

Raskuskiirenduse anomaalvälja kerkest Luusika kandis ning selle mõjust geoidile

Tõnis Oja – Maa-amet, e-post: tonis.oja@maaamet.ee

Sissejuhatus

2010. a suve lõpuks jõuti teadusgrandi ETF7356 (sellest pikemalt Ellmann jt artiklis käesolevas ajakirjas) uurimistöödega niikaugemale, et oli võimalik alustada raskuskiirenduse anomaalväljade modelleerimisarvutustega Eesti ja Eestit ümbritsevate alade jaoks, mis oli omakorda lähteks siinse geoidi mudelpinna arvutustele.

Suur töö oli seljataga, sest oldi ju lõpetatud koguka gravimeetrilise andmebaasi (u 460 000 punkti) koostamine, süstematiseerimine ja kaasajastamine märkimisväärselt suurel alal. Kuid oluline tööetapp oli veel ees, nimelt tulid korrigeerida jämedad vead ehk eksed ja ebakooskõlad gravimeetrilises sisendandmestikus, samaaegselt hinnates anomaalvälja mudelpindade täpsust. Selleks jälgiti pidevalt mudelpindade sobivust lähteandmetega, samuti võeti abiks sõltumatu usaldusväärne kontrollandmestik.

Peale 2010. a sügist, mis oli täidetud modelleerimis-arvutuste, võrdluste ja diskussioonidega, oli teadusgrandi töögrupp tükk maad targem. Selgunud olidparimad anomaalväljade modelleerimise ehk võrgustamise meetodid, hinnatud mudelpindade täpsus ja leitud mitmed võimalikud eksed ning mõned probleemsed piirkonnad. Järgnevalt tulebki jutuks üks selline piirkond Kirde-Eesti kandis, kus mudelpindade ja kontrollandmestiku vaheliste erinevuste lähem uuring viis küllalt intrigeerivate tulemusteni. Kontrollandmestik koosnes 320 kontroll-punkti, mille täpsed ning usaldusväärsed raskuskiirenduse anomaaliade väärtused arvutati 2006. a Eesti gravimeetrilise I, II, III klassi võrgu tasanduse tulemuste põhjal (loe ka Ellmann jt 2009). Seega igati sobilik andmestik mudelpindade sõltumatuks kontrollimiseks ja ka täpsuse hindamiseks Eesti aladel.

Suuremal osal kontrollpunktidel jäid erinevused mõõdetud ja mudelpinna põhjal tuletatud anomaalia väärtuste vahel vahemikku ± 1 mGal, mida võib lugeda heaks tulemuseks, arvestades lisaks mudelpindade „sisemisele“ täpsusele (alla ± 1 mGal, hinnatud sisend-andmete ning pinna omavahelise sobivuse põhjal) ka sisendväärtuste (raskuskiirenduse anomaaliade) täpsus-hinnangutega gravimeetrilisest andmebaasist (hinnanguliselt vahemikus $\pm 0,10 \dots \pm 2,50$ mGal).

Selgelt eristus ülejäänud kontrollpunktidest riikliku geodeetilise võrgu punkt IMUKVERE97 (6434) Kirde-Eestis Lääne-Viru, Ida-Viru ja Jõgeva maakonna ristumiskohas,

kus Bouguer' anomaalvälja¹ (BA) korral ulatus kontroll-väärtuse hälve mudelpinna suhtes ligi 4 mGal-ni (joonis 1).

