

# Staatilised GNSS-mõõtmised Eesti geodeetilise võrgu I klassi punktidel

Jaanus Metsar, Karin Kollo, Artu Ellmann, Priit Pihlak, Andres Rüdja – Maa-amet, jaanus.metsar@maaamet.ee

Käesolev artikkel on lühendatud versioon Jaanus Metsari, Karin Kollo, Artu Ellmanni, Andres Rüdja ja Priit Pihlaku poolt kirjutatud ingliskeelsest artiklist „Multi-Epoch GNSS Campaigns of the National Geodetic Network in Estonia“, mis avaldati 2019. aasta suvel Soome teadusajakirjas *Geophysica*.

## Sissejuhatus

EUREF-BAL92 GPS-mõõtmiskampaania tulemusena saadi esimesed ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*) referentssüsteemi koordinaadid Balti riikides. 1994. aastal viidi Eestis läbi uued GPS-mõõtmised ning EUREF-BAL92 tulemustest leiti süstemaatilisi vigu (Rüdja, 2004). Seetõttu käivitati juba järgmisel aastal projekt, et rajada uus riiklik geodeetiline võrk, mille I klassi kuulub kokku 13 geodeetilist punkti, millest 1 on Eesti esimene riiklik GNSS-püsijaam (Suurupi). Uue geodeetilise võrgu I klassi punktide mõõtmine viidi läbi 1997. aasta juulikuus (epohh 1997.56) ja EUREFi 1999. aasta sümposiumi otsusena (EUREF, 1999) vastavad nende mõõtmiste tulemused EUREFi B-täpsusklassile (1 cm mõõtmiste epohhil). Saadud koordinaadid on ametlikuks ETRS89 realiseerimiseks Eestis ja aluseks meie riiklikule geodeetilisele referentssüsteemile EUREF-EST97.

Aastatel 2008 ja 2017 viidi riigi geodeetilise võrgu I klassi punktidel läbi kordusmõõtmised, mis kaasasid riiklike GNSS-püsijaamu. GNSS-püsijaamade kaasamise eesmärgiks oli nende sidumine EUREF-EST97 süsteemiga (Metsar jt, 2018). 2018. aastal arvatati kõigi kolme eelnevalt mõõdetud kampaania (1997, 2008 ja 2017) andmed läbi uusimas rahvusvahelises referentsraamistikus ITRF 2014 (*International Terrestrial Reference Frame*), et saada parimad võimalikud tulemused I klassi punktide koordinaatide võrdlemiseks. Saadud tulemuste alusel hinnati I klassi punktide liikumiskiirusi ning võrreldi neid regionaalsete kiirusmudelitega.

## Geodeetilise võrgu I klass ja selle kordusmõõtmised

Riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktid rajati ja mõõdeti aastatel 1996–1997. Punktide koordinaadid määrati 9 välismaise IGSi (International GNSS Service) võrku kuuluva GNSS-püsijaama suhtes (vt joonis 1). Mõõtmisteks kasutati Ashtech Z-12 GPS vastuvõtjaid ja Choke Ring antenni ning mõõtmiste aeg varieerus olenevalt punktist 72–216 tunnini. Arvutused viidi läbi ITRF96 referentsraamistikus, kasutades Bernese GPS tarkvara versiooni 4.0. Lõplikud koordinaadid transformeeriti ETRS89 (ETRF96) süsteemi vastavalt Boucher ja Altamimi (1998) memole. Mõõtmised ja arvutused on detailselt kirjeldatud tehnilistes aruannetes: Rüdja jt (1998) ja Rüdja (2004).

Kordusmõõtmiste eesmärgiks oli: esiteks, kindlustada ETRS89 realiseerimise Eestis, teiseks, määrata ETRS89 koordinaatide ajalised muutused Eestis ja kolmandaks, ühendada riiklikud GNSS-püsijaamad (ESTPOS) Eesti geodeetilise süsteemiga. Kordusmõõtmised viidi läbi võimalikult sarnaselt esimese mõõtmiskampaaniaga (baasjooned ja lähtepunktid). 1997. ja 2008. aasta mõõtmistel kasutati sama seadmeid, 2017. aastal aga juba modernsemaid GNSS-seadmeid, mis võimaldasid kasutada lisaks GPS-satelliitide signaalidele ka GLONASSi satelliitide signaale. Kordusmõõtmiste arvutused viidi läbi samuti sarnaselt 1997. aasta kampaania arvutustega. Kasutati täpseid orbiidiparameetreid (IGS ja CODE), ookeaniloodete mudelit FES2004, troposfääri mudelit VMF1, absoluutseid GNSS-antennide kalibreerimisväärtusi ja satelliidimudeleid ning kvaasi-ionosfäärivaba (QIF) kombinatsiooni algundmatute lahendamiseks.

