



1918

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TEEDEINSTITUUT

---

Geodeesia õppetool

Jaanus Metsar

RIIKLIK GNSS PÜSIJAAMADE VÕRK, SELLE AEGRIDADE  
KASUTAMINE JÄÄAJAJÄRGSE MAATÕUSU  
TÄPSUSTAMISEL

NATIONAL GNSS REFERENCE STATION NETWORK, USING ITS TIME SERIES FOR  
SPECIFYING POST-GLACIAL LAND UPLIFT

Magistritöö  
ETG 60 LT

Juhendajad:

MSc. Karin Kollo

Prof. Artu Ellmann

Tallinn 2015

## **Kokkuvõte**

Käesolevas magistritöös käsitleti riikliku GNSS püsijaamade võrgu rajamist ja arutati koordinaadid uutele Maa-ameti püsijaamadele. Samuti kasutati GNSS andmete töötamiseks mõeldud programmi Bernese ja selle tulemfaile ning SINEX formaadis andmeid, et koostada aegridasid ja nende graafikuid, mille põhjal saaks hinnata erinevate tasandusmeetodite mõju aegridadele ning nende põhjal täpsustada maakerke suuruseid.

Aastatel 2013-2015 toimus Maa-ameti GNSS püsijaamade võrgu rekonstrueerimine, mille raames rajati 11 uut GNSS püsijaama. Uue seadmestiku püstitamisele eelnesid kontrollmõõtmised ning asukoha visuaalne ülevaatus, et tuvastada võimalikud püsijaama tööd segavad faktorid - horisondi suletus, satelliitide nähtavus, SNR (signaali-müra suhe), mitmeteelisus jne. Püsijaama rajamise protsess koosnes: antennisamba, antenni, vastuvõtja ja seadmekapi montaažist; antenni ja vastuvõtja vaheliste kaablite paigaldusest; internetiühenduse loomisest ja vastuvõtja seadistamisest.

Püsijaamade võrgu uuenemisega kaasnes ka uue tarkvara kasutusele võtmine Maa-ametis. Võrgu haldamiseks kasutatakse Šveitsi ettevõtte Leica tarkvara GNSS Spider, mille abil on võimalik püsijaamade võrgu tööd täielikult Maa-ameti sisevõrgust hallata, samuti lisandus uue tarkvaraga ka võimalus pakkuda RTN teenust. RTN teenuses toimub parandite arvutamine ja edastamine erinevate RTN meetoditega (sh. MAX, VRS, FKP). MAX meetodi puhul kasutab arvutuskeskus vastuvõtja ümbrusest kuue püsijaama andmeid, et arvutada parand. Parand edastatakse vastuvõtjale aga lähima püsijaama suhtes.

Täpseks GNSS andmete töötamiseks on loodud erinevaid tarkvarapakette, millest tuntuimad on näiteks GAMIT, ettevõtete Leica ja Trimble paketid ning ka käesolevas töös kasutatud Bernese GNSS tarkvara. Bernese abil on võimalik lihtsalt automatiseerida mõõtmisandmete töötlust, kasutades selleks Bernese andmetöötlusmootorit BPE. BPE abil on kasutajal võimalik programmile ette anda kindlad kriteeriumid kuidas ja milliseid andmeid see läbi arvutab.

Põhilisteks algandmeteks Bernese andmetöötluses olid RINEX formaadis GNSS püsijaamade 24-tunnised mõõtmisandmed. Andmetöötlusel kasutati kahte erinevat tasandusmeetodit: nn. vaba- ja seotud tasandust. Vabatasanduse puhul olid fikseeritud valitud püsijaamade võrgu

geomeetrilise keskpunkti koordinaadid, seotud tasanduse puhul kasutati aga rangeid veapiire (0.01 mm), mis on Bernese alternatiiv koordinaatide fikseerimisele. Baasjoonte määramisel kasutati OBS-MAX meetodit, mis valis püsijaamades toimunud ühiste mõõtmiste järgi automaatselt parimad baasjooned. Algtundmatute lahendamisel kasutati kvaasi-ionosfääri vaba (QIF) strateegiat ja ionosfäärivaba meetodit  $L_3$ .

Bernese tarkvara kasutati esmalt koordinaatide arvutamiseks 11-le uuele Maa-ameti püsijaamale. Algandmeteks olid mõõtmistulemused 15-st välismaisest ning 20-st Maa-ameti püsijaamast. Kasutades seotud tasanduse meetodit arvutati GPS nädala 1827 keskmine lahendus globaalses IGB08 referentsraamistikus. Seotud lahenduse tulemusi võrreldi Maa-ametis arvatud lahendusega sama GPS nädala kohta. Kahe lahenduse erinevused jäid alla  $\pm 5$  mm.

