



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEODÉZIE

INSTITUTE OF GEODESY

MĚŘENÍ POSUNŮ ŽELEZNIČNÍHO SVRŠKU A MOSTNÍ KONSTRUKCE

RAILWAY TRACK DEFORMATION MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ludvík Leischner

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. OTAKAR ŠVÁBENSKÝ, CSc.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3646 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3646R003 Geodézie, kartografie a geoinformatika
Pracoviště	Ústav geodézie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Ludvík Leischner
Název	Měření posunů železničního svršku a mostní konstrukce
Vedoucí práce	prof. Ing. Otakar Švábenský, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

Podklady: zápisníky měřených dat a technické zprávy z jednotlivých etap měření posunů

Literatura:

1. ČSN 73 0405 Měření posunů stavebních objektů
2. ŠVÁBENSKÝ, O; VITULA, A; BUREŠ, J.: Inženýrská geodézie I, M01 Základy inženýrské geodézie, VUT Brno, 2006
3. ŠVÁBENSKÝ, O; VITULA, A; BUREŠ, J.: Inženýrská geodézie I, M02 Geodézie ve stavebnictví, VUT Brno, 2006
4. Michalčák O. a kol.: Inžinierska geodézia II. Alfa Bratislava, 1990

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Zpracujte vyhodnocení dříve realizovaných etap měření posunů kolejnicových pásů a nosné konstrukce mostovky v úseku železniční trati zahrnujícího most přes Dyji ve Znojmě a jeho obě předpolí. Výsledky vyhodnocení číselně a graficky dokumentujte.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o měření posunů na znojenském železničním viaduktu. Prostřednictvím dvou měřických metod, a to prostorové polární metody a kinematické GNSS Stop & Go metody, byly měřeny polohové a výškové změny železničního svršku a mostní konstrukce nově rekonstruovaného mostu.

V práci je kladen důraz na posouzení podélných posunů v závislosti na atmosférických podmínkách – zejména teplotních – a posouzení přesností obou nezávislých měřických metod.

KLÍČOVÁ SLOVA

posun, prostorová polární metoda, GNSS, železnice, viadukt, teplotní roztažnost, střední chyba, střední elipsa chyb

ABSTRACT

This bachelor thesis is about measuring deformations on railway bridge in Znojmo. The horizontal and vertical changes of railway track on the bridge and newly renovated bridge construction were measured by using two independent methods, namely 3D polar method and kinematic GNSS Stop & Go method.

The assessment of the longitudinal shifts depending on atmospheric conditions especially the temperature changes is an essential goal of this work. Another key aim is the determination of precision of both independent measuring methods.

KEYWORDS

deformations, 3D polar method, GNSS, railway, bridge, thermal expansion, standard deviation, probable error ellipse

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ludvík Leischner *Měření posunů železničního svršku a mostní konstrukce.*
Brno, 2020. 51 s., 64 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce prof. Ing. Otakar Švábenský, CSc.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Měření posunů železničního svršku a mostní konstrukce* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 22. 5. 2020

Ludvík Leischner
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Měření posunů železničního svršku a mostní konstrukce* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 5. 2020

Ludvík Leischner
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat prof. Ing. Otakaru Švábenskému, CSc. za předané materiály, cenné rady, praktickou pomoc a jeho čas při zpracovávání této bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval svým blízkým a rodině za podporu při studiu.

OBSAH

1	ÚVOD	13
1.1	Historie mostu	14
1.2	Rekonstrukce mostu	15
2	MĚŘENÍ	18
2.1	Měření posunů	18
2.2	Metodika měření	19
2.2.1	Prostorová polární metoda	20
2.2.2	GNSS metoda	22
2.3	Pomůcky	22
2.3.1	Speciální pojízdné zařízení	23
2.3.2	Totální stanice	24
2.3.3	GNSS aparatura	25
2.4	Etapy	26
2.4.1	První etapa E1	26
2.4.2	Druhá etapa E2	28
2.4.3	Třetí etapa E3	28
2.4.4	Čtvrtá etapa E4	29
2.4.5	Pátá etapa E5	30
2.4.6	Šestá etapa E6	31
2.4.7	Závěrečná sedmá etapa E7	32
3	ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ	34
3.1	Prostorová polární metoda	34
3.1.1	Určení pravoúhlých souřadnic	35
3.1.2	Transformace na podélné a příčné posuny	36
3.1.3	Určení výškových posunů	36
3.2	GNSS metoda	37
3.2.1	Souřadnice v lokálním kartézském souřadnicovém systému ...	37
3.2.2	Transformace na podélné a příčné posuny	38
3.3	Vyhodnocení měřických dvojic	38

4	ROZBORY PŘESNOSTI	40
4.1	Prostorová polární metoda	40
4.2	GNSS metoda.....	41
4.3	Vzájemná přesnost obou metod.....	42
5	VYHODNOCENÍ ZPRACOVANÝCH DAT	44
5.1	Posouzení posunů	44
5.2	Určení teplotní roztažnosti	46
5.3	Grafické znázornění	46
5.4	Shrnutí	47
6	ZÁVĚR	49
7	LITERATURA	50
A	APRIORNÍ PŘESNOST MĚŘENÍ	53
B	TABULKY POSUNŮ BODŮ URČENÝCH PROSTOROVOU POLÁRNÍ METODOU	54
C	TABULKY POSUNŮ BODŮ URČENÝCH GNSS	58
D	GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ POSUNŮ	62

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Historický snímek z archivní dokumentace původního mostu Zdroj: [3]	14
Obr. 2	Zrekonstruovaný znojemský viadukt Zdroj: převzato z www.irozhlas.cz	16
Obr. 3	Náčrt rozložení monitorovaných bodů	20
Obr. 4	Ukázka umístění hranolů a přijímací aparatury na zařízení ZF1 Zdroj: [1]	24
Obr. 5	Referenční stanice GNSS na bodě mostní opěry Zdroj: [1]	26
Obr. 6	Grafické znázornění závislosti na teplotě pro vybrané body, data měřená polární metodou	62
Obr. 7	Grafické znázornění závislosti na teplotě pro vybrané body, data měřená metodou GNSS	63
Obr. 8	Grafické znázornění závislosti na teplotě pro body mostní konstrukce P1, P2, P3	63
Obr. 9	Grafické znázornění průběhu podélných posunů měřených polární metodou	64
Obr. 10	Grafické znázornění průběhu podélných posunů měřených metodou GNSS	64
Obr. 11	Grafické znázornění výškových posunů určených prostorovou polární metodou	64

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Přesnost přístrojů udávaná výrobcem:	25
Tab. 2	Naměřená meteodata v oblasti bodu JT ze dne 3.3.2010	27
Tab. 3	Naměřená meteodata v oblasti bodu JT ze dne 6.5.2010	28
Tab. 4	Naměřená meteodata v oblasti bodu JT ze dne 12.7.2010	29
Tab. 5	Naměřená meteodata v oblasti bodu JT ze dne 21.11.2010	30
Tab. 6	Naměřená meteodata v oblasti bodu JT ze dne 18.4.2011 (E5b)	31
Tab. 7	Naměřená meteodata v oblasti bodu JT ze dne 29.6.2011	32
Tab. 8	Naměřená meteodata v oblasti bodu JT ze dne 12.9.2011	33
Tab. 9	Vypočtené hodnoty střední náhodné chyby pro polární metodu	42
Tab. 10	Vypočtené hodnoty střední náhodné chyby pro metodu GNSS	42
Tab. 11	Porovnání apriorní a aposteriorní přesnosti obou metod	43
Tab. 12	Posuny monitorovaných bodů na mostní konstrukci	54
Tab. 13	Posuny monitorovaných bodů železničního svršku v pravoúhlých souřadnicích	55
Tab. 14	Příčné a podélné posuny monitorovaných bodů železničního svršku	56
Tab. 15	Výškové posuny monitorovaných bodů železničního svršku	57
Tab. 16	Posuny monitorovaných bodů železničního svršku v systému n, e, v	59
Tab. 17	Příčné a podélné posuny monitorovaných bodů železničního svršku	60
Tab. 18	Výškové posuny monitorovaných bodů železničního svršku	61

1 Úvod

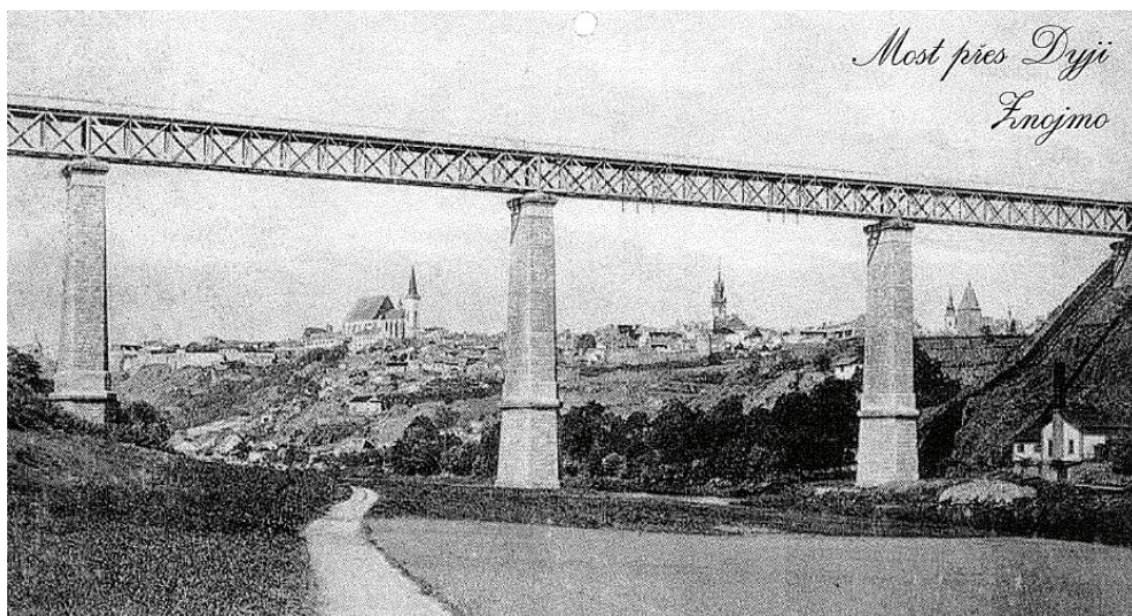
Předmětem této práce je měření posunů železničního svršku a konstrukce mostovky na historicky významném znojmském viaduktu, který se nachází na železniční trati 248 Znojmo – Šatov – Retz – Vídeň v km 99,297. V rámci stavby „Elektrizace traťového úseku vč. PEU Šatov – Znojmo“ byla nahrazena provizorní konstrukce znojmského viaduktu přes řeku Dyji novou spojitou ocelovou konstrukcí [1].

Cílem této práce je následně posoudit změnu polohy a výšky železničního svršku a mostní konstrukce nového tělesa. V práci se budu zabývat zpracováním již proběhlých měření v dané lokalitě, které probíhaly na základě projektu „Dlouhodobé měření účinků na mostní přepážku nad pohyblivým ložiskem“ [2]. Zadanými podklady pro vypracování této práce byly redukováné technické zprávy z původního měření, zápisníky měření a dva soubory s opraveným číslováním bodů. V jednom ze souborů byla data naměřená ze stanoviska JT pro polární metodu, která už byla opravená o součtovou konstantu dálkoměru. V druhém souboru byly souřadnicové rozdíly monitorovaných bodů vztažené k bodu JG z výsledků měření GNSS transformované do lokálního souřadnicového systému n, e, v.

Hlavním cílem práce je určit a posoudit příčné a podélné posuny zvolených monitorovaných bodů v závislosti na teplotních podmínkách při měření jednotlivých etap. Důraz je kladen na vyhodnocení podélných posunů v závislosti na teplotě. Další náplní této práce je porovnat vzájemnou přesnost obou zvolených měřických metod, ale také apriorní a aposteriorní přesnost měření v rámci jedné metody.

1.1 Historie mostu

Znojemský viadukt byl postaven již v roce 1871 jako součást Rakouské severozápadní dráhy a převádí jednokolejnou železniční trať přes hluboké údolí řeky Dyje. Podle původního projektu Johanna Emanuela Brika je tvořen třemi pilíři, na kterých spočíval nýtovaný spojitý příhradový nosník ze svárkové oceli.



Obr. 1 Historický snímek z archivní dokumentace původního mostu

Zdroj: [3]

Most je situován jihozápadně od historického centra města Znojma a je součástí železničního spojení Znojmo – Vídeň, které je vedeno přes Šatov a Retz. Železniční spojení Znojmo – Vídeň, je datováno od roku 1870, kdy na této trase zahájila provoz soukromá železnice. Do té doby se využívalo dostavníkové dopravy. První spojení ale vedlo přes Hrušovany nad Jevišovkou kvůli obtížnému překonání údolí řeky Dyje. Na konci roku 1871 byl znojemský viadukt dokončen a 1. listopadu téhož roku po něm přešel první vlak.

Původní konstrukce sloužila až do roku 1992, kdy byla nahrazena provizorní mostní konstrukcí, která byla dvoupatrová, jednostěnná s dolní mostovkou. Ta se pak v roce 2009 dočkala rekonstrukce v rámci elektrizace železniční tratě a nutnosti převedení trakčního vedení. Dne 12.11.2009 symbolicky v listopadu přijel první elektrifikovaný vlak z Vídně do Znojma. Za zmínku jistě stojí, že se jedná o nejvyšší most v Jihomoravském kraji, který je také od roku 1988 zařazen mezi technické památky [3].

1.2 Rekonstrukce mostu

Rekonstrukce proběhla, jak již bylo zmíněno, v roce 2009. Jednalo se o nahrazení provizorní konstrukce mostu zcela novou. Protože původní kamenné pilíře byly začátkem 90. let sanovány injektáží a byl zjištěn jejich velmi dobrý stav, byly v rámci rekonstrukce vybudovány na pilířích pouze nové úložné bločky pro ložiska. Pilíře jsou jednou z dominant mostu, a proto byly jejich hlavice obloženy kamennými deskami, aby most získal vzhled odpovídající historickému významu. Provizorní konstrukce byla nahrazena zcela novou spojitou ocelovou konstrukcí. Kvůli historickému významu bylo úřady památkové péče požadováno, aby nová konstrukce byla příhradová s horní mostovkou.