Riiklike GNSS-püsijaamade lisamine kordusmõõtmistes tingis kahe erineva arvutusstrateegia kasutamise. Esimesel juhul oli eesmärgiks arvutada koordinaadid vaid geodeetilise võrgu I klassi punktidele ja riiklike GNSS-püsijaamade andmeid ei kasutatud (v.a Suurupi). Teisel juhul aga kaasati arvutustesse kõigi GNSS-püsijaamade andmed ning lisaks I klassi punktidele saadi koordinaadid ka riiklikele GNSS-püsijaamadele (2008. aastal 5 ja 2017. aastal 27). Kui esimese strateegia puhul valiti kõik baasjooned käsitsi, siis teisel juhul tegi seda Bernese tarkvara automaatselt OBS-MAXi meetodil. OBS-MAXi meetodi puhul valib tarkvara baasjooned vastavalt mõõdistuspunktide omavaheliste sarnaste mõõtmiste arvu järgi. 2008 ja 2017. aasta kordusmõõtmised ja arvutused on detailselt kirjeldatud tehnilistes aruannetes: Kollo ja Pihlak (2008), Kollo (2010), Metsar jt (2017) ja Metsar jt (2018).

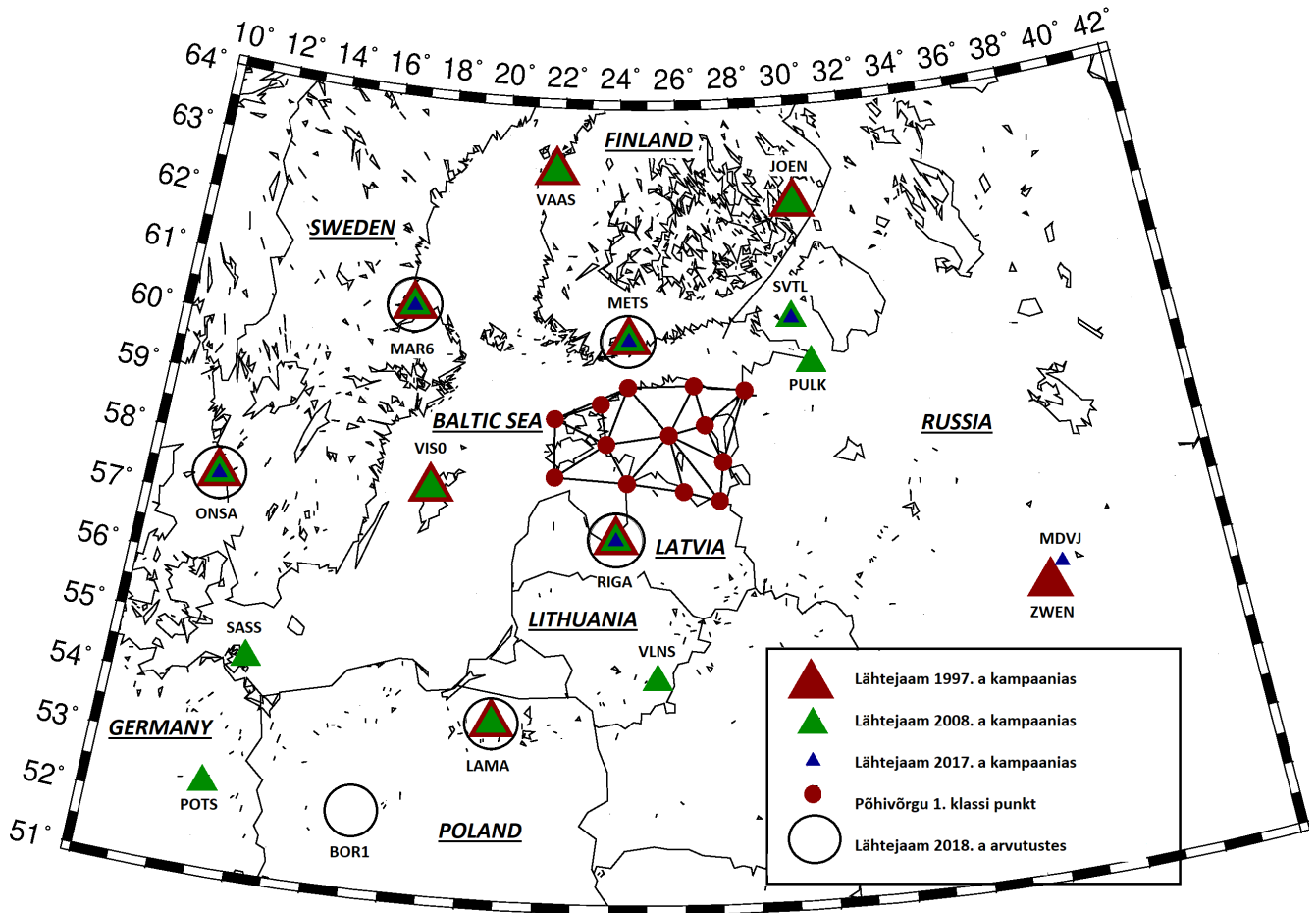
## Kordusarvutused ITRF2014 referentsraamistikus

