



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV GEODÉZIE**

INSTITUTE OF GEODESY

## **ANALÝZA PŘESNOSTI SOUČASNÝCH GNSS MĚŘIDEL**

ACCURACY ANALYSIS OF CURRENT GNSS SENSORS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Ondřej Jabůrek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. JIŘÍ BUREŠ, Ph.D.**

**BRNO 2022**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N0532A260001 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav geodézie

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Ondřej Jabůrek
Název	Analýza přesnosti současných GNSS měřidel
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

---

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

---

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

## PODKLADY A LITERATURA

ANDĚL J. – Matematická statistika, SNTL, Praha 1978

BÖHM J., RADOUCH V., HAMPACHER M. – Teorie chyb a vyrovnávací počet, GKP Praha, 1990

BUREŠ, J. Optimalizace procesu měření GPS-RTK při využití CZEPOS. In 44. geodetické informační dny. 1. Brno: ECON Publishing, s.r.o., 2008. s. 124-136. ISBN: 978-80-86433-50-9.

BUREŠ, J. Analýza experimentálních měření GPS - RTK. Geodetický a kartografický obzor, 2009, roč. 55/ 97, č. 4, s. 75-87. ISSN: 0016- 7096.

BUREŠ, J. Přesné pozicování technologií GNSS- RTK na liniových stavbách. In XII. mezinárodní konference GEODÉZIE A KARTOGRAFIE V DOPRAVĚ. 1. Olomouc: Český svaz geodetů a kartografů, 2014. s. 89-99. ISBN: 978-80-02-02553- 5.

BUREŠ J., ŠVÁBENSKÝ O., WEIGEL J. - Některé problémy spolehlivosti určování polohy GPS. Seminář s mezinárodní účastí "Současný stav a vývoj bodových polí", sborník referátů, str. 93-99, Brno, ČR, ECON Publishing, 2004. ISBN 80-86433-29-3

ŠVÁBENSKÝ O., WEIGEL J., BUREŠ J. - Aspekty přesného vyhodnocení GPS měření v lokálních účelových sítích. Seminář s mezinárodní účastí "Zpracování měření GPS", sborník referátů, str. 73-78, VUT v Brně, ČR, 2003. ISBN 80-86433-19-6

Sborník ze semináře "GPS a speciální geodetické práce", VUT v Brně, 2000

Sborník ze semináře "Diferenční systémy a RTK", VUT v Brně, 2002, ISBN 80-86433-09-9

Sborník ze semináře "Současný stav a vývoj bodových polí", VUT v Brně, 2004, ISBN 80-86433-29-3

Firemní dokumentace Topcon

Firemní dokumentace Sokkia

<https://czepos.cuzk.cz/>

<https://positioningservices.trimble.com/services/vrs/vrs-now/>

<http://topnet.gb-geodezie.cz/topnet/>

<https://www.georbit.cz/>

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Pro dvě různé současné aparatury GNSS navrhnete vhodné testovací postupy s cílem porovnání jejich vlastností a přesnosti v podmínkách vybraných permanentních sítí v ČR. Realizujte testovací postupy, vyhodnoťte je a interpretejte výsledky.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

---

doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRACT**

The purpose of this thesis is to test and analyze the accuracy of determining the position and heights of contemporary GNSS receivers in RTK mode using the network of permanent stations CZEPOS with VRS3 - iMAX - MSM product. The test procedures are intended to provide representative results with potential use in conventional surveying applications. The goal of the thesis is to obtain measured data, analyze this data and evaluate the results. Based on this results we should be able to compare the tested devices. The comparison is intended to carry out an information that will help us to select a more suitable receiver for a particular application in the common practice of surveyor.

## **KEYWORDS**

GNSS, IMU, RTK, VRS, CZEPOS, Topcon, Sokkia, test, accuracy

## **ABSTRAKT**

Cílem této práce je testování a analýza přesnosti určení polohy a výšky současných GNSS měřidel v režimu RTK s využitím sítě permanentních stanic CZEPOS a produktu VRS3 - iMAX - MSM. Testovací postupy jsou zamýšleny tak, aby poskytly reprezentativní výsledky s možností uplatnění při běžných geodetických aplikacích. Cílem diplomové práce je získat měřená data, tyto data zanalyzovat, zhodnotit zjištěné výsledky na jejichž základě si budeme moci realizovat srovnání testovaných měřidel. Srovnání má poskytnout takové informace, které poslouží k volbě vhodnějšího přijímače pro konkrétní aplikace v běžné praxi geodeta.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

GNSS, IMU, RTK, VRS, CZEPOS, Topcon, Sokkia, testování, přesnost

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Bc. Ondřej Jabůrek *Analýza přesnosti současných GNSS měřidel*. Brno, 2022. 78 s.,  
0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,  
Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Analýza přesnosti současných GNSS měřidel* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 17. 5. 2022

---

Bc. Ondřej Jabůrek  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Analýza přesnosti současných GNSS měřidel* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17. 5. 2022

---

Bc. Ondřej Jabůrek  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl poděkovat doc. Ing. Jiřímu Burešovi, Ph.D. za poskytnuté rady, cenné připomínky a především za ochotu při sjednávání termínů měření a konzultací.

# Obsah

1 Úvod .....	10
2 Přehled o vybraných souvislostech GNSS měření v reálném čase .....	11
2.1 Sítě permanentních stanic na území ČR.....	11
2.1.1 Služby CZEPOS.....	11
2.2 Faktor snížení přesnosti DOP (Dilution of Precision).....	14
2.2.1 Jednotlivé faktory snížení přesnosti .....	16
2.3 Testování normality .....	17
2.3.1 Rozdělení náhodných veličin .....	17
2.3.2 Intervalové odhady.....	18
2.3.3 Statistické testy normality .....	18
2.3.4 Centrální tendence.....	21
2.3.5 Šikmost a špičatost.....	22
2.3.6 Korelace .....	24
2.4 Kompenzace náklonu.....	26
2.4.1 IMU a INS.....	26
2.4.2 Přístupy ke kompenzaci náklonu.....	28
3 Testovaná GNSS měřidla a použité testovací postupy .....	32
3.1 Specifikace použitých GNSS měřidel .....	32
3.1.1 TOPCON HIPER HR.....	32
3.1.2 SOKKIA GCX3 .....	33
3.2 Specifikace použitých testovacích postupů.....	36
3.2.1 Testovací měření na dálkoměrné a GNSS základně Brno-jih .....	36
3.2.2 Testovací měření na kalibrační GNSS základně TUBO FAST VUT v Brně .....	37
4 Vyhodnocení naměřených dat a analýza přesnosti .....	38
4.1 Z hlediska normálního rozdělení.....	38
4.1.1 Krátké intervaly.....	39
4.1.2 Kontinuální 45hodinová observace .....	42
4.2 Výpočet výběrových směrodatných odchylek .....	44
4.2.1 Krátké intervaly.....	44
4.2.2 Kontinuální 45hodinová observace .....	45



4.3 Analýza vývoje směrodatných odchylek.....	46
4.3.1 Krátké intervaly .....	46
4.3.2 Kontinuální 45hodinová observace .....	47
4.4 Korelační analýzy .....	49
4.4.1 Směrodatných odchylek a dílčích měřidel.....	49
4.4.2 Směrodatných odchylek a meteorologických dat.....	50
4.4.3 Směrodatných odchylek a počtu družic.....	52
4.4.4 DOP hodnot a počtu družic .....	53
5 Testování kompenzace náklonu.....	55
5.1 Experimentální měření při naklonění a rotaci aparatury kolem její osy.....	56
5.1.1 Hodnocení na základě MAX-MIN .....	57
5.1.2 Hodnocení na základě výběrové směrodatné odchylky.....	58
5.1.3 Hodnocení na základě délky k teoreticky pravé poloze .....	58
5.2 Experimentální měření ve svislé poloze s otáčením do symetrických poloh .....	59
5.2.1 Hodnocení na základě MAX-MIN .....	60
5.2.2 Hodnocení na základě výběrové směrodatné odchylky.....	60
5.2.3 Hodnocení na základě délky k teoreticky pravé hodnotě .....	60
5.2.4 Hodnocení na základě vzdálenosti mezi průměrnými souřadnicemi jednotlivých poloh a teoreticky pravé .....	61
5.3 Experimentální měření v nesvislé poloze s otáčením do symetrických poloh .....	62
5.3.1 Hodnocení na základě MAX-MIN .....	62
5.3.2 Hodnocení na základě výběrové směrodatné odchylky.....	63
5.3.3 Hodnocení na základě délky k teoreticky pravé hodnotě .....	63
5.3.4 Hodnocení na základě vzdálenosti mezi průměrnými souřadnicemi jednotlivých poloh a teoreticky pravé .....	63
5.3.5 Shrnutí testování kompenzace náklonu .....	64
6 Závěr.....	67
Seznam použitých zdrojů.....	70
Seznam zkratk.....	72
Seznam obrázků.....	73
Seznam tabulek.....	74
Seznam grafů .....	75
Seznam příloh .....	76

# 1 Úvod

Možností jak určit polohu bodu na zemském povrchu v rámci geodézie je již více, avšak většina z nich je poměrně složitá, alespoň pro neodborné uživatele. Kdybychom měli tyto metody sestavit dle obtížnosti na obsluhu, rozhodně bude určení polohy bodu technologií GNSS s využitím RTK jednou z těch jednodušších.

Právě díky jednoduchosti a přesnosti, která je poskytována, se těchto technologií hojně využívá a dostává se do rukou i těm, kteří nemají v podvědomí základní vlastnosti a úskalí této technologie. GNSS aparatura se pak stává černou skříňkou, která podává uspokojivé výsledky. Měřič pak může nabývat dojmu, že jediné co je potřebné kontrolovat, je ikona řešení fixováno na displeji.

Předmětem diplomové práce je analýza přesnosti současných GNSS měřidel Topcon Hiper HR a Sokkia GCX3. Analýza přesnosti bude sloužit ke srovnání měřidel. Datové soubory, které jsou analyzovány byly získány při měření navržených testů. Testování zahrnuje měření na dálkoměrné a GNSS základně Brno-jih; měření na pilíři na střeše VUT FAST budova B po dobu 45 hodin; doplňující měření se zaměřením na automatickou urovnávací technologii.

Jedním z primárních důvodů výběru právě těchto aparatur je jejich rozdílnost zejména co se týče tvaru, velikosti a hmotnosti. Tyto aparatury jsou zároveň používány v rodinné firmě, výsledky práce budou tedy přínosné pro efektivnější přiřazení aparatury měřické skupině na základě typu zakázek v daném výjezdu nebo pro zjednodušení rozhodovacích procesů při budoucí modernizaci přístrojového vybavení.

Veškerá měření probíhala v souřadnicovém systému S-JTSK a výškovém systému Bpv. Pro všechna měření bylo využíváno síť permanentních stanic CZEPOS, konkrétně služby VRS3 - iMAX - MSM.

První část práce je věnována přehledu o současném stavu problematiky a teorii spjatou s druhou částí. Druhá část práce se pak věnuje jednotlivým testům, jejich popisu, způsobu zpracování a získaným výsledkům.

## **2 Přehled o vybraných souvislostech GNSS měření v reálném čase**

### **2.1 Síť permanentních stanic na území ČR**

Mezi nejvýznamnější celostátní sítě permanentních stanic na našem území patří:

- CZEPOS
- TopNET
- Trimble VRS Now Czech
- Georbit

V další části se budu věnovat právě síti CZEPOS, která byla k veškerým měřením v rámci diplomové práce využívána.

Síť CZEPOS poskytuje uživatelům globálních navigačních satelitních systémů korekční data, která slouží k přesnému určení polohy na území České republiky. Síť je spravována a provozována Zeměměřickým úřadem jakožto součást geodetických základů České republiky.

Síť na území České republiky obsahuje celkem 28 permanentních stanic, ty jsou rovnoměrně rozmístěny po území tak, aby vzdálenost mezi nimi byla zhruba 60 km. Síť zahrnuje také 27 příhraničních stanic státních sítí GNSS sousedních států. Z počtu 28 stanic na našem území je 23 z nich ve správě Zeměměřického úřadu a dalších 5 je ve správě vědeckých či akademických pracovišť. [1]

#### **2.1.1 Služby CZEPOS**

Služby a produkty jsou zpoplatněny a jsou poskytovány registrovaným uživatelům. Volba služby či produktu závisí na požadované přesnosti souřadnic určované polohy a na charakteru prací.

Poskytovány jsou celkem 3 kategorie služeb DGPS, RTK, VRS. Kategorii DGPS můžeme zvolit v případě, že požadovaná přesnost je do 10 centimetrů. Zbylé dvě kategorie mají poskytovat centimetrovou přesnost, a právě taková přesnost je vhodná pro klasická geodetická měření. [1]

## Kategorie RTK

Použijeme v případě, že očekáváme centimetrovou přesnost a chceme využít korekční data pouze z jedné referenční stanice. K využití této služby je zapotřebí dvoufrekvenční aparatura, která je schopna přijímat a zpracovávat RTK korekce. Korekce jsou přijímány prostřednictvím mobilního internetového připojení. V kategorii RTK najdeme tyto služby:

- RTK3 - MSM = RTK z konkrétní stanice s korekcemi GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, případně QZSS,
- RTK3 - NS - MSM = RTK z nejbližší stanice s korekcemi GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, případně QZSS. [1]

## Kategorie VRS

Použijeme v případě, že očekáváme centimetrovou přesnost. Na rozdíl od služeb RTK, využívají služby VRS (virtuální referenční stanice) k výpočtu korekcí data z více stanic, jedná se tedy o takzvané síťové řešení. Výpočet je generován pro virtuální referenční stanici, která je automaticky systémem umístěna do místa, ve kterém uživatel operuje. K využití této kategorie služeb je stejně jako u RTK dvoufrekvenční aparatura, která je schopna přijímat a zpracovávat RTK korekce. Korekce jsou přijímány prostřednictvím mobilního internetového připojení. V kategorii VRS najdeme tyto služby:

- VRS3 - MAX - MSM = Virtuální referenční stanice, která je generována dle konceptu MAX (master - auxiliary) s korekcemi GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou. Výpočet probíhá v rámci výpočetní buňky, ta se skládá z více stanic (zpravidla 6), které jsou umístěny v blízkosti uživatele. V buňce je jedna ze stanic volena jako hlavní (Master), ostatní stanice jsou vedlejšími (Auxiliary). Uživatel přijímá korekční data z hlavní stanice a současně s nimi difference korekcí ze stanic vedlejších.

- VRS3 - iMAX - MSM = Virtuální referenční stanice, která je generována dle individualizovaného konceptu MAX. Ostatní popis je shodný s VRS - MAX - MSM, s tím rozdílem, že uživatel přijímá korekce z hlavní stanice, které jsou již opravené o vliv korekcí z vedlejších stanic.

- VRS3 - VirtualRS - MSM = Virtuální referenční stanice s korekcemi GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou. Na základě zprávy z aparatury zaslané do řídicího centra

obdržíme korekce z virtuální referenční stanice umístěné v bezprostřední blízkosti polohy uživatele. Korekční data jsou generována na základě síťového řešení z okolních stanic. [1]

### **Shrnutí CZEPOS**

Je dobré si povšimnout, že při porovnání služeb RTK a VRS, máme v případě RTK možnost přijímat korekce pro satelitní systém QZSS, u služby VRS takovou možnost nemáme. Avšak i u služby RTK jsme limitováni, podpora regionálního QZSS je pouze u stanic, které jsou vybaveny přijímačem Leica GR30. Takovým přijímačem jsou vybaveny všechny stanice CZEPOS, které jsou ve správě Zeměměřického úřadu (23 stanic). Zbylých 5 externích stanic ve správě vědeckých a akademických pracovišť disponují dle jejich webu přijímači:

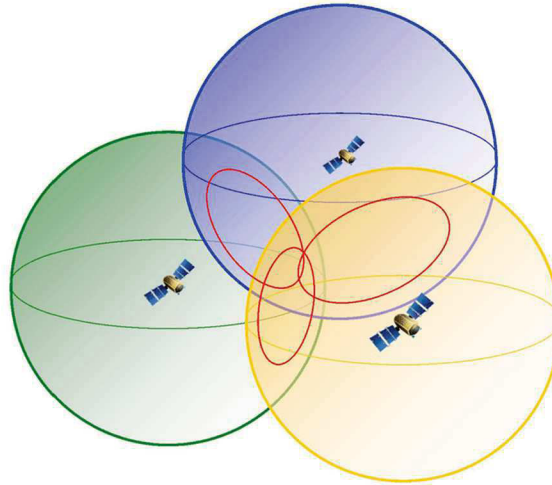
- Brno (TUBO) - Leica GR30
- Pecný (GOPE) - slovně neuvedeno (dle snímků Topcon)
- Plzeň (PLZE) - Topcon Legacy-E
- Ostrava (VSBO) - Topcon
- Polom (POL1) - Trimble

Z uvedených informací, které byly dohledány na webových stránkách příslušných pracovišť, popřípadě v publikacích, vyplývá, že jedinou externí stanicí disponující přijímačem Leica GR30 je stanice TUBO. Informace uvedené na webech však mohou být neaktuální.

## 2.2 Faktor snížení přesnosti DOP (Dilution of Precision)

DOP je termín používaný k popisu vhodnosti konfigurace satelitů, neboli vlivu geometrie na přesnost dat získaných prostřednictvím GNSS přijímače.

Při určení polohy pomocí GNSS se využívá trilaterace, ta je analogií triangulace, s tím rozdílem, že využívá pouze délek k určení polohy bodu. [2]



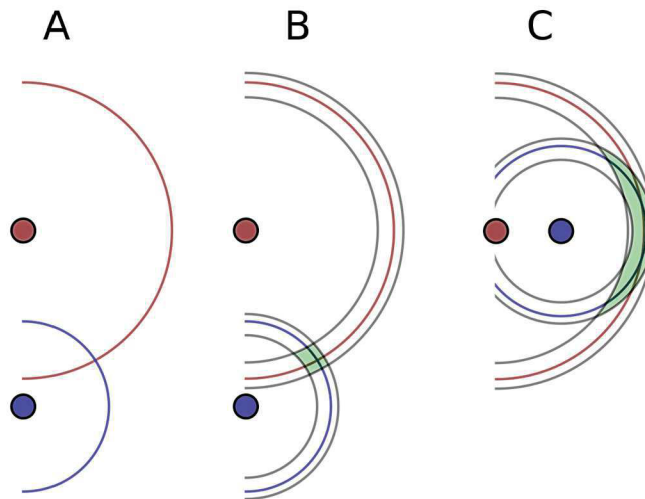
Obrázek 1: Grafické znázornění trilaterace [2]

Umístění GNSS přijímačů se při jejich observaci volí tak, aby byla zajištěna co nejlepší viditelnost na příslušné satelity, tzn. aby nedocházelo k zákrytu obzoru na bodě observace. Umístění přijímačů je tedy do určité míry spjato s nevhodnou konfigurací satelitů.

Starší GNSS přijímače nebyly ještě vybaveny algoritmy pro určení odhadu horizontální a výškové přesnosti získávaných dat. Tento důvod vedl ke kontrolování DOP hodnot. Ty nám poskytovaly informaci s jakou spolehlivostí výsledků pracujeme a zda raději počkat na lepší configurační podmínky.

Jedním z důvodů proč bychom měli DOP poněkud ignorovat a zaměřit se spíše na odhadovanou přesnost, může být v případě PDOP. Hodnoty mohou být zavádějící, pokud pracujeme na otevřeném prostranství. Zde je velmi pravděpodobné, že hodnota PDOP bude nabývat malých hodnot a stejně tak odhadovaná přesnost. Při mírném zákrytu obzoru dojde ke snížení počtu satelitů a zhoršení odhadované přesnosti. Avšak pokud tyto satelity budou vhodně rozmístěny, pak hodnoty PDOP budou stále dobré.

Odhadovaná přesnost však nemusí být určena vždy stejně, a to právě kvůli přijímačům různých výrobců. Ti pak mají vlastní algoritmy k určení odhadované přesnosti, které vznikají na základě testování na známých bodech. [3]



Obrázek 2: Znárodnění problematiky na protínání z délek [30]

K vysvětlení principu DOP můžeme uvažovat úlohu protínání z délek z dvojice bodů (družic) ve zjednodušeném dvourozměrném systému. Uvažujeme řešení na *Obrázku 2*, kdy v případě A máme dvě bezchybné vzdálenosti, při jejichž vnesení od bodů získáme právě dvě bezchybná řešení, která lze považovat za ideální.

Signály satelitů mají stanovenou přesnost ve vztahu k podmínkám okolního prostředí, kterým procházejí. V důsledku této skutečnosti dostáváme případ B, tzn. každému bodu pak přísluší dvě soustředné kružnice, ty se navzájem protínají a mezi průsečíky tak vzniká plocha, která je množinou možných řešení.

Na případě C pak můžeme vidět, jaký vliv na plochu vzniklou průsečíky kružnic má vzájemná poloha těchto bodů. Při takové konfiguraci, kdy jsou družice vzájemně situovány takřka v jedné přímce vůči pozorovateli, se hodnoty DOP zvětšují a měření ztrácí na spolehlivosti.