Výměna mostní konstrukce proběhla v několika fázích. Mostní provizorium bylo vysouváno hydraulickým posuvným systémem na šatovské předpolí a tam následně rozebíráno na jednotlivé díly. Pro co největší urychlení rekonstrukce byl z druhé strany, tedy ze znojemského předpolí, nasouván most nový. Nasouvání probíhalo ve 4 etapách s ohledem na počet polí v otvoru a realizovanou délku montážní plošiny. Pohled na nový zrekonstruovaný most a údolí řeky Dyje ze znojemské strany je na obr. 2. Na novém mostě

jsou veškeré nosné prvky z oceli. Směrově je most přímý a stoupá v jednotném sklonu 4,49 ‰ ve směru staničení, tedy k žst. Znojmo.



Obr. 2 Zrekonstruovaný znojemský viadukt

Zdroj: převzato z www.irozhlas.cz

Nový most má následující charakteristiky:

- Rozpětí mostu: 49,95 + 59,94 + 59,94 + 49,95 m
- Délka ocelové konstrukce: 220,97 m
- Výška mostu: 48,9 m
- Šikmost mostu: 90° (most je kolmý)
- Volná šířka na mostě: 6,27 m
- Mostní průjezdný průřez: MPP 3,0
- Konstrukční výška: 5,73 m
- Návrhové zatížení: ČSD T dle ČSN 73 6203/1986

- Rychlost na mostě: 80 km/h
- Hmotnost nosné konstrukce: 1011 t
- Zatížitelnost ZUIC: 1,43

Protože nahrazovaný provizorní most byl s dolní mostovkou a nový most byl na žádost památkového úřadu s horní mostovkou, vznikl zde výškový rozdíl, který byl řešen zvýšením úrovně uložení pomocí mostního pilíře Pižmo. Po dokončení výsunu nového mostu byl násep na znojemské straně upraven sendvičovou konstrukcí v kombinaci stabilizované zeminy s drenážními vrstvami. Za použití geomembrány byl po vrstvách budován nový násep. Upravené bylo i mostní předpolí na šatovské straně včetně směrových úprav.

Nový železniční svršek tvoří bezстыková kolej. Na obou stranách mostu byla umístěna dvojice dilatačních zařízení (KMDZ + KVDZ) pro přechod z bezстыkové koleje mostu na drážní těleso a ochranu mostního objektu před podélnými vlivy koleje vlivem teplotních změn a provozních účinků. Na znojemské straně jsou instalována pohyblivá ložiska mostu [3].

2 Měření

Náplní této kapitoly je obecné popsání metod a způsobů získávání dat, ale také konkrétní postupy, techniky a okolnosti realizovaného monitoringu zadaného objektu.

Proběhlé měření znojemského viaduktu bylo realizováno v rámci projektu s názvem „Dlouhodobé měření účinků na mostní přepážku nad pohyblivým ložiskem“. Proto byl do měření zařazen i geodetický monitoring změn polohy koleje na mostě, v přilehlých předpolích a vlastní mostní konstrukce vlivem teplotních změn a provozních účinků [1].

2.1 Měření posunů

Tato práce se zabývá vyhodnocením měření posunů, a proto bude v této podkapitole přiblíženo, co měření posunů znamená a obnáší.

Dle ČSN 73 0405 je měření změn polohy, výšky a tvaru (posunů a přetvoření) stavebních objektů a jejich částí označováno jako *měření posunů stavebních objektů* [4]. Tato měření můžeme dělit na geodetické a negeodetické (fyzikální) a spadají do řešení problémů budování a provozování objektů investiční výstavby.

Posuny vznikají působením nejrůznějších vnějších vlivů. Mezi tyto vlivy nejčastěji patří: změny zatížení základové půdy, dynamické provozní účinky, kolísání hladiny spodní vody, seismickou činností, poddolováním atp. Tyto vlivy působí na objekt a mění jeho tvar (přetvoření) nebo jej přemísťuje jako celek (posun). Takovéto změny jsou nežádoucí a hlavně nebezpečné, protože mohou narušit stabilitu a bezpečnost objektu. Proto je zapotřebí tyto změny sledovat a určovat jejich časový vývoj opakovaným měřením. Objekt se

následně měří v etapách, které jsou voleny tak, aby byl zachycen celkový vývoj změn objektu včetně okolností, které je zapříčinily. Základní – nultou etapu je nutno vykonat velmi pečlivě, protože k té se vztahují naměřené hodnoty a počítají velikosti posunů a přetvoření. Součástí měření posunů je třeba zaznamenávat také hodnoty fyzikálních faktorů, stavební a provozní okolnosti atp., které mohou mít vliv na výsledky měření a jeho přesnost.

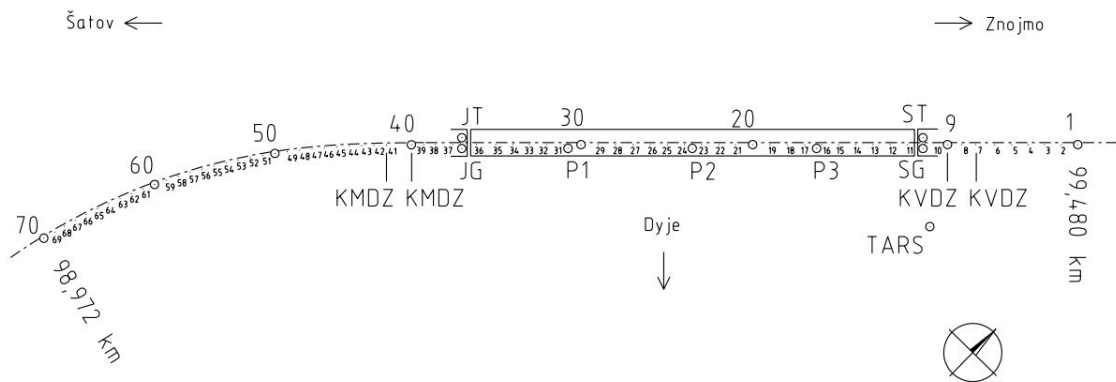
Měření posunů geodetickými metoda se řadí mezi nejnáročnější aplikace klasických a moderních geodetických postupů, protože je požadována vysoká přesnost a spolehlivost výsledků [5].

2.2 Metodika měření

Po testovací etapě E0 byl v rámci etapy E1 ustálen způsob měření, který byl dodržován v rámci všech nadcházejících etap. Stabilizováno bylo celkem 71 bodů na mostním tělese a obou předpolích. Dále byly stabilizovány 3 body na mostovce nad pilíři mostu (P1, P2, P3), 2 body na šatovské opěře (JT, JG) a 2 body na znojemské opěře (ST, SG), které byly monitorovány v rámci vyhodnocování polohových změn. Bod TARS, který byl stabilizovaný pro umístění referenční stanice, je na znojemské straně mostu zřízen mimo mostní konstrukci. Nachází se na pravé straně od osy mostu ve směru nárůstu staničení v příčné vzdálenosti 17 m. Bod byl zřízen na horní hraně opěrné zdi.

Pozorované body jsou rozmístěny v pravidelných intervalech (s výjimkou bodů u dilatačních zařízení) a je jimi pokryt celý úsek mostu (222 m), znojemské předpolí v délce 75 m a šatovské předpolí v délce 211 m, kde body zasahují do směrového oblouku trati. Sledovaný úsek je tedy celkově dlouhý 508 m a je vymezen kilometrovým staničením trati 98,972 km až 99,480 km. Číslování bodů je vzestupné ve směru proti nárůstu staničení.

Měření probíhalo třemi nezávislými způsoby – prostorovou polární metodou ze dvou různých stanovisek a GNSS metodou. Body byly určovány 2x v rámci jedné etapy měření TAM a ZPĚT [1].



Obr. 3 Náčrt rozložení monitorovaných bodů

2.2.1 Prostorová polární metoda

Polární metoda je metoda určení polohy bodu pomocí polárních souřadnic. Polární souřadnice jsou úhel a vzdálenost a bod je určován jako průsečík úhlu mezi výchozím a určovaným bodem a kružnice, která má střed v polárním stanovisku a její poloměr je roven vzdálenosti na měřený bod [6]. Prostorová polární metoda neboli 3D polární metoda je potom rozšíření polární metody o určení výškové složky. Měřenými veličinami jsou tedy směr, šikmá délka a zenitový úhel. Určovány parametry jsou pravouhlé souřadnice y , x a vertikální složka – výška (převýšení). Za použití zenitového úhlu je šikmá délka redukována na délku vodorovnou (horizontální) dle vztahu (1)

$$s = s' \sin z \quad (1)$$

Kde s je vodorovná délka, s' je šikmá délka a z je zenitový úhel.

Vodorovná délka se následně použije pro výpočet pravoúhlých souřadnic y , x podle vzorců:

$$y = s \sin \varphi \quad (2)$$

$$x = s \cos \varphi \quad (3)$$

Kde φ je orientovaný směr od osy x souřadnicové soustavy.

Pro správné určení diferencí mezi jednotlivými měřeními, je důležité mít soustavu směrů vždy stejně orientovanou. Toho docílíme zaměřením stejných orientačních směrů na daném stanovišti. Pro jednodušší výpočetní činnost je výhodné mít soustavu orientovanou rovnoběžně s osou koleje v rovném úseku.

Po určení polohové složky lze z měřených veličin vypočítat i vertikální složku. Dosazením do tohoto vztahu se s použitím zenitového úhlu a délky určí převýšení a z něho výška měřeného bodu:

$$\Delta H = \left[\begin{array}{l} s' \cos z \\ s \cot z \end{array} \right] + i - v \quad (4)$$

Kde ΔH je určované převýšení, i je výška přístroje a v je výška cíle. Výsledná výška se následně určí ze vztahu:

$$H_B = H_A + \Delta H_B \quad (5)$$

Kde H_B je určovaná výška a H_A je výška stanoviště.

Jsou-li měřeny výškové rozdíly mezi body není třeba měřit výšku stroje. Pokud zůstává výška cíle konstantní, nevstupuje do výpočtu ani ta.

Uvedené vztahy platí pro kratší vzdálenosti, při měření delších vzdáleností je nutné zavádět koeficienty pro opravu z působení zakřivení horizontu a terestrické refrakce [6].

2.2.2 GNSS metoda

GNSS neboli globální satelitní navigační systémy (z angl. Global Navigation Satellite System) se používají přibližně od osmdesátých let minulého století. První byl spuštěn americký satelitní polohový systém GPS (z angl. Global Position System), původním názvem NAVSTAR GPS. Dnes již existují další systémy, např. ruský GLONASS, evropský Galileo nebo čínský BeiDou.

Jedná se o satelitní systémy, kterými je určována 3D poloha v globálním geocentrickém prostorovém souřadnicovém systému s přesností několika metrů vůči geocentru při práci s jedním přijímačem. Pokud je měřeno v diferenciálním režimu (měření s použitím dalších aparatur), je možné složky vektorů spojnic určit s mnohem větší přesností a tím přesnost určení polohy výrazně zvýšit – lze dosáhnout přesnosti do několika milimetrů, v závislosti na metodě. Signál z GNSS měření je zpracováván na dvou nosných frekvencích L1 a L2. Měření ovlivňují i vnější vlivy, jako jsou zemská atmosféra a její složky nebo systematické vlivy, např. excentricita fázových center antén, vícecestné šíření signálu, chyby hodin družice a přijímače atp. [6].

2.3 Pomůcky

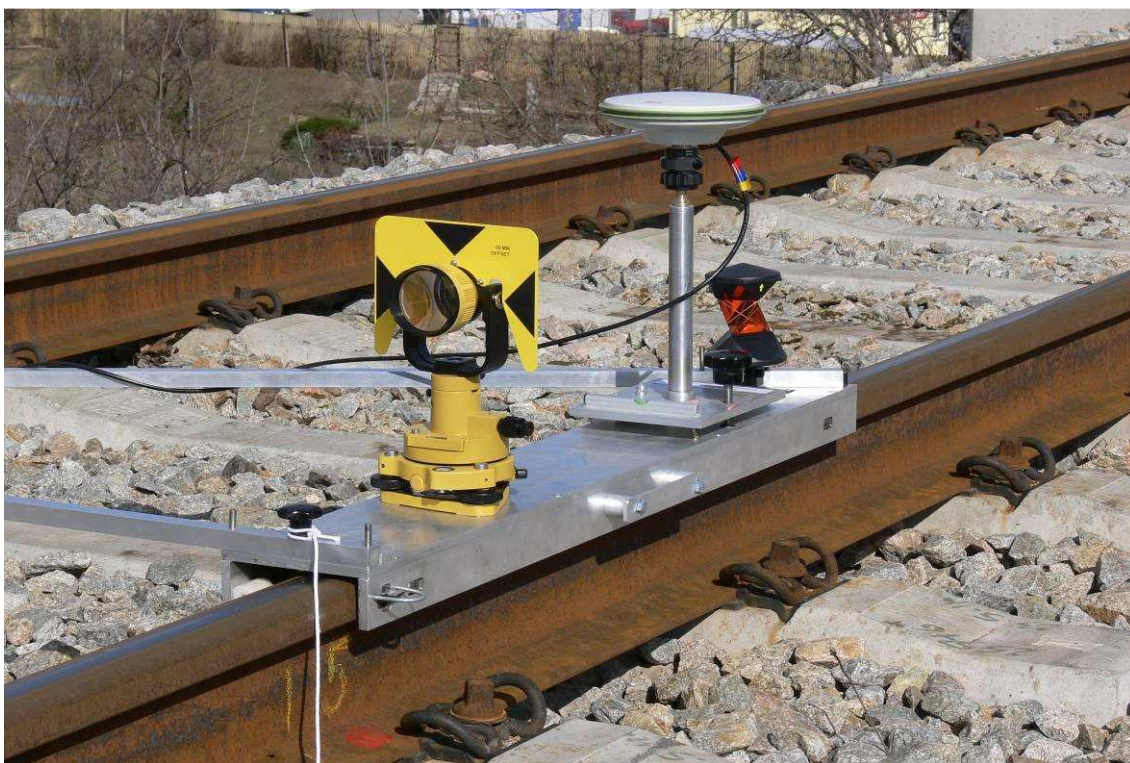
V dalších kapitolách bude pojednáno o hlavním použitém měřickém vybavení. Mimo to bylo použito i další vybavení, které zde není nutné více rozvádět. Jsou to například: svinovací metr pro určení výšky přístroje na stanovisku, stativy a trojnožky pro zajištění centrace na bodech a pomůcky, kterými byly

zaznamenávány teplota a tlak v průběhu měření v pravidelných intervalech na stanovisku ve výšce přístroje.

2.3.1 Speciální pojízdné zařízení

Ke stabilizaci monitorovaných bodů na železničním svršku bylo použito originální pojízdné zařízení s označením ZF1 v konečné úpravě, kterou prošlo v rámci etapy E1, umožňující měřit zároveň GNSS a EDM.

