



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra geomatiky**

**Vývoj systému pro sledování svahových deformací
Development of system for monitoring of slope deformations**

Diplomová práce

Studijní program: Geodézie a kartografie
Studijní obor: Geodézie a kartografie

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Lukeš Ph.D.

Martina Kotrčová

Praha 2016



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

| | | |
|---|-----------------------|-----------------------------|
| Příjmení: <u>Kotrčová</u> | Jméno: <u>Martina</u> | Osobní číslo: <u>396888</u> |
| Zadávací katedra: <u>Katedra geomatiky</u> | | |
| Studijní program: <u>Geodézie a kartografie</u> | | |
| Studijní obor: <u>Geodézie a kartografie</u> | | |

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vývoj systému pro sledování svahových deformací

Název diplomové práce anglicky: Development of system for monitoring of slope deformations

Pokyny pro vypracování:
Navrhněte a realizujte systém pro kontinuální sledování svahových deformací pomocí GNSS. Proveďte prvotní testování systému.

Seznam doporučené literatury:
dokumentace k použitému hardwaru

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Zdeněk Lukeš Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: **18.2. 2016** Termín odevzdání diplomové práce: 22. 5. 2016

Zdeněk Lukeš
Podpis vedoucího práce

Martina Kotrčová
Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

18.2. 2016
Datum převzetí zadání

Martina Kotrčová
Podpis studenta(ky)

Prohlášení:

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího diplomové práce Ing. Zdeňka Lukeše Ph.D. Veškeré použité zdroje, ze kterých bylo čerpáno, jsou uvedeny v seznamu zdrojů.

V Praze dne:

.....

(Podpis)

Poděkování:

Ráda bych touto cestou poděkovala svému vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Lukešovi Ph.D., který mi umožnil zpracovat tuto, pro mě velmi zajímavou, diplomovou práci, za jeho trpělivost a ochotu a za jeho odbornou a pedagogickou pomoc při tvorbě diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Zdeňku Vyskočilovi Ph.D. a mojí kolegyni Bc. Lucii Bernardové, kteří se podíleli na tvorbě webového rozhraní a dali tak celému projektu grafickou podobu. Následně bych chtěla poděkovat Ing. Ivanovi Bílému Ph.D., který nám umožnil instalaci našeho systému pro sledování svahových deformací v povrchovém dole Bílina a Ing. Milanovi Větrovskému, který nám poskytl informace ohledně současného měření posunů v dole Bílina a výsledky pro porovnání s naším zařízením. Také bych chtěla poděkovat Ing. Marcelovi Šebkovi, který mi pomohl lépe pochopit programovací jazyk C++ a v neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině za jejich trpělivost a podporu při studiu.

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá vývojem systému pro měření svahových deformací pomocí GNSS. Celý systém je plně automatizovaný a výsledky jsou ukládány do databáze. V závěru je porovnání metod mezi naším instalovaným systémem a systémem, který v současné době měří svahové deformace v povrchovém dole Bílina.

Na tuto diplomovou práci navazuje diplomová práce kolegyně Bc. Lucie Bernardové: *Vývoj webového rozhraní pro kontrolu a řízení monitorovacího GNSS systému*. Součástí její práce je vývoj webového rozhraní pro náš systém. Zde lze sledovat posuny v reálném čase, informace o stavu zařízení a administraci databáze.

Klíčová slova:

Svahové deformace, GNSS, radiomodem, C++, TCP/IP protokol, databáze.

Abstract:

This diploma thesis deals with the development of the system for monitoring of slope deformations using GNSS. The whole system is fully automatized and the results are being saved in a database. In the final part there is a comparison between our installed system and the system, which currently measures slope deformations in the strip mine Bilina.

This diploma thesis is followed by the diploma thesis of a colleague, Bc. Lucie Bernardova: *The development of the web interface for the control and management of the monitoring GNSS system*. The development of the web interface for our system is part of this work as well. Here you can follow shifts in a real time, information about the state of the device and the administration of the database.

Keywords:

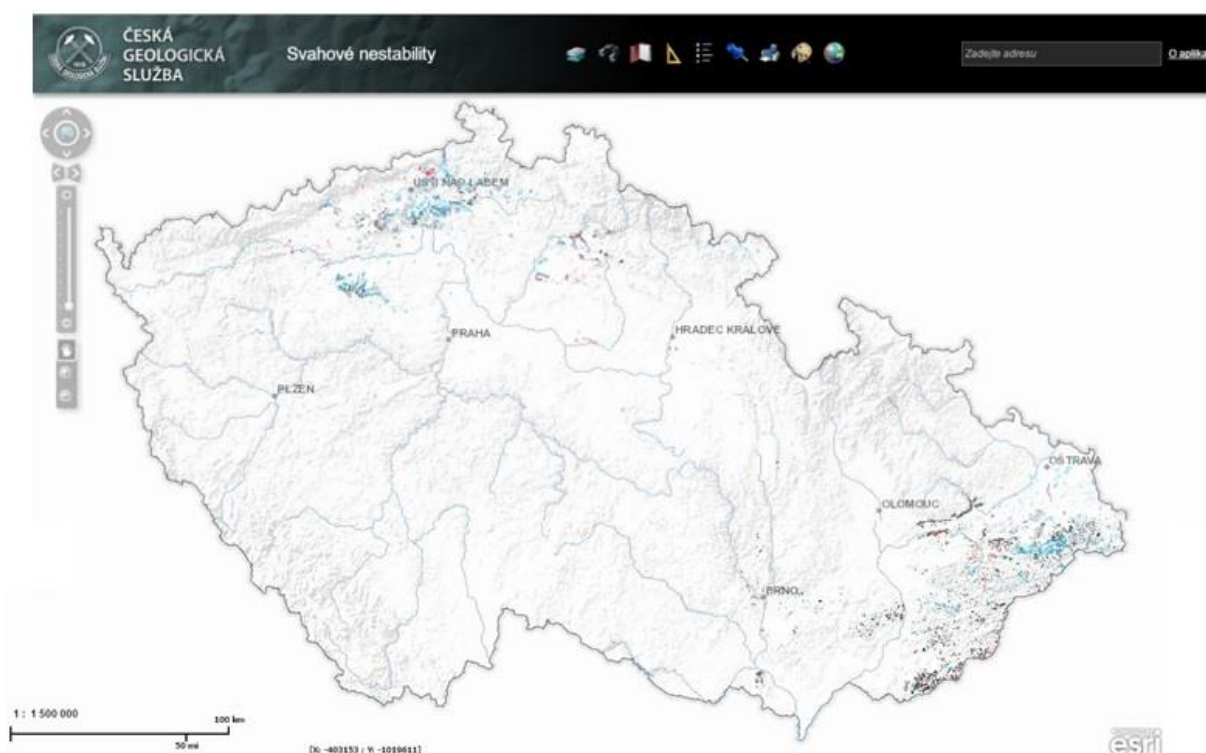
Slope deformations, GNSS, radiomodem, C++, TCP/IP protocol, database

Obsah

| | | |
|-------|--|--------|
| 1 | Úvod | - 8 - |
| 2 | Povrchový důl Bílina | - 10 - |
| 2.1 | Posuny na dole Bílina | - 10 - |
| 2.2 | Současné geodetické měření posunů na dole Bílina | - 12 - |
| 2.2.1 | Výpočetní software | - 13 - |
| 3 | System pro sledování svahových deformací | - 14 - |
| 3.1 | Pozorované body | - 15 - |
| 3.1.1 | GNSS přijímač U-blox | - 17 - |
| 3.1.2 | Arduino | - 17 - |
| 3.1.3 | Radiomodem X-Bee - PRO 868 RF Modul | - 18 - |
| 3.2 | Pozorovací stanice Citron | - 21 - |
| 3.2.1 | Raspberry Pi | - 21 - |
| 3.2.2 | Citron | - 22 - |
| 3.3 | Výpočetní centrum | - 22 - |
| 3.3.1 | Separator | - 23 - |
| 3.3.2 | RTNet | - 24 - |
| 3.3.3 | Result | - 25 - |
| 3.4 | Databáze MySQL | - 25 - |
| 3.5 | Webové rozhraní | - 26 - |
| 4 | Testování antén | - 29 - |
| 4.1 | Přijímač U-blox s anténou U-blox | - 30 - |
| 4.2 | Přijímač U-blox s anténou Leica | - 31 - |
| 4.3 | Přijímač Leica s anténou Leica | - 34 - |
| 4.4 | Zhodnocení výsledků testování | - 35 - |
| 5 | Porovnání metody současného měření posunů v dole Bílina se systémem GNSS | - 36 - |
| 5.1 | Porovnání výsledků obou metod | - 38 - |
| 5.2 | Ekonomické porovnání obou metod | - 41 - |
| 6 | Závěr | - 43 - |
| | Seznam obrázků | - 44 - |
| | Citovaná literatura | - 45 - |

1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá vývojem systému pro měření svahových deformací pomocí GNSS, protože ke svahovým deformacím dochází na některých území České republiky. Nejzatíženější oblasti svahovou deformací jsou Mostecká a Ostravsko-karvinská uhelná pánev. Kvůli těžbě uhlí zde dochází k poddolování svahů Krušných hor, Moravskoslezských Beskyd a Bílých Karpat, a proto dochází k lokálním sesuvům na úbočí těchto hor. Další příčinou svahových deformací související s těžbou je akumulace vytěžených hmot na jednom místě. Při sesuvu svahů často dochází k majetkové škodě, proto je důležité sledovat průběh deformací na těchto svazích, aby včas mohly začít sanační práce.



Obrázek 1 - Svahové nestability na území ČR. [10]

V rámci tohoto projektu vzniklo plně automatizované zařízení, které měří svahové deformace, zobrazuje výsledné grafy a včas varuje před blížícím se nebezpečím. Pro sledování svahových deformací bylo použito GNSS. V základním principu musíme použít vždy minimálně dva GNSS přijímače, kdy jeden GNSS přijímač slouží jako referenční stanice a ostatní GNSS přijímače jsou umístěny na pozorovaných bodech zvolených geologem. K přijímačům na pozorovaných bodech je počítán vektor z referenční stanice a určuje se relativní změna polohy, neboť je přesnější, než určování absolutních posunů. Výhody GNSS systému oproti klasickým geodetickým metodám, jako je například

automatické měření posunů totální stanicí, se kterou bude náš GNSS systém porovnán, jsou, že je možné měřit i za nepříznivých viditelných podmínek a lze náš systém uplatnit na rozsáhlém území, aniž bychom museli přestavovat referenční stanici.

V základním principu náš GNSS systém pracuje tak, že počítač, který je součástí referenční stanice, sbírá data z GNSS přijímačů na pozorovaných bodech a referenční stanice a pomocí internetu posílá data do výpočetního centra. Zde dochází ke zpracování dat a vypočtení odchylek od předchozí etapy na pozorovaných bodech. Výsledné odchylky se ukládají do databáze, odkud jsou zobrazovány na webových stránkách kolegyně Bc. Lucie Bernardové.

V povrchovém dole Bílina nám umožnili naše zařízení nainstalovat a otestovat jeho funkčnost. Zároveň nám bylo umožněno porovnat naměřené posuny pomocí GNSS s naměřenými posuny pomocí totální stanice, která v současné době monitoruje posuny na dole Bílina.

Celý projekt je podporován SGS ČVUT (studentská grantová soutěž ČVUT) s číslem SGS15/147/OHK1/2T/11 a názvem: *Vývoj ekonomicky efektivního a spolehlivého systému měření svahových a konstrukčních deformací pomocí GNSS s vysokou přesností v reálném čase.*

2 Povrchový důl Bílina

Lokalita povrchového dolu Bílina se nachází ve východní části Mostecké pánve, ohraničená z východní strany obcemi Bílina, Ledvice a Duchcov. Těžbu nízkosirnatého hnědého uhlí zde provádí společnost Severočeské doly a.s., která ročně vytěží 8 až 9 miliónů tun uhlí. Podle současně platných rozhodnutí by měla být těžba zrušena kolem roku 2035, avšak v těžební trase dolu se nenachází žádná lidská obydlí, a proto došlo k prodloužení životnosti až do roku 2050-2055. S převýšením přes 200 metrů se povrchový důl Bílina označuje za nejhlubší lom v České republice. Nejnižší bod povrchového dolu, který se nachází pouze několik metrů nad hladinou moře, je i nejnižším bodem na povrchu v České republice. [5]



Obrázek 2 - Povrchový lom Bílina

2.1 Posuny na dole Bílina

Protože v povrchovém dole Bílina se uhelná sloj nachází několik desítek až stovek metrů pod povrchem země, je zapotřebí nejprve odtěžit skrývku a následně je možné začít s těžbou uhlí. Skrývka je přemístěna na kraj lomu, kde je již uhlí vytěženo nebo tam, kam nebude těžba pokračovat. Na vzniklé výsypce pak může začít rekultivace krajiny. V dole Bílina však kvůli těžbě došlo k poddolování jedné ze starých výsypek a v důsledku toho se začal svah pohybovat. Z tohoto důvodu je svah osazen sledovacími hranoly a měřen posun svahu, aby případně byla včas implementována opatření proti sesuvu půdy a nedošlo tak k zavalení lomu. V mikropilotách umístěných v sesuvném území, jsou založeny železobetonové bloky, do kterých jsou ukotveny záhlaví kotev. Pod hlavou kotev jsou umístěny dynamometry, které snímají napětí v kotvách. Začne-li růst napětí na

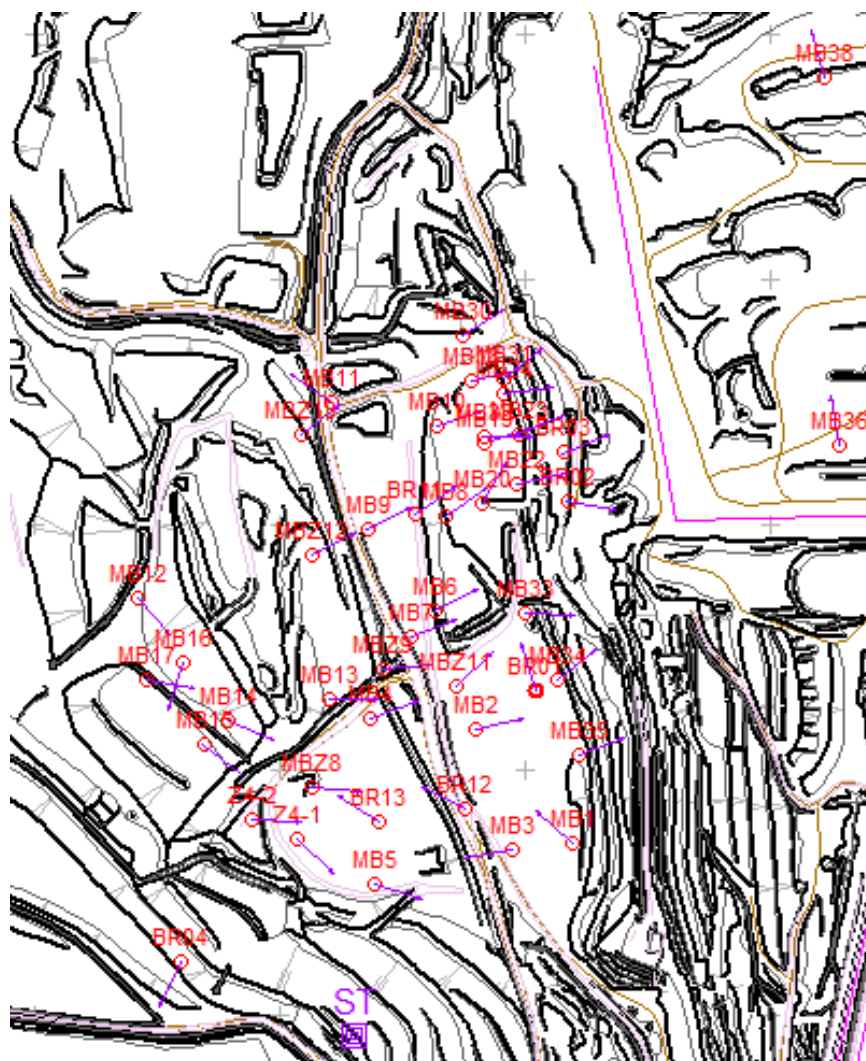
dynamometrech, je to signál, že se svah dává do pohybu. Dalším opatřením jsou kamenné lavice (žebra), které svou vahou podchycují patu výsypky. Každé žebro je založeno na rostlém podloží a odvodněno, čímž drénuje i výsypku nad sebou. [12]



