá kosínusoida.

V meranej lokalite je použitá kubická parabola, preto sa na určenie parametrov prechodnice aplikuje nelineárny regresný model.

Všeobecná rovnica kubickej paraboly v rovine má tvar:

$$y = ax_i^3 + bx_i^2 + cx_i + d,$$

4-6

kde a, b, c, d sú parametre kubickej paraboly.

Ukážka aplikácie teoretických výpočtov na meranej lokalite v úseku „Turecký vrch- Severný portál“

Testovací výpočet bol vykonaný na údajoch úseku prechodnice, opäť sa jedná o merané dáta severného portálu tunela Turecký vrch v staničení nžkm 104,580-104,710, hodnôt taktiež zameraných polárnou metódou.

Typ zápisu prechodnice	Všeobecný zápis prechodnice	Hodnoty parametrov použitých pre zápis	σ [mm]
Kubická parabola	$y = ax_{ired}^3 + bx_{ired}^2 + cx_{ired} + d$	$a = 2,814 \cdot 10^{-6}$ $b = 6,853 \cdot 10^{-4}$ $c = 1,111$ $d = 1,465$	2,08

Tabuľka 4-3 Zoznam jednotlivých typov zápisu prechodnice v rovine s výslednými hodnotami parametrov pre testovaciu lokalitu "Turecký vrch- Severný portál" v úseku prechodnice staničenie nžkm 104,580-104,710 (I. epocha) s hodnotami stredných kvadratických odchýlok

Smerodajná odchýlka odhadu úseku prechodnice je 2,1 mm, pričom sa jedná o dlhší úsek ako úsek priamy a teda bolo vyrovňovaných viac hodnôt. Priebeh nebol porovnávaný s existujúcou projektovou dokumentáciou, keďže táto nebola dostupná. Stredná polohová odchýlka meraných a vyrovnaných hodnôt nepresahuje hodnotu 5 mm.

Odhad priebehu úseku v oblúku

Súčasťou sledovaného úseku je i oblúk, ktorý zároveň zakončuje meranú lokalitu. Smerovo je os koľaje zhodná s časťou kružnice danou polomerom a stredom. Všeobecný zápis rovnice oblúka je:

$$R^2 = (x - X_s)^2 + (y - Y_s)^2, \quad 4-7$$

kde súradnice $[x, y]$ sú súradnice bodu na kružnici, súradnice $[X_s, Y_s]$ sú súradnice stredu a R je polomer kružnicového oblúka. Pre možnosť dosadenia do Gauss-Markovho modelu je potrebné vytvorenie rovnice uzáverov, ktorá má tvar:

$$u_i = \sqrt{(x_i - X_{s_0})^2 + (y_i - Y_{s_0})^2} - R_0. \quad 4-8$$

Pre dosadenie do matice plánu, resp. matice opráv je najskôr potrebný výpočet približných hodnôt stredu $S[X_{s_0}, Y_{s_0}]$ a približnú hodnotu polomeru R_0 . Na určenie približných hodnôt je potrebné poznať súradnice troch bodov na kružnici. Súradnice stredu je možné vypočítať zo vzťahu:

$$Y_{s_0} = \frac{1}{1 - \frac{X_3 - X_1}{Y_3 - Y_1} \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2}} \cdot \left(\frac{X_3^2 - X_1^2}{2(Y_3 - Y_1)} + \frac{Y_3^2 - Y_1^2}{2(Y_3 - Y_1)} - \frac{X_3 - X_1}{Y_3 - Y_1} \frac{Y_1^2 - Y_2^2}{2(X_1 - X_2)} - \right. \quad 4-9$$

$$\left. - \frac{X_3 - X_1}{Y_3 - Y_1} \frac{X_1^2 - X_2^2}{2(X_1 - X_2)} \right) - \frac{Y_1^2 - Y_2^2}{2(X_1 - X_2)} + \frac{X_1^2 - X_2^2}{2(Y_1 - Y_2)} - \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} Y_s. \quad 4-10$$

Polomer je po znalosti polohy stredu možné vypočítať ako rozdiel súradníc:

$$R_0 = \sqrt{(X_1 - X_s)^2 + (Y_1 - Y_s)^2} = \sqrt{(X_2 - X_s)^2 + (Y_2 - Y_s)^2} = \sqrt{(X_3 - X_s)^2 + (Y_3 - Y_s)^2}. \quad 4-11$$

Ukážka aplikácie teoretických výpočtov na meranej lokalite v úseku „Turecký vrch- Severný portál“

Meranie a vyrovnanie hodnôt oblúka sa vzťahuje na rovnaký prípad merania ako v predošlých dvoch prípadoch, jedná o staničenie nžkm 104,200-104,580. Podobne ako u predošlých postupov, aj pri výpočte súradníc stredu a veľkosti polomeru je nutné vychádzať z redukovaných súradníc.

Typ zápisu oblúka	Všeobecný zápis oblúka	Hodnoty parametrov použitých pre zápis	σ [mm]
Kružnicový oblúk	$R^2 = (x_{red} - X_s)^2 + (y_{red} - Y_s)^2$	$R = 1996,790 \text{ m}$ $X_{s_{red}} = 1322,971 \text{ m} \quad Y_{s_{red}} = 1507,605 \text{ m}$ $X_s = 1212608,879 \text{ m} \quad Y_s = 512276,816 \text{ m}$	3,13

Tabuľka 4-4 Zoznam jednotlivých typov zápisu oblúka v rovine s výslednými hodnotami parametrov pre testovaciu lokalitu "Turecký vrch- Severný portál" v úseku oblúka staničenie nžkm 104,200-104,580 (I. epocha) s hodnotami stredných kvadratických odchýlok

Smerodajná odchýlka odhadu úseku oblúka je 3,1 mm, pričom sa jedná o najdlhší vyrovnávaný úsek a teda bolo vyrovnávaných hodnôt bolo najviac. Stredná polohová odchýlka meraných a vyrovnaných hodnôt nepresahuje hodnotu 5 mm.

V prípade potreby je možné súradnice oblúka možné vyjadriť nie len k stredu oblúka, ale podobne k dotyčnici kružnice, je potrebné uvedomiť si tento fakt v prípade prepočítavania súradníc vzhľadom na požiadavky kladené komplikáciou úlohy, akou je najmä porovnanie epochových meraní kontinuálneho charakteru.

Výpočet medziľahlých bodov k susedným bodom

Ďalšou z možností riešenia je možnosť výpočtu posunov od tetivy susedných bodov. Princíp spočíva v prepočítavaní súradníc medziľahlých bodov na základe matematických vzťahov, vzťahujúcim sa ku susedným bodom.

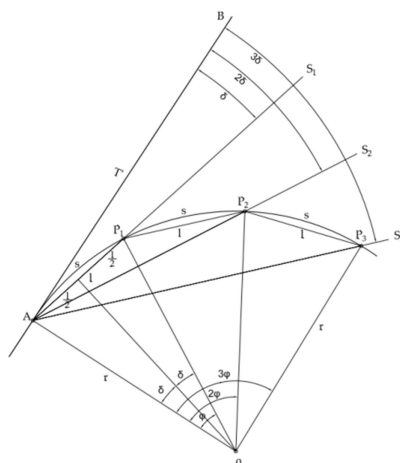
Výpočet polohy medziľahlého bodu (Obrázok 4-1) vychádza z výpočtu vrcholového uhla:

$$\frac{\alpha}{2} = \sin \frac{t}{R} \Rightarrow \alpha = 2 \sin \frac{t}{2R}, \quad 4-12$$

kde

$$t = \sqrt{\Delta Y_{(n-1)(n+1)}^2 + \Delta X_{(n-1)(n+1)}^2}, \quad 4-13$$

a R je polomer oblúka.