Toto zařízení bylo speciálně navrženo a vyrobeno na Ústavu geodézie VUT v Brně za spolupráce s Ústavem železničních konstrukcí a staveb pro měření zvoleným způsobem. Je vybaveno přesným čtecím zařízením, díky kterému je docíleno stabilizace pro oba kolejnicové pásy a slouží také jako nosič hranolů pro elektronické určování vzdáleností a GNSS antény pro satelitní měření. Tento měřický vozík je konstruován tak, aby byly zachovány jeho přesné geometrické vlastnosti, díky kterým lze určovat prostorovou polohu měřených bodů. Polohovou změnu monitorovaných bodu je tedy možno určovat nezávisle až 3x – pomocí antény pro GNSS měření a prostorovou polární metodou ze dvou různých stanovisek – což umožňuje dostatečnou kontrolu zaznamenaných měření. Zařízení je rozložitelné pro převoz a při smontování je dosaženo znovuoobnovení přesných geometrických vztahů. Poloha bodů na jednom kolejnicovém pásu je určována přímým měřením a poloha druhého se určuje relativně vzhledem k prvnímu pásu. Určování polohy druhého pásu probíhá na milimetrové stupnici upevněné na kolmém rameni zařízení. Přesnost odečtu je 0,1 mm. Umístění hranolů a antény zůstává díky zachování geometrických vztahů ve všech etapách konstantní [2].



Obr. 4 Ukázka umístění hranolů a přijímací aparatury na zařízení ZF1

Zdroj: [1]

2.3.2 Totální stanice

Pro určení prostorové polární metody byly využity dvě přesné totální stanice. Výstup měření totální stanicí jsou úhly (směry) a délky.

Zvoleny byly dvě stanice firmy Topcon vybavené dvojosým kompenzáto-rem sklonu vertikální osy. Měření bylo zaznamenáváno na paměťovém médiu v přístrojích (PCMCIA karta). Pro určení změny v poloze bodů byla původně určena jedna totální stanice Topcon GTS-6A, později byla nasazena druhá typu Topcon GPT-6001N. Komparací na srovnávací základně na FAST VUT v Brně byla zajištěna vzájemná homogenita v měření vzdáleností u obou přístrojů [1].

V následující tabulce (tab. 1) jsou uvedeny základní střední chyby přístrojů, uváděné výrobcem, které budou použity pro výpočet rozborů přesností:

Tab. 1 Přesnost přístrojů udávaná výrobcem:

typ	m_r	m_s
Topcon GTS-6A	0,5 mgon	3 mm + 2ppm
Topcon GPT-6001N	0,5 mgon	2 mm + 2ppm

Zdroj: Manuály k přístrojům Topcon

V tabulce m_r značí základní přesnost směru měřeného ve dvou polohách dalekohledu a m_s je základní přesnost elektronicky určené vzdálenosti.

V kombinaci s totální stanicí je použit také odrazný hranolový systém, který slouží k nepřímému určování vzdálenosti pomocí elektronického dálkoměru. Použité hranoly byly zároveň s totálními stanicemi komparovány na srovnávací základně na FAST VUT v Brně [1].

2.3.3 GNSS aparatura

Pro zaznamenávání satelitního měření byly použity čtyři GNSS aparatury – 2x Leica GX1230GG, 1x Leica SR530 a 1x Leica SR520, s anténami LEIAT504GG, LEIAX1202GG (2x) a LEIAT502.

Zvolený způsob pro záznam GPS měření byla kinematická metoda se statickými intervaly Stop & Go. Délka observace pro 1 bod byla průměrně 45 s a interval záznamu dat 1 Hz. Anténa pro měření bodů na železničním svršku byla umístěna na zařízení ZF1 mezi dvěma odraznými hranoly. Bylo zvoleno rozmístění referenčních stanic na místních bodech označených JG a TARS. Přitom byla využita i data z permanentních stanic sítě CZEPOS, a to stanice na VUT FAST v Brně TUBO a nově zřízená stanice CZNO ve Znojmě [7].



Obr. 5 Referenční stanice GNSS na bodě TARS

Zdroj: [1]

2.4 Etapy

Měření probíhalo v osmi etapách mezi lety 2009–2011. Protože první etapa, označená jako E0, byla později nahrazena vztažnou etapou E1, předně z důvodu rozšíření počtu sledovaných bodů [2], budu se v této práci zabývat posouzením pouze sedmi etap, které byly měřeny stejnou metodikou za plného provozu.

2.4.1 První etapa E1

První etapa – označena jako E1 – proběhla dne 3.3.2010 a následovala po nulté etapě E0, která byla měřena bezprostředně po zprovoznění železničního mostu dne 24.11.2009 (E0 nebude v rámci této práce posuzována). Před měřením proběhla rekognoskace všech bodů v celkovém počtu 71 na

každém kolejnicovém pásu, 2 body na šatovské opěře, 2 body na znojemské opěře, 1 bod na mostní opěře na znojemské straně a 3 body nad pilíři mostu. Tato etapa se dělí na měření TAM a ZPĚT s označení E1a a E1b ve smyslu nárůstu číslování proti směru nárůstu staničení trati. Tento systém je zachován pro všechny následující etapy. Měření bylo zahájeno v 11:04 h SEČ a druhé opakované v 15:54 h [1].

Z této etapy bylo zpracováno 70 bodů na železničním svršku a 3 body na mostní konstrukci (P1, P2, P3) z měření E1a a E1b určených polárně ze stanoviště JT a plný počet bodů – tj. 71 určených satelitním měřením. Použitá totální stanice byla Topcon GTS-6A.

Tab. 2 Naměřená meteodata v oblasti bodu JT ze dne 3.3.2010

Meteodata E1:		
Čas SEČ	Teplota [°C]	Atm. Tlak [hPa]
10:15	7,5	990,4
10:45	7,6	990,2
11:15	8,3	990,4
11:45	9,5	990,1
12:15	9,3	989,5
12:45	9,1	989,3
13:15	7,9	988,9
13:45	7,5	988,5
14:15	7,8	988,1
14:45	7,5	987,9
15:15	7,1	987,7
15:45	5,9	987,5
16:15	4,9	987,1
16:45	4,4	986,9
17:15	3,6	986,8
∅	7,19	988,62

Zdroj: [1]

2.4.2 Druhá etapa E2

Měření druhé etapy E2 proběhlo dne 6.5.2010 po předchozích etapách E0 a E1. Před zahájením měření proběhla rekognoskace všech měřených bodů. Body byly měřeny stejnou metodikou jako v předchozí etapě nezávisle s časovým odstupem TAM i ZPĚT, označených jako měření E2a a E2b [2].

V této etapě bylo zpracováno 63 bodů 2x zaměřených polární metodou ze stanoviska JT s použitím totální stanice Topcon GTS-6A a 3 body na mostní konstrukci. Z měření GNSS byl vyhodnocen plný počet bodů na železničním svršku v opakovaném určení.

Tab. 3 Naměřená meteorologická data v oblasti bodu JT ze dne 6.5.2010

Meteorologická data E2:		
Čas SELČ	Teplota [°C]	Atm. Tlak [hPa]
12:30	22,1	966,8
13:00	22,0	966,5
13:30	23,0	966,6
14:00	24,5	966,5
14:30	24,3	965,8
15:00	23,5	966,0
15:30	22,8	965,9
16:00	22,3	965,8
16:30	21,4	965,8
17:00	21,3	965,9
17:30	21,1	966,1
18:00	20,5	966,9
18:30	19,3	967,0
19:00	20,7	967,2
19:30	19,3	967,6
19:50	17,2	968,0
Ø	21,58	966,53

Zdroj: [2]

2.4.3 Třetí etapa E3

Zaměření etapy E3 proběhlo 12.7.2010 po rekognoskaci všech měřených bodů. V rámci třetí etapy byly zaměřeny všechny body, a to jedenkrát [8].

Zpracováno bylo 63 bodů na kolejnicovém pásu a 3 body na mostní konstrukci zaměřených ze stanoviška JT a určených polární metodou přístrojem Topcon GTS-6A. Dále plný počet 71 bodů zaměřených metodou GNSS.

Tab. 4 Naměřená meteodata v oblasti bodu JT ze dne 12.7.2010

Meteodata E3:		
Čas SELČ	Teplota [°C]	Atm. Tlak [hPa]
11:30	31,4	984,0
12:00	33,3	983,8
12:30	33,4	983,7
13:00	34,2	983,6
13:30	33,6	983,6
14:00	33,4	983,3
14:30	33,5	983,0
15:00	33,2	982,8
15:30	33,1	982,4
16:00	33,1	981,8
∅	33,22	983,20

Zdroj: [8]

2.4.4 Čtvrtá etapa E4

Etapa s označením E4 byla měřena 24.11.2010 a před vlastním měřením proběhla opět rekognoskace všech bodů. Byl zaměřen opět plný počet bodů, které byly určeny jedenkrát [9].

Z proběhlého měření je v rámci této práce zpracováno 69 bodů určených polárně ze stanoviška JT a 3 body na mostní konstrukci zaměřených kombinací přístrojů Topcon GTS-6A a GPT-6001N. Zaměřen byl i plný počet bodů určených GNSS.

Tab. 5 Naměřená meteodata v oblasti bodu JT ze dne 21.11.2010

Meteodata E4:		
Čas SEČ	Teplota [°C]	Atm. Tlak [hPa]
11:00	5,0	969,7
11:30	5,0	969,6
12:00	4,8	970,0
12:30	4,9	970,1
13:00	4,8	970,3
13:30	4,5	970,5
14:00	4,5	970,5
14:30	4,4	970,7
15:00	4,3	970,9
15:30	4,1	971,3
16:00	3,7	971,7
Ø	4,55	970,48

Zdroj: [9]

2.4.5 Pátá etapa E5

Zaměření páté etapy probíhalo ve dvou dnech. Dne 4.4.2011 proběhlo první měření označované jako E5a a 18.4.2011 bylo uskutečněno druhé zaměření E5b. Před zahájením měření byla opět provedena rekognoskace všech bodů. Měření páté etapy bylo realizováno 4.4.2011, ale z důvodu náhlého zhoršení povětrnostních podmínek bylo zaměřeno pouze 22 bodů a měření bylo opakováno v pozdějším termínu. V novém termínu se podařilo zaměřit již všechny body dvakrát TAM a ZPĚT. Tato měření jsou označena jako E5ba a E5bb [10].

Protože měření E5a probíhalo za špatných podmínek, kdy bylo zaměřeno pouze 22 bodů, nebude zahrnuto do výsledků této práce. Z měření E5b je zpracováno 63 bodů na kolejnicovém pásu měřených polární metodou TAM a ZPĚT a také 3 body na mostní konstrukci. Použité přístroje pro polární metodu byly obě totální stanice. Topcon GTS-6A pro 1. měření (TAM) a Topcon

GPT-6001N pro 2. měření (ZPĚT). V rámci GNSS měření jsou zpracovány všechny body na železničním svršku (71).

Tab. 6 Naměřená meteodata v oblasti bodu JT ze dne 18.4.2011 (E5b)

Meteodata E5b:		
Čas SELČ	Teplota [°C]	Atm. Tlak [hPa]
11:30	17,9	991,7
12:00	18,5	991,5
12:30	18,8	991,1
13:00	18,9	990,8
13:30	19,1	990,6
14:00	19,2	990,4
14:30	19,5	990,2
15:00	20,2	989,8
15:30	19,5	989,3
16:00	19,1	989,0
16:30	19,0	988,7
17:00	19,2	988,3
17:30	19,0	988,0
18:30	18,7	987,8
∅	19,04	989,80

Zdroj: [10]

2.4.6 Šestá etapa E6

Měření šesté etapy proběhlo dne 29.6.2011. Před měřením této etapy proběhla tradičně rekognoskace stavu všech bodů [11].

Zpracovávaná data z této etapy tvoří měření ve směru TAM od bodu 41 vzestupně a měření ZPĚT v sestupném číslování opět od bodu 41, takže všechny body jsou určeny jedenkrát. Toto schéma platí jak pro satelitní měření, tak pro polární metodu. Pro měření polární metody byl použit přístroj Topcon GPT-6001N.

Tab. 7 Naměřená meteorologická data v oblasti bodu JT ze dne 29.6.2011

Meteorologická data E6:		
Čas SELČ	Teplota [°C]	Atm. Tlak [hPa]
10:30	27,2	983,1
11:00	28,5	983,0
11:30	29,7	982,9
12:00	29,6	982,7
12:30	28,9	982,4
13:00	28,0	982,2
13:30	28,1	982,0
14:00	27,8	981,7
14:30	28,1	981,8
15:00	28,7	981,7
15:30	28,4	981,6
16:00	29,2	981,2
Ø	28,52	982,19

Zdroj: [11]

2.4.7 Závěrečná sedmá etapa E7

Poslední sedmá etapa byla zaměřena dne 12.9.2011 a byla zahájena po obvyklé rekognoskaci všech sledovaných bodů [7].

Dle závěrečné technické zprávy [7] byly **naměřené rozdíly** polohové přesnosti sledovaných bodů mimo mostní konstrukci (TARS, JG, SG) pomocí statického monitoringu GNSS technologií **v mezích mezních odchylek** stanovených dvojnásobkem střední chyby přesnosti určení. Proto lze konstatovat, že **s jistotou 95 % se jejich poloha nezměnila a případná změna polohy nebude v této práci uvažována** [7]. Body JT a ST nebyly v rámci původního měření přímo monitorovány, ale protože jsou umístěny na stejných opěrách jako monitorované body (TARS, JG, SG), předpokládá se, že ani jejich poloha nebyla změněna.

Zpracovávané naměřené veličiny tvoří v této etapě celkem 64 monitorovaných bodů na kolejnicovém pásu a 3 body na mostní konstrukci určené

polární metodou ze stanoviště JT. Použitý přístroj je Topcon GTS-6A. Zpracovávaná data z určení GNSS je plný rozsah 71 bodů. Naměřené veličiny v této etapě nejsou určeny TAM a ZPĚT, ale opakovaným zaměřením stejného bodu v jednom směru (ve směru nárůstu číslování).

Tab. 8 Naměřená meteodata v oblasti bodu JT ze dne 12.9.2011

Meteodata E7:		
Čas SELČ	Teplota [°C]	Atm. Tlak [hPa]
13:30	24,9	985,0
14:00	25,2	985,1
14:30	24,8	984,9
15:00	25,5	984,6
15:30	25,3	984,3
16:00	25,5	984,2
16:30	25,7	983,9
17:00	25,5	983,6
17:30	25,8	983,6
18:00	23,8	983,7
18:30	23,6	983,7
Ø	25,05	984,24

Zdroj: [7]

3 Zpracování měření

Tato kapitola se zabývá zpracováním zaznamenaných dat ze sedmi měřených etap. Protože metodika měření zůstávala po celou dobu neměnná, tak i zpracování je pro všechny měřené etapy stejné.

