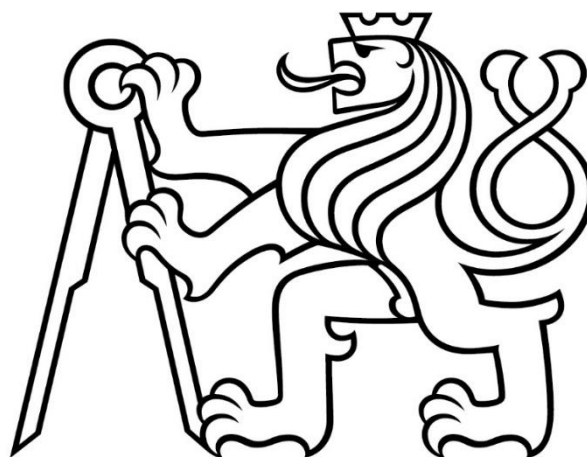


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA SPECIÁLNÍ GEODÉZIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

TESTOVÁNÍ ABSOLUTNÍ PŘESNOSTI GNSS RTK MĚŘENÍ

TESTING THE ABSOLUTE ACCURACY OF GNSS RTK MEASUREMENTS

STUDIJNÍ PROGRAM: GEODÉZIE A KARTOGRAFIE
AUTOR PRÁCE: ANNA CHRBOLOKOVÁ
VEDOUCÍ PRÁCE: PROF. ING. MARTIN ŠTRONER, PH.D.

PRAHA 2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Chrbolková Jméno: Anna Osobní číslo: 494996

Zadávající katedra: Katedra speciální geodézie

Studijní program: (B36GK) Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie a kartografie

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Testování absolutní přesnosti GNSS RTK měření

Název bakalářské práce anglicky: Testing the absolute accuracy of GNSS RTK measurements

Pokyny pro vypracování:

Navrhnete a realizujete test absolutní přesnosti GNSS RTK měření. Test zaměřte také na porovnání přesnosti staršího a současného přijímače a vývoj přesnosti v závislosti na observačních podmínkách.

Seznam doporučené literatury:

Hampacher, M. - Štroner, M.: Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. 2. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2015. 336 s. ISBN 978-80-01-05843-5.

Jméno vedoucího bakalářské práce: prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 14.2.2022

Termín odevzdání BP v IS KOS: 15. 5. 2021

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

14.2.2022

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

ABSTRAKT

Předmětem bakalářské práce je testování absolutní přesnosti GNSS RTK měření. Experimentálně byla porovnána starší a novější GNSS aparatura celkem třemi navrženými testy zaměřující se na změnu přesnosti vlivem zakrytého obzoru, délky měřeného časového úseku a na vzájemné porovnání mezi sebou. Prakticky byla provedena opakovaná měření na bodech s absolutními souřadnicemi. Naměřená data byla vyhodnocena pomocí výběrových směrodatných odchylek v poloze a výšce formou tabulek a grafů. Závěrem jsou výsledky analyzovány, okomentovány a doplněny o porovnání s garantovanými přesnostmi od výrobce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Geodézie, GNSS, RTK, statická metoda, Trimble GeoXR, Trimble R12i, testování, přesnost, výběrová směrodatná odchylka, Trimble Business Center, GROMA

ABSTRACT

The subject matter of this bachelor thesis is testing the absolute accuracy of GNSS RTK measurements. Older and newer GNSS devices has been experimentally tested by three proposed tests focusing on accuracy due to the obscured horizon, the measured time period and comparison of the devices between themselves. Measurements were repeated on points with absolute coordinates. The measured data were evaluated by standard deviation in position and elevation in form of tables and graphs. The results were analysed, commented, and compared with guaranteed accuracy provided by producer.

KEY WORDS

Geodesy, GNSS, RTK, static method, Trimble GeoXR, Trimble R12i, testing, accuracy, standard deviation, Trimble Business Center, GROMA

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci s názvem *Testování absolutní přesnosti GNSS RTK měření* vypracovala samostatně, s výjimkou odborných konzultací s vedoucím práce a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Praze dne 16.5.2022

Anna Chrbolková

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat panu prof. Ing. Martinovi Štronerovi, Ph.D. za jeho vedení, odbornou pomoc, energii strávenou konzultacemi a čas, který mi věnoval. Dále bych ráda poděkovala firmě GEOTRONICS Praha, s.r.o. za vypůjčení testovaného GNSS přístroje Trimble R12i, které bylo předmětem testování. V neposlední řadě bych ráda poděkovala zejména své rodině a příteli za jejich oporu během studia.



OBSAH

1	ÚVOD	8
2	GLOBÁLNÍ NAVIGAČNÍ SATELITNÍ SYSTÉM	9
2.1	METODY MĚŘENÍ GNSS	10
2.1.1	STATICKÁ METODA	10
2.1.2	RYCHLÁ STATICKÁ METODA	10
2.1.3	METODA STOP AND GO	10
2.1.4	KINEMATICKÁ METODA	11
2.1.5	METODA RTK	11
2.2	PRAMENY CHYB OVLIVŇUJÍCÍ PŘESNOST SYSTÉMU GNSS	11
3	NÁVRH EXPERIMENTU	12
3.1	TESTOVÁNÍ VLIVU ZAKRYTÉHO OBZORU	12
3.2	TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI V KRÁTKÉM A DLOUHÉM ČASOVÉM ÚSEKU	13
3.3	TESTOVÁNÍ STARŠÍ A NOVĚJŠÍ GNSS APARATURY	13
3.4	NÁVRH PROVEDENÍ ZAMĚŘENÍ	13
4	PROVEDENÍ EXPERIMENTU	14
4.1	BODOVÉ POLE – STATICKÁ METODA	14
4.1.1	PŘÍSTROJE A POMŮCKY	14
4.1.2	PŘÍPRAVNÉ PRÁCE	15
4.1.3	MĚŘENÍ	16
4.1.4	ZPRACOVÁNÍ STATICKÉ METODY	17
4.2	TESTOVACÍ BODY	19
4.2.1	PŘÍSTROJE A POMŮCKY	19
4.2.2	PŘÍPRAVNÉ PRÁCE	20
4.2.3	MĚŘENÍ	20
4.2.4	VÝPOČET SOUŘADNIC TESTOVACÍCH BODŮ	21
4.3	GNSSAP1: TRIMBLE GEOXR	23
4.3.1	PŘÍSTROJE A POMŮCKY	23
4.3.2	MĚŘENÍ	23
4.4	GNSSAP2: TRIMBLE R12I	24
4.4.1	PŘÍSTROJE A POMŮCKY	24
4.4.2	MĚŘENÍ	25
5	ZPRACOVÁNÍ RTK MĚŘENÍ	26
5.1	VÝBĚROVÉ SMĚRODATNÉ ODCHYLKY	26
5.2	STUDENTOVO ROZDĚLENÍ	27



5.3	ZÁVĚREČNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	27
6	VÝSLEDKY EXPERIMENTU	28
6.1	TESTOVÁNÍ VLIVU ZAKRYTÉHO OBZORU	28
6.2	TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI V KRÁTKÉM A DLOUHÉM ČASOVÉM ÚSEKU	30
6.2.1	<i>VLIV DÉLKY MĚŘENÉHO ČASOVÉHO INTERVALU</i>	<i>30</i>
6.2.2	<i>VLIV DENNÍ DOBY.....</i>	<i>33</i>
6.2.3	<i>PRŮBĚH SM.O. V ČASE</i>	<i>35</i>
6.3	TESTOVÁNÍ STARŠÍ A NOVĚJŠÍ GNSS APARATURY.....	35
6.4	POROVNÁNÍ GARANTOVANÝCH A DOSAŽENÝCH PŘESNOSTÍ	36
7	ZÁVĚR	37
8	POUŽITÉ ZKRATKY	39
9	SEZNAM TABULEK	39
10	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	40
11	SEZNAM GRAFŮ.....	40
12	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	41
13	SEZNAM PŘÍLOH	42
14	SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH	42



1 ÚVOD

GNSS technologie nacházejí s postupem času čím dál větší uplatnění v široké škále oborů. Přední postavení zastávají především v geodézii, kde se staly běžným prostředkem měření, a to všemi možnými nabízenými způsoby. Nejpoužívanější je právě metoda RTK pro její jednoduchost, rychlé výsledky, snadné zpracování, a především kvůli měření a vytyčování v reálném čase. Nicméně výrobci přicházejí neustále s inovacemi a jejich rozmanitost nám dává větší možnost výběru než například před 10 lety. Hlavním aspektem pro výběr je, mimo ceny a uživatelského komfortu, vysoká přesnost měřicí aparatury. Ta je ale ovlivněna mnoha faktory, kvůli kterým jsou výsledky měření spíše odhady skutečných hodnot s určitou přesností.

Snahou práce je zjištění absolutních přesností GNSS RTK měření pro dvě zvolené GNSS aparatury, konkrétně Trimble GeoXR a Trimble R12i. První část je spíše teoretická s uvedením do GNSS problematiky. Druhá hlavní část práce je zaměřena na samotný experiment, jeho představení, provedení a vyhodnocení. Navrženy byly celkem tři testy zaměřující se na změnu přesnosti vlivem zakrytého obzoru, délky měřeného časového úseku a na vzájemné porovnání aparatur mezi sebou. Princip postupu spočívá v opakovaném měření na bodech o absolutních souřadnicích. Dosahované výsledky jsou prezentovány výběrovými směrodatnými odchylkami ve formě přehledných tabulek a grafů. Součástí práce je také srovnání přesností získaných měření s přesnostmi garantovanými výrobcem. Měření je provedeno v souřadnicovém systému S-JTSK a výškovém Bpv.

2 GLOBÁLNÍ NAVIGAČNÍ SATELITNÍ SYSTÉM

Global Navigation Satellite System, neboli GNSS, je společný název pro všechny navigační systémy. Tato technologie je známa již od 70. let minulého století (1973), kdy byl světu představen první satelitní americký armádní systém NAVSTAR GPS. Postupem času zůstal princip zachován s výjimkou technického vylepšení. Mezi nejznámější satelitní systémy patří již zmíněný americký GPS, ruský GLONASS, evropský Galileo, čínský BeiDou, japonský QZSS a indický regionální IRNSS.

Jedná se o pasivní dálkoměrný systém. Družice vysílá navigační zprávu ve formě radiových vln a přijímač je pouze přijímá. Nesená zpráva obsahuje mimo jiné označení družice, její aktuální polohu a čas vyslání signálu. Poloha přijímače je určena z jejich vzájemné vzdálenosti, resp. ze vzdáleností k nejméně čtyřem družicím, která je ovlivněna chybami hodin družice a přijímače, proto mluvíme o pseudovzdálenosti. Je-li vzdálenost určena z rozdílu času vyslání signálu družicí a jeho přijetím přijímačem, mluvíme o kódovém měření. Je-li z rozdílu fáze přijatého signálu a signálu v čase vyslání družicí, pak mluvíme o fázovém měření.

U kódového měření je předmětem určení pseudovzdálenosti tranzitní čas. Přesnost tohoto typu diferenciálního měření se pohybuje v řádech decimetrů až metrů. Z tzv. dálkoměrného kódu je znám čas vyslání signálu, jeho porovnáním s časem přijetí získáme časový rozdíl dt . Spolu se znalostí rychlosti šíření signálu c lze vypočítat pseudovzdálenost dle jednoduchého vztahu (2.1).

$$d = c \cdot dt \quad (2.1)$$

U fázového měření se zpracovává demodulovaná dopplerovksy posunutá nosná vlna, kdy je známa vlnová délka λ a měřený fázový posun $d\varphi$. Neznámou je tzv. ambiguita. Jedná se o celočíselný počet vlnových délek nosné vlny mezi přijímačem a družicí. Výsledná pseudovzdálenost se vypočte ze vztahu (2.2). Přesnost je výrazně vyšší, v řádech centimetrů či dokonce milimetrů.

$$d = N \lambda + d\varphi \quad (2.2)$$

Pro určení polohy přijímače je zapotřebí přijmout signál alespoň od čtyř družic. Z geodetického hlediska mluvíme o prostorovém protínání z délek. Teoreticky by stačily družice tři, ale výsledná poloha by vlivem nepřesného chodu hodin přijímače byla velmi orientační. K určení oprav hodin je potřeba družice čtvrtá. Faktory ovlivňující výslednou přesnost jsou popsány níže v kapitole 2.2.



2.1 METODY MĚŘENÍ GNSS

Metody měření lze rozdělit podle různých aspektů. Základní dělení je dle způsobu získání výsledných souřadnic – metoda postprocesní nebo v reálném čase. U postprocesní metody jsou data registrována během měření a výsledky se získají dodatečně. Metoda měření v reálném čase, jinak známá jako RTK, spočívá v získání výsledků ihned při měření. V současné době je v praktické geodézii nejvíce využívána právě RTK metoda, která umožňuje měření i okamžité vytyčení.

Geodetická měření se konají diferenciálním způsobem, kdy je současně měřeno nejméně dvěma přijímači, přičemž se alespoň jeden musí nacházet na bodě o známých souřadnicích. Výsledkem GNSS měření jsou souřadnice bodů, nicméně při měření je určován vektor rozdílu souřadnic známého (base) a neznámého (rover) bodu. Base je stanice statická, umístěna na bodě o známých souřadnicích. Z rozdílu polohy měřené a své známé jsou zjištěny odchylky, na jejichž základě rover určuje výsledný vektor. Průchod signálu atmosférou způsobuje určité chyby, které se opravují pomocí korekčních dat. Namísto vlastní base stanice se za poplatek využívá síť permanentních referenčních stanic. Příkladem jsou sítě TopNET, GEOORBIT, Trimble VRS NOW nebo CZEPOS. Různé metody měření GNSS jsou popsány v následujících odstavcích.

2.1.1 STATICKÁ METODA

Tato metoda je využívána pro získání vysokých přesností, jejichž hodnota je závislá na době observace, která se pohybuje v řádu hodin či dní. Jedná se o časově nejnáročnější metodu, avšak s nejpřesnějšími výsledky získanými postprocesně. Principem je současné měření dvou či více referenčních přijímačů s vzájemně dlouhými záměry. Přesnost se pohybuje v rozmezí 3–5 mm a je využívána především ve vyšší geodézii pro práce s maximální požadovanou přesností.

2.1.2 RYCHLÁ STATICKÁ METODA

Je podobná metodě statické, avšak s kratší observační dobou, která se pohybuje v řádech minut až hodin (10-30 minut). Řadí se mezi postprocesní a je využívána na kratší vzdálenosti do 15 km od referenčního bodu. Dosažitelná přesnost je závislá na vzdálenosti a pohybuje se v rozmezí 5–10 mm + 1 ppm.

2.1.3 METODA STOP AND GO

Metoda na rozhraní metody statické a kinematické, kdy přijímač měří i při přesunu mezi jednotlivými body. Druhý přijímač musí být po celou dobu nehybný. Čas měření na určovaném bodě je zkrácen na několik sekund a výsledky jsou opět získány postprocesně. Podmínkou je prvotní inicializace (vyřešení ambiguit) a následné udržení signálu, nesmí dojít k jeho ztrátě. Dosažitelná



přesnost je závislá na vzdálenosti od referenční stanice a pohybuje se v rozmezí 10–20 mm + 1 ppm. Nejedná se o běžně využívanou metodu.

2.1.4 KINEMATICKÁ METODA

Počáteční inicializace je provedena na bodě o známých souřadnicích, řádově v desítkách minut, a následně se rover dává do pohybu. Jedná se o poměrně rychlé měření v pravidelných intervalech, zpracováno postprocesně. Oba přijímače musí přijímat signál ze stejných družic a během měření nesmí dojít ke ztrátě signálu kvůli opětovné inicializaci. Dosažitelná přesnost je opět závislá na vzdálenosti a pohybuje se v rozmezí 20–30 mm + 3 ppm.

2.1.5 METODA RTK

Jedná se o nejpoužívanější metodu geodetického GNSS měření. Hlavní rozdíl od ostatních zmíněných metod je měření v reálném čase, kdy je potřeba permanentní datové spojení mezi přijímači. Jedním z nich je základní stanice, která je obvykle nahrazena sítí referenčních stanic. Druhým je pohyblivý přijímač (rover) používaný pro samotný sběr dat. Vzdálenost mezi nimi je poměrně malá (maximálně do 60 km) z důvodu stejných atmosférických podmínek, které jsou předmětem korekcí. Ty se pomocí radiových vln vysílají do roveru a umožňují tak jeho přesné určení pozice. Díky okamžitým korekcím lze ihned měřit či vytyčovat v reálném čase. Přesnost metody se při použití sítě referenčních stanic pohybuje v řádech nízkých jednotek centimetrů.