Přijímače detekují počet družic a jejich polohu na obloze, to vede k možnosti vyhodnotit jejich konfiguraci vůči přijímači a určit hodnoty DOP. [3]

### 2.2.1 Jednotlivé faktory snížení přesnosti

GDOP - faktor globálního snížení přesnosti

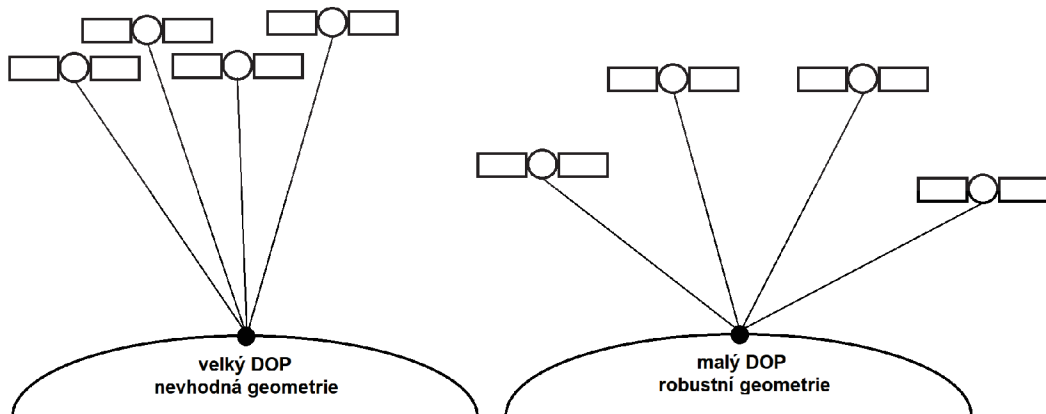
PDOP - faktor snížení přesnosti v určení polohy

HDOP - faktor snížení přesnosti v horizontální rovině

VDOP - faktor snížení přesnosti ve výšce

TDOP - faktor snížení přesnosti korekce hodin přijímače

*Geometrickou představou DOPu může být objem mnohostěnu, který je vytvořen polohovými vektory družic. Hodnota DOPu je nepřímo úměrná objemu mnohostěnu. Čím je větší objem, tím je menší hodnota DOPu. [4]*



Obrázek 3: Souvislost geometrie a DOP

S DOP je taktéž možné se setkat v legislativě, konkrétně ve vyhlášce č. 31/1995 Sb. (Vyhláška Českého úřadu zeměměřického a katastrálního, kterou se provádí zákon č. 200/1994 Sb., o zeměměřictví a o změně a doplnění některých zákonů souvisejících s jeho zavedením.)

Ve vyhlášce v části 9.6 pak máme stanoveno, že výsledek měření GNSS, jehož hodnota parametru GDOP nebo PDOP je větší než 7,0 nelze ověřit pomocí dalšího výsledku měření GNSS jehož parametr GDOP nebo PDOP je větší než 7,0 a čas ověřujícího měření vůči času ověřovaného se nachází v intervalu:  $\langle -3 + n \cdot k; n \cdot k + 3 \rangle$  hodin ( $k$  je počet dní, nabývá celých kladných čísel;  $n = 23,9333$  hodin pro GPS a 22,5000 hodin pro GLONASS).



## 2.3 Testování normality

### 2.3.1 Rozdělení náhodných veličin

Nejúplnější charakteristikou náhodných veličin je takzvané rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny. Takové rozdělení je dáno vzorcem, grafem či tabulkou.

Nejdůležitějším rozdělením spojité náhodné veličiny je normální rozdělení (Laplace - Gaussovo). Z tohoto rozdělení jsou dále odvozena další, například  $\chi^2$  (Chí-kvadrát), Studentovo t a Snedecorovo - Fischerovo F-rozdělení.

Můžeme říci, že toto rozdělení je možné použít všude, kde kolísání náhodné veličiny je způsobeno součtem velkého počtu nepatrných a vzájemně nezávislých vlivů.

Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení je definována frekvenční funkcí. Graf takové funkce pak nazýváme „Gaussova křivka“ [5] [24] :

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, x \in (-\infty, +\infty) \quad (1)$$

---

*x* .. výběrový soubor z uvedeného intervalu

$\mu$  .. střední hodnota

$\sigma$  .. směrodatná odchylka

$\sigma^2$  .. variance

Taková frekvenční funkce má pak dva parametry, a to střední hodnotu a varianci (rozptyl). Normální rozdělení značíme jako  $N(\mu, \sigma^2)$ .

Normální normované rozdělení (nazývané také jako standardizované) je takové normální rozdělení, jehož střední hodnota je rovna 0 a směrodatná odchylka je rovna 1 dle uvedeného značení pak  $N(0, 1)$ . Můžeme se setkat také s názvem U-rozdělení. [5] [24]

### 2.3.2 Intervalové odhady

Prostřednictvím charakteristik rozptylu, polohy a vlastností rozdělení můžeme sestavit intervaly spolehlivosti. Takto nazýváme intervaly, ve kterých s určitou pravděpodobností očekáváme naměřené hodnoty  $x$ .

Interval spolehlivosti pak můžeme vyjádřit jako:

$$P(\bar{X} - t \cdot m_x < x < \bar{X} + t \cdot m_x) = 1 - \alpha \quad (2)$$

---

$\bar{X}$  .. střední hodnota                       $m_x$  .. výběrová střední chyba  
 $t$  .. součinitel konfidence               $x$  .. naměřené hodnoty

Kde násobek  $t$  je součinitelem konfidence, který se volí v souvislosti s hladinou významnosti  $\alpha$ . Běžné využití nachází součinitele konfidence 2; 2,5; 3.

Pravděpodobnost náhodného rozdělení podle násobku směrodatné odchylky. [5]

SOUČINITEL KONFIDENCE	1D [%]	2D [%]	3D [%]
2	95	86	74
2,5	99	95	90
3	99,7	99	97

Tabulka 1: Intervaly spolehlivosti normálního rozdělení

### 2.3.3 Statistické testy normality

Velké množství statistických testů je založeno na předpokladu, že náhodný výběr pochází z normálního rozdělení. Některé statistické testy mohou být na odchylky od normality citlivé, jiné testy zase mohou být ovlivněny jen nepatrně.

Test, který by určil, že daný výběr pochází z normálního rozdělení neexistuje. Avšak máme k dispozici testy, které prokážou, že výběr nepochází z normálního rozdělení.

Uvažujeme náhodný výběr  $x_1, x_2, \dots, x_n$  kde  $n$  je rozsah výběru. Testy normality pracují tedy s hypotézou  $H_0$ , kterou buďto zamítáme nebo nezamítáme. V dnešní době máme možnost posoudit výběrový soubor pomocí řady postupů. Za zmínku stojí metody uvedené níže. [8] [9] [10] [11] [12] [13]

Grafické metody:

- histogram
- Q-Q graf
- P-P graf

Regresní testy:

- Shapirův-Wilkův test
- Fillibenův test

Testy založené na momentech:

- Základní test šikmosti a špičatosti
- D'Agostinův test šikmosti
- Jarqueho-Berův test

Testy založené na empirické distribuční funkci:

- Kolmogorovův-Smirnovův test a Lillieforsova varianta
- Andersonův-Darlingův test

Chí-kvadrát test dobré shody

Z důvodu použití testů Shapiro-Wilk a Kolmogorov-Smirnov v programu STATISTIKA 12 níže uvedu o konkrétních testech více informací.

### **Shapirův-Wilkův test**

Test byl publikován v práci *Biometrika (1965), An analysis of variance test for normality (complete samples)*. Test patří mezi regresní, je založený na vzdálenosti jednotlivých bodů od regresní přímky. Pro svoji vypovídající schopnost pro malé výběry  $n \leq 50$  je předepisován normou ČSN 01 0225: Aplikovaná statistika. Testy shody empirického rozdělení s teoretickým.

Hypotézu  $H_0$  zamítáme v případě, že je vypočítaná hodnota  $W$  menší tabelovaná kritická hodnota. Tento test je možné modifikovat, kdy jej pomocí transformace můžeme použít i pro výběrový soubor o 5000 měřeních. Program STATISTIKA využívá takového rozšířeného testu popsaného v *Approximating the Shapiro-Wilk W-test for non-normality, Patrick Royston, 1992*. V případě kdy má náš výběrový soubor více než 5000 měření, nemůže být tento test použit. [6] [8]

## Kolmogorovův-Smirnovův test

Test je jedním z testů patřících do kategorie využívajících empirické distribuční funkce, takové testy jsou založeny na maximální lineární vzdálenosti empirické a hypotetické distribuční funkce.

Hlavní nevýhodou K-S testu je nutnost znalosti přesné hodnoty  $\hat{\mu}$  a  $\hat{\sigma}$ . Vlivem použití odhadu střední hodnoty a směrodatné odchylky by nebyla zaručena přesná hladina testu  $\alpha$ . K-S test nachází taktéž uplatnění při testování, zda dvě jednorozměrné náhodné proměnné pocházejí ze stejného rozdělení pravděpodobnosti. [7] [8]

## Lillieforsův test

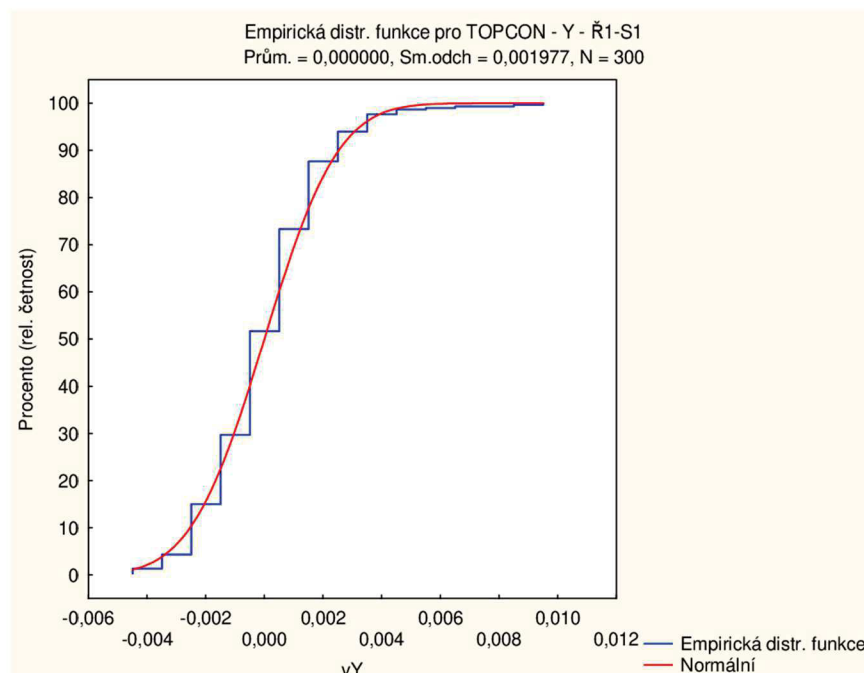
Je modifikací K-S testu, která nevyžaduje přesnou znalost hodnot  $\hat{\mu}$  a  $\hat{\sigma}$ . Takový test pak používá odhadů těchto hodnot.

$$\hat{\mu} = \bar{x}, \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3)$$

.....  
 $\bar{x}$  .. střední hodnota

$\hat{\sigma}$  .. výběrová střední chyba

Test je pro svoji vypovídající schopnost pro výběry o rozsahu  $n \geq 100$  předepisován normou ČSN 01 0225. [7] [8]



Obrázek 4: Ukázka distribuční funkce

## P-hodnota

P-hodnota je pojem který patří do oblasti testování hypotéz. Statistické software obvykle namísto porovnání hodnoty testovacího kritéria s kritickými (často tabelovanými) hodnotami používají takzvanou p-hodnotu. Ve světě počítačů se výstupy zahrnující p-hodnotu stávají standardem a často je vyžadována i v odborných publikacích.

P-hodnotu lze definovat jako nejmenší hladinu významnosti testu, na které zamítáme. Na základě takové skutečnosti platí, že čím menší p-hodnota je, tím je menší pravděpodobnost, že platí nulová hypotéza. To v praxi znamená, že když při vyhodnocení statistického testu vyjde p-hodnota blízká nule, má hypotéza velmi malou oporu v pozorovaných datech a můžeme ji zamítnout.

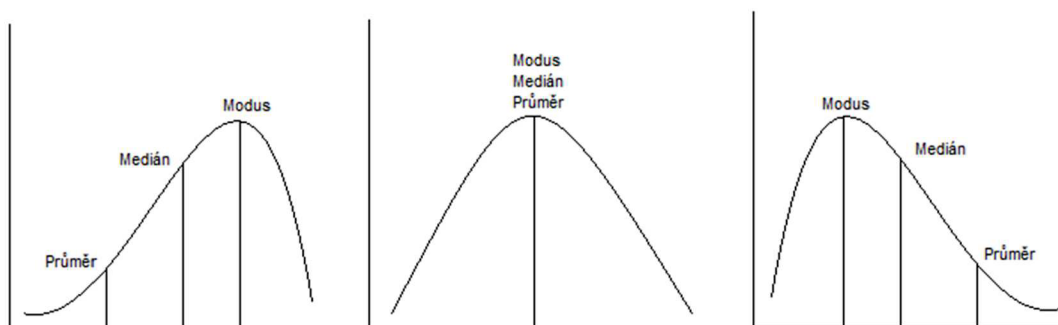
Rozhodování o zamítnutí či nezamítnutí spočívá v porovnání výsledné p-hodnoty a zvolené hladiny významnosti  $\alpha$ , a to v případě kdy p-hodnota klesne pod zvolenou hladinu významnosti  $\alpha$ .

P-hodnota však není spásná, jelikož může indikovat špatný výsledek, neboť i v tomto případě hrozí chyba I. a II. druhu. Může tedy nastat situace, kdy hypotézu zamítneme i přestože platí, v druhém případě hypotézu nezamítáme, přestože neplatí.

P-hodnota se v programu STATISTICA využívá u testů středních hodnot, normality a dalších. Všechny testy ve výstupu obsahují tuto hodnotu ať už přímo v tabulce, nebo v jejím záhlaví. Při vyhodnocování normality je zásadní vědět, jak zní nulová hypotéza. [14]

### 2.3.4 Centrální tendence

K hrubému posouzení výběrového souboru můžeme použít úvahy, že medián, modus a průměr výběrového souboru by si měli být rovny. Představme si histogram normálního rozdělení jako křivku ve tvaru zvonu, která je dokonale symetrická vůči



Obrázek 5: Modus, medián a průměr v souvislosti s rozdělením

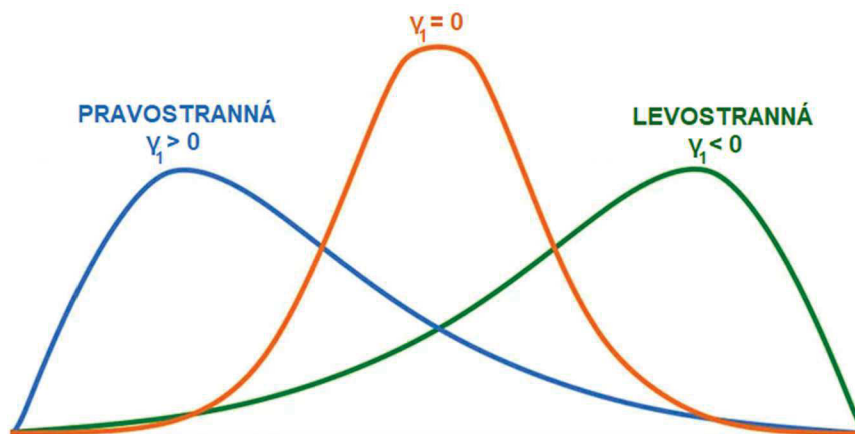
střední hodnotě. V takovém případě se medián, modus a průměr musejí rovnat. Čím větší rozdíly mezi jednotlivými prvky jsou, tím vyšší je pravděpodobnost na zamítnutí hypotézy. Modus je nejčastěji se vyskytující hodnota ve vzorku. Průměr (aritmetický průměr) jakožto součet pozorování / počet pozorování ve vzorku. Průměr je citlivější na odlehlé hodnoty než medián a modus. Medián je střední hodnota ve vzorku seřazeného dle velikosti. Pokud existuje sudý počet pozorování, je medián průměrem dvou centrálních hodnot. [15]

### 2.3.5 Šikmost a špičatost

Tyto dvě hodnoty se využívají ve statistice k rychlému poskytnutí představy o podobě příslušné distribuce.

Šikmost je mírou symetrie v distribuci, symetrický soubor nabývá hodnoty koeficientu šikmosti 0. Z uvedeného vyplývá, že normální rozdělení bude mít šikmost 0.

Koeficient **šikmosti** může nabývat hodnot kladných i záporných. V případě kladné šikmosti se vpravo od průměru nachází odlehlější hodnoty nežli vlevo a většina hodnot leží nalevo od průměru, takovou šikmost nazýváme pravostrannou (jelikož delší z ocasů je na pravé straně), u záporné šikmosti je tomu naopak. [16]



Obrázek 6: Grafická interpretace koeficientu šikmosti

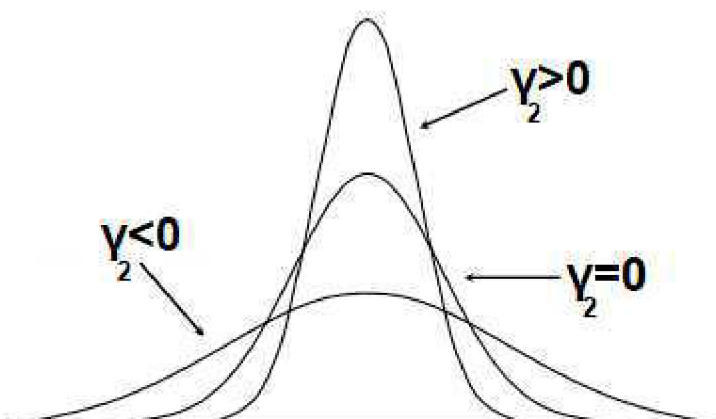
$$k = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \Sigma \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \quad (4)$$

.....  
\*

$n$  .. počet prvků  
 $\bar{x}$  .. průměrná hodnota  $n$  prvků  
 $x_i$  .. hodnota  $i$ -tého prvku  
 $s$  .. výběrová směrodatná odchylka

Koeficient **špičatosti** taktéž nabývá kladných i záporných hodnot. V případě normálního rozdělení se rovná 0 a distribuce se nazývá mesokurtická. Kladná špičatost vyjadřuje skutečnost, že většina hodnot veličiny leží v blízkosti střední hodnoty, takovou distribuci nazýváme jako leptokurtickou. U špičatosti záporné dochází k rozdělení rovnoměrnému tzv. platykurtická distribuce. [16]

$$* \quad k = \left\{ \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 \right\} - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \quad (5)$$



Obrázek 7: Grafická interpretace koeficientu špičatosti

Hodnoty koeficientů šikmosti a špičatosti se mění v návaznosti na velikosti souboru. Pro ukázkou vývoje koeficientů zde uvedu dva příklady. V prvním případě jsem vygeneroval 5000 náhodných veličin normálního rozdělení pro  $N(0,1)$  (Tabulka 2). V druhém případě jsem vygeneroval 5 náhodných čísel, ty jsem opakovaně kopíroval a vytvořil soubor o 5000 hodnotách (Tabulka 2).

Na základě této znalosti můžeme říct, že soubory o menším počtu vzorků mohou poskytovat výsledky, které jsou zavádějící.

VELIKOST SOUBORU	NORMÁLNÍ ROZDĚLENÍ N(0,1)		OPAKUJÍCÍ SE HODNOTY	
	KOEFICIENT ŠIKMOSTI	KOEFICIENT ŠPIČATOSTI	KOEFICIENT ŠIKMOSTI	KOEFICIENT ŠPIČATOSTI
5	-0.963	1.805	1.089	0.536
10	-0.380	-0.731	0.866	-0.567
15	-0.834	0.122	0.814	-0.705
20	-0.342	-0.923	0.791	-0.757
25	-0.156	-0.922	0.778	-0.783
50	0.171	-0.922	0.753	-0.829
75	0.200	-0.798	0.745	-0.842
100	0.117	-0.703	0.741	-0.849
250	-0.102	-0.214	0.735	-0.859
500	-0.161	0.086	0.732	-0.863
1000	-0.117	0.197	0.731	-0.864
1500	-0.091	0.104	0.731	-0.864
2000	-0.060	-0.003	0.731	-0.864
2500	-0.045	-0.052	0.731	-0.864
3000	-0.042	-0.010	0.731	-0.864
3500	-0.036	0.020	0.731	-0.864
4000	-0.027	0.004	0.731	-0.864
4500	-0.004	0.013	0.731	-0.864
5000	-0.018	0.032	0.731	-0.864

Tabulka 2: Vliv velikosti souboru na koeficienty špičatosti a šikmosti

### 2.3.6 Korelace

Je popisem vztahu mezi dvěma veličinami určující míru závislosti mezi nimi. V případě kdy se mezi veličinami projeví korelace, je pravděpodobné, že na sobě závisejí. Míru korelace mezi veličinami vyjadřuje korelační koeficient, který nabývá hodnot od -1 do +1. Korelační koeficient roven nule nám říká, že mezi proměnnými není lineární vztah. S koeficientem rostoucím od nuly se zvětšuje míra závislosti mezi proměnnými. Hodnota +1 značí zcela přímou závislost, hodnota -1 zcela nepřímou závislost.

V této práci byl pro určení míry korelace používán Pearsoův korelační koeficient v rozhraní tabulkového procesoru Excel.

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

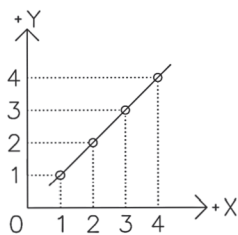
$x_i$  .. hodnota  $i$ -tého prvku

$\bar{x}$  .. průměrná hodnota  $n$  prvků

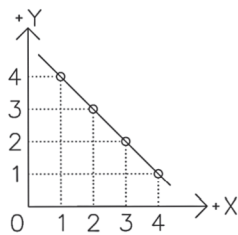


Síla korelace lze popsat i slovně. Použijeme-li Evansovu příručku, kterou navrhl pro absolutní hodnotu  $r$  [17]:

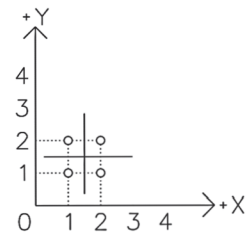
- 0,00 - 0,19 „velmi slabá“
- 0,20 - 0,39 „slabá“
- 0,40 - 0,59 „střední“
- 0,60 - 0,79 „silná“
- 0,80 - 1,00 „velmi silná“



KOR.KOEF. = 1  
ÚPLNÁ POZITIVNÍ KORELACE



KOR.KOEF. = -1  
ÚPLNÁ NEGATIVNÍ KORELACE



KOR.KOEF. = 0  
NULOVÁ KORELACE

Obrázek 8: Příklady korelace

## 2.4 Kompenzace náklonu

V posledních letech dochází k velkému rozšíření GNSS aparatur s možností kompenzace náklonu. Přístroje disponující takovou funkcí jsou na trhu již řadu let (v případě firmy TOPCON od roku 2016). Přístroje se tedy pomalu začínají objevovat i v malých firmách a u soukromníků, kde modernizace vybavení není tak častá, jako u velkých firem.