3.1 Prostorová polární metoda

Měřené veličiny prostorovou polární metodou jsou délky, směry a zenitové úhly. Nejprve bude rozebráno zpracování směrů, poté délek, a nakonec výškových úhlů.

Protože měřické práce probíhaly za plného provozu, byla po každém projetí vlaku provedena kontrola centrace, opětovné zaměření zvolených externích orientačních směrů a většinou i kontrolní zaměření alespoň jednoho identického bodu, tj. bodu který byl již dříve určen. Pro orientaci osnovy směrů byly vždy na začátku zaměřeny minimálně dvě vnější orientace. Po každém projetí vlaku byly tyto orientace zaměřeny znovu. Proto byly všechny později určené směry opraveny o rozdíl, který vznikl mezi původní a novou orientací osnovy směrů – tzv. orientační posun. Tento posun je určen dle vzorce:

$$o_i = \psi_0 - \psi_i \quad (6)$$

Kde o je orientační posun a ψ je směr na měřený bod.

Výsledný orientační posun při více orientacích je určen aritmetickým průměrem všech orientačních posunů.

Takto byla získána jednotně orientovaná osnova směrů, která byla následně upravená tak, aby výchozí – tedy nultý směr byl směrem na bod ST.

Tímto bylo docíleno orientace osnovy směrů souhlasně s osou koleje v jejím přímém úseku.

Nepřímo měřené délky je nutné opravit o vliv systematických chyb, konkrétně o součtovou konstantu hranolu a fyzikální korekce. Protože data, která jsem v rámci této práce zpracovával, byla již opravena o hodnotu součtové konstanty, byla provedena oprava délek jen o hodnotu jejich fyzikální korekce, určenou dle vzorce:

$$b = 278,88 - \left(\frac{79,307 p}{273,15+t} \right) \quad (7)$$

Kde p [hPa] je hodnota tlaku a t je teplota [°C]. Výslednou korekci měřené délky určíme dle vzorce:

$$k = a + b \text{ ppm} \quad (8)$$

Kde a je součtová konstanta a b je hodnota fyzikální korekce v jednotkách ppm . Člen b je úměrný měřené délce a jeho oprava je pro jednu milióntinu měřené délky, proto je b v násobku 10^{-6} s (tj. ppm). Tuto hodnotu lze zadat přímo do přístroje při měření, nebo zavádět až při zpracování. Zde je nutné dávat pozor, aby nebyla korekce zavedena vícekrát [6].

3.1.1 Určení pravoúhlých souřadnic

Veličiny zpracované dle předchozí podkapitoly lze dosadit do vzorců (1) až (3) a vypočítat pravoúhlé souřadnice bodů v horizontální souřadnicové soustavě, jejíž kladná osa x je ve směru spojnice bodů JT – ST a osa y je levotočivě doplněna k ose x . Dále se dle vzorce (9) a (10) spočítají posuny v této souřadnicové soustavě.

$$dx_i = x_{i(Ej)} - x_{i(E1)} \quad (9)$$

$$dy_i = y_{i(Ej)} - y_{i(E1)} \quad (10)$$

Kde dx je posun v místním souřadnicovém systému, $x_{i(E1)}$ je x-ová souřadnice bodu v základní (srovnávací) etapě a $x_{i(Ej)}$ je příslušná souřadnice bodu v aktuální etapě.

3.1.2 Transformace na podélné a příčné posuny

Výsledky posunů jsou na železnici vyžadovány v podélném a příčném směru osy koleje. Proto je nutné posuny určené v systému pravoúhlých souřadnic transformovat na podélnou a příčnou složku. V přímém úseku koleje byla souřadnicová soustava orientována souhlasně s osou koleje. Tato skutečnost byla ověřena i početně, kdy byla body proložena přímka a zjištěna odchylka této přímky a osy x zvoleného souřadnicového systému. Nejvyšší zjištěná odchylka osy koleje od osy x činí 31^{cc} (E2) a ta neovlivnila v požadované přesnosti hodnoty podélných a příčných posunů. Je tedy nutno transformovat body, které nejsou v přímém úseku dle vztahu:

$$\begin{bmatrix} ds \\ dq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \quad (11)$$

α je úhel, který svírá osa x s osou koleje. V oblouku je to úhel osy x s tečnou pro určovaný bod.

3.1.3 Určení výškových posunů

Posledním prvkem v určení polohy prostorovou polární metodou je převýšení. Převýšení bylo spočítáno ze vztahu (4) a z rozdílů převýšení byly určeny pomocí vzorce (12) výškové posuny. Díky konstantnímu umístění hranolů na

měřickém vozíku byla zajištěna neměnná výška cíle. Z tohoto důvodu nebude ve výpočtu posunů uvažována. Zkoumané výškové posuny se určí ze vztahu:

$$d_{Hi} = \Delta H_{i(Ej)} - \Delta H_{i(E1)} \quad (12)$$

$\Delta H_{i(Ej)}$ je převýšení určené v aktuální etapě a $\Delta H_{i(E1)}$ je příslušné převýšení vypočtené v základní (srovnávací) etapě. d_{Hi} je hledaný výškový posun.

3.2 GNSS metoda

Výsledkem satelitního měření na obou frekvencích L1 a L2 jsou souřadnicové rozdíly mezi určeným bodem a bodem na kterém byla umístěna referenční stanice (JG). Tyto rozdíly jsou v souřadnicovém systému WGS-84, který používá GPS, a byly vypočteny v programu Leica LGO. Pro účely dalšího zpracování byly transformovány do lokálního kartézského souřadnicového systému [1].

3.2.1 Souřadnice v lokálním kartézském souřadnicovém systému

Lokální kartézský souřadnicový systém je definován tak, že má počátek v bodě referenční stanice (JG) a jeho osy n a e leží v místní horizontální rovině. Osa n je orientována kladně do severní větve místního meridiánu, osa e směřuje na východ a osa v splývá s místní svislicí. V tomto systému byly vypočteny posuny pro každý pozorovaný bod ve směru souřadnicových os za použití následujících vztahů:

$$dn_i = n_{i(Ej)} - n_{i(E1)} \quad (13)$$

$$de_i = e_{i(Ej)} - e_{i(E1)} \quad (14)$$

$$dv_i = v_{i(Ej)} - v_{i(E1)} \quad (15)$$

3.2.2 Transformace na podélné a příčné posuny

Jako v případě posunů určených polární metodou, je nutno rozdíly vypočtené v lokálním kartézském souřadnicovém systému transformovat na podélné a příčné posuny. Tato transformace byla provedena za pomoci vztahu (16) [1].

$$\begin{bmatrix} ds \\ dq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dn \\ de \end{bmatrix} \quad (16)$$

Kde úhel α je azimut osy koleje uvažovaný od místního meridiánu a v oblouku je to azimut tečny v určovaném bodě.

3.3 Vyhodnocení měřických dvojic

V geodézii se častou používá opakovaných měření pro zvýšení přesnosti a ověření, že nedošlo k omylu nebo hrubé chybě. Speciální případ je zpracování měřických dvojic. Ze dvou nezávislých měření TAM a ZPĚT můžeme určit diferenci d

$$d = l' - l'' \quad (17)$$

l' je označeno měření TAM a l'' měření ZPĚT. Výsledná diference d nesmí překročit mezní hodnotu d_{mez}

$$d_{mez} = \sqrt{\delta^2 + \delta^2} = \delta\sqrt{2} \quad (18)$$

Kde δ je mezní hodnota odchylky vypočtená ze vztahu

$$\delta_x = m_x t \quad (19)$$

Zde je m_x základní střední chyba měřené veličiny a t je součinitel konfidence, který je volen na základě hladiny statistické významnosti α [6]. Pro účely této

práce je hladina statistické významnosti (riziko) $\alpha = 5 \%$, které odpovídá hodnota $t = 2$.

Pokud je $|d| < d_{mez}$ je výsledná hodnota určena jako aritmetický průměr obou měření. Pakliže je mezní hodnota difference překročena, je měření opakováno a chybné měření je nahrazeno novým, nebo jsou opakovány měření obě [12].

Protože se v této práci zabývám zpracováním již proběhlého měření, budou hodnoty, které překročily mezní odchylky pouze vyloučeny z výpočtu, protože nemohou být nahrazeny novým měřením konaným za stejných podmínek, jako to původní.

4 Rozbory přesnosti

4.1 Prostorová polární metoda

Apriorní přesnost

Pro polární metodu lze na základě těchto vztahů určit apriorní střední chyby určení polohy ve směru souřadnicových os:

$$m_x^2 = \cos^2 \alpha m_s^2 + s^2 \sin^2 \alpha m_\omega^2 \quad (20)$$

$$m_y^2 = \sin^2 \alpha m_s^2 + s^2 \cos^2 \alpha m_\omega^2 \quad (21)$$

a kovarianci:

$$m_{xy} = \sin \alpha \cos \alpha m_s^2 - s^2 \sin \alpha \cos \alpha m_\omega^2 \quad (22)$$

a z následujícího vztahu střední souřadnicovou chybu:

$$m_{x,y}^2 = \frac{m_s^2 + s^2 m_\omega^2}{2} \quad (23)$$

Ve vzorcích znamená α směrník měřeného bodu, m_s je základní střední chyba délky a m_ω základní střední chyba úhlu. s je měřená délka [6].

Pro komplexní informaci o poloze bodu byly vypočteny a v **příloze A** jsou zakresleny apriorní střední elipsy chyb vybraných bodů. Parametry středních elips chyb jsou vypočteny ze vzorců:

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{2m_{xy}}{m_x^2 - m_y^2} \quad (24)$$

$$m_{max}^2 = \frac{m_x^2 + m_y^2}{2} + \sqrt{\frac{(m_x^2 - m_y^2)^2}{4} + m_{xy}^2} \quad (25)$$

$$m_{min}^2 = \frac{m_x^2 + m_y^2}{2} - \sqrt{\frac{(m_x^2 - m_y^2)^2}{4} + m_{xy}^2} \quad (26)$$

Kde φ je úhel pootočení, m_{max} je velikost hlavní poloosy a m_{min} je velikost vedlejší poloosy [6].

Aposteriorní přesnost

Ze souřadnic monitorovaných bodů měřených TAM byla za pomoci vzorce (27) vypočtena délka mezi jednotlivými body

$$s = \sqrt{\Delta y^2 + \Delta x^2} \quad (27)$$

Následně byla vypočtena délka mezi odpovídajícími body z měření ZPĚT a tyto dvě délky byly zpracovány jako měřické dvojice. Ze vztahu (17) byla určena diference a z následujícího vztahu střední chyba jednoho měření.

$$m = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}} \quad (28)$$

d je zjištěná diference a n je počet měření. Vypočtená střední chyba je vnitřní přesnost měření, charakterizovaná střední náhodnou chybou. Pro horizontální polohu určenou polární metodou byla vypočtena hodnota **1,4 mm** a pro vertikální polohu **4,9 mm**.

4.2 GNSS metoda

Apriorní přesnost

Apriorní střední polohová chyba pro satelitní metodu Stop & Go je daná vztahem:

$$m_{P(GNSS)} = 10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \quad (29)$$

Protože člen úměrný měřené délce se na určovaných vzdálenostech neprojeví, je výsledná střední polohová chyba rovna 10 mm. Z této chyby je za

použití následujícího vztahu (30) odvozena základní střední souřadnicová chyba $m_{xy(GNSS)} = 7 \text{ mm}$.

$$m_{x,y} = \frac{m_p}{\sqrt{2}} \quad (30)$$

Aposteriorní přesnost

Vypočtená střední náhodná chyba délky mezi dvěma sousedními body z rozdílů měřických dvojic dle postupů z předchozí podkapitoly ze vztahů (27) a (28) je rovna **3,5 mm** a pro výškové určení **8,7 mm**.

4.3 Vzájemná přesnost obou metod

V následujících tabulkách jsou uvedeny vypočtené střední chyby pro délky mezi dvěma sousedními body na železničním svršku z etap, které byly určeny TAM a ZPĚT (E1, E2, E5).

Tab. 9 Vypočtené hodnoty střední náhodné chyby pro polární metodu

Polární metoda		
Etapa	m_n [mm]	m_H [mm]
E1	1,4	6,5
E2	1,6	3,2
E5	1,2	1,3
∅	1,4	4,9

Tab. 10 Vypočtené hodnoty střední náhodné chyby pro metodu GNSS

Metoda GNSS		
Etapa	m_n [mm]	m_H [mm]
E1	2,9	7,2
E2	4,5	10,2
E5	3,1	7,2
∅	3,5	8,7

Pro přímé porovnání přesnosti obou metod byla sestavena následující tabulka (tab. 11), která obsahuje základní střední chyby délky odvozené ze základní střední souřadnicové chyby pomocí zákona hromadění středních

chyb. Výchozí základní střední souřadnicová chyba pro polární metodu je $m_{x,y} = 2,8 \text{ mm}$ a pro metodu GNSS Stop & Go $m_{x,y} = 7,1 \text{ mm}$. Po aplikaci zákona hromadění středních chyb máme základní střední chybu délky pro polární metodu 4,0 mm a pro GNSS 10,0 mm. Dále tabulka obsahuje vypočtené náhodné střední chyby použitých měřických metod.

Tab. 11 Porovnání apriorní a aposteriorní přesnosti obou metod

metoda	stř. chyba	m_s [mm]	m_H [mm]
polární metoda	apriorní	4,0	5,6
	aposteriorní	1,4	4,9
GNSS metoda	apriorní	10,0	25,0
	aposteriorní	3,5	8,7

5 Vyhodnocení zpracovaných dat

Hlavním cílem této práce je určit hodnoty podélných posunů v závislosti na teplotě. Z výsledků obou použitých měřických metod lze tuto závislost jednoznačně pozorovat. Tabulky s vyhodnocenými posuny určenými polární metodou jsou uvedeny **v příloze B** a určenými metodou GNSS jsou **v příloze C**. Podélné posuny jsou kladné ve smyslu nárůstu staničení (ve směru k žst. Znojmo) a příčné posuny jsou kladné ve směru napravo od osy koleje ve smyslu nárůstu staničení. Grafické znázornění určených posunů je uvedeno **v příloze D**.