2.2 PRAMENY CHYB OVLIVŇUJÍCÍ PŘESNOST SYSTÉMU GNSS

Kvalita a přesnost určení polohy přijímače podléhá několika vlivům. Výsledky měření GNSS systémů jsou stejně jako všechna ostatní měření odhady skutečných hodnot s určitou přesností, která je předmětem řešení této práce.

Mezi faktory ovlivňující výslednou přesnost získaných dat patří následující. Nesprávné určení efemerid družic, tj. hodnoty udávající polohu družice na oběžné dráze. Nesynchronní chod atomových hodin, vybavených rubidiovým či cesiovým oscilátorem, na všech družicích s hodinami na Zemi. Refrakce neboli lom vyslaného signálu družice způsobený volnými elektrony a ionty pohybující se v ionosféře, jejíž stav ovlivňují aktivita Slunce, fáze dne, roční období aj. Refrakce způsobená troposférou, jejíž stav je ovlivněn lokálními fyzikálními podmínkami na Zemi (teplota, tlak, vlhkost). Multipath neboli vícecestné šíření signálu je rozdělení a roznásobení přímého signálu, kdy přijímač přijme stejný signál vícekrát s různým zpožděním. A mnoho dalších.

3 NÁVRH EXPERIMENTU

Cílem této práce je určení absolutních přesností GNSS RTK měření. Testovány byly dvě aparatury od firmy Trimble s cca 10letým rozdílem rokem výroby. Starší aparaturu reprezentuje Trimble GeoXR s externí anténou Zephyr Model 2, novější Trimble R12i, která je aktuálně jednou z nejmodernějších dostupných pro RTK měření. Aparatury budou dále značeny jako GNSSap1 a GNSSap2. Z hlavních rozdílů mezi přijímači lze konkrétně uvést – rok výroby a s tím i související vyspělost technologie, počty definovaných dálkoměrných kódů pro příjem signálu z různých družicových systémů či úroveň početních algoritmů. V této kapitole budou popsány navržené způsoby testování a jejich provedení.

K určení absolutních přesností je nutné vycházet z reálného měření s větším počtem nadbytečných hodnot. Zhodnocení menšího souboru naměřených dat je provedeno na základě výběrových směrodatných odchylek. Způsoby testování byly navrženy tak, aby prostředí a postup měření odpovídal běžným podmínkám v praxi. Výsledkem jsou tedy hodnoty mající pro běžného zeměměřiče praktický význam. Nutnou podmínkou pro objektivní zhodnocení je totožný pracovní postup při měření oběma aparaturami.

Navrženy byly celkem 3 testy sledující přesnost měření. První z nich je zaměřen na vliv zakrytého obzoru, druhý na vliv délky časového intervalu. Oba jsou hodnoceny pouze v rámci dané aparatury. Poslední z nich porovnává aparatury mezi sebou.

3.1 TESTOVÁNÍ VLIVU ZAKRYTÉHO OBZORU

Je běžně známo, že GNSS aparatura dosahuje větších přesností na volném prostranství. Naopak např. v zastavěném či zalesněném prostředí očekáváme přesnost obecně horší. Proto se v této části experimentu budeme zabývat vlivem okolního prostředí na výslednou přesnost určovaných bodů.

Měření bylo provedeno v parku před budovou B Fakulty stavební ČVUT v Praze. Lokalita byla zvolena dle časové dostupnosti a její podobnosti s běžně navštěvovaným prostředím v praxi – okolní vegetace, budovy a další. Využito bylo prostranství volné, ale i blízké vysokých budov. Testovací body (dále značeno „TB“) byly uspořádány do přímky kolmo na budovu B v celkovém počtu 7 bodů. Umístění přímky bylo realizováno tak, aby počáteční body měly volnější okolní prostranství a body koncové naopak prostředí zčásti omezené, situace dále viz Obrázek 12.

3.2 TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI V KRÁTKÉM A DLOUHÉM ČASOVÉM ÚSEKU

Konfigurace družic se během dne neustále mění. Na počátku GNSS byl dostupný pouze systém NAVSTAR GPS, v průběhu let systémů přibývalo. Naším cílem je zjistit, zda má aktuální konfigurace a počet družic vliv na přesnost měření. Pokud vliv má, bude nás zajímat, jak se mění směrodatná odchylka.

Pro testování bylo navrženo měření v počtu 10 opakování provedených bezprostředně po sobě v porovnání s měřením po 15 minutách, kdy první měření představuje kratší časový úsek a druhé delší. Pro kratší časový interval předpokládáme stabilitu atmosférických podmínek a obdobnou konfiguraci družic. V delším časovém intervalu naopak předpokládáme změnu v obou aspektech. Po sobě 10 jdoucích měření bylo provedeno v rámci jedné hodiny, celkem dvakrát. Měření po 15 minutách zabralo celkem 8 hodin.

3.3 TESTOVÁNÍ STARŠÍ A NOVĚJŠÍ GNSS APARATURY

Posledním testem je porovnání starší a novější GNSS aparatury se zájmem zjistit případné zlepšení v kvalitě měření a přesnosti výsledných souřadnic. Porovnání spočívá v měření identickým postupem. U novější aparatury byla navíc automaticky využita kompenzace náklonu, která je jejím standardem.

Měření bylo realizováno urovnáním výtyčky do svislé polohy měřičkou pomocí libely. Důležitým faktorem ovlivňující výslednou přesnost je samotná výtyčka. Vzhledem k nejistotě správné rektifikace libely bylo zapotřebí tento vliv eliminovat měřickým postupem, a to měřením vždy dvakrát bezprostředně po sobě, tzv. „ve dvou polohách“, druhé měření otočeno o 200 gon.

3.4 NÁVRH PROVEDENÍ ZAMĚŘENÍ

Základní myšlenkou je opakované měření na identických bodech o známých souřadnicích oběma GNSS aparaturami v průběhu stejného časového úseku v různých dnech. K tomu byl vytvořen pevný etalon TB, představující absolutní polohy pro následné vyhodnocení. Pevně stabilizované body tvořily v parku řadu směřující kolmo na budovu B. Vzhledem k veřejnému prostranství byla zvolena dočasná stabilizace dřevěnými kolíky se šroubem s křížovou drážkou na vršku. Rozestupy bodů byly směrem k budově zmenšovány pro vyšší citlivost zhodnocení.

Pro získání relevantních výsledků je nutné mít všechny TB určené se stejnou přesností a současně s přesností kvalitativně převyšující testovanou GNSS aparaturu. Z tohoto důvodu byla zvolena statická metoda měření, kterou bylo vybudováno lokální bodové pole zaměřené s dostatečně dlouhou observací. Bodové pole se skládá ze třech bodů na volném prostranství s vhodnou konfigurací. Získaná přesnost byla totální stanicí přenesena na TB polární metodou.

4 PROVEDENÍ EXPERIMENTU

4.1 BODOVÉ POLE – STATICKÁ METODA

K vytvoření lokálního bodového pole, a tedy přesného základu, zásadního pro veškeré následující měření a zpracování, byla zvolena statická metoda měření.

4.1.1 PŘÍSTROJE A POMŮCKY

Zaměření bodů bylo provedeno zařízením GNSS Trimble GeoXR (Obrázek 1) jinak označované jako GeoExplorer 6000, s externí anténou Trimble Zephyr Model 2 zapůjčené od Katedry speciální geodézie Fakulty stavební ČVUT v Praze. Tento přístroj umožňuje měření různými metodami jako je statická, rychlá statická či RTK. Jedná se o zařízení s dvoufrekvenční GNSS interní anténou a 220 kanálovým čipem.

K měření byly využity celkem čtyři sety aparatur, skládajících se z přijímače Trimble GeoXR, externí antény, trojnožky, stativu Leica (Obrázek 2) a společně pro všechny byl použit optický centrovač a svinovací metr pro změření výšky antény od měřického hřebu. Technické parametry uvedené níže byly čerpány z [8], [9].

Tabulka 1 - Výrobní čísla měřických aparatur

Školní číslo	Trimble GeoXR	Trimble Zephyr Model2
1	5135407185	4611118278
2	5141409191	4611118578
3	5143409804	4611118507
5	5143409829	4611118267



Obrázek 1 - Statická metoda: Trimble GeoXR [13]



Obrázek 2 - Statická metoda: měřická aparatura

Tabulka 2 - GNSS Trimble GeoXR: Satelitní signály

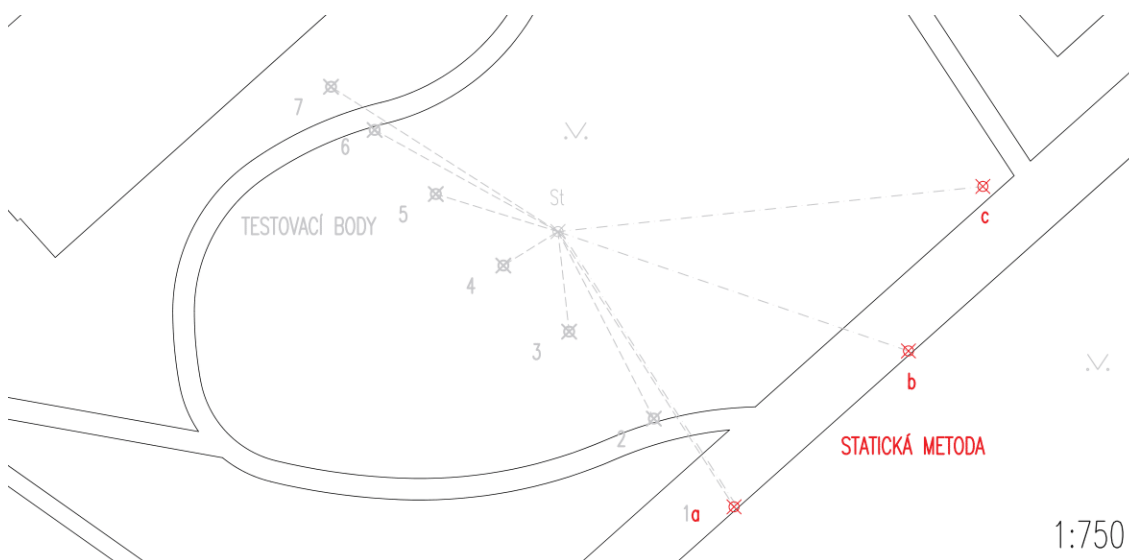
SLEDOVANÉ SATELITNÍ SIGNÁLY	
GPS	L1C/A, L2C, L2E (Trimble method for tracking L2P)
GLONASS	L1C/A, L1P, L2C/A (GLONASS M only), L2P
SBAS ¹ (WAAS/EGNOS/MSAS)	L1C/A

Tabulka 3 - GNSS Trimble GeoXR: Parametry přístroje

PŘESNOST STATICKÉ A RYCHLÉ STATICKÉ METODY		
Horizontální	3 mm + 0,5 ppm RMS	
Vertikální	3.5 mm + 0,5 ppm RMS	
PŘESNOST RTK METODY		
Externí GNSS anténa	Horizontální	10 mm + 0,5 ppm RMS
	Vertikální	15 mm + 0,5 ppm RMS
Interní GNSS anténa	Horizontální	25 mm + 1 ppm RMS
	Vertikální	40 mm + 1 ppm RMS
DALŠÍ SPECIFIKA	Inicializace	<8 sekund

4.1.2 PŘÍPRAVNÉ PRÁCE

V úvodu proběhla rekognoskace terénu před budovou B. Jihovýchodně od budovy byly v komunikaci pro pěší z asfaltových vrstev nalezeny již stabilizované měřické hřeby, viz Obrázek 4. Tento druh stabilizace je pro naše účely ideální volbou z důvodu zajištění neměnnosti a stálosti polohy. K vytvoření lokálního bodového pole byly vybrány celkem 3 hřeby. Výběr byl proveden tak, aby jejich poloha vyhovovala potřebě relativně volného prostranství pro observační měření a zároveň aby jejich rozložení tvořilo vhodnou konfiguraci pro následné protnutí se totální stanicí kvůli opakovanému zaměření TB. Grafické znázornění situace na Obrázku 3, kde je červeně značena statická metoda a šedě následné zpracování.



Obrázek 3 - Statická metoda: grafické znázornění bodů

¹ Včetně WAAS dostupný pouze v Severní Americe, EGNOS pouze v Evropě a MSAS pouze v Japonsku.



Obrázek 4 - Statická metoda: stabilizace



Obrázek 5 - Statická metoda: měřický hřeb

4.1.3 MĚŘENÍ

Měření statickou metodou probíhalo ve dvou různých dnech, a to v úterý 5.10.2021 a v úterý 19.10.2021. Celkem bylo tedy měřeno na třech bodech, tvořících bodové pole. Na každém měřickém hřebu byla postavena, zcentrována a zhorizontována měřická aparatura s externí anténou Zephyr Model 2 na stativu, kabelem připojenou k zařízení Trimble GeoXR, popsáno výše 4.1.1.

První den měření probíhal v čase 10:00 až 19:30. Pro takto dlouhý časový úsek byly zvoleny hodinové intervaly měření z důvodu kontroly stavu baterií aparatury a kontroly neustálého příjmu signálu. Každou započatou hodinu bylo na každém ze tří stanovisek znovu spuštěno měření. V odpoledních hodinách nastaly z neznámého důvodu výpadky, které byly vyřešeny během kancelářského zpracování. Výpadky mohly být způsobeny vlivem atmosférických podmínek, tzn. zatažená obloha během celého dne s podvečerním deštěm.

Další den bylo měřeno v čase 9:00 až 13:00. Zde byly zvoleny dvouhodinové intervaly z důvodu znalostí situací, které nastaly během prvního dne. Výdrž baterie na takto krátkou dobu měření byla dostačující a vzhledem ke slunečnému počasí bez mráčků nebyl předpokládán výpadek signálu vlivem atmosférických podmínek.

Stanoviska byla označena písmeny malé abecedy a-c, jednotlivé měřené etapy arabskými číslicemi počínaje číslem 1. Celkový čas měření činil 13,5 hodin, přičemž pokryl 10,5 hodin z celého dne.



Obrázek 6 - Statická metoda: měřický set



Obrázek 7 - Statická metoda: rozmístění aparatur

4.1.4 ZPRACOVÁNÍ STATICKÉ METODY

Zpracování bylo provedeno v programu Trimble Business Center, se zkratkou TBC. Jednotlivé měřické dny byly řešeny a zpracovány odděleně ve dvou projektech. Výsledným souřadnicím z druhého dne byla z důvodu dvakrát delšího měřeného intervalu přiřazena dvojnásobná váha. Po založení projektu proběhl import naměřených dat spolu s daty referenční stanice Kobylisy (kód CPRG) od CZEPOS pro daný den. Data ze stanice byla považována za fixní, nebyla vyrovnána.