GNSS přijímače jsou schopny v dnešní době již s vysokou přesností určit souřadnice bodů. Dříve bylo nezbytné přijímač dostatečně urovnat nad bodem tak, aby výsledky byly s odpovídající přesností. Díky urovňovací technologii tedy není nutné přístroj horizontovat s takovou přesností, to pak vede k úspoře času. Zároveň v průběhu měření na svislost výtyčky působí rušivé vlivy, například chyby z nesvislosti vnášené lidským faktorem nebo nedokonalost použitých nástrojů, jako je systematické vychýlení libely. Navíc jsme schopni pomocí příslušného přístroje určovat polohu takových bodů, u kterých bylo nezbytné využití jiných geodetických metod. Takovými body pak mohou být rohy budov, jednoduše místa, kde výtyčka nemůže být ve svislé poloze.

### 2.4.1 IMU a INS

IMU neboli inerciální měřicí jednotka je elektronickým zařízením, které využívá gyroskopů a akcelerometrů k nepřetržitému určení polohy, orientace a rychlosti pohybu. Inerciální jednotky bývají často doplňovány o barometrické výškoměry nebo magnetometry, které slouží k definování referenčního směru.

Gyroskopické snímače měří změny úhlu polohy, obvykle v jednotkách stupně za sekundu. Integrovanou úhlovou rychlost je možné použít pro sledování změny orientace. Gyroskopické snímače můžeme dělit na jednoosé, dvouosé a tříosé. Gyroskopy sledují relativní pohyb nezávisle na gravitaci, z tohoto důvodu může dojít k chybě polohy zvané jako „drift“.

Akcelerometrické snímače slouží k měření lineárních zrychlení, včetně zrychlení způsobeného pohybem zařízení a gravitačním zrychlením. Zrychlení se udává v jednotkách G, které představují násobky gravitační síly Země v podobě  $1\text{ G} = 9,8\text{ m/s}^2$ . Akcelerometry jsou opět jednoosé, dvouosé a tříosé. Jednotlivé osy pak definují souřadnicový systém X, Y, Z.

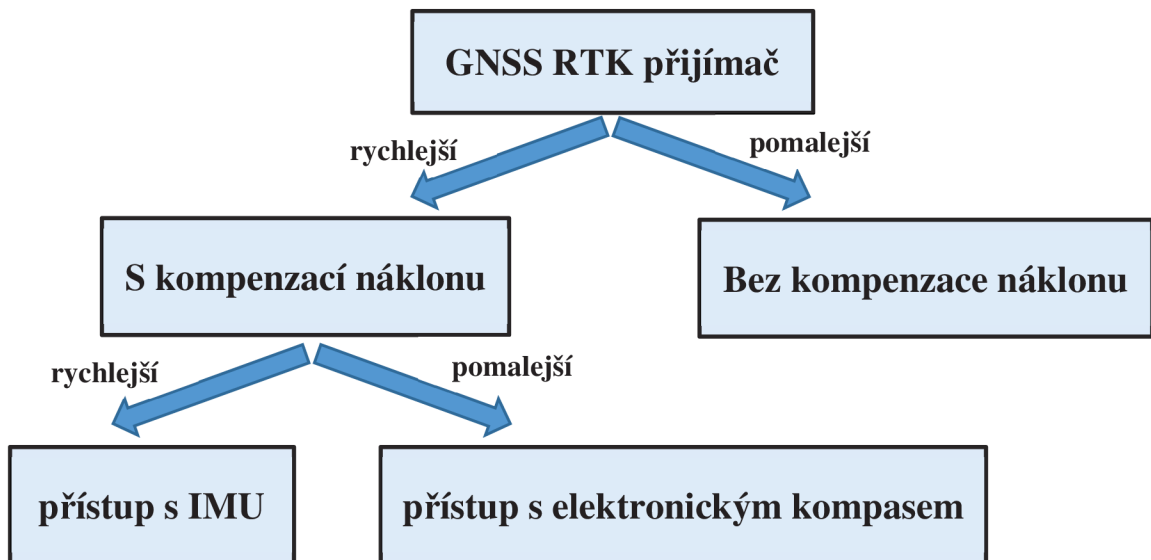
Magnetické snímače měří intenzitu magnetického pole, která se obvykle udává v jednotkách mikrotésla nebo Gauss. Magnetický snímač v podobě tříosého elektronického kompasu lze používat při nečinnosti nebo při pohybu nízkou rychlostí. Takový kompas je kompenzován náklonem, což vede k tomu, že zařízení může být drženo v jakékoli poloze, avšak kompas může občas vyžadovat kalibraci.

Stupně volnosti popisují možné pohyby tělesa v trojrozměrném prostoru. Pro takový prostor pak tedy existuje šest stupňů volnosti. Tři stupně volnosti popisují lineární pohyb, další tři stupně volnosti popisují rotaci. Bez ohledu na složitost pohybu jej vždy můžeme vyjádřit kombinací těchto šesti stupňů volnosti. Mezi IMU jednotkami jsou však i takové, které poskytují devět stupňů volnosti nebo dokonce deset, což může působit zmatečně v kombinaci s předchozím tvrzením. Vysvětlení je takové, že IMU s 9 stupni volnosti se dělí na 3 pro akcelerometry, 3 pro gyroskopy a 3 pro magnetometr. Takovou IMU jednotku pak považujeme za schopnou snímat 9 stupňů volnosti. V případě 10 stupňů volnosti se jedná o přidání senzoru atmosférického tlaku za účelem určení nadmořské výšky. [18] [19]

INS neboli inerciální navigační systém se skládá z IMU jednotky, přijímače GNSS a softwaru pro fúzi těchto senzorů. INS zařízení pracuje na základě „dead reckoning system“, což znamená, že výchozí polohu zajišťují externí zdroje, kterým může být právě GNSS přijímač. Pomocí těchto dat může INS začít určovat polohu, rychlost a další prvky pohybu pomocí informací přijatých ze snímačů pohybu. [19]

## 2.4.2 Přístupy ke kompenzaci náklonu

V dnešní době se u GNSS aparatur můžeme setkat s dvěma přístupy k řešení náklonu.



Obrázek 9: Schéma rozdělení GNSS přijímačů dle kompenzace náklonu

### Přístup s elektronickým kompasem

Jeden z přístupů využívá 9-ti osou IMU jednotku s gyroskopy, akcelerometry a kompasem. Takového řešení využívají například firmy Topcon, Sokkia. Tyto přijímače používají ke kompenzaci náklonu také elektronický kompas, který pracuje s měřeními magnetometru a poskytuje orientaci výtyčky vzhledem k magnetickému severu.

#### Tento přístup má určité nevýhody jako jsou:

- Výsledky měření magnetometru jsou výrazně závislé na sklonu, tato skutečnost může vést k omezení rozsahu náklonu tak, aby výsledky nebyly příliš znehodnoceny (u přístroje Topcon HiPer HR je výrobcem hodnota náklonu limitována na 15° od svislice).
- Potřeba věrného a výpočetně náročného magnetického modelu, s účelem omezení vlivu magnetické deklinace (rozdílu zeměpisného a magnetického pólu).
- Nutné kalibrace na místě před měřením, které snižují produktivitu v návaznosti na časové náročnosti kalibrace.
- Magnetometrická měření jsou rušena a znehodnocována v blízkosti feromagnetických materiálů (například automobily, budovy, střešní žlaby),

na měření má také vliv elektrický proud (například elektrické vedení, elektrické instalace), uvedené rušivé předměty se však často v prostředí kde je RTK aparatur využíváno vyskytují. [20]

### **Kalibrace elektronického kompasu**

Přijímač TOPCON HiPer HR disponuje tříosým elektronickým kompasem, který slouží k monitorování zemského magnetického pole a poskytuje informace o azimutu. V návaznosti na vlastnosti elektronického kompasu je potřebné provádět polní kalibraci.

#### **Kalibrační postup se skládá z těchto kroků:**

1. kalibrace elektronické úrovně přijímače,
2. kalibrace magnetického kompasu přijímače v prostoru,
3. kalibrace magnetického kompasu přijímače v horizontální rovině.

Pozn.: Kalibrace se provádí nezávisle a postupně. Po provedení těchto tří kroků je elektronický kompas připraven k použití.

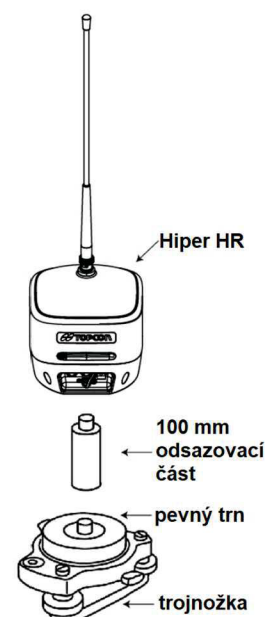
Veškeré kalibrace se mají provádět po získání fixního řešení, zároveň všechna příslušenství, která budou v průběhu měření aparaturou používána, mají být během kalibrace zapnuta a připojena. Zároveň během kalibrace nemáme používat externí napájení. [21]

### **Kalibrace elektronické úrovně**

Pro přesné získání informací o vodorovné rovině a kompasu je nutné realizovat příslušnou kalibraci:

Umístění a horizontace trojnožky do které se vloží pevný trn, na ten se umístí 100 mm dlouhá odsazovací část s cílem eliminovat vibrace během kalibrace. Po získání fixního řešení je možné spustit proces kalibrace, který trvá 30 sekund.

U kalibrace elektronické úrovně není uvedeno, že by bylo nutné kalibraci realizovat pro každou lokalitu před začátkem měření. [21]



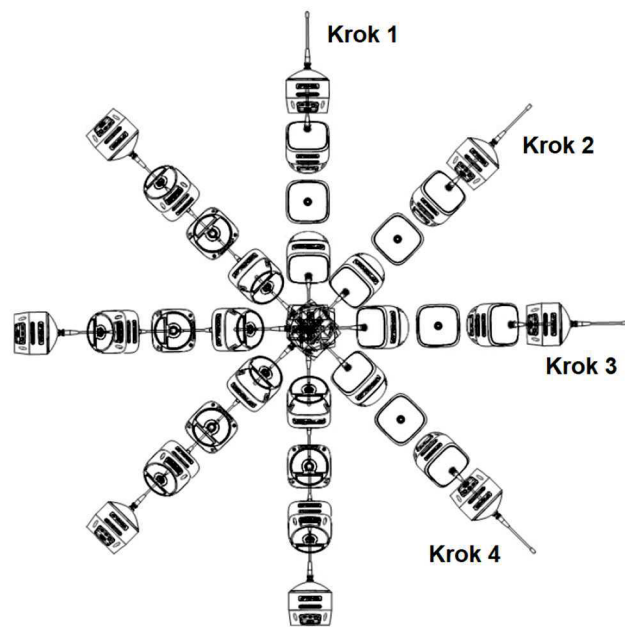
Obrázek 10: Příslušenství pro kalibraci [21]

### Kalibrace kompasu v prostoru

Výrobce připomíná, že pro přesné získávání dat z kompasu je nezbytné realizovat kalibrační proceduru pro každou lokalitu před začátkem měření.

Realizace příslušné kalibrace:

Držte přijímač vodorovně tak, aby LED panel směřoval k vám, spusťte kalibrační proces a rotujte přijímačem o  $360^\circ$  ve vertikální rovině. Přijímač se pootočí vůči vertikální ose o  $45^\circ$  a opět se rotuje o  $360^\circ$ . Postup opakujeme pro úhly  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  vůči vertikální ose. [21]



Obrázek 11: Kalibrace kompasu v prostoru [21]

### Kalibrace kompasu v horizontální rovině

Opětovné připomenutí výrobce, že pro přesné získávání dat z kompasu je nezbytné realizovat kalibrační proceduru pro každou lokalitu před začátkem měření.

Umístění přijímače na odsazovací část, spuštění kalibračního procesu a následná rotace přijímače ve směru hodinových ručiček ve vodorovné rovině. Nejvyšší přesnosti kalibrace se docílí v případě pravouhlosti přijímače a horizontální roviny. [21]

### Rekalibrace kompasu

Přijímač během provozu vyhodnocuje místní magnetické prostředí a upozorňuje uživatele o nutnosti rekalibrace v příslušném softwaru. Software vyhodnotí nutnou rekalibraci v případě [21]:

- přijímač byl po dlouhou dobu vypnutý,
- přijímač je používán poprvé,
- častá změna lokality měření,
- nárazu nebo pádu přijímače,
- změny teplot o  $10^\circ\text{C}$  a více,

- přepravy přijímače autem nebo letadlem,
- přiblížení se silně magnetickým objektům.

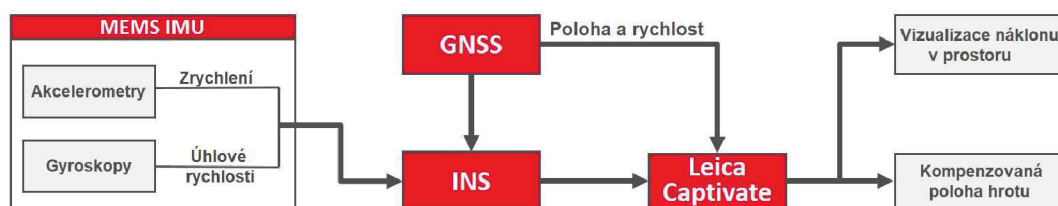
### Přístup s IMU

Dalším přístupem, který využívá např. společnost Leica, je použití pouze IMU jednotky bez kompasu. Při kompenzaci absence kompasu se více spoléhá na INS, který využívá algoritmu se vstupy z IMU a GNSS. INS algoritmus matematicky rotuje a integruje měření z IMU tak, aby určil polohu výtyčky. Spojením vstupů z IMU a GNSS je navíc umožněno odhadovat odchylky akcelerometru a gyroskopu v reálném čase s cílem podchytit časově závislý posun v řešení polohy. Na základě polohy z GNSS, INS a délky výtyčky vypočítá integrovaný software Leica Captivate polohu hrotu výtyčky. Aby urovnání probíhalo s dostatečnou kvalitou, záleží na stabilním RTK spojení během observace. To znamená, že aby kompenzace náklonu fungovala správně, závisí na stabilním připojení RTK během observace. Interní navigační systém nefunguje samostatně dostatečně dobře při nedostatečné aktualizaci absolutní polohy přijímače pomocí RTK.

Při použití takového přístupu se pak vyhneme nepříjemnostem uvedeným v části o přístrojích s elektronickým kompasem, neboť IMU měření nejsou ovlivňovány magnetickými vlivy. Takové přístroje jsou pak označovány jako „calibration-free“, jelikož ke kompenzaci náklonu není vyžadována polní kalibrace. Výhodou u takových přístrojů je také možnost pracovat bez limitu sklonu výtyčky.

Nevýhodou takového přijímače může být rostoucí ztráta přesnosti při delším setrvání na stejném bodě bez pohybu. [21]

Společnost Leica v dnešní době má v nabídce produkt Leica AP20 AutoPole. Jedná se o výtyčku pro klasické terestrické měření s využitím totální stanice. Výtyčka využívá inerciální kompenzaci náklonu. Tato technologie se nejspíše u GNSS aparatur osvědčila, a proto se pomalu začíná aplikovat i ve vybavení pro klasický způsob sběru dat.



Obrázek 12: Schéma implementace GNSS/INS v Leica GS18 T [20]

## 3 Testovaná GNSS měřidla a použité testovací postupy

### 3.1 Specifikace použitých GNSS měřidel

#### 3.1.1 TOPCON HIPER HR

TECHNICKÉ PARAMETRY PŘIJÍMAČE		
Výrobce	TOPCON	
Počet kanálů	452 kanálů	
Sledované signály	GPS	L1 C/A, L1C, L1P(Y), L2P(Y), L2C, L5
	GLONASS	L1 C/A, L1P, L2 C/A, L2P, L3C
	Galileo	E1, E5a, E5b, E5AltBOC, E6
	BeiDou	B1, B2, B3
	IRNSS	SPS-L5
	SBAS	WAAS / EGNOS / MSAS
	QZSS	L1 C/A, L1C, L2C, L5, LEX
	L-band	1525-1560 MHz
Přesnost	Statika*	H: 3,0 mm + 0,1 ppm V: 3,5 mm + 0,4 ppm
	RTK	H: 5 mm + 0,5 ppm V: 10 mm + 0,8 ppm
	RTK náklon	H: 1,3 mm/° náklonu; náklon ≤ 10° H: 1,8 mm/° náklonu; náklon > 15°
Interní paměť	8 GB	
Napájení	možnost externího napájení interní baterie (3.7 V, 5200 mAh) vyjímatelné baterie (7.2 V, 2900 mAh) doba provozu až 9 hodin s vyjímatelnými bateriemi	
Provozní teplota	-40° C až 80° C	
Odolnost	IP67	
Rozměry (š x v x d)	115 x 132 x 115 mm	
Hmotnost	1,172 kg (včetně vnitřní a vyjímatelné baterie)	

Tabulka 3: Technické specifikace přístroje TOPCON HIPER HR [21]

\*Za normálních měřických podmínek a přísných zpracovatelských metod, včetně použití dvoufrekvenční GPS, přesných efemeridů, klidných ionosférických podmínek, schválené kalibrace antény, nerušený výhled nad 10 stupňů a doby měření alespoň 3 hodiny (v závislosti na délce základny)

Autorizovaný prodejce uvádí v propagačním letáku vlastnosti přijímače, které mají být stěžejními při rozhodování o koupi. Mezi těmito vlastnostmi uvádí tvar a funkce. Přijímač má poskytovat nejpokročilejší GNSS technologie, přesto je však kompaktní tak, aby se vešel do dlaně vaší ruky, je také ideální pro hybridní měření.

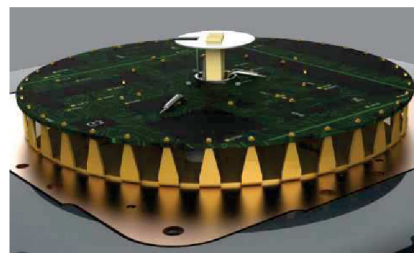


Obrázek 13: Přístroj TOPCON HIPER HR [29]



Tělo přístroje je vyrobeno z robustní hliníkové slitiny, díky čemuž může operovat v těžkých podmínkách.

V přijímači je použita konstrukce antény patentovaná firmou Topcon. Anténu nazývá jako Fence Antenna, ta slouží k filtraci signálů vícecestného šíření (multipath). Přínosem je pak vyšší přesnost při určování polohy i v obtížnějších podmínkách.



Obrázek 14: Fence Antenna [29]

Hlavním benefitem přístroje je integrovaná urovnávací technologie. Přístroj obsahuje 9-ti osou inerciální měřící jednotku (IMU) a elektronický kompas (eCompass). Díky této skutečnosti dokáže kompenzovat neurovnání výtyčky v rozsahu do 15° od svislice. [24]

### 3.1.2 SOKKIA GCX3

TECHNICKÉ PARAMETRY PŘIJÍMAČE		
Výrobce	SOKKIA	
Počet kanálů	226 kanálů	
Sledované signály	GPS	L1 C/A, L1C, L2P, L2C
	GLONASS	L1 C/A, L1P, L2 C/A, L2P
	Galileo	E1
	BeiDou	B1, B2
	SBAS	WAAS / EGNOS / MSAS
	QZSS	L1 C/A, L1C, L2C
	GAGAN	-
Přesnost	Statika*	H: 3,0 mm + 0,4 ppm V: 5,0 mm + 0,6 ppm
	RTK	H: 10 mm + 0,8 ppm V: 15 mm + 1,0 ppm
Interní paměť	8 GB	
Napájení	možnost externího napájení typ baterií - interní nevyjímatelné celodenní provoz v jakékoli konfiguraci. (až 10 hodin)	
Provozní teplota	-20° C až 63° C (s interními bateriemi) -40° C až 63° C (s externím napájením)	
Odolnost	IP67	
Rozměry (š x v x d)	47 x 197 x 47 mm	
Hmotnost	0,440 kg (včetně baterií)	

Tabulka 4: Technické specifikace přístroje SOKKIA GCX3 [21]

\*Za normálních měřických podmínek a přísných zpracovatelských metod, včetně použití dvoufrekvenční GPS, přesných efemeridů, klidných ionosférických podmínek, schválené

kalibrace antény, nerušený výhled nad 10 stupňů a doby měření alespoň 3 hodiny (v závislosti na délce základny).

Za zmínění stojí také funkce vyzdvihované autorizovaným prodejcem. Na propagačním letáku můžeme najít tyto informace.

Sokkia GCX3 je dvoufrekvenční přijímač, který v režimu RTK poskytuje centimetrovou přesnost. Tím tedy poskytuje vysoce kvalitní výsledky jak pro geodetické, tak i stavební aplikace. Přijímač je dostatečně univerzální, lze ho tedy uplatnit v celé řadě dalších oblastí a průmyslových odvětví.



Obrázek 15: Přístroj SOKKIA GCX3 [29]

Malý, ale mocný. Zařízení je kompaktní a ultralehké, výsledkem je tedy minimalizování váhy celé výtyčky a dosažení maximální pohyblivosti v terénu. Následně jsme upozorněni, že se nemáme nechat zmást velikostí přijímače, protože právě jeho výkon v prostředí s překážkami překonává jiné tradiční technologie antén.

Díky špičkovým technologiím vám přijímač přináší to nejlepší z GNSS (jak při RTK tak i při sběru statických dat). Prvotřídní výkon má zajistit integrovaná anténa POST2™, zároveň od předchozí generace (GCX2) byly přidány sledované signály Galileo a BeiDou, které mají zajistit tu nejlepší dostupnost pozice takřka kdekoli. Uváděná přesnost u předchozí generace je pak [Statika H: 3,0 mm + 0,5 ppm, V: 5,0 mm + 0,5 ppm]; [RTK: H: 10,0 mm + 1,0 ppm, V: 15,0 mm + 1,0 ppm]. [22]

## Shrnutí

Oba prodejci vyzdvihují velikost a hmotnost, neboli ideálnost pro hybridní měření, při čemž přístroj Topcon je 4krát objemnější a více než 2,5krát těžší než přístroj Sokkia.

Dalším významným parametrem jsou přesnosti jednotlivých přístrojů, v našem případě se pak soustředíme na přesnost v režimu RTK. Při porovnání zjišťujeme, že přístroj Topcon je v určení polohy zhruba 2krát přesnější a v určení výšky má také podávat lepší výsledky než přístroj Sokkia.