Obrázok 4-1 Schéma výpočtu medziľahlého bodu z výpočtu medziľahlého bodu

Vzdialenosť bodov po oblúku je možné vypočítať podľa vzťahu:

$$s = \pi \cdot R \cdot \frac{\alpha}{200^g}. \quad 4-14$$

Vzdialenosť a medzi susednými bodmi je možné vypočítať zo vzťahu:

$$a_{(n-1)n'} = \sqrt{2R^2 - 2R^2 \cos \frac{\alpha}{2}}, \quad 4-15$$

pomocou ktorej je možné vypočítať polohu medziľahlého bodu v strede oblúka pomocou vzťahov pre výpočet polárnych súradníc:

$$\begin{aligned} Y_{n'} &= Y_{(n-1)} + a_{(n-1)n'} \cdot \sin(\sigma_{13} + \alpha) \\ X_{n'} &= X_{(n-1)} + a_{(n-1)n'} \cdot \cos(\sigma_{13} + \alpha) \end{aligned} \quad 4-16$$

Polohový posun medzi bodmi je možné vypočítať zo vzťahu:

$$d = \sqrt{\Delta Y_{nn'}^2 + \Delta X_{nn'}^2}. \quad 4-17$$

Pre porovnanie je však dôležitý posun v smere osi, resp. kolmo na smer osi koľaje.

V predošlých kapitolách bola preukázaná potreba špecifikovaného prístupu k úlohám súvisiacim s meraním posunov a pretvorení PJD a to najmä z dôvodu špecifických podmienok, ktoré pri meraní nastávajú ako aj z dôvodu potreby použiť kontinuálny spôsob merania. V predchádzajúcich kapitolách bola popísaná inovácia hardvérového vybavenia, taktiež zmeny vyvolané komplexným riešením a spôsobom spracovania výsledkov. So zmenou metód merania sa pristúpilo aj k zmene metodiky spracovania dát, podobne ako metodiky následného postprocessingu. Na spracovanie jednotlivých typov merania je možné aplikovať metódy lokálnej transformácie, analytickej geometrie, či výpočet medzifáhových bodov. Výsledky meraní realizovaných klasickými metódami sú spracované zaužívanými postupmi, akými je napríklad metóda geometrickej (presnej) nivelácie. O významnosti posunov je potrebné rozhodnúť na základe výsledkov matematicko-štatistických testov. Využívajú sa pritom charakteristiky presnosti, ktoré sa porovnávajú ich s kritickou hodnotou pre posúdenie presnosti v jednotlivých epochách. Kritickou hodnotou na posúdenie významnosti posunu je v technických disciplínach štandardne používaná hodnota dvojnásobku smerodajnej odchýlky pri uvažovanej hladine

významnosti 5%. V prípade prekročenia hraníc tohto intervalu je možné s 95% pravdepodobnosťou tvrdiť, že došlo k posunu.

Špecifický prístup vyžaduje interpretácia pretvorení, ktorá vychádza z odhadu geometrických parametrov jednotlivých úsekov koľaje ako je uvedené v kapitole 8.2. Následne dochádza k spätnému prepočtu epochových posunov, polohový posun je rozložený na priečny, a naň kolmý pozdĺžny posun. Pod pojmom spätný prepočet je možné si predstaviť výpočet vyrovnaných súradníc podrobných bodov v jednotlivých epochách, ktoré je následne možné použiť pre vzájomné porovnanie dvoch bodov v jednotlivých epochách. Rozhodujúcou zložkou na posúdenie tvaru koľaje je práve priečny posun. Pozdĺžny posun nie je možné jednoznačne interpretovať ako zmenu polohy pozorovaného bodu, pretože je významným spôsobom ovplyvnený najmä neistotou v pointácii podrobných bodov. Ďalšou úlohou je porovnanie výpočtu geometrických parametrov jednotlivých úsekov trate. Merania sú tiež podrobené testovaniu na vybočujúce hodnoty, teda na identifikáciu a s tým súvisiace vylúčenie chybných meraní. Po stanovení pravdepodobnosti a redundancie jednotlivých modelov došlo k určeniu quantilu Studentovho rozdelenia, aplikáciou testu nulovej štatistickej hypotézy na merané hodnoty a v prípade jej zamietnutia k prijatiu alternatívnej hypotézy, z ktorej plynie následné potvrdenie odľahlosti meraní, a ich následné vylúčenie z ďalšieho spracovania. Obdobne sa aplikuje test na vybočujúce údaje v prípade súradníc podrobných bodov, ktoré sú výsledkom spracovania meraní.

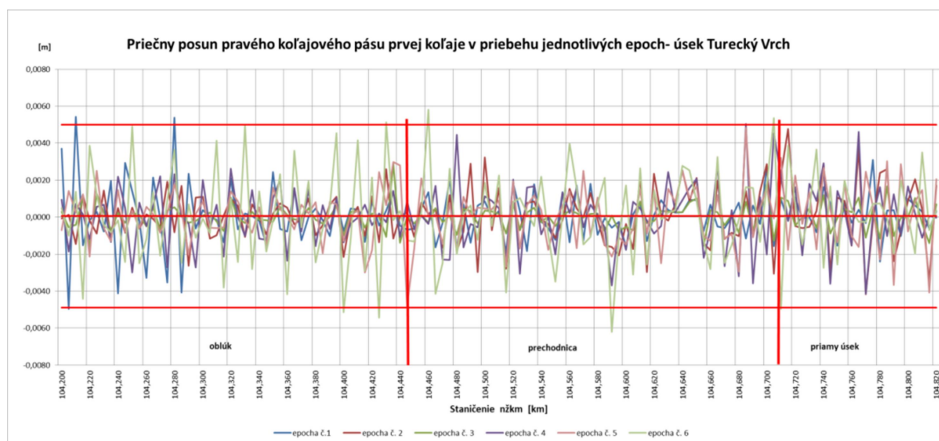
Z hľadiska významnosti je postup pri porovnaní jednotlivých koľajnicových pásov rovnaký ako postup pri porovnaní geometrických parametrov osi koľaje, ktorú je možné považovať za priestorový priemer osí dvoch koľajových pásov. Z hľadiska štatistickej významnosti výsledkov za najhodnotnejšie možno považovať meranie vyhotovené v lokalite Turecký vrch, kde došlo k meraniu v pravidelných intervaloch od roku 2012 v období piatich rokov.