Uued raskuskiirenduse mõõdistamised Kirde-Eestis

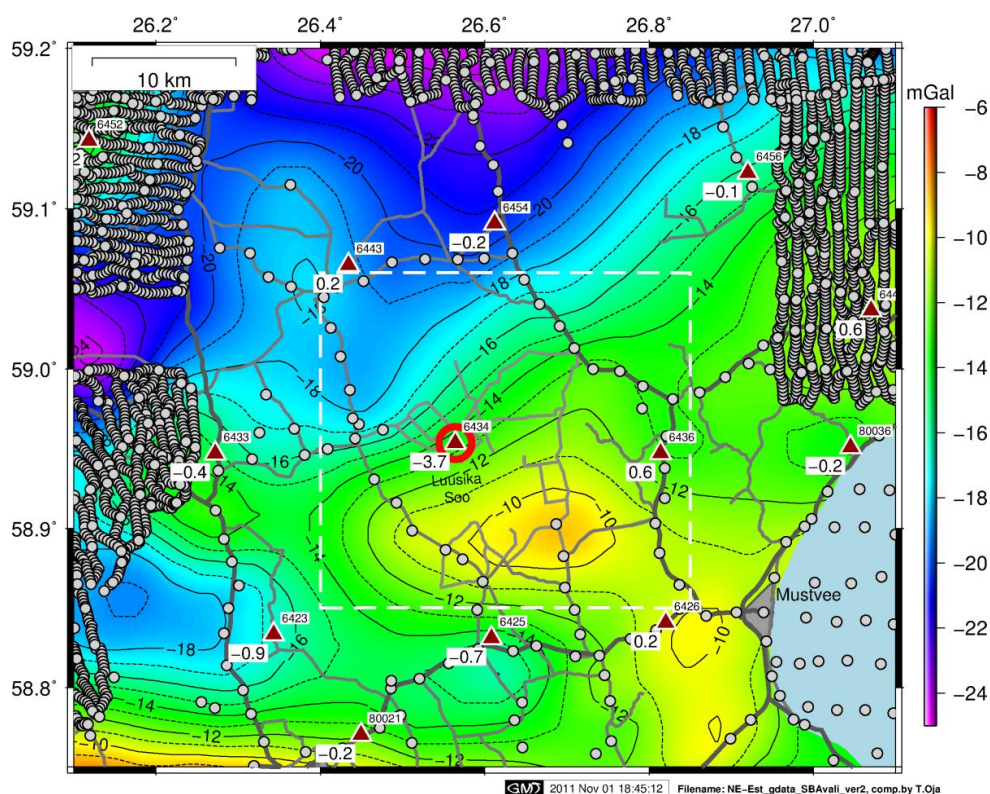
Nimetatud piirkonna gravimeetrilist andmestikku esindavad põhiliselt 1950-ndatel Teaduste Akadeemia Geoloogia Instituudi (TA GI) mõõdistatud punktid (mööda teid paari km tagant), mille mõõtmistäpsus tänapäeva nõudmistele nii mitmeski piirkonnas enam ei vasta (pikemalt loe Ellmann jt 2009). Piirkonna äärealasid (joonisel 1 vasakul, üleval ja paremal) palistab Eesti Geoloogiakeskuse (EGK) ülitiheduse mõõdistusandmestik, mille täpsus on ETF7356 grandis eesmärgi silmas pidades igati piisav. Samas jääb see andmestik küllalt eemale kontrollpunktist 6434, et välja mudelit piirkonna keskosas oluliselt mõjutada.

Kuna koguka gravimeetrilise andmebaasi kaasamisega modelleerimisse ning mudelpindade arvutamiseks oli 2010. a sügisel tegemist rohkem kui küll, polnud esialgu eriti aega punktiga 6434 seotud probleemi süveneda. Tol korral käisid sealse suure hõlbega silmitsi olles peast läbi järgmised variandid:

- 1) eemaldada kontrollpunkt edasistest arvutustest, kuna selle anomaalia väärtus võib olla vigane;
- 2) kaasata siiski punkt arvutustesse ning eeldada, et anomaalvälja mudelpind hoopis hõlbib antud piirkonnas (näiteks vigaste TA GI mõõdistuste tõttu!);
- 3) selgitada välja erinevuse põhjus, tehes täiendavaid uuringuid (juhul kui mingi ime läbi selleks enne geoidi modelleerimisarvutusi aega jääb).

Et tollel IMUKVERE97 kontrollpunktil mõõtis raskuskiirendust 2003. a hilissügisel autor isiklikult, ei andnud probleem arusaadavalt asu ega rahu. Variandi 1 käikulaskmist toetasid tol hetkel asjaolud, et punkt 6434 seoti II kl gravimeetrilise võrguga hilissügisel ajal (mikroseismiliste võnkumiste tõttu küllalt ebasobiv periood täpseteks mõõtmisteks) peale lume tulekut (täiendav segav asjaolu). Välipäeviku märkmetest selgus veel, et tol korral viis punktile äärmiselt halvas korras tee (auklik ning mudane), mis gravimeetrilistel töödel kindlasti mõõtmistäpsust ei paranda. Samas oli siiski äärmiselt ebatõenäoline, et mõõdetud raskuskiirenduse väärtus (hinnanguliselt mõõtmistäpsusega alla $\pm 0,1$ mGal) nii valeks osutus. Mõõtmisandmete ning arvutuste hoolikas kontroll ühtki trüki- ega arvutusviga esile ei toonud. Esialgu jäi punkt 6434 arvutuste andmebaasi sisse vastavalt variandile 2.