GNSS püsijaamade koordinaatide varieerumist kajastavate aegridade koostamisel kasutati 24 GNSS püsijaama (9 vanemat püsijaama Eestist + 15 referentsjaama ümbritsevatest riikidest) mõõtmisandmed. Aegread koostati Bernese tarkvaraga aga vaid 9 vanema Eesti püsijaama kohta, 2014. a nelja kalenderkuu (jaanuar, aprill, juuli ja oktoober) tulemustest. Jääajajärgset maatõusu uurida võimaldavate seitsmeaastaste GNSS aegridade koostamiseks piirduti vaid viie Maa-ameti kauaaegseima püsijaama (AUDR, KURE, SUR4, TOIL ja TOR2) nädalaste SINEX formaadis tulemustega. Bernese tulemuste põhjal koostati aegread topotsentriliste koordinaatide *NEU* muutuste kohta igas kalenderkuus ja ka vahemikus jaanuar-oktoober, kasutades nii vaba- kui ka seotud tasanduse tulemusi. Tulemuste täpsuse hindamiseks kasutati keskmist ruutviga  $m$ . SINEX failidest koostati aegread geodeetilise kõrguse  $h$  muutuse määramiseks perioodidel jaanuar-oktoober (2014) ning 2008-2015. SINEX failide põhjal tehtud aegridadele lineaarse trendijoonet lisamisega määrati maakerke suurus antud perioodidel. Tulemuste täpsuse hindamiseks kasutati standardhälvet  $\sigma$ .

Vabatasanduse tulemuste põhjal võib öelda, et koordinaatidest on kõige ebastabiilsem kõrgus  $U$ . Võrreldes põhja ja ida suunaliste muutustega võib kõrguse keskmine muutus olla neist ligikaudu 4 korda suurem. Võrreldes erinevate püsijaamade stabiilsust ühe kalenderkuu jooksul, siis on näha, et keskmise suhtes muutuvad  $N$  ja  $E \pm 0.5$  mm,  $U$  aga  $\pm 1.5$  mm, kui võrrelda aga püsijaamade stabiilsust erinevate kalenderkuude suhtes, on muutused märksa suuremad. Näiteks jaanuaris oli  $U$  maksimaalne muutus 15.06 mm, aprillis aga ainult 6.20 mm, ehk ligikaudu 2.5 korda väiksem. Sellised suured erinevused kalenderkuude lõikes on ilmselt tingitud ionosfääris toimuvatest hooajalistest aga ka sündmuspõhistest muutustest.

Näiteks 2014. aasta jaanuaris toimus Päikesel väga võimas gaasi ja magnetvälja purse (CME), mis oli suunatud otse Maale ja tekitas ionosfääris suuri muutusi, mistõttu ka aegreast toimus sellel perioodil väga järsk muutus. Vaba- ja seotud tasanduse võrdluste tulemustest nähtub, et seotud tasanduses on märkimisväärselt vähenenud  $U$  koordinaadi muutus.  $N$  ja  $E$  koordinaatide muutused vähenesid keskmiselt umbes 15-20%,  $U$  aga keskmiselt umbes 60%, seetõttu tuleks arvutustel kindlasti eelistada seotud tasanduse lahendust.

Maakerke tulemusi analüüsides peab ütlema, et kuigi aastane aegrida annab küll umbkaudse ülevaate maakerke väärtustest, jääb aastane periood ikkagi liiga lühikeseks, et saada usaldusväärseid tulemusi. GNSS aegridadest on võimalik saada üpriski täpne absoluutne maatõus, ning kui võtta arvesse ka geoidi tõusu mõju (6% vertikaalliikumisest), siis saab ka geodeetilisi kõrgusi kasutades väga head tulemused - keskmine erinevus Oja jt. (2014) tulemustest vaid 0.25 mm/a. Seitsmeaastaste aegridade tulemuste keskmiseks standardhälbeks hinnati  $\pm 0.46$  mm/a ja viie püsijaama seitsmeaastaste aegridade järgi on seega keskmine maatõus Eestis  $3.0 \pm 0.5$  mm/a (arvestades ka geoidi tõusuga). Väike erinevus Oja jt. (2014) tulemustest on tingitud arvatavasti erinevatest referentsraamistikest, mis võivad tekitada süstemaatilisi vigu; laamtektoonikast ja aegridade analüüsi meetodikast.

## Summary

In this MSc thesis issues of establishing a national GNSS reference station network were reviewed. Also coordinates of the Land Board's new reference stations were calculated with Bernese GNSS software. Different data adjustment methods were compared for obtaining the most optimum results. Thereafter the SINEX format files were used for compiling GNSS time series to be used for specifying post-glacial land uplift values in Estonia.

In the years 2013-2015 Land Board's CORS network was reconstructed and 11 new sites were established in addition to 9 existing ones. Preceding the reconstruction in situ test measurements and a visual check of the new sites were conducted to identify possible shortages of selected site locations such as presence of obstacles, satellite visibility, SNR (*Signal Noise Ratio*), signal multipath etc. The main process of establishing a reference station consisted of - antenna mounting construction, receiver and GNSS equipment locker assembly; installation of cables between receiver and antenna; establishing an internet connection and configuring the GNSS receiver.