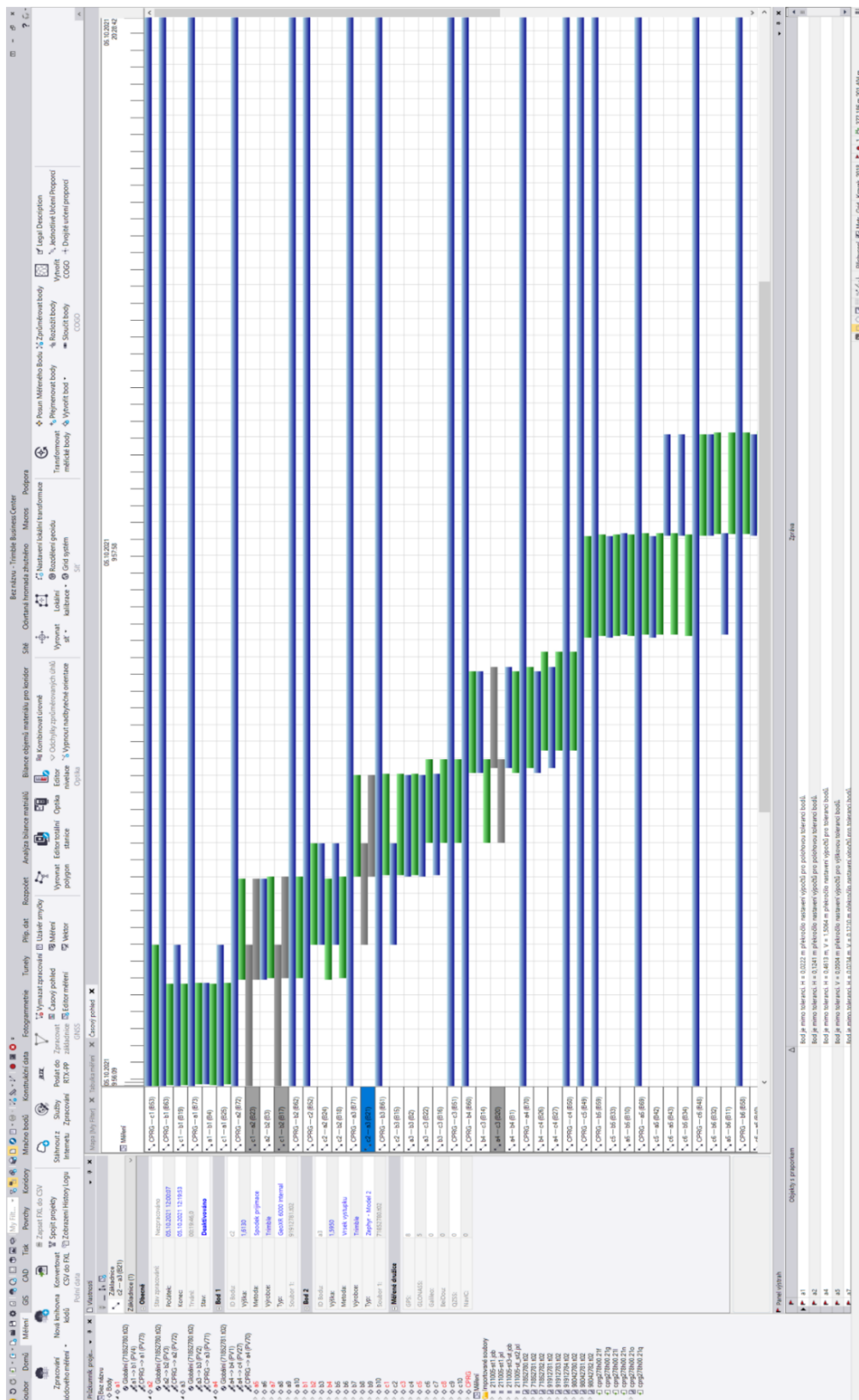
Veškeré zpracování proběhlo v sekci *Měření*. Funkcí *Zpracovat základnice* byly z naměřených dat automaticky vytvořeny vektory všech možných kombinací souběžného měření. Kromě hodinových či dvouhodinových měření, byly vytvořeny i vektory s velmi malým překryvem v řádech několika minut. Takové dvojice byly v *Časovém pohledu* graficky zobrazeny a následně deaktivovány.

Z důvodu již zmíněných výpadků bylo nezbytnou kontrolou prozkoumání dat, konkrétně nastavení antény na hodnotu Zephyr Model 2. U prvního dne měření na stanovisku c a stanovisku a tato podmínka pro pátý interval nebyla splněna a signál byl přijímán do antény interní. Měření byla z důvodu jejich nepoužitelnosti pro další zpracování deaktivována. U druhého dne měření tato situace nenastala.

Pro dosažení lepších výsledků bylo nutné očistit přijímaný signál družic, a to v *Editoru měření*, kde byla graficky zobrazena kvalita signálu. V některých případech byl jasně vyjádřen výpadek a následné naskočení signálu přerušovanými čarami. Tato nespojitost mohla být způsobena vlivem slabého signálu, okolní vegetace



či budov a negativně by ovlivnila výsledné souřadnice, proto byly tyto nedostatky vybrány a deaktivovány. Na závěr byla použita funkce *Vyrovnat síť* s podmínkou pevného bodu CPRG. Prostředí programu TBC zobrazeno na Obrázku 8. Souřadnice z jednotlivých etap jsou spolu s výslednými průměry uvedeny v Příloze 1.



Obrázek 8 - Statická metoda: prostředí programu TBC

4.2 TESTOVACÍ BODY

4.2.1 PŘÍSTROJE A POMŮCKY

Pro opakované určování polohy TB byla využita robotická bezhranolová totální stanice Trimble S6 HP (v.č. 92120086) vypůjčená od Katedry speciální geodézie. Jak již uvádí název, jedná se o totální stanici s velmi vysokou přesností, HP = High Precision. Mezi výhody patří automatické cílení díky technologii MultiTrack, bezhranolové měření, automatické zacílení na zvolený hranol pomocí Target ID nebo SurePoint, tj. záruka přesnosti zacílení na bod i přes povětrnostní podmínky či otřesy. Technické parametry a specifikace zařízení [10] jsou uvedeny v tabulce níže.



Obrázek 9 - Trimble S6 HP [14]

Tabulka 4 - Trimble S6 HP: Technické parametry

MĚŘENÍ ÚHLŮ		
Přesnost (sm. odchylka dle DIN 18723)	1" (0,3 mgon)	
Automatický kompenzátor	Dvouosý v rozsahu $\pm 6'$ (± 100 gon)	
MĚŘENÍ DÉLEK		
Přesnost na hranol Standard	± 1 mm + 1 ppm	
Přesnost na hranol Tracking	± 5 mm + 2 ppm	
Přesnost pro bezhranolové měření	± 3 mm + 2 ppm	
DALŠÍ SPECIFIKA MĚŘENÍ NA HRANOL	Doba měření	2 s
	Nejkratší měřitelná délka	1,5 m

4.2.2 PŘÍPRAVNÉ PRÁCE

Před samotným měřením byla opět provedena rekognoskace terénu. Krokováním bylo rozměřeno celkem 7 TB s různými vzájemnými rozestupy ve směru od asfaltové komunikace kolmo k budově. První TB byl vložen do *Stanoviska a* statické metody a v postupném vzrůstajícím pořadí byly stabilizovány body další, číslované arabskými číslicemi 1-7. Grafické znázornění spolu s uvedenými kótami je vyobrazeno na Obrázku 12.

Stabilizace bodů byla realizována dřevěnými kolíky se šroubem s křížovou drážkou na vršku. Šroub byl přidán z důvodu přesného a rychlého vymezení místa pro stavění výtyčky s hranolem pro zaměření jejich polohy či GNSS aparaturu při samotném měření. Tato volba nám zajistila přesnější a jistější měření stejné polohy.



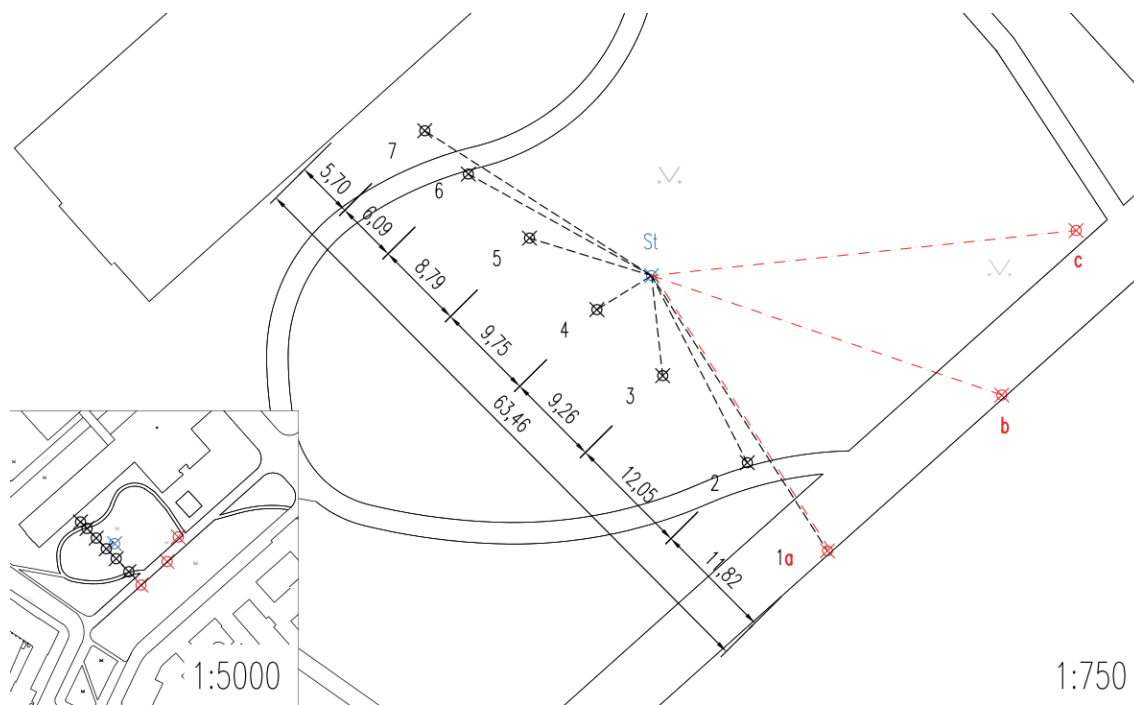
Obrázek 10 - TB: stabilizace v parčíku



Obrázek 11 - TB: detailnější pohled na stabilizaci

4.2.3 MĚŘENÍ

Před každým měřením testovanou GNSS aparaturou proběhlo nové určení poloh TB z důvodu možné změny jejich umístění. Po horizontaci přístroje bylo provedeno zaměření TB polární metodou s tím, že poloha a orientace totální stanice byla určena pomocí úlohy volné stanovisko s připojením se na body bodového pole. Při měření byla využita možnost automatického cílení i automatického měření ve dvou polohách dalekohledu. Pro větší přesnost bylo měřeno na samotný hranol Trimble VX&S Series 360 s hrotem (celková výška 0,115 m), bez výtyčky, který se vždy vložil na měřický hřeb a následně do křížků vrutů na vršku kolíků.



Obrázek 12 - Grafické znázornění situace

Na obrázku je znázorněna situace stabilizovaných TB a jejich zaměření totální stanicí. V levém dolním rohu vzdálený pohled, jinak detailní situace v měřítku 1:750. Červená barva značí bodové pole, modrá dočasná stanoviště a černá TB spolu se vzájemnými vzdálenostmi. Poslední kóta (od TB7 dál) je vzdálenost od budovy.

4.2.4 VÝPOČET SOUŘADNIC TESTOVACÍCH BODŮ

Veškerá naměřená data byla společně zpracována v programu GROMA. V úvodu byl změněn typ záznamníku na MAPA2 formát Standard a nastaven měřítkový koeficient, funkcí Křovák ve volbě *Nástroje*. Pro jeho výpočet byl vybrán bod *b* zjištěný statickou metodou o nadmořské výšce 219,52 m. Po importu dat byly u příslušných bodů nastaveny hodnoty na stanoviště či orientaci a v sekci *Měření* bylo vybráno Zpracování zázpisníku s volbou zpracování měření v obou polohách. Následoval výpočet čtyř volných stanovišek, pro každý den měření testovanou GNSS aparaturou, v sekci *Výpočty – Volné stanoviště*. Poté mohly být vypočteny souřadnice TB pomocí funkce *Polární metoda dávkou* v sekci *Výpočty*. Výsledné souřadnice slouží pro následné zpracování jako pevný etalon. Prostředí programu GROMA je znázorněno na Obrázku 13. Souřadnice TB jsou součástí příloh této práce.



The screenshot displays the Groma software interface with the following components:

- Top Panel:** File menu, configuration options (e.g., Výšky, Projevit souř., Přímání), and a search bar.
- Table:** A list of points with columns: Předm. číslo, Y, X, Z, Typ, Kv., Popis. The table contains 60 rows of data, including coordinates and point types like 'STN'.
- Map:** A 2D plot showing the spatial distribution of points from the table. Points are labeled with their IDs (e.g., 41, 42, 40, 22, 26, 27, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 40).
- Configuration Windows:**
 - Volně st...:** Fields for orientation (Přesb., Cílo, Y, X, Z) and transformation (Typ transformace, Bod, V Ose..., V Délky, V Pře...). Includes buttons for 'Aktualizovat souř.', 'Přidat', and 'Ubrat'.
 - Polární metoda...:** Fields for 'Vstup' (Vstup, Výstup) and 'Výběr' (Use checkboxes for 'Použít pouze uznačené hodnoty', 'Editovat orientace', 'Použít veškerá stanoviška v dílce'). Includes 'Stanoviško:' and 'Bod:' fields.
 - Polární souřadice...:** Fields for 'Převodné souřadice' (Y, X, Z) and 'Polární souřadice' (R₀, Epolon, Kartografické souřadice - Šírka, Délka). Includes 'Měřkový koeficient' and 'Výsledný měřkový koeficient'.
 - Učtování bod...:** Fields for 'Přesb.', 'Cílo', 'Výška stop.', 'Kód', and 'Kval.'. Includes 'Aktualizovat souř.', 'Přidat', and 'Ubrat' buttons.

Obrázek 13 - TB: prostředí programu Groma

4.3 GNSSap1: TRIMBLE GeoXR

První testovací aparaturou byla Trimble GeoXR. Jedná se o jedno ze starších GNSS zařízení poměrně hojně využívané dříve i dnes.

4.3.1 PŘÍSTROJE A POMŮCKY

Testované zařízení bylo již využito pro statickou metodu, tj. GNSS Trimble GeoXR (v.č. 5143409804) s externí anténou Trimble Zephyr Model 2 (v.č. 4611118507) zapůjčené od Katedry speciální geodézie. V tomto případě byla využita namísto statické metody RTK metoda s měřicí aparaturou na výtyčce. Specifikace a technické parametry viz kapitola 4.1.1.



Obrázek 14 - GNSSap1: Trimble GeoXR + Zephyr Model 2 [15]

4.3.2 MĚŘENÍ

Měření proběhlo ve dvou po sobě jdoucích dnech, a to v pondělí 15.11.2021 a v úterý 16.11.2021. Před samotným měřením bylo opět provedeno zaměření TB robotickou totální stanicí, více popsáno dříve. TB byly postupně měřeny od TB1 až do TB7 jako body podrobné s měřením trvajícím 10 sekund. Pro systematičnost bylo první měření provedeno z pravé strany přímky směřující k budově, druhé ze strany levé, aby rozdíl poloh byl 200 gon, dále jako měření „zprava a zleva“.

Vzhledem k navrženým experimentům byly zvoleny dva postupy měření. Princip prvního postupu spočíval v okamžitě po sobě jdoucích 10 zaměření TB. Po doměření jedné sady TB1-7 ihned započala další měřická sada od začátku. Tento postup trval přibližně hodinu. Druhý postup plynule navazoval na první, kdy po skončení 10 opakovaných sad započalo měření každých 15 minut.

Doba potřebná k zaměření bodu se s přibližováním k budově prodlužovala, konkrétně u TB5-7. Vlivem blízké vzdálenosti od budovy byla prakticky z poloviny zastíněna vhodná konfigurace družic. Delší časová odezva přibývala také s blížícím se večerem. V určitých případech byl signál ztracen úplně a měření na bodě nebylo možné provést. V takových případech se vyčkalo na obnovení připojení, a v případě jeho navázání byl změřen alespoň rychlý bod, a to dvakrát, který byl zprůměrován.

Oba dny se postupovalo stejným způsobem pouze s rozdílem jiného času. Měření byla číslována postupně vzrůstajícími arabskými číslicemi, přičemž počáteční čísla v daný měřický den byla náhodně zvolena jen z důvodu rozeznání naměřených bodů. Lichá čísla značí měření zprava, sudá naopak zleva. První den započalo měření v 9:15 a do 14:20 bylo naměřeno celkem 364 bodů, číslovaných 1 až 364. Druhý den probíhal v čase 14:00 až 17:24 přičemž bylo naměřeno 281 bodů, z čehož 3 byly měřeny dvakrát jako rychlý bod, číslovaných 401 až 678.

4.4 GNSSap2: TRIMBLE R12i

4.4.1 PŘÍSTROJE A POMŮCKY

Pro porovnání vývoje vyspělosti současných technik byla jako druhá měřicí GNSS aparatura zvolena jedna z aktuálně nejmodernějších, Trimble R12i (v.č. 6104F01532), vypůjčena od firmy GEOTRONICS Praha, s.r.o. Její hlavní a neopomenutelnou výhodou pro vyšší produktivitu při měření a vytyčování je IMU jednotka kompenzující neomezený náklon a technologie Trimble TIP (Trimble Inertial Platform). Další výhodou je integrovaná GNSS anténa s 672 kanály, využití širokopásmového UHF radia pro příjem a vysílání signálu a vylepšení ochrany před rušením. Tato aparatura je vhodnou volbou do prostředí se špatnými konfiguračními podmínkami, kdy je schopna si z jednotlivých útržků signálu spojit potřebné informace, a i přesto určit polohu bodu s relativně vysokou přesností. Technické parametry a specifikace zařízení [11] jsou uvedeny v tabulkách níže.