¹ Bouguer plaadi tiheduseks on võetud siin ja edaspidi 2300 kg m^{-3} .



Joonis 1. Gravimeetiline lähteandmestik (hallid punktid), modelleeritud Bouguer' anomaalia (BA) väli ning kontrollpunktid (punased kolmnurgad) koos teedevõrgustikuga Kirde-Eestis. Arvuliselt on esitatud kontrollpunktide BA väärtuste kõrvalekaldeid mudelpinnast $BA_{\text{mudel}} - BA_{\text{kontroll}}$ (ühikud mGal). Valge joonega on tähistatud järgnevatel joonistel kujutatud piirkond.

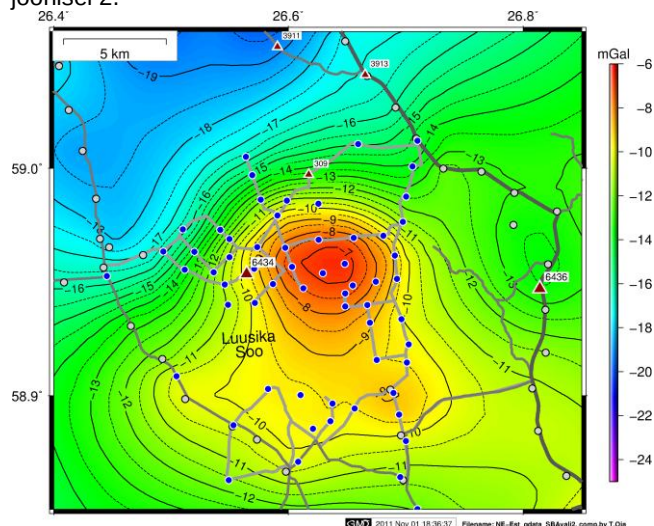
Kuid rahu see kõrvalekalle punktil 6434 ei andnud, ning 2010. a hilissügisel võttis autor riuililt „purgi ning saua“, ehk siis gravimeetri Scintrex CG5 ja GPS RTK komplekti (Tallinna Tehnikaülikooli Trimble T5800) ning suundus soode keskele „palverännakule“ valgustust saama, teisisõnu mõõdistama. Lihtsaks see ei osutunud, kuna samal ajal otsustas tihe märg lumi maha sadada, lisaks sellele olid metsatöömehed piirkonna teedele (Käru ja Venevere vahel) tõelise rünnaku korraldanud ning ime läbi ei jäänud Maa-ameti pisike kuid tubli sõiduk sealsetesse mülgastesse kinni. Kõik läks õnneks tänu sobiva meetodika valikule ning uued mõõtmistulemused tõid olukorda viimaks selguse. Enne tulemuste esitamist lisan, et täiendavad mõõtmised sama aparatuuriga toimusid veel 2011. a suvel, täpsustamaks ülevaadet raskuskiirenduse anomaalväljast piirkonnas. Tollel kampaanial võeti kasutusele juba 4-rattaveoga maastikuauto, millega pääseti ka kõrvalisematesse kohtadesse raskuskiirendust mõõtma.

Luusika kerge

Kokku mõõdeti ajavahemikus november 2010 kuni juuli 2011 raskuskiirenduse väärtused 67 uuel mõõdistuspunktil, neist 3 olid tihendusvõrgu punktid. Mõõtmised seoti mitme II ja III klassi gravimeetrilise võrgu punktiga, sealhulgas ka punktiga 6434 (gravimeetrilise võrgu III klass).