Obrázek 4 - Kotvy



Obrázek 3 - Dynamometr



Obrázek 5 - Posuny na pozorovaných bodech v dole Bílina

2.2 Současné geodetické měření posunů na dole Bílina

V současné době se na dole Bílina měří posuny svahů pomocí totální stanice Leica TM30 od firmy Leica. Tato totální stanice je vteřinový přístroj a v kombinaci s automatikou, rychlostí měření a ATR (Automatic Target Recognition), je velmi vhodná pro automatické měření deformací různých typů (deformace přehrad, mostních konstrukcí, svahů atd.). [8]

| Parametry totální stanice Leica TM30 | |
|--------------------------------------|-----------------|
| Úhlová přesnost | 0,5" - 1" |
| Délková přesnost na hranol | 0,6 mm + 1 ppm |
| Délková přesnost na ostatní povrchy | 2 mm + 2 ppm |
| Přesnost ATR | 7 mm na 3 000 m |

Tabulka 1 - Parametry totální stanice Leica TM30

Totální stanice TM30 je umístěna v pozorovací stanici na místě, kde se předpokládá, že nedochází k posunu svahu a zároveň je zaručena viditelnost na pozorované body. Jméno pozorovací stanice pro tuto diplomovou práci jsme převzali od místních geotechniků, kteří ji pojmenovali Citron podle jejího žlutého zbarvení. Totální stanice Leica TM30 každou hodinu automaticky měří na pozorované body horizontální a vertikální úhel a šikmou délku. Dále se pro správné atmosférické korekce měří tlak a teplota vzduchu u pozorovací stanice Citron, které vstupují do výpočtu. [12]



Obrázek 6 - Totální stanice Leica TM30

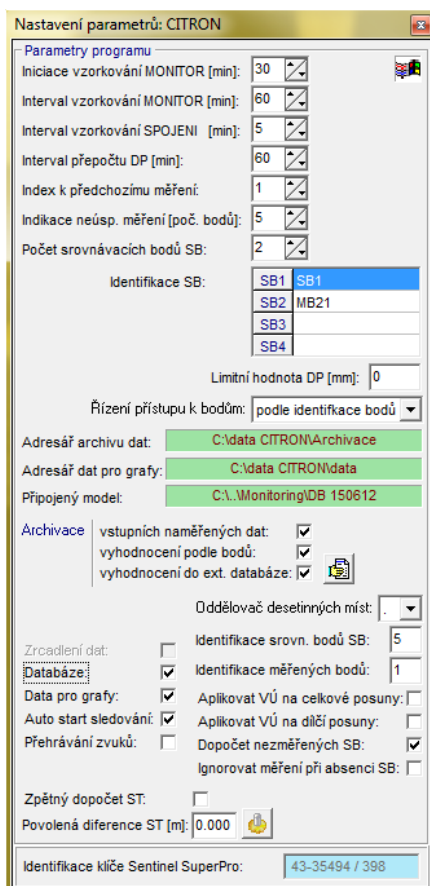


Obrázek 7 - Pozorovací stanice Citron

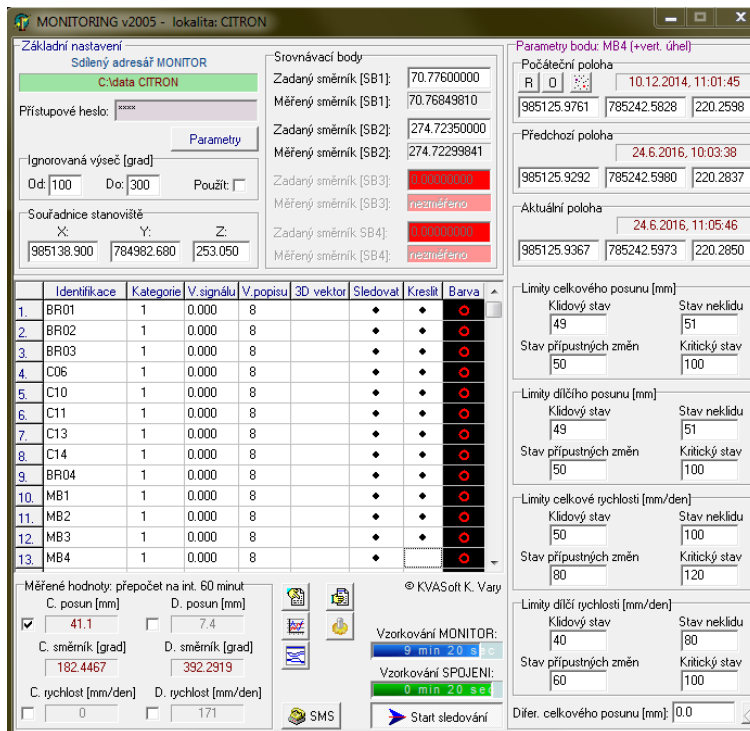
2.2.1 Výpočetní software

Veškerý výpočet probíhá v softwaru GeoMoS Monitor. Do výpočtu vstupují naměřené horizontální úhly, šikmé délky, teplota a tlak. Na začátku každé hodiny se změří orientace na pevné body a z nich se určí stržení přístroje. Všechny změřené horizontální úhly na pozorované body se pak opraví o hodnotu stržení přístroje. Šikmé délky se nepřepočítávají na vodorovné, aby nebyla zahrnuta chyba vertikálního úhlu, ale opravují se pouze o refrakci. Šikmá délka a horizontální úhel stačí pro určení odchylky od předchozí etapy měření.

Ve výpočetním softwaru GeoMoS Monitor je možné pro každý pozorovaný bod nastavit parametry, jako jsou například, zda budou do výpočtu zahrnuty vertikální úhly, zda a kam se budou data ukládat a další nastavení. V základním nastavení je vidět počáteční, předchozí a aktuální poloha bodu, celkový a dílčí posun a ikona pro zobrazení grafů s posuny, případně s jejich rychlostí. Pro nastavení měření nového bodu stačí pomocí GNSS přijímače určit přibližnou polohu nově sledovaného bodu a výsledné souřadnice vložit do softwaru GeoMoS Monitor. Při následující etapě měření totální stanice sama nový bod nalezne a pomocí ATR docílí na střed hranolu a změří horizontální a vertikální úhel a šikmou délku. [12]



Obrázek 9 - Nastavení parametrů v GeoMoS Monitor [12]

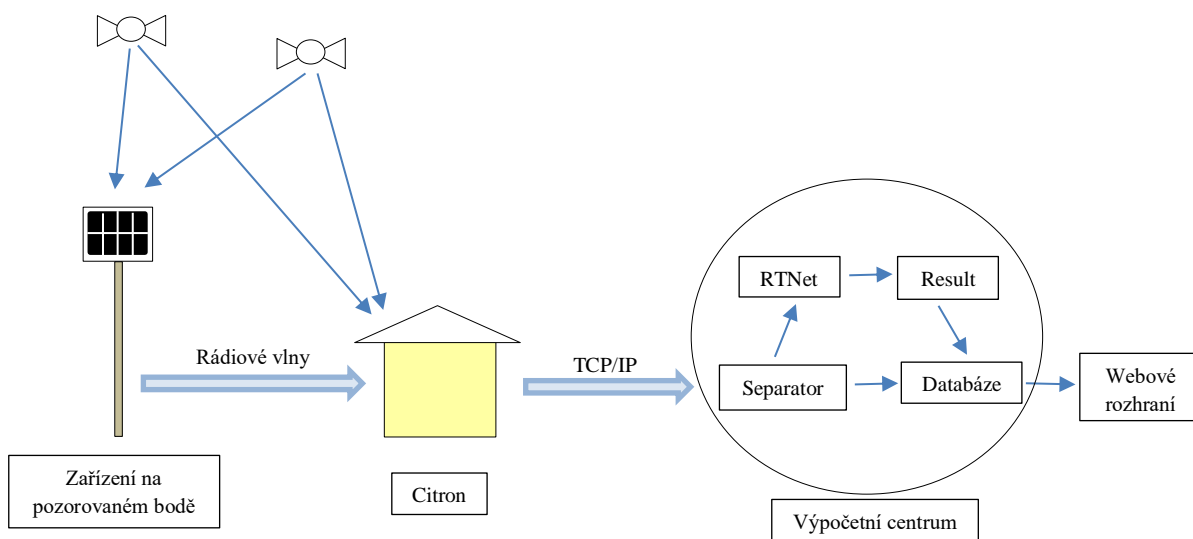


Obrázek 8 - Základní nastavení v GeoMoS Monitor [12]

3 Systém pro sledování svahových deformací

Náš systém pro sledování svahových deformací umístěný v dole Bílina se skládá z několika komponent: zařízení na pozorovaném bodě, pozorovací stanice Citron, výpočetní centrum a webové rozhraní. Protože se snažíme o ekonomicky efektivní a spolehlivý systém pro měření svahových deformací pomocí GNSS, zvolili jsme pro příjem družicových signálů levné jednofrekvenční GNSS přijímače od firmy U-blox se základní přesností. Jeden referenční GNSS přijímač je umístěn na pozorovací stanici Citron a od něho počítáme vektory k GNSS přijímačům umístěným na pozorovaných bodech. V současné době máme v dole Bílina osazen jeden pozorovaný bod, ale celý systém je připraven pro monitoring více pozorovaných bodů.

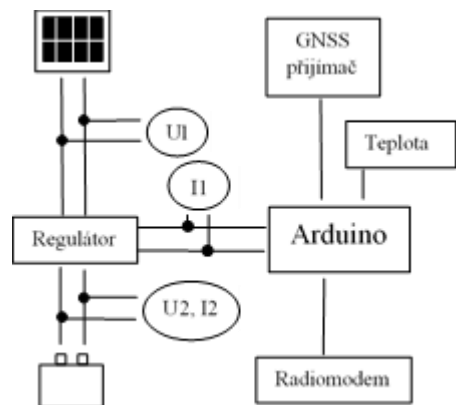
Klíčovým prvkem systému umístěného v dole Bílina je počítač (Raspberry Pi), který je součástí pozorovací stanice Citron. Počítač sbírá data z GNSS referenční stanice a z GNSS přijímačů umístěných na pozorovaných bodech. Jejich data jsou do stanice Citron přenášena pomocí radiomodemů. Stanice Citron má zajištěné internetové spojení pomocí GPRS modemu a odesílá data přes TCP/IP protokol do výpočetního centra. Zde dochází ke zpracování dat a výsledné posuny jsou ukládány do databáze. Do počítače jsou pomocí radiomodemů přenášena i data o stavu zařízení na pozorovaných bodech. Tyto data jsou také odesílána do výpočetního centra a ukládána do databáze. Veškeré uložené informace v databázi lze zobrazit na webovém rozhraní kolegyně Bc. Lucie Bernardové.



Obrázek 10 - Schéma systému pro sledování svahových deformací pomocí GNSS

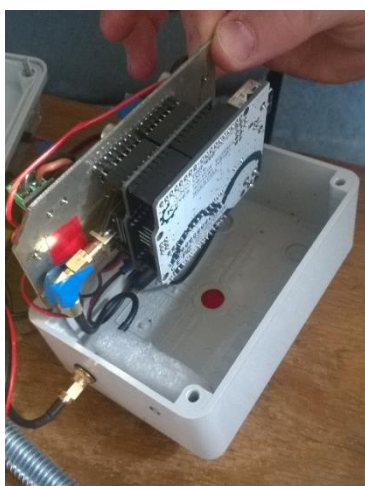
3.1 Pozorované body

Na základě geologického průzkumu jsou určeny rizikové oblasti pro sesun svahu. Na pozorovaných bodech určených geologem jsou umístěna zařízení pro sledování svahových deformací, jejichž schéma je znázorněno na obr. č. 11. Na pozorovaném bodě se nachází zabetonovaný ocelový sloupek, na jehož vrcholu je umístěn solární panel, který nabíjí akumulátory o celkové kapacitě 27 Ah, aby zajistil samostatný chod všech elektrických součástí



Obrázek 11 - Schéma zařízení na pozorovaném bodě

zařízení. Hlavním prvkem zařízení na pozorovaném bodě je čip (Arduino). Pro Arduino byl vytvořen shield, který umožňuje spojení Arduina s radiomodemem. Radiomodem umístěný na pozorovaném bodě odesílá data do radiomodemu umístěném na stanici Citron. Jedny odesílaná data jsou družicové signály zpracované GNSS přijímačem a následně jsou přenesena do Arduina. Druhá odesílaná data jsou hodnoty proudových senzorů ACS712, která jsou čtena pomocí AD převodníku Arduina. Z nich určujeme nabíjecí proud akumulátoru I2, proud I1 na výstupu z akumulátoru do přístrojů, napětí U1 na výstupu ze solárního panelu a napětí U2 na vstupu do akumulátorů. Na Arduino je napojen i teplotní senzor LM35.



Obrázek 14 - Shield (Arduino, radiomodem)



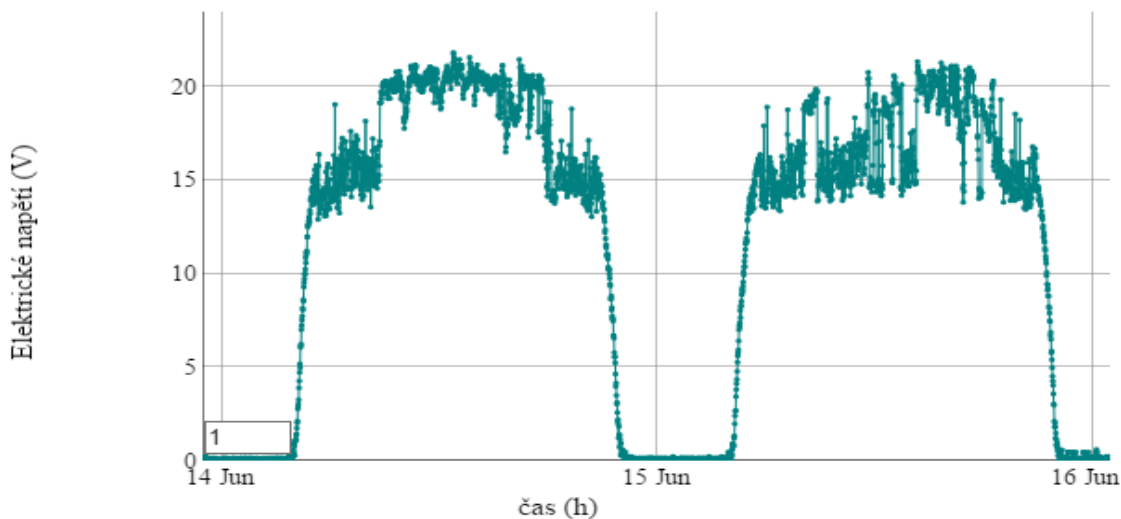
Obrázek 12 - GNSS přijímač a krabička obsahující shield



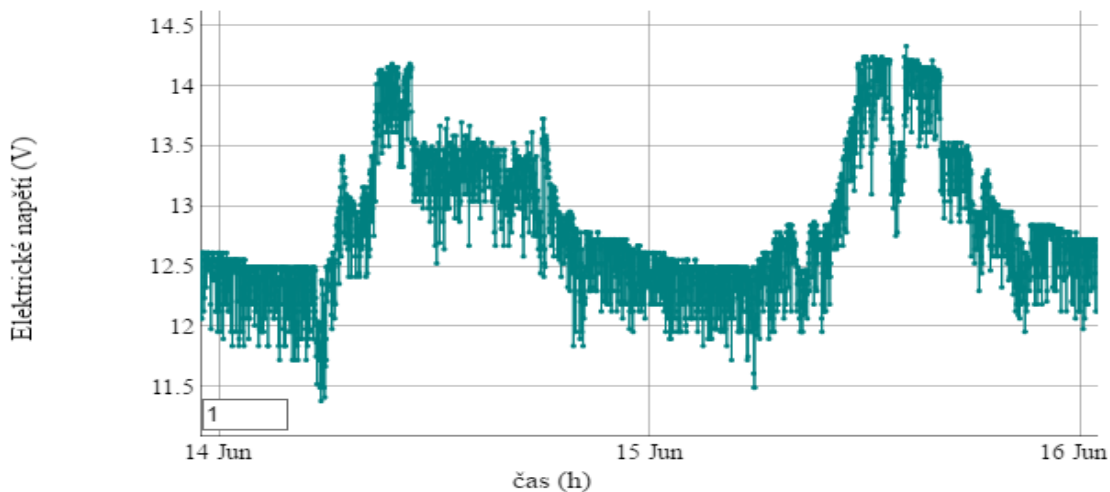
Obrázek 13 - Zařízení na pozorovaném bodě

Z rozdílů příkonu a výkonu na akumulátorech lze určit, zda solární panel stačí na dobíjení akumulátorů a dokáže tak zajistit chod elektrických součástí zařízení i přes noc. Z grafů na obrázcích č. 15 a 16 je patrné, že solární panel dodává největší výkon za jasného počasí. Dne 14. června nad dolem Bílina převládalo jasné počasí a hodnoty napětí se

pohybovaly kolem dvaceti voltů mezi osmou a osmnáctou hodinou. Dne 15. června bylo polojasno a hodnoty kolísaly mezi patnácti a dvaceti volty. Z grafů je vidět, že příkon akumulátorů je závislý na výkonu solárního panelu. Je však nutno dodat, že i když solární panel po západu slunce nedodává žádný výkon, akumulátory jsou dostatečně nabitě na to, aby zajistily napájení všech přístrojů na pozorovaném bodě i přes noc.