Tabulka 5 - GNSS Trimble R12i: Satelitní signály

SLEDOVANÉ SATELITNÍ SIGNÁLY	
GPS	L1C, L1C/A, L2C, L2E, L5
GLONASS	L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3
SBAS (WAAS/EGNOS/GAGAN/MSAS)	L1C/A, L5
Galileo	E1, E5A, E5B, E5 AltBOC, E6
BeiDou	B1, B1C, B2, B2A, B3
QZSS	L1C/A, L1S, L1C, L2C, L5, L6
NavIC (IRNSS)	L5
L-band	CenterPoint RTX



Obrázek 15 - GPS2: Trimble R12i [11]

Tabulka 6 - GNSS Trimble R12i: Parametry přístroje

PŘESNOST GNSS DIFERENČNÍHO KÓDOVÉHO MĚŘENÍ		
Horizontální	0,25 m + 1 ppm RMS	
Vertikální	0,50 m + 1 ppm RMS	
PŘESNOST STATICKÉ A RYCHLÉ STATICKÉ METODY		
Horizontální	3,0 mm + 0,5 ppm RMS	
Vertikální	3,5 mm + 0,5 ppm RMS	
PŘESNOST RTK METODY		
Vlastní základna <30 km	Horizontální	8 mm + 1 ppm RMS
	Vertikální	15 mm + 1 ppm RMS
RTK síť	Horizontální	8 mm + 0,5 ppm RMS
	Vertikální	15 mm + 0,5 ppm RMS
DALŠÍ SPECIFIKA	Inicializace	<2 sekund

4.4.2 MĚŘENÍ

Měření druhou testovanou GNSS aparaturou probíhalo opět ve dvou po sobě jdoucích dnech, a to v pondělí 20.12.2021 a v úterý 21.12.2021. Postup měření byl totožný s již provedeným. První den započalo měření v 9:00 a do 13:04 bylo naměřeno celkem 308 bodů, číslovaných 1001 až 1308. Druhý den probíhal v čase 13:00 až 17:05 se stejným počtem naměřených bodů, s čísly 1401 až 1708.

5 ZPRACOVÁNÍ RTK MĚŘENÍ

V této části bude popsán postup zpracování naměřených dat. Protokoly GNSS měření byly exportovány v textových formátech, obsahujících souřadnice naměřených bodů, jejich přesnost, kvalitu konfigurace, počet satelitů aj. Souřadnice jsou uvedeny v souřadnicovém systému S-JTSK a výškovém Baltu po vyrovnání.

Z protokolů byla vybrána potřebná data, následně nahrána a zpracována v programu Microsoft Office Excel. Jednotlivé dny měření byly řešeny odděleně, z důvodu odlišných absolutních hodnot TB zaměřených totální stanicí. V prvním kroku byla zprůměrována data každého měření „zprava a zleva“. Následovalo další rozdělení dat. Nejprve pro každý TB, z nich bylo následně vybráno 10 po sobě jdoucích měření a poté měření po 15 minutách. Takto rozdělená data byla dále zpracována stejným způsobem dle níže uvedeného postupu.

5.1 VÝBĚROVÉ SMĚRODATNÉ ODCHYLKY

Charakteristiku proměnlivosti značí směrodatná odchylka neboli střední kvadratická odchylka od střední hodnoty. Vzhledem k malému počtu měření budeme pracovat se směrodatnou odchylkou výběrovou (dále značeno „sm.o.“).

SM.O. Z OPAKOVÁNÍ

Pro zjištění dosažitelné přesnosti běžně v praxi, kdy přesná poloha určovaného bodu není známá, byla vypočtena sm.o. z opakování dle (5.1.1). Udává nám přesnost samotného měření bez vlivu podkladu (absolutní polohy bodu). Jsou zde počítány opravy od průměru z naměřených souřadnic (X, Y, H).

$$s_{\text{opakování}} = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5.1.1)$$

Jednotlivé veličiny ve vzorci: x jsou naměřené souřadnice, \bar{x} jsou průměrné souřadnice z měření, n je počet měření. Ve jmenovateli $n - 1$ značí počet nadbytečných měření, kdy k určení hledaného bodu stačí právě jedno.

SM.O. VŮČI „SPRÁVNÉ“ HODNOTĚ

Pro zjištění absolutní přesnosti výsledných souřadnic byla vypočtena sm.o. vůči „správné“ (etalonové, bráno jako absolutní) hodnotě dle (5.1.2). Zde jsou počítány opravy od absolutních hodnot TB (X, Y, H) zjištěné totální stanicí. Velikosti sm.o. očekáváme vyšší než v předchozím případě z důvodu pevně daných hodnot, kterých by GNSS aparatura měla docílit.

$$s_{\text{vůči správné}} = \sqrt{\frac{\sum(x - x_{\text{správné}})^2}{n}} \quad (5.1.2)$$

Jednotlivé veličiny ve vzorci: x jsou naměřené souřadnice, $x_{\text{správné}}$ jsou absolutní souřadnice TB určené ze statické metody, n je počet měření. Ve jmenovateli n značí počet nadbytečných měření, kdy kurčení polohy, vzhledem k předem známé poloze, jsou všechna měření nadbytečná. Dále je pro obě sm.o. postup následující.

SM.O. SOUŘADNICOVÁ

Sm.o. souřadnicová byla vypočtena jako kvadratický průměr součtu sm.o. souřadnic X a Y dle (5.1.3).

$$s_{XY} = \sqrt{\frac{s_X^2 + s_Y^2}{2}} \quad (5.1.3)$$

5.2 STUDENTOVO ROZDĚLENÍ

Pro statistické zhodnocení a následné vyloučení odlehlých měření bylo použito Studentovo rozdělení. Jedná se o rozdělení pravděpodobnosti, které popisuje výběrové soubory dat, u nichž není známá skutečná směrodatná odchylka σ , a je tedy nutné ji odhadnout pomocí výběrové směrodatné odchylky s .

Pro zhodnocení byl zvolen oboustranný test na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, z důvodu vyšší jistoty vyloučení odlehlých měření. Tabulka kritických hodnot pro Studentovo rozdělení byla převzata z [1], přičemž chybějící hodnoty byly dopočteny lineární interpolací. Z tabulky byly vybrány příslušné hodnoty dle počtu nadbytečných měření a hladině významnosti. Jejich vynásobením se sm.o. vůči správné hodnotě pro X, Y, H byly získány hranice pro odlehlá měření. Opravy naměřených souřadnic od absolutních byly s danými hranicemi porovnány. Překročila-li absolutní hodnota největší opravy hranici Studentova rozdělení, byla považována za měření odlehlé a následně vyloučena. Po každém vyloučení byl celý výpočet zopakován s rozdílem jiné volby kritické hodnoty.

5.3 ZÁVĚREČNÉ ZPRACOVÁNÍ

Sm.o. pro dvojici měření („zprava a zleva“) byly vynásobeny odmocninou ze dvou pro získání sm.o. jednoho měření. Dílčí výsledky byly zhodnoceny a porovnány v jednom výsledném excelovském souboru, viz Elektronická příloha 3. Na závěr byly veškeré si odpovídající sm.o. pro YX a H kvadraticky zprůměrovány.

Vzhledem ke zkušenostem a znalostem každého geodeta, kdy jsou dosažitelné přesnosti měření u vysokých budov poměrně nízké, budou absolutní přesnosti GNSS RTK metody hodnoceny bez TB7.



6 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

V této kapitole budou zhodnoceny dosažené sm.o. obou aparatur. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách, vždy sm.o. z opakování a vůči správné hodnotě pro složku polohovou (YX) a výškovou (H), s následným grafickým zobrazením. Pro snazší orientaci jsou v tabulkách aparatury barevně odlišeny, modrou barvou aparatura starší, oranžovou aparatura novější. Pro názorné zobrazení výsledků je nutné upozornit na měnící se měřítko os jednotlivých grafů.

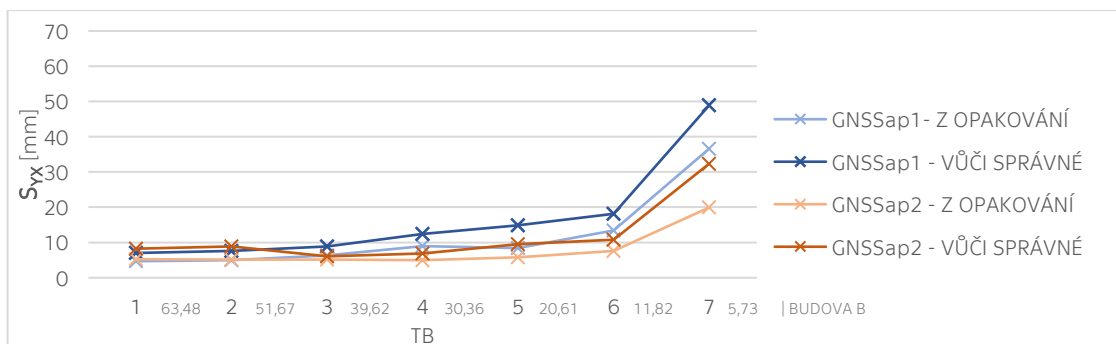
6.1 TESTOVÁNÍ VLIVU ZAKRYTÉHO OBZORU

Zhodnocení vychází z měření po 15 minutách z důvodu většího množství dat, a tedy z důvodu získání objektivnějšího výsledku. Sm.o. jsou přehledně zobrazeny v Tabulce 7. Na posledních dvou řádcích jsou barevně vyznačeny dosažené absolutní přesnosti. Zaměříme se čistě na změnu velikosti sm.o. se vzrůstajícím číslem TB (1 až 7), tedy se snižující vzdálenost od budovy B.

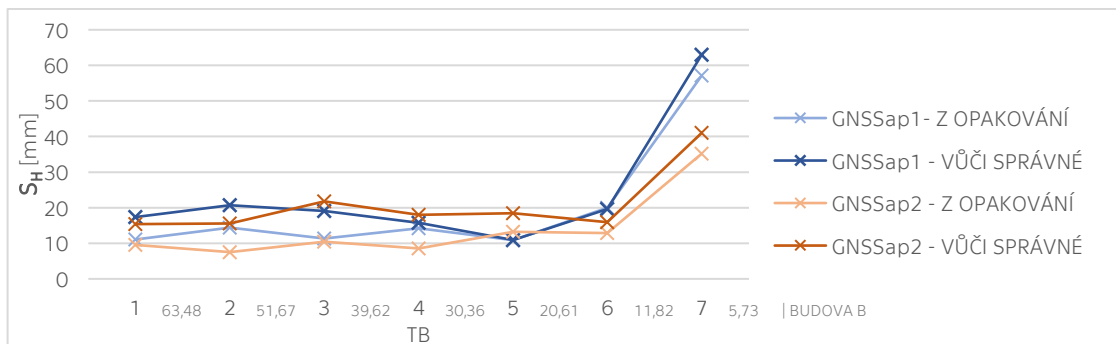
Tabulka 7 - Sm.o. měření po 15 min: GNSSap1 a GNSSap2

TB	MĚŘENÍ PO 15 MINUTÁCH							
	GNSSap1				GNSSap2			
	S _{z opakování} [mm]		S _{vůči správné} [mm]		S _{z opakování} [mm]		S _{vůči správné} [mm]	
	YX	H	YX	H	YX	H	YX	H
1	4,7	11,1	7,0	17,4	5,2	9,5	8,2	15,4
2	5,0	14,4	7,6	20,7	5,1	7,5	8,8	15,5
3	6,4	11,3	8,8	19,1	5,2	10,5	6,1	21,8
4	9,0	14,2	12,4	15,7	5,0	8,5	6,9	18,0
5	8,4	10,9	14,9	10,9	5,7	13,2	9,5	18,4
6	13,4	20,0	18,1	19,6	7,6	12,9	10,8	15,9
7	36,6	57,2	48,9	63,0	19,9	35,2	32,3	41,0
\bar{s}	15,8	25,2	21,6	28,8	9,2	16,5	14,6	22,5
$\bar{s}_{bez TB7}$	8,3	14,0	12,2	17,5	5,7	10,6	8,5	17,7

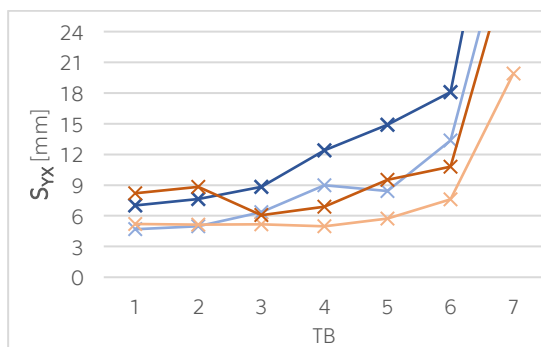
Hodnoty jsou dále graficky zobrazeny, zvláště polohová (s_{YX}) a výšková složka (s_H). Světlejší odstín barvy reprezentuje sm.o. z opakování a tmavší sm.o. vůči správné hodnotě. Pro názornost byly příslušné vzdálenosti TB od budovy uvedeny v grafech na vodorovné ose, vždy za číslem TB. Z uvedených grafů byly vybrány detaily pro podrobnější popis.



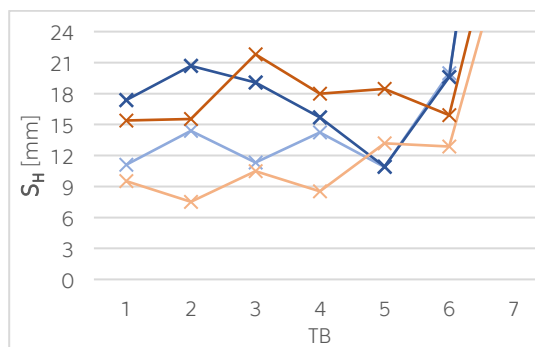
Graf 1 - Měření po 15 min: sm.o. YX



Graf 2 - Měření po 15 min: sm.o. H



Graf 3 - Měření po 15 min: sm.o. YX - detail



Graf 4 - Měření po 15 min: sm.o. H - detail

Z Grafu 1 a 2 jsou na první pohled patrné vysoké hodnoty sm.o. pro TB7. Tímto je dokázána nevhodnost měření v blízkosti vysokých budov, kde lze dosáhnout velmi nízkých přesností. Zhodnocení ostatních TB bude vycházet z detailních grafů. U polohové složky (Graf 3) je průběh lineárně rostoucí. GNSSap1 s rychlejším vzrůstem a GNSSap2 s výrazně pomalejším. Výšková složka (Graf 4) je naopak poměrně rozmanitá bez určitého trendu, dochází k nepravidelným výkyvům hodnot. Razantní zlom nastává u obou složek na TB6, od kterého bleskově sm.o. zvyšují hodnotu. Sm.o. z opakování nabývají podstatně nižších hodnot, víceméně kopírují průběh sm.o. vůči správné hodnotě.

Přibližování se k budově má negativní vliv především pro přesnost v poloze, kde průběh hodnot sm.o. lineárně roste. Výšková složka se zdá být neovlivněna. Toto platí v případě vzdálenosti větší než 12 m od budovy. V blízké vzdálenosti nejsou podmínky pro měření vhodné, dokázáno na necelých 6 m.

6.2 TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI V KRÁTKÉM A DLOUHÉM ČASOVÉM ÚSEKU

V této části byl navíc přidán test na vliv denní doby se snahou otestovat, zda lze během dopoledního a odpoledního měření dosáhnout odlišných přesností.

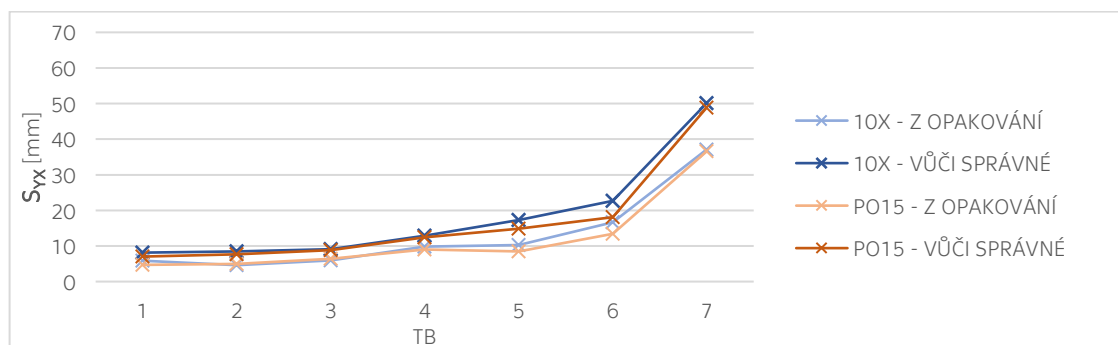
6.2.1 VLIV DÉLKY MĚŘENÉHO ČASOVÉHO INTERVALU

Vyhodnocení je provedeno porovnáním 10 opakujících se měření (10x, kratší interval) s měřením po 15 minutách (po15, delší interval). Nejprve je zhodnocena starší aparatura, poté novější. Patřičné hodnoty jsou uvedeny v Tabulkách 8 a 9 a následně graficky zobrazeny, modrou barvou 10 opakujících se měření, oranžovou měření po 15 minutách. V tabulce se zaměříme na porovnání hodnot mezi jednotlivými měřeními úseky, rozdíly v posledních dvou sloupcích.

