Riiklikud GNSS-püsijaamad üle-euroopalise EUREFi tihendusvõrgu osana

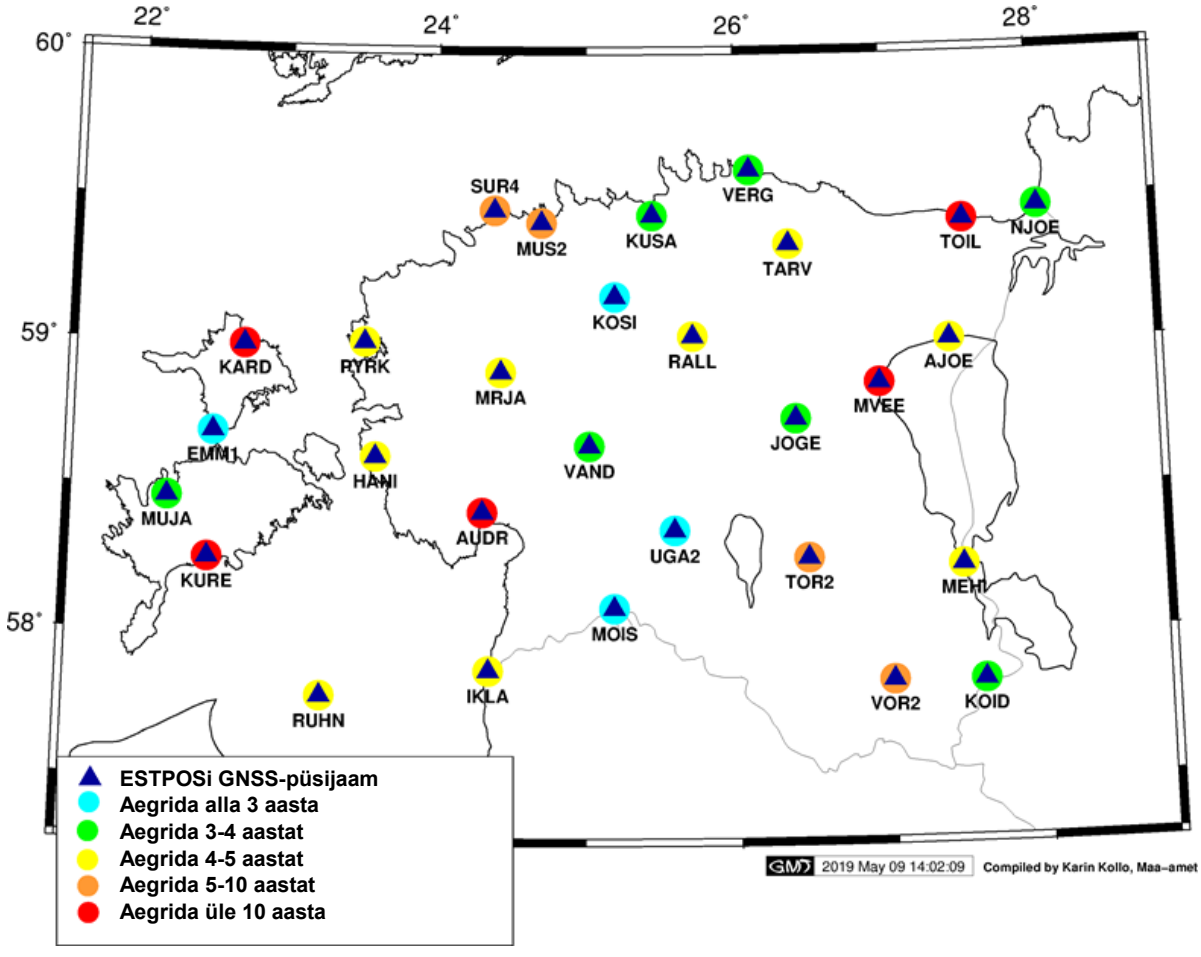
Jaanus Metsar, Karin Kollo, Priit Pihlak, Artu Ellmann – Maa-amet, jaanus.metsar@maaamet.ee