5.1 Posouzení posunů

Abychom odlišili hodnotu posunu od rozptylu měření, jsou určeny podmínky posouzení posunů. Dle následujících podmínek bylo posouzeno, jestli došlo k posunu, nebo nikoliv.

$$\text{posun nenastal} \quad d < m_d \quad (31)$$

$$\text{posun nebyl prokázán} \quad m_d \leq d \leq 2m_d \quad (32)$$

posun nastal s pravděpodobností 95 %

$$2m_d < d \quad (33)$$

Pro polární metodu byla základní střední souřadnicová chyba pro délky do 300 m stanovena dle vzorce (23) na $\mathbf{m_{x,y} = 4 \text{ mm}}$ [5]. Chyba posunu m_d je pak určena jako chyba aritmetického průměru dvou měření ze zákona hromadění středních chyb.

$$m_d = m_{xy}\sqrt{2} \quad (34)$$

Pro výpočet základní střední chyby určení výšky byl použit zjednodušený vztah, který předpokládá vodorovné záměry (100⁸), protože v měření se strmější záměry nevyskytují. Základní střední chyba určení výšky byla stanovena na **m_H = 6 mm**.

$$m_H^2 = s^2 m_z^2 + m_i^2 + m_v^2 \quad (35)$$

Kde s je měřená délka, m_z základní střední chyba zenitového úhlu a m_i je základní střední chyba určení výšky na stanovisku. Protože výška cíle m_v zůstává konstantní díky zachování geometrických vztahů na měřickém vozíku, nebude střední chyba určení výšky cíle uvažována.

Základní střední polohová chyba metody GNSS je stanovena jako **m_P = 10 mm + 1 ppm**. Jelikož přesnost určení výšky je metodou GNSS 2–3krát nižší než u horizontální složky, jsou **v příloze C** vertikální posuny určené GNSS uvedeny pouze orientačně.

V přehledných **tabulkách**, které jsou uvedeny **v přílohách B a C**, jsou výsledné posuny označeny **oranžově**, pokud spadají do podmínky (32), a **červeně**, pokud do podmínky (33). Může se stát, že dvě zdánlivě stejná čísla jsou jinak vyhodnocena. Toto nastalo při zaokrouhlování hodnot – hodnota, která je zahrnuta do podmínky, byla zaokrouhlena směrem dolů a hodnota, která do podmínky zahrnuta není, byla zaokrouhlena směrem nahoru.

Pokud je v tabulce prázdné místo, tak tato hodnota nebyla buď zaměřena, nebo byla z měření vyloučena jako omyl či hrubá chyba.

5.2 Určení teplotní roztažnosti

Teplotní roztažnost železničního svršku byla počítána z bodů, které tvoří bezstykovou kolej. Bezstyková kolej je svařena dohromady z jednotlivých kolejnic. Zde se projevuje největší teplotní vliv v podélném směru a z těchto podélných posunů byla spočítána teplotní roztažnost odvozením ze vzorce:

$$d_i = s_i \alpha (t_j - t_0) \quad (36)$$

Kde d je zjištěný posun, s je délka, t_0 je teplota počáteční (srovnávací) etapy a t_j je teplota v aktuální etapě. α je zjišťovaný teplotní koeficient.

Odvozením a dosazením do vzorce byl vypočten koeficient α . Aritmetickým průměrem ze všech etap byla zjištěna hodnota $\alpha = 1,33 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pro **železniční svršek** z měření polární metodou a $\alpha = 1,35 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ze satelitního měření GNSS. Pro **mostní konstrukci** byla vypočtena hodnota $\alpha = 1,44 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ z posunů bodů stabilizovaných na mostní konstrukci (P1, P2, P3), které byly určeny pouze polární metodou. Tabulková hodnota α pro ocel je $1 - 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Jelikož byla měřena teplota vzduchu v okolí bodu JT, mohl zde vzniknout rozdíl mezi uvedenými hodnotami.

5.3 Grafické znázornění

Nakonec bylo provedeno grafické znázornění vypočtených posunů. V příloze D je uvedeno celkem 5 grafů. Na prvních dvou (obr. 6 a 7) jsou znázorněny podélné posuny v závislosti na teplotě pro vybrané body stabilizované na železničním svršku na mostě mezi dilatačními zařízeními. Z grafů je patrné, že železniční svršek se v závislosti na teplotě protahoval v kladném směru (k žst. Znojmo), kde jsou umístěna posuvná ložiska mostu.

V dalších grafech (obr. 8 a 9) je znázorněn vývoj posunů všech bodů v rámci jednotlivých etap měření. Můžeme si všimnout, že nejsignifikantnější jsou posuny v etapách, které byly zaměřovány s nejvyšším teplotním rozdílem vzhledem ke vztažné etapě E1.

A v posledním grafu (obr. 10) je znázorněno výškové přetvoření železničního svršku, které bylo zaměřeno prostorovou polární metodou.

5.4 Shrnutí

Největší délkový posun byl naměřen ve třetí etapě (E3) a jeho hodnota je 81 mm. Tento posun byl očekávaný, protože je na straně mostu s pohyblivými ložisky a byl naměřen v etapě, která má největší teplotní rozdíl vzhledem k výchozí etapě E1 (26,03 °C). Největší příčný posun polární metodou byl zaměřen v šesté etapě (E6) a jeho hodnota je 18 mm. Opět zde působil velký teplotní rozdíl (21,32 °C) a posun byl opakovaně určen v následující etapě E7 s také výrazným teplotním rozdílem (18,86 °C). Navíc se bod 42 nachází na začátku směrového oblouku trati, takže je vystaven zvýšenému provoznímu zatížení. Celkový největší příčný posun -27 mm byl určen ve třetí etapě (E3). Tento rozdíl je z měření satelitní metodou a nebyl z měření polární metodou potvrzen. Protože třetí etapa byla určena pouze jednou, nelze tedy provést kontrolu. Pravděpodobně se tedy jedná o chybu měření, která spadá do dvojnásobku střední polohové chyby rozdílu dvou etap určení GNSS ($\delta_d = 28$ mm).

Největší výškový posun -67 mm byl zaměřen v šesté etapě (E6) na znojemském předpolí. Opět zde mohl hrát roli teplotní rozdíl 21,32 °C a vliv provozního zatížení. Tento rozdíl se při zaměření v sedmé etapě (E7) o 19 mm zmenšil, ale zároveň se snížil teplotní rozdíl.

Z porovnání apriorních a aposteriorních středních chyb vyplývá, že výsledná vnitřní přesnost měření je vyšší, než je předpokládaná přesnost pro zadané metody. Jak z rozboru přesnosti před měření, tak i po měření, je patrné, že přesnost polární metody je vyšší, než u kinematické satelitní metody Stop & Go. Tato skutečnost platí jak pro horizontální, tak pro vertikální určení polohy bodu.

6 Závěr

V této práci je obsažena metodika měření a hlavně následného vyhodnocení prostorových posunů železničního viaduktu. Je zde popsán celkový postup určování prostorových změn daného objektu nejpoužívanějšími geodetickými metodami. Obsaženo je i porovnání přesností před a po měření pro obě zvolené metody a vyhodnocení zjištěných posunů v závislosti na teplotních změnách při zaměřování konkrétních měřických etap.

Z výsledků práce je patrné, že se podařilo potvrdit předpokládané chování železničního svršku a mostní konstrukce na základě vnějších vlivů. Nejvýraznější posuny byly naměřeny v podélném směru na železničním svršku – který je tvořen bezстыkovou kolejí – a na mostní konstrukci. Výsledky potvrdily, že tyto změny v poloze jsou vázány na změnu teploty a odpovídají vlastnostem použitých materiálů. Posuny jsou sledovány v očekávaném směru, tedy ve směru pohyblivých ložisek na kterých je uložena konstrukce mostu. Potvrdila se i předpokládaná místa podélných posunů. Nejvyšší hodnoty podélných posunů byly naměřeny před umístěním kolejových dilatačních zařízení, a to jak na šatovské straně, tak i na znojemské straně.

V příčném směru byly zaznamenány největší rozdíly v nájezdu/výjezdu ze směrového oblouku trati, což odpovídá očekávanému zvýšenému provoznímu zatížení železničního svršku.

Z výsledků výškových posunů vyplývá, že při zvyšování teplotního rozdílu vůči vztažné etapě dochází k roztahování mostní konstrukce, a tím nastává zdvih v horizontálním směru. Naopak v místech obou náspů můžeme sledovat sedání železničního svršku.

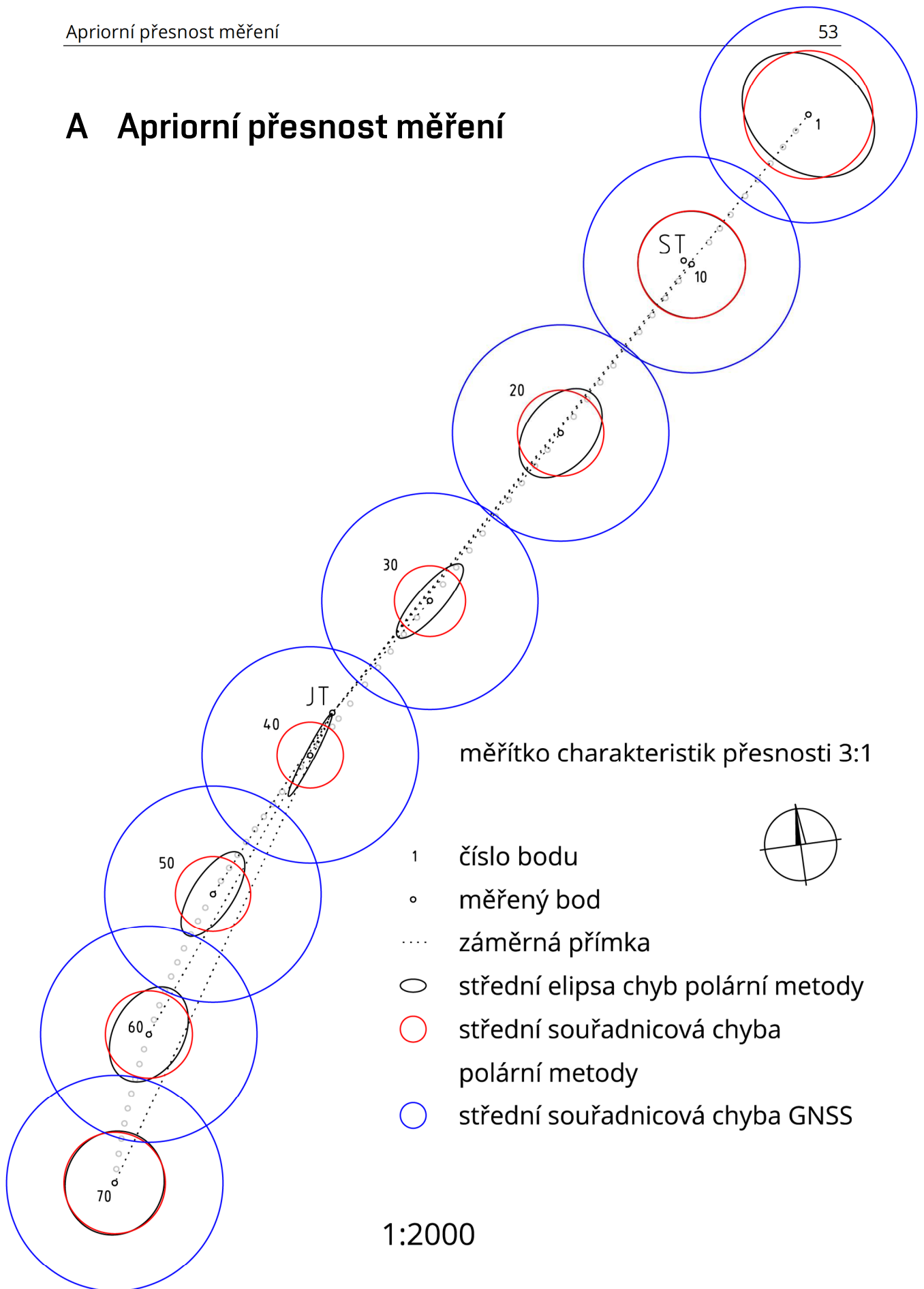
7 Literatura

- [1] ŠVÁBENSKÝ, O., *Sledování účinků od provozu a železničního svršku na mostní pře-pážku mostní konstrukce v km 99,297 – Znojemský viadukt. Geodetické měření – 1. etapa*. Dílčí technická zpráva, 22 s., FAST VUT v Brně, 2010
- [2] ŠVÁBENSKÝ, O., *Sledování účinků od provozu a železničního svršku na mostní pře-pážku mostní konstrukce v km 99,297 – Znojemský viadukt. Geodetické měření – 2. etapa*. Dílčí technická zpráva, 18 s., FAST VUT v Brně, 2010
- [3] ŠOUKALOVÁ, D., VÁCLAVÍK, D., *Rekonstrukce znojemského viaduktu*. Sborník 16. kon-ference „Železniční dopravní cesta 2010“ Pardubice, s.74-81, SŽDC Praha, 2010, ISBN 978-80-254-6802-2
- [4] ČSN 73 0405 Měření posunů stavebních objektů
- [5] ŠVÁBENSKÝ, O., VITULA, A., BUREŠ, J., *Inženýrská geodézie I, M02 Geodézie ve stavebnic-tví*, VUT Brno, 2006
- [6] ŠVÁBENSKÝ, O., VITULA, A., BUREŠ, J., *Inženýrská geodézie I, M01 Základy inženýrské ge-odézie*, VUT Brno, 2006
- [7] ŠVÁBENSKÝ, O., *Sledování účinků od provozu a železničního svršku na mostní pře-pážku mostní konstrukce v km 99,297 – Znojemský viadukt. Geodetické měření – 7. etapa a závěrečné zhodnocení*. Závěrečná technická zpráva, 34 s., FAST VUT v Brně, 2011
- [8] ŠVÁBENSKÝ, O., *Sledování účinků od provozu a železničního svršku na mostní pře-pážku mostní konstrukce v km 99,297 – Znojemský viadukt. Geodetické měření – 3. etapa a závěrečné zhodnocení dosavadních etap*. Roční technická zpráva, 26 s., FAST VUT v Brně, 2010
- [9] ŠVÁBENSKÝ, O., *Sledování účinků od provozu a železničního svršku na mostní pře-pážku mostní konstrukce v km 99,297 – Znojemský viadukt. Geodetické měření – 4. etapa*. Dílčí technická zpráva, 23 s., FAST VUT v Brně, 2010

-
- [10] ŠVÁBENSKÝ, O., *Sledování účinků od provozu a železničního svršku na mostní pře-pážku mostní konstrukce v km 99,297 – Znojemský viadukt. Geodetické měření – 5. etapa.* Dílčí technická zpráva, 27 s., FAST VUT v Brně, 2011
- [11] ŠVÁBENSKÝ, O., *Sledování účinků od provozu a železničního svršku na mostní pře-pážku mostní konstrukce v km 99,297 – Znojemský viadukt. Geodetické měření – 6. etapa.* Dílčí technická zpráva, 28 s., FAST VUT v Brně, 2011
- [12] WEIGEL, J., *Teorie chyb a vyrovnávací počet I, M02 Základní druhy vyrovnání (1.část),* VUT Brno, 2004

Přílohy

A Apriorní přesnost měření



B Tabulky posunů bodů určených prostorovou polární metodou

Prázdné místa v tabulkách značí, že bod nebyl v dané etapě zaměřen, nebo byl z výsledků vyloučen jako omyl či hrubá chyba. Vypočtené posuny jsou vztaženy ke srovnávací etapě E1.