2018. aastal arvatati 1997., 2008. ja 2017. aasta mõõdistuskampaaniate andmed uuesti läbi ITRF2014 referentsraamistikus. Arvutusstrateegia oli sama kõigi kolme kampaania jaoks ning see sarnanes algse 1997. aasta omaga. Koordinaadid arvatati ainult geodeetilise võrgu I klassi punktidele ja riiklike GNSS-püsijaamu ei kaasatud. Kasutati Bernese tarkvara versiooni 5.2 ning baasjoonte valik tehti kahel erineval meetodil – OBS-MAX ja manuaalselt (baasjooned määrati käsitsi juba enne arvutusi). Lähtejaamadeks oli 6 välismaist IGSi GNSS-püsijaama. Et tagada homogeenne tulemus, kasutati vaid GPS-satelliitide signaale. Esialgsed koordinaadid saadi mõõtmiste keskmistel epohhidel (1997.56, 2008.59 ja 2017.61), lõplikud tulemused aga transformeeriti võrdlemise jaoks ETRS89 süsteemi.

Kordusarvutuste eesmärgiks oli määrata riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktide koordinaadid ühtses referentsraamistikus ja anda usaldusväärne hinnang selle võimalike-

le deformatsioonidele. Kordusarvutuste KRV (keskruutviga) väärtused jäävad kõik samasse suurusjärku ning see on keskmiselt 1 mm. OBS-MAX ja manuaalselt valitud baasjoonte alusel arvutatud tulemuste erinevus on statistiliselt tühine. EUREF-EST97 kohalike koordinaatide (L-EST97)

võrdlusest tulenevad erinevused jäävad keskmiselt alla 5 mm, mis viitab I klassi punktide stabiilsusele ning sellele, et need on hästi rajatud. Koordinaatide KRV-d kolme kampaania keskmiste suhtes on: N = 1,9 mm, E = 2,9 mm ja U = 2,8 mm.



Joonis 1. Eesti geodeetilise võrgu I klassi punktid, nendevahelised baasjooned ning lähtejaamad, mida kasutati kolmes mõõdistuskampanias ja ka 2018. aasta kordusarvutustes.