Obrázek 15 - Graf el. napětí na výstupu ze solárního panelu v závislosti na čase [7]



Obrázek 16 - Graf el. napětí na vstupu do akumulátoru v závislosti na čase [7]

3.1.1 GNSS přijímač U-blox

Pro příjem družicových signálů jsou použity GNSS přijímače od firmy U-blox (dále jen jako U-blox), jejichž parametry byly zmíněny již v kapitole č. 3 *Systém pro sledování svahových deformací*. Tyto GNSS přijímače dokáží pracovat při teplotách v rozmezí - 40 až + 65 °C a proto jsou vhodné pro naše permanentní venkovní měření. Pro příjem dat byla zvolena GNSS anténa Novatel.

Pro příjem družicového signálu v zařízení na pozorovaných bodech je použit GNSS přijímač EVK M8T, od firmy U-blox, zatímco na stanici Citron je použita sedmá řada těchto přijímačů EVK 7. Tyto GNSS přijímače se liší podle možností, ze kterých kosmických segmentů mohou přijímat signály. Obě řady GNSS přijímačů mohou přijímat signály z GPS a GLONASS. EVK M8T může navíc přijímat družicové signály z kosmického segmentu BeiDou. Další rozdíl je v předávání dat, kde GNSS přijímač EVK M8T odesílá data pomocí portu RS232, zatímco GNSS přijímač EVK 7 odesílá data pomocí USB portu. [6] [7]

3.1.2 Arduino

Arduino je mikrokontroler založený na čipu ATmega od firmy Atmel, ke kterému je dodáváno IDE (integrované vývojové prostředí). Protože Arduino nemá operační systém, běží na Arduinu jeden proces v nekonečné smyčce. Tento proces, který řídí chod Arduina, je napsán v programovacím jazyce Processing, který je velmi blízký programovacímu jazyku C++. Proces je napsán na stolním počítači a pomocí IDE je nahrán do Arduina, zkompilován a spuštěn. Výhody Arduina jsou jeho nízké náklady na pořízení, nízká spotřeba energie a jednoduché programovací prostředí, které lze rozšířit přes knihovny jazyka C++. [4]

Pro zařízení na pozorovaném bodě je použita verze Arduino Uno. Úkolem vyvinutého programu je komprimovat data přicházející z GNSS přijímače a senzorů na zařízení pozorovaného bodu do strukturované zprávy protokolu radiomodemu a následně zapisovat zprávy do portu RS232 připojeného na radiodemem.

3.1.3 Radiomodem X-Bee - PRO 868 RF Modul

X-Bee - PRO 868 RF Modul, dále jen jako X-Bee, je navržen jako nízkonákladové a nízkoeenergetické zařízení, které umožňuje bezdrátový přenos dat mezi vzdálenými body i několik kilometrů daleko. Data jsou přenášena pomocí rádiových vln na frekvenci 868 MHz. To je pásmo, které lze použít na základě generální licence ČTU (Český telekomunikační úřad). Pro vysílání nebo příjem rádiových vln byla použita koaxiální anténa. Komunikace s X-Bee probíhá na sériovém rozhraní.

X-Bee podporuje dva módy. Transparentní a API mód.

- V transparentním módu se radiomodem chová tak, že všechna přijatá data (např. z GNSS přijímače) posílá přes rádiové vlny do jiného radiomodemu. Zpočátku jsme s tímto módem pracovali, neboť transparentní mód lze vhodně využít při posílání dat mezi dvěma radiomodemi. Přijímá-li však jeden radiomodem data z více radiomodemů, tak nejen že nelze rozlišit ze kterého radiomodemu jsou která data, ale zároveň se data mezi sebou promíchají. Z tohoto důvodu jsme začali používat API mód.
- API mód je alternativou transparentního módu, s tím rozdílem, že všechna data, která vstupují nebo vystupují z radiomodemu v API módu, jsou ohraničena strukturovanou zprávou protokolu X-Bee (v dokumentaci X-Bee uvedeno jako frame). Tato zpráva zaručuje, že nedojde k mísení dat a lze rozeznat, ze kterých radiomodemů pocházejí která data, čehož bylo využito v této diplomové práci. [1]

Moduly v API módu mezi sebou komunikují pomocí zprávy. Každá zpráva má přesně definovanou strukturu podle toho o jaký typ zprávy se jedná. Obecně však platí, že struktura zprávy je následující:

| Start Delimiter (Byte 1) | Length (Byte 2 - 3) | | Frame Data (Byte 4 - n) | Checksum (Byte n+1) |
|-----------------------------|------------------------|-----|----------------------------|------------------------|
| 0x7E | MSB | LSB | API-Specific Structure | 1 Byte |

MSB...Most Significant Byte
LSB...Least Significant Byte

Obrázek 17 - Struktura zprávy [1]

V případě, že zpráva není správně přijata, nebo neodpovídá kontrolní součet, modul zpět odešle stavovou zprávu s informacemi o důvodu selhání přijetí zprávy.

Zpráva začíná oddělovačem a následuje délka zprávy (length), která má vyhrazené dvou-bajtové pole a je zde uložen počet bajtů, který se nachází v těle zprávy (Frame Data).

První bajt těla zprávy je tzv. cmdID, který říká, o jaký typ zprávy se jedná. V následující tabulce jsou všechny typy zpráv:

| Typ zprávy | ID zprávy |
|------------------------------------|-----------|
| AT command | 0x08 |
| AT command - queue parameter value | 0x09 |
| Transmit request | 0x10 |
| Explicit addressing command frame | 0x11 |
| Remote command request | 0x17 |
| AT command response | 0x88 |
| Modem status | 0x8A |
| Transmit status | 0x8B |
| Receive packet | 0x90 |
| Explicit Rx indicator | 0x91 |
| Node identification indicator | 0x95 |
| Remote command response | 0x97 |

Tabulka 2 - Typy zpráv [1]

Pro lepší pochopení zprávy, je v následující tabulce uveden příklad obdržené zprávy z X-Bee. Tento typ zprávy je pro náš projekt nejdůležitější.

| Pole zprávy | Pozice | Příklad | Popis |
|-----------------|--------|---------|--------------------------------|
| Start Delimiter | 0 | 0x7E | |
| Length | 1 | 0x00 | Délka těla zprávy |
| | 2 | 0x13 | |
| Frame data | 3 | 0x90 | Typ zprávy |
| | 4 | 0x00 | 64 - bitová adresa odesílatele |
| | 5 | 0x13 | |
| | 6 | 0xA2 | |
| | 7 | 0x00 | |
| | 8 | 0x11 | |
| | 9 | 0x11 | |
| | 10 | 0x11 | |
| | 11 | 0x11 | |
| | 12 | 0xFF | Síťová adresa příjemce |
| | 13 | 0xFE | |
| | 14 | 0x01 | Potvrzení balíčku |
| | 15 | 0x56 | Přijatá data |
| | 16 | 0x41 | |
| | 17 | 0x43 | |
| | 18 | 0x32 | |
| 19 | 0x32 | | |

| | | | |
|----------|----|------|--|
| | 20 | 0x36 | |
| | 21 | 0x35 | |
| Checksum | 22 | 0xE1 | |

Tabulka 3 - Struktura zprávy 0x90 [1]

Na první a druhé pozici se nachází délka těla zprávy. Jak je patrné z tabulky č. 3, tělo zprávy obsahuje devatenáct bajtů (0x00, 0x13 (HEX) = 19 (DEC)). Na třetí pozici je vložena informace o typu zprávy. Na čtvrté až jedenácté pozici se nachází adresa odesílatele. Je to tzv. MAC adresa, která je unikátní pro každý radiomodem. Od patnácté do předposlední pozice se nacházejí přijatá data.

Protože přes strukturovanou zprávu protokolu X-Bee přijímáme více druhů dat, rozhodli jsme se data rozlišit podle prvních třech znaků vložených před vlastní data zprávy. Jejich význam je uveden v tabulce č. 4.

| Znaky | Význam |
|-------|--|
| VAC | Napětí na vstupu do akumulátoru |
| VSO | Napětí na výstupu ze solárního panelu |
| ABO | Proud odebíraný na výstupu z akumulátoru |
| ASO | Proud odebíraný na vstupu do akumulátoru |
| TMP | Okolní teplota na pozorovaném bodě |
| GPS | Data z GNSS přijímače |

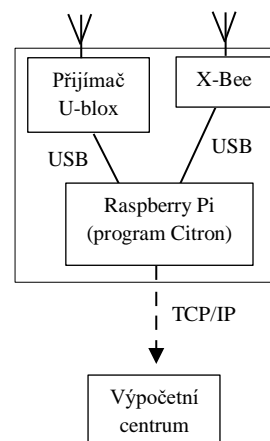
Tabulka 4 - Význam znaků před přijatými daty

Přeložíme-li si pomocí ASCII tabulky přijatá data z příkladu uvedeném v tabulce č. 3, zjistíme, že obdržíme zprávu "VAC2265". Z tabulky č. 4 je patrné, že jsme obdrželi napětí na vstupu do akumulátoru o hodnotě 2265. Tato hodnota odpovídá čtení na proudovém senzoru ACS 712. Data začínající GPS, jsou data z GNSS přijímače v U-blox binary formátu.

Na poslední pozici příkladu se nachází kontrolní součet.

3.2 Pozorovací stanice Citron

Na střeše pozorovací stanice Citron se nachází koaxiální X-Bee anténa pro příjem dat z X-Bee na pozorovaných bodech a GNSS anténa Novatel pro příjem družicových signálů. Všechny přijaté signály jsou pomocí USB portu přeneseny do Raspberry Pi, kde dochází ke zpracování a po internetové síti přes TCP/IP spojení preposílání dat do výpočetního centra. Protože v kapitole č. 3.1 *Pozorované body* již bylo psáno o X-Bee i GNSS přijímači, bude se následující kapitola zabývat pouze Raspberry Pi.



Obrázek 18 - Schéma pozorovací stanice Citron



Obrázek 20 - Rozmístění antén GNSS přijímače a X-Bee na pozorovací stanici Citron



Obrázek 19 - Zařízení na pozorovací stanici Citron (zleva: Raspberry Pi, X-Bee, U-blox)

3.2.1 Raspberry Pi

Raspberry Pi je jednodeskový počítač. Na rozdíl od Arduina, má Raspberry Pi operační systém a je možné, aby zde běželo více procesů najednou. Další výhodou oproti Arduinu je také to, že obsahuje USB porty a ethernetový port. Díky internetovému spojení lze komunikovat se vzdálenými počítači pomocí TCP/IP protokolu.

IP (Internet Protokol) je komunikační protokol, na jehož principu je postaven internet. Zajišťuje komunikaci mezi dvěma počítači předáváním IP paketů. TCP (Transmission Control Protokol) je komunikační protokol se spojovací službou. Před vlastní komunikací je potřeba navázat spojení. To má za úkol klient, který pro správné spojení musí znát IP adresu vzdáleného počítače a číslo portu na kterém běží aplikace. TCP tedy zajišťuje komunikaci mezi dvěma aplikacemi. Aby bylo spojení správně navázáno, je zapotřebí, aby na vzdáleném počítači pomocí funkce *listen* poslouchal server na stejném portu. Ve chvíli, kdy je spojení

navázáno, server plní požadavky klienta a můžou mezi sebou například posílat data, čehož bylo využito v této diplomové práci. [3]

3.2.2 Citron

Pro Raspberry Pi byl vytvořen zdrojový kód s názvem *Citron* v programovacím jazyce C++. Tento zdrojový kód je více-vláknový program.

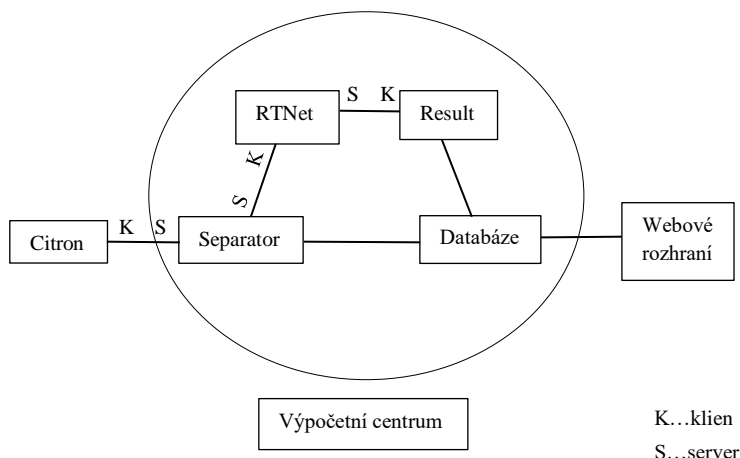
Jedno vlákno se stará o komunikaci s X-Bee. Nejprve otevře sériový port a následně čte přijatá data z X-Bee. Data obsahují pouze typ zprávy 0x90. Zde jsou data z GNSS přijímače na pozorovaném bodě a nebo informace ze senzorů umístěných na pozorovaném bodě. Viz tabulka č. *Tabulka 4 - Význam znaků před přijatými daty*.

Další vlákno se stará o komunikaci s GNSS přijímačem umístěným na střeše pozorovací stanice Citron. Z portu připojeného na GNSS přijímač tečou data v U-blox binary formátu. Tyto data jsou komprimována do typu zprávy 0x90.

Poslední vlákno se stará o komunikaci s výpočetním centrem. Pro odesílání dat jsme využili již definované strukturované zprávy protokolu X-Bee, neboť mají v sobě zakomponováno, jaká přijímáme data, přijatá data a z jakého pozorovaného bodu data přijímáme. GPS data z GNSS přijímače na stanici Citron jsou ohraničena zprávou, kde pro MAC adresu X-Bee používáme 00000000. Všechny zprávy jak z X-Bee, tak z GNSS přijímače jsou posílány přes TCP/IP spojení do výpočetního centra.

3.3 Výpočetní centrum

Poslední část projektu se nachází na počítačích v budově Fakulty stavební ČVUT v Praze s veřejnou IP adresou. Tato část se skládá z několika programů vytvořených v programovacím jazyce C++. Nejprve data putují z pozorovací stanice Citron pomocí programu *Citron* do programu *Separator* přes TCP/IP spojení. Zde část dat putuje do databáze a část do výpočetního programu *RTNet*. Z *RTNetu* pak jsou výsledky posílány přes program *Result* opět do databáze. Zde na moji práci navazuje práce kolegyně Bc. Lucie Bernardové, která údaje v databázi zobrazuje na webových stránkách. Následující kapitoly detailněji popisují chod jednotlivých programů.