Sissejuhatus

EUREF (Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe) on Rahvusvahelise Geodeesia Assotsiatsiooni IAG (*International Association of Geodesy*) referentsraamistike Euroopa töögrupp. EUREF tegeleb Euroopa referentsraamistiku määratlemise ja haldamisega ning Eesti on EUREFi tegemistega olnud seotud juba 1992. aastast, kui Baltimaades viidi läbi EUREF-BAL92 GPS-mõõtmised (Madsen ja Madsen, 1993). Lisaks eelmainitule haldab EUREF ka Euroopa GNSS-püsijaamade võrku EPN (*EUREF Permanent GNSS Network*). EPNi põhiliseks eesmärgiks on tagada juurdepääs Euroopa terrestrilisele referentssüsteemile ETRS89, mis on täpsete koordinaatide standardiks Euroopas. Eesti riiklik referentssüsteem on ETRS89 realisatsioon, ametliku nimega EUREF-EST97, kusjuures see põhineb 1997. aasta GPS-mõõtmistel (Rüdja, 1999). Eelmainitud mõõtmiskampaania abil määrati koordinaadid riikliku geodeetilise võrgu I klassi punktidele (12 pinnasemärki ja 1 GNSS-püsijaam), ühtlasi on need osa EUREFi tihendusvõrgust (EUREF, 1999). EUREFi tihendusvõrgu eesmärgiks on luua homogeenne ja kõrge täpsusega koordinaatide ja kiiruste kogum (mudel) Euroopas.

Eestis täiendab geodeetilise võrgu I klassi punkte riiklik GNSS-püsijaamade võrk ESTPOS, mille eesmärgiks on tagada Eesti geodeetilise süsteemi järjepidev monitooring (Metsar jt, 2018). 2019. aasta kevadel esitas Maa-amet EUREFi juhtkonnale aruande ESTPOSi arvutustest ja tulemustest, eesmärgiga lisada ka Eesti riiklikud GNSS-püsijaamad EUREFi tihendusvõrku. Aruanne osutus tulemuslikuks ja seega maikuus Tallinnas peetud EUREFi sümpoosioni resolutsiooniga kinnitati 25 ESTPOSi püsijaama osaks EUREFi tihendusvõrgust. Käesolev artikkel annab ülevaate antud projektist.

Riiklik GNSS-püsijaamade võrk – ESTPOS



Joonis 1. ESTPOSi püsijaamade asukohad ja nende andmete aegridade pikkused.

Esimene riiklik GNSS-püsijaam rajati 1996. aastal Suurupi tuletorni katusele (Ellmann, 1997). Aastatel 2006–2008 lisandus veel 8 püsijaama, moodustades esialgse Eestit katva GNSS-püsijaamade võrgustiku. 2014–2016 toimus suurem püsijaamade võrgu kaasajastamine (Metsar jt, 2018). Täiendavalt rajati 19 uut GNSS-püsijaama, mis olemasolnutega kokku moodustab tänapäevase ESTPOSi võrgu. ESTPOSi püsijaamades on kasutusel Leica vastuvõtjad (GR25 ja GRX1200GG PRO) ning antennid (LEIAR25.R4 ja LEIAT504GG). Peaaegu kõik GNSS-püsijaamad võtavad vastu GPS-, GLONASS- ja Galileo signaale (vaid 2 püsijaama võtavad vastu ainult GPS- ja GLONASS-signaale). ESTPOSi jaamad on rajatud hoonete katustele (v.a MVEE, mille mast on maapinnal) ja nende antennid on paigaldatud 1–2 meetri kõrguste metallsammaste otsa. 2019. aasta alguse seisuga on ESTPOSi võrgus 29 GNSS-püsijaama, millest 25 on piisavalt kaua töötanud, et neid sai edukalt EUREFi tihendusvõrgu projekti kaasata (eelduseks oli vähemalt 3-aastane aegrida, vt joonis 1).