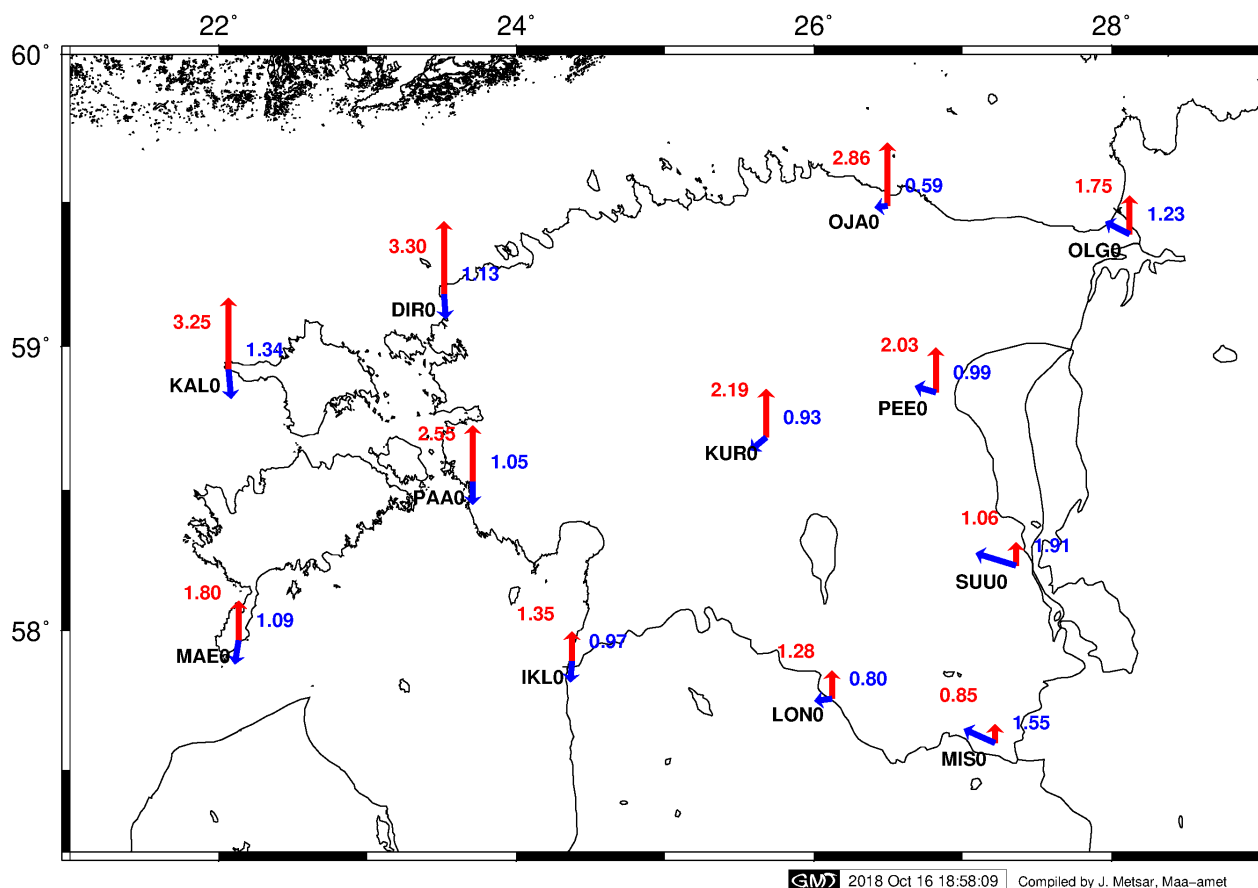
### Geodeetilise võrgu I klassi punktide koordinaatide ajalisel muutused

Kordusarvutuste tulemuste abil määrati 12 I klassi punktile horisontaalsed ja vertikaalsed liikumiskiirused. Suurupi GNSS-püsijaam jäeti siinkohal I klassi punktide seast välja, sest selle antenni asukoht on aastate jooksul mitu korda muutunud, tekitades aegridadesse ebamõistlikke hüppeid. Kokku leiti kiirused kolme erineva ajahetke kohta: 1997–2008, 2008–2017 ja 1997–2017. Saadud tulemusi võrreldi nende keskmisega ja leiti, et need on kõik sarnased. Kiirusväärtuste võrdlemisel hinnati nende määramatusteks E = 0,10, N = 0,13 ja U = 0,15 mm/a. Edasiseks analüüsiks valiti ajavahemiku 1997–2017 kiirused (vt joonis 2).

Horisontaalsete kiiruste puhul eemaldati tulemustest Euraasia laama liikumise kiirused ITRF2014 laamtektoonika mudeli abil ja selle tulemused on näidatud joonisel 2. Horisontaalsed kiirused on Lääne-Eestis lõunasuunalised, Ida-Eestis aga pigem idasuunalised. See võib olla tingitud

kasutatud laamtektoonika mudelist, aga võib olla ka tõend sellest, et Fennoskandia jääajajärgse maatõusu äärealadel toimuvad keerulisemad maapinna liikumised, kui võiks eeldada. Sarnaseid tulemusi on varem tuvastanud ka Oja jt (2014) ning seda kinnitasid ka riiklike GNSS-püsijaamade andmed. Üldiselt jäävad aga lokaalsed horisontaalsed liikumiskiirused suurusjärku 1 mm/a ja kindlamate järeltuste tegemiseks oleks vaja suuremat andmehulka (pikemaid aegridasid).