Obrázek 21 - Schéma výpočetního centra

3.3.1 Separátor

Při samotném prvním spuštění programu *Separator* dojde k vytvoření spojení mezi *Separátorem* a databází. Následně vznikne i spojení mezi programy *Citron* a *Separator*. Protože pozorovací stanice *Citron* zajišťuje GPRS modem, je zde pouze lokální IP adresa. Z tohoto důvodu program *Separator* zajišťuje server na TCP/IP spojení s *Citronem*, neboť klient nemůže navázat spojení s lokální adresou. Toto spojení je neustále otevřené a slouží k nepřetržitému příjmu dat z *Citronu*. Protože jde o nepřetržitý tok, jsou data ve třídě *buffer* dělena na jednotlivé zprávy. Víme, že do programu *Separátor* přichází jediný typ zprávy 0x90 a známe přesně jeho strukturu. Přijaté zprávy jsou rozděleny podle třech znaků (tab. č. 4) na jednotlivé typy dat.

Všechny typy dat kromě GPS jsou každou minutu ukládány do tabulky *RoverStatus* pro každý pozorovaný bod. Data z GNSS jsou dekodována a jsou z nich vybrány informace o počtu družic a údaje hodin přijímače. Následně je vypočtena časová prodleva mezi údaji hodin přijímače a aktuálním časem počítače, kde běží program *Separator*. Tyto informace se vkládají do tabulky *TrackingStatus* každých pět minut pro každý pozorovaný bod a stanici *Citron*. Proto se k nim přidává ještě informace o kompletnosti dat, kterou lze snadno vypočítat, pokud víme, že každých pět vteřin má přijít GNSS epocha. Pomocí následujícího vzorce lze vypočítat kompletnost dat.

$$completeness[\%] = \frac{100 * count}{60}$$

count ... celkový počet přijatých GNSS epoch za 5 minut

Data začínající znaky GPS jsou odesílána i do programu *RTNet* přes TCP/IP spojení k dalšímu zpracování.

3.3.2 RTNet

Na vývoji softwaru RTNet (Real Time NETwork processing Engine) se podílel Ing. Zdeněk Lukeš Ph.D. Program je primárně navržen pro zpracování dat v reálném čase (real time), ale umí zpracovávat data i v režimu post-processing. Tento software se dělí na dvě etapy. První etapa RTES (Real Time Epoch Server) je příjmová a sbírá data z GNSS přijímačů. V okamžiku, kdy obdrží data ze všech přijímačů, tak z nich vytvoří data, která je možné zpracovat v RTNetu. Druhá etapa je RTNet, který si obstará observační data a provede zpracování dat. RTNet je navržen pro zpracování GNSS sítí s nejvyšší možnou přesností. RTNet umí dopočítat velké množství parametrů, jako jsou ambiquity a souřadnice stanice. Počítá i s chybou hodin přijímače a chybou družicových hodin a také započítává ionosférickou a troposférickou refrakci. [9]

Než RTNet začne počítat, je třeba mu dodat informace pomocí vstupních souborů. V prvním souboru jsou uloženy názvy počítaných bodů, jejich apriorní souřadnice, odsazení přijímače od vlastního bodu a názvy antén. Z hlavičky dalšího vstupního souboru RTNet vyčte, kolik spojení má otevřít na TCP/IP spojení s programem *Separator*, aby nedocházelo k mísení dat z GNSS přijímačů. V jednom spojení tečou data pouze z jednoho GNSS přijímače.

```
! Server
! -----
SERVER 3
"CITR socket+ublox::/147.32.131.33:9598/ XYZ"
"1001 socket+ublox::/147.32.131.33:9599
"ORBIT ntrip+rtcm3://bkg:realtime06@products.igs-ip.net:2101/RTCM3EPH"
```

Obrázek 22 - Hlavička vstupního souboru pro RTNet

Číslo za *SERVER* uvádí, kolik bude otevřeno spojení a následuje, pro které body bude spojení navázáno. CITR a 1001 jsou názvy bodů. Socket+ublox znamená, jak a v jakém formátu *RTNet* přijímá data. Následuje IP adresa počítače, ze kterého *RTNet* přijímá data a za dvoutečkou je číslo portu, na kterém se navazuje spojení. XYZ u bodu CITR znamená, že jeho souřadnice jsou fixovány a nepočítají se u něho relativní změny polohy. V posledním řádku je informace o tom, odkud lze stáhnout orbity družic. V tomto vstupním souboru *RTNetu* jsou uvedeny i apriorní směrodatné odchylky ve směru North/East/Up a směrodatné odchylky bílého šumu ve směru North/East/Up. Všechny tyto informace jsou uloženy v databázové tabulce *PointsIdentifier* a lze je modifikovat přes webové rozhraní kolegyně Bc. Lucie Bernardové.

3.3.3 Result

Program *Result* dělá prostředníka mezi programem *RTNet* a databází, protože nebyl umožněn přístup do programu *RTNet*. Na základě poskytnutého dekodéru byly z protokolu z *RTNetu* vybrány výsledné kartézské souřadnice X, Y, Z systému WGS84 pro pozorované body a uloženy do databáze spolu s informací, zda mají souřadnice řešení *fix* nebo *float*.

3.4 Databáze MySQL

Na vývoji relačního databázového systému jsme se podílely s kolegyní Bc. Lucíí Bernardovou. MySQL je relační databázový systém tvořený minimálně jednou tabulkou, skládající se z řádků a sloupců. Na řádcích jsou uloženy jednotlivé záznamy a sloupce obsahují hodnoty atributů a definují datový typ. Každá tabulka musí obsahovat tzv. primární klíč, který slouží pro jasnou identifikaci řádků. Práce s databázemi se provádí pomocí dotazů programovacího jazyka sql. Pro náš projekt je potřeba databáze spravovat vzdáleně, a proto bylo použito prostředí phpMyAdmin. [11]

V prostředí phpMyAdmin byla pro náš projekt vytvořena databáze *GPS*, která obsahuje čtyři tabulky. Všechny tyto tabulky jsou mezi sebou provázány pomocí *ID_instrument* (číslo bodu).

- *PointsIdentifier*

V této tabulce jsou uloženy informace o bodech. Je to jediná tabulka, kterou lze editovat přes webové rozhraní kolegyně Bc. Lucie Bernardové a je možno mazat nebo přidávat bod a nebo upravovat již vložené hodnoty. Tato tabulka je důležitá i pro výpočetní centrum, neboť je zde provázáno *ID_instrument* s MAC adresou X-Bee a číslem portu, na kterém se otevírá spojení mezi programy *Separator* a *RTNet*. V této tabulce je uloženo *id*, což je primární klíč. Dále zde nalezneme již zmiňované *ID_instrument*, MAC adresa X-Bee a číslo portu. Tabulka také obsahuje, zda se tento bod počítá nebo je fixní, přibližné souřadnice X/Y/Z v kartézských souřadnicích systému WGS84, formát ve kterém jsou přijatá data z GNSS přijímačů, IP adresa počítače odkud tečou data do programu *RTNet* (kde běží program *Separator*), směrodatné odchylky ve směru N/E/U, směrodatné odchylky bílého šumu opět ve směru N/E/U, odsazení přijímače od vlastního bodu ve směru N/E/U a název antény pro GNSS přijímač.

- *Result*

Do této tabulky ukládá program *Result* všechny výsledné souřadnice pozorovaných bodů z programu *RTNet*. Tato tabulka obsahuje ID_epoch (primární klíč), ID_instrument, time (čas vložení údaje do tabulky), X, Y, Z (kartézské souřadnice v systému WGS84) a fix (zda vložené souřadnice mají fix nebo float řešení).

- *RoverStatus*

Tato tabulka obsahuje hodnoty ze senzorů umístěných na pozorovaných bodech. Údaje do tabulky jsou zapisovány každou minutu pomocí programu *Separator* pro každý pozorovaný bod. Opět je zde uložen ID_epoch (primární klíč), ID_instrument, time (čas vložení údaje do tabulky), VOLT_A (napětí na vstupu do akumulátoru), VOLT_S (napětí na výstupu ze solárního panelu), CURR_A (proud na výstupu z akumulátoru), CURR_S (proud na vstupu do akumulátoru) a TEMP_O (venkovní teplota).

- *TrackingStatus*

Tato tabulka nás informuje o stavu příjmu družicových signálů. Program *Separator* sem ukládá hodnoty každých pět minut a vložena hodnota je průměr všech přijatých informací za posledních pět minut. Opět obsahuje ID_epoch (primární klíč), ID_instrument a time (čas vložení údaje do tabulky). Dále obsahuje NSV, což je počet satelitů, ze kterých daný GNSS přijímač přijímá družicové signály. Je zde uložena i *latence a kompletnost dat*.

3.5 Webové rozhraní

Na vývoji webového rozhraní se podílela kolegyně Bc. Lucie Bernardová. Toto webové rozhraní slouží k editaci hodnot v databázové tabulce *PointsIdentificator* a následně k zobrazování těchto informací. Dále zobrazuje všechny naměřené hodnoty uložené v tabulkách databáze *GPS* pomocí grafů a lze ze stránek získat základní informace o projektu

Tyto stránky se nacházejí na adrese:

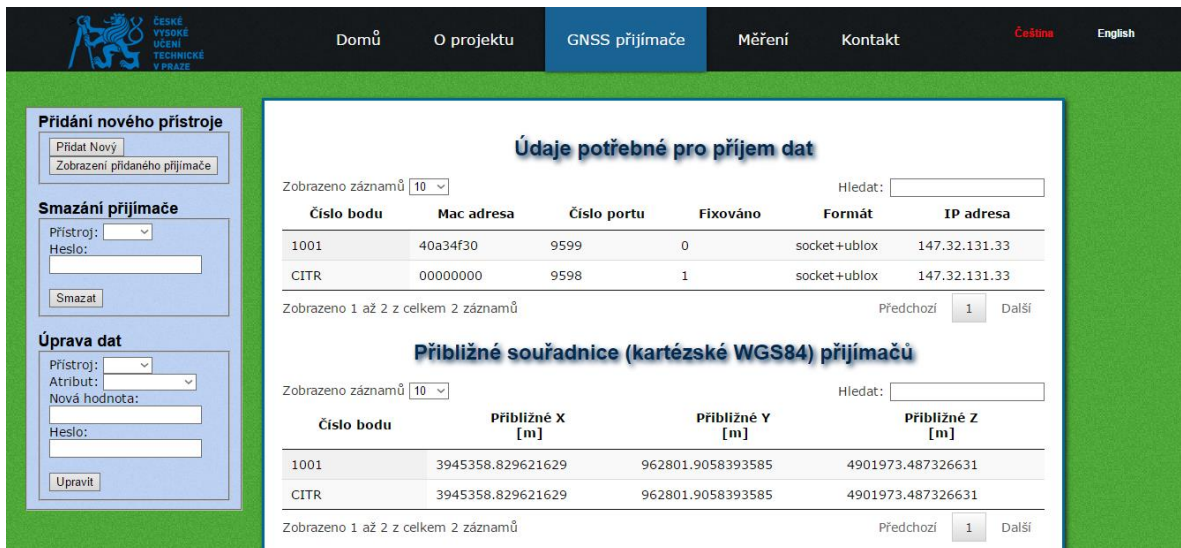
k155-33.fsv.cvut.cz/GNSSNetMonitor/projekt/index.html

Zde se nachází pět záložek, které si postupně popíšeme.

Na záložce *Domů* se nachází základní informace o celém projektu a fotografie instalovaného zařízení. Dále je zde odkaz na záložku *Měření*, kde se nacházejí grafy. Další

záložka *O projektu* jak již název napovídá, podává informace o projektu a jaké jsou jeho cíle.

Následující záložka *GNSS přijímače* poskytuje možnost editovat data v tabulce *PointsIdentifier*. Díky webovému rozhraní lze do tabulky přidat nový přijímač. Při vkládání nového bodu jsou některé parametry omezeny počtem znaků. Jiné jsou předvyplněné s možností přepsání a nebo lze vybrat z roletového menu. Na záložce *GNSS přijímače* je také možné smazat již nepoužívaný bod, nebo alespoň upravit data, již vložených přijímačů. Dále je zde zobrazena celá tabulka *PointsIdentifier* rozdělena na čtyři části. V první části se nachází údaje potřebné pro příjem dat, jako jsou IP adresa počítače, číslo portu, formát dat atd. V druhé části jsou zobrazeny přibližné kartézské souřadnice systému WGS84. V další části jsou informace o apriorních směrodatných odchylkách a o směrodatných odchylkách bílého šumu. Poslední část se týká údajů o anténě. Název antény a odsazení antény od vlastního bodu. Na obrázku č. 23 je ukázka záložky *GNSS přijímače*.



Údaje potřebné pro příjem dat

Zobrazeno záznamů Hledat:

| Číslo bodu | Mac adresa | Číslo portu | Fixováno | Formát | IP adresa |
|------------|------------|-------------|----------|--------------|---------------|
| 1001 | 40a34f30 | 9599 | 0 | socket+ublox | 147.32.131.33 |
| CITR | 00000000 | 9598 | 1 | socket+ublox | 147.32.131.33 |

Zobrazeno 1 až 2 z celkem 2 záznamů Předchozí Další

Přibližné souřadnice (kartézské WGS84) přijímačů

Zobrazeno záznamů Hledat:

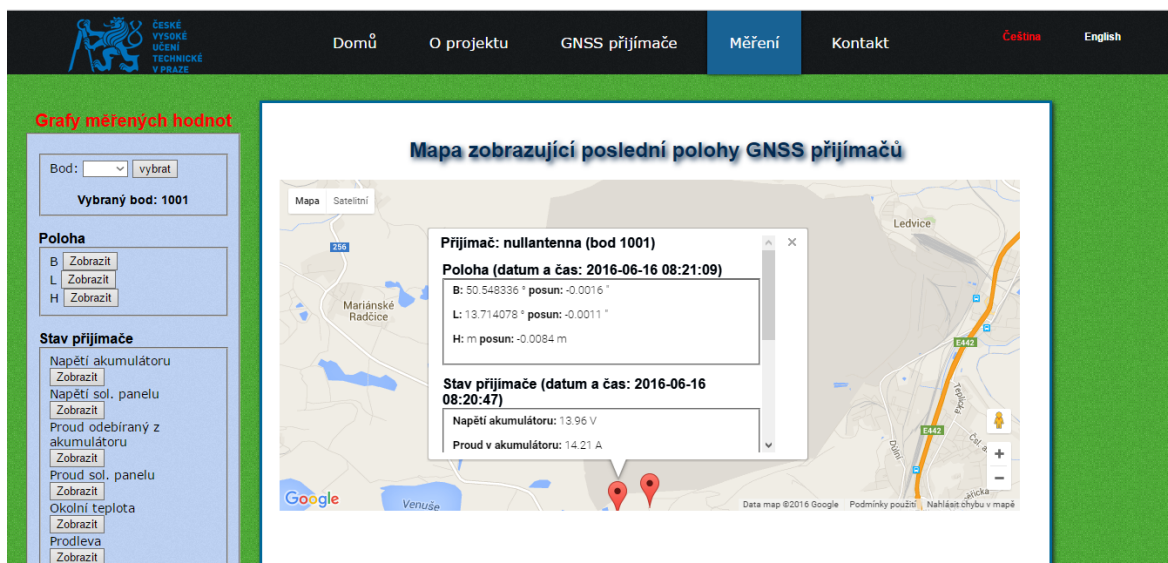
| Číslo bodu | Přibližné X [m] | Přibližné Y [m] | Přibližné Z [m] |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1001 | 3945358.829621629 | 962801.9058393585 | 4901973.487326631 |
| CITR | 3945358.829621629 | 962801.9058393585 | 4901973.487326631 |

Zobrazeno 1 až 2 z celkem 2 záznamů Předchozí Další

Obrázek 23 - Webová stránka, záložka *GNSS přijímače* [7]

Další záložka je *Měření*. Zde je umístěna mapa, která zobrazuje poslední polohy GNSS přijímačů. Klikneme-li na některý ze zobrazených přijímačů, ukáže se nám, o jaký bod se jedná a jeho aktuální naměřené hodnoty. U referenční stanice Citron se zobrazí datum a čas posledního měření a poloha bodu v tomto čase. Dále se zobrazí aktuální počet družic při posledním měření, latence a kompletnost dat. U pozorovaného bodu lze navíc získat i posun a stav přijímače (napětí na výstupu ze solárního panelu, napětí a proud na výstupu z akumulátoru, proud na vstupu do akumulátoru a okolní teplota). Pro zobrazení grafu se nejprve v boční liště vybere pozorovaný bod, pro který by měl být vykreslen graf a následně

se vybere požadovaný graf. V nabídce jsou grafy znázorňující aktuální posun ve směru B, L, H, stav přijímače a prodleva. U grafů je možné vybrat, v jakém časovém úseku chci zobrazit data. Na obrázku č. 24 je ukázka záložky *Měření*.