Andmetöötlus

EUREFi tihendusvõrgu projekti jaoks kasutatud ESTPOSi andmed on töödeldud kahe erineva arvutusstrateegia järgi: REPRO ja OPERATIONAL. Mõlemad põhinevad Põhjamaade Geodeesiakomisjoni NKG (*Nordic Geodetic Commission*) poolt välja töötatud juhistel (Lahtinen jt, 2018). REPRO lahenduse tulemused on GPSi nädalate 1408–1933 (jaanuar 2007 kuni jaanuar 2017) kohta ning IGb08 koordinaatraamistikus. OPERATIONAL lahenduse tulemused on aga GPSi nädalate 1934–2034 (jaanuar 2017 kuni jaanuar 2019) kohta ning IGS14 koordinaatraamistikus. Kahe strateegia kasutamine on tingitud globaalsete referentsraamistike vahetusest 2017. aasta alguses (IGb08 asemel võeti kasutusele IGS14). GNSS-püsijaamade vaatlusandmed on 24-tunniste osakutena, 30-sekundilise salvestussagedusega, RINEXi formaadis.

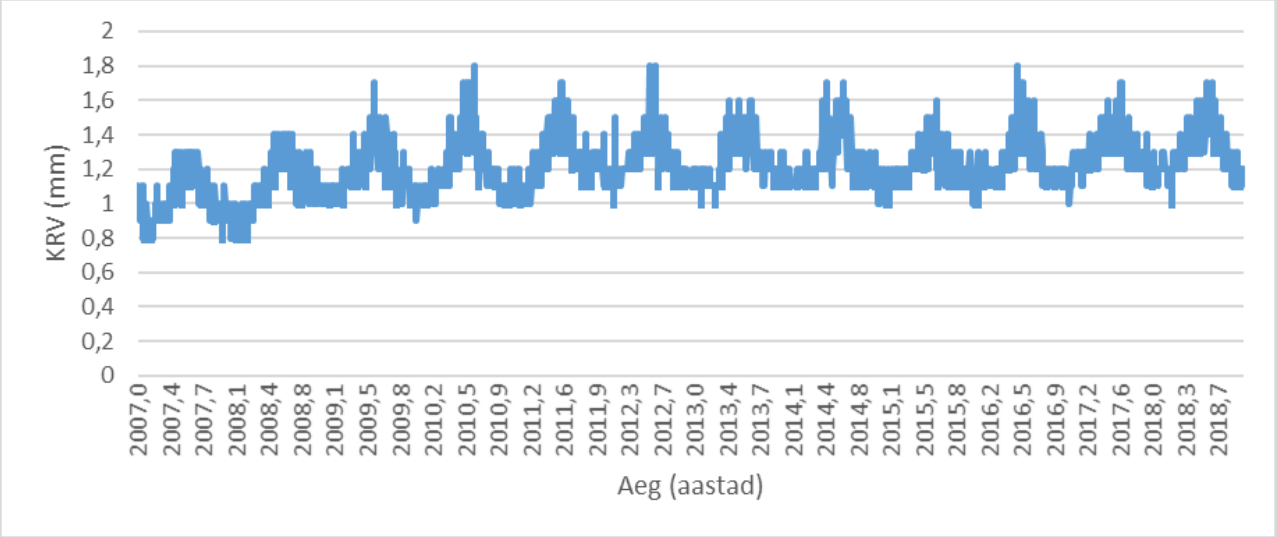
Arvutusstrateegiad on üldjoontes sarnased. Kasutati Bernese GNSSi arvutustarkvara; CODE (*Center for Orbit Determination for Europe*) satelliitide orbiitide infot, Maa pöörlemise parameetreid ja ionosfäärimudeleid; VMFi (*Vienna Mapping Function*) troposfäärimudelit; globaalseid ionosfäärikaarte ION ja ookeaniloodete mudelit FES2004. Mõlemal juhul kasutati võrgulahendust (*Double Difference*), baasjoonte valikul OBS-MAXi meetodit ja algtundmatute lahendamisel QIFi (Quasi Ionosphere Free) strateegiat.