Analýza polohových meraní

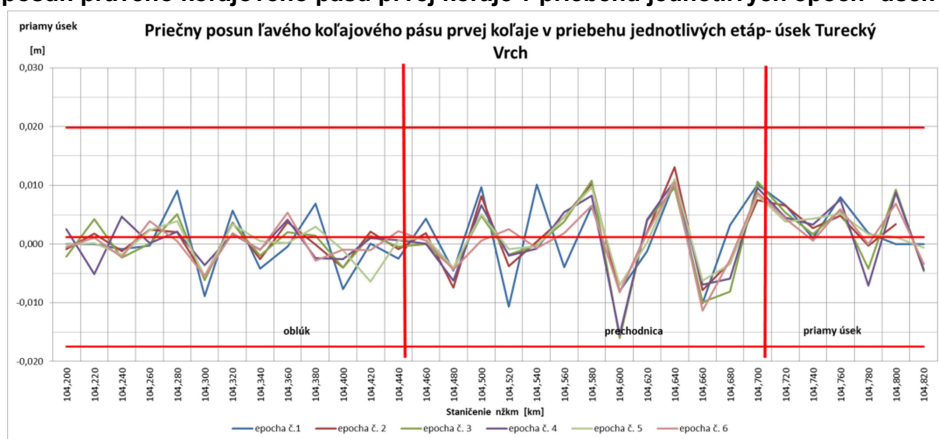
Analýza výsledkov spracovania polohových meraní vychádza z množiny bodov, interpretujúcich rovnakú časť úseku trate, či bolo meranie vykonané robotickou univerzálnou meracou stanicou, globálnymi navigačnými satelitnými systémami alebo terestrickým laserovým skenovaním. Predspracovaním bodov, uvedeným v kapitole 8.1, dôjde k ich úprave. Tieto dáta môžu byť spracované rôznymi matematickými postupmi, z ktorých sú v dizertačnej práci rozobraté najmä metódy analytickej geometrie, lokálnej transformácie a postup výpočtu medziľahlých bodov od tetivy. Z hľadiska presnosti sa smerodajná odchýlka jednotlivých výpočtov pohybuje v rozmedzí 12,6-16,9 mm.

Ako je vidieť na grafoch nižšie, posuny a pretvorenia vo väčšine prípadov nepresiahli hladinu významnosti 95% a teda nie je možné s istotou konštatovať prítomnosť posunov. V prípade, že takáto skutočnosť nastala, jedná sa skôr o vybočujúci údaj než o zmenu tvaru koľaje. Vzájomná nekorelácia posunov pravých a ľavých koľajnicových pásov v jednotlivých staničeniach sa odrazí na zmene rozchodu jednotlivých koľají. Ten je následne spracovaný na obrázkoch nižšie. Aj v prípade rozchodu sa jedná vo veľkej časti sledovaného úseku o náhodne vybočujúce hodnoty. Kontinuálne prekročenie nastáva u pravej koľaje od staničenia nžkm 104,660. V tomto úseku jednak dochádza k zmene smerových pomerov (z prechodnice do priameho úseku), ale najmä o zmenu konštrukcie trate, ktorá prechádza z PJD do prechodovej oblasti a do následnej klasickej konštrukcie železničného zvršku. Aj pri ostatných výpočtoch, uvedených nižšie, sa práve táto časť javí ako kritická časť celej konštrukcie, ktorá sa už od začiatku zavedenia do prevádzky správala nestabilne a musela byť viac krát opravovaná, jednalo sa najmä o podbíjanie. K polohovým zmenám so významným charakterom, ktoré však zatiaľ neprekračujú kritické hodnoty dochádza aj v staničení nžkm 104,560-104,680. V predmetnom úseku je súčasťou trate mostná konštrukcia, pričom pri sadaní mostnej konštrukcie mohlo dôjsť aj k miernym polohovým posunom.

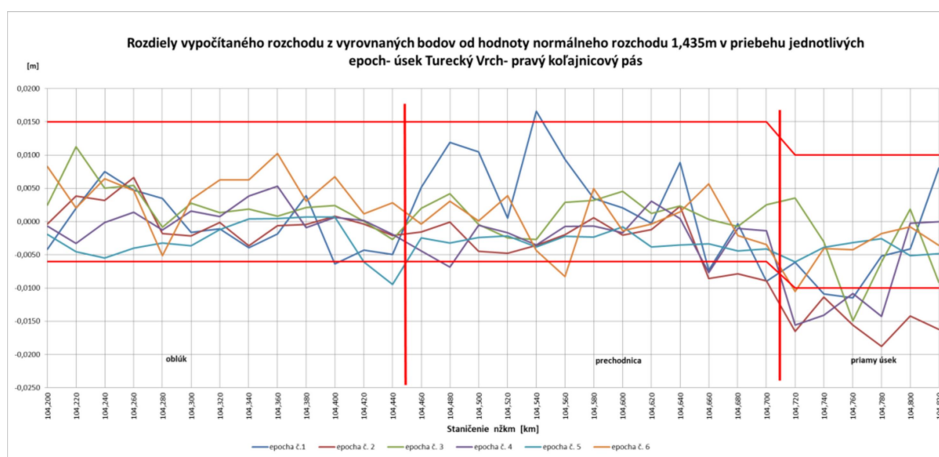
Pozn.: Rozdielny počet pozorovaných bodov na ľavej a pravej časti koľaje vyplýva zo spôsobu merania schematicky znázornenom a vysvetlenom v kapitole 3.



5-1 Priečný posun pravého koľajového pásu prvej koľaje v priebehu jednotlivých epoch- úsek Turecký Vrch



5-2 Priečný posun ľavého koľajového pásu prvej koľaje v priebehu jednotlivých epoch- úsek Turecký Vrch



5-3 Rozdiely vypočítaného rozchodu z vyrovnaných bodov od hodnoty normálneho rozchodu 1,436 m v priebehu jednotlivých epoch- úsek Turecký vrch

Ďalšou spôsobom spracovania a vyrovňania polohových meraní je regresná analýza, aplikovaná na zaužívané metódy analytickej geometrie. Princípom bolo rozdelenie pozorovaných úsekov na segmenty, ktoré je možné charakterizovať istým analytickým prepisom (funkciou). Hranice segmentov sú zhodné s hranicami segmentov definovaných v projektovej dokumentácii. Úlohou bolo určenie priebehu jednotlivých segmentov pomocou definovania parametrov príslušnej funkcie. Následne bol vykonaný

výpočet súradníc podrobných bodov na segmentoch, v miestach (staničeniach) umožňujúcich porovnanie s meranými dátami, poprípade porovnanie koľajnícových pásov navzájom. Počas užívania koľaje došlo k zisteniu, že kritickou časťou celej konštrukcie je prechodová oblasť medzi PJD a klasickou konštrukciou jazdnej dráhy. To malo za následok jej podbíjanie a konštrukčné zmeny. Táto editácia jazdnej dráhy prebehla medzi epochami 1-2, čo sa pravdepodobne následne odráža v rozdieloch parametrov, viditeľné v tabuľkách nižšie. Zaujímavosťou je možnosť sledovať výrazné zmeny počas jednotlivých epoch v súradniciach stredu spojené so zmenou polomeru oblúka v úseku, kde bol použitý kružnicový oblúk. Je pravdou, že zmeny, viditeľné v tabuľke majú rozdiely v metroch. Je potrebné si však uvedomiť, že môže dôjsť k zväčšeniu polomeru o viac ako 1,5 m, ak je spojený s obdobným súradnicovým posunom, kružnicové výseky v záujmovej oblasti majú takmer totožný priebeh a v lokálnom úseku sa jedná len o minimálnu zmenu priebehu osi, ktorá sa však v celkovom meradle odrazí aj na zmene súradníc stredu spojenej so zmenou polomeru.