Co se týče počtu kanálů tak přístroj Topcon má 2krát více. Sledované signály systémů GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, jsou také rozdílné.

Velkou výhodou přístroje Sokkia pak může být právě jeho výdrž na baterii, kdy na interní baterii má v provozu vydržet až 10 hodin, přístroj Topcon má vydržet až 9

hodin, ale s jednou interní a třemi externími bateriemi (v jeden okamžik je možné mít připojenou pouze jednu externí baterii).

Nejzásadnějším rozdílem je kompenzace náklonu, kterou přístroj Sokkia nedisponuje. Při porovnání je důležité připomenout, že přístroje nejsou v nabídce výrobců ve stejné kategorii, tzn. testujeme dva přístroje, které mají stejný cíl, avšak rozdílnou filozofii použití.

## 3.2 Specifikace použitých testovacích postupů

### 3.2.1 Testovací měření na dálkoměrné a GNSS základně Brno-jih

Základna byla vybudována ve spolupráci společnosti Brněnské komunikace a.s. s Vysokým učením technickým v Brně s cílem možnosti metrologické kalibrace geodetických dálkoměrů a družicových systémů GNSS.

Kalibrační základna je umístěna na pozemcích společnosti Brněnské komunikace a.s. nedaleko autobusového nádraží Zvonařka. Pozemky jsou rezervovány pro budoucí stavbu nového nádraží.

Kalibrační základna je realizována celkem 7 měřickými pilíři v přímce, ty jsou hloubkově založeny na únosném podloží, největší délka mezi pilíři (1. až 7.) činí 417,5 m; nejmenší vzdálenost mezi pilíři je pak 15 m.

Základna je metrologicky délkově navázána autorizovaným metrologickým střediskem a akreditovanou kalibrační laboratoří Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického na státní délkový etalon.

Realizace metrologické GNSS návaznosti do ETRS a S-JTSK byla zajištěna institucí VUT v Brně, jakožto správcem permanentní stanice TUBO. Cílem zbudování základny bylo zvýšení kvality realizace geometrických parametrů na veřejných stavbách dozorovaných společností Brněnské komunikace a.s. [23]



Obrázek 16: Fotografie z dálkoměrné a GNSS základny Brno-jih

Dne 30. 10. 2021 bylo uskutečněno měření s využitím GNSS aparatur Topcon Hiper HR a Sokkia GCX3. Měření probíhalo celý den, celkem bylo měřeno 7 řad na 7 pilířích, přičemž délka observace jedné řady na jednom pilíři byla zvolena na 5 minut se záznamem po 1 sekundě. Ze základny tedy máme celkem 49 pětiminutových observací pro jednu GNSS aparaturu.\*

### **3.2.2 Testovací měření na kalibrační GNSS základně TUBO FAST VUT v Brně**

Na střeše budovy B fakulty stavební VUT v Brně na jihovýchodním a jihozápadním pilíři. Pilíře nejsou zastíněny překážkami, zároveň jsou v bezprostřední blízkosti permanentní stanice TUBO, tudíž jsou pro měření technologií GNSS ideální.

Mezi dny 3. 12. až 5. 12. 2021 bylo uskutečněno měření pomocí obou aparatur. Přístroj Topcon Hiper HR byl umístěn na jihovýchodním pilíři, Sokkia GCX3 na jihozápadním. Doba záznamu byla u obou aparatur nastavena na 2 sekundy, z takového měření bylo celkem pořízeno 81 842 záznamů (pro jednu aparaturu). Při tomto měření byly navíc staženy data z meteostanice přidružené k TUBO. Data obsahují informace o intenzitě celkové/kapalně/pevné, radarovou odrazivost, srážky, viditelnost.\*



Obrázek 17: Fotografie pilířů na budově VUT v Brně

*\* Při měření byla nastavena elevační maska u obou aparatur na 10°; příjem signálů ze všech systémů, které daná aparatura nabízí; observace byla realizována s využitím služby CZEPOS: VRS3 - iMAX - MSM.*

## 4 Vyhodnocení naměřených dat a analýza přesnosti

### 4.1 Z hlediska normálního rozdělení

Při měření klasickými geodetickými metodami na základě podmínek při měření a zvolenou metodou měření z měřené veličiny činíme veličinu náhodnou, jelikož na měřický proces v každé metodě měření působí náhodné, popřípadě i systematické chyby. Jedním měřením je jedna z realizací této náhodné veličiny, která má svůj typ rozdělení pravděpodobnosti, například normální rozdělení.

Velké odchylky od normálního rozdělení vznikají v případě použití méně přesných přístrojů, málo důrazného měření, v případě nahromadění systematických chyb nebo při značné proměnlivosti parametrů rozdělení v průběhu měření.

Jedním ze základních předpokladů statistických hypotéz je normální rozdělení testovaných dat. [24] [25]

#### Realizované testy

I. Pro statistické testování normality byla zvolena v programu STATISTICA 12 Lillieforsova modifikace Kolmogorov-Smirnov testu. Hladina významnosti  $\alpha$  byla zvolena 5 %, jedná se tedy o 95% interval. Na základě p-hodnoty bylo stanoveno, zda hypotézu o normálním rozdělení zamítáme či nezamítáme.

V návodu statistického software je poznamenáno, že testy normality mají tendenci zamítat hypotézu s rostoucí velikostí testovaného vzorku a s tím rostoucí nepatrné odchylky od normálního rozdělení. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl vyzkoušet, do jaké míry je pro velikosti mých souborů tato skutečnost limitující. Byly tedy vygenerovány soubory dat s normálním rozdělením  $N(0;1)$ , dle výsledků viditelných v Tabulce 5 je p-hodnota ve všech případech až na velikost vzorku o 600 prvcích větší než hladina alfa 5 %, tudíž normální rozdělení nezamítáme. V druhém kroku jsem 10 % z každého souboru nahradil normálním rozdělením  $N(0,1; 1,1)$  a pozoroval vliv na výsledné posouzení hypotézy. Výsledkem je nezamítnutí nulové hypotézy, všechny p-hodnoty jsou větší než zvolená hladina alfa, tzn. nezamítáme normalitu souboru.

VEL. VZORKU	D <sub>N</sub> (0;1)	D <sub>N</sub> (0,1;1,1) <sub>10%</sub>	p-hodnota
100	0.054	0.047	p > .20
200	0.035	0.040	p > .20
300	0.033	0.031	p > .20
400	0.029	0.029	p > .20
500	0.020	0.021	p > .20
600	0.034	0.034	p < ,10
700	0.020	0.026	p > .20
800	0.014	0.018	p > .20
900	0.022	0.024	p > .20
1000	0.019	0.010	p > .20
5000	0.008	0.009	p > .20
10000	0.005	0.005	p > .20
100000	0.002	0.001	p > .20

Tabulka 5: Testování funkčnosti statistického programu

II. Dále bylo pozorováno, jaký vliv z hlediska normálního rozdělení bude mít na data odstranění hodnot, které se nacházejí mimo intervaly 2; 2,5 a 3 násobku směrodatné odchylky výběru od střední hodnoty. Posouzení bylo opět pomocí p-hodnot s doplněním D hodnot, která vyjadřuje maximální lineární vzdálenost empirické a hypotetické distribuční funkce.

III. U měření byla dále určovaná špičatost a šikmost jejich rozdělení. U koeficientu špičatosti se očekává, že bude nabývat hodnot větších jako 0, jelikož rozdělení GNSS měření má špičatější charakter, než odpovídá normálnímu rozdělení. U koeficientu šikmosti se očekává hodnota blízká nule, rozdělení GNSS měření by mělo mít symetrický charakter.

IV. Posledním testováním v této části bude určení intervalových odhadů a porovnání s intervalovými odhady normálního rozdělení.

#### 4.1.1 Krátké intervaly

I. U všech 49 pětiminutových observací byla testována normalita v jednotlivých souřadnicových složkách. Výsledkem je zamítnutí nulové hypotézy pro hladinu  $\alpha = 5 \%$  ve všech případech pro oba testované přístroje, žádný z pořízených souborů dat nemá tedy normální rozdělení.

II. Výsledky pozorování vlivu odstranění hodnot které se nachází mimo uvedené intervaly jsou, viditelné v příložených tabulkách. Hodnota D uvedená v tabulkách byla určena jako průměr z D hodnot všech pětiminutových observací. Čím je červená barva

intenzivnější, tím větší je hodnota maximální lineární vzdálenosti empirické a hypotetické distribuční funkce a tím více je rozdělení odlišené od normálního.

VLIV ODSTRANĚNÍ HODNOT MIMO UVEDENÝ INTERVAL POSOUZENÍ PODLE D-HODNOTY								
	TOPCON				SOKKIA			
	2	2,5	3	PŮVODNÍ SOUBOR	2	2,5	3	PŮVODNÍ SOUBOR
Y	0.156	0.147	0.145	0.145	0.157	0.151	0.156	0.156
X	0.131	0.124	0.123	0.123	0.143	0.144	0.144	0.145
H	0.092	0.089	0.088	0.087	0.099	0.097	0.098	0.098

Tabulka 6: Vliv odstranění odlehlých hodnot - základna

Z výsledků je viditelné, že u přístroje Topcon se normálnímu rozdělení přiblížíme nejvíce v případě, kdy odstraníme ta měření, která se nachází mimo interval trojnásobku výběrové střední chyby. Při odstranění měření které jsou mimo interval dvojnásobku, se normálnímu rozdělení nejvíce vzdalujeme.

U přístroje Sokkia výsledek není tak jednoznačný. K největšímu přiblížení došlo při odstranění hodnot mimo interval dvouapůlnásobku výběrové střední chyby v ose Y a H, v ose X pak šlo o odstranění hodnot mimo interval dvounásobku výběrové střední chyby.

III. Pro všechny observace byly také vypočítány koeficienty špičatosti a šikmosti (Příloha 1 až 4). Zde si uvedeme pouze průměrné hodnoty (aritmetický průměr koeficientů všech observací).\*\*

	PRŮMĚRY KOEFICIENTŮ ŠPIČATOSTI A ŠIKMOSTI					
	TOPCON			SOKKIA		
	Y	X	h	Y	X	h
ŠPIČATOST	-0.009	-0.049	-0.171	-0.025	0.084	-0.302
ŠIKMOST	-0.068	0.035	0.065	0.023	-0.036	0.069

Tabulka 7: Průměry koeficientů špičatosti a šikmosti - základna

\*\*Z uvedené tabulky průměrných koeficientů bychom mohli nabývat dojem že:

Průměrné koeficienty špičatosti vychází ve všech případech kromě složky X přístroje Sokkia záporné, to by znamenalo že, rozdělení je méně špičaté než normální, což vede k rovnoměrnému rozdělení.

Průměrné koeficienty šikmosti se blíží 0, znamínko je proměnlivé, to by znamenalo přibližně symetrické soubory vůči střední hodnotě.



Pro posouzení těchto koeficientů je důležité neopomíjet znalosti uvedené v části 1.3.5. Zároveň je nutné nahlédnout do kompletní tabulky (Příloha 1 až 4), ze které vidíme velkou proměnlivost jednotlivých koeficientů. Průměrné hodnoty jsou tedy lehce zavádějící.

IV. Pro jednotlivé 5minutové observace byla v jednotlivých souřadnicových složkách spočítána střední hodnota a směrodatná odchylka výběru. Z těchto veličin byly vytvořeny intervaly spolehlivosti pro  $t = 1; 2; 2,5; 3$ . Do těchto intervalů byla následně data tříděna, z počtu měřených v jednotlivých intervalech byla spočítána procentuální četnost v jednotlivých intervalech. Výstup v tabulce je průměrem intervalů spolehlivosti ze všech 5 minutových observací.

ODLEHLOST OD TABULKOVÝCH HODNOT – 5 MIN SOUBORY								
SOUŘ.	TOPCON				SOKKIA			
	t = 1	t = 2	t = 2.5	t = 3	t = 1	t = 2	t = 2.5	t = 3
Y	67%	96%	99%	99.7%	69%	96%	99%	99.8%
X	66%	96%	99%	99.7%	73%	96%	99%	99.7%
H	67%	96%	99%	99.8%	66%	96%	99%	99.9%

Tabulka 8: Průměry intervalů spolehlivosti určené z 5minutových observací - základna

Z tabulky lze vidět, že při součiniteli konfidence  $t = 1$  u přístroje TOPCON dostáváme ve všech případech hodnotu menší, než je příslušná tabulková. U přístroje SOKKIA můžeme pozorovat zvýšenou hodnotu ve složce X, ta pak koresponduje s kladnou špičatostí z předchozí části III.

Při  $t = 2$  do tohoto intervalu patří 96 % měření u obou přístrojů a ve všech souřadnicových složkách, což je o 1 % více, než je tabulková hodnota.

Při  $t = 2,5$  se dostáváme na 99 %, taková hodnota již koresponduje s jí odpovídající tabulkovou.

Při  $t = 3$  je tabulková hodnota 99,7 %, zde jsou mírné rozdíly, kdy v našem případě do stanoveného intervalu spadá větší počet měření.

#### 4.1.2 Kontinuální 45hodinová observace

I. Při statistickém testování normality jsem v prvním kroku otestoval celý soubor. V tomto případě došlo k zamítnutí hypotézy o normálním rozdělení u obou přístrojů ve všech souřadnicových složkách.

V druhém kroku jsem se na v návaznosti na informace uvedené v návodu o problematice testování rozsáhlých souborů rozhodl vytvořit z celého souboru 100 náhodných výběrů, každý o 150 záznamech (5 minut). Tabulka uvádí poměr zamítnutých z celkového počtu testovaných.

	POČET ZAMÍTNUTÍ - 5 MIN SOUBORY; $\alpha=5\%$		
	Y	X	H
TOPCON	100/100	100/100	67/100
SOKKIA	100/100	100/100	70/100

Tabulka 9: Statistické testování normality - budova VUT

Z tabulky je viditelné největší přiblížení k normálnímu rozdělení v případě výškové složky, avšak u obou přístrojů došlo i tak k zamítnutí více než 2/3 z celkového počtu náhodných výběrů.

II. Při odstranění hodnot mimo uvedené intervaly se dostáváme k výsledkům uvedeným v tabulce níže.

Z výsledků vyplývá pro oba přístroje stejný závěr. Nejvíce se normálnímu rozdělení přiblížíme při odstranění hodnot mimo interval pro  $t=3$ .

Výsledek nejvhodnější úpravy s cílem dosažení normálního rozdělení u přístroje TOPCON koresponduje s výsledkem příslušného testu na lokalitě základna, u přístroje SOKKIA se výsledky liší, v případě složky X jsou dokonce naprosto opačné.

	VLIV ODSTRANĚNÍ HODNOT MIMO UVEDENÝ INTERVAL POSOUZENÍ PODLE D-HODNOTY							
	TOPCON				SOKKIA			
	2	2,5	3	PŮVODNÍ SOUBOR	2	2,5	3	PŮVODNÍ SOUBOR
Y	0.122	0.106	0.105	0.109	0.134	0.117	0.110	0.105
X	0.103	0.091	0.090	0.091	0.104	0.094	0.091	0.087
H	0.057	0.050	0.049	0.047	0.058	0.050	0.048	0.050

Tabulka 10: Vliv odstranění odlehlých hodnot - budova VUT

III. Pro jednotlivé souřadnicové složky ze všech záznamů byly určeny koeficienty špičatosti a šikmosti.

KOEFIČIENTY ŠPIČATOSTI A ŠIKMOSTI - CELÝ SOUBOR						
	TOPCON			SOKKIA		
	Y	X	h	Y	X	h
ŠPIČATOST	0.086	0.112	0.181	0.102	0.186	0.358
ŠIKMOST	0.000	0.006	0.012	0.030	-0.019	0.053

Tabulka 11: Koeficienty špičatosti a šikmosti určené z celého souboru - budova VUT

Výsledky z celého souboru poukazují na větší špičatost nežli má normální rozdělení.

Pro možnost porovnání s měřením uskutečněným na základně jsem celý soubor rozdělil na po sobě jdoucí části o délce pěti minut (v takovém případě pěti minutám odpovídá 150 záznamů pro 2sekundový interval registrace).

KOEFIČIENTY ŠPIČATOSTI A ŠIKMOSTI - 5 MIN SOUBORY						
	TOPCON			SOKKIA		
	Y	X	h	Y	X	h
ŠPIČATOST	0.033	0.097	0.103	-0.005	0.014	0.003
ŠIKMOST	0.019	-0.024	0.007	0.005	-0.003	0.014

Tabulka 12: Průměry koeficientů špičatosti a šikmosti z 5minutových souborů - budova VUT

IV. Celý soubor o 81 927 záznamech (s intervalem 2 s) pro každou aparaturu byl roztržěn do intervalů spolehlivosti dle příslušné střední hodnoty a směrodatné odchylky výběru.

ODLEHLOST OD TABULKOVÝCH HODNOT - CELÝ SOUBOR								
	TOPCON				SOKKIA			
	t = 1	t = 2	t = 2.5	t = 3	t = 1	t = 2	t = 2.5	t = 3
Y	73%	94%	99%	99.7%	57%	93%	98%	99.5%
X	72%	95%	98%	99.8%	73%	95%	98%	99.6%
h	70%	96%	99%	99.6%	73%	94%	99%	99.5%

Tabulka 13: Intervaly spolehlivosti určené z celého souboru - budova VUT

Pro každou pětiminutovou část jsem určil intervalové odhady, pro sumarizaci do tabulky byl použit aritmetický průměr ze všech těchto částí.

ODLEHLOST OD TABULKOVÝCH HODNOT - 5 MIN SOUBORY								
	TOPCON				SOKKIA			
	t = 1	t = 2	t = 2.5	t = 3	t = 1	t = 2	t = 2.5	t = 3
Y	68%	96%	99%	99.6%	68%	96%	99%	99.7%
X	68%	96%	99%	99.6%	68%	96%	99%	99.6%
h	68%	96%	99%	99.6%	68%	96%	99%	99.6%

Tabulka 14: Průměry intervalů spolehlivosti určené z 5minutových observací - budova VUT

## 4.2 Výpočet výběrových směrodatných odchylek

Směrodatná odchylka výběru je jednou z možných charakteristik přesnosti určení polohy bodu ve směru jednotlivých souřadnicových os.

### 4.2.1 Krátké intervaly

Z měření na základně bylo pořízeno celkem 49 pětiminutových observací, pro každou z nich byla vypočítána směrodatná odchylka výběru v souřadnicích Y, X a h. Výsledné průměry směrodatných odchylek výběru všech observací jsou uvedeny v Tabulce 15.

Pro sumarizaci jsem z rozsáhlé tabulky o 49 buňkách určil průměrné hodnoty směrodatných odchylek výběru.

**Do průměrů přístroje Sokkia nevstupovaly observace Ř2P6, Ř3P1, Ř3P6 (Ř - řada; P - Pilíř). U těchto observací došlo k výraznému zhoršení, kdy aparatura určovala souřadnice, které byly v poloze řádově o decimetry odlišné než ostatní observace na těchto pilířích. Při nahlédnutí do dat registrovaných aparaturou nebyla zjištěna příčina, aparatura vykazovala fixní řešení, DOP hodnoty rozměrem navazovali na ostatní měření, odhady přesnosti HRMS a VRMS nebyly nikterak rozdílné vzhledem k ostatním měřením.**

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad (7)$$

ZÁKLADNA - SMĚRODATNÁ ODCHYLKA VÝBĚRU			
PRŮMĚRNÁ			
	$\overline{sY}$ [m]	$\overline{sX}$ [m]	$\overline{sh}$ [m]
TOPCON	0.0017	0.0021	0.0044
SOKKIA	0.0019	0.0023	0.0046

Tabulka 15: Průměrné výběrové směrodatné odchylky určené z 5minutových observací - základna

Při přepočtu průměrných směrodatných odchylek průměru na střední souřadnicovou chybu  $m_{x,y}$  dostaneme pro přístroj Topcon  $m_{x,y} = 0,0019$  m; Sokkia  $m_{x,y} = 0,0021$  m.

#### 4.2.2 Kontinuální 45hodinová observace

Z měření na budově VUT v Brně bylo celkem pořízeno 81 842 měření při 2sekundovém záznamu. Tento rozsáhlý soubor jsem pro posouzení směrodatných odchylek uvažoval jako navazující pětiminutová měření. Při registraci po 2 sekundách to znamená, že 5minutové observaci přísluší 150 záznamů. Z celého souboru tak dostáváme 545 pětiminutových observací, kdy pro každou byly vypočítány směrodatné odchylky výběru.