Iganädalaste arvutuste tulemuseks on päevased lahendused (GNSS-püsijaamade koordinaadid). Päevaste lahenduste kombineerimisel saadakse nädalapikkused SINEX-formaadis lahendused, mille epohh vastab antud GPSi nädala keskmisele epohhile. Kasutades CATREFi (*Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames*) tarkvara (Altamimi jt, 2006), kombineeriti SINEXi nädalafailid tervet ajavahemikku (2007–2019) katvaks pikaajaliseks GNSS-püsijaamade koordinaatide ja kiiruste lahenduseks. Enne kombineerimist CATREFi tarkvara abil transformeeriti REPRO strateegia tulemused (nädalased SINEX-failid) vastavate scriptide ja mudelite abil (IGS, 2016) IGb08 referentssüsteemist IGS14 süsteemi. Pikaajalise lahenduse lõplikud koordinaadid ja kiirused on seega referentssüsteemis IGS14 ja keskepohhil 2013.00. EPN-kalkulaatori (Altamimi, 2018) abil transformeeriti tulemused ka ETRS89 süsteemi.

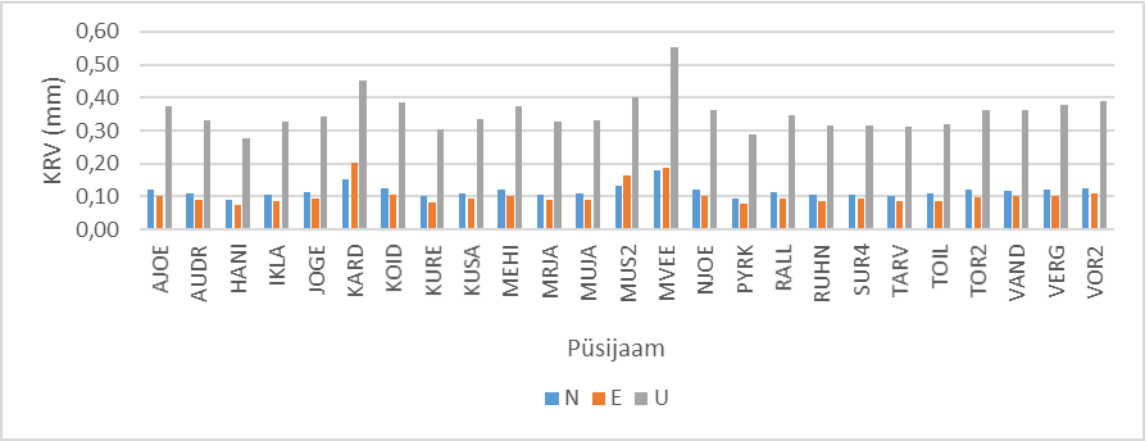
Tulemused

1. Päevased tulemused

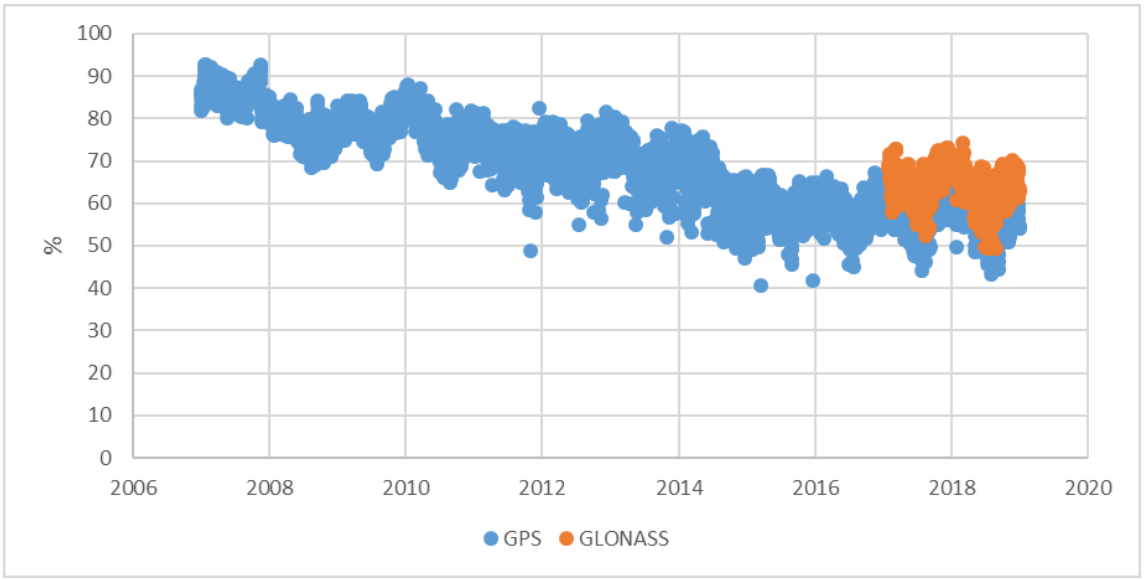
Kõikide päevaste lahenduste keskmine KRV on 1,20 mm. GPSi nädalate 1408–2034 KRV väärtused on näidatud joonisel 2. GNSS-püsijaamade NEU koordinaatide keskmine KRV on N = 0,12 mm, E = 0,10 mm ja U = 0,35 mm. Joonisel 3 on toodud NEU koordinaatide keskmine päevane KRV iga arvutusse kaasatud ESTPOSi püsijaama kohta. Nagu varasemaltki täheldatud, on asukoha vertikaalkomponendi määramise täpsus kolm korda kehvem plaanilise komponendi määramise täpsusest. Joonisel 4 on toodud päeva keskmine algtundmatute lahendamise protsent. Siinkohal peab märkima, et alates GPSi nädalast 1934 on tulemused toodud ka GLONASSi satelliitide kohta. Samuti nähtub graafikust, et GNSS-püsijaamade koguarvu kasvamisega koos langes algtundmatute lahendamise protsent.