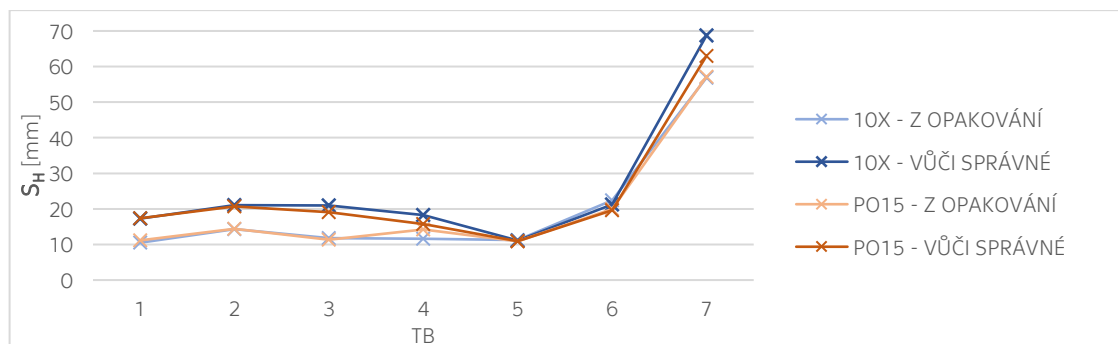
Tabulka 8 - Sm.o. GNSSap1: 10 opakovaných měření, měření po 15 minutách

TB	GNSSap1									
	10 OPAKOVANÝCH MĚŘENÍ				MĚŘENÍ PO 15 MINUTÁCH				10X – PO15	
	S _{z opakování} [mm]		S _{vůči správné} [mm]		S _{z opakování} [mm]		S _{vůči správné} [mm]		S _{vůči správné} [mm]	
	YX	H	YX	H	YX	H	YX	H	YX	H
1	5,9	10,5	8,1	17,3	4,7	11,1	7,0	17,4	1,1	-0,1
2	4,6	14,3	8,4	21,1	5,0	14,4	7,6	20,7	0,8	0,4
3	5,9	11,8	9,1	20,9	6,4	11,3	8,8	19,1	0,3	1,9
4	9,8	11,6	12,9	18,3	9,0	14,2	12,4	15,7	0,5	2,6
5	10,3	11,3	17,3	11,1	8,4	10,9	14,9	10,9	2,4	0,2
6	16,7	22,4	22,7	21,2	13,4	20,0	18,1	19,6	4,6	1,6
7	37,1	56,9	50,1	68,8	36,6	57,2	48,9	63,0	1,2	5,7
\bar{s}	16,7	25,2	23,0	31,2	15,8	25,2	21,6	28,8	1,4	2,4
$\bar{s}_{bez TB7}$	9,8	14,3	14,1	18,7	8,3	14,0	12,2	17,5	1,9	1,2

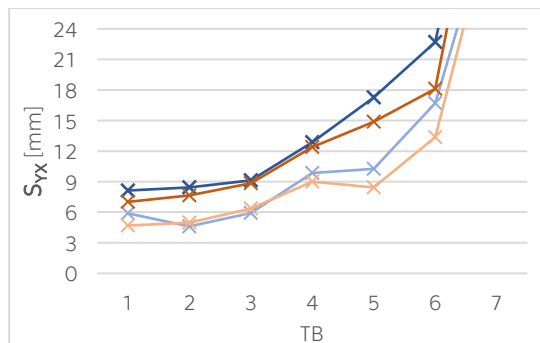
Z posledních dvou sloupců je patrné, že mírně lepší hodnoty byly získány během delšího časového intervalu pro polohovou i výškovou složku. Rozdíly dosahují ve většině případů hodnot do 2 mm, což je lehce zanedbatelné.



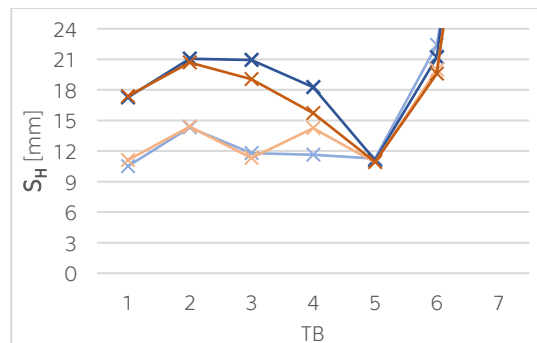
Graf 5 - GNSSap1: sm.o.YX



Graf 6 - GNSSap1: sm.o.H



Graf 7 - GNSSap1: sm.o.YX - detail



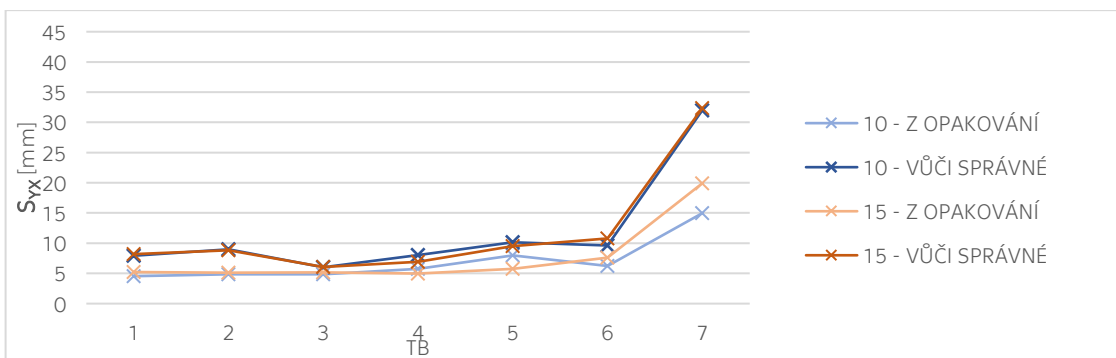
Graf 8 - GNSSap1: sm.o.H - detail

V grafech je patrná velmi malá odlišnost dosažených přesností. Sm.o. z opakování nabývají nižších hodnot a víceméně kopírují sm.o. vůči správné hodnotě. Výjimkou jsou body TB5 a TB6, kdy bylo ve výšce dosaženo stejných přesností. Z jakého důvodu se tak stalo není známo. Počty měření jsou i přes vyřazená odlehlá měření obdobná jako na ostatních bodech.

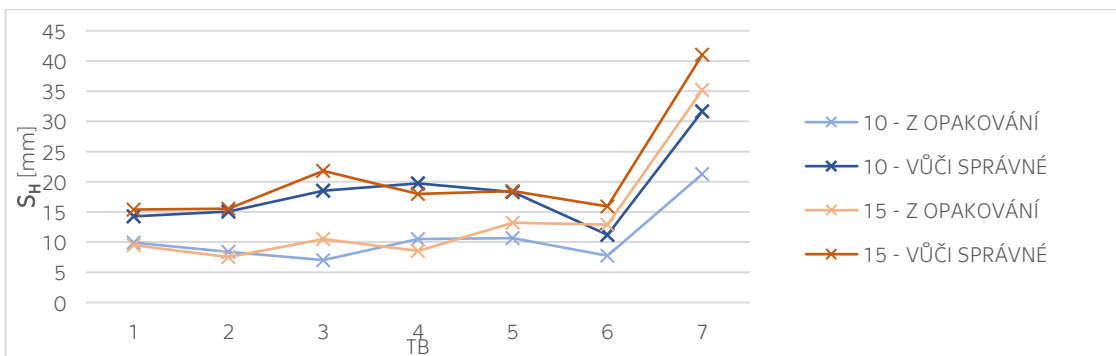
Tabulka 9 - Sm.o. GNSSap2: 10 opakovaných měření, měření po 15 minutách

TB	GNSSap2									
	10 OPAKOVANÝCH MĚŘENÍ				MĚŘENÍ PO 15 MINUTÁCH				10X - PO15	
	S z opakování [mm]		S vůči správné [mm]		S z opakování [mm]		S vůči správné [mm]		S vůči správné [mm]	
	YX	H	YX	H	YX	H	YX	H	YX	H
1	4,5	9,9	7,9	14,3	5,2	9,5	8,2	15,4	-0,3	-1,1
2	4,8	8,4	9,0	15,1	5,1	7,5	8,8	15,5	0,1	-0,5
3	4,8	7,0	6,0	18,5	5,2	10,5	6,1	21,8	-0,1	-3,3
4	5,8	10,5	8,0	19,7	5,0	8,5	6,9	18,0	1,1	1,8
5	8,0	10,6	10,1	18,3	5,7	13,2	9,5	18,4	0,6	-0,1
6	6,2	7,7	9,6	11,2	7,6	12,9	10,8	15,9	-1,2	-4,7
7	15,0	21,3	32,0	31,7	19,9	35,2	32,3	41,0	-0,3	-9,4
\bar{s}	7,8	11,7	14,5	19,4	9,2	16,5	14,6	22,5	-0,1	-3,2
$\bar{s}_{bez TB7}$	5,8	9,1	8,5	16,5	5,7	10,6	8,5	17,7	0,0	-1,2

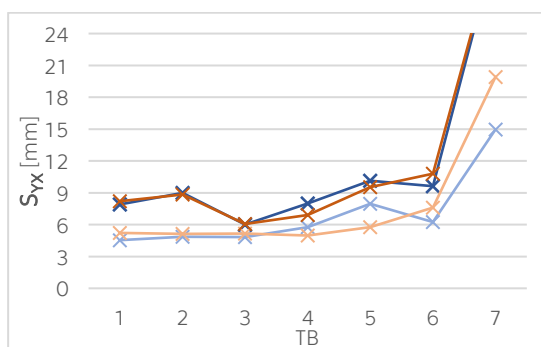
V posledních dvou sloupcích tabulky nabývají rozdíly náhodně kladných a záporných hodnot. V polohové složce dosahují hodnot převážně do 1 mm, což je zanedbatelné. Na délce měřeného intervalu v tomto případě nezáleží. Výšková složka nabývá znatelně vyšších rozdílů, kdy se větší přesnosti dosáhlo během kratšího časového intervalu.



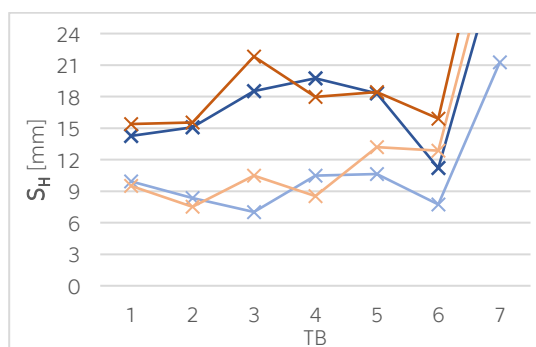
Graf 9 - GNSSap2: sm.o.YX



Graf 10 - GNSSap2: sm.o.H



Graf 11 - GNSSap2: sm.o.YX - detail



Graf 12 - GNSSap2: sm.o.H - detail

Jak již bylo zmíněno v předchozích řádcích, rozdíly v polohové složce jsou minimální. Přesnosti získané ze sm.o. z opakování se výrazně neliší, což je známka obecně přesnějších výsledků získaných novější aparaturou. Výšková složka je naopak pestřejší s výrazným rozdílem od sm.o. z opakování, mimo TB6.

Zhodnocení GNSS aparatur bude vycházet z jednotlivých sm.o. bez TB7, kde přesnosti dosahují výrazně vyšších hodnot, které by výsledky znehodnocovaly. U starší aparatury je vhodnější měřit spíše v delším časovém intervalu. Novější aparatura dosahuje naopak o něco lepších výsledků během kratšího časového intervalu, především ve složce výškové.

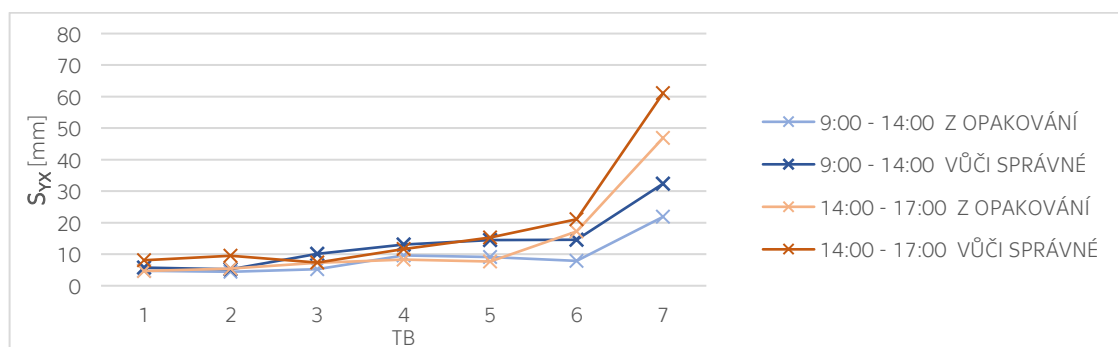
6.2.2 VLIV DENNÍ DOBY

Opět zde budeme vycházet z měření po 15 minutách z důvodu většího množství dat. Porovnáno bude měření dopolední s odpoledním za účelem zjištění, zda má denní doba nějaký vliv na výslednou přesnost. Nejprve se zaměříme na GNSSap1 a poté na GNSSap2. Patříčné hodnoty jsou uvedeny v Tabulkách 10 a 11 a následně graficky zobrazeny. Modrá barva značí dopolední měření, oranžová odpolední. V tabulce se zaměříme čistě na porovnání dopoledního a odpoledního měření, rozdíly uvedené v posledních dvou sloupcích.

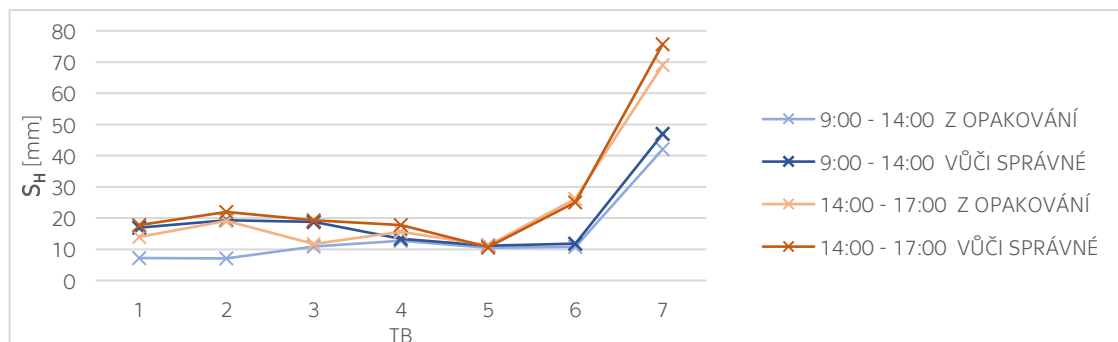
Tabulka 10 - Sm.o. GNSSap1: dopolední a odpolední měření

TB	GNSSap1									
	DOPOLEDNE (9:00 - 14:00)				ODPOLEDNE (14:00 - 17:00)				DOPOL – ODPOD	
	S z opakování [mm]		S vůči správné [mm]		S z opakování [mm]		S vůči správné [mm]		S vůči správné [mm]	
	YX	H	YX	H	YX	H	YX	H	YX	H
1	4,7	7,2	5,8	16,9	4,7	14,0	8,1	17,8	-2,3	-0,9
2	4,4	7,1	5,2	19,3	5,5	19,1	9,5	21,9	-4,2	-2,6
3	5,3	10,9	10,1	18,8	7,3	11,7	7,3	19,3	2,8	-0,5
4	9,7	12,7	13,1	13,3	8,3	15,6	11,7	17,8	1,4	-4,4
5	9,1	10,5	14,5	11,1	7,7	11,3	15,3	10,7	-0,8	0,4
6	7,9	10,7	14,5	11,8	17,2	26,1	21,1	25,1	-6,5	-13,3
7	21,9	42,1	32,4	47,0	46,9	69,0	61,1	75,7	-28,7	-28,8
\bar{s}	10,6	18,4	16,1	22,9	19,7	30,5	26,1	33,7	-10,0	-10,9
$\bar{s}_{\text{bez TB7}}$	7,2	10,1	11,2	15,6	9,4	17,1	13,0	19,3	-1,8	-3,7

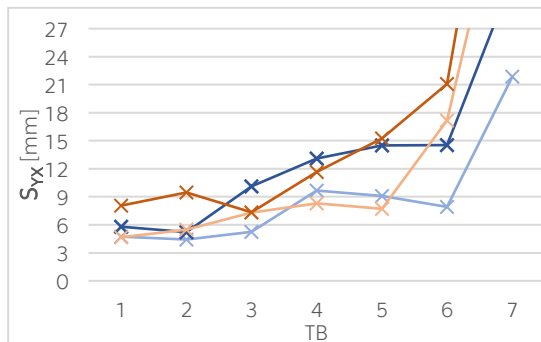
V posledních dvou sloupcích je mezi hodnotami patrná značná odlišnost. Nižších hodnot bylo ale dosaženo během dopoledního měření, a to v poloze i výšce.