	X _s [m]	Y _s [m]	R [m]
epocha 1	1215439,967	509445,207	1997,9
epocha 2	1215438,955	509446,543	1996,2
epocha 3	1215439,914	509445,388	1997,7
epocha 4	1215439,759	509445,466	1997,6
epocha 5	1215438,656	509447,006	1995,7
epocha 6	1215440,100	509445,166	1998,0

Tabuľka 5-1 Zmena vypočítaných parametrov stredu oblúka a jeho polomeru v priebehu jednotlivých epoch v úseku "Turecký vrch"- severný portál, staničenie nžkm 104,200-104,580 [m]

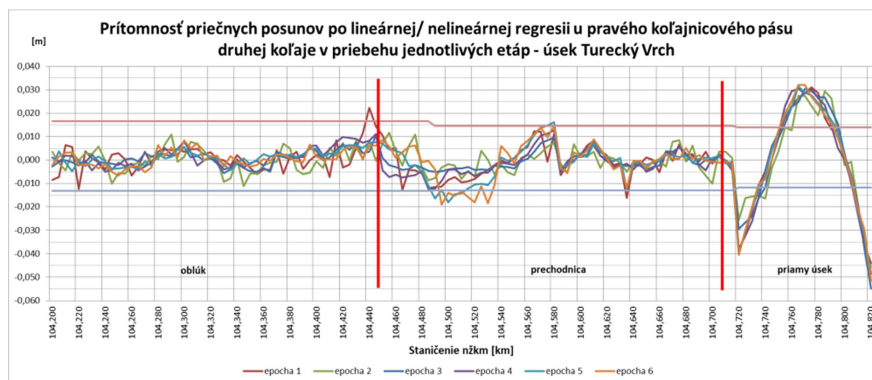
	a [m ⁻²]	b [m ⁻¹]	c	d [m]
epocha 1	0,2.10 ⁻⁶	-5,2.10 ⁻⁴	0,825	10,000
epocha 2	-2,0.10 ⁻⁶	-9,1.10 ⁻⁴	0,807	9,644
epocha 3	-2,0.10 ⁻⁶	-9,2.10 ⁻⁴	0,806	9,607
epocha 4	-1,9.10 ⁻⁶	-8,9.10 ⁻⁴	0,808	9,677
epocha 5	-2,0.10 ⁻⁶	-9,3.10 ⁻⁴	0,805	9,560
epocha 6	-2,0.10 ⁻⁶	-9,3.10 ⁻⁴	0,804	9,539

Tabuľka 5-2 Zmena vypočítaných parametrov prechodnice v tvare kubickej paraboly v priebehu jednotlivých epoch v úseku "Turecký vrch"- severný portál, staničenie nžkm 104,580-104,720 [m]

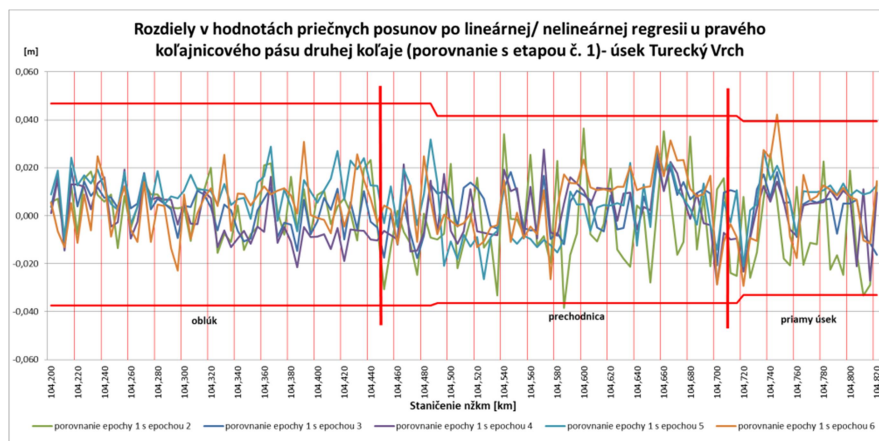
	k	q [m]
epocha 1	14,106	0,925
epocha 2	16,817	0,947
epocha 3	16,808	0,947
epocha 4	16,775	0,947
epocha 5	16,783	0,947
epocha 6	16,791	0,947

Tabuľka 5-3 Zmena vypočítaných parametrov priamky v smernicovom tvare v priebehu jednotlivých epoch v úseku "Turecký vrch"- severný portál, staničenie nžkm 104,720-104,820 [m]

Stredná odchýlka meraní sa medzi jednotlivými meraniami výrazne nelíšila, ani jedna neprekročila hodnotu 18 mm. Stredné odchýlky v rámci jednotlivých epoch sa pohybovali v hodnote 11,3-17,9 mm. Po výpočte bodov na jednotlivých segmentoch je možné vypočítať posuny a pretvorenia medzi jednotlivými epochami. Na grafoch nižšie sú následne zobrazené posuny určené v jednotlivých epochách. Metóda ešte lepšie odráža skutočnosť, že kritickým úsekom celej konštrukcie je prechodová oblasť medzi PJD a klasickou konštrukciou železničného zvršku, ktorá začína v staničení nžkm 104,720⁵⁰⁰, teda približne v rovnakom staničení, v ktorom sa menia smerové pomery z prechodnice na priamy úsek. Ako je vidieť na výsledkoch tohto typu merania, zachytáva kritickejšie pretvorenia spôsobené rekonštrukciami počas prevádzky koľají.



5-4 Prítomnosť priečných posunov po lineárnej/ nelineárnej regresii u pravého koľajnicového pásu druhej koľaje v priebehu jednotlivých epoch- úsek Turecký Vrch

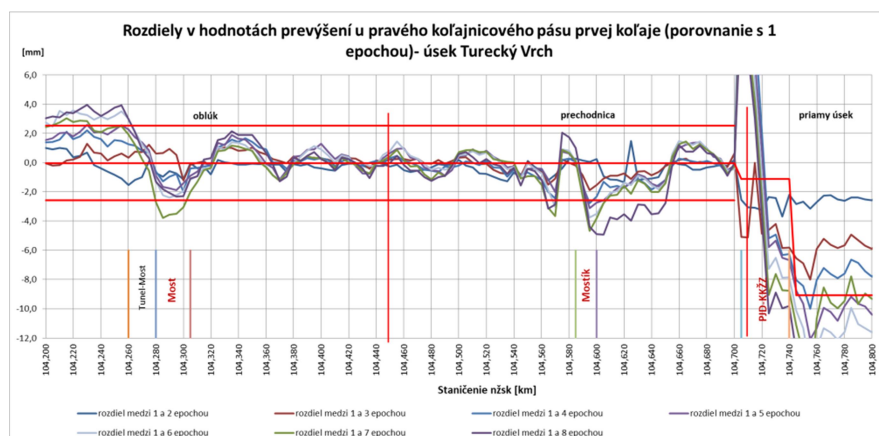


5-5 Rozdiely v hodnotách priečných posunov po lineárnej/ nelineárnej regresii u pravého koľajnicového pásu druhej koľaje (porovnanie s epochou č. 1) - úsek Turecký Vrch