Joonis 2. Päevaste lahenduste keskmine KRV mm.



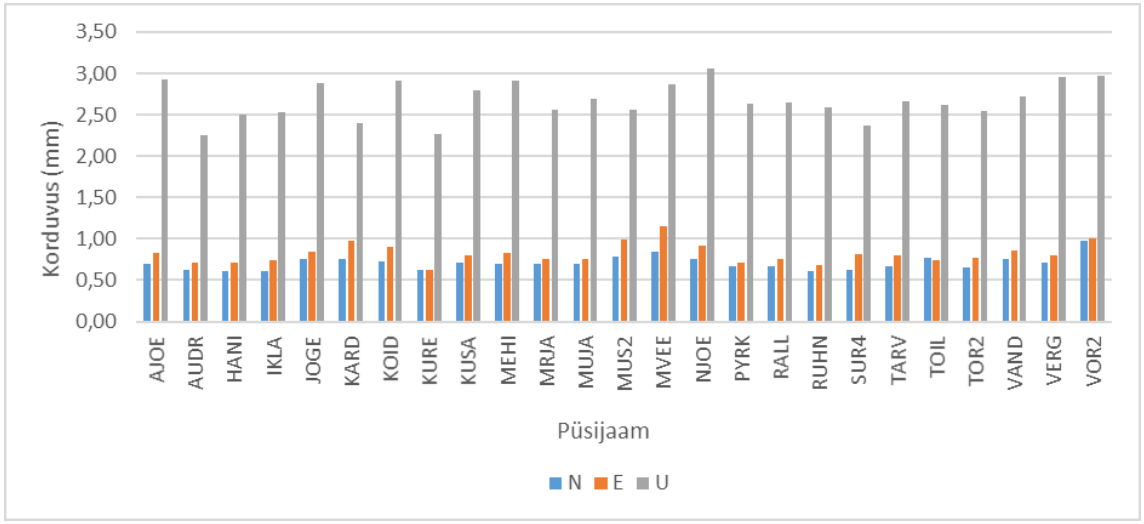
Joonis 3. ESTPOSi püsijaamade NEU koordinaatide keskmine päevane KRV mm.



Joonis 4. Päevane keskmine algtundmatute lahendamise protsent.