Eesti aladel jääb maapinna vertikaalne liikumiskiirus vahemikku 1–3 mm/a (vt joonis 2). Antud uurimuses määratud vertikaalsed kiirused mahuvad samuti sellesse vahemikku ning klapiivad samuti hästi mitmete olemasolevate (NKG2005LU\_abs ja NKG2016LU\_abs) regionaalsete kiirusmudelitega. Keskmine erinevus NKG mudelite ja käesoleva töö tulemuste vahel on peaaegu tühine – NKG2005 mudeli puhul on see 0,05 mm/a ja NKG2016 mudeli puhul vaid 0,01 mm/a.



Joonis 2. Eesti geodeetilise võrgu I klassi punktide horisontaalsed (sinise noolega) ja vertikaalsed (punase noolega) liikumiskiirused. Ühikuks on mm/a.

### Kokkuvõtteks

Kordusarvutuste tulemuste määramatused on kõigil kolmel juhul samased ja lokaalsete L-EST97 koordinaatide erinevused jäävad keskmiselt alla 5 mm. 2017. aasta kordusmõõtmiste KRV jääb samasse suurusjärku kordusarvutuste tulemustega (~ 1 mm) ja selle põhjal võib eeldada, et riigi geodeetilise võrgu I klassi punktide ja riiklike GNSS-püsijaamade koordinaadid on täpsed ja usaldusväärsed.

Kordusarvutuste põhjal arvatud kiirused aga annavad ainet edaspidiseks uurimistöök. Määratud horisontaalsed liikumiskiirused ei allu ühtsele trendile ja seetõttu vajaksid horisontaalsed maapinna deformatsioonid Eestis detailsemat uurimist. Antud töös arvatud maapinna tõusu kiirused aga sobituvad hästi regionaalsete mudelitega ning annavad üpris hea ülevaate vertikaalsetest deformatsioonidest Eestis.

### Referentsid

- Boucher, C., Altamimi, Z. (1998). *Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*. <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V7.pdf> (vaadatud 29.08.2019).
- EUREF. (1999). *Symposia – Resolutions. Prague, 2-5 June 1999*. [http://www.euref.eu/html/resolutions\\_prague1999.pdf](http://www.euref.eu/html/resolutions_prague1999.pdf) (vaadatud 29.08.2019).
- Kollo, K., Pihlak, P. (2008). *Riigi geodeetilise põhivõrgu kordusmõõtmiste arvutused*. Maa-amet, aruanne nr I-805.
- Kollo, K. (2010). *Computations of re-measurement campaign of Estonian I-order National Geodetic Network*. NKG General Assembly 2010. [http://www.nordicgeodeticcommission.com/wp-content/uploads/2014/10/poster\\_NKG2010\\_Kollo.pdf](http://www.nordicgeodeticcommission.com/wp-content/uploads/2014/10/poster_NKG2010_Kollo.pdf) (vaadatud 29.08.2019).
- Metsar, J., Kollo, K. (2017). *Riigi geodeetilise võrgu I klassi kordusmõõtmised 2017*. Maa-amet, aruanne nr I-972.
- Metsar, J., Priit, P., Kollo, K. (2018). *Riigi geodeetilise põhivõrgu I klassi kordusmõõtmiste arvutused*. Maa-amet, aruanne nr I-978.
- Metsar, J., Kollo, K., Ellmann, A. (2018). *Modernization of the Estonian National GNSS Reference Station Network*. *Geodesy and Cartography*; Vol 44 nr 2: 55–62.
- Oja, T., Kollo, K., Pihlak, P. (2014). *GIAs ja maapinna liikumistest Eestis GNSS täppismõõtmiste valguses*. *Geodeet*, nr. 44.
- Rüdja, A., Ostonen, A., Lainevool, R. (1998). *Riigi geodeetilise põhivõrgu kameraalrvutused*. Maa-amet, aruanne nr I-446.
- Rüdja, A. (2004). *Geodetic datums, reference systems and geodetic networks in Estonia*. Akadeemiline dissertatsioon, Helsingi Ülikool.