Mõõtmiste tasandus ning statistiline analüüs kinnitasid mõõtmiste õnnestumist ning arvutatud raskuskiirenduse

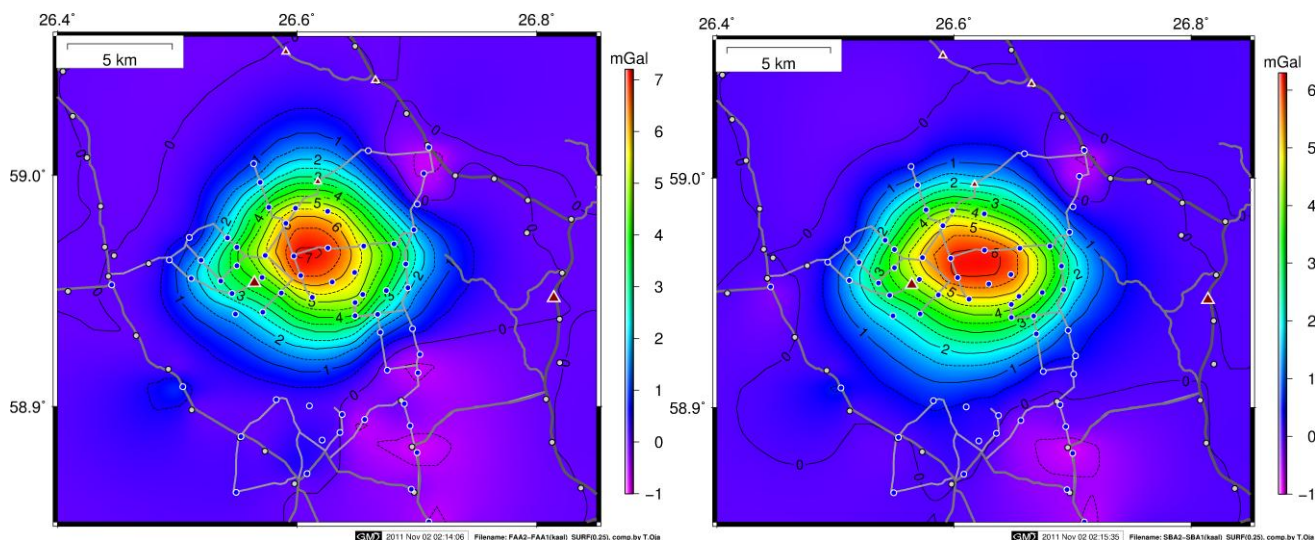
anomaaliat täpsuseks hinnati $\pm 0,10 \dots 0,15$ mGal. Selgus ka, et 2003. a määratud raskuskiirenduse väärtus punktil 6434 on igati usaldusväärne ja eespool nimetatud täpsuse piires. Uute ja varasemate andmete põhjal modelleeritud BA pind koos varasemate ja uute punktidega on näha joonisel 2.



Joonis 2. Bouguer' anomaalvälja mudelpind Kirde-Eestis seisuga juuli 2011. Esitatud on gravimeetrilised andmed 2010. a novembri seisuga (hallid punktid, vt ka selgitusi joonisel 1) ning uusimad raskuskiirenduse mõõdistused ajavahemikust nov 2010 kuni juuli 2011 (väiksemad kolmnurgad – tihendusvõrgu punktid, sinised punktid – mõõdistuspunktid mööda teid)

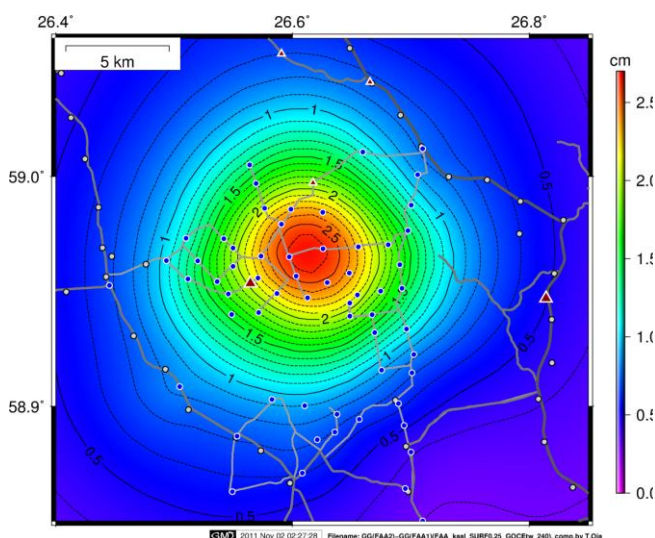
Jooniste 1 ja 2 võrdlusest selgub, et BA välja pind muutus uute andmete lisandumisega drastiliselt. Ilmnes täiesti uus maksimum, mille kese jääb umbes Luusika ja Venevere soode vahele, Luusika külast 3 km lõunasse (Mustveest siis u paarkümmend km loodesuunas). Parema ülevaate saamiseks võrreldi nii vabaõhu (FAA) kui BA anomaalväljade mudelpindasid ning arvutati nende