2. Nädalapikkused lahendused

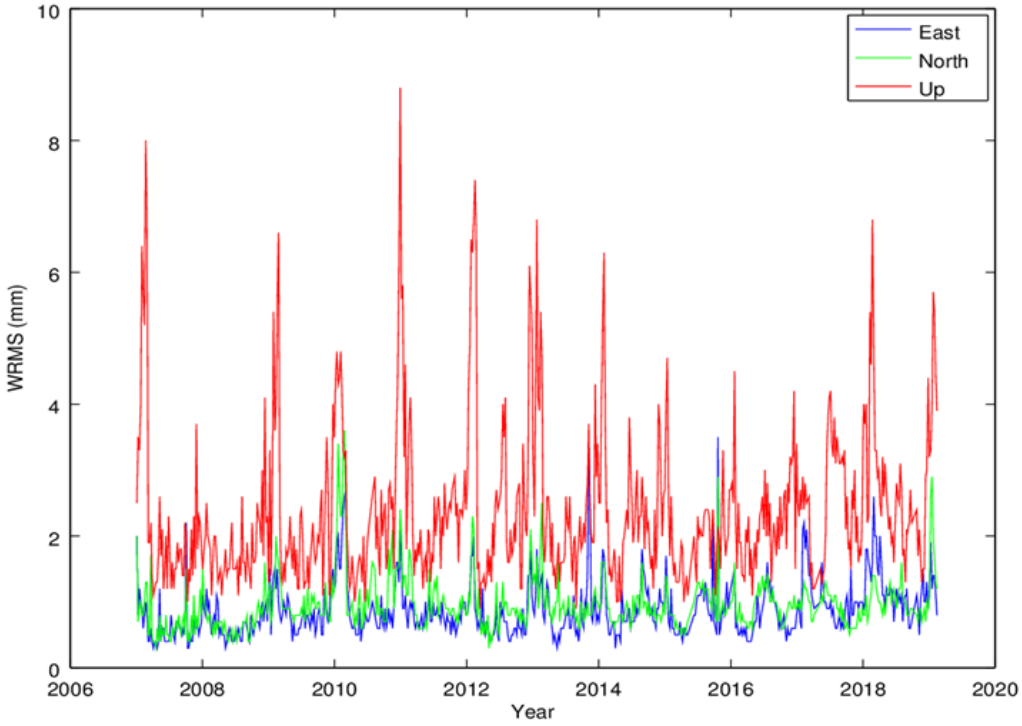
Nädalasi tulemusi võrreldi referentslahendiga, kasutades minimaalseid piiranguid üle kolme teisendusparameetri. ESTPOSi püsijaamade NEU koordinaatide keskmine nädalane korduvus on toodud joonisel 5. Koordinaatide keskmine korduvus jääb N- ja E-koordinaadis alla 1 mm ja kõrguses alla 3 mm.



Joonis 5. ESTPOSi püsijaamade NEU koordinaatide keskmine nädalane korduvus.

3. Pikaajaline lahendus

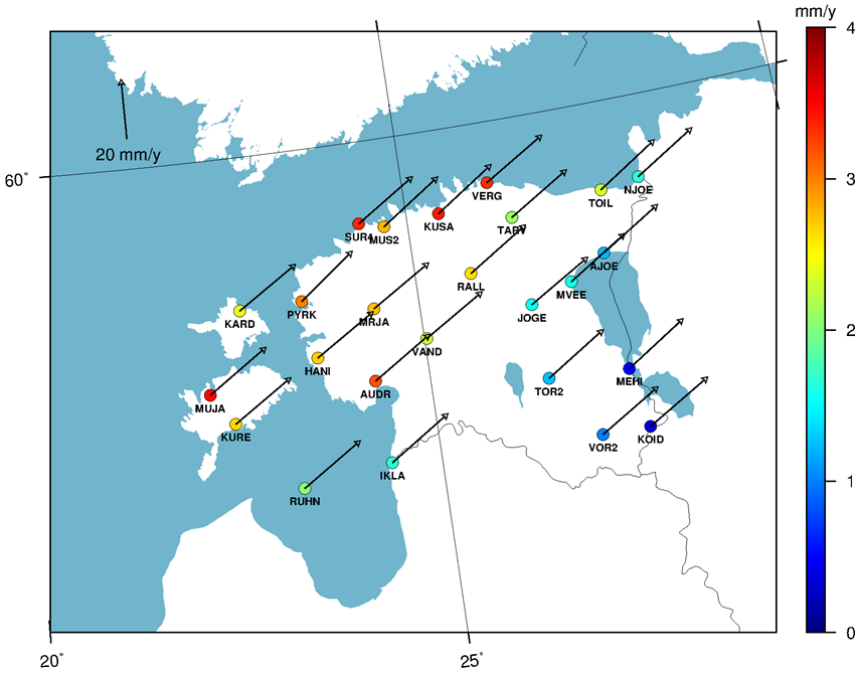
Nädalased lahendused kombineeriti EPNi pikaajalise lahenduse EPN_A_IGS14_C2025 suhtes, kasutades minimaalseid piiranguid üle 14 teisendusparameetri. Referentsiks oli 14 EPNi ja IGSi võrgu GNSS-püsijaama. Kombineeritud tulemuste kaalutud KRV väärtused on toodud joonisel 6. Sealt on hästi näha hooajaline mõju tulemustele – talvel on kaalutud KRV väärtused suuremad kui suvel. Pikaajalise lahenduse lõplikud koordinaadid ja kiirused referentssüsteemis IGS14 ja epohhil 2013.00 on toodud tabelis 1 ja joonisel 7. Nähtub, et Eesti liigub kirdesuunas kiirusega 2 cm aastas, sarnaselt enamusega põhjapoolsest Euroopast.