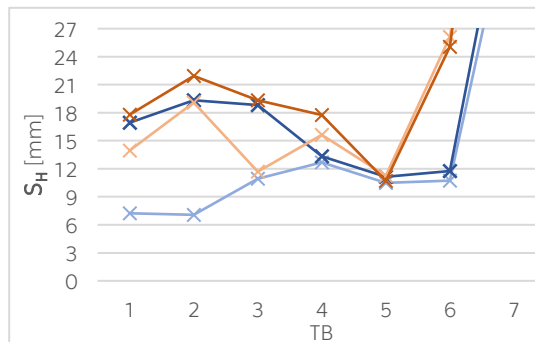
Graf 13 - Delší interval GNSSap1: sm.o.YX



Graf 14 - Delší interval GNSSap1: sm.o.H



Graf 15 - Delší interval GNSSap1: sm.o.YX - detail



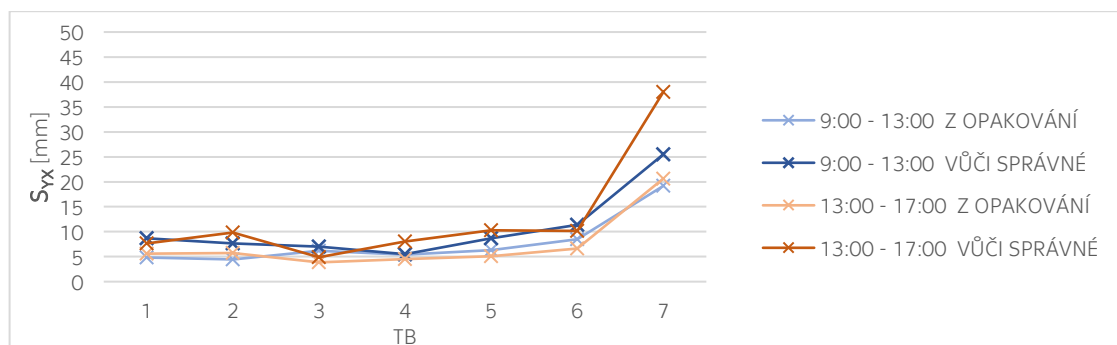
Graf 16 - Delší interval GNSSap1: sm.o.H - detail

Z grafů je patrná větší dosažená přesnost pro většinu TB v dopoledních hodinách. Především pak pro výškovou složku, mimo TB5, kde bylo z neznámých důvodů dosaženo nejlepší přesnosti. Sm.o. z opakování pro polohovou složku nabývají obdobných hodnot jako sm.o. vůči správné hodnotě. U výškové složky bylo v dopoledních hodinách na volnějším prostranství dosaženo značně lepších přesností, až o 12 mm.

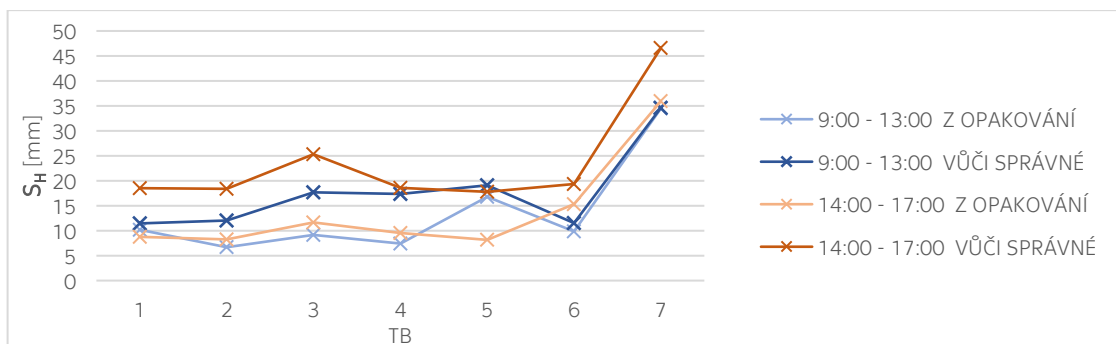
Tabulka 11 - Sm.o. GNSSap2: dopolední a odpolední měření

TB	GNSSap2									
	DOPOLEDNE (9:00 - 13:00)				ODPOLEDNE (13:00 - 17:00)				DOPOL - ODPODOL	
	S z opakování [mm]		S vůči správné [mm]		S z opakování [mm]		S vůči správné [mm]		S vůči správné [mm]	
	YX	H	YX	H	YX	H	YX	H	YX	H
1	4,8	10,2	8,7	11,4	5,6	8,8	7,7	18,5	1,0	-7,1
2	4,4	6,7	7,7	12,0	5,7	8,3	9,9	18,4	-2,2	-6,4
3	6,2	9,1	7,0	17,7	3,9	11,7	4,9	25,3	2,1	-7,6
4	5,4	7,4	5,5	17,3	4,5	9,5	8,1	18,6	-2,6	-1,3
5	6,3	16,8	8,7	19,1	5,1	8,2	10,3	17,8	-1,6	1,3
6	8,5	9,9	11,4	11,5	6,6	15,3	10,2	19,3	1,2	-7,8
7	19,2	34,5	25,5	34,6	20,6	35,9	38,0	46,6	-12,5	-12,0
\bar{s}	9,2	16,3	12,4	19,2	9,2	16,7	16,5	25,4	-4,1	-6,2
$\bar{s}_{bez TB7}$	6,1	10,5	8,4	15,2	5,3	10,6	8,7	19,8	-0,3	-4,6

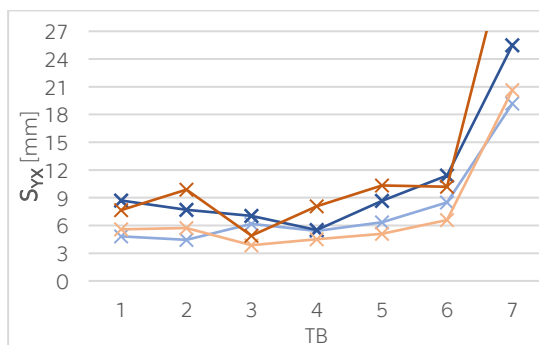
Rozdíly v polohové složce nabývají různých kladných a záporných hodnot s převážně nižšími hodnotami v dopoledních hodinách. Výšková složka je výrazně přesnější také v dopoledních hodinách.



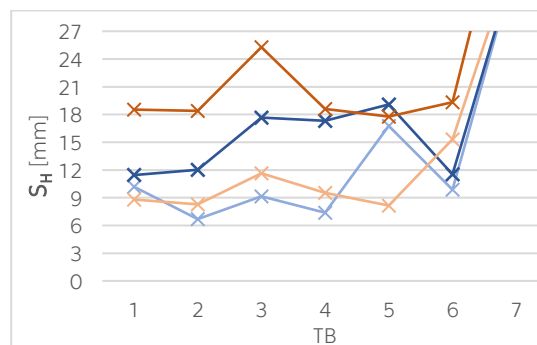
Graf 17 - Delší interval GNSSap2: sm.o.YX



Graf 18 - Delší interval GNSSap2: sm.o.H



Graf 19 - Delší interval GNSSap2: sm.o.YX - detail



Graf 20 - Delší interval GNSSap2: sm.o.H - detail

Závěrem lze říct, že lepší měřické, observační a možná i atmosférické podmínky pro získání větších přesností jsou vhodnější pro obě aparatury v dopoledních hodinách, především pak pro složku výškovou.

6.2.3 PRŮBĚH SM.O. V ČASE

Veškeré výpočty byly provedeny z oprav neboli rozdílů naměřených souřadnic TB od „správných“. Tyto opravy pro složku polohovou (Y, X) a výškovou (H) byly vyneseny v měřených časech do grafů. U starší aparatury je hustota dat nižší z důvodu většího množství vyloučených odlehlých měření. Pro ukázkou jsou součástí přílohy grafy pro TB1 a TB7 (Přílohy 3 a 4). Všechny grafy jsou součástí Elektronické přílohy 3, v listu Časový_vývoj.

6.3 TESTOVÁNÍ STARŠÍ A NOVĚJŠÍ GNSS APARATURY

Na závěr byly vzájemně porovnány obě testované GNSS aparatury se snahou zjistit, zda se změnila přesnost měření. V níže uvedené Tabulce 12 jsou uvedeny relativní (z opakování) a absolutní (vůči „správné“ hodnotě) přesnosti obou aparatur pro kratší časový interval měření (10x) a pro delší časový interval (po15).

Tabulka 12 - Porovnání testovaných aparatur

	Trimble GeoXR (GNSSap1)				Trimble R12i (GNSSap2)			
	S z opakování [mm]		S vůči správné [mm]		S z opakování [mm]		S vůči správné [mm]	
	YX	H	YX	H	YX	H	YX	H
10X	9,8	14,3	14,1	18,7	5,8	9,1	8,5	16,5
PO15	8,3	14,0	12,2	17,5	5,7	10,6	8,5	17,7

Nejprve budou aparatury zhodnoceny jednotlivě. Měření GNSSap1 je nepatrně přesnější při delším časovém intervalu měření. V polohové složce bylo dosaženo o 2 mm nižší hodnoty, ve výškové o 1 mm, což jsou ale pro praxi hodnoty téměř zanedbatelné. GNSSap2 bylo v poloze v obou intervalech dosaženo identických hodnot, v kratším intervalu ve výšce o 1 mm nižší hodnoty, což je známka její vysoké kvality. Lehce překvapivá je hodnota sm.o. H v delším intervalu pro starší aparaturu, která nabývá téměř shodné hodnoty jako u novější aparatury.

Ze vzájemného porovnání vyplývá výrazně lepší přesnost v polohové složce novější aparaturou. Výšková složka je lepší pouze při měření v kratším časovém intervalu, jinak je téměř identická. Nové GNSS aparatury od výrobce Trimble udělaly v průběhu let pokrok především v určení polohy bodu. Výšková přesnost zůstala beze změny, jak již značí stejná garantovaná vertikální přesnost 15 mm + 0,5 ppm.

6.4 POROVNÁNÍ GARANTOVANÝCH A DOSAŽENÝCH PŘESNOSTÍ

Přesnosti garantované výrobcem jsou závislé na vzdálenosti od nejbližší referenční stanice. U starší aparatury bylo využito sítě referenčních stanic CZEPOS s nejbližší stanicí na budově ČÚZK v Kobylicích (kód CPRG), vzdálené zhruba 5,4 km od místa měření. U novější aparatury byla využita síť VRS NOW s nejbližší stanicí na budově společnosti GEOTRONICS Praha, s. r. o. v části Braník (kód TPRA), vzdálené zhruba 8,2 km. V následující tabulce je uvedeno porovnání přesnosti garantované výrobcem s přesností dosažené našim měřením.

Tabulka 13 - Porovnání garantované a dosažené přesnosti

Testovaná aparatura	GeoXR		R12i	
	Garance	Měření	Garance	Měření
Horizontální	12,7 mm	13,2 mm	12,1 mm	8,5 mm
Vertikální	17,7 mm	18,1 mm	19,1 mm	17,1 mm

Přesnost garantovanou výrobcem očekáváme za tzv. ideálních podmínek, tj. na volném prostranství, mírně oblačné počasí bez slunečního záření. Tuto přesnost mírně překračují přesnosti dosažené GNSSap1. Rozdíly jsou řádově v desetinách mm, což lze zanedbat. Novější aparaturou byla naopak dosažena přesnost vyšší, a to především pro horizontální složku o necelé 4 mm.

7 ZÁVĚR

Předmětem této práce bylo zjištění absolutních přesností GNSS RTK měření. Testovány byly dvě aparatury značky Trimble, starší GeoXR a novější R12i. Navrženy byly celkem 3 testy sledující v různých aspektech přesnost měření. První z testů se zaměřuje na vliv postupně zakrývaného obzoru, druhý na vliv délky časového intervalu a zároveň na vliv denní doby, přičemž oba jsou hodnoceny pouze v rámci dané aparatury. Poslední z nich porovnává aparatury mezi sebou. Součástí práce je také srovnání přesností získaných měření s přesnostmi garantovanými výrobcem.

Statickou metodou bylo vytvořeno lokální bodové pole, které posloužilo jako orientace pro úlohu volného stanoviska, ze kterého se totální stanicí polárně zaměřily testovací body. Tímto se vytvořil pevný měřický etalon bodů, s přesností kvalitativně převyšující GNSS měření, na kterém proběhlo samotné testování zkoušených aparatur. Princip spočíval v opakovaném měření, zpočátku 10 opakujících se, vzápětí po 15 minutách. Z naměřených dat byly vypočteny výběrové směrodatné odchylky pro horizontální a vertikální složku. Odlehlá měření byla vyloučena na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ pomocí Studentova rozdělení. Navrženými a provedenými testy bylo dokázáno následující.

VLIV ZAKRYTÉHO OBZORU

U měření s postupně zakrývaným obzorem byl prokázán jeho vliv formou lineárního vzrůstu hodnot výběrových směrodatných odchylek pro absolutní horizontální přesnost. U vertikální přesnosti vliv vzhledem k neurčitému trendu prokázán nebyl, mimo TB7. Vhodná vzdálenost od budovy připadá pro tuto práci na necelých 12 m a větší. Na 6 m (TB7) byla u starší aparatury dokázána až 7x horší přesnost oproti TB1, u novější až 5x horší oproti TB3. Relativní dosažená přesnost (z opakování) kopíruje průběh absolutních přesností (vůči absolutní hodnotě), avšak s výrazně nižšími hodnotami.

VLIV KRÁTKÉHO A DLOUHÉHO ČASOVÉHO ÚSEKU

Nejprve byl testován vliv délky měřeného časového intervalu. Z celkového hodnocení byl odebrán TB7, na kterém přesnosti dosahují razantně vyšších hodnot, které by znehodnocovaly výsledky. Starší aparaturou bylo dosaženo nepatrně vyšších přesností v rámci delšího časového intervalu, v horizontální i vertikální složce. V porovnání s hodinovým intervalem dosahovaly rozdíly hodnot do 2 mm. U novější aparatury prakticky délka intervalu neměla na horizontální přesnost vliv, vzhledem k rozdílům hodnot dosahujících 1 mm. Vertikální přesnost dosahovala vyšších přesností během intervalu hodinového. Následně byl testován vliv denní doby, kde se prokázalo dosažení vyšších absolutních přesností během dopoledních



hodin, především pak pro vertikální složku. Totéž platí pro relativní přesnosti starší aparatury, u novější jsou hodnoty srovnatelné.

POROVNÁNÍ APARATUR

Bylo prokázáno zlepšení přesnosti GNSS aparatur značky Trimble s 10letým rozdílem rokem výroby. V polohové složce se novější aparaturou, oproti starší, při delším časovém úseku dosáhlo vyšší absolutní přesnosti o 3,7 mm, při kratším časovém úseku dokonce o 5,6 mm. Výšková složka zůstala bez větších změn, kdy se při delším časovém úseku dosažené absolutní přesnosti sobě rovnají, u kratšího úseku dosáhla novější aparatura hodnot o 2,2 mm nižších. Relativní přesnosti nabývají oproti absolutním výrazně nižších hodnot. Pro starší aparaturu až o 4,4 mm nižších, u novější aparatury až o 7,3 mm.