erinevused, lahutades 2011. a pindadest varasemad, 2010. a modelleeritud pinnad (joonis 3). Ilmneb, et BA välja puhul on muutus veidi üle 6 mGal, FAA puhul aga kuni +7 mGal! Kerkeala läbimõõt on umbes 10 km ning keskmise geodeetilised koordinaadid on hinnanguliselt $B = 58.96^\circ$, $L = 26.61^\circ$.



Joonis 3. FAA (vasakul) ja BA (paremal) välja mudelpindade muutused peale uute punktide kaasamist.

Kuna teadusgrandi üks eesmärke oli lisaks anomaalväljade modelleerimisele arvutada ka geoidi pinna mudel, tekkis Luusika kerget nähes koheselt küsimus, kuidas selline anomaaliade muutus võiks mõjutada geoidi pinda. Polnud muud võimalust, kui hakata „käsi mullaseks tehes“ geoidi arvutama. Võttes aluseks varasema ja uuema FAA mudelpinna, arvutati piirkonna jaoks 2 gravimeetrilist geoidi mudelit ning leiti nende omavaheline erinevus (joonis 4).



Joonis 4. Gravimeetrilise geoidi kerge Kirde-Eestis, mis on tingitud uute andmete lisandumisest alates 2010. a novembrist.

Nagu näha, on geoid u 10 km raadiusega alal kerkinud 1...3 cm võrra. Pidades silmas ± 1 cm täpsusega geoidi, on see päris märkimisväärne tulemus. Üsna sarnase +3.5 cm geoidi kerkeni jõuaks ka Ellmann & Oja (2008) õpiku lihtsustatud valemi (8.6, lk 262) rakendamisega. Täheldatud kerge on heaks näiteks, kuidas väikesel alal mõõdistatud andmestik võib muuta senist ettekujutust raskusjõuväljast. Kui nüüd joonisel 1 heita pilk Luusika kandist edela- või loodesuunas, siis jäävad silma andmetega katmata alad, kus meie teadmised raskuskiirenduse anomaaliatest ning geoidi kujust on sarnases seisus Luusika piirkonnaga enne 2010. a novembrikuud. Võib ju olla, et neil „valgete laikudega“ aladel ei leidu mingeid märkimisväärsed anomaalvälja kerkeid ega lohke, kuid ilma mõõtmisi läbi viimata pole ju võimalik seda kinnitada.

Omalt poolt siiski loodan, et nii mõnigi anomaalvälja häiriv muster on Eestimaal veel avastamata, sest otsimisrõõm peab ju jääma. Hetkel toimuvad gravimeetrilised mõõdistamised Rapla- ja Läänemaa kandis, kus ekspeditsioonid „avastamata džunglitesse“ on toonud nähtavale nii mõndagi uut. Aga neist mõõdistustest juba mõnes teises artiklis. Üks on kindel, gravimeetriliste andmetega katmata alasid (u raadiusega 10...20 km) leidub siinmail veel küllalt, seega ei saa hetkel välistada Luusika kerkega sarnaseid üllatusi. Teisisõnu, ± 1 cm gravimeetrilise geoidi mudel pole igas Eestimaa punktis veel reaalne.

Sellises olukorras võiks ju loota GNSS²/nivelleerimise andmepunktidele, mille abiga gravimeetriline geoid õigesse

² Global Navigation Satellite System.