BUDOVA VUT - SMĚRODATNÁ ODCHYLKA VÝBĚRU			
PRŮMĚRNÁ			
	$\overline{sY}$ [m]	$\overline{sX}$ [m]	$\overline{sh}$ [m]
TOPCON	0.0014	0.0017	0.0032
SOKKIA	0.0014	0.0018	0.0034

Tabulka 16: Průměrné výběrové směrodatné odchylky určené z 5 minutových observací - budova VUT

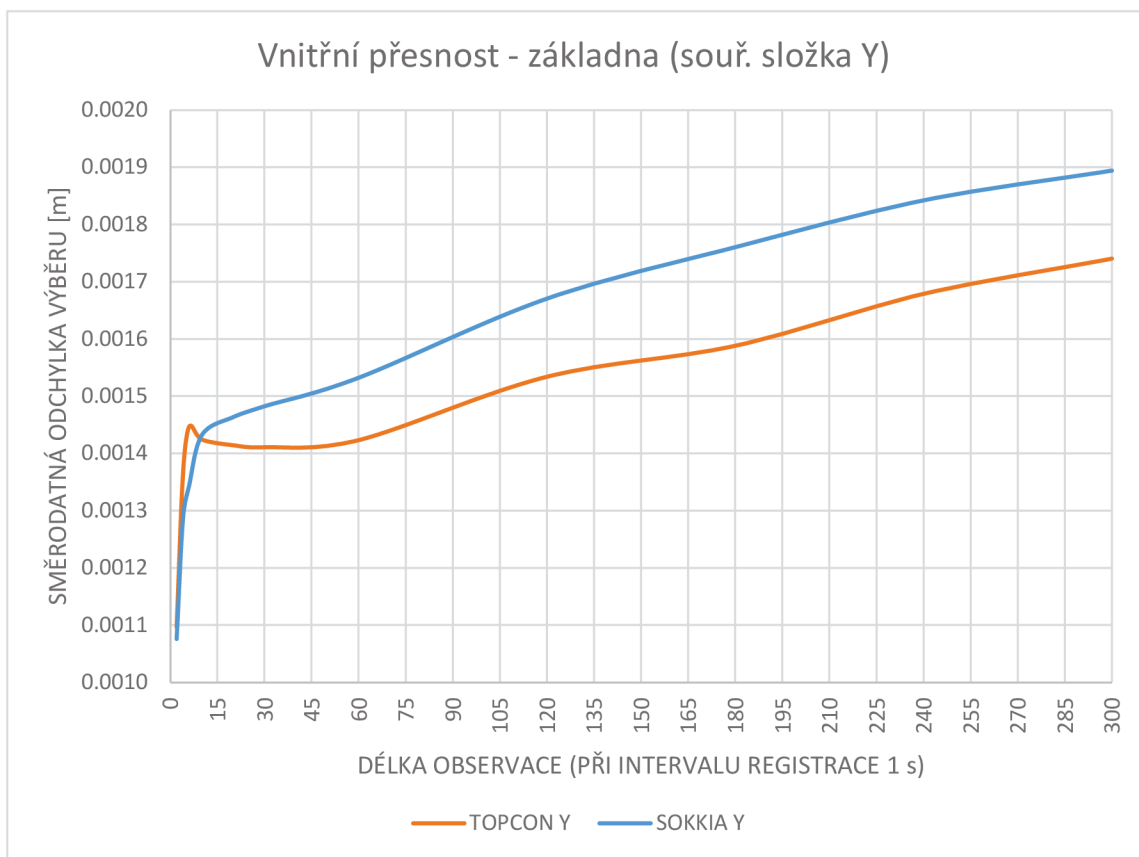
Při přepočtu průměrných směrodatných odchylek průměru na střední souřadnicovou chybu  $m_{x,y}$  dostaneme pro přístroj Topcon  $m_{x,y} = 0,0016$  m; Sokkia  $m_{x,y} = 0,0016$  m.

### 4.3 Analýza vývoje směrodatných odchylek

Cílem této části bylo určit průběh velikost výběrové směrodatné odchylky v závislosti na délce observace.

#### 4.3.1 Krátké intervaly

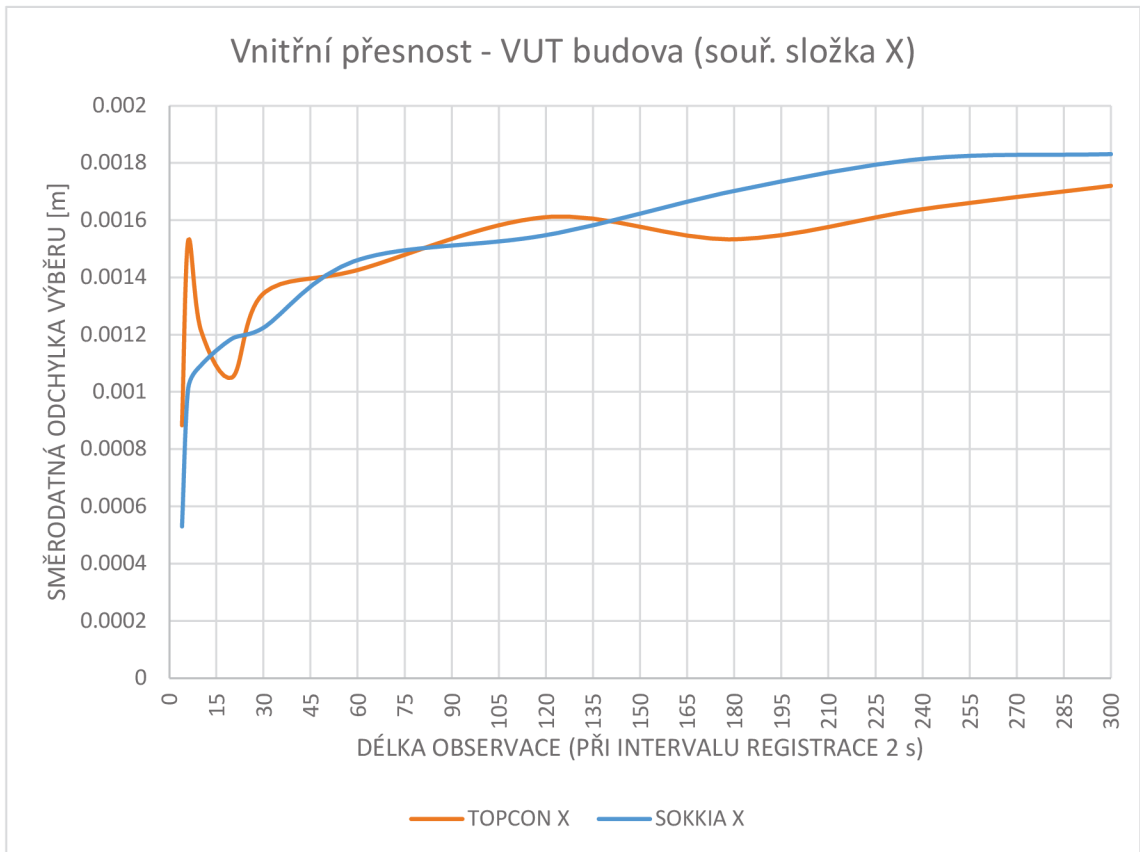
Jednotlivé 5minutové observace byly rozděleny do dílčích segmentů po 2, 4, 6, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 300 sekundách (při intervalu registrace 1 s), pro které byla určena výběrová směrodatná odchylka. Pro sumarizaci jsem udělal průměr jednotlivých segmentů a ty následně vynesl do grafu. **U přístroje Sokkia do výpočtu nebyly zahrnuty uvedené observace, viz 5.1.1.**



Graf 1: Průběh výběrové směrodatné odchylky v závislosti na délce observace - základna

### 4.3.2 Kontinuální 45hodinová observace

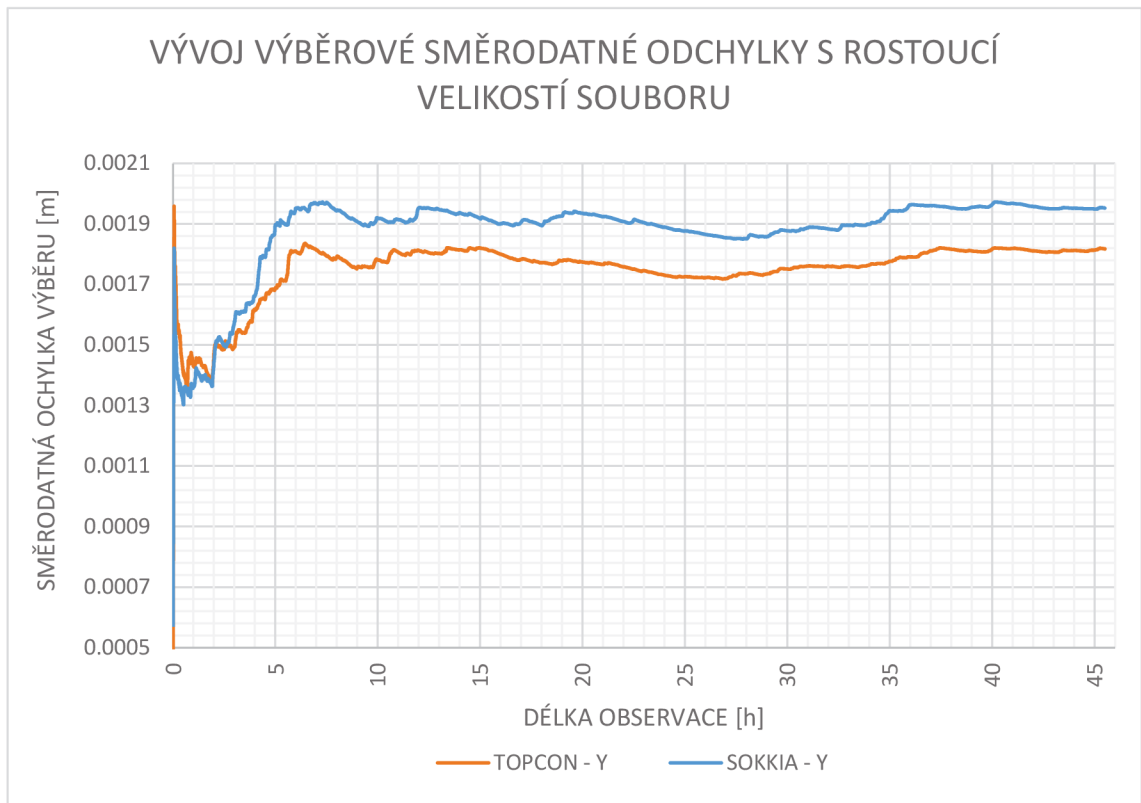
Celý soubor byl rozdělen na po sobě jdoucí 5minutové intervaly, ty byly rozděleny do segmentů po 4, 6, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 300 sekundách (při intervalu registrace 2 s), pro které byla určena výběrová směrodatná odchylka. Pro sumarizaci jsem udělal průměr jednotlivých segmentů a ty následně vynesl do grafu.



Graf 2: Průběh výběrové směrodatné odchylky v závislosti na délce observace - budova VUT

### Ukázka stabilizace výběrové směrodatné odchylky s rostoucí velikostí souboru

V návaznosti na interval registrace 2 sekundy byla spočítána výběrová směrodatná odchylka pro dobu observace 4 sekundy (ze 2 záznamů), následně výpočet pokračoval se zvětšujícím se časovým intervalem. Z grafu můžeme vidět, že k největším změnám dochází v prvních 5 hodinách, po 10 hodinách observace se výběrová směrodatná odchylka „stabilizuje“.



Graf 3: Vývoj výběrové směrodatné odchylky s rostoucí velikostí souboru - budova VUT

## Shrnutí

Z grafů, které jsou výsledkem měření na základně, je viditelné, že k největším změnám dochází v prvních 60 sekundách, následně dochází k jistému stabilizování změn, nedochází k prudkým skokům.

Z grafů reprezentujících výsledky z měření na budově VUT nemůžeme jednoznačně určit čas, po který dochází k největším změnám, je zde významná rozdílnost mezi jednotlivými souřadnicovými složkami.

Za určitou úroveň stabilizace lze považovat také okamžik, ve kterém křivka znázorňující průběh pro přístroj Topcon klesne pod průběh přístroje Sokkia, čímž dojde ke korespondenci s charakteristikami přesnosti dle výrobců aparatur, kdy přístroj Topcon má dosahovat vyšší přesnosti. Další úrovní by byl okamžik, kdy by průběh výběrové směrodatné odchylky byl „rovnoběžný“ s vodorovnou osou grafu viz Graf 6.



## 4.4 Korelační analýzy

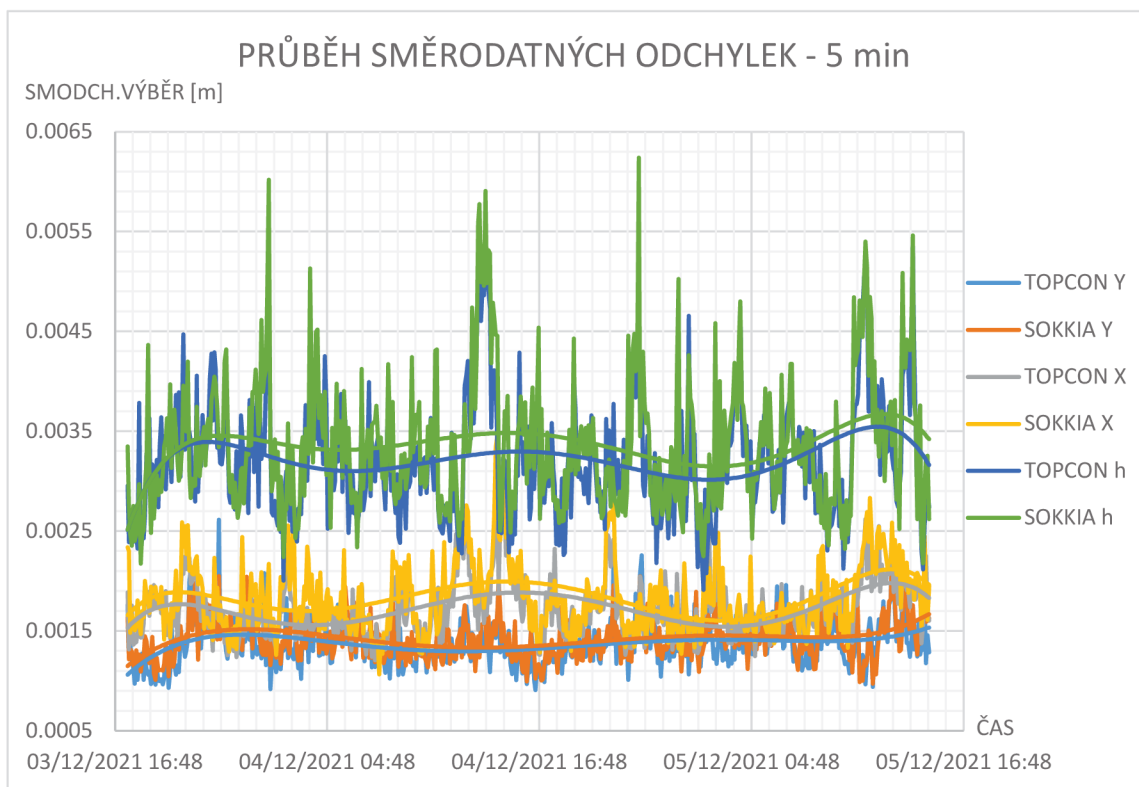
Díky skutečnosti že obě aparatury observovaly současně za prakticky totožných podmínek, dostáváme možnost posoudit míru korelace mezi určitými skutečnostmi u daných přístrojů.

### 4.4.1 Směrodatných odchylek a dílčích měřidel

Korelační koeficient by dle jeho znalosti měl nabývat hodnoty blížící se +1, jelikož na aparatury působí stejné vlivy, avšak u každé se můžou takové vlivy projevit jinak. V tabulce je uvedena míra korelace mezi řadami směrodatných odchylek výběru jednotlivých přístrojů.

KORELAČNÍ KOEFICIENTY SMĚRODATNÉ ODCHYLKY VÝBĚRU TOPCON - SOKKIA		
k_sY	k_sX	k_sh
0.71	0.83	0.80

Tabulka 17: Míra korelace směrodatných odchylek jednotlivých přístrojů



Graf 4: Průběh směrodatných odchylek - budova VUT

Výsledkem je silná závislost v souřadnicové složce Y, velmi silná závislost ve složkách X a h. Vývoj směrodatných odchylek výběru v čase proložený polynomem je viditelný v Grafu 1. Za povšimnutí stojí větší směrodatné odchylky přístroje SOKKIA ve všech souřadnicových osách.

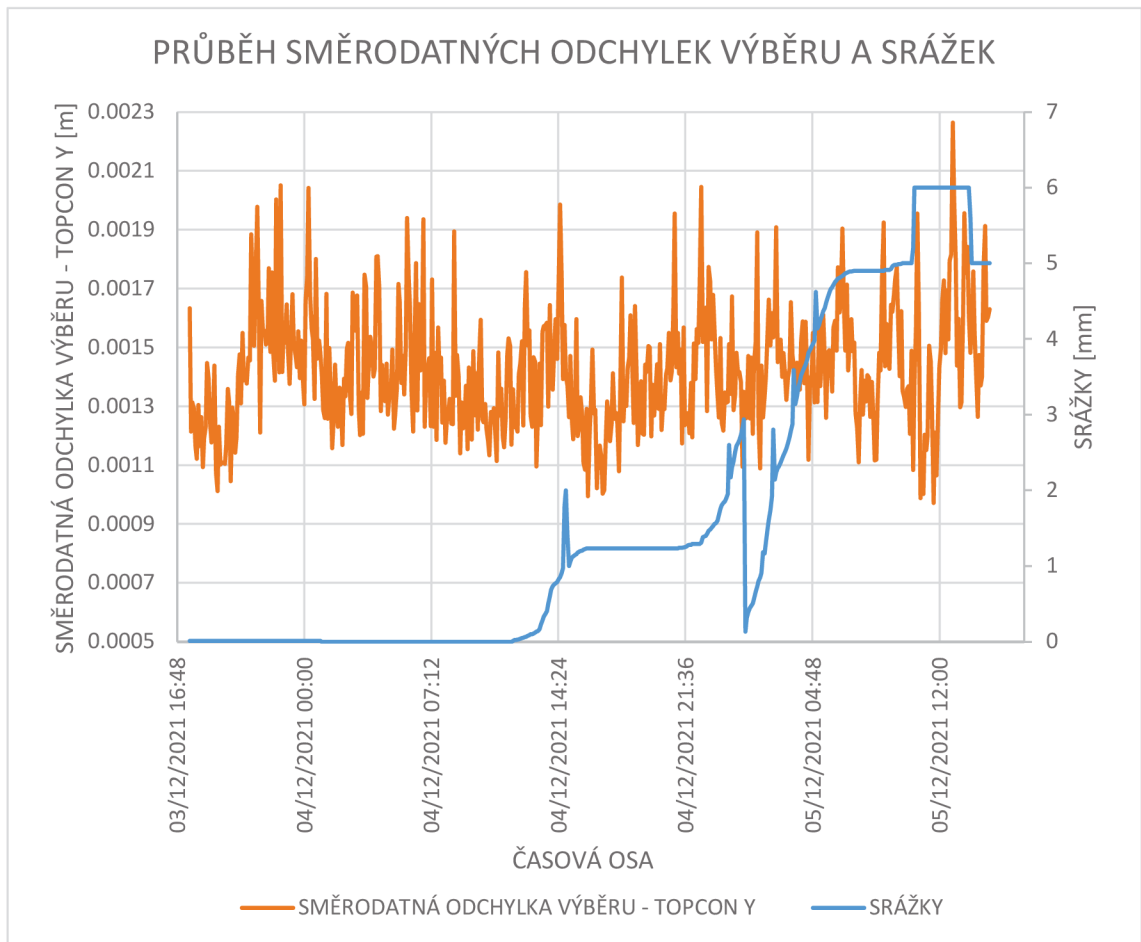
Závěrem je úvaha, že v případě použití identických přístrojů v prakticky identických observačních podmínkách by se hodnota korelace měla teoreticky velmi blížit +1. V případě použití rozdílných přístrojů za prakticky identických observačních podmínek dostaneme hodnotu, která se od +1 bude lišit o interakci přijímače na nepříznivé vlivy, které ovlivňují jeho přesnost.

#### 4.4.2 Směrodatných odchylek a meteorologických dat

Jak již bylo zmíněno v předchozí části, pro měření na střeše budovy VUT máme k dispozici meteorologická data s intervalem záznamu po 1 minutě. Soubor jsem přepracoval tak, aby záznamy byly po 5 minutách (1 pětiminutový záznam je průměrem 5 jednodominutových). Korelační koeficient by dle jednoduché úvahy měl nabývat kladných hodnot, jelikož s rostoucími nepříznivými vlivy v atmosféře by se měla zvětšovat hodnota přesnosti (tedy přesnost zhoršovat).

	KORELAČNÍ KOEFICIENTY SMODCH.VÝBĚR - METEO					
	TOPCON			SOKKIA		
	k_sY	k_sX	k_sh	k_sY	k_sX	k_sh
INTEZITA	0.05	-0.01	-0.02	0.04	-0.06	0.00
INT.KAPALNE	-0.03	-0.06	0.03	0.05	-0.06	0.05
INT.PEVNE	0.07	0.03	-0.04	0.02	-0.03	-0.02
SRÁŽKY	0.12	0.15	0.12	0.15	0.11	0.10

Tabulka 18: Míra korelace směrodatných odchylek a meteorologických dat



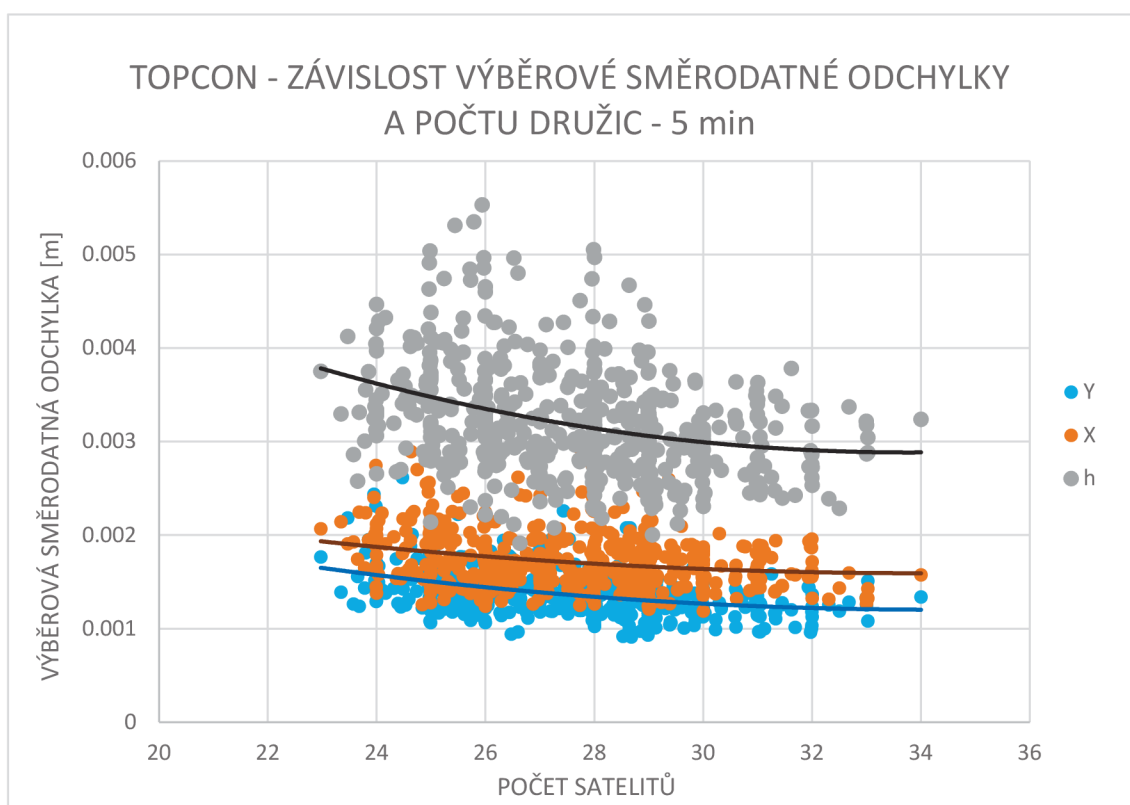
Graf 5: Průběh velikosti výběrové směrodatné odchylky a množství srážek - budova VUT

Míra korelace mezi intenzitami [mm/h] a směrodatnými odchylkami výběru má proměnlivé znaménko i velikost, korelace je velmi slabá, z dat se nedá říci, zda je mezi nimi závislost.