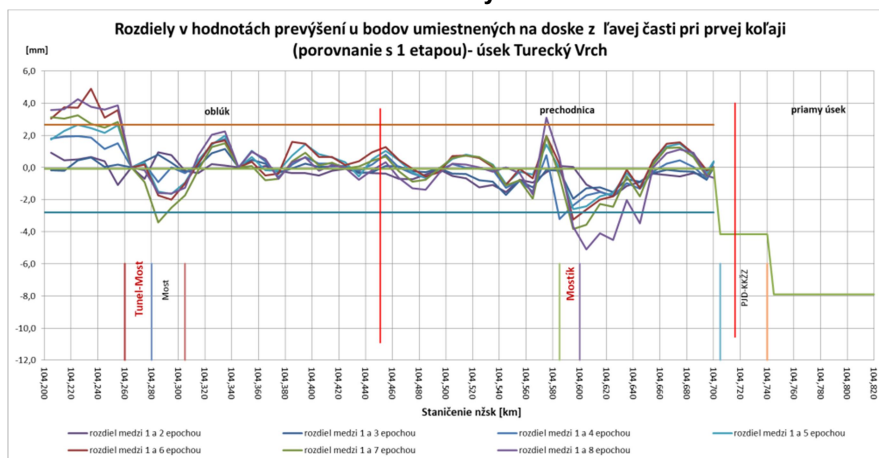
Analýza výškových výsledkov

Podobne ako i pri polohových meraniach, aj pri výškových je nutné porovnanie medzi jednotlivými epochami a interpretácia jednotlivých úsekov. Na rozdiel od polohových meraní, výškové merania zachytávajú poklesy a zdvihnutia, je teda možný predpoklad, že jednotlivé merania budú zachytávať správanie sa podložia a jednotlivých konštrukčných prvkov, použitých pri výstavbe. Na výpočet vertikálnych posunov bolo použité merania prevýšení, rozpracované v kapitole **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov..** Následne je možné, podľa výpočtov uvedených vyššie, vypočítať diskretné výšky bodov a interpretovať zvislé posuny vzhľadom na charakter podložia, resp. jednotlivých stavebných konštrukcií použitých pri výstavbe. Z výškových meraní je možné monitorovať zmeny sklonu koľaje, prevýšenia koľajnicových pásov ako hlavné geometrické parametre koľaje, ale tiež výšku doskovej konštrukcie železničného zvršku či výškovú stabilitu prechodových oblastí. Jednotlivé kilometrové smerodajné odchýlky nepresiahli v žiadnej z epoch hodnotu 0,27 mm. Aj pri výškovom vyhodnotení sa posudzuje prekročenie kritických hraníc, kedy je možné s 95% pravdepodobnosťou signalizovať prítomnosť zvislého posunu, resp. posunu konštrukcie prezentujúci pokles konštrukčnej vrstvy.

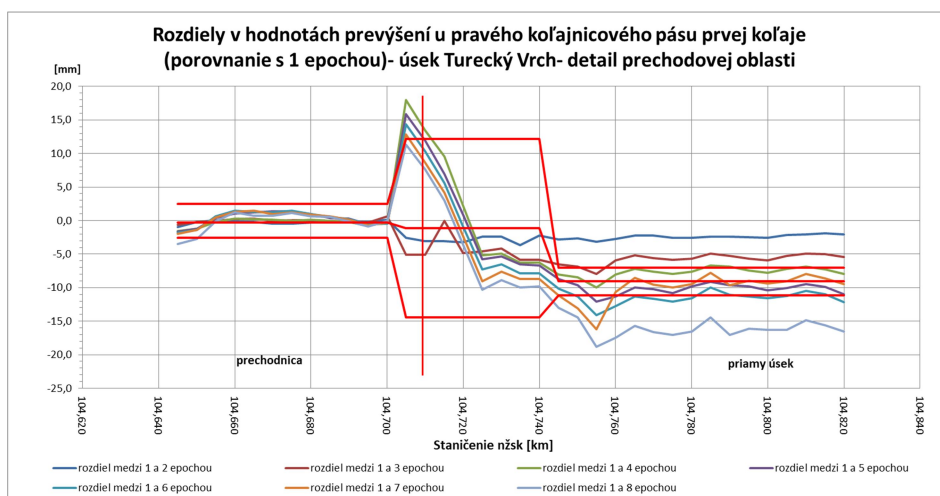
Ako je vidieť na grafoch nižšie, v priebehu epochových meraní došlo k posunu vo zvislom smere, ktorý je evidentný najmä v miestach aplikácie mostných objektov. K výrazným deformáciám tiež dochádza v už vyššie spomínanej prechodovej oblasti. Ako bolo spomenuté vyššie, táto časť bola opakovane podbýjaná a rekonštruovaná a spracovanie výškových meraní túto skutočnosť potvrdzuje. Medzi epochou 1 a 2 došlo k trvalej zmene výškového priebehu trate jeho komplexným prebudovaním, čo sa odráža na grafoch **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.****Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov..**



5-6 Rozdiely v hodnotách prevýšení u pravého koľajnicového pásu prvej koľaje (porovnanie s 1 epochou) - úsek Turecký Vrch



5-7 Rozdiely v hodnotách prevýšení u bodov umiestnených na doske z ľavej časti pri prvej koľaji (porovnanie s 1 epochou) - úsek Turecký Vrch



5-8 Rozdiely v hodnotách prevýšení u pravého koľajnicového pásu prvej koľaje (porovnanie s 1 epochou) - úsek Turecký Vrch - detail prechodovej oblasti

6 Záver

Téma aplikácie pevnej jazdnej dráhy je prirodzeným trendom, prenikajúcim na územie Slovenska z celého sveta, najmä však Západnej Európy. Podmienky, kladené pri budovaní koridorov európskeho charakteru, mali za následok nutnosť aplikácie tohto typu jazdnej dráhy vo vybraných úsekoch železničných tratí na Slovensku. Ruku v ruku s aplikáciou pevnej jazdnej dráhy bolo nutné vytvoriť podmienky na pravidelný monitoring a sledovanie jej zmien vplyvom lokálneho prevádzkového zaťaženia. Analýza takýchto výsledkov zdôrazňuje nutnosť a potrebu zvýšeného záujmu a implementácia nových poznatkov v praxi. Podobne ako tlaky z oblastí použitých konštrukcií, aj legislatíva v oblasti železničnej dopravy a jej monitoringu prešla výraznou zmenou. Treba však brať do úvahy aj faktické obavy zo správnosti a efektivity implementácie meracích postupov. Dôležité je klásť dôraz na postupy merania, spracovanie a vyrovnanie meraní a samotnú interpretáciu. Pri nesprávnom prístupe je totižto možné degradovať výsledky merania resp. nesprávne interpretovať prítomnosť posunov a pretvorenií.