POROVNÁNÍ GARANTOVANÉ A DOSAŽENÉ PŘESNOSTI

Za účelem zjištění věrohodnosti garantovaných přesností proběhlo jejich porovnání s přesnostmi dosaženými během testování. Starší aparatura víceméně splnila garantovanou přesnost. Mírné překročení může být způsobeno například neideálním prostředím, ve kterém bylo měření provedeno. Jedná se o hodnoty do 0,5 mm, které lze zanedbat. Novější aparatura naopak předčila garantovanou přesnost, pro horizontální složku o 3,6 mm a vertikální o 2 mm.

Závěrem lze říct, že novější aparatura si v průběhu testování vedla oproti starší mnohem lépe. V nepříznivých podmínkách vykazuje vyšší přesnosti a jejich stabilitu, přičemž jí postačuje kratší časový interval s menším počtem měření. Toto ale platí pouze pro polohovou složku, kdy lze dosáhnout přesnosti do 1 cm. Výšková složka zůstala takřka beze změny. Přesnosti garantované výrobcem Trimble lze považovat za správné, i když lze s novějšími přístroji dosáhnout za běžných podmínek o něco přesnějších výsledků.



8 POUŽITÉ ZKRATKY

<i>CZEPOS</i>	Česká síť permanentních stanic pro určování polohy
<i>ČÚZK</i>	Český úřad zeměměřický a katastrální
<i>EGNOS</i>	European Geostationary Navigation Overlay Service
<i>GLONASS</i>	Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja systémá
<i>GNSS</i>	Global Navigation Satellite System
<i>IMU</i>	Inertial Measurement Unit
<i>IRNSS</i>	Indian Regional Navigation Satellite System
<i>MSAS</i>	Multi-functional Satellite Augmentation System
<i>NAVSTAR GPS</i>	Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System
<i>PRN</i>	Pseudorange noise
<i>QZSS</i>	Quasi-Zenith Satellite System
<i>RMS</i>	Root-Mean-Square
<i>RTK</i>	Real Time Kinematic
<i>SBAS</i>	Satellite Based Augmentation System
<i>Sm.o.</i>	Výběrová směrodatná odchylka
<i>TB</i>	Testovací body
<i>WAAS</i>	Wide Area Augmentation System

9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Výrobní čísla měřických aparatur	14
Tabulka 2 - GNSS Trimble GeoXR: Satelitní signály	15
Tabulka 3 - GNSS Trimble GeoXR: Parametry přístroje	15
Tabulka 4 - Trimble S6 HP: Technické parametry	19
Tabulka 5 - GNSS Trimble R12i: Satelitní signály	24
Tabulka 6 - GNSS Trimble R12i: Parametry přístroje	25
Tabulka 7 - Sm.o. měření po 15 min: GNSSap1 a GNSSap2	28
Tabulka 8 - Sm.o. GNSSap1: 10 opakovaných měření, měření po 15 minutách.....	30
Tabulka 9 - Sm.o. GNSSap2: 10 opakovaných měření, měření po 15 minutách.....	31
Tabulka 10 - Sm.o. GNSSap1: dopolední a odpolední měření.....	33
Tabulka 11 - Sm.o. GNSSap2: dopolední a odpolední měření.....	34
Tabulka 12 - Porovnání testovaných aparatur	36
Tabulka 13 - Porovnání garantované a dosažené přesnosti	36



10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Statická metoda: Trimble GeoXR [13].....	14
Obrázek 2 - Statická metoda: měřická aparatura.....	14
Obrázek 3 - Statická metoda: grafické znázornění bodů.....	15
Obrázek 4 - Statická metoda: stabilizace.....	16
Obrázek 5 - Statická metoda: měřický hřeb.....	16
Obrázek 6 - Statická metoda: měřický set.....	17
Obrázek 7 - Statická metoda: rozmístění aparatur.....	17
Obrázek 8 - Statická metoda: prostředí programu TBC.....	18
Obrázek 9 - Trimble S6 HP [14].....	19
Obrázek 10 - TB: stabilizace v parčíku.....	20
Obrázek 11 - TB: detailnější pohled na stabilizaci.....	20
Obrázek 12 - Grafické znázornění situace.....	21
Obrázek 13 - TB: prostředí programu Groma.....	22
Obrázek 14 - GNSSap1: Trimble GeoXR + Zephyr Model 2 [15].....	23
Obrázek 15 - GPS2: Trimble R12i [11].....	25

11 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 - Měření po 15 min: sm.o. YX.....	29
Graf 2 - Měření po 15 min: sm.o. H.....	29
Graf 3 - Měření po 15 min: sm.o. YX - detail.....	29
Graf 4 - Měření po 15 min: sm.o. H - detail.....	29
Graf 5 - GNSSap1: sm.o.YX.....	30
Graf 6 - GNSSap1: sm.o.H.....	31
Graf 7 - GNSSap1: sm.o.YX - detail.....	31
Graf 8 - GNSSap1: sm.o.H - detail.....	31
Graf 9 - GNSSap2: sm.o.YX.....	32
Graf 10 - GNSSap2: sm.o.H.....	32
Graf 11 - GNSSap2: sm.o.YX - detail.....	32
Graf 12 - GNSSap2: sm.o.H - detail.....	32
Graf 13 - Delší interval GNSSap1: sm.o.YX.....	33
Graf 14 - Delší interval GNSSap1: sm.o.H.....	33
Graf 15 - Delší interval GNSSap1: sm.o.YX - detail.....	34
Graf 16 - Delší interval GNSSap1: sm.o.H - detail.....	34
Graf 17 - Delší interval GNSSap2: sm.o.YX.....	34
Graf 18 - Delší interval GNSSap2: sm.o.H.....	35
Graf 19 - Delší interval GNSSap2: sm.o.YX - detail.....	35
Graf 20 - Delší interval GNSSap2: sm.o.H - detail.....	35



12 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

LITERATURA

- [1] HAMPACHER, Miroslav a Martin ŠTRONER. Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. Vydání druhé, upravené a doplněné. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015. ISBN 978-80-01-05843-5.

INTERNETOVÉ ZDROJE

- [2] ŠTRONER, Martin. *Globální navigační systémy (GNSS)* [online]. Praha [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://k154.fsv.cvut.cz/wp-content/uploads/2022/01/GNSS_obs.pdf
- [3] BENEŠ, Jiří. *Měření parametrů GNSS přijímačů*. [online]. Brno, 2020, 103 s. [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=209121. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Ing. Tomáš Jílek, Ph.D.
- [4] ŠTRONER, Martin. *Teorie chyb a vyrovnávací počet 1: Úvod* [online]. In: . s. 19 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: https://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/TCH1/tch_pred_1.pdf
- [5] RAPANT, Petr. *Družicové polohové systémy*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2002. ISBN 80-248-0124-8. Dostupné také z: <https://web.archive.org/web/20121113151008/http://gis.vsb.cz/dokumenty/dns-gps/view>
- [6] ŘÍHA, Jan. *Moderní přístrojová technika: Vybrané kapitoly: GNSS* [online]. 2014, 46 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://spszem.cz/storage/files/1363/Moderni-pristrojova-technika-GNSS.pdf>
- [7] MYSLIVEC, Jan. *Testování přesnosti a využitelnosti GNSS přijímače Leica GS18* [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/93179>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.
- [8] *Trimble GeoXR Datasheet: GeoExplorer 6000 Series* [online]. In: . s. 2 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <http://www.laserscangst.com/images/geoexplorer.pdf>
- [9] *Trimble Zephyr 2 Antennas Datasheet* [online]. In: . s. 2 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: https://oemgnss.trimble.com/wp-content/uploads/2020/10/Zephyr_Antenna_2_DS_01_17.pdf
- [10] *Totální stanice Trimble S6: Technický popis* [online]. In: s. 4 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/53678538/technicky-popis>
- [11] *Trimble R12i: Technický popis* [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.r12i.trimble.com/r12i/img/Datasheet%20-%20Trimble%20R12i%20GNSS%20Receiver%20-%20Czech%20-%20Screen.pdf>
- [12] *Emlid, 2022, How RTK works, YouTube video*. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ieearzWTCZw>

OBRÁZKY

Obrázek 1	[13]	Trimble GeoXR [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/Trimble-Geoexplorer-6000-Series-GeoXR-handheld_1976983976.html
Obrázek 2		vlastní tvorba
Obrázek 3		vlastní tvorba pomocí AutoCAD 2023 studentská verze
Obrázky 4-8		vlastní tvorba
Obrázek 9	[14]	Totální stanice Trimble S6 HP [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/ROBOTIC-TOTAL-STATION-TRIMBLE-S6_60132898564.html
Obrázky 10-11		vlastní tvorba
Obrázek 12		vlastní tvorba pomocí AutoCAD 2020 studentská verze
Obrázek 13		vlastní tvorba
Obrázek 14	[15]	Trimble GeoXR + Zephyr Model 2 [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: https://us.all.biz/trimble-geoxr-network-rover-g175674
Obrázek 15	[11]	Trimble R12i: Technický popis [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: https://www.r12i.trimble.com/r12i/img/Datasheet%20-%20Trimble%20R12i%20GNSS%20Receiver%20-%20Czech%20-%20Screen.pdf

13 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 - Výsledky statické metody
- Příloha 2 - Výsledné souřadnice TB
- Příloha 3 - Průběh sm.o. v závislosti na čase pro TB1
- Příloha 4 - Průběh sm.o. v závislosti na čase pro TB7
- Příloha 5 - Sm.o. pro kratší interval měření
- Příloha 6 - Sm.o. pro delší interval měření

14 SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH

- | | |
|---------------------------------------------|---------------------------------|
| Elektronická příloha 1 - 211115_GNSSap1.txt | (Trimble GeoXR protokol měření) |
| Elektronická příloha 2 - 211220_GNSSap2.txt | (Trimble R12i protokol měření) |
| Elektronická příloha 3 - GNSS_VYSLEDKY.xlsx | (hodnocení zpracovaných dat) |

PŘÍLOHA 1 – VÝSLEDNÉ SOUŘADNICE STATICKÉ METODY

1.DEN MĚŘENÍ

BOD	Y [m]	X [m]	H [m]
a1	744920.959	1040968.527	220.314
a2	744920.963	1040968.530	220.325
a3	744920.963	1040968.529	220.316
a4	744920.962	1040968.525	220.324
a6	744920.960	1040968.529	220.322
a7	744920.959	1040968.525	220.331
a8	744920.964	1040968.529	220.317
a9	744920.963	1040968.530	220.320
a10	744920.958	1040968.523	220.344

2.DEN MĚŘENÍ

BOD	Y [m]	X [m]	H [m]
a1	744920.957	1040968.530	220.327
a2	744920.956	1040968.527	220.326
b1	744903.654	1040953.062	219.528
b2	744903.654	1040953.059	219.529
c1	744896.273	1040936.736	219.180
c2	744896.273	1040936.735	219.172

CPRG 739771.658 1039190.639 311.247

b1	744903.656	1040953.062	219.514
b2	744903.660	1040953.064	219.528
b3	744903.659	1040953.064	219.517
b4	744903.658	1040953.059	219.523
b5	744903.657	1040953.065	219.517
b6	744903.657	1040953.062	219.523
b7	744903.657	1040953.061	219.527
b8	744903.659	1040953.063	219.510
b9	744903.660	1040953.064	219.518
b10	744903.655	1040953.056	221.141

c1	744896.527	1040936.419	217.746
c2	744896.440	1040936.303	217.733
c3	744896.437	1040936.311	217.711
c4	744896.278	1040936.736	219.208
c6	744896.277	1040936.737	219.167
c7	744896.277	1040936.736	219.171
c8	744896.278	1040936.740	219.153
c9	744896.280	1040936.738	219.161
c10	744896.274	1040936.732	219.188

CPRG 739771.658 1039190.639 311.247

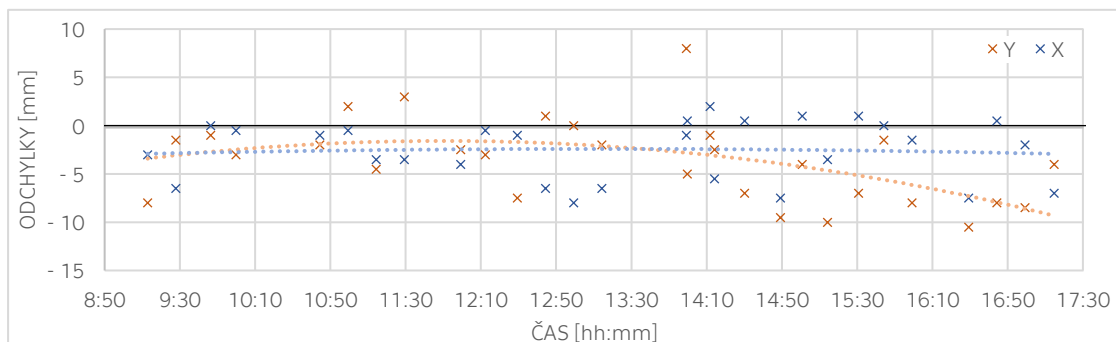
BOD	σ_Y [mm]	σ_X [mm]	σ_{YX} [mm]	σ_H [mm]	Y [m]	X [m]	H [m]
a	2.92	2.31	2.63	7.67	744920.960	1040968.528	220.325
b	2.27	2.53	2.40	6.49	744903.657	1040953.062	219.522
c	2.67	2.08	2.40	15.22	744896.276	1040936.736	219.175

PŘÍLOHA 2 – VÝSLEDNÉ SOUŘADNICE TB

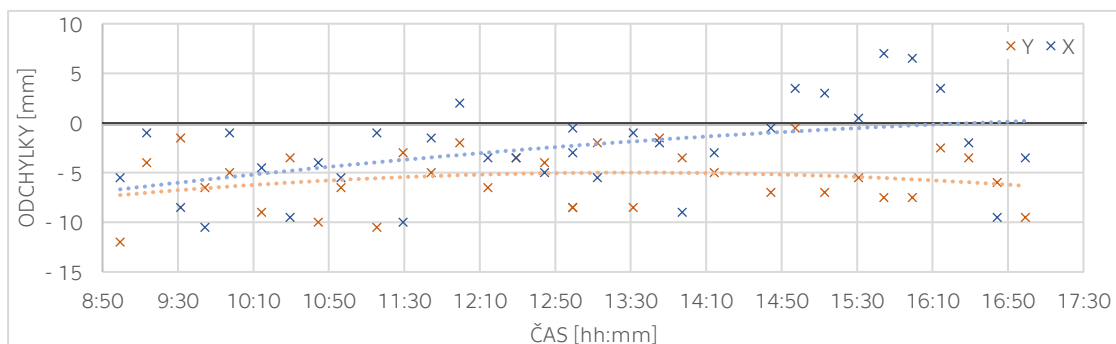
	CB	Y [m]	X [m]	H [m]
URČENÍ TB PRO 1. MĚŘENÍ S GNSSap1	4005	744939.361	1040940.312	222.733
	21	744920.958	1040968.529	220.324
	22	744928.914	1040959.778	220.716
	23	744937.326	1040951.143	221.099
	24	744943.853	1040944.586	221.349
	25	744950.547	1040937.488	221.625
	26	744956.619	1040931.130	222.221
	27	744960.946	1040926.841	222.252
URČENÍ TB PRO 2. MĚŘENÍ S GNSSap1	4006	744937.809	1040940.334	222.635
	31	744920.958	1040968.528	220.324
	32	744928.915	1040959.777	220.716
	33	744937.326	1040951.144	221.098
	34	744943.853	1040944.586	221.349
	35	744950.549	1040937.493	221.624
	36	744956.620	1040931.131	222.221
	37	744960.947	1040926.842	222.251
Budova fakulty	40	744965.811	1040923.393	224.678
	41	744951.287	1040910.461	222.296
	42	744956.634	1040915.515	254.276
URČENÍ TB PRO 1. MĚŘENÍ S GNSSap2	4009	744938.099	1040941.520	222.700
	51	744920.962	1040968.527	220.324
	52	744928.921	1040959.777	220.718
	53	744937.322	1040951.142	221.100
	54	744943.855	1040944.585	221.350
	55	744950.550	1040937.486	221.626
	56	744956.622	1040931.134	222.221
	57	744960.948	1040926.841	222.252
URČENÍ TB PRO 2. MĚŘENÍ S GNSSap2	4010	744938.439	1040942.695	222.687
	61	744920.963	1040968.528	220.323
	62	744928.919	1040959.776	220.718
	63	744937.319	1040951.141	221.099
	64	744943.852	1040944.579	221.350
	65	744950.548	1040937.488	221.625
	66	744956.619	1040931.133	222.220
	67	744960.944	1040926.837	222.252