Korelační koeficienty mezi srážkami [mm] a směrodatnými odchylkami výběru nabývají kladných hodnot, korelace je velmi slabá, to vede k závěru, že na testovaných datech je jistá závislost mezi velikostí hodnoty směrodatné odchylky výběru a množstvím srážek. Můžeme tedy říct, že množství srážek v případě obou testovaných aparatur má do jisté míry souvislost s jejich přesností.

### 4.4.3 Směrodatných odchylek a počtu družic

Počet satelitů pro tento výpočet byl stanoven jako průměrná hodnota počtu satelitů v rámci 5minutové observace ze 150 dvousekundových záznamů. Zde lze očekávat záporná korelace, čím větší počet satelitů, tím menší hodnota směrodatné odchylky výběru. Je potřebné neopomínat skutečnost, že počet satelitů ihned neznamená vyšší přesnost viz kapitola 1.2.



Graf 6: Závislost výběrové směrodatné odchylky a počtu družic - budova VUT

KORELAČNÍ KOEFICIENT SMODCH. VÝBĚR - POČET DRUŽIC					
TOPCON			SOKKIA		
k_sY	k_sX	k_sh	k_sY	k_sX	k_sh
-0.43	-0.28	-0.32	-0.41	-0.25	-0.29

Tabulka 19: Míra korelace mezi směrodatnými odchylkami a počtem družic - budova VUT

Dle očekávání všechny korelace vycházejí záporné, v případě složky Y u obou přístrojů dostáváme střední korelaci, v ostatních případech slabou korelaci. Za povšimnutí stojí také, že výsledky v jednotlivých souřadnicových osách obou přístrojů jsou poměrově velmi podobné. Podle výsledků uvedených v tabulce má počet družic vliv na přesnost. Z grafu můžeme vidět, že rostoucí počet družic nejvíce ovlivní výškovou složku, kde přesnost roste rychleji než u složek polohy.

#### 4.4.4 DOP hodnot a počtu družic

V této části se budu věnovat závislosti velikosti jednotlivých DOP hodnot na počtu družic.

Testované aparatury registrují ke každému záznamu DOP hodnoty určené z konfigurace všech družic a počet družic rozdělených dle konkrétních navigačních systémů. Míra korelace je určena z původních neupravených dat.

K posouzení závislosti jsem použil Pearsonův korelační koeficient. Zde se očekává, že koeficient bude záporný. Čím více je družic, tím větší pravděpodobnost je na vhodnou konfiguraci, tedy malou DOP hodnotu.

Výsledky jsou uvedeny v tabulkách níže. Jednotlivé sloupce jsou barevně škálovány pro rychlejší orientaci, čím sytější barva je, tím je větší závislost.

#### Krátké intervaly

	MÍRA KORELACE – POČET DRUŽIC / DOP HODNOTY									
	HDOP		PDOP		VDOP		GDOP		TDOP	
	TOPCON	SOKKIA	TOPCON	SOKKIA	TOPCON	SOKKIA	TOPCON	SOKKIA	TOPCON	SOKKIA
GPS	-0.43	-0.40	-0.32	-0.28	-0.20	-0.18	-0.44	-0.38	-0.63	-0.54
GLONASS	-0.66	-0.43	-0.42	-0.42	-0.20	-0.33	-0.39	-0.37	-0.27	-0.22
GALILEO	-0.41	-0.36	-0.55	-0.55	-0.49	-0.52	-0.47	-0.47	-0.25	-0.24
BEIDOU	-0.45	-0.32	-0.21	-0.04	-0.05	0.10	-0.21	-0.05	-0.17	-0.07
HROMADNĚ	-0.86	-0.70	-0.70	-0.62	-0.46	-0.46	-0.67	-0.60	-0.53	-0.48

Tabulka 20: Míra korelace mezi počtem družic a DOP - základna

#### Kontinuální 45hodinová observace

	MÍRA KORELACE – POČET DRUŽIC / DOP HODNOTY									
	HDOP		PDOP		VDOP		GDOP		TDOP	
	TOPCON	SOKKIA	TOPCON	SOKKIA	TOPCON	SOKKIA	TOPCON	SOKKIA	TOPCON	SOKKIA
GPS	-0.50	-0.49	-0.40	-0.43	-0.32	-0.35	-0.51	-0.53	-0.69	-0.69
GLONASS	-0.55	-0.60	-0.43	-0.45	-0.34	-0.34	-0.43	-0.45	-0.40	-0.40
GALILEO	-0.39	-0.34	-0.46	-0.43	-0.44	-0.41	-0.39	-0.37	-0.22	-0.20
BEIDOU	-0.41	-0.32	-0.22	-0.15	-0.13	-0.07	-0.21	-0.13	-0.16	-0.09
HROMADNĚ	-0.85	-0.83	-0.70	-0.69	-0.57	-0.55	-0.70	-0.68	-0.62	-0.60

Tabulka 21: Míra korelace mezi počtem družic a DOP - budova VUT

Z testu můžeme vidět, který navigační systém má nejvyšší míru korelace s výslednou DOP hodnotou. Za povšimnutí stojí nízká závislost na systému BeiDou, který na obou lokalitách a u obou přístrojů vykazuje nejnižší hodnoty korelace ze všech navigačních systémů. Zajímavostí je rozhodně také červeně vyznačené pole. Zde vyšla hodnota korelace pro systém BeiDou kladná, což by v praxi znamenalo, že s rostoucím

počtem družic dochází k nárůstu DOP hodnoty. Konfigurace družic BeiDou nejspíše není ideální pro naše využití.

## 5 Testování kompenzace náklonu

Závěrečná část této práce bude věnována testování funkce automatického urovnání, kterou disponuje aparatura Topcon HiPer HR využívající přístupů s elektronickým kompasem.

Při testování byly použity dvě identické aparatury s identickým nastavením elevační masky, přijímaných signálů a službou VRS.

Při realizaci testů a při posuzování výsledků jsem dospěl k názoru, že otestování a zjištění přesnosti této funkce bude náročnější, než jsem očekával. Důvody jsou takové, že samotné GNSS měření jsou poměrně neprůhledná, nevidíme, co se děje na pozadí, bavíme se tedy o jisté černé skříňce. K takové černé skříňce přidáme IMU jednotku, která využívá elektronický kompas a do jejíž funkčnosti se dá stěží nahlédnout.

Máme tedy černou skříňku s funkcí kompenzace náklonu, která si žije svým životem a některé její interakce se velmi těžko odůvodňují.

Přesnost automatického urovnání je silně závislá na správnosti provedené kalibrace uživatelem. Ke kalibraci je prakticky nezbytné použít stativ s trojnožkou, která musí být horizontována, zároveň musíme mít možnost přijímačem otáčet kolem jeho osy.

Nabytí dojmu, že ke kalibraci stačí výtyčka, která bude v průběhu kalibrace držena svisle, je chybné. Původní testování jsem realizoval i s přístrojem kalibrovaným na výtyčce, v takovém případě rozdíly určení polohy bodu v symetrických polohách byly až v řádu decimetrů vzdáleny.

Praktické použití této funkce s přístupem elektronického kompasu je tedy velmi komplikované. Jak již bylo zmíněno, chování IMU jednotky je nepředvídatelné. V průběhu měření bez jakéhokoliv důvodu může zahlásit chybu s požadavkem provedení kalibrace a při skutečnosti komplikovaného kalibračního postupu není uživatel bez příslušného vybavení schopen tento postup vykonat s odpovídající kvalitou.

Zvolené testovací postupy lze rozdělit do tří částí.

I) Experimentální měření při naklonění a rotaci aparatury kolem její osy:

- i) hodnocení na základě MAX-MIN,
- ii) hodnocení na základě výběrové směrodatné odchylky,

- iii) hodnocení na základě délky k teoreticky pravé hodnotě.
- II) Experimentální měření ve svislé poloze s otáčením do symetrických poloh:
- i) hodnocení na základě MAX-MIN,
  - ii) hodnocení na základě výběrové směrodatné odchylky,
  - iii) hodnocení na základě délky k teoreticky pravé hodnotě,
  - iv) hodnocení na základě vzdálenosti mezi průměrnými souřadnicemi jednotlivých poloh a teoreticky pravé.
- III) Experimentální měření v nesvislé poloze s otáčením do symetrických poloh:
- i-iv) identické s II).

Veškeré testování bylo vykonáno s nastavením aparatur, které bylo již uvedeno v předešlých částech práce.

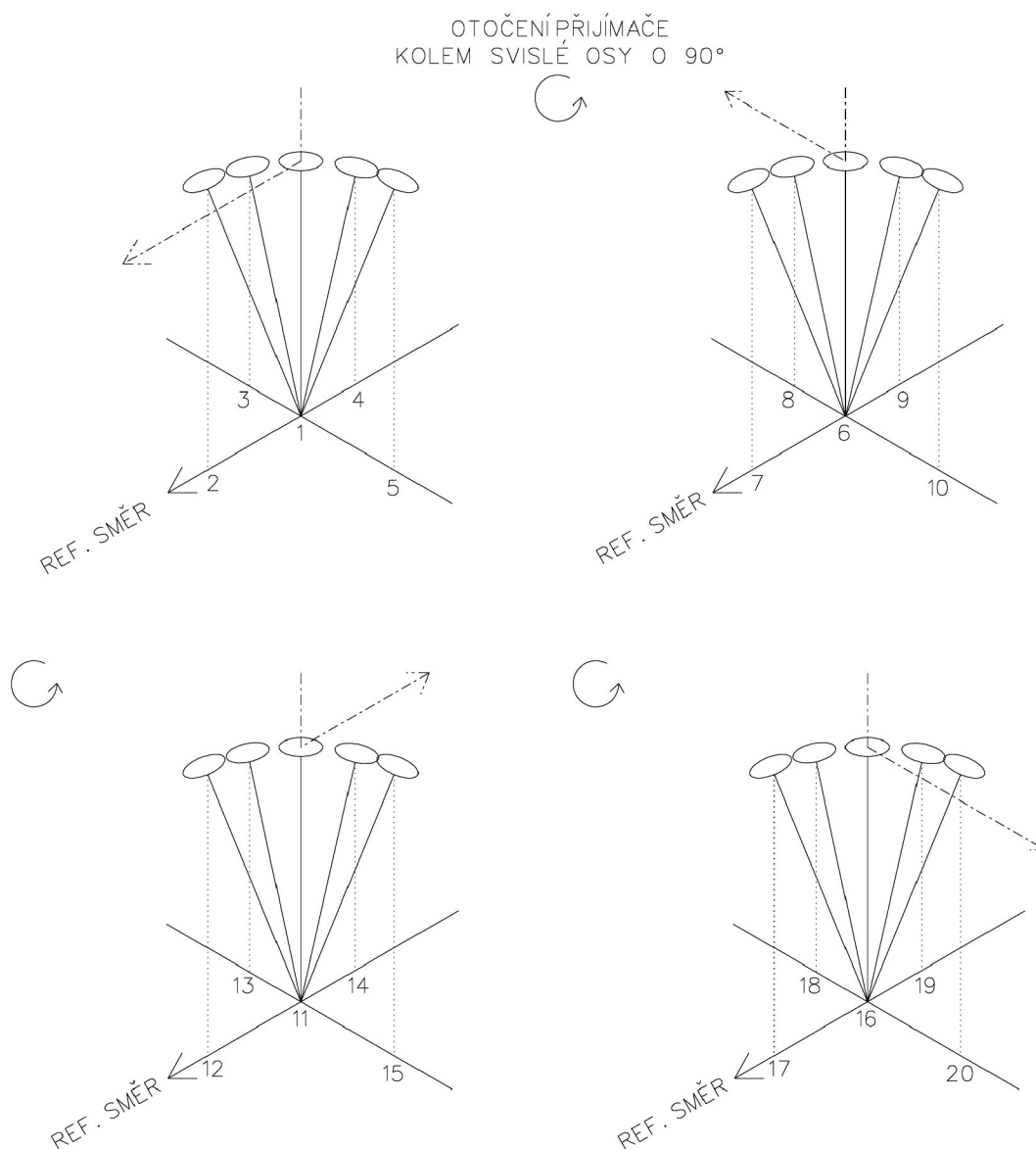
## **5.1 Experimentální měření při naklonění a rotaci aparatury kolem její osy**

Cílem tohoto testu bylo v krátkém časovém úseku určit přesnost, se kterou aparatura při zapnutí kompenzace náklonu pracuje.

Počet záznamů pro určení polohy bodu byl v aparatuře nastaven na 5 v návaznosti na vyhlášku č. 31/1995 Sb. (9.2).

Postup byl rozdělen do čtyř skupin, ty se od sebe liší rozdílným směrem natočení aparatury vůči její svislé ose vzhledem k referenčně zvolenému směru v terénu. Každá jednotlivá skupina obsahuje celkem 5 měřených bodů. Schéma postupu měření je v každé skupině stejné, prvním bodem každé skupiny je měření ve svislé poloze, při druhém bodě je výtyčka vykloněna do referenčního směru, následující body jsou realizovány v naklonění do směrů kolmých vůči referenčnímu směru po směru hodinových ručiček. Při dokončení skupiny se aparaturou otočilo o  $90^\circ$  vůči její svislé ose a realizovala se následující skupina. Obrázek 18 reprezentuje schéma postupu měření.





Obrázek 18: Schéma vstupního testu

### 5.1.1 Hodnocení na základě MAX-MIN

Pro prvotní klasifikaci výsledků z tohoto testu jsem použil rozdíly maximálních a minimálních hodnot souřadnic. Jedná se tedy o pravoúhelníky, jejichž strany vzniknou proložením souřadnic Y, X bodů, které jsou nejvíce odlehlé. Tento pravoúhelník bude teoretickou reprezentací plochy, ve které může být výsledek měření realizován.

Ke klasifikaci výškové složky byl také použit rozdíl maximálních hodnot.

SKUPINA	APARATURA A			APARATURA B		
	maxY [m]	maxX [m]	maxh [m]	maxY [m]	maxX [m]	maxh [m]
I	0.039	0.048	0.009	0.021	0.032	0.013
II	0.047	0.040	0.014	0.011	0.019	0.014
III	0.031	0.021	0.011	0.011	0.019	0.014
IV	0.044	0.042	0.013	0.022	0.035	0.015
I-IV	0.065	0.063	0.023	0.056	0.062	0.016

Tabulka 22: Výsledky MAX-MIN - náklon t.1

V tabulce lze vidět výsledky jednotlivých skupin. Poslední řádek je určen ze všech skupin, tudíž má nejlepší reprezentační schopnost, jelikož při jeho výpočtu není hledáno na jednotné natočení vůči referenčnímu směru.

U obou aparatur jsou výsledky posledního řádku velmi podobné, řádově se jedná o 6 centimetrů v každé z vodorovných os. U výšek nedochází k tak velké rozdílnosti.

### 5.1.2 Hodnocení na základě výběrové směrodatné odchylky

SKUPINA	APARATURA A			APARATURA B		
	sY [m]	sX [m]	sh [m]	sY [m]	sX [m]	sh [m]
I	0.016	0.019	0.004	0.009	0.012	0.005
II	0.021	0.016	0.005	0.005	0.008	0.006
III	0.015	0.009	0.004	0.005	0.008	0.006
IV	0.018	0.019	0.005	0.010	0.013	0.006
I-IV	0.017	0.016	0.005	0.017	0.017	0.005

Tabulka 23: Výsledky výběrových směrodatných odchylek - náklon t.1

### 5.1.3 Hodnocení na základě délky k teoreticky pravé poloze

Teoreticky pravá poloha je určena jako průměr měření GNSS aparatur umístěných ve stavu s vypnutým kompenzátorem (průměr z 1200 měření realizovaných během 1 hodiny).

Z jednotlivých bodů skupin byly spočítány vodorovné délky k teoreticky pravé poloze bodu, k prezentaci přesnosti je vybrána ta největší vzdálenost pro každou aparaturu. Na rozdíl od MAX-MIN tedy nejsou hledány maximální rozdíly v jednotlivých souřadnicových osách, ale největší vzdálenost mezi skutečně zaměřenými body.

	APARATURA A	APARATURA B
MAXIMÁLNÍ DÉLKA	0.061 m	0.047 m

Tabulka 24: Maximální délka k teoreticky pravé poloze - náklon t.1

## 5.2 Experimentální měření ve svislé poloze s otáčením do symetrických poloh

Při tomto testu byla aparatura umístěna na stativ, který byl nad bodem centrován optickým centrovačem a horizontován pomocí kompenzátoru totální stanice.

Interval záznamu byl nastaven na 1 sekundu. Měření bylo rozděleno do I. a II. polohy\* a se zapnutým a vypnutým kompenzátořem viz schéma níže. Měření bylo opakováno pro každou polohu 5krát.

Výsledky byly určeny ze všech realizovaných měření s rozdělením dle stavu kompenzátořu.

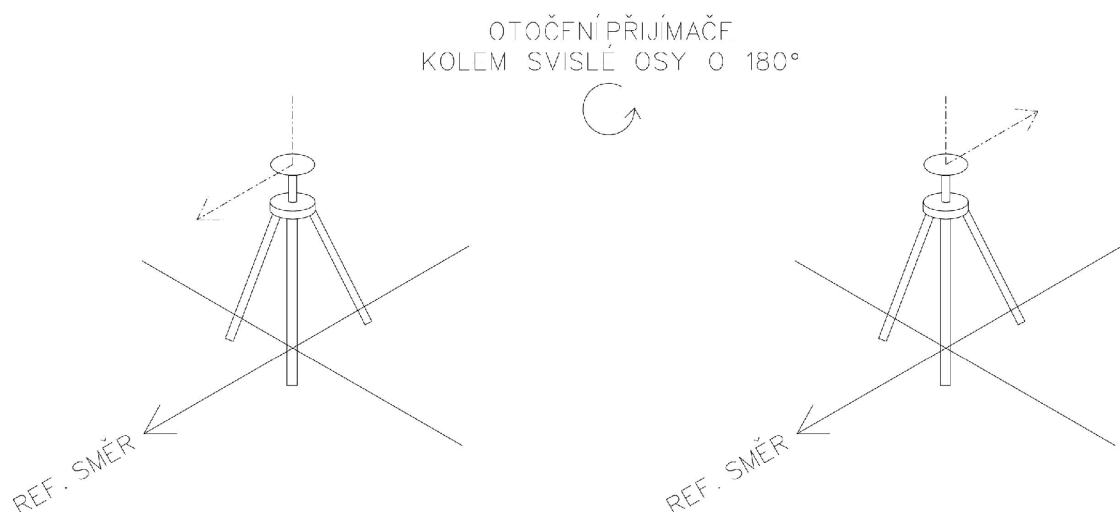
S cílem zachytit poměr přesnosti GNSS měření oproti GNSS+IMU byla měření vykonávána střídavě se zapnutým a vypnutým kompenzátořem viz harmonogram měření.

\*I. poloha - aparatura natočena referenčním směrem

\*II. poloha - aparatura otočena o 180° vůči referenčnímu směru (symetrická poloha)

PRŮBĚH MĚŘENÍ STATICKÉHO TESTU VE SVISLÉ POLOZE CHRONOLOGICKY VE SMĚRU -->							
POLOHA	I.	I.	II.	II.	I.	I.	...
KOMPENZÁTOR	VYP.	ZAP.	VYP.	ZAP.	VYP.	ZAP.	...
DOBA OBSERVACE	60 s	60 s	60 s	60 s	60 s	60 s	...

Tabulka 25: Harmonogram měření - statický test ve svislé poloze s opakováním symetrických poloh



Obrázek 19: Schéma statického testu ve svislé poloze s opakováním symetrických poloh

### 5.2.1 Hodnocení na základě MAX-MIN

KOMPENZACE	APARATURA A			APARATURA B		
	maxY [m]	maxX [m]	maxh [m]	maxY [m]	maxX [m]	maxh [m]
VYP.	0.088	0.035	0.133	0.049	0.032	0.068
ZAP.	0.100	0.069	0.082	0.113	0.063	0.074

Tabulka 26: Výsledky MAX-MIN - náklon t. 2

V tabulce můžeme vidět poměrně velké hodnoty maximálních rozdílů jak pro měření s vypnutým, tak zapnutým kompenzátozem. Odlehlá měření nastala nejspíše vlivem ne zcela vhodných observačních podmínek, kdy aparatura umístěná na stativu není dostatečně vysoko, tak aby bylo zamezeno zastínění apod. Právě z tohoto důvodu byly realizovány měření s kompenzátozem vypnutým a zapnutým střídavě, s cílem zachytit poměr GNSS měření oproti GNSS+IMU.

### 5.2.2 Hodnocení na základě výběrové směrodatné odchylky

KOMPENZACE	APARATURA A			APARATURA B		
	sY [m]	sX [m]	sh [m]	sY [m]	sX [m]	sh [m]
VYP.	0.013	0.006	0.015	0.016	0.004	0.019
ZAP.	0.035	0.017	0.011	0.029	0.020	0.020

Tabulka 27: Výsledky výběrových směrodatných odchylek - náklon t. 2

Co se týče výběrových směrodatných odchylek, zde se při zapnutí/vypnutí kompenzaci náklonu dostáváme u aparatury A na téměř 3násobné zvětšení této charakteristiky. U aparatury B se v případě souřadnicové složky X dostáváme až na 4,5 násobek. Za povšimnutí stojí výšková složka, ve které nedochází ke zhoršení, což odpovídá technickým parametrům výrobce.

### 5.2.3 Hodnocení na základě délky k teoreticky pravé hodnotě

Určení největší délky mezi teoreticky pravými souřadnicemi bodu a body měřenými.