Celá úloha dizertačnej práce je zameraná týmto smerom. V kapitole jedna sú uvedené hlavné ciele, zhrnuté do štyroch bodov. Prvá časť práce sa venuje teoretickému pohľadu na danú problematiku. Kapitola dva pojednáva o rozdieloch medzi meraním posunov a diagnostikou koľaje, kde je nutné si uvedomiť rozdiel a s touto skutočnosťou ďalej narábať. V ďalšej kapitole je popísané prístrojové vybavenie, sú v ňom popísané prístroje a metódy používané nielen na Slovensku, ale tiež vo svete. Väčší dôraz je kladený na prístroje, ktoré boli použité na samotných epochových meraniach. Ďalšia kapitola pojednáva o problematike pevnej jazdnej dráhy, rieši nie len návrhové parametre pevnej jazdnej dráhy, ale tiež epochy merania pevnej jazdnej dráhy v súlade s aktuálne platnými technickými a rezortnými predpismi. Súbor epochových meraní bol vykonaný na jednom z úsekov aplikácie PJD na Slovensku, konkrétne sa jedná o úsek Turecký vrch. Lokalita je špecifická a stáva sa výzvou nie len preto, že zachytáva rôzne typy konštrukcií podložia (použitie štrkového lôžka, prechodovej oblasti a pevnej jazdnej dráhy), ale tiež sa nachádza v úseku, kde sa menia smerové a výškové pomery trate. V meranej lokalite sa nachádza priamy úsek, prechodnica a oblúk. Tieto skutočnosti sú popísané v kapitole šesť. Ďalšia kapitola sa sústreďí na použité hardvérové vybavenie, na spôsob zamerania koľaje bez možnosti trvalej stabilizácie pozorovaných bodov na samotnom tele koľajnicových pásov. Na túto skutočnosť reflektuje vytvorenie špecializovaného zariadenia, vytvoreného len pre túto úlohu, taktiež editácia diagnostického prístroja KRAB, ktoré bolo upravené pre úlohy merania. Úprava meracieho vozíka musela prebehnúť v súlade s podmienkami zhotoviteľa, teda úprava vozíka nemohla technicky ovplyvniť jeho funkčnosť, spoľahlivosť a správnosť. V súlade s požiadavkami bola na KRAB na trvalo stabilizovaná skrutka, na ktorú je možné na trvalo stabilizovať odrazový hranol, a tým zabezpečiť kvázi-kontinuálne meranie. Pre kontrolu boli v lokalite umiestnené tiež trvalo stabilizované klinové značky, ktoré slúžia na kontrolu inovovaného merania.

Keďže tento typ merania je doposiaľ v oblasti železničného staviteľstva nepoužívaný, je potrebné prispôbiť tomu aj spôsob spracovania výsledkov. Rôzne postupy spracovania výsledkov sú uvedené v kapitole osem. Pri výpočte posunu medzi jednotlivými epochami je potrebné dbať na prítomnosť posunu v smere osi koľaje. Pri nemožnosti identickej signalizácie pozorovaného bodu na temene koľaje vzniká nutný posun v smere koľaje, ktorý však nemá nič spoločné s posunom koľajnicového pásu ako takého. Preto je potrebné túto zložku posunu eliminovať. Tomu sa prispôbujú aj použité metódy vyrovnaní, aplikované boli metódy analytickej geometrie a výpočtu medziľahlých bodov. Metóda analytickej geometrie spočíva v odhade parametrov jednotlivých smerových, resp. priestorových charakteristík koľaje. Jedná sa napríklad o zápis priamky v rovine resp. v priestore, o zápis prechodnice a oblúka (kružnice). Idea použitia tohto spôsobu výpočtu je vo vyrovnaní jednotlivých častí pomocou merania pozorovaných bodov. Súradnice v jednotlivých staničeniach sú následne spätne prepočítané z vyrovnaných parametrov a porovnané. Napríklad v prípade oblúka sa môžu súradnica oblúka a jeho vyrovnaný polomer v jednej epoche výrazne líšiť od druhej, dôležité je ale sústrediť sa na diferenciálnu časť oblúkov, ktorá môže mať takmer totožný priebeh. Výpočet medziľahlých bodov je podrobne popísaný v kapitole deväť. Podobne ako aplikácia metód analytickej geometrie, aj táto metóda porovnáva epochovo reverzne prepočítané pozorované body a ich posuny. Metódy sú porovnané s klasickým

zameraním priebehu koľajníc, ktoré bolo spočítané obdobným spôsobom. Problémom je výškové meranie. Keďže analyticky je náročné až nemožné vyjadriť prechodnicu a oblúk v priestore. Preto spracovanie výškových meraní prebehlo zvlášť a je porovnané samostatne. Sumarizácia výsledkov preukázala, že metódy zamerania sú schopné sledovať posuny a pretvorenia osi koľaje v priebehu jednotlivých epoch. Výsledky sú takmer zhodné s výsledkami, ktoré boli vypočítané klasickými, zaužívanými spôsobmi merania. Vďaka epochovým meraniam sa dokázala nestálosť konštrukčnej vrstvy prechodovej oblasti klasickej konštrukcie železničného zvršku a pevnej jazdnej dráhy. Výsledky tiež preukázali citlivosť konštrukcie v oblastiach, kde sa nachádzajú konštrukčné prvky ako mosty resp. priepusty. Na samotnej lokalite je zrejmé, že spĺňa požiadavky, kladené normou, zachytáva tiež prítomnosť opráv konštrukčných vrstiev a podbíjania úseku trate v priebehu epochových meraní. Bolo by vhodné, ďalej sledovať metódy merania a kontrolne porovnávať možnosť jej trvalej aplikácie nie len v oblasti výskumu, ale aj jej užívanie v bežnej praxi.

Publikované práce

- [1] Ižvotová, J., **Chromčák, J.**; 2015. Diagnostics of systematic errors in angle measurements. In Procedia Engineering, ISSN 1877-7058, vol. 111, pp. 339-343
- [2] Kotka, V., **Chromčák, J.**; 2015. Analysis of large-scale maps symbols. In Procedia Engineering, ISSN 1877-7058, vol. 111, pp. 450-453
- [3] **Chromčák, J.**, Grinč, M., Pánisová, J., Vajda, P., Kubová, A.; 2016. Validation of sensitivity and reliability of GPR and microgravity detection of underground cavities in complex urban settings: Test case of a cellar, In Contributions to Geophysics and Geodesy, ISSN 1335-2806, vol. 46(1), p. 13-32
- [4] Ižvotová, J., **Chromčák, J.**; 2017. Quality evaluation of digital maps. In International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, ISSN 1314-2704, vol.17 (22), pp. 499-506
- [5] Seidlová A., **Chromčák, J.**; 2017. Factors effecting to area and its precision in cadastre of real estates. In International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, ISSN 1314-2704, vol.17 (22), pp. 315-320
- [6] Seidlová A., **Chromčák, J.**; 2017. Types of Cadastral Maps in Slovak Republic and Accuracy of the Land Area. In MATEC Web of Conferences, ISSN 1314-0014, vol. 117
- [7] **Chromčák, J.**; 2017. The estimation of transition curves geometry in railway engineering from measured data. In MATEC Web of Conferences, ISSN 1314-0014, vol. 117
- [8] **Chromčák, J.**, Ižvotová, J., Grinč, M.; 2017. Application of microgravity for searching of cavities in historical sites. In Advances and Trends in Geodesy, Cartography and Geoinformatics- Proceedings of the 10th International Scientific and Professional Conference on Geodesy, Cartography and Geoinformatics, ISBN 9780429505645, pp. 133-137
- [9] Seidlová, A., Šíma, J., **Chromčák, J.**; 2018. Geodetic Basis used during the remediation of Strečno Cliff. In MATEC Web of Conferences, ISSN 1314-3012, vol. 196
- [10] **Chromčák, J.**; 2018. Possibilities of continual Measurement Alignment. In MATEC Web of Conferences, ISSN 1314-3012, vol. 196
- [11] **Chromčák, J.**, Censek, T., Ižvotová, J.; 2019. Comparison of chosen geodetic method for measuring of swimming pool length. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, ISSN 1757-8981, Vol. 661(1)
- [12] Cesnek, T., **Chromčák, J.**, Ižvotová, J.; 2019. Geodetic and Microgravity Measurement used in St. Mary's Assumption Chapel. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, ISSN 1757-8981, Vol. 661(1)
- [13] Odrobiňák, J., Farbák, M., **Chromčák, J.**, Kortiš, J., Gocál, J.; 2020. Real geometrical imperfection of bow-string arches-measurement and global analysis. In Applied Sciences (Switzerland), ISSN 2076-3417, vol. 10(13)