PŘÍLOHA 3 – PRŮBĚH SM.O. V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO TB1

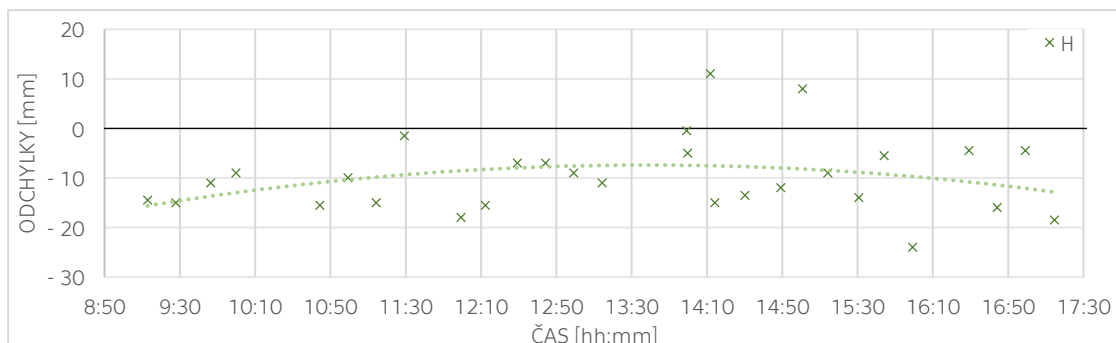
Časový vývoj oprav YX: GNSSap1 pro TB1



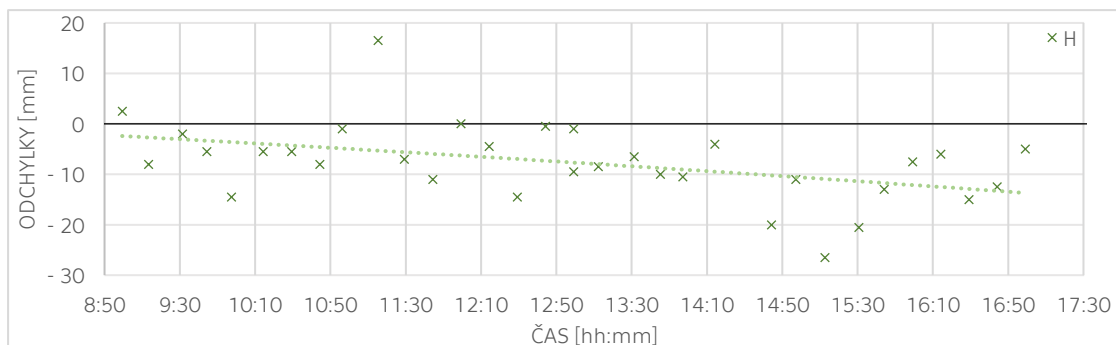
Časový vývoj oprav YX: GNSSap2 pro TB1



Časový vývoj oprav H: GNSSap1 pro TB1

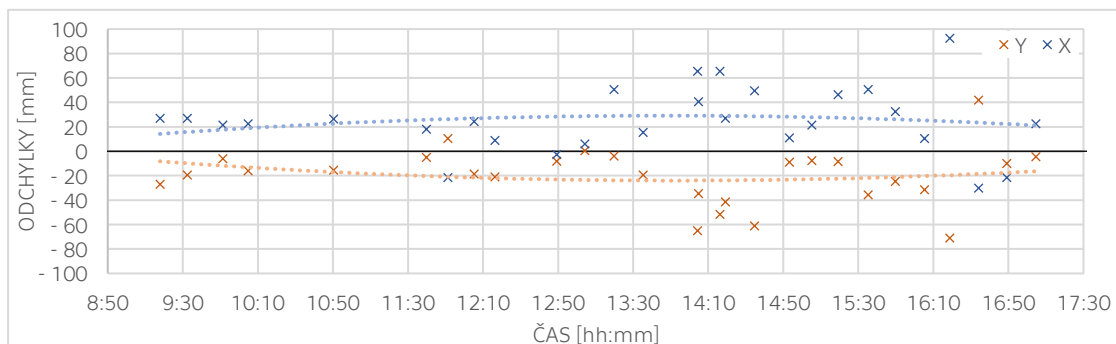


Časový vývoj oprav H: GNSSap2 pro TB1

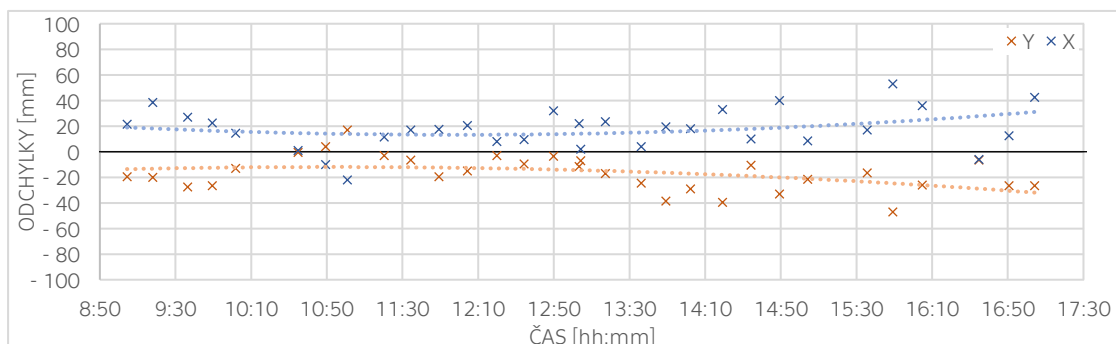


PŘÍLOHA 4 – PRŮBĚH SM.O. V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO TB7

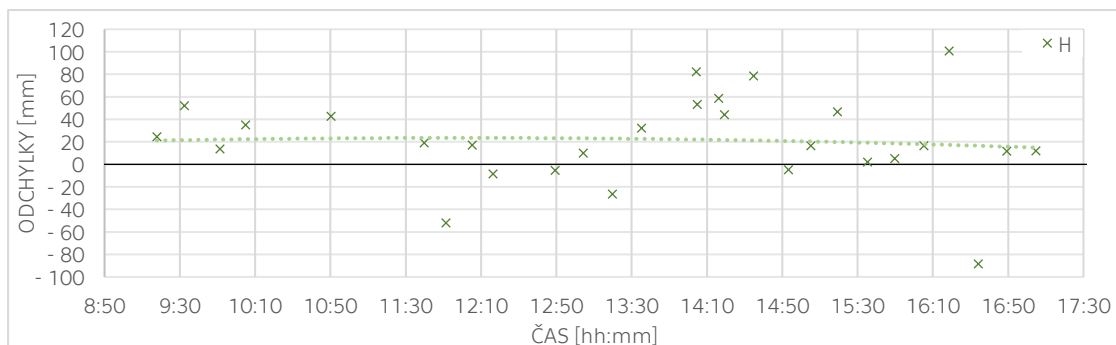
Časový vývoj oprav YX: GNSSap1 pro TB7



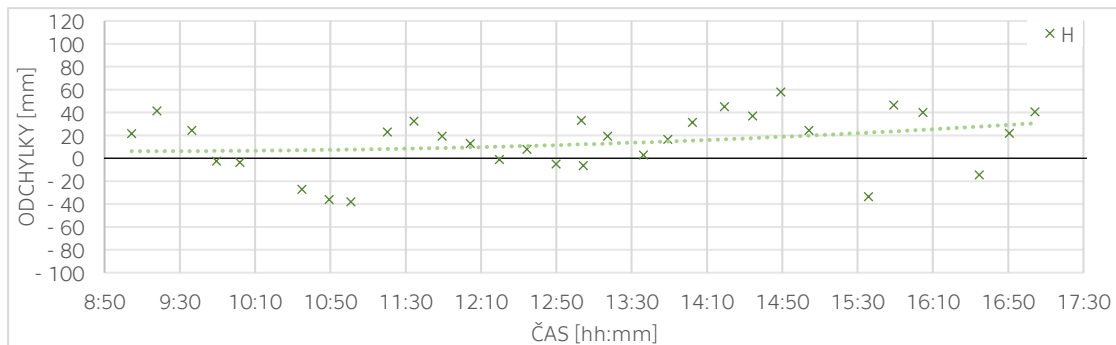
Časový vývoj oprav YX: GNSSap2 pro TB7



Časový vývoj oprav H: GNSSap1 pro TB7



Časový vývoj oprav H: GNSSap2 pro TB7



PŘÍLOHA 5 – SM.O. PRO KRATŠÍ INTERVAL MĚŘENÍ

GNSSap1 – DOPOLEDNE (9:00 - 10:00)	S opakování [mm]					S vůči správné [mm]			
	TB	Y	X	YX	Z	Y	X	YX	Z
1	5,0	7,2	6,2	7,7		5,4	9,7	7,9	13,9
2	1,5	5,6	4,1	7,2		3,1	7,7	5,9	12,1
3	4,5	5,2	4,9	10,5		13,8	5,6	10,5	17,7
4	5,4	13,4	10,2	11,7		14,6	12,8	13,8	14,7
5	6,6	14,9	11,5	8,8		15,7	16,9	16,3	9,1
6	10,6	14,9	12,9	11,6		21,4	23,8	22,6	10,9
7	13,3	9,4	11,6	30,1		27,8	37,1	32,7	51,8
\bar{s}	7,7	10,8	9,4	14,5		16,6	19,2	17,9	23,2
$\bar{s}_{bez TB7}$	6,2	11,1	9,0	9,8		13,8	14,1	14,0	13,4

GNSSap1 – ODPOLEDNE (14:00 - 15:00)	S opakování [mm]					S vůči správné [mm]			
	TB	Y	X	YX	Z	Y	X	YX	Z
1	3,9	6,9	5,6	12,7		9,1	7,6	8,4	20,1
2	4,7	5,4	5,1	18,9		13,6	5,5	10,4	27,2
3	7,0	6,5	6,8	12,9		7,5	7,4	7,4	23,8
4	8,6	10,1	9,4	11,5		13,1	10,7	11,9	21,2
5	5,7	11,1	8,8	13,3		19,6	16,6	18,2	12,8
6	20,6	18,8	19,8	29,5		24,6	20,9	22,8	27,9
7	64,5	32,9	51,2	74,6		69,7	55,2	62,9	82,3
\bar{s}	26,1	15,9	21,6	32,6		30,1	24,0	27,2	37,6
$\bar{s}_{bez TB7}$	10,2	10,8	10,5	17,6		15,7	12,7	14,3	22,7

GNSSap2 – DOPOLEDNE (9:00 - 10:00)	S opakování [mm]					S vůči správné [mm]			
	TB	Y	X	YX	Z	Y	X	YX	Z
1	4,1	6,5	5,4	9,5		9,4	8,7	9,1	12,7
2	2,8	8,0	6,0	6,1		9,3	9,8	9,6	11,8
3	3,9	7,6	6,0	5,9		3,9	9,5	7,3	19,2
4	4,8	7,5	6,3	6,1		4,6	8,1	6,6	18,8
5	8,5	10,5	9,5	10,7		11,7	10,0	10,9	19,7
6	7,1	7,2	7,1	8,1		13,5	8,0	11,1	9,9
7	10,9	14,0	12,5	20,9		32,9	37,5	35,3	34,6
\bar{s}	6,6	9,1	7,9	10,8		15,2	16,5	15,8	19,7
$\bar{s}_{bez TB7}$	5,6	8,0	6,9	8,0		9,4	9,1	9,2	15,8

GNSSap2 – ODPOLEDNE (13:00 - 14:00)	S opakování [mm]					S vůči správné [mm]			
	TB	Y	X	YX	Z	Y	X	YX	Z
1	4,3	2,3	3,4	10,3		8,3	3,9	6,5	15,7
2	3,0	3,7	3,4	10,1		10,8	4,8	8,4	17,7
3	2,8	3,7	3,3	8,0		4,5	4,3	4,4	17,9
4	5,3	5,0	5,2	13,5		8,5	9,9	9,2	20,7
5	5,1	6,7	6,0	10,6		11,4	6,7	9,3	16,9
6	4,0	6,2	5,2	7,3		9,4	6,1	7,9	12,4
7	19,4	14,4	17,1	21,7		34,3	20,7	28,3	28,4
\bar{s}	8,3	7,1	7,7	12,5		15,5	9,7	12,9	19,1
$\bar{s}_{bez TB7}$	4,2	4,9	4,5	10,2		9,1	6,3	7,8	17,0

PŘÍLOHA 6 – SM.O. PRO DELŠÍ INTERVAL MĚŘENÍ

GNSSap1 – DOPOLEDNE (9:00 - 14:00)	S opakování [mm]				
	TB	Y	X	YX	Z
1	5,5	3,8	4,7	7,2	
2	2,0	5,9	4,4	7,1	
3	5,7	4,8	5,3	10,9	
4	6,5	12,0	9,7	12,7	
5	8,7	9,5	9,1	10,5	
6	8,4	7,3	7,9	10,7	
7	19,1	24,3	21,9	42,1	
\bar{s}	9,4	11,7	10,6	18,4	
$\bar{s}_{bez TB7}$	6,5	7,8	7,2	10,1	

S vůči správné [mm]			
Y	X	YX	Z
5,7	5,9	5,8	16,9
3,1	6,7	5,2	19,3
13,1	5,8	10,1	18,8
14,1	11,9	13,1	13,3
17,3	11,0	14,5	11,1
16,7	12,1	14,5	11,8
28,1	36,1	32,4	47,0
15,9	16,2	16,1	22,9
12,8	9,3	11,2	15,6

GNSSap1 – ODPOLEDNE (14:00 - 17:00)	S opakování [mm]				
	TB	Y	X	YX	Z
1	4,4	4,9	4,7	14,0	
2	5,2	5,7	5,5	19,1	
3	6,6	8,0	7,3	11,7	
4	7,7	8,8	8,3	15,6	
5	6,1	9,1	7,7	11,3	
6	12,1	21,1	17,2	26,1	
7	44,4	49,3	46,9	69,0	
\bar{s}	18,1	21,2	19,7	30,5	
$\bar{s}_{bez TB7}$	7,4	11,0	9,4	17,1	

S vůči správné [mm]			
Y	X	YX	Z
10,1	5,4	8,1	17,8
12,2	5,5	9,5	21,9
7,0	7,7	7,3	19,3
12,5	10,8	11,7	17,8
17,6	12,5	15,3	10,7
20,7	21,4	21,1	25,1
56,3	65,5	61,1	75,7
25,0	27,1	26,1	33,7
14,1	11,9	13,0	19,3

GNSSap2 – DOPOLEDNE (9:00 - 13:00)	S opakování [mm]				
	TB	Y	X	YX	Z
1	4,4	5,2	4,8	10,2	
2	3,6	5,1	4,4	6,7	
3	4,3	7,6	6,2	9,1	
4	4,6	6,1	5,4	7,4	
5	6,7	5,9	6,3	16,8	
6	8,7	8,3	8,5	9,9	
7	16,6	21,4	19,2	34,5	
\bar{s}	8,2	10,1	9,2	16,3	
$\bar{s}_{bez TB7}$	5,7	6,5	6,1	10,5	

S vůči správné [mm]			
Y	X	YX	Z
9,4	7,9	8,7	11,4
8,6	6,7	7,7	12,0
4,7	8,8	7,0	17,7
4,7	6,2	5,5	17,3
10,8	5,8	8,7	19,1
13,3	9,1	11,4	11,5
21,3	29,1	25,5	34,6
11,7	13,0	12,4	19,2
9,1	7,5	8,4	15,2

GNSSap2 – ODPOLEDNE (13:00 - 17:00)	S opakování [mm]				
	TB	Y	X	YX	Z
1	3,9	6,9	5,6	8,8	
2	4,0	7,1	5,7	8,3	
3	4,0	3,8	3,9	11,7	
4	3,7	5,2	4,5	9,5	
5	4,4	5,7	5,1	8,2	
6	6,4	6,8	6,6	15,3	
7	16,8	23,8	20,6	35,9	
\bar{s}	7,6	10,6	9,2	16,7	
$\bar{s}_{bez TB7}$	4,5	6,0	5,3	10,6	

S vůči správné [mm]			
Y	X	YX	Z
8,5	6,8	7,7	18,5
12,0	7,1	9,9	18,4
5,7	4,0	4,9	25,3
9,6	6,1	8,1	18,6
12,8	6,9	10,3	17,8
12,8	6,6	10,2	19,3
38,4	37,5	38,0	46,6
17,5	15,3	16,5	25,4
10,6	6,3	8,7	19,8