Tab. 12 Posuny monitorovaných bodů na mostní konstrukci

Tabulka posunů bodů mostní konstrukce v podélném a příčném směru [m]												
číslo bodu	E2		E3		E4		E5		E6		E7	
	d_x	d_y	d_x	d_y	d_x	d_y	d_x	d_y	d_x	d_y	d_x	d_y
P1	0,033	0,003	0,062	0,003	-0,003	0,010	0,029	0,013	0,047	0,013	0,043	0,001
P2	0,020	0,007	0,040	0,002	-0,001	0,003	0,020	0,006	0,030	0,009	0,028	0,002
P3	0,010	0,001	0,020	0,003	0,001	0,002	0,014	0,003	0,016	0,006	0,013	-0,003

Tab. 15 Výškové posuny monitorovaných bodů železničního svršku

Tabulka vertikálních posunů [m]						
číslo bodu	E2	E3	E4	E5	E6	E7
	d _H	d _H	d _H	d _H	d _H	d _H
1	0,022	-0,009	0,020	-0,004	-0,031	-0,022
2	0,018	-0,002	0,022	-0,009	-0,027	-0,020
3	0,021		0,023	-0,003	-0,027	-0,016
4	0,014	-0,014	0,013	-0,016	-0,032	-0,023
5	0,015	-0,002	0,016	-0,015	-0,022	-0,019
6	0,016		0,014	-0,005	-0,046	-0,025
7	0,016	-0,004	0,000	-0,030	-0,067	-0,048
8	0,024	-0,005	0,009	-0,020	-0,041	-0,041
9	0,018	-0,004	0,003	-0,016	-0,038	-0,031
10	0,016	0,004	0,013	0,006	-0,023	-0,011
11	0,023	0,003	0,025	0,003	-0,012	-0,009
12	0,015	0,004	0,012	-0,003	-0,012	-0,012
13	0,020	0,004	0,018	-0,001	-0,012	-0,007
14	0,016	0,008	0,020	0,001	-0,005	-0,004
15	0,020		0,012	0,002	-0,008	0,000
16	0,015	0,001	0,009	0,000	-0,012	-0,001
17	0,019	0,016	0,013	0,005	0,000	0,004
18	0,017	0,009	0,014	0,009	0,005	0,008
19	0,017	0,012	0,022	0,004	0,003	0,006
20	0,019	0,023	0,013	0,006	0,002	0,008
21	0,021	0,017	0,008	0,007	0,003	0,009
22	0,015	0,011	0,009	0,007	0,004	0,007
23	0,016	0,012	0,004	0,008	0,007	0,009
24	0,019	0,016	0,006	0,013	0,010	0,014
25	0,018	0,014	0,003	0,011	0,007	0,012
26	0,018	0,015		0,010	0,008	0,013
27	0,015	0,015	0,003	0,013	0,010	0,014
28	0,017	0,018	0,003	0,014	0,011	0,015
29	0,018	0,019	0,003	0,013	0,012	0,016
30	0,015	0,017	0,003	0,013	0,010	0,015
31	0,016	0,017	0,003	0,014	0,013	0,016
32	0,016	0,016	0,003	0,015	0,014	0,016
33	0,016	0,017	0,003	0,015	0,015	0,017
34	0,017	0,018	0,004	0,017	0,016	0,018
35	0,016	0,015	0,003	0,014	0,013	0,016
36	0,018	0,017	0,005	0,017	0,016	0,018
37	0,019	0,019	0,010	0,024	0,022	0,025
38	0,018	0,018	0,007	0,019	0,017	0,020
39	0,014	0,012	0,000	0,007	0,004	0,005
40	0,015	0,011	-0,004	0,001	-0,004	-0,004
41	0,014	0,010	-0,007	-0,005	-0,010	-0,011
42	0,016	0,012	0,000	0,005	0,002	0,004
43	0,018	0,015	0,004	0,008	0,006	0,006
44	0,022	0,018	0,008	0,012	0,011	0,012
45	0,022	0,020	0,008	0,012	0,011	0,014
46	0,021	0,016	0,007	0,010	0,008	0,011
47	0,021	0,013		0,003	0,006	0,006
48	0,020	0,012	0,004	0,004	0,005	0,005
49	0,021	0,011	0,005	0,003	0,003	0,005
50	0,020	0,009	0,004	0,007	0,006	0,006
51	0,014	0,009	0,005	0,003	0,006	0,004
52	0,016	0,010	0,003	0,004	0,003	0,003
53	0,015	0,008	0,004	0,006	0,003	0,001
54	0,010	0,009	0,001	0,000	-0,002	0,000
55	0,011	0,009	0,006	0,004	0,002	0,005
56	0,011	0,004	0,004	0,001	-0,002	0,004
57	0,013	0,007	0,003	0,001	-0,003	0,001
58	0,013	0,008	0,003	-0,002	-0,005	0,001
59	0,013	0,006	0,005	-0,002	-0,005	-0,001
60	0,018	0,012	0,006	0,000	-0,002	0,002
61	0,020	0,010	0,010	0,001	0,001	0,005
62	0,018	0,010	0,008	0,003	-0,002	0,003
63	0,011	0,002	0,005	-0,004	-0,006	-0,001
64			0,000			-0,005
65			-0,001			
66			0,001			
67			0,008			
68			0,000			
69			0,009			
70						

C Tabulky posunů bodů určených GNSS

Prázdné místa v tabulkách značí, že bod nebyl v dané etapě zaměřen, nebo byl z výsledků vyloučen jako omyl či hrubá chyba. Vypočtené posuny jsou vztaženy ke srovnávací etapě E1.

Tab. 16 Posuny monitorovaných bodů železničního svršku v systému n, e, v

Tabulka posunů v systému n, e, v [m]												
číslo bodu	E2		E3		E4		E5		E6		E7	
	dn	de	dn	de	dn	de	dn	de	dn	de	dn	de
1	0,003	-0,008	0,000	-0,014	-0,007	-0,013	0,001	-0,009	-0,004	-0,005	0,004	0,034
2	0,008	-0,015	-0,010	-0,022	-0,003	-0,007	0,007	-0,014	0,003	-0,016	0,015	0,022
3	0,007	-0,004	-0,008	-0,017	0,001	-0,008	0,003	-0,008	-0,009	-0,008	0,005	0,034
4	0,005	0,002	-0,004	-0,017	-0,002	-0,009	0,001	-0,011	-0,006	-0,006	-0,007	-0,016
5	-0,005	-0,001	-0,014	-0,017	-0,008	-0,002	-0,003	-0,007	-0,020	-0,003	-0,014	-0,013
6	-0,001	-0,005	-0,016	-0,021	-0,005	-0,002	-0,003	-0,002	-0,014	-0,004	-0,018	-0,012
7	0,002	0,002	0,004	-0,003	-0,011	0,003	-0,005	0,013	-0,018	0,016	-0,013	0,016
8	0,003	0,006	0,005	-0,005	-0,005	0,002	-0,001	0,008	-0,002	0,007	-0,005	0,011
9	0,007	0,005	-0,016	-0,009	-0,015	0,007	-0,001	0,009	0,001	0,007	-0,007	0,010
10	0,023	0,023	0,051	0,042	0,000	-0,009	0,012	0,025	0,041	0,033	0,045	0,032
11	0,029	0,016	0,054	0,049	-0,004	-0,007	0,026	0,017			0,041	0,030
12	0,028	0,021	0,057	0,050	-0,009	-0,005	0,027	0,022			0,039	0,034
13	0,026	0,023	0,055	0,050	-0,009	-0,003	0,023	0,025			0,032	0,033
14	0,026	0,020	0,045	0,040	0,000	-0,001	0,022	0,022			0,031	0,026
15	0,032	0,014	0,042	0,042	-0,003	0,000	0,025	0,020			0,029	0,027
16	0,029	0,021	0,036	0,039	-0,008	0,002	0,016	0,022	0,030	0,039	0,022	0,029
17	0,024	0,027	0,045	0,039	-0,011	-0,002	0,014	0,019	0,036	0,039		
18	0,029	0,025	0,040	0,034	-0,009	-0,002	0,016	0,018	0,036	0,031	0,023	0,026
19	0,025	0,023	0,032	0,031	-0,010	-0,004	0,011	0,018	0,031	0,030	0,017	0,026
20	0,024	0,023	0,036	0,029	-0,007	0,000	0,010	0,016			0,020	0,023
21	0,025	0,017	0,030	0,021	-0,004	0,000	0,013	0,014	0,030	0,026	0,025	0,016
22	0,014	0,026	0,031	0,028	-0,011	0,004	0,014	0,016	0,021	0,030	0,021	0,018
23	0,019	0,019	0,024	0,022	-0,006	0,000	0,011	0,013	0,025	0,021	0,016	0,020
24	0,013	0,016	0,029	0,019	-0,006	-0,003	0,009	0,009	0,019	0,026	0,015	0,018
25	0,018	0,016	0,020	0,015	-0,008	0,001	0,013	0,012	0,027	0,017	0,014	0,012
26	0,013	0,009	0,016	0,016	-0,015	-0,003	0,008	0,007	0,018	0,020	0,005	0,006
27	0,009	0,011	0,017	0,016	-0,012	-0,004	0,010	0,007	0,014	0,017	0,010	0,009
28	0,006	0,010	0,020	0,017	-0,013	-0,005	0,005	0,008	0,012	0,013	0,010	0,007
29	0,008	0,008	0,015	0,009	-0,004	-0,006	0,009	0,004	0,021	0,006	0,014	0,004
30	0,013	0,013	0,010	0,013	-0,009	-0,007	0,002	0,004	0,006	0,015	0,014	0,004
31	0,006	0,006	0,008	0,011	-0,010	-0,001	0,003	0,003	0,008	0,011	0,015	0,008
32	0,007	0,007	0,013	0,010	-0,011	-0,004	0,005	0,001	0,016	0,011	0,011	0,004
33	0,001	0,009	0,003	0,009	-0,015	-0,003	0,003	0,003	0,008	0,011	0,007	0,006
34	0,003	0,009	0,001	0,008	0,000	0,002	0,004	0,004	0,008	0,011	0,004	0,000
35	0,003	0,004	-0,002	0,003	-0,003	0,001	0,004	0,000	0,009	0,000	0,000	-0,005
36	0,006	-0,001	0,003	0,003	0,006	0,002	0,008	-0,003	0,000	0,002	0,005	-0,006
37	-0,002	0,005	-0,010	-0,002	-0,007	0,003	-0,003	-0,001	-0,011	0,001	-0,008	-0,003
38	-0,001	0,022	-0,010	0,012	-0,003	0,014	0,000	0,014	-0,003	0,013	0,000	0,011
39	-0,007	0,018	-0,009	0,006	-0,009	-0,001	-0,002	0,009	-0,005	0,005	-0,018	-0,001
40	-0,005	0,007	-0,011	-0,013	-0,005	0,004	0,005	0,002	0,003	0,002	-0,004	-0,006
41	-0,003	0,007	0,006	0,028	-0,005	0,006	0,007	0,000	0,001	0,001	-0,008	-0,008
42	0,005	0,018	0,009	0,020	-0,016	0,014	0,005	0,018	0,006	0,031	0,003	0,018
43	0,002	0,021	-0,001	0,010	-0,011	0,014	0,005	0,017	0,003	0,030	0,000	0,016
44	-0,005	0,018	-0,008	0,014	-0,009	0,018	-0,003	0,018	0,004	0,030	-0,007	0,012
45	-0,005	0,016	-0,002	0,024	-0,006	0,010	-0,002	0,016	0,003	0,022	-0,013	0,013
46	-0,005	0,016	0,005	0,019	-0,008	0,010	-0,006	0,016	-0,001	0,019	-0,008	0,011
47	0,001	0,009	0,004	0,013	-0,006	0,008	-0,009	0,014	-0,001	0,018	-0,005	0,011
48	-0,002	0,011	-0,005	0,018	-0,010	0,009	-0,009	0,014	-0,004	0,016	-0,004	0,015
49	0,005	0,010	-0,003	0,020	-0,008	0,009	-0,004	0,014	-0,003	0,012	-0,003	0,011
50	0,005	0,005	0,002	0,016	0,002	0,001	0,004	0,007	0,013	0,012	0,007	0,005
51	0,005	0,002	0,002	0,002	0,003	-0,004	0,007	0,001	0,002	0,004	0,004	-0,005
52	0,008	0,006	0,001	0,004	-0,002	0,002	-0,002	0,002	0,000	0,006	-0,005	-0,004
53	0,007	0,006	0,001	0,000	-0,001	0,005	-0,001	0,003	-0,002	0,007	-0,002	-0,002
54	0,004	0,003	0,004	-0,003	-0,002	0,003	0,000	-0,001	0,006	0,002	-0,003	-0,005
55	0,005	0,002	0,033	-0,011	0,000	-0,002	-0,001	-0,004	0,004	-0,001	-0,005	-0,003
56	-0,003	0,004	0,008	-0,006	-0,006	0,000	-0,002	0,000	0,007	0,002	-0,003	-0,006
57	0,009	0,003	0,005	-0,001	0,001	-0,004	0,002	0,000	0,009	0,000	0,000	-0,004
58	0,005	0,002	0,004	-0,005	-0,001	0,000	0,002	-0,002	0,003	0,001	0,001	-0,006
59	0,008	0,003	0,001	-0,001	0,000	-0,006	0,001	-0,003	0,004	0,001	0,003	-0,010
60	0,009	0,002	0,009	-0,007	0,002	-0,003	0,003	-0,005	0,006	0,001	0,001	-0,005
61	0,013	0,009	0,028	-0,005	0,004	-0,002	0,007	-0,001	0,009	0,004	0,001	-0,009
62	0,005	0,005	-0,021	0,003	-0,002	0,002	-0,001	0,004	-0,002	0,000	-0,005	-0,005
63	0,012	0,007	0,022	-0,013	-0,002	-0,003	0,001	-0,002	0,000	-0,002	-0,004	-0,005
64	0,010	0,008	0,009	-0,004	-0,002	0,000	0,000	-0,002	0,001	0,002	-0,006	-0,004
65	0,008	0,005	0,007	-0,003	-0,002	0,001	-0,001	-0,002	0,001	0,007	-0,010	-0,001
66	0,008	0,003	0,004	0,002	-0,007	0,002	0,000	-0,002	0,002	0,007	-0,010	-0,007
67	0,014	0,002	0,005	0,004	0,002	-0,002	0,005	0,003	0,013	0,006	-0,003	-0,003
68	0,007	0,007	0,002	0,001	0,000	0,010	0,007	0,005	0,003	0,008	-0,005	0,005
69	-0,001	0,000	-0,001	0,001	-0,006	0,005	0,001	0,006	0,000	0,006	-0,007	-0,001
70	0,002	0,006	-0,003	0,001	-0,010	0,008	-0,003	0,003	0,000	0,005	-0,010	-0,002
71	0,007	0,007	0,010	-0,004	-0,006	0,000	0,000	0,005	0,005	0,008	-0,007	-0,009