Literatúra

- [1] BERRGGREN E.G. et al., 2005. Simulation, development and field testing on a track stiffness measurement vehicle, Rio De Janero, 8th International Heavy Haul Conference, ISBN: 0-646-33463-8
- [2] BITTERER, L., 2003. Vyrovnávací počet, Žilina, EDIS, ISBN 80-8070-517-8

- [3] BITTERER, L., 2008. Geodézia, Žilina, EDIS, ISBN 978-80-8070-886-3
- [4] BOCCIOLONE M. et al., 2002. Wheel and rail longitudinal wear measurement and diagnostics, Paris, Techrail International Workshop and Dem on High Technology Systems for Railway Transportation
- [5] BÖHM, J., RADOUCH, V., 1978. Vyrovnávací počet, Praha, Kartografie, ISBN 80-7011-056-2
- [6] BÖHM, J., RADOUCH, V., HAMPACHER, M., 1990. Teorie chyb a vyrovnávací počet, Praha, Geodetický a kartografický podnik, ISBN 80-7011-056-2
- [7] CEBECAUER, D., 1990. Vzťažné sústavy pri meraní zvislých posunov líniových stavieb, Bratislava, Geodetický a kartografický obzor, Zv. 12, ISSN 1805-7446
- [8] CLARKE, B.R., 2008. Linear Models. The Theory and Application of Analysis of Variance, New Jersey, John Wiley & Sons, ISBN 978-0-470-02566-6
- [9] DARR, E., 2000. Ballastless Track: Design, Types, Track Stability, Maintenance and System Comarison, Hamburg, Hestra-Verlag
- [10] DARR, E., GIEBIG, W., 2006. Feste Fahrbahn: Konstruktion und Bauarten für Eisenbahn und Strassenbahn, Berlin, Eurailpress
- [11] DARR, E., FIEBIG, W., 1999. Feste Fahrbahn, Konstruktion, Bauarten, Systemvergleich Feste Fahrbahn-Schotteroberbau, Hamburg, Telzlaff Verlang, ISBN 3-87814-700-7
- [12] DLUGOŠ, M., 2020. Interiér GPK. Žilina. Žilinská univerzita v Žiline
- [13] ERHARD, F., WOLTER, K., ZACHER, M., 2009. Improvement of track maintenance by continuous monitoring with regularly scheduled high speed trains, London, International Conference & Exhibition, ISSN:1402-1544
- [14] ESVELD, C., 2010. Developments in high-spreed track design, Delfs, Delfs University of Technology
- [15] ESVELD, C., 2001. Modern Railway Track, Second Edition, Delfs, Delfs University of Technology, ISBN 90-800324-3-3
- [16] HOFMANN-WELLENHOB, B. et al., 2008. Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS, Galileo & more, Wien, Springer Verlag, ISBN 978-3-211-73017-1
- [17] GAŠPARÍK, J., BLAHO, P., LICHNER, D., 2015. Železničná dopravná prevádzka- Základy železničnej dopravy, Žilina, EDIS, ISBN 978-80-554-0996-2
- [18] GENTLE, J.E., 2007. Matrix Algebra: Theory, Computations, and Applications in Statistics, Fairfaw, VA, Speinger, ISBN 978-0-387-70872-0
- [19] GOCAL, J., STRACH M., 2004. RTK in engineering applications- GPS receivers in the tracks, Warsaw, Geodete- Magazyn Geoinformacyjny, vyd. 5, ISSN 1234-5202
- [20] GRASSIE, S.L., 2012. Rail and Wheel corrugation and acoustic roughness- problems, solutions and measurement, Gothenburg, Sweden, Chalmers University of Technology
- [21] GRASSIE, S.L., SAXON, M.J., SMITH, J.D., 1999. Measurement of longitudinal rail irregularities and criteria for acceptable grinding, Gothenburg, Sweden, Journal of Sound and Vibration, Zv. 1, ISSN 0022-460X

- [22] GUBO, Š., 2016. Riešenie úloh nelineárnej regresie pomocou tabuľového kalkulátora, Rzeszow, Wydawnictwo UR, zv. 1. ISSN 2080-9069
- [23] HÁTLE, J., LIKEŠ, J., 1974. Základy pravdepodobnosti a matematické statistiky, Bratislava, SNTL Alfa
- [24] HOWERTER, E.D., 2016. Autonomous Track Geometry Measurement System (ATGMS), Falls Church, Virginia, USA, Rederal Rail road Administation, 800-ENSCO-VA
- [25] IŽVOLT, L., 2012. Súhrnná správa o vstupných skúškach pre monitoring časti úseku nekonvenčnej konštrukcie železničného zvršku a jej prechodových oblastí, Žilina, EDIS, 2012
- [26] IŽVOLT, L., ŠESTÁKOVÁ, J., ŠMALO, M., 2016. Železničné staviteľstvo 2. Diagnostika, mechanizácia a technologické postupy prác na železničnej jazdnej dráhe, Žilina, EDIS
- [27] IŽVOLTOVÁ, J. et al., 2013. Analýza metód merania nekonvenčnej železničnej dráhy z dohľadu presnosti a spoľahlivosti. S.I. : 1/0597/14
- [28] IŽVOLTOVÁ, J., PISCA, P., 2015. Vyhodnotenie 3D laserového skenovania pevnej jazdnej dráhy, Bratislava, Stavebná fakulta STU
- [29] IŽVOLTOVÁ, J., PISCA, P., KOŤKA, V., MANCOVIČ, M., 2013. 3D laser scanning of railway line, Žilina, EDIS, Zc. 15, ISSN 1335-4205
- [30] IŽVOLTOVÁ, J., VILLIM, A., KOZÁK, P., 2014. Determination of Geometrical Track Position by Robotic Station, Weoclaw, Procedia Engineering, ISSN 18777058
- [31] IŽVOLTOVÁ, J., VILLIM, A., PISCA, P., 2014. Analýza výškových zmien na pevnej jazdnej dráhe, Tatranské Matliare, Geodézia, kartografia a geografické informačné systémy
- [32] JENKINS, H.H., et al., 1974. The Effect of Track and Vehicle Parameters on Wheel/rail vertical dynamic Forces, London, Railway Engineering Journal
- [33] KABELÁČ, J., 2003. Geodetické metódy vyrovnání: Metoda nejmenších čtverců, Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, 978-80-7043-601-1
- [34] KOC, W., CEZARY, S. 2012. Finding Deformation of the stright Rail Track by GNSS Measurement, Gdansk, Annual of Naviagation, vers. 19, zv.1. 1478/v10367-012-0008-6
- [35] KOC, W., SPECHT, C., 2010. Selected problems of Determining the Course of Railway Routes by Use of GPS Network Solution, Gdansk, The Archives of Transport, Zv. XXIII., 10.2478/v10174-011-0021-x
- [36] KOPÁČIK, A., 2013. Meranie posunov a pretvorení stavebných objektov. Zborník referátov ku kvalifikačnej skúške z inžinierskej geodézie
- [37] KRUMPHANZL, V., MICHALČÁK, O., 1975. Inženýrská geodézie II., Praha, Kartografie, 29-902-75
- [38] KUŠNÍR, J., GRAMBLIČKA, M., HASÍK, O., 2013. Železničný tunel Turecký vrch. Inžinierske stavby/ Inženýrské stavby, Praha, Zv. 06/2016
- [39] LEWIS, M. J. T., 2001. Railways in the Greek and Roman World, A Selection of Papers from the First International Early Railway Conference
- [40] LICHTBERGER, B., 2005. Track compendium, Hamburg, First edition, Eurail Press, ISBN 3-777-0320-9