MAXIMÁLNÍ VODOROVNÁ VZDÁLENOST		
KOMPENZACE	APARATURA A	APARATURA B
VYP.	0.059 m	0.037 m
ZAP.	0.061 m	0.068 m

Tabulka 28: Maximální délka k teoreticky pravé poloze - náklon t. 2

## 5.2.4 Hodnocení na základě vzdálenosti mezi průměrnými souřadnicemi jednotlivých poloh a teoreticky pravé

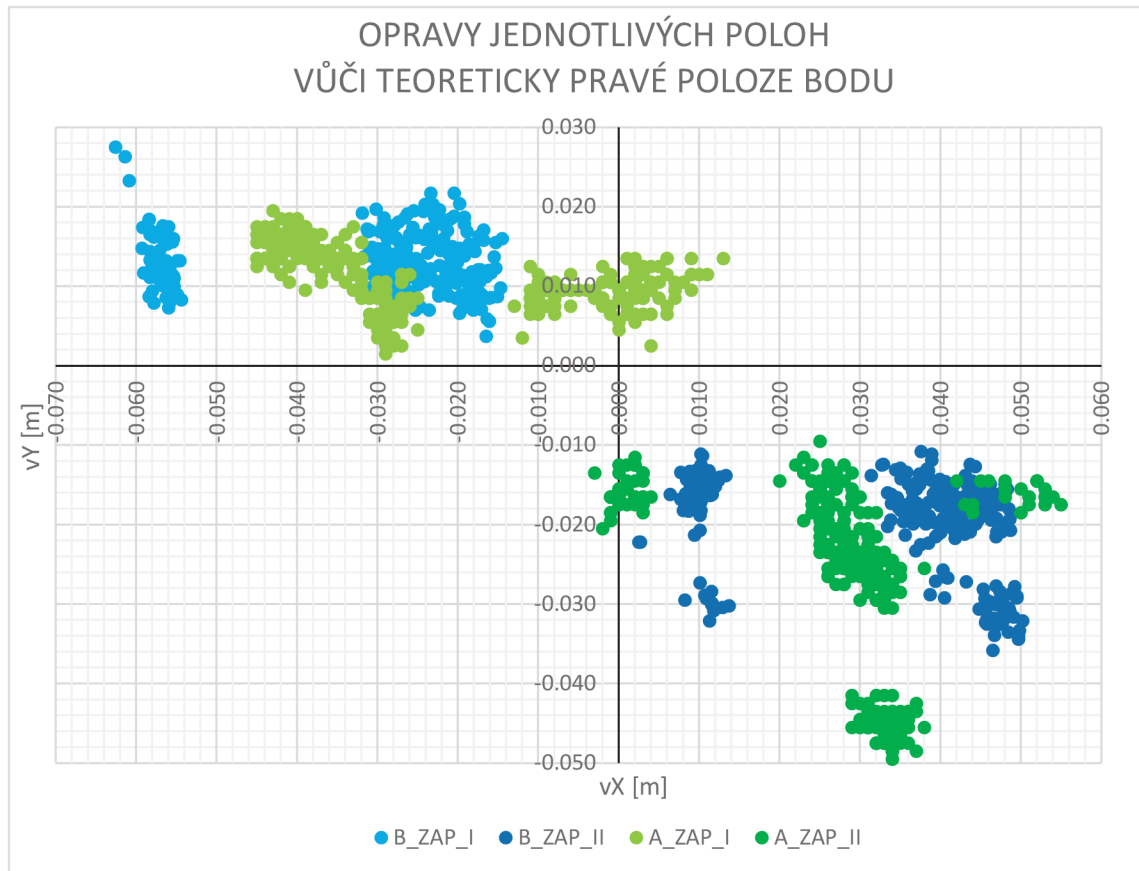
Jednotlivým polohám byly vypočítány průměrné souřadnice, od kterých pak byla určena délka k teoreticky pravým souřadnicím bodu.

KOMPENZACE	APARATURA A		APARATURA B	
	I. POLOHA	II. POLOHA	I. POLOHA	II. POLOHA
VYP.	0.003 m	0.003 m	0.003 m	0.008 m
ZAP.	0.025 m	0.038 m	0.033 m	0.040 m

Tabulka 29: Délka mezi průměrnou polohou I. a II polohy a teoreticky pravou polohou - náklon t. 2

Z uvedených výsledků je zřejmé, že při zapnutém kompenzátoru se délka od teoreticky pravé polohy bodu násobně zvětšuje. Při vypnuté kompenzaci dostáváme překrývající se bodové mraky, které leží přes teoreticky pravou polohu bodu.

Pro účely lepšího pochopení jsem vytvořil graf, ve kterém jsou vyneseny hodnoty v podobě rozdílu (teoreticky pravá) - (měřená). Průsečíkem souřadnicových os je tedy teoreticky pravá hodnota. Popis uvedený v legendě je ve smyslu PŘÍSTROJ\_KOMPENZACE\_POLOHA. Z grafu je viditelná symetrie jednotlivých poloh vzhledem ke středu.

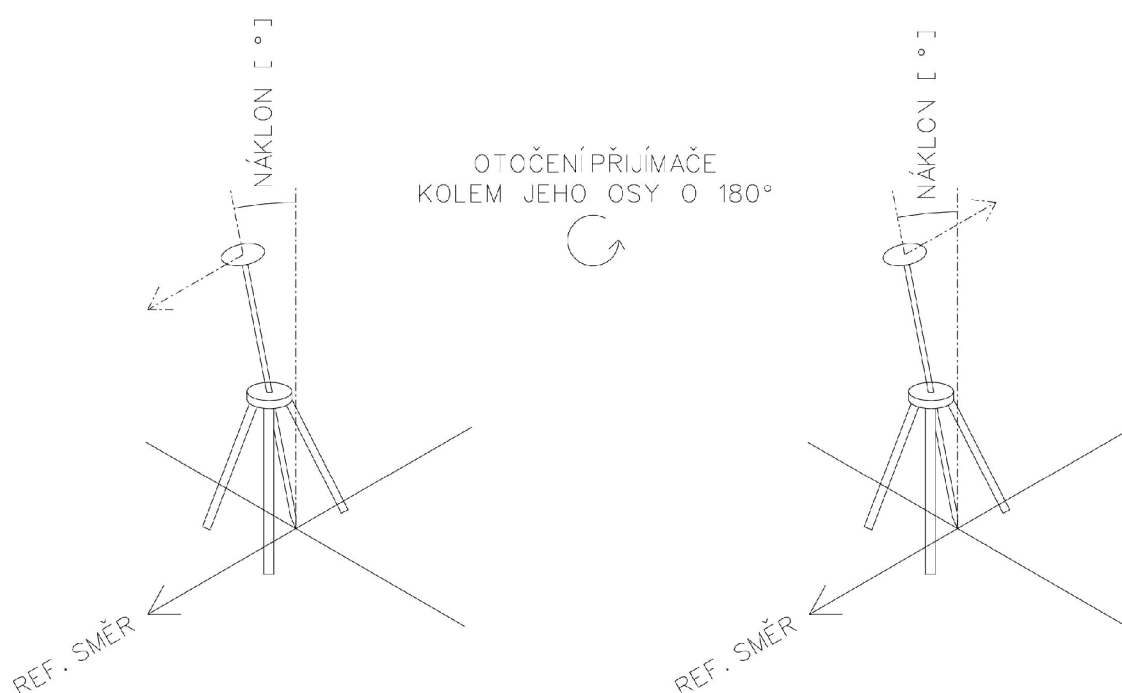


Graf 7: Symetrie I. a II. poloh vůči teoreticky pravé poloze bodu - náklon t. 2

### 5.3 Experimentální měření v nesvislé poloze s otáčením do symetrických poloh

Při tomto testu byla aparatura umístěna na výtyčce o délce 2 metry, která byla stabilně zapřena o stativ. Měření probíhalo ve stejném schématu a počtu jako test ve svislé poloze s opakováním symetrických poloh. Výsledky byly určeny ze všech realizovaných měření s rozdělením dle stavu kompenzátoru.

Kontrolním měřením pomocí totální stanice byla hodnota náklonu (odklon od svislice) určena na  $14,3^\circ$ , maximální rozsah ve kterém je přístroj schopen pracovat je  $15^\circ$ .



Obrázek 20: Schéma statického testu při náklonu s opakováním symetrických poloh

#### 5.3.1 Hodnocení na základě MAX-MIN

KOMPENZACE	APARATURA A			APARATURA B		
	maxY [m]	maxX [m]	maxh [m]	maxY [m]	maxX [m]	maxh [m]
VYP.	0.018	0.018	0.043	0.018	0.030	0.036
ZAP.	0.069	0.056	0.038	0.029	0.038	0.038

Tabulka 30: Výsledky MAX-MIN - náklon t. 3

Z tabulky výsledků je viditelné, že při tomto testu nedošlo ke značnému znehodnocení měření vlivem vnějších podmínek, jako tomu bylo v části 8.2.1.

Zároveň můžeme pozorovat zhoršení při zapnutí kompenzace náklonu, které u aparatury A vede i k trojnásobnému zvětšení tohoto ukazatele.

### 5.3.2 Hodnocení na základě výběrové směrodatné odchylky

KOMPENZACE	APARATURA A			APARATURA B		
	sY [m]	sX [m]	sh [m]	sY [m]	sX [m]	sh [m]
VYP.	0.003	0.004	0.008	0.004	0.007	0.007
ZAP.	0.024	0.016	0.008	0.005	0.008	0.007

Tabulka 31: Výsledky výběrových směrodatných odchylek - náklon t. 3

Zajímavostí tohoto konkrétního hodnocení je právě minimální nárůst výběrových směrodatných odchylek při zapnutí kompenzátoru u aparatury B.

### 5.3.3 Hodnocení na základě délky k teoreticky pravé hodnotě

Určení největší délky mezi teoreticky pravými souřadnicemi bodu a body měřenými.

MAXIMÁLNÍ VODOROVNÁ VZDÁLENOST		
KOMPENZACE	APARATURA A	APARATURA B
ZAP.	0.072 m	0.032 m

Tabulka 32: Maximální délka k teoreticky pravé poloze - náklon t. 3

### 5.3.4 Hodnocení na základě vzdálenosti mezi průměrnými souřadnicemi jednotlivých poloh a teoreticky pravé

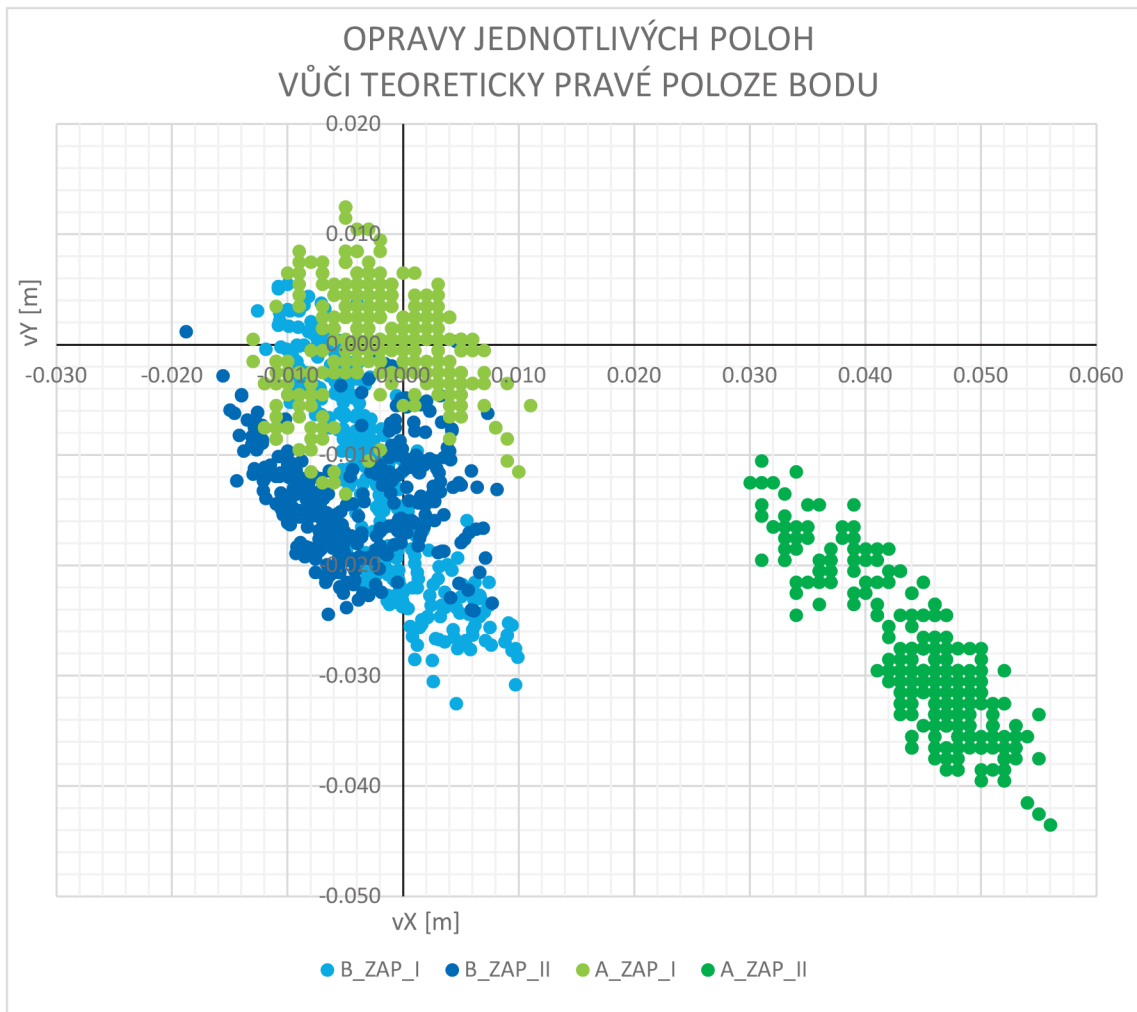
Jednotlivým polohám byly vypočítány průměrné souřadnice, od kterých pak byla určena délka k teoreticky pravým souřadnicím bodu.

KOMPENZACE	APARATURA A		APARATURA B	
	I. POLOHA	II. POLOHA	I. POLOHA	II. POLOHA
VYP.	0.547	0.546	0.527	0.521
ZAP.	0.003	0.053	0.013	0.014

Tabulka 33: Délka mezi průměrnou polohou I. a II. polohy a teoreticky pravou polohou - náklon t. 3

Výsledky s vypnutým kompenzátozem jsou zde uvedeny pouze pro přehlednost, při vypnutém kompenzátozem tedy nebyl uskutečněn přepočítání na hrot výtyčky. Při grafickém posouzení jednotlivých poloh pro vypnutý kompenzátozem dostáváme překrývající se bodové mraky.

V případě zapnutého kompenzátozem dostáváme bodové mraky, které nejsou symetrické vzhledem k teoreticky pravé hodnotě. U přístroje A překrývají výsledky z I. polohy teoreticky pravou hodnotu, avšak II. poloha je odchýlena od teoreticky pravé o zhruba 5 centimetrů. U přístroje B se bodové mraky I. a II. polohy prolínají, vzdálenost od jejich středu vzhledem k teoreticky pravé poloze je zhruba 1 centimetr. Výsledky jsou vyobrazeny v grafu níže.



*Graf 8: Znázornění I. a II. poloh vůči teoreticky pravé poloze bodu - náklon t. 3*

### 5.3.5 Shrnutí testování kompenzace náklonu

Testování automatické urovnávací technologie nelze jednoznačně sumarizovat, je nutné nahlédnout do výsledků jednotlivých testů a na jejich základě s touto technologií pracovat.

Části závěrů dohledaných prací řešící stejnou problematiku:

1. „Pro běžná rychlá polohopisná měření, účely katastru nebo zaměření skutečného stavu některých staveb je přesnost kompenzace náklonu v rozsahu do 45° naprosto dostačující. Při malých náklonech je možné přístroj využívat v podstatě bez omezení.“ [26]



2. *\*Je třeba zmínit, že zařízení není určeno pro měření při odklonu 0° se zapnutým kompenzátorem sklonu, jak je uvedeno v této studii. To je také ukázáno na odchylujících se výsledcích při odklonu 0°, kde hodnoty nejistoty polohy nejsou vždy nejnižší. [27]*

**\*Přeloženo ze švédštiny pomocí Google překladač dne 17. 5. 2022**

3. *„While receiver A is precise in all three dimensions, only the height values are within the expected accuracy. The accuracy along the horizontal plane is lower than expected for surveying purposes, with an RMS between 0,112-0,230m. The reason for accuracy of the horizontal plane being below the expected value requires further research.“ [28]*

Uvedené citace pochází ze závěrečných prací věnující se stejnému tématu. První z citací vede k závěru, že přístroj při malých náklonech lze používat prakticky bez omezení (přístroj Leica GS 18 I). To si autoři práce, ze které pochází 3. citace, vyložili tak, že při držení přístroje ve svislici je doporučeno mít kompenzaci náklonu zapnutou viz citace níže.

*„Comparing the work of Myslivec (2021) and Almstedt and Peterson (2019) with our results when measuring at 0°, whereas Myslivec recommends turning on the tilt compensator for observations at 0° Almstedt & Peterson recommend turning it off. These constasting recommendations warrant further investigation.“ [28]*

Druhá citace jasně říká, že není vhodné mít kompenzaci náklonu zapnutou při měření, kdy je výtyčka ve svislé poloze. V práci byl použit přístroj Leica GS18 T.

Z výsledků mého testování přístroje Topcon HiPer HR je viditelné chování automatické urovnávací technologie a zároveň její nepředvídatelnost. Na základě získaných výsledků rozhodně není přesnosti prospěšné mít kompenzaci náklonu aktivní v případě měření, kdy se výtyčka nachází ve svislici.

Třetí citace je z práce, ve které dle uvedených technických specifikací byla použita aparatura identická (popřípadě jiný výrobce, ale stejné parametry). Podle uvedené citace bylo dospěno ke střední kvadratické chybě v horizontální rovině v rozmezí 11,2 až 23 centimetrů.

Výsledky z mého testování vedou k podstatně menším hodnotám než-li uvádí tato práce, avšak i mnou zjištěné menší hodnoty vedou k zamyšlení, zda je prospěšné funkci automatického urovnání používat a zvážit k jakým aplikacím je taková přesnost přípustná.

## 6 Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit testy, jejichž výsledky povedou ke komplexní analýze přesnosti a spolehlivosti současných GNSS měřidel.

První část práce byla věnována teoretickým základům, stavu řešené problematiky kterých bylo využíváno v rámci celé práce. Dále je v této části zmínka o použitých přístrojích a lokalitách, kde byla měření uskutečněna.

Druhá část práce se věnuje testování a analýze přesnosti GNSS aparatur. V této části jsme posuzovali s využitím statistických nástrojů rozdělení souborů vzhledem k normálnímu rozdělení. Byly zde také vytvořeny testy ovlivnění rozdělení při odstranění odlehlých hodnot, testy špičatosti a šikmosti, testy intervalových odhadů. Tyto testy byly realizovány u obou lokalit s cílem vytvořit jistou návaznost mezi daty.

Následně jsem se v této části zabýval směrodatnými odchylkami, jejich sumarizací a korelací s dalšími veličinami.

V této části bylo zahrnuto také testování závislosti DOP hodnot na počtu družic nebo pozorování vnitřní přesnosti v závislosti na délce observace.

V závěrečné části jsem realizoval testování automatické urovnávací technologii s přístupem využívající elektronický kompas. Zde jsem uskutečnil tři různé testy. Výsledky jsem se opět snažil sjednotit tak, aby mezi testy bylo možné hledat souvislosti.

### **Mezi zajímavé poznatky, které byly získány v rámci všech měření rozhodně patří:**

Při sníženém stavu baterie přístroje TOPCON HiPer HR začaly vyžadovat opětovnou kalibraci elektronického kompasu. Při restartování aparatury a výměně baterie však již vyžadována nebyla.

Při jednom z testů u přístroje SOKKIA GCX3 nastal jev, kdy určované souřadnice byly v poloze určovány rozdílně od všech ostatních měření v jednom případě až o 2 metry, ve dvou dalších případech řádově do dvou decimetrů.

Výdrž interní baterie přístroje SOKKIA GCX3 se vyrovnala výdrži přístroje TOPCON HIPER HR s interní baterií a třemi externími.

## **Mezi důležité poznatky z jednotlivých testování patří:**

### **Testování normality**

Souřadnice určené GNSS měřením nemají normální rozdělení, nejbližší normálnímu rozdělení má výšková složka. Původní soubory mají však normálnímu rozdělení často nejbližší, tedy při odstranění odlehlých hodnot nedochází k výraznému zlepšení. Charakter normálního rozdělení byl pozorován až u dostatečně dlouhých observací, krátké pětiminutové soubory byly často „deformované“, kdy koeficienty špičatosti a šikmosti měly velký rozptyl.

### **Testování výběrových směrodatných odchylek**

Při ideálních observačních podmínkách testované GNSS aparatury na základě výběrových směrodatných odchylek pracují s velice podobnou, ne-li identickou přesností.

Množství srážek má do jisté míry souvislost s přesností při určování polohy pomocí GNSS aparatur.

Počet družic má vliv na přesnost určení polohy, kdy nejvíce progresivní zlepšení se odehrává ve výškové složce.

### **Faktor snížení přesnosti DOP**

Nejmenší souvislost mezi výslednými DOP hodnotami a systémy GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU má právě navigační systém Čínské lidové republiky BeiDou.

### **Vnitřní přesnost**

K největším změnám výběrové směrodatné odchylky dochází v prvních 60 sekundách observace, následně dojde ke zmírnění náhlých změn.