Tab. 17 Příčné a podélné posuny monitorovaných bodů železničního svršku

Tabulka posunů v podélném a příčném směru [m]													
číslo bodu	E2		E3		E4		E5		E6		E7		
	ds	dq	ds	dq	ds	dq	ds	dq	ds	dq	ds	dq	
1	-0,003	-0,008	-0,010	-0,010	-0,014	-0,005	-0,005	-0,007	-0,007	-0,001	0,027	0,022	
2	-0,005	-0,016	-0,022	-0,009	-0,007	-0,003	-0,005	-0,015	-0,009	-0,014	0,026	0,005	
3	0,002	-0,008	-0,017	-0,007	-0,005	-0,007	-0,004	-0,008	-0,012	0,000	0,027	0,021	
4	0,005	-0,002	-0,015	-0,010	-0,008	-0,005	-0,007	-0,008	-0,009	0,000	-0,016	-0,006	
5	-0,005	0,003	-0,022	-0,002	-0,007	0,004	-0,007	-0,003	-0,016	0,012	-0,019	0,001	
6	-0,004	-0,002	-0,026	-0,004	-0,005	0,002	-0,004	0,001	-0,013	0,007	-0,021	0,004	
7	0,002	0,000	0,001	-0,005	-0,005	0,010	0,006	0,013	-0,002	0,025	0,002	0,020	
8	0,006	0,002	0,000	-0,007	-0,002	0,005	0,005	0,007	0,004	0,007	0,004	0,011	
9	0,008	-0,002	-0,018	0,004	-0,006	0,015	0,005	0,008	0,006	0,004	0,002	0,012	
10	0,032	0,000	0,066	-0,005	-0,006	-0,006	0,026	0,009	0,052	-0,006	0,054	-0,009	
11	0,032	-0,009	0,073	-0,003	-0,008	-0,002	0,031	-0,007			0,050	-0,007	
12	0,035	-0,004	0,075	-0,004	-0,009	0,003	0,035	-0,003			0,052	-0,003	
13	0,035	-0,001	0,074	-0,003	-0,008	0,004	0,034	0,002			0,046	0,002	
14	0,033	-0,004	0,060	-0,003	0,000	-0,001	0,031	0,000			0,041	-0,003	
15	0,033	-0,012	0,059	0,001	-0,002	0,002	0,032	-0,003			0,039	-0,001	
16	0,035	-0,005	0,053	0,002	-0,004	0,007	0,026	0,004	0,048	0,007	0,036	0,005	
17	0,036	0,003	0,059	-0,004	-0,010	0,006	0,023	0,004	0,053	0,003			
18	0,038	-0,002	0,053	-0,004	-0,008	0,004	0,024	0,002	0,047	-0,004	0,035	0,002	
19	0,034	-0,001	0,044	0,000	-0,010	0,005	0,020	0,005	0,043	-0,001	0,030	0,007	
20	0,033	0,000	0,046	-0,005	-0,005	0,005	0,018	0,005			0,030	0,003	
21	0,030	-0,006	0,036	-0,005	-0,003	0,002	0,019	0,001	0,040	-0,002	0,029	-0,006	
22	0,029	0,009	0,042	-0,002	-0,005	0,010	0,022	0,002	0,036	0,006	0,028	-0,002	
23	0,027	0,000	0,032	-0,001	-0,005	0,004	0,017	0,002	0,033	-0,002	0,026	0,003	
24	0,020	0,003	0,034	-0,006	-0,006	0,002	0,013	0,000	0,032	0,005	0,024	0,002	
25	0,024	-0,001	0,024	-0,003	-0,005	0,006	0,018	-0,001	0,031	-0,007	0,019	-0,001	
26	0,016	-0,003	0,023	0,000	-0,012	0,008	0,011	-0,001	0,027	0,002	0,008	0,000	
27	0,014	0,001	0,023	-0,001	-0,011	0,006	0,012	-0,002	0,022	0,002	0,013	-0,001	
28	0,011	0,003	0,026	-0,002	-0,012	0,005	0,009	0,002	0,018	0,001	0,013	-0,002	
29	0,011	0,000	0,018	-0,004	-0,007	-0,002	0,009	-0,003	0,019	-0,010	0,012	-0,007	
30	0,018	0,001	0,016	0,002	-0,012	0,001	0,004	0,001	0,014	0,007	0,013	-0,007	
31	0,009	0,000	0,013	0,002	-0,008	0,006	0,004	0,000	0,013	0,002	0,017	-0,004	
32	0,009	0,000	0,016	-0,002	-0,011	0,005	0,004	-0,002	0,019	-0,004	0,010	-0,005	
33	0,008	0,006	0,008	0,005	-0,013	0,008	0,004	0,001	0,013	0,002	0,009	0,000	
34	0,008	0,004	0,006	0,005	0,002	0,001	0,006	0,000	0,013	0,002	0,003	-0,003	
35	0,005	0,001	0,001	0,004	-0,002	0,003	0,003	-0,003	0,006	-0,006	-0,003	-0,003	
36	0,004	-0,005	0,004	-0,001	0,006	-0,002	0,004	-0,008	0,002	0,001	-0,001	-0,008	
37	0,002	0,005	-0,009	0,006	-0,003	0,007	-0,003	0,002	-0,007	0,009	-0,008	0,003	
38	0,015	0,016	0,001	0,015	0,008	0,012	0,010	0,010	0,007	0,012	0,008	0,008	
39	0,008	0,018	-0,003	0,010	-0,007	0,005	0,005	0,008	0,000	0,007	-0,013	0,012	
40	0,001	0,008	-0,017	-0,001	-0,001	0,006	0,005	-0,002	0,004	0,000	-0,007	-0,001	
41	0,002	0,007	0,024	0,016	0,000	0,008	0,004	-0,005	0,001	0,000	-0,012	0,000	
42	0,016	0,009	0,020	0,008	-0,002	0,021	0,017	0,010	0,026	0,018	0,015	0,011	
43	0,016	0,014	0,006	0,008	0,002	0,018	0,015	0,009	0,023	0,019	0,011	0,012	
44	0,009	0,017	0,004	0,016	0,006	0,019	0,010	0,015	0,023	0,019	0,003	0,013	
45	0,007	0,015	0,015	0,019	0,002	0,011	0,009	0,013	0,017	0,014	-0,001	0,019	
46	0,007	0,015	0,016	0,010	0,001	0,013	0,006	0,016	0,012	0,015	0,002	0,013	
47	0,006	0,006	0,012	0,008	0,001	0,011	0,002	0,016	0,011	0,015	0,003	0,012	
48	0,006	0,010	0,008	0,017	-0,002	0,013	0,003	0,016	0,007	0,014	0,007	0,013	
49	0,010	0,004	0,011	0,018	0,000	0,012	0,005	0,013	0,006	0,011	0,004	0,010	
50	0,007	0,001	0,012	0,012	0,002	-0,001	0,007	0,003	0,018	0,001	0,009	0,000	
51	0,005	-0,002	0,003	0,000	0,000	-0,005	0,006	-0,003	0,004	0,001	0,000	-0,006	
52	0,010	0,000	0,003	0,002	-0,001	0,002	-0,001	0,002	0,003	0,005	-0,007	0,000	
53	0,009	0,001	0,000	0,000	0,001	0,005	0,001	0,003	0,002	0,007	-0,003	-0,001	
54	0,005	0,000	0,002	-0,004	0,000	0,003	-0,001	0,000	0,006	-0,002	-0,006	-0,003	
55	0,006	-0,001	0,022	-0,027	-0,001	-0,001	-0,003	-0,002	0,003	-0,003	-0,006	0,000	
56	-0,001	0,005	0,004	-0,009	-0,005	0,003	-0,002	0,001	0,007	-0,002	-0,005	-0,003	
57	0,009	-0,002	0,004	-0,004	-0,001	-0,004	0,002	-0,001	0,008	-0,004	-0,002	-0,004	
58	0,005	0,000	0,001	-0,007	-0,001	0,001	0,001	-0,002	0,003	-0,001	-0,002	-0,006	
59	0,008	-0,001	0,000	-0,001	-0,003	-0,005	0,000	-0,004	0,004	-0,001	-0,002	-0,010	
60	0,009	-0,002	0,005	-0,010	0,001	-0,004	0,001	-0,006	0,005	-0,002	-0,001	-0,005	
61	0,016	0,002	0,023	-0,016	0,003	-0,004	0,006	-0,004	0,010	0,000	-0,003	-0,009	
62	0,007	0,003	-0,018	0,012	-0,001	0,003	0,000	0,004	-0,002	0,001	-0,007	-0,003	
63	0,014	0,002	0,015	-0,020	-0,003	-0,002	0,000	-0,002	-0,001	-0,002	-0,005	-0,003	
64	0,012	0,004	0,007	-0,007	-0,002	0,001	-0,001	-0,001	0,002	0,002	-0,007	-0,002	
65	0,009	0,002	0,006	-0,006	-0,002	0,002	-0,002	-0,002	0,004	0,006	-0,010	0,003	
66	0,008	0,000	0,005	0,001	-0,005	0,005	-0,001	-0,002	0,005	0,006	-0,012	-0,003	
67	0,014	-0,002	0,006	0,003	0,001	-0,003	0,006	0,001	0,014	0,002	-0,003	-0,002	
68	0,009	0,004	0,003	0,001	0,003	0,010	0,008	0,003	0,005	0,007	-0,003	0,006	
69	-0,001	0,000	0,000	0,001	-0,004	0,007	0,002	0,005	0,002	0,005	-0,007	0,001	
70	0,004	0,005	-0,003	0,002	-0,008	0,011	-0,002	0,004	0,001	0,005	-0,010	0,001	
71	0,008	0,006	0,009	-0,006	-0,006	0,001	0,001	0,004	0,007	0,006	-0,009	-0,007	

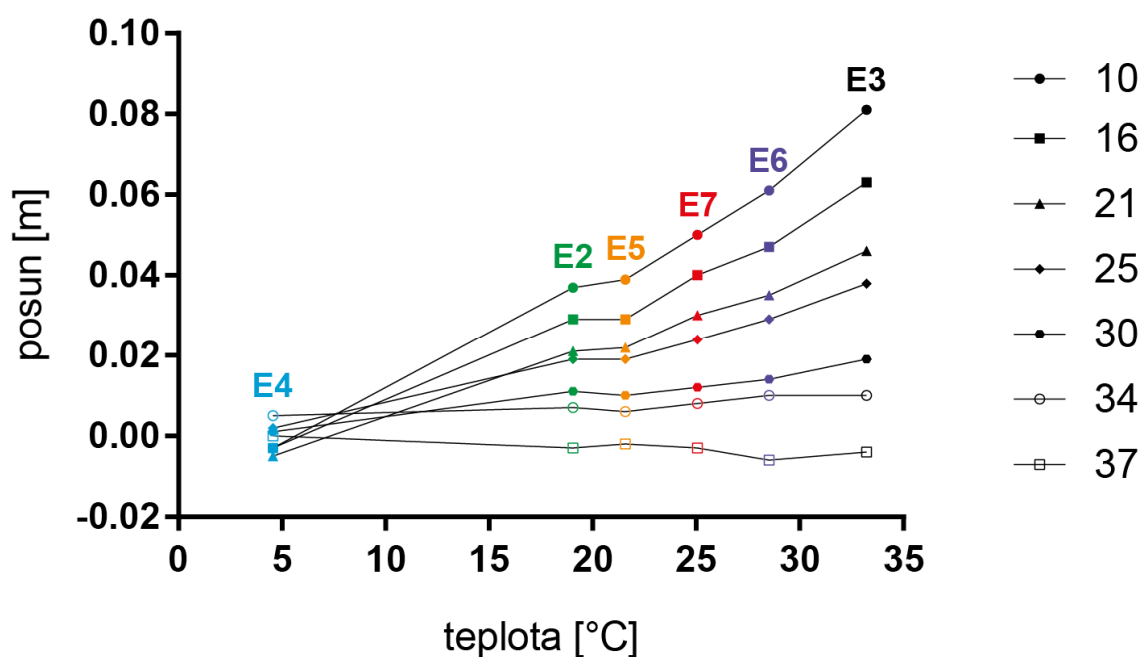
Tab. 18 Výškové posuny monitorovaných bodů železničního svršku