- [41] MARČÁK, P., 1961. Skúmanie stability pevných výškových bodov pri nivelačných meraniach zvislých posunov stavieb, Bratislava, Stavebnícky čas, vyd.1, zv. 9
- [42] MARČÁK, P., KUBÁČEK, L., 1956. The problem of the system of height reference in determining the settling of foundation and buidings, Studia Geophysica et Geodaetica, vyd. 64, zv.1, ISSN 0036-3169
- [43] MICHALČÁK, O. et al., 1985. Inžinierska geodézia I., Bratislava, Alfa, ISBN 9788005006784
- [44] MICHAS, G, 2012. Slab Track Systems for High-Speed Railways, Stockholm, Royal Institute of Technology, SE-100 44
- [45] NEARING, J., 2010. Mathematical Tools for Physics, Miami, FA, University of Miami, ISBN 048648212X
- [46] NIELSEN, J. et al., 2013. Overview of Methods for Measurement of Track Irregularities Important for Ground-Borne Vibration, RIVAS- Railway Induced Vibration Abetement Solutions, WP 2, RIVAS_CHALMERS_WP2_D2_5
- [47] NORMAN C. et al., 2004. Design of a system to measure track modulus from a moving railcar, London, Proceedings from Railway Engineering Conference
- [48] MIKŠÍK, J., ŠPÁNIK, J., 2006. Železničné staviteľstvo 2, Žilina, EDIS, ISBN 978-83-7335-557-6
- [49] PLÁŠEK O. et al., 2004. Železniční stavby, Železniční spodek a svršek, Brno, Vysoké učení technické v Brne, ISBN 80-214-2641-7
- [50] PLÁŠEK, O., ZVĚŘINA, P., SVOBODA, R., MOCKOVČIAK, M., 2004. Železniční stavby. Železniční spodek a svršek, Brno, Vysoké učení technické v Brne, ISBN 80-214-2621-7
- [51] PODMANICKÝ S., 2005. Podmienky pre vysokorýchlostné trate a modernizácia železničných koridorov na Slovensku v kontexte Európskej únie, Žilina, EDIS, ISBN 8080704554
- [52] PYSZKO, L., SOLÁR, M., 2009. Technologický postup. Stavebný objekt SO 24-32-01 Železničný zvršok a SO 24-53-02 Železničný spodok. Stavebná časť. Pevná jazdná dráha. RHEDA 2000®, Združenie "Nové Mesto- Zlatovce"
- [53] ROUSSEUW, P., LEROY, A. M., 2003. Robust Regression and Outlier Detection, New Jersey, Wiley and Sons, ISBN 0-471-48855-0
- [54] SPECHT C., NOWAK, A., KOC, W., JURKOWSKA, A., 2011. Application of the Polish Active Geodetic Netwoek for railway track determination, London, Press- Taylor and Francis Group, 978-0-8058
- [55] VIDRIKOVÁ, D. et al., 2010. Terminologický slovník odborných pojmov pre potreby dopravy v krízových situáciách, Žilina, EDIS, ISBN 80-969148-1-2
- [56] EN 13848-1:2008, A1 Railway applications- Track- Part 1: Characterisation of track geometry
- [57] EN 13848-2: 2006, Railway applications- Track- Track geometry quality- Part 2: Measuring systems- Track recording vehicles
- [58] STN EN 13848-1+A1 (73 6315): 2009, Železnice. Koľaj. Kvalita geometrickej polohy koľaje. Časť 1: Opis geometrickej polohy koľaje (konsolidovaný text)
- [59] STN EN 13848-3: 2009, Železnice. Koľaj. Kvalita geometrickej polohy koľaje. Časť 3. Meracie systémy. Stroje na stavbu a údržbu tratí

- [60] STN 73 0212: 1991, Presnosť geometrických parametrov vo výstavbe. Kontrola presnosti
- [61] STN 73 0275: 1991, Kontrolné meranie líniových stavebných objektov
- [62] STN 73 0405: 1986, Meranie posunov stavebných objektov
- [63] STN 73 6360-1: 2015, Železnice. Koľaj. Časť 1: Geometrická poloha a usporiadanie koľaje železničných dráh rozchodu 1435 mm
- [64] STN 73 6360-2: 2015, Železnice. Koľaj. Časť 2: Preberanie stavebných prác udržiavacích prác a hodnotenie prevádzkového stavu koľaje rozchodu 1435 mm
- [65] TNŽ 73 63 61: 2007, Geometrická poloha a usporiadanie koľaje železničných dráh rozchodu 1000 mm
- [66] Predpis TS3: 2011, Prepis pre Železničný zvršok P-17-O420
- [67] Prepis ŽSR 103-4 (TS): 2016, Meranie a vyhodnocovanie geometrickej polohy koľaje vozňom GPK
- [68] Prepis ŽSR 103-7 (S): 2008, Meranie a vyhodnocovanie geometrickej polohy koľaje meracím vozíkom KRAB
- [69] Prepis ŽSR 103-8: 2008, Všeobecné požiadavky na projektovanie, výstavbu, opravu, údržbu a preberanie stavebných, opravných a udržiavacích prác na konštrukcii pevnej jazdnej dráhy
- [70] Predpis ŽSR Z1: 2011, Pravidlá železničnej prevádzky
- [71] Předpis SŽDC S3: 2019, Železniční svršek. Díl I, Základní ustanovení
- [72] Správa S9 SŽDC, 2012: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace
- [73] Vyhláška č. 350: 2010, Ministerstvo dopravy, pôšt a telekomunikácií Slovenskej republiky a technickom poriadku dráh
- [74] Vyhláška 300: 2009, Úrad geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky
- [75] ENSCO Rail, Inc. [Online], ENSCO [cit. 20. Marec 2020], <http://ensco.com/rail/track-measurement-systems>
- [76] Slab Track System ÖBB-PÖRR Elastically Supported Slab. [Online], PICHLER, D., [cit. 23. Marec 2020], https://www.arena.org/files/library/2013_Conference_Proceedings/Ballastless_Track_Systems-Experiences_Gained_in_Austria_and_Germany.pdf
- [77] On track with Züblin. Slab Track Systems. [Online], Züblin, [cit. 21. Marec 2020], https://www.zueblin.de/databases/internet/_public/content30.nsf/web30?Openagent&id=EN-ZUEBLIN.DEN.html
- [78] Low Vibration Track, [Online], AG Sonneville, [cit. 21. Marec 2020], www.sonneville.com
- [79] Skanska, [Online], DIMITROV, I., [cit. 28. Júl 2020], <https://www.skanska.sk/co-robime/projekty/211761/Modernizacia-zeleznicnej-trate-Nove-Mesto-nad-Vahom-Zlatovce%2C-zeleznicny-tunel-Turecky-vrch>

- [80] mytrencin.sme.sk,. [Online] SITA, [Dátum: 28. júl 2020.]
<https://mytrencin.sme.sk/c/22267946/zeleznicny-tunel-pod-tureckym-vrchom-pri-novom-meste-nad-vahom-prerazili-pred-deviatimi-rokmi.html>