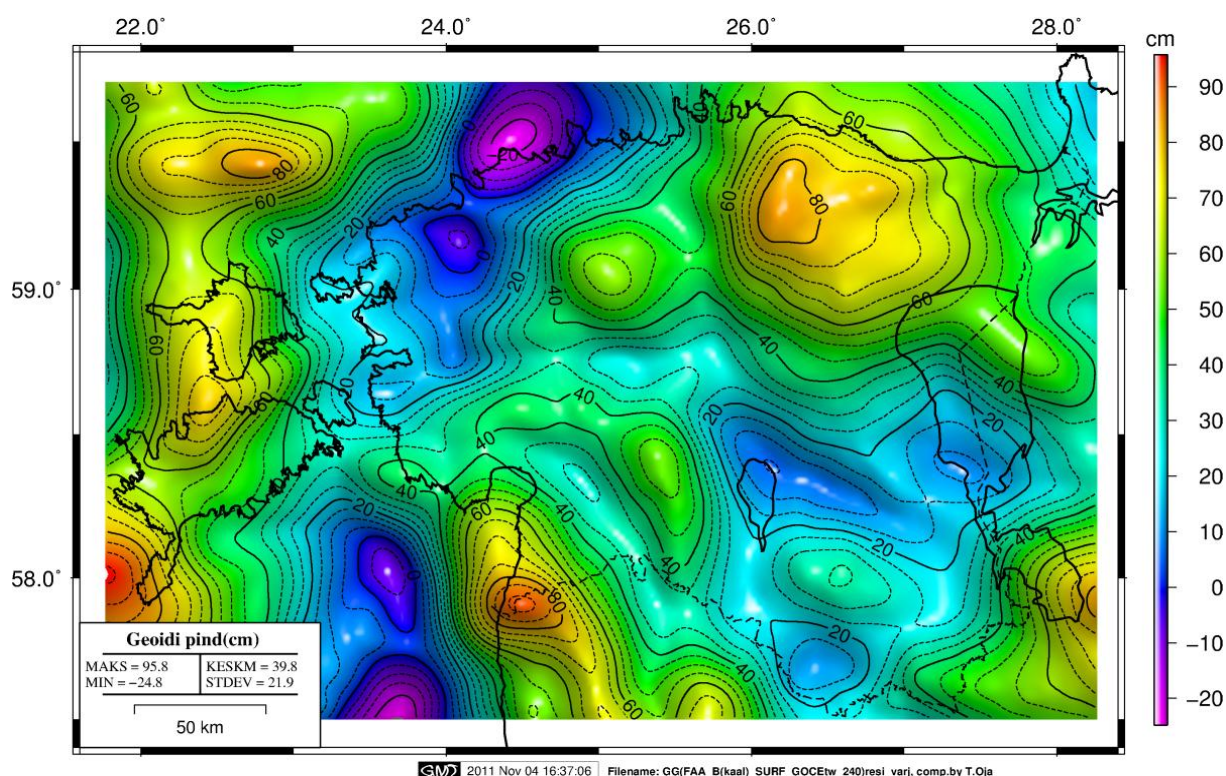
kohta nihutada ja vajadusel ka „väänata“. Sellist nihutamist-väänamist on tehtud äsja ametlikuks kuulutatud mudelpinnaga EST-GEOID2011, mis ühitati riiklike geodeetilise ning kõrgusvõrgu kõrgustega (GNSS/nivelleerimise) andmepunktide põhjal.

Joonisel 1 esitatud piirkonnas on GNSS/nivelleerimise andmestikku kaasatud geodeetilise võrgu punktid 6423, 6425, 6426, mis jäävad Luusika kerkest u 15...20 km lõunasse. On selge, et nendest pole näiteks Luusika geoidi muhu korrigeerimiseks küll mitte mingit abi loota. Kuid isegi kui kaasata korrigeerimispunktide sekka kerkenõlvale jääv 6434 (võimalik ainult peale ajamahukaid nivelleerimisi kõrvalises kohas), poleks võimalik täielikult elimineerida joonisel 4 esitatud geoidi muhklikkust. Lugeja võib ise ette kujutada, mis juhtub, kui joonise 4 nullnivoo nihutada keskpaigast veidi vasakule jääva kolmnurga kõrgusele (hetkel u 2 cm kõrgusel). Tulemuseks on, et süstemaatilised vead hakkavad mõjutama (kuigi mitte nii suurelt kui kerge ise) ka muhust kaugemale jäävaid alasid (tekib n-ö vallikraav).