Tabulka vertikálních posunů [m]						
číslo bodu	E2	E3	E4	E5	E6	E7
	d _H	d _H	d _H	d _H	d _H	d _H
1	-0,010	-0,009	-0,008	-0,011	-0,008	-0,024
2	-0,003	0,007	0,007	-0,011	-0,014	-0,034
3	-0,008	0,000	-0,031	-0,019	-0,019	-0,026
4	-0,006	-0,006	-0,017	-0,014	-0,014	-0,016
5	-0,011	-0,004	-0,008	-0,014	-0,015	-0,012
6	-0,011	0,002	-0,011	-0,025	-0,014	-0,025
7	-0,004	0,001	-0,030	-0,037	-0,036	-0,034
8	0,006	0,020	-0,026	-0,035	-0,026	-0,034
9	-0,004	0,012	-0,028	-0,019	-0,027	-0,016
10	-0,005	-0,024	-0,014	-0,011	-0,024	-0,017
11	-0,006	-0,006	-0,002	-0,014	-0,018	0,000
12	-0,008	-0,014	-0,010	-0,006	-0,009	-0,006
13	0,001	0,006	-0,002	-0,002		0,009
14	0,004	-0,006	0,006	0,002		0,001
15	-0,001	0,001	0,002	-0,009		-0,001
16	-0,016	0,008	-0,016	-0,012	0,004	-0,004
17	-0,013	-0,011	-0,020	-0,016	-0,004	
18	-0,009	-0,010	-0,012	-0,006	-0,002	0,016
19	-0,003	-0,009	-0,003	-0,006	0,000	-0,001
20	-0,009	-0,009	-0,012	-0,015		0,001
21	-0,003	-0,015	-0,006	-0,006	0,000	0,005
22	0,011	0,006	-0,003	-0,002	-0,001	0,002
23	0,007	0,007	0,002	-0,005	-0,007	0,001
24	0,003	0,005	-0,005	-0,007	-0,015	0,009
25	-0,003	-0,006	-0,012	-0,004	-0,014	-0,005
26	-0,001	-0,008	-0,010	0,000	0,003	-0,005
27	-0,019	-0,024	-0,028	-0,012	-0,006	-0,021
28	-0,005	0,006	-0,027	-0,006	-0,006	-0,013
29	-0,007	-0,005	-0,012	-0,009	-0,014	-0,013
30	-0,010	-0,006	-0,009	-0,008	0,007	-0,003
31	0,000	-0,007	-0,007	-0,004	0,006	0,001
32	-0,005	-0,015	-0,017	-0,016	-0,007	-0,007
33	-0,002	-0,010	-0,033	-0,015	-0,008	-0,008
34	0,010	-0,005	0,006	-0,012	-0,017	-0,003
35	0,006	-0,007	-0,017	-0,008	-0,008	-0,004
36	0,001	0,007	0,011	-0,008	0,005	-0,006
37	0,004	0,005	0,009	0,000	0,001	-0,003
38	-0,002	-0,012	-0,015	-0,014	-0,008	-0,017
39	-0,005	0,011	-0,027	-0,015	-0,029	-0,023
40	-0,012	0,043	-0,021	-0,022	-0,031	-0,028
41	-0,013	-0,036	-0,022	-0,030	-0,035	-0,040
42	-0,012	0,004	-0,022	-0,021	-0,031	-0,029
43	-0,008	0,031	-0,019	-0,023	-0,023	-0,025
44	-0,005	0,041	-0,002	-0,011	-0,009	-0,018
45	-0,009	0,019	-0,012	-0,013	-0,009	-0,006
46	-0,005	0,007	-0,016	-0,012	-0,017	-0,011
47	-0,005	0,005	-0,018	-0,009	-0,015	-0,018
48	0,000	0,007	-0,008	-0,007	-0,019	-0,021
49	0,013	0,037	-0,009	-0,006	-0,026	-0,017
50	-0,002	0,032	-0,021	-0,010	-0,011	-0,022
51	0,000	0,003	-0,014	-0,016	-0,023	-0,012
52	0,015	0,007	-0,007	-0,003	-0,011	-0,019
53	0,013	-0,006	-0,005	-0,004	-0,013	-0,019
54	0,009	-0,016	-0,004	0,007	-0,012	-0,009
55	0,014	-0,013	-0,010	0,004	-0,018	0,000
56	0,006	-0,020	-0,008	-0,009	-0,006	-0,023
57	0,003	-0,003	-0,009	-0,008	-0,013	-0,017
58	0,004	-0,013	-0,007	-0,012	-0,017	-0,016
59	-0,001	-0,002	-0,009	-0,009	-0,015	-0,029
60	-0,013	-0,014	-0,018	-0,007	-0,023	-0,033
61	-0,011	0,003	-0,015	-0,018	-0,010	-0,028
62	-0,008	-0,010	-0,006	-0,011	-0,028	-0,014
63	-0,011	-0,038	-0,016	-0,006	-0,017	-0,005
64	-0,005	-0,011	0,003	-0,013	-0,011	-0,006
65	-0,007	-0,001	-0,002	-0,005	0,010	0,006
66	0,001	-0,001	0,014	-0,003	0,003	-0,003
67	-0,002	0,004	0,013	-0,001	0,011	0,004
68	-0,005	-0,025	0,012	-0,001	-0,016	0,005
69	0,003	-0,008	0,018	-0,002	0,003	0,004
70	0,010	0,009	0,025	-0,008	0,029	0,011
71	0,010	-0,002	0,015	0,011	0,025	-0,010

D Grafické znázornění posunů

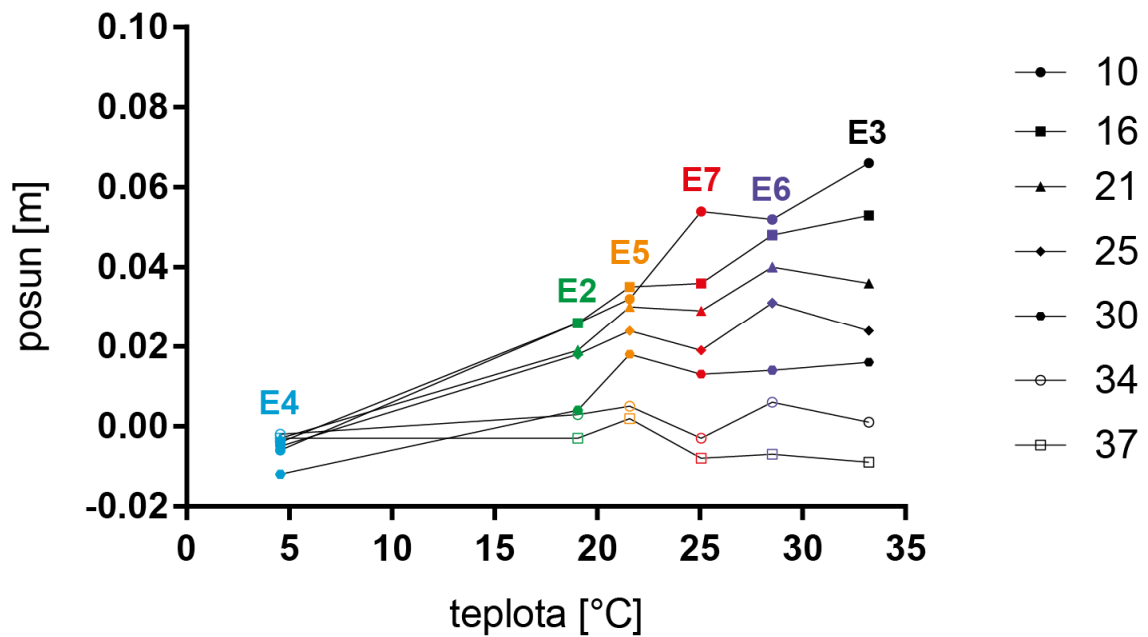
V následujícím obrázku je zobrazen graf teplotní roztažností pro vybrané body na železničním svršku mezi dilatačními zařízeními. Posuny jsou vztaženy k první etapě, která byla měřena při průměrné teplotě 7,19 °C. Všechny ostatní etapy, s výjimkou čtvrté, byly měřeny při vyšší teplotě, a proto můžeme z grafu sledovat roztažnost železničního svršku.

Body jsou seřazeny sestupně od nejvzdálenějšího bodu od šatovské opěry směrem ke znojemské opěře, na které jsou posuvná ložiska mostu.



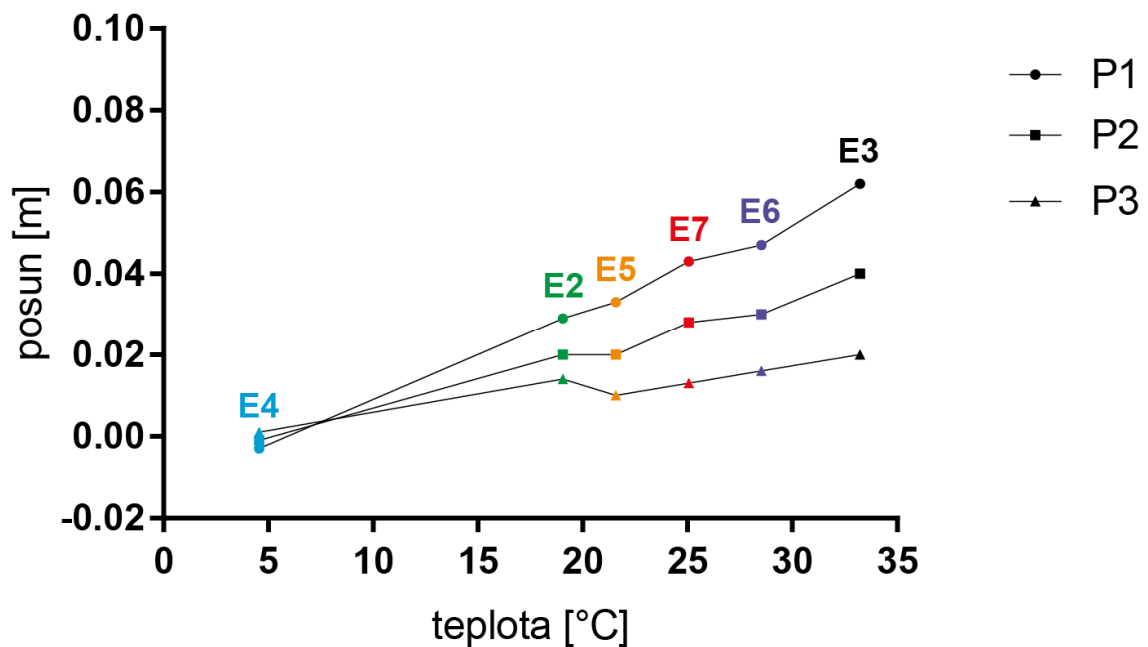
Obr. 6 Grafické znázornění závislosti na teplotě pro vybrané body, data měřená polární metodou

Další graf znázorňuje stejnou situaci jako předchozí, ale data jsou získaná satelitním měřením. Jak je z porovnání obou grafů vidět, můžeme sledovat podobný trend vývoje podélných posunů.

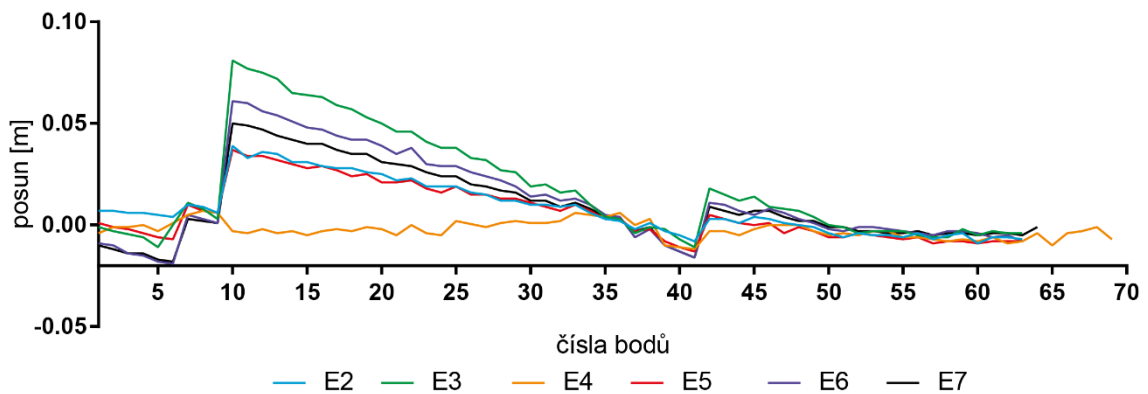


Obr. 7 Grafické znázornění závislosti na teplotě pro vybrané body, data měřená metodou GNSS

Na dalším grafu jsou zobrazeny podélné posuny bodů na mostní konstrukci.

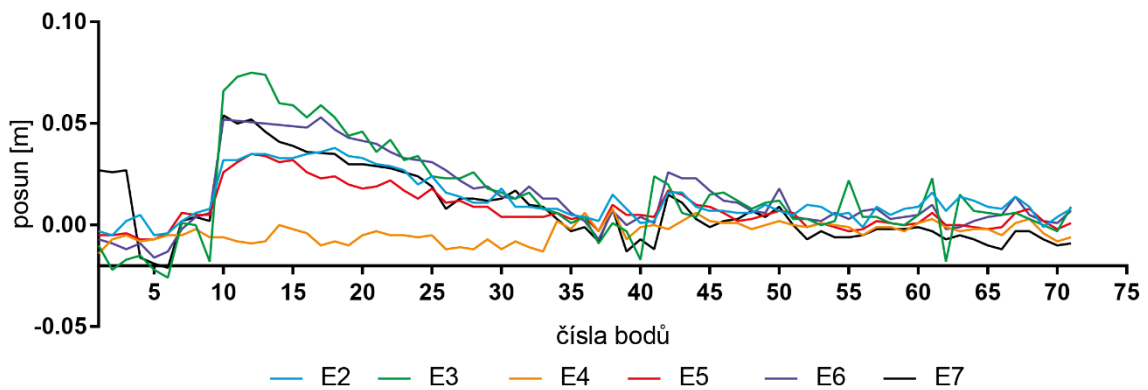


Obr. 8 Grafické znázornění závislosti na teplotě pro body mostní konstrukce P1, P2, P3

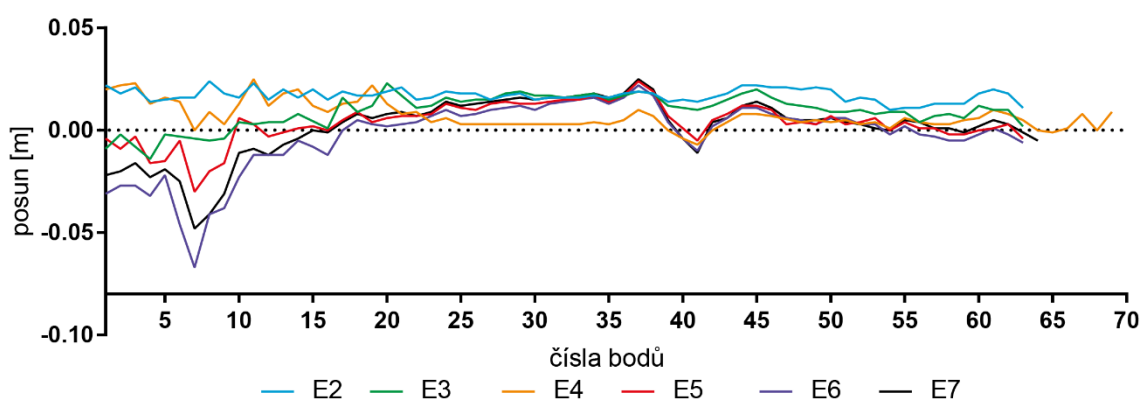


Obr. 9 Grafické znázornění průběhu podélných posunů měřených polární metodou

Mezi body 10–6 a 38–42 jsou umístěna dilatační zařízení.



Obr. 10 Grafické znázornění průběhu podélných posunů měřených metodou GNSS



Obr. 11 Grafické znázornění výškových posunů určených prostorovou polární metodou

Mostní konstrukce je mezi body 11–36.