### **Náklon**

Při běžném měření, kdy je výtyčka držena svisle, není vhodné kompenzaci náklonu mít aktivní, přepočtem je do výsledné polohy bodu vnášena další nepřesnost. Použití funkce kompenzace náklonu s přístupem elektronického kompasu není zcela nejvýhodnější, kalibrace elektronického kompasu je obtížná a výsledky nemají

očekávanou přesnost. V některých případech by se jevilo jako přínosem pro přesnost určení polohy bodu zavést „II. polohu“, kdy by přijímač byl otočen symetricky vůči prvnímu určení, prostým průměrem by pak mohlo dojít k jistému zlepšení a redukování vlivu nepřesnosti inerciální kompenzace náklonu.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] CZEPOS Síť permanentních stanic GNSS České Republiky [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <http://czeapos.cuzk.cz/>
- [2] STEPHENSON, Scott. Automotive Applications of High Precision GNSS [online]. 2016 [cit. 2022-05-22]. PhD thesis. University of Nottingham. Dostupné z: <http://eprints.nottingham.ac.uk/38716/1/Scott%20Stephenson%20-%204148128%20-%20Thesis%2015%2011%202016.pdf>.
- [3] ANATUM GeoMobile Solutions: What is PDOP? And why it's obsolete. [online]. 2016 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: [https://www.agsgis.com/What-is-PDOP-And-Why-its-Obsolete\\_b\\_43.html](https://www.agsgis.com/What-is-PDOP-And-Why-its-Obsolete_b_43.html)
- [4] MACHOTKA, Radovan a Jan FIXEL. Kosmická geodézie - vybrané techniky. Brno, 2013. [studijní opory]
- [5] HAMPACHER, Miroslav a Martin ŠTRONER. Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. Vydání druhé. Praha: ČVUT (CTN), Zikova 4, Praha 6, 2015. ISBN 978-80-01-05843-5.
- [6] SHAPIRO, Samuel Sanford a Martin Bradbury WILK. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). Biometrika [online]. General Electric Co. and Bell Telephone Laboratories, Inc., 1965, 52(3/4), 591-611 [cit. 2022-05-22]. Dostupné z: <http://www.bios.unc.edu/~mhudgens/bios/662/2008fall/Backup/wilkshapiro1965.pdf>
- [7] LILLIEFORS, Robert Whitman. On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown. Journal of the American Statistical Association [online]. The George Washington University, 1967, (62(318), 399-402 [cit. 2022-05-22]. Dostupné z: <http://www.bios.unc.edu/~mhudgens/bios/662/2008fall/Backup/lilliefors1967.pdf>
- [8] StatSoft CR s.r.o. Ovládání a základy statistiky v softwaru STATISTICA [online]. 2013 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <http://www.statsoft.cz/file1/PDF/StrucnyManualSTATISTICA.pdf>
- [9] NETOLICKÁ, Veronika. Testy normality. Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci : Katedra matematické analýzy a aplikací matematiky, 2008
- [10] KASAL, Pavel a Marie HLADÍKOVÁ. Koutek pro statistiky amatéry. Pelikán: akademický bulletin 2. LF UK [online]. 1995, roč. 3, no. 3, s., dostupné z: <http://stary.lf2.cuni.cz/projekty/pelikan/peli0395/statis1.htm>
- [11] WOOLSON, Robert F. a William CLARKE. Statistical Methods for the Analysis of Biomedical Data. 2. vydání. New York : John Wiley & Sons. Inc., 2002. 368 s. ISBN 9780471394051.
- [12] GEIZEROVÁ, Helena, et al. Epidemiologie : vybrané kapitoly pro seminární a praktická cvičení. 1. vydání. Praha : Karolinum, 1995. 83 s. ISBN 80-7184-179-X.
- [13] ZVÁROVÁ, Jana. Základy statistiky pro biomedicínské obory. 2. vydání. Praha : Karolinum, 2011. 219 s. Biomedicínská statistika; sv. I. ISBN 978-80-246-1931-6
- [14] StatSoft CR s.r.o.: Statsoft: Nebojte se p-hodnot! [online]. 2014, 2014 [cit. 2022-05-22]. Dostupné z: [http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2014\\_06\\_26\\_StatSoft\\_Nebojte\\_se\\_p-hodnot.pdf](http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2014_06_26_StatSoft_Nebojte_se_p-hodnot.pdf)
- [15] BHANDARI, Pritha. Central Tendency | Understanding the Mean, Median and Mode [online]. 30-7-2020 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.scribbr.com/statistics/central-tendency/>
- [16] MCNEESE, Bill. Are the Skewness and Kurtosis Useful Statistics?. SPC for Excel [online]. 2008 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.spcforexcel.com/knowledge/basic-statistics/are-skewness-and-kurtosis-useful-statistics>

- [17] Statistika 2: I Pearsonův korelační koeficient [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: [https://mathstat.econ.muni.cz/media/12657/pear\\_cor.pdf](https://mathstat.econ.muni.cz/media/12657/pear_cor.pdf)
- [18] LEIBSON, Steve. Use IMUs for Precise Location Data When GPS Won't Suffice [online]. 2018, 2018 [cit. 2022-05-22]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/articles/use-imus-for-precise-location-data-when-gps-wont-suffice>
- [19] BITAR, Andreea. 4 Interesting Facts About Inertial Navigation Systems. Honeywell AEROSPACE [online]. 2019 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/learn/about-us/blogs/four-facts-about-inertial-navigation-systems>
- [20] LUO, Xiaoguang, Stefan SCHAUFLEER, Matteo CARRERA a Ismail CELEBI. High-Precision RTK Positioning with Calibration-Free Tilt Compensation [online]. Švýcarsko, 2018 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/325022922\\_High-Precision\\_RTK\\_Positioning\\_with\\_Calibration-Free\\_Tilt\\_Compensation](https://www.researchgate.net/publication/325022922_High-Precision_RTK_Positioning_with_Calibration-Free_Tilt_Compensation)
- [21] Topcon Positioning Systems, Inc. Multi-Purpose GNSS Receiver: HiPer HR Operator's Manual. 2018.
- [22] GCX3 - World-Class GNSS Receiver. eu.sokkia.com [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://eu.sokkia.com/products/gnss-systems/rtk-systems/gcx3>
- [23] BUREŠ, Jiří, Jakub KOSTELECKÝ, Otakar ŠVÁBENSKÝ a Josef WEIGEL. DVACET LET PROVOZU STANICE TUBO V EPN [online]. 14. 1. 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/203558/03\\_Bures\\_GNSSseminary\\_2022.pdf?sequence=1](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/203558/03_Bures_GNSSseminary_2022.pdf?sequence=1)
- [24] WEIGEL, J. Teorie chyb a vyrovnávací počet I, GE04\_M02 Základní druhy vyrovnání (1. Část). Brno: VUT 2004. [studijní opory]
- [25] BITTERER, Ladislav. Vyrovnávací počet II. Žilina, Žilinská univerzita v Žilině, 2003.
- [26] MYSLIVEC, Jan. Testování přesnosti a využitelnosti GNSS přijímače Leica GS18. Praha, 2021. Diplomová práce. ČVUT.
- [27] ALMSTEDT, Åsa a Niclas PETERSON. Lägessosäkerhet vid nätverks-RTK-mätning med inbyggd lutningskompensator: en undersökning av Leica GS18 T. Gävle, 2019. Studijní projekt. AKADEMIN FÖR TEKNIK OCH MILJÖ.
- [28] KARLSEN, Sveinung, Stewart a Stewart ROBERTSON. Accuracy of Tilt-compensated GNSS-sensors using Network-RTK. Gävle, 2021. Bakalářská práce. Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet.
- [29] TOPGEOSYS.cz - totální stanice, GPS systémy, GIS, rotační lasery Topcon a Sokkia. TOPGEOSYS [online]. Dostupné z: <https://geosys.webnode.cz/>
- [30] LANGLEY, Richard B. Dilution of Precision. GPS WORLD [online]. University of New Brunswick, 1999 [cit. 2022-05-22]. Dostupné z: <http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/gpsworld.may99.pdf>

## Seznam zkratek

<b>Bpv</b>	Balt po vyrovnání
<b>CZEPOS</b>	Česká síť permanentních stanic pro určování polohy
<b>ČÚZK</b>	Český Úřad Zeměměřický a Katastrální
<b>DGPS</b>	Differential Global Positioning System
<b>DOP</b>	Dilution Of Precision
<b>ETRS</b>	European Terrestrial Reference System
<b>FAST VUT</b>	Fakulta stavební Vysokého učení technického v Brně
<b>GLONASS</b>	Globalnaja Navigacionnaja Sputnikova Sistema
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit
<b>INS</b>	Inertial Navigation System
<b>Ppm</b>	Parts Per Million
<b>QZSS</b>	QuasiZenith Satellite System
<b>RTK</b>	Real Time Kinematic
<b>SJTSK</b>	Systém Jednotné Trigonometrické Sítě Katastrální
<b>VRS</b>	Virtual Reference Stations



## Seznam obrázků

Obrázek 1: Grafické znázornění trilaterace [2].....	14
Obrázek 2: Znázornění problematiky na protínání z délek [30] .....	15
Obrázek 3: Souvislost geometrie a DOP.....	16
Obrázek 4: Ukázka distribuční funkce.....	20
Obrázek 5: Modus, medián a průměr v souvislosti s rozdělením .....	21
Obrázek 6: Grafická interpretace koeficientu šikmosti.....	22
Obrázek 7: Grafická interpretace koeficientu špičatosti .....	23
Obrázek 8: Příklady korelace.....	25
Obrázek 9: Schéma rozdělení GNSS přijímačů dle kompenzace náklonu.....	28
Obrázek 10: Příslušenství pro kalibraci [21].....	29
Obrázek 11: Kalibrace kompasu v prostoru [21] .....	30
Obrázek 12: Schéma implementace GNSS/INS v Leica GS18 T [20] .....	31
Obrázek 13: Přístroj TOPCON HIPER HR [29].....	32
Obrázek 14: Fence Antenna [29] .....	33
Obrázek 15: Přístroj SOKKIA GCX3 [29].....	34
Obrázek 16: Fotografie z dálkoměrné a GNSS základny Brno-jih.....	36
Obrázek 17: Fotografie pilířů na budově VUT v Brně .....	37
Obrázek 18: Schéma vstupního testu .....	57
Obrázek 19: Schéma statického testu ve svislé poloze s opakováním symetrických poloh.....	59
Obrázek 20: Schéma statického testu při náklonu s opakováním symetrických poloh.....	62

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Intervaly spolehlivosti normálního rozdělení .....	18
Tabulka 2: Vliv velikosti souboru na koeficienty špičatosti a šikmosti .....	24
Tabulka 3: Technické specifikace přístroje TOPCON HIPER HR [21] .....	32
Tabulka 4: Technické specifikace přístroje SOKKIA GCX3 [21].....	33
Tabulka 5: Testování funkčnosti statistického programu .....	39
Tabulka 6: Vliv odstranění odlehlých hodnot - základna .....	40
Tabulka 7: Průměry koeficientů špičatosti a šikmosti - základna.....	40
Tabulka 8: Průměry intervalů spolehlivosti určené z 5minutových observací - základna .....	41
Tabulka 9: Statistické testování normality - budova VUT.....	42
Tabulka 10: Vliv odstranění odlehlých hodnot - budova VUT.....	42
Tabulka 11: Koeficienty špičatosti a šikmosti určené z celého souboru - budova VUT.....	43
Tabulka 12: Průměry koeficientů špičatosti a šikmosti z 5minutových souborů - budova VUT.....	43
Tabulka 13: Intervaly spolehlivosti určené z celého souboru - budova VUT.....	43
Tabulka 14: Průměry intervalů spolehlivosti určené z 5minutových observací - budova VUT .....	43
Tabulka 15: Průměrné výběrové směrodatné odchylky určené z 5minutových observací - základna .....	44
Tabulka 16: Průměrné výběrové směrodatné odchylky určené z 5 minutových observací - budova VUT	45
Tabulka 17: Míra korelace směrodatných odchylek jednotlivých přístrojů.....	49
Tabulka 18:Míra korelace směrodatných odchylek a meteorologických dat.....	50
Tabulka 19: Míra korelace mezi směrodatnými odchylkami a počtem družic - budova VUT .....	52
Tabulka 20: Míra korelace mezi počtem družic a DOP .....	53
Tabulka 21: Míra korelace mezi počtem družic a DOP - budova VUT .....	53
Tabulka 22: Výsledky MAX-MIN - náklon t.1 .....	58
Tabulka 23: Výsledky výběrových směrodatných odchylek - náklon t.1 .....	58
Tabulka 24: Maximální délka k teoreticky pravé poloze - náklon t.1.....	58
Tabulka 25: Harmonogram měření - statický test ve svislé poloze s opakováním symetrických poloh....	59
Tabulka 26: Výsledky MAX-MIN - náklon t. 2 .....	60
Tabulka 27: Výsledky výběrových směrodatných odchylek - náklon t. 2 .....	60
Tabulka 28: Maximální délka k teoreticky pravé poloze - náklon t. 2.....	60
Tabulka 29: Délka mezi průměrnou polohou I. a II polohy a teoreticky pravou polohou - náklon t. 2 .....	61
Tabulka 30: Výsledky MAX-MIN - náklon t. 3 .....	62
Tabulka 31: Výsledky výběrových směrodatných odchylek - náklon t. 3 .....	63
Tabulka 32: Maximální délka k teoreticky pravé poloze - náklon t. 3.....	63
Tabulka 33: Délka mezi průměrnou polohou I. a II. polohy a teoreticky pravou polohou - náklon t. 3 ....	63

## Seznam grafů

Graf 4: Průběh výběrové směrodatné odchylky v závislosti na délce observace - základna .....	46
Graf 5: Průběh výběrové směrodatné odchylky v závislosti na délce observace - budova VUT .....	47
Graf 6: Vývoj výběrové směrodatné odchylky s rostoucí velikostí souboru - budova VUT .....	48
Graf 1: Průběh směrodatných odchylek - budova VUT .....	49
Graf 2: Průběh velikosti výběrové směrodatné odchylky a množství srážek - budova VUT .....	51
Graf 3: Závislost výběrové směrodatné odchylky a počtu družic - budova VUT .....	52
Graf 7: Symetrie I. a II. poloh vůči teoreticky pravé poloze bodu - náklon t. 2 .....	61
Graf 8: Znárodnění I. a II. poloh vůči teoreticky pravé poloze bodu - náklon t. 3 .....	64

## **Seznam příloh**

Příloha 1: Kompletní přehled výsledků špičatosti - TOPCON - základna

Příloha 2: Kompletní přehled výsledků špičatosti - SOKKIA - základna

Příloha 3: Kompletní přehled výsledků šikmosti - TOPCON - základna

Příloha 4: Kompletní přehled výsledků šikmosti - SOKKIA - základna

**Příloha 1: Kompletní přehled výsledků špičatosti - TOPCON - základna**

			TOPCON ŠPIČATOST						
			PILÍŘ						
			1	2	3	4	5	6	7
ŘADA	1	Y	2.42	-0.29	-0.07	-0.02	1.54	-0.62	-0.28
		X	-0.15	-0.29	0.15	0.11	0.46	0.02	-0.18
		H	-0.48	0.14	0.06	0.20	-0.39	-0.09	0.05
	2	Y	1.63	-0.13	-0.25	0.66	-0.16	-0.40	0.12
		X	-0.56	0.03	0.32	-0.19	0.34	0.15	-0.14
		H	1.28	-0.21	-0.49	-0.13	0.09	-0.39	-0.66
	3	Y	0.51	-0.81	0.07	-0.41	-0.36	0.28	-0.36
		X	-0.37	0.19	-0.71	0.49	-0.02	-0.54	0.28
		H	-0.17	0.30	0.45	0.57	0.80	-0.09	0.04
	4	Y	-0.11	0.11	-0.35	-0.28	0.04	0.75	-0.45
		X	-0.35	-0.60	0.11	0.96	-0.46	0.03	-0.23
		H	-0.16	-0.55	-0.70	-0.33	-0.18	-0.57	-0.54
	5	Y	0.03	0.09	0.62	-0.21	0.22	0.65	-0.43
		X	0.03	0.52	-0.62	-0.38	0.03	-0.14	-0.18
		H	-0.70	-0.50	-0.07	0.23	-0.12	-0.19	-0.52
	6	Y	-0.05	-0.22	-0.12	-0.47	-0.40	-0.23	0.08
		X	-0.41	0.38	-0.55	-0.28	0.32	-0.06	-0.07
		H	-0.46	0.13	0.15	-0.25	-0.09	-0.91	-0.17
	7	Y	-0.81	-0.75	-0.19	0.00	-0.35	0.00	-0.71
		X	-0.26	-0.33	0.82	-0.33	-0.25	1.15	-0.69
		H	-0.70	0.07	-0.31	-0.85	-0.57	-0.33	-0.10

**Příloha 2: Kompletní přehled výsledků špičatosti - SOKKIA - základna**

			SOKKIA ŠPIČATOST						
			PILÍŘ						
			1	2	3	4	5	6	7
ŘADA	1	Y	2.36	-0.12	-0.38	0.46	-0.12	0.13	-0.26
		X	0.43	0.37	-0.32	0.46	0.28	0.88	0.07
		H	0.23	-0.01	0.02	-0.57	0.56	0.41	-0.18
	2	Y	0.32	0.12	0.05	-0.06	0.22	-0.72	-0.79
		X	0.02	0.43	-0.27	0.47	0.52	-0.71	0.18
		H	-0.52	0.05	-0.10	0.22	-0.14	-1.27	-0.03
	3	Y	-0.67	0.28	0.42	-0.39	0.02	3.10	0.10
		X	-0.68	-0.39	0.09	-0.07	-0.39	3.17	0.55
		H	-0.68	-0.69	-0.04	-0.03	-0.17	1.88	-0.54
	4	Y	-0.26	-0.06	-0.45	0.07	-0.50	0.06	-0.65
		X	0.32	0.38	0.18	1.14	-0.15	-0.63	-0.26
		H	-0.48	-0.59	-0.41	-0.65	-0.48	-0.61	-0.64
	5	Y	-0.21	0.26	-0.15	-0.14	-0.51	-0.28	-0.30
		X	-0.33	0.23	0.20	-0.02	0.17	-0.16	0.10
		H	-0.13	-0.39	-0.60	-0.26	-0.50	-0.47	-0.38
	6	Y	0.35	0.26	-0.22	-0.14	-0.06	-0.19	0.48
		X	-0.84	1.52	-0.15	-0.15	0.16	-0.21	-0.02
		H	-1.10	-1.09	-0.37	-0.01	-0.16	-0.37	-0.51
	7	Y	-0.51	-0.85	0.26	-0.30	-0.56	-0.35	-0.35
		X	-0.14	-0.15	-0.41	-0.28	-0.88	-0.24	-0.33
		H	-0.20	-0.85	-0.54	-0.25	0.19	-0.61	-0.69

**Příloha 3: Kompletní přehled výsledků šikmosti - TOPCON - základna**

		TOPCON ŠIKMOST							
		PILÍŘ							
		1	2	3	4	5	6	7	
ŘADA	1	Y	-0.75	0.18	-0.07	0.02	0.45	0.02	-0.08
		X	0.02	-0.12	0.12	-0.09	-0.12	0.19	-0.08
		H	0.07	-0.32	0.21	-0.01	0.48	0.04	0.15
	2	Y	-0.42	-0.27	-0.20	-0.41	0.39	-0.41	-0.30
		X	0.09	-0.09	0.26	-0.28	-0.45	-0.14	0.01
		H	0.09	0.30	0.14	-0.07	-0.09	0.10	-0.06
	3	Y	-0.12	0.29	-0.16	-0.01	-0.14	-0.26	-0.21
		X	0.14	0.01	0.19	0.28	-0.08	0.26	0.08
		H	0.02	0.04	0.43	0.26	0.14	-0.45	0.14
	4	Y	-0.01	0.36	0.11	-0.30	-0.33	0.18	-0.28
		X	0.46	0.34	0.34	0.53	0.03	0.07	-0.32
		H	0.00	-0.06	-0.04	-0.59	-0.38	0.24	0.17
	5	Y	0.10	-0.07	0.40	0.18	-0.23	-0.45	-0.07
		X	0.06	-0.19	0.17	0.25	-0.01	-0.23	0.37
		H	0.25	0.10	0.05	-0.19	0.29	-0.06	0.17
	6	Y	0.11	0.04	0.07	0.24	-0.33	0.14	-0.07
		X	0.05	0.45	0.00	-0.47	-0.50	-0.30	-0.13
		H	0.14	0.05	0.90	0.04	0.30	-0.12	-0.19
	7	Y	0.05	0.16	-0.52	-0.36	0.01	-0.13	0.10
		X	-0.25	-0.05	-0.32	-0.06	0.27	0.88	0.06
		H	0.45	0.57	-0.28	0.21	0.07	-0.15	-0.34

**Příloha 4: Kompletní přehled výsledků šikmosti - SOKKIA - základna**

		SOKKIA ŠIKMOST							
		PILÍŘ							
		1	2	3	4	5	6	7	
ŘADA	1	Y	-1.12	0.13	-0.07	-0.32	0.06	0.41	-0.05
		X	-0.58	0.28	0.28	-0.32	-0.11	-0.06	0.06
		H	0.15	-0.53	0.41	-0.22	0.22	-0.08	-0.47
	2	Y	0.08	0.14	0.09	0.12	0.34	1.12	0.13
		X	-0.08	-0.39	0.01	0.10	0.24	1.13	-0.30
		H	-0.02	-0.17	-0.18	0.10	0.12	0.60	0.25
	3	Y	1.15	-0.14	-0.06	0.03	-0.33	2.25	-0.44
		X	-1.14	-0.35	0.08	-0.04	-0.25	2.26	0.10
		H	1.14	0.24	0.23	-0.01	0.01	1.48	-0.03
	4	Y	0.08	0.12	0.05	-0.07	0.24	-0.54	0.43
		X	-0.27	0.37	-0.15	-0.78	-0.66	-0.69	0.29
		H	-0.30	0.34	-0.11	0.09	-0.01	0.03	-0.31
	5	Y	-0.15	-0.64	-0.22	0.06	-0.32	-0.24	-0.03
		X	0.23	0.00	0.23	0.03	-0.29	-0.25	0.02
		H	-0.34	0.37	0.04	-0.28	0.06	-0.28	0.28
	6	Y	0.08	0.06	-0.11	-0.06	-0.23	0.13	-0.73
		X	0.27	-1.07	-0.05	-0.24	-0.23	0.11	-0.43
		H	-0.26	0.31	-0.33	-0.03	0.03	-0.15	0.40
	7	Y	0.16	-0.52	-0.18	-0.17	-0.10	0.06	0.42
		X	0.12	0.30	0.30	-0.11	0.00	0.13	0.14
		H	0.05	0.35	0.30	0.06	-0.21	0.04	-0.03