Obrázek 24 - Webová stránka, záložka *Měření* [2]

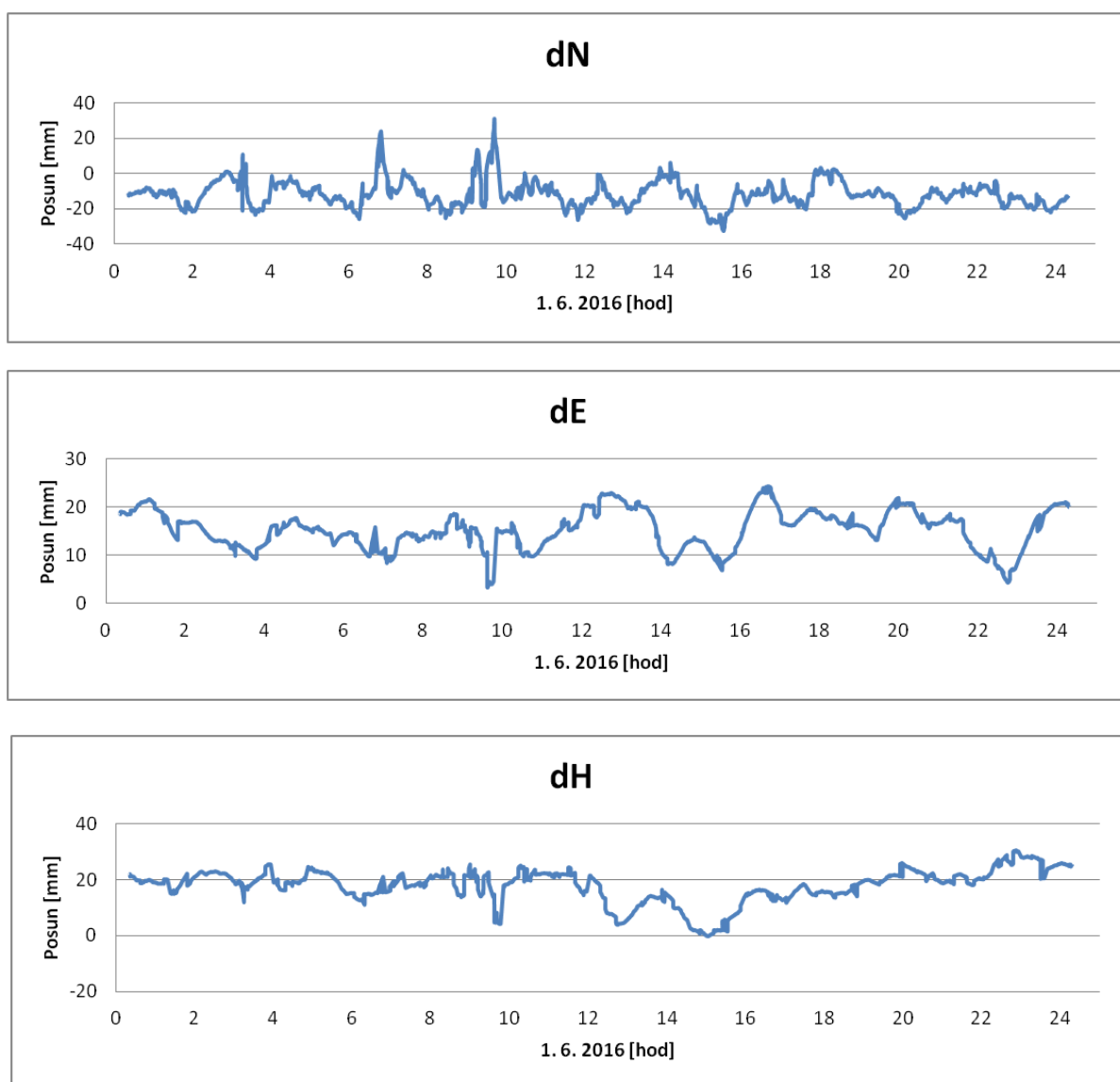
V poslední záložce *kontakt* je se možné se svými dotazy obrátit na slečnu Bc. Lucii Bernardovou prostřednictvím e-mailu. Webové stránky je možné zobrazovat i v anglickém jazyce. [2]

4 Testování antén

Na dole Bílina je umístěna jednofrekvenční nízkonákladová anténa Novatel, která je pouze základní kvality. Výsledné posuny se na dole Bílina pohybují v rozmezí ± 15 mm. Z toho důvodu jsme chtěli porovnat výsledky z přijímače U-blox, na který je připojena anténa Novatel, s výsledky z vysoce přesného dvoufrekvenčního geodetického přijímače Leica s anténou Leica AX1202 GG, přičemž druhou frekvenci jsme ignorovali.

dN...posun ve směru sever, jih
 dE...posun ve směru východ západ
 dH...výškový posun

Posuny na pozorovaném bodě 1001 v dole Bílina



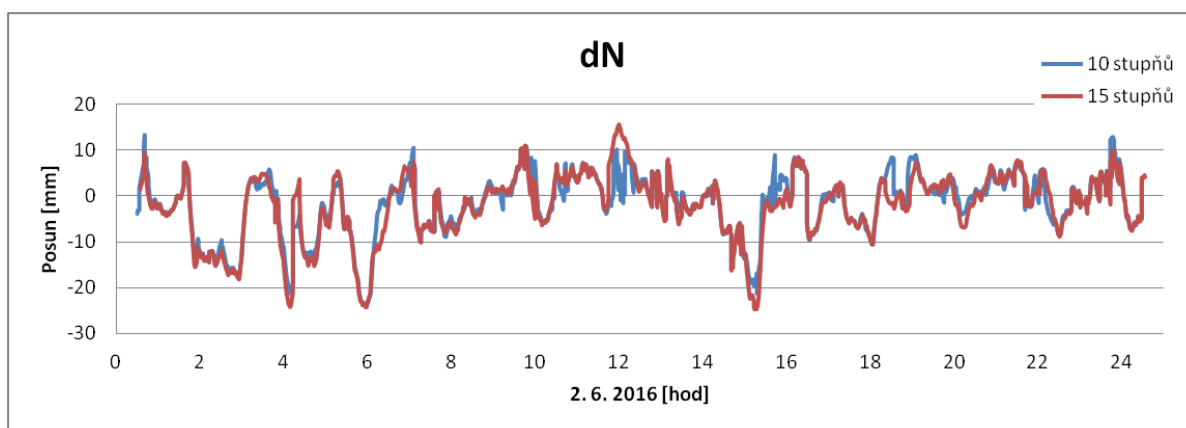
Obrázek 25 - Posuny na pozorovaném bodě 1001 v dole Bílina

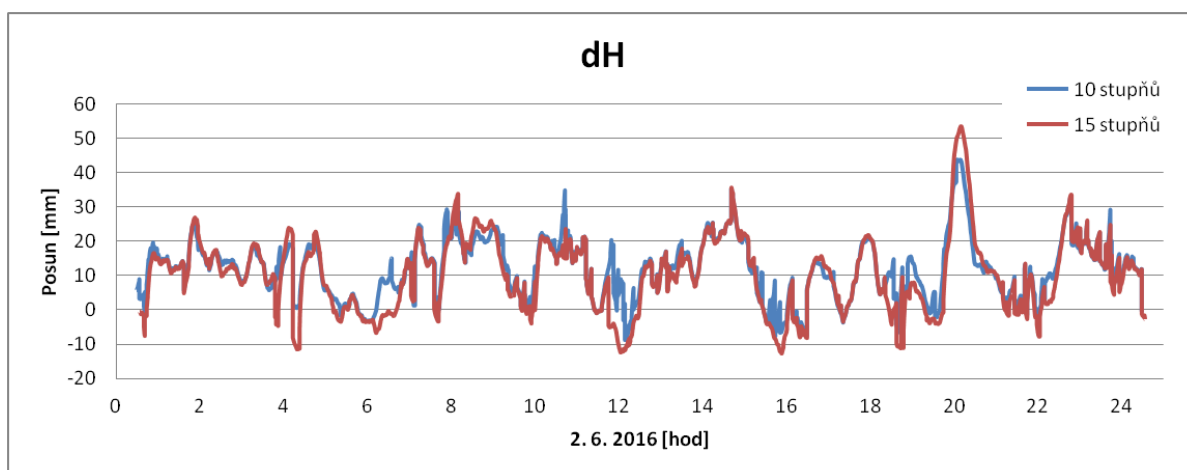
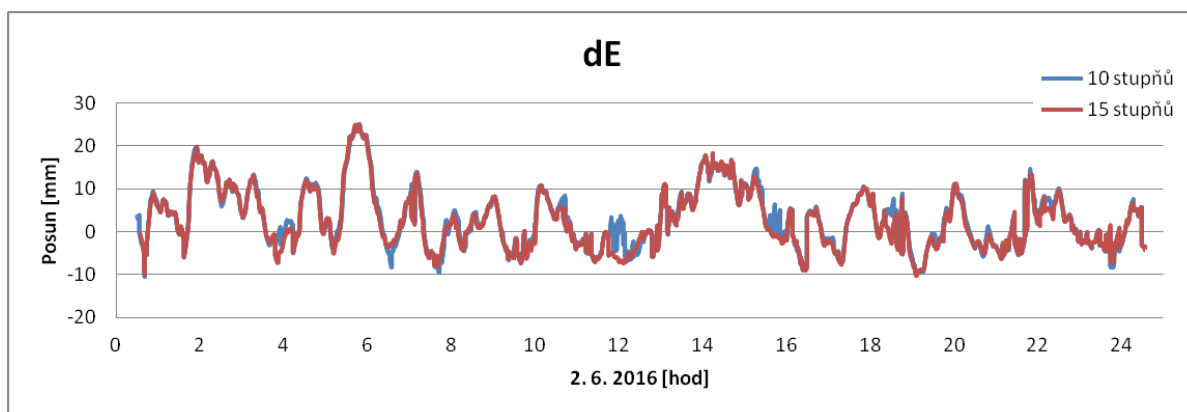
Za tímto účelem byl proveden test na střeše fakulty stavební ČVUT v Praze. Na budově B byl nainstalován GNSS přijímač Leica s anténou Leica AX1202 a spuštěn příjem dat. Jako referenční stanice byla použita stanice CPRG ze sítě permanentních stanic GNSS České Republiky CZEPOS, aby byly vypočteny přesné souřadnice antény Leica AX1202. Následně jsme z této antény udělali referenční stanici pro náš experiment. Testované antény byly nainstalovány na střeše budovy D. Počítaný vektor mezi takto umístěnými anténami měl přibližnou délkou 106 m a vystihoval tak lépe situaci na dole Bílina, než kdyby jako referenční stanice byla použita stanice CPRG z CZEPOSU s vektorem o přibližné délce 5,5 km. Pro výpočet výsledných posunů v experimentu byl použit pouze program *RTNet*, který jsme spouštěli v různých režimech, abychom zjistili, který režim je nejvhodnější pro měření na dole Bílina.

4.1 Přijímač U-blox s anténou U-blox

Při prvním testu na střeše D byl nainstalován přijímač U-blox s anténou U-blox. Tato anténa je také jednofrekvenční o základní kvalitě a dobře tak vystihuje anténu Novatel umístěnou na dole Bílina. Za stejné časové období byly pro přijímači U-blox spuštěny dva *RTNety*. Jeden s nastavením sklonu elevační masky na 10° a druhý na 15° . Bylo to z toho důvodu, zda u přijatých signálů z družic nízko nad obzorem nedochází k multipath a nejsou tak ovlivněny výsledky. Z grafů je patrné, že nastavení elevační masky nemá vliv na přesnost výsledků. Porovnání elevační masky o hodnotě 10° a 15° jsou v následujících grafech.

Test antény U-blox, porovnání sklonu elevační masky 10° x 15°





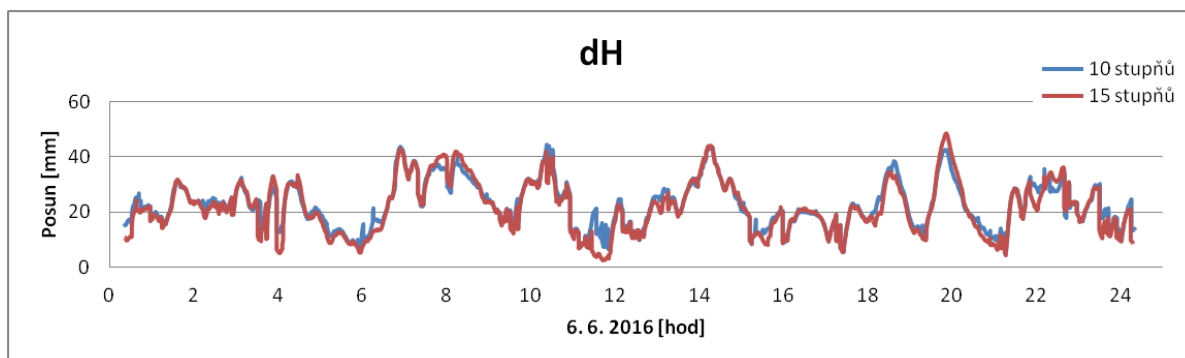
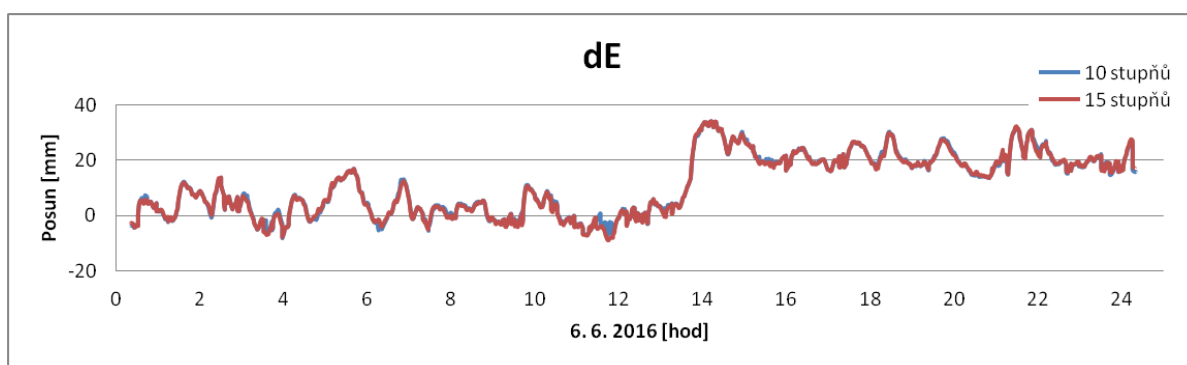
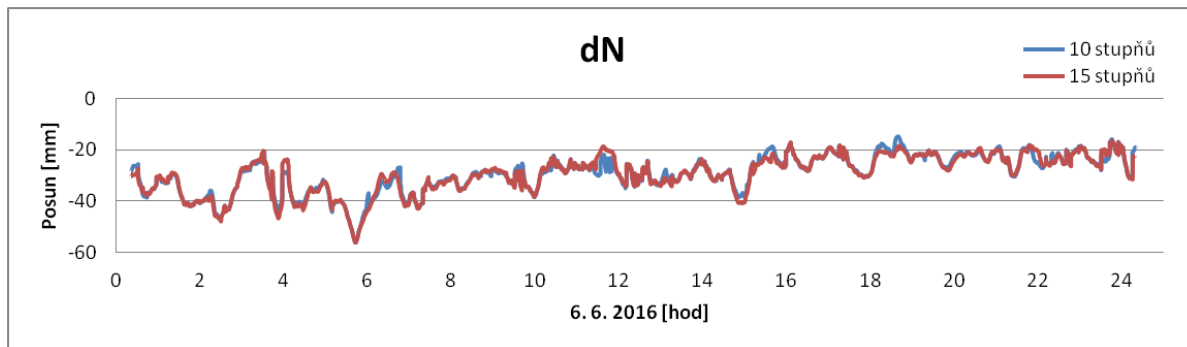
Obrázek 26 - Test antény U-blox, porovnání sklonu elevační masky 10° a 15°

4.2 Přijímač U-blox s anténou Leica

Z předchozího testu vyšlo najevo, že nastavení sklonu elevační masky u antény U-blox nemá vliv na výsledky posunů. Proto byla vyměněna anténa U-blox za geodetickou anténu Leica AX1202 GG a byl spuštěn test ve stejném časovém období. Sklon elevační masky byl opět nastaven na 10° a na 15°. Předpoklad byl takový, že pokud nainstalujeme přesnější anténu, dostaneme přesnější data. Avšak výsledky byly srovnatelné s předchozím testem.