Joonis 6. Pikaajalise lahenduse kaalutud KRV.

Tabel 1. ESTPOSi püsijaamade koordinaadid ja kiirused referentssüsteemis IGS14, epohhil 2013.00

Püsijaam	Koordinaadid IGS14			Kiirused IGS14		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	vX (m/a)	vY (m/a)	vZ (m/a)
AJOE	2922027,7769	1516183,8311	5444680,6355	–0,01833	0,01363	0,00743
AUDR	3051129,9852	1378515,0174	5410561,3041	–0,01743	0,01437	0,00894
HANI	3049795,4413	1334503,6355	5422257,3084	–0,01686	0,01476	0,00897
IKLA	3096568,2289	1403550,3454	5378427,2820	–0,01807	0,01437	0,00858
JOGE	2564138,9408	1486149,8755	5628951,5187	–0,01793	0,01337	0,00881
KARD	3038082,0899	1272076,6716	5443646,5186	–0,01727	0,01457	0,00944
KOID	3016329,1262	1576581,0469	5376144,1754	–0,01925	0,01446	0,00690
KURE	3107617,2856	1287856,6337	5400807,3616	–0,01674	0,01460	0,00924
KUSA	2935289,4719	1394967,8644	5469747,0110	–0,01731	0,01378	0,00967
MEHI	2986350,5706	1552589,2713	5399636,2301	–0,01903	0,01343	0,00721
MRJA	3007598,6995	1365586,2491	5437989,7586	–0,01683	0,01461	0,00881
MUJA	3095604,7132	1265344,0550	5412939,2508	–0,01682	0,01487	0,01017
MUS2	2955252,6216	1359141,8645	5467989,8954	–0,01694	0,01427	0,00927
MVEE	2946882,5824	1498402,5633	5436249,1143	–0,01800	0,01368	0,00779
NJOE	2867608,5407	1527387,8539	5470224,7579	–0,01833	0,01365	0,00771
PYRK	3018918,7778	1313997,3841	5444349,2544	–0,01741	0,01297	0,00997
RALL	2964595,3104	1427314,6628	5445746,3961	–0,01768	0,01428	0,00891
RUHN	3131364,3384	1346557,5946	5372875,3456	–0,01744	0,01457	0,00887
SUR4	2959056,7677	1341058,7903	5470427,0481	–0,01678	0,01428	0,00943
TARV	2921186,3818	1446686,0438	5463936,0947	–0,01773	0,01418	0,00815
TOIL	2884257,0824	1503794,1704	5468068,0093	–0,01838	0,01369	0,00858
TOR2	3010733,5969	1498577,1093	5401387,5696	–0,01827	0,01379	0,00779
VAND	3013891,6869	1407296,4894	5423955,3075	–0,01727	0,01461	0,00844
VERG	2905541,0847	1423459,9380	5478170,6730	–0,01726	0,01463	0,00917
VOR2	3032206,1279	1545165,0423	5376375,8358	–0,01829	0,01409	0,00740



Joonis 7. ESTPOSi püsijaamade kiirused IGS14 referentssüsteemis. Nooled kujutavad horisontaalsete (N ja E koordinaatkomponent) kiiruste suunda ja suurust ning värvid vertikaalsete (U-komponent) kiiruste suurust.