In addition to the hardware also new CORS network software, the Leica GNSS Spider, was also introduced. With the new software the possibility to offer GNSS real-time network services (RTN) was also added. In the RTN approach the corrections are calculated and distributed to rovers using different RTN formats (e.g. MAX, VRS, FKP). When using MAX (*Master Auxilliary concept*) the control center uses data from 6 reference stations that are closest to the rover to calculate the corrections for the rover's position. Corrections however are given to the rover with respect to the closest GNSS reference station.

For calculating precise GNSS data many programs are available, for example GAMIT and also commercial software from Leica or Trimble. Bernese GNSS processing software version 5.2 was used for the present research. Bernese allows to automate the data processing workflow by using Bernese Processing Engine (BPE). The user can define the BPE programm which data, when and how it should be processed.

The input data for the Bernese calculations consisted of 24-hour RINEX format observation files from participating GNSS reference stations. Two different adjustment methods were used - a so called "free" solution and a "fixed" solution. With the free solution the coordinates

of the geometric center of the selected station network were fixed, for the fixed solution however strict constraints (0.01 mm) were used instead. Baselines were selected automatically by using the Bernese OBS-MAX method that chose the best baselines depending on similar observations in reference stations. For ambiguity determination quasi-ionsphere free (QIF) strategy and ionosphere free  $L_3$  solution were used.

Bernese software was first used to calculate coordinates to the 11 new Land Board's GNSS CORS. Raw GNSS data from 15 neighbouring countries and 20 Estonian reference stations were used. Using the fixed adjustment solution coordinates in global reference frame IGB08 for GPS week 1827 were calculated. The fixed solution was then compared with the same week's solution computed in the Land Board. The difference between those two solutions was less than  $\pm 5$  mm.

In order to compile time series for the time dependant variations in reference station coordinates, GNSS observation data from 24 reference stations (9 older CORS from Estonia + 15 from neighbouring countries) was used. Time series were created with Bernese for only 9 older Estonian reference stations for four months in 2014 (January, April, July and October). In addition seven years long time series were compiled by using weekly SINEX files from five oldest Estonian reference stations (AUDR, KURE, SUR4, TOIL and TOR2). These were used for determining and analyzing post-glacial land uplift velocities in Estonia. Bernese output files from free and fixed solutions were used to create time series about changes in geocentric coordinates  $NEU$  for each selected month and also for the period from January to October. The accuracy of the results was assessed using root mean squared errors of  $NEU$  changes. SINEX files were used to create time series about changes in geodetic height  $h$  of participating CORS for periods January to October (2014) and also for the entire seven year long period (2008 to 2015). With adding a linear trendline to the SINEX based time series land uplift was calculated. The accuracy of geodetic height changes was assessed using standard deviation  $\sigma$ .

The results from free adjustment showed that the most unstable coordinate is  $U$ . When compared to  $N$  and  $E$  the average difference in  $U$  can be as much as 4 times larger. When comparing the stability of different reference stations the difference from average in  $N$  and  $E$  is about  $\pm 0.5$  mm, for  $U$  however the difference is about  $\pm 1.5$  mm. When comparing different months the stability is much worse, for example in January the total change in coordinate  $U$  was 15.06 mm but in April it was only 6.20 mm, so about 2.5 times smaller.

These quite remarkable variations in-between monthly solutions are most likely caused by seasonal conditions and astronomical events disturbing the state of the ionosphere. For example in January 2014 there was a huge Coronal Mass Ejection or CME (a burst of gas and magnetic field) on the Sun that was pointed directly towards Earth and it caused very extreme changes in ionosphere thus also affecting the quality of the GNSS data processing. Notably, the fixed adjustment method provided a more realistic change in  $U$  coordinate than that of the free adjustment one. Particularly in average the changes in  $N$  and  $E$  coordinates decreased about 15-20%, changes in  $U$  coordinate however decreased as much as 60%, thus the "fixed" solution should be used for calculating GNSS data.

Analyzing the results of land uplift it can be noted that although a year long time series gives some idea of land uplift it is still not long enough of a period of time to give rigorous results. Using longer time series it would be possible to achieve quite accurate absolute land uplift results. If geoid uplift (6% of vertical movement) is also accounted for the results may become even better. For instance differences from Oja et. al. (2014) results were only 0.25 mm/year. The standard deviation of seven years long time series results was  $\pm 0.46$  mm/year and thus seven years long time series from five Estonian GNSS reference stations give an average land uplift of  $3.0 \pm 0.5$  mm/year. Most likely this difference from Oja et. al. (2014) is a result of using different reference frames that cause a systematic error in velocity estimation, also tectonic plate movement and different methods of analyzing data probably had an effect on the final results.