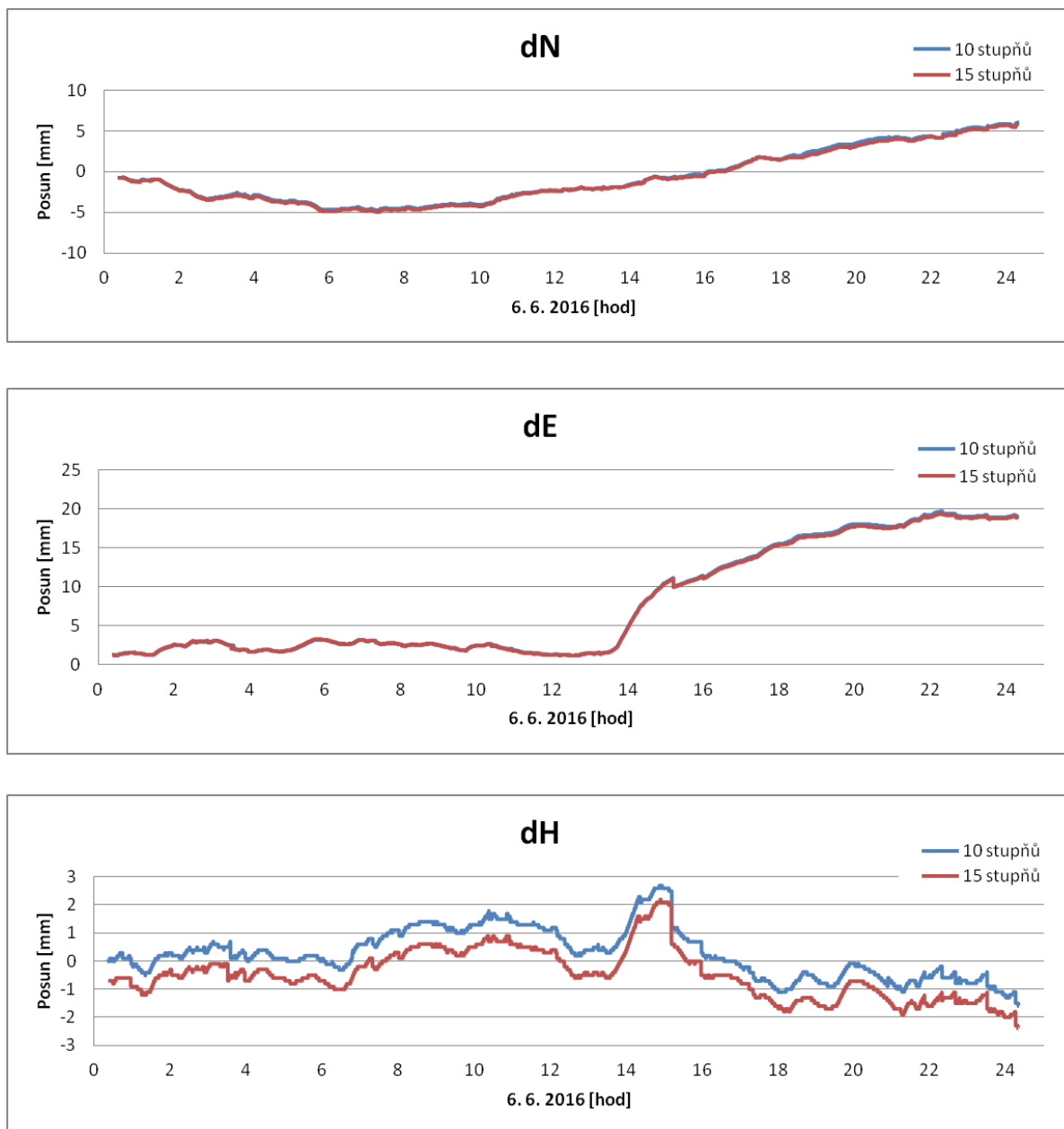
Byly proto spuštěny testy s různě nastaveným bílým šumem na hodnoty 36 mm/hod a 0,72 mm/hod. Nastala však obava, že dojde-li opravdu k posunu bodu, nemusel by se na měřených posunech s hodnotou bílého šumu 0,72 mm/hod projevit. Proto při tomto testu byl proveden posun s anténou Leica AX1202 GG ve směru východ/západ. Na následujících grafem je vidět test s přijímačem U-blox a anténou Leica opět s porovnáním elevační masky 10° a 15° s nastavením bílého šumu na hodnotu 36 mm/hod. Na dalším grafu je nastavení bílého šumu na hodnotu 0,72 mm/hod. Oba tyto testy proběhly současně a lze pozorovat vývoj posunu.

Test antény Leica, porovnání sklonu elevační masky 10° x 15° s bílým šumem 36 mm/hod



Obrázek 27 - Test antény Leica, porovnání sklonu elevační masky 10° a 15° s bílým šumem 36 mm/hod

Test antény Leica, porovnání elevační masky $10^\circ \times 15^\circ$ s bílým šumem $0,72 \text{ mm/hod}$



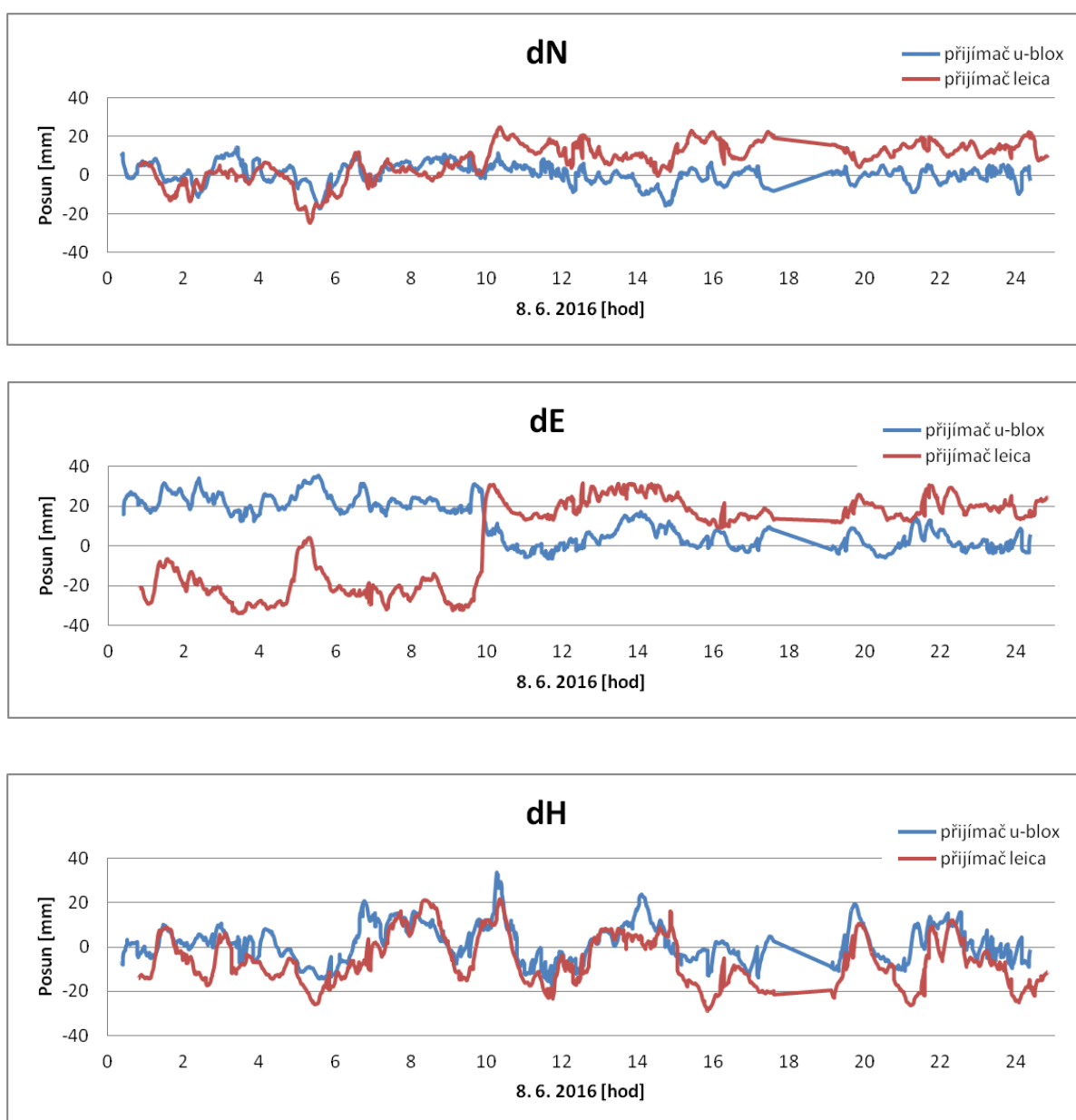
Obrázek 28 - Test antény Leica, porovnání sklonu elevační masky 10° a 15° s bílým šumem $0,72 \text{ mm/hod}$

Na grafu dE s bílým šumem nastaveným na hodnotu 36 mm/hod je vidět, že kolem čtrnácté hodiny nastal posun zhruba o 2 cm. Na grafu dE s bílým šumem nastaveným na hodnotu $0,72 \text{ mm/hod}$ je posun také patrný s tím rozdílem, že posun trvá několik hodin. Z toho plyne, že nevíme, zda se svah neustále posouvá, nebo došlo ke skokovému posunu. Kdyby se však svah opravdu pohyboval rychlostí několika centimetrů za hodinu, mohlo by dojít ke zřícení svahu dřív, než by náš systém vyslal varovné signály. Proto metodu s nastavením bílého šumu na $0,72 \text{ mm/hod}$ dále nepoužíváme.

4.3 Přijímač Leica s anténou Leica

Při našem posledním testu se porovnávaly výsledky z U-blox přijímače s anténou Leica AX1202 GG s přijímačem Leica GRX1200+ GNSS s anténou AX1203+ GNSS. Oba dva testy probíhaly za stejné časové období, kdy obě dvě antény byly od sebe vzdáleny přibližně 30 cm. Na grafu dE je vidět, že u obou přijímačů nastal kolem desáté hodiny posun. U přijímače U-blox nastal posun ve směru západ zhruba o dva centimetry, zatímco u přijímače Leica GRX1200+ GNSS nastal posun ve směru východ zhruba o čtyři centimetry.

Porovnání přijímače U-blox s přijímačem Leica GRX1200+ GNSS



Obrázek 29 - Porovnání přijímače U-blox s přijímačem Leica GRX1200+ GNSS

4.4 Zhodnocení výsledků testování

V rámci tohoto testování jsme chtěli porovnat výsledky z nízkonákladové soupravy U-blox s vysoce přesnou geodetickou soupravou od firmy Leica. Nejprve byly porovnány sklony elevační masky u soupravy U-blox. Sklon elevační masky byl nastaven na 10° a na 15° , kvůli tomu zda u přijatých signálů z družic nízko nad obzorem nedochází k multipath a nevzniká tak zkreslování výsledků. V obou dvou případech se však výsledné posuny pohybují v rozmezí ± 15 mm.

Při dalším experimentu se testoval vliv nastavení bílého šumu u přijímače U-blox s anténou Leica AX1202 GG. Při jednom testu byla hodnota bílého šumu nastavena na 36 mm/hod a druhá na 0,72 mm/hod. Při hodnotě bílého šumu na 0,72 mm/hod se výsledné posuny pohybovaly v rozmezí ± 2 mm, ale nastala obava, že pokud opravdu dojde k posunu bodu, tak při tomto nastavení bílého šumu nebude posun včas patrný. Tato domněnka se i potvrdila a tak další použití bílého šumu s hodnotou 0,72 mm/hod se již nepoužilo.

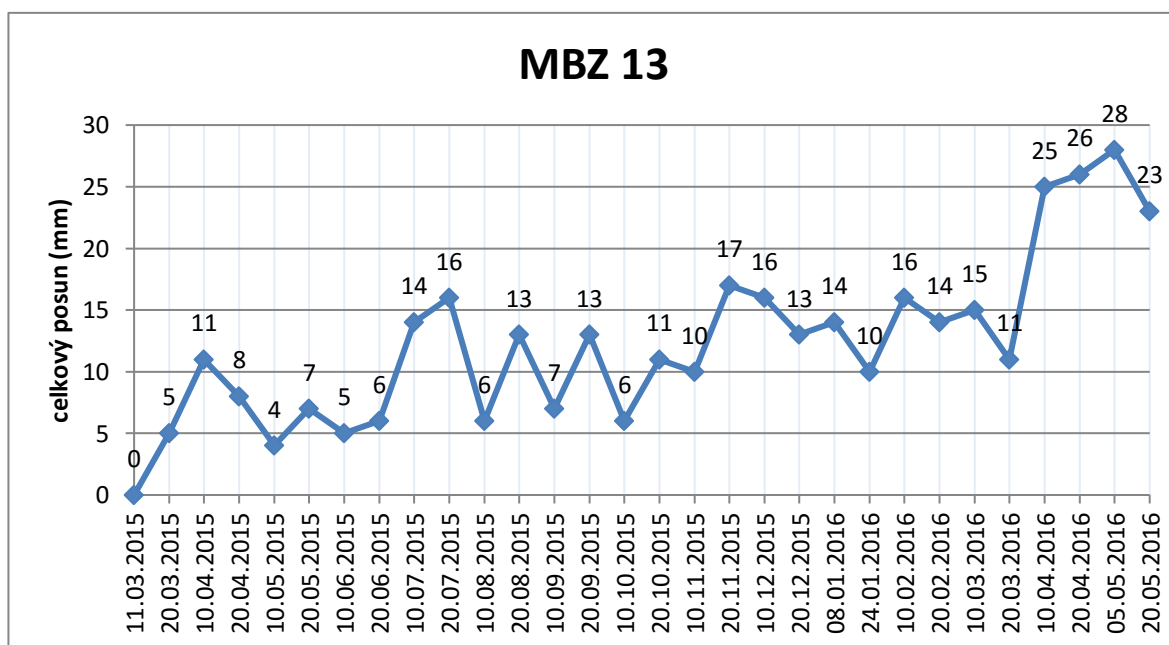
Při posledním testu se porovnával přijímač U-blox s anténou AX1202 GG s přijímačem Leica GRX1200+ GNSS s anténou AX1203+ GNSS. Domnívali jsme se, že při použití vysoce přesné geodetické soupravy, obdržíme přesnější data, než ze soupravy s nízkonákladovým přijímačem od firmy U-blox. Z grafů tohoto testu je však patrné, že i výsledné posuny měřené soupravou od firmy Leica nabývají hodnot v rozmezí ± 15 mm. Tyto špatné výsledky mohl způsobit program *RTNet*, který byl pro tento experiment modifikován, ale nebyl porovnán s ověřenou výpočetní technikou.

5 Porovnání metody současného měření posunů v dole Bílina se systémem GNSS

Naše zařízení, kterým se osazuje pozorovaný bod je umístěno v blízkosti pozorovaného bodu MBZ 13, který je v současné době monitorován totální stanicí TM30. Bod MBZ 13 je osazen sledovacím hranolem a každou hodinu na něho měří totální stanice TM30 horizontální a vertikální úhel a šikmou délku. Tento bod je monitorován již přes rok. V následujícím grafu je vidět celkový posun pozorovaného bodu MBZ 13 od 11. 3. 2015. Pro zobrazení grafu jsou vybrána data zhruba po deseti až dvaceti dnech. Z grafu je patrné, že pozorovaný bod se za celý rok posunul o zhruba 30 mm a můžeme prohlásit, že svah není stabilní. [12]

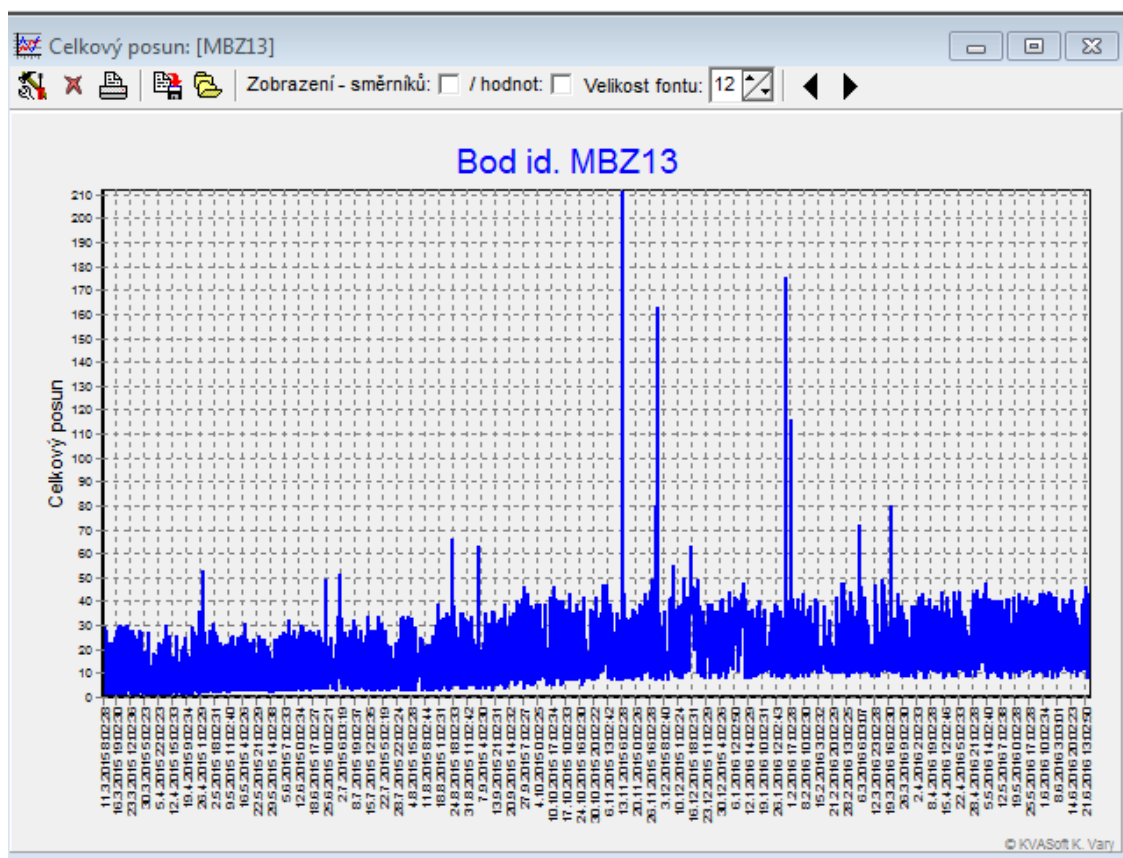


Obrázek 30 - Bod MBZ 13

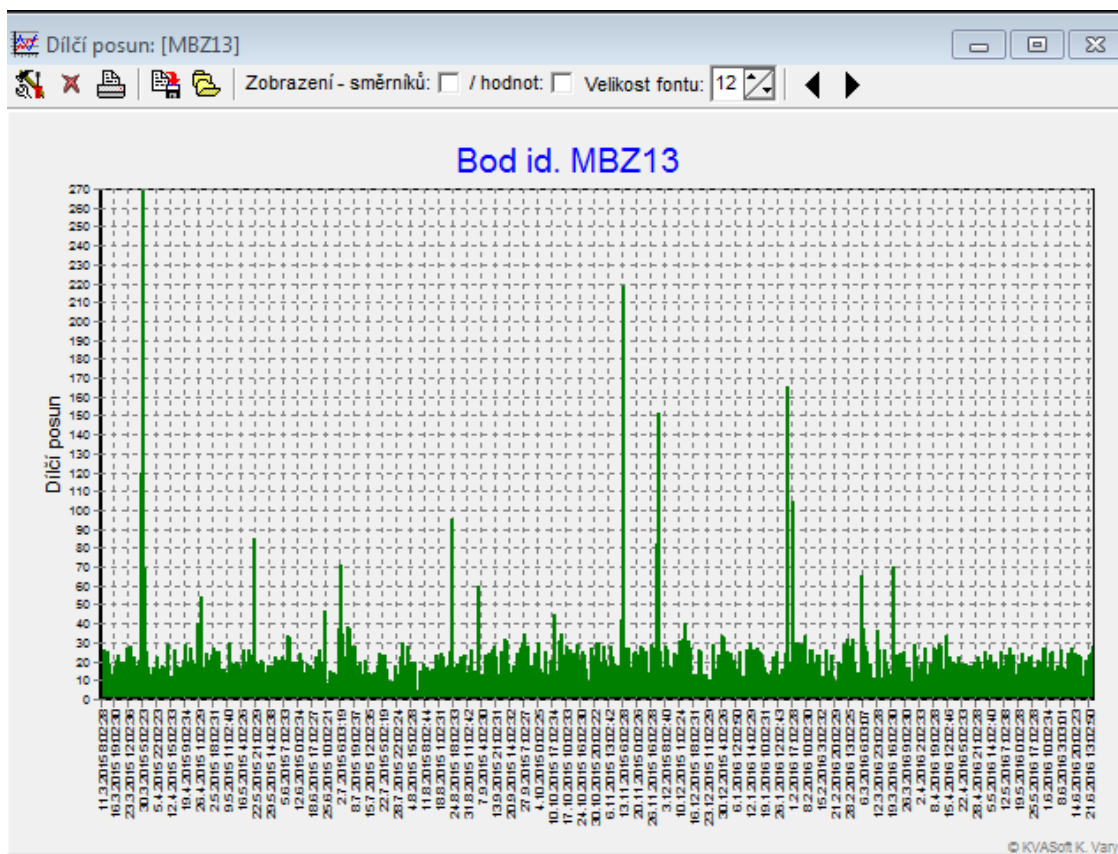


Obrázek 31 - Celkový posun pozorovaného bodu MBZ 13 [12]

Na dalších grafech je zobrazen celkový a dílčí posun bodu MBZ 13 bez vyselektovaných bodů v průběhu celé doby měření. V celkovém posunu je znázorněn posun oproti první etapě měření, zatímco v dílčím posunu jsou znázorněny posuny oproti předchozí etapě měření. Naměřené hodnoty posunů, které vybočují z průměrných hodnot, jsou hrubé chyby měření, které vznikly v důsledku špatné viditelnosti na pozorované body. Tyto hrubé chyby měření totální stanice TM30 jsou ručně odstraněny v programu GeoMoS Monitor.



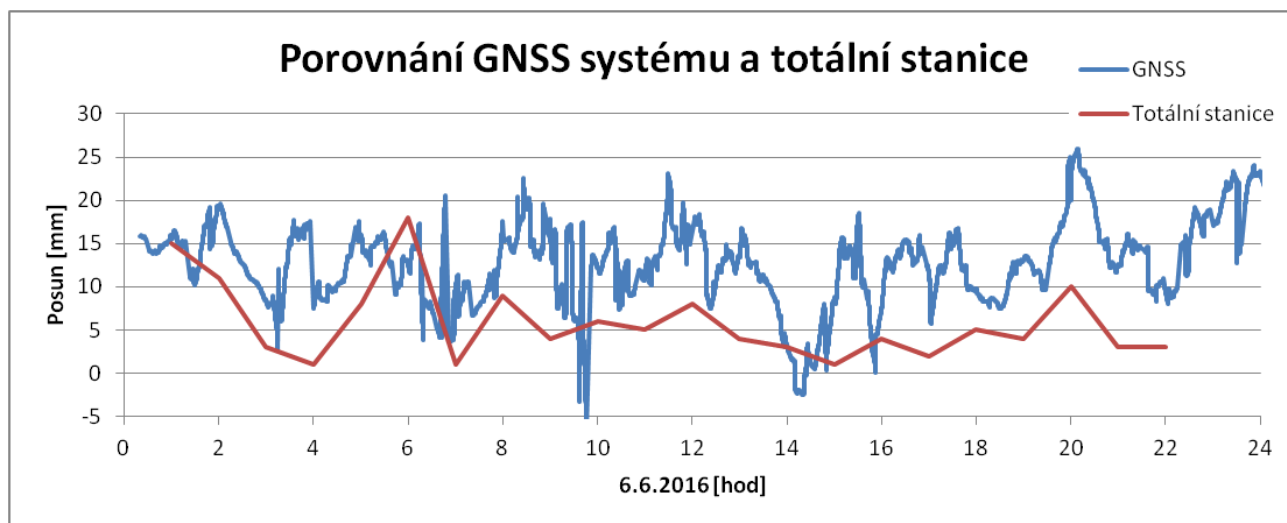
Obrázek 32 - Celkový posun bodu MBZ 13 bez vyselektovaných bodů [12]



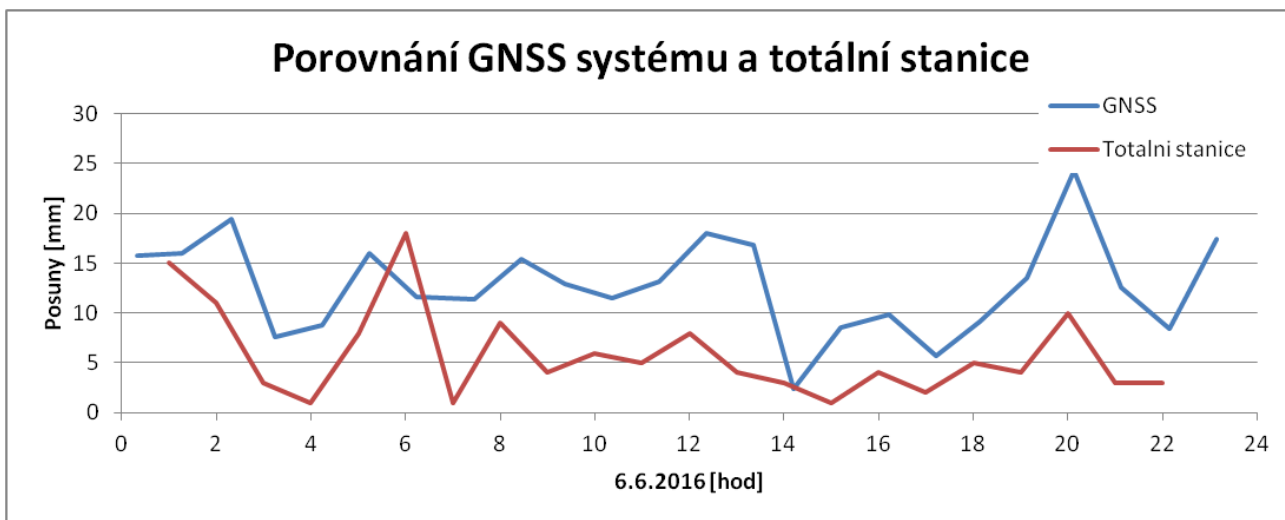
Obrázek 33 - Dílčí posun bodu MBZ 13 bez vyselektovaných bodů [12]

5.1 Porovnání výsledků obou metod

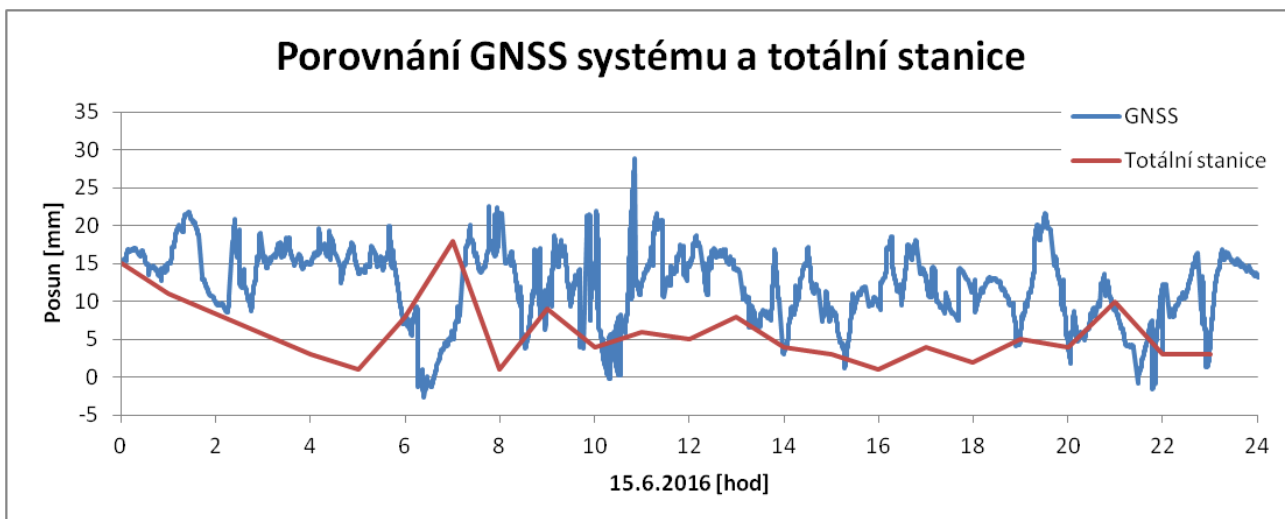
Na následujících grafech jsou porovnány naměřené hodnoty posunů z totální stanice TM30 a GNSS systému v průběhu tří dnů. Měření posunů bylo provedeno za stejné časové období. V druhém grafu je vždy znázorněn stejný graf, ale z GNSS systému jsou vybrány měřené posuny ve stejný čas, kdy měření prováděla i totální stanice.



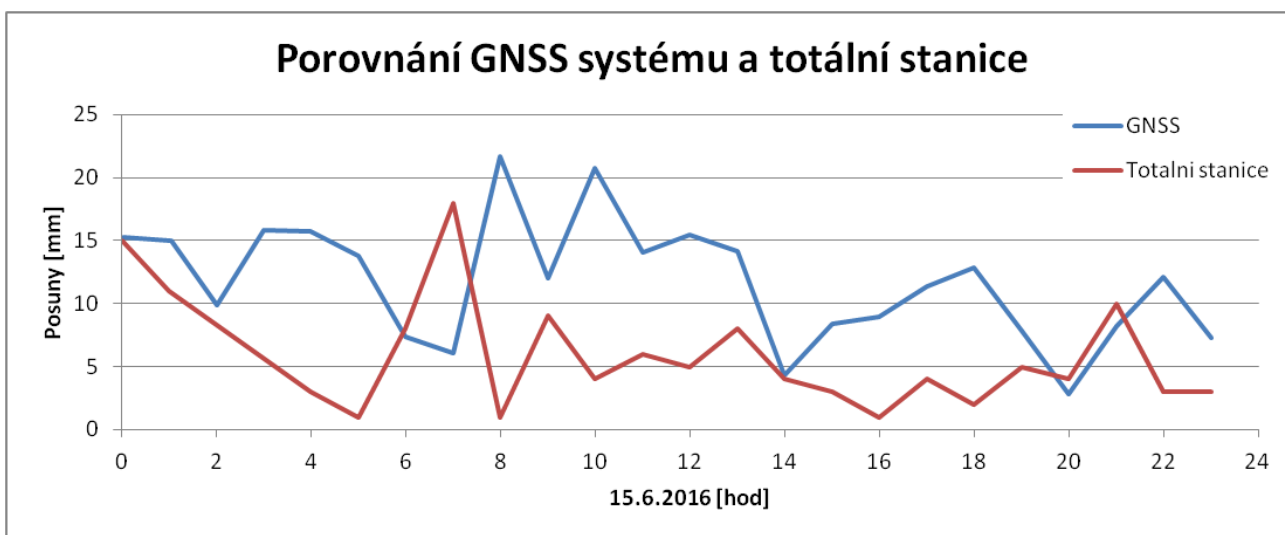
Obrázek 34 - Porovnání GNSS systému a totální stanice 6.6.2016



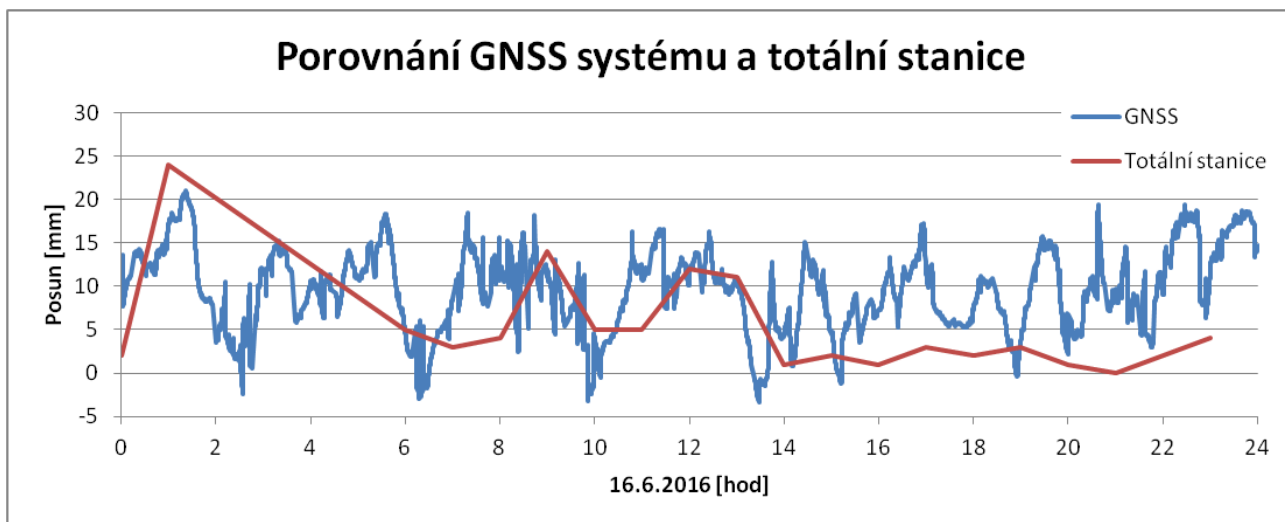
Obrázek 35 - Porování GNSS systému a totální stanice 6.6.2016 (vyselektované měření)



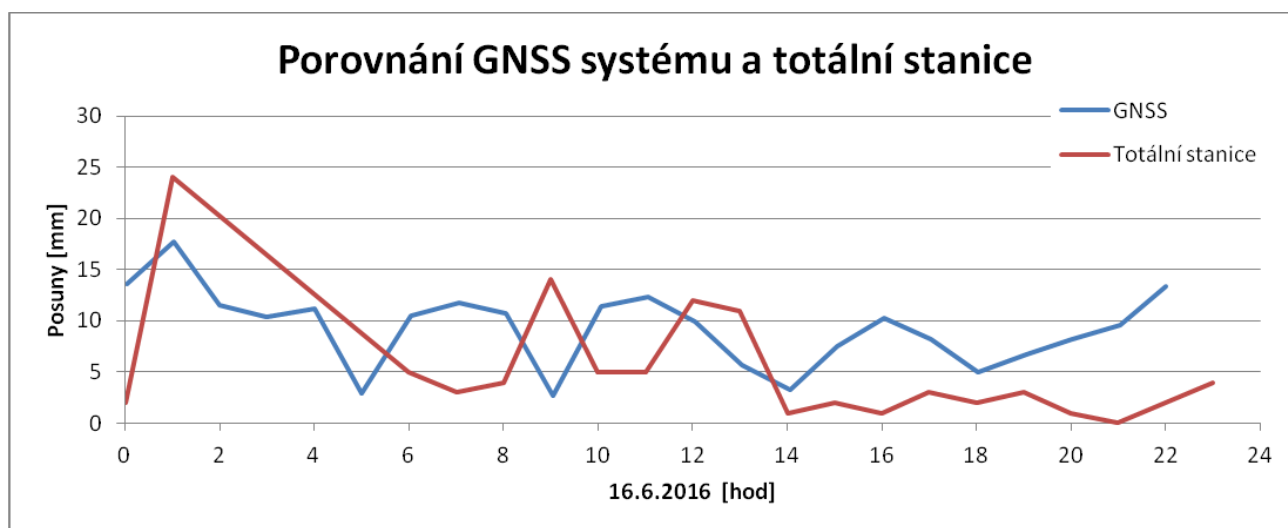
Obrázek 36 - Porovnání GNSS systému a totální stanice 15.6.2016



Obrázek 37 - Porování GNSS systému a totální stanice 15.6.2016 (vyselektované měření)



Obrázek 38 - Porovnání GNSS systému a totální stanice 16.6.2016



Obrázek 39 - Porovnání GNSS systému a totální stanice 16.6.2016 (vyselektované měření)

Z grafů je patrné, že totální stanice TM30 měří na bodech posun ± 10 mm, což odpovídá její přesnosti. Na základě předchozích grafů lze prohlásit, že přesnost systému GNSS je srovnatelná s přesností systému totální stanice Leica TM30.

5.2 Ekonomické porovnání obou metod

V této kapitole se budeme zabývat porovnáním metod z ekonomického hlediska, protože se snažíme o vývoj ekonomicky efektivní systém. Do našeho finančního porovnání nezapočítáváme osazení pozorovaného bodu zařízením, neboť tato částka je pro obě dvě metody stejná. Pro metodu měření posunů pomocí totální stanice započítáváme instalaci pozorovací stanice Citron, i když ji momentálně pro náš systém také používáme. Naše zařízení na pozorovací stanici Citron však lze instalovat v každé budově v blízkosti pozorovaných bodů s přístupem k internetu. V následujících tabulkách jsou obě metody porovnány po finanční stránce.

Ocenění systému GNSS

| Zařízení na pozor. stanici Citron | | Zařízení na pozor. bodě | |
|-----------------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| Zařízení | Kč | Zařízení | Kč |
| X-Bee | 3 000 | Sloupek | 4 000 |
| GNSS souprava | 20 000 | Solární panel | 5 000 |
| Raspberry Pi | 1 000 | GNSS souprava | 20 000 |
| | | Arduino Uno | 700 |
| | | X-Bee | 3 000 |
| | | Senzory | 1 000 |
| Celkem | 24 000 | | 33 700 |

Tabulka 5 - Ocenění systému GNSS

Ocenění systému s totální stanicí

| Zařízení na pozor. stanici Citron | | Zařízení na pozor. bodě | |
|-----------------------------------|------------------|-------------------------|----------------------|
| Zařízení | Kč | Zařízení | Kč |
| Totální stanice | 2 762 000 | Hranol | 2 000 - 7 000 |
| Staince Citron | 631 000 | | |
| Celkem | 3 393 000 | | 2 000 - 7 000 |

Tabulka 6 - Ocenění systému s totální stanicí

Sledovací hranoly pro měření posunů totální stanicí se liší v ceně podle toho, zda jde o malé hranoly na krátkou vzdálenost (2 000 Kč), nebo o velké hranoly na velkou vzdálenost (7 000 Kč). Z tabulek č 5. a 6. je patrné, že zařízení na pozorovaném bodě pro systém GNSS je o 26 700 Kč až 31 700 Kč dražší, než sledovací hranol pro totální stanici. Proto v následující tabulce porovnáme, při jakém počtu pozorovaných bodů, se naše zařízení po finanční stránce ještě vyplatí. Pro výpočet jsme použili vždy půlku hranolů za 2 000 Kč a druhou půlku za 7 000 Kč. Při použití lichého počtu hranolů, počítáme hranol za 2 000 Kč o jeden kus navíc.

Z tabulky č. 7 je patrné, že pokud pro sledování posunů nebudeme potřebovat více než 115 pozorovaných bodů, vyplatí se pro sledování posunů použít systém GNSS. V dole Bílina se v současné době nachází přibližně 100 pozorovaných bodů. Za použití systému GNSS by se ušetřilo přibližně 449 000 Kč.

| Počet pozorovaných bodů | GNSS systém | Totální stanice | Rozdíl ceny |
|-------------------------|--------------|-----------------|--------------|
| 1 | 57 700 Kč | 3 395 000 Kč | 3 337 300 Kč |
| 10 | 361 000 Kč | 3 438 000 Kč | 3 077 000 Kč |
| 100 | 3 394 000 Kč | 3 843 000 Kč | 449 000 Kč |
| 115 | 3 899 500 Kč | 3 908 000 Kč | 8 500 Kč |
| 116 | 3 933 200 Kč | 3 915 000 Kč | -18 200 Kč |

Tabulka 7 - Porovnání ceny obou systémů v závislosti na počtu pozorovaných bodů

6 Závěr

V rámci této diplomové práce byla snaha o vývoj ekonomicky efektivního a spolehlivého systému pro měření svahových a konstrukčních deformací pomocí GNSS s vysokou přesností v reálném čase. Vyvinutý systém pro měření posunů pomocí GNSS, pracuje na principu minimálně dvou nízkonákladových GNSS přijímačů od firmy U-blox, kdy jeden z GNSS přijímačů funguje jako referenční stanice, od které se počítají relativní posuny k GNSS přijímačům na pozorovaných bodech.

Tento nízkonákladový GNSS přijímač byl porovnán s vysoce přesným, geodetickým GNSS přijímačem od firmy Leica. Na základě porovnaných grafů lze říci, že měříme-li permanentně GNSS přijímačem od firmy U-blox metodou RTK, má srovnatelné výsledky s GNSS přijímačem od firmy Leica. Tento test však nelze prohlásit za platný, protože výsledné posuny byly počítány neověřeným výpočetním programem *RTNet*.

Náš GNSS systém byl nainstalován v povrchovém dole Bílina, kde se v současné době měří svahové deformace automatická totální stanice TM30. Výsledné posuny změřené pomocí systému GNSS byly porovnány s měřenými posuny totální stanice TM30. Na základě porovnaných grafů lze říci, že systém GNSS dává srovnatelné výsledky s totální stanicí TM30.

Protože byla snaha o vývoj ekonomicky efektivního systému, byl systém GNSS porovnán se systémem totální stanice i po finanční stránce. Porovnáme-li zařízení na pozorovací stanici Citron (referenční stanice), vychází GNSS systém levněji o zhruba 3,37 milióny Kč levněji. Avšak zařízení na jednom pozorovaném bodě je o zhruba 27 – 32 tisíc Kč dražší. Z toho vychází, že pokud pro sledování svahových deformací budeme potřebovat méně než 116 pozorovaných bodů, je systém GNSS levnější.

V rámci této diplomové práce byl vyvinut ekonomicky efektivní a spolehlivý systém pro měření svahových a konstrukčních deformací pomocí GNSS s vysokou přesností v reálném čase a tím byl splněn stanovený cíl.

Seznam obrázků:

| | |
|--|--------|
| Obr. 1 - Svahové nestability na území ČR. [10]..... | - 8 - |
| Obr. 2 - Povrchový lom Bílina | - 10 - |
| Obr. 3 - Dynamometr..... | - 11 - |
| Obr. 4 - Kotvy..... | - 11 - |
| Obr. 5 - Posuny na pozorovaných bodech v dole Bílina | - 11 - |
| Obr. 6 - Totální stanice Leica TM30 | - 12 - |
| Obr. 7 - Pozorovací stanice Citron | - 12 - |
| Obr. 8 - Základní nastavení v GeoMoSMonitor [12] | - 13 - |
| Obr. 9 - Nastavení parametrů v GeoMoS Monitor [12] | - 13 - |
| Obr. 10 - Schéma systému pro sledování svahových deformací pomocí GNSS..... | - 14 - |
| Obr. 11 - Schéma zařízení na pozorovaném bodě | - 15 - |
| Obr. 12 - GNSS přijímač a krabička obsahující shield..... | - 15 - |
| Obr. 13 - Zařízení na pozorovaném bodě | - 15 - |
| Obr. 14 - Shield (Arduino, radiomodem) | - 15 - |
| Obr. 15 - Graf el. napětí na výstupu ze solárního panelu v závislosti na čase [2]..... | - 16 - |
| Obr. 16 - Graf el. napětí na vstupu do akumulátoru v závislosti na čase [2]..... | - 16 - |
| Obr. 17 - Struktura zprávy [1] | - 18 - |
| Obr. 18 - Schéma pozorovací stanice Citron..... | - 21 - |
| Obr. 19 - Zařízení na pozorovací stanici Citron (zleva: Raspberry Pi, X-Bee, U-blox) - | 21 - |
| Obr. 20 - Rozmístění antén GNSS přijímače a X-Bee na pozorovací stanici Citron | - 21 - |
| Obr. 21 - Schéma výpočetního centra | - 23 - |
| Obr. 22 - Hlavička vstupního souboru pro RTNet | - 24 - |
| Obr. 23 - Webová stránka, záložka GNSS přijímače [2]..... | - 27 - |
| Obr. 24 - Webová stránka, záložka Měření [2] | - 28 - |
| Obr. 25 - Posuny na pozorovaném bodě 1001 v dole Bílina | - 29 - |
| Obr. 26 - Test antény U-blox, porovnání sklonu elevační masky 10° a 15° | - 31 - |
| Obr. 27 - Test antény Leica, porovnání ele. masky 10° a 15° s b. šumem 36 mm/hod . - | 32 - |
| Obr. 28 - Test antény Leica, porovnání ele. masky 10° a 15° s b. šumem 0,72 mm/hod- | 33 - |
| Obr. 29 - Porovnání přijímače U-blox s přijímačem Leica GRX1200+ GNSS | - 34 - |
| Obr. 30 - Bod MBZ 13 | - 36 - |
| Obr. 31 - Celkový posun pozorovaného bodu MBZ 13 [12]..... | - 36 - |
| Obr. 32 - Celkový posun bodu MBZ 13 bez vyselektovaných bodů [12]..... | - 37 - |
| Obr. 33 - Dílčí posun bodu MBZ 13 bez vyselektovaných bodů [12] | - 38 - |
| Obr. 34 - Porovnání GNSS systému a totální stanice 6.6.2016..... | - 38 - |
| Obr. 35 - Porování GNSS systému a totální stanice 6.6.2016 (vyselektované měření) . - | 39 - |
| Obr. 36 - Porovnání GNSS systému a totální stanice 15.6.2016..... | - 39 - |
| Obr. 37 - Porování GNSS systému a totální stanice 15.6.2016 (vyselektované měření) - | 39 - |
| Obr. 38 - Porovnání GNSS systému a totální stanice 16.6.2016..... | - 40 - |
| Obr. 39 - Porování GNSS systému a totální stanice 16.6.2016 (vyselektované měření) - | 40 - |

Citovaná literatura

- [1] 868 RF Module. *Digi*. [Online] [Citace: 02. února 2016.] http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001020_F.pdf.
- [2] Bernardová, Bc. Lucie. GNSS pozorovací systém. [Online] 2016. [Citace: 29. května 2016.] <http://k155-33.fsv.cvut.cz/GNSSNetMonitor/projekt/index.html>.
- [3] C/C++. *BUILDER*. [Online] 4. listopadu 2002. [Citace: 1. červen 2016.] <http://www.builder.cz/rubriky/c/c--/sokety-a-c--156186cz>.
- [4] CO JE TO ARDUINO? *ARDUINO.CZ*. [Online] 2014-2015. [Citace: 25. květen 2016.] <http://arduino.cz/co-je-to-arduino/>.
- [5] Doly Bílina. *Severočeské doly a.s.* [Online] [Citace: 11. května 2016.] <http://www.sdas.cz/aktivity/hornicka-cinnost/doly-bilina.aspx>.
- [6] EVK 7 / EVK 8 / EVK M8. *User Guide*. [Online] [Citace: 25. června 2016.] https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/EVK-7-8-M8-PCBvC-D_UserGuide_%28UBX-14002502%29.pdf.
- [7] EVK M8T Evaluation Kit. *u-blox*. [Online] [Citace: 25. února 2016.] [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/EVK-M8T_UserGuide_\(UBX-14041540\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/EVK-M8T_UserGuide_(UBX-14041540).pdf).
- [8] Leica TM30. *Leica Geosystem*. [Online] [Citace: 25. června 2016.] http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-TM30_77983.htm.
- [9] RTNet. *GPS Solutions*. [Online] [Citace: 17. června 2016.] http://gps-solutions.com/rtnet_software.
- [10] Svahové nestability. *Česká geologická služba*. [Online] [Citace: 15. června 2016.] http://mapy.geology.cz/svahove_nestability/.
- [11] Úvod do MySQL. *MySQL databáze - český manuál*. [Online] [Citace: 14. červen 2016.] <http://www.junext.net/mysql/>.
- [12] Větrovský, Ing. Milan. Současný systém pro sledované posunů na dole Bílina. Bílina : autor neznámý, 2016.