Kokkuvõte

EUREFi tihendusvõrgu projekt koondab endas ESTPOSi püsijaamade andmeid vahemikust 2007–2019. See on periood, mille jooksul Eestis on toimunud pidev geodeetilise süsteemi jälgimine GNSS-püsijaamade abil. 12 aasta jooksul GNSS-püsijaamades kogutud andmed on arvutatud Bernese GNSSi-tarkvara kasutades ning koondatud CATREFi programmi abil pikaajaliseks lahenduseks. Pikaajalise lahenduse tulemusena kuuluvad 25 ESTPOSi püsijaama 2019. aasta juunist EUREFi tihendusvõrku. Tulemuste keskmine päevane KRV on 1,2 mm ning NEU koordinaatide keskmine KRV on: N = 0,12 mm, E = 0,10 mm ja U = 0,35 mm. Nädalaste lahenduste keskmine korduvus on N- ja E-koordinaadis alla 1 mm ja kõrguses alla 3,5 mm. Erinevuste KRV väärtused EPNi pikaajalise lahenduse suhtes on 1,32 mm, 0,98 mm ja 1,94 mm NEU koordinaatides ning 0,10 mm/a, 0,07 mm/a ja 0,17 mm/a NEU kiirustes. ESTPOSi püsijaamade pidev monitooring tagab, et meie riikliku koordinaatraamistikuga toimuvaid deformatsioone on võimalik usaldusväärselt jälgida. Eeldada võib, et ka ülejäänud geodeetiliste punktide liikumised on sarnased, mis võimaldab nende koordinaatide muutusi usaldusväärselt prognoosida, seeläbi edasi lükates riiklike geodeetiliste võrkude renoveerimisvajadust.

Referentsid

Altamimi, Z. (2018). *EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems.* URL: http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1.pdf

Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C. (2006). *CATREF Software Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames.* IGN. URL: https://www.researchgate.net/publication/265490577_CATREF_Software_Combination_and_Analysis_of_Terrestrial_Reference_Frames

Ellmann, A. (1997). *Suurupi GPS püsivaatlusjaam*. Geodeet 12, 1997, lk 5–7.

EUREF (1999). *Symposia – Resolutions. Prague, 2–5 June 1999.* URL: http://www.euref.eu/html/resolutions_prague1999.pdf

Lahtinen, S., Pasi, H., Jivall, L., Kempe, C., Kollo, K., Kosenko, K., Pihlak, P., Prizginiene, D., Tangen, O., Weber, M., Paršeliunas, E., Baniulis, R., Galinauskas, K. (2018). *First results of the Nordic and Baltic GNSS Analysis Centre.* Journal of Geodetic Science, 8(1). URL: https://doi.org/10.1515/jogs-2018-0005

Madsen, F., ja Madsen, B. (1993). *A new GPS-network in the Baltic Countries.* In E. Gubler, H. Hornik (Eds), Report on the Symposium of the IAG Subcommission for European Reference Frame (EUREF) held in Budapest, 17–19 May 1993, Veröff. Bayr. Komm. Intern. Erdmessung. EUREF Publ. No. 2, München, pp. 83–91.

Metsar, J., Kollo, K., Ellmann, A. (2018). *Modernization of the Estonian national GNSS reference station network.* Geodesy and Cartography, 2018, Volume 44, issue 2, pp. 55–62. DOI: 10.3846/gac.2018.2023 URL: https://journals.vgtu.lt/index.php/GAC/ article/view/2023

Rüdja, A. (1999). *A new ETRS89 system for Estonia*. Report on the Symposium of the IAG Subcomission for the European Reference Frame (EUREF) held in Prague 2–5 June 1999. Veröff. Bayr. Komm. Intern. Erdmessung. EUREF Publ. 8. München, pp 123–135. URL: http://www.euref.eu/html/resolutions_prague1999.pdf

IGS (2016). *IGS-mail No 7399.* URL: https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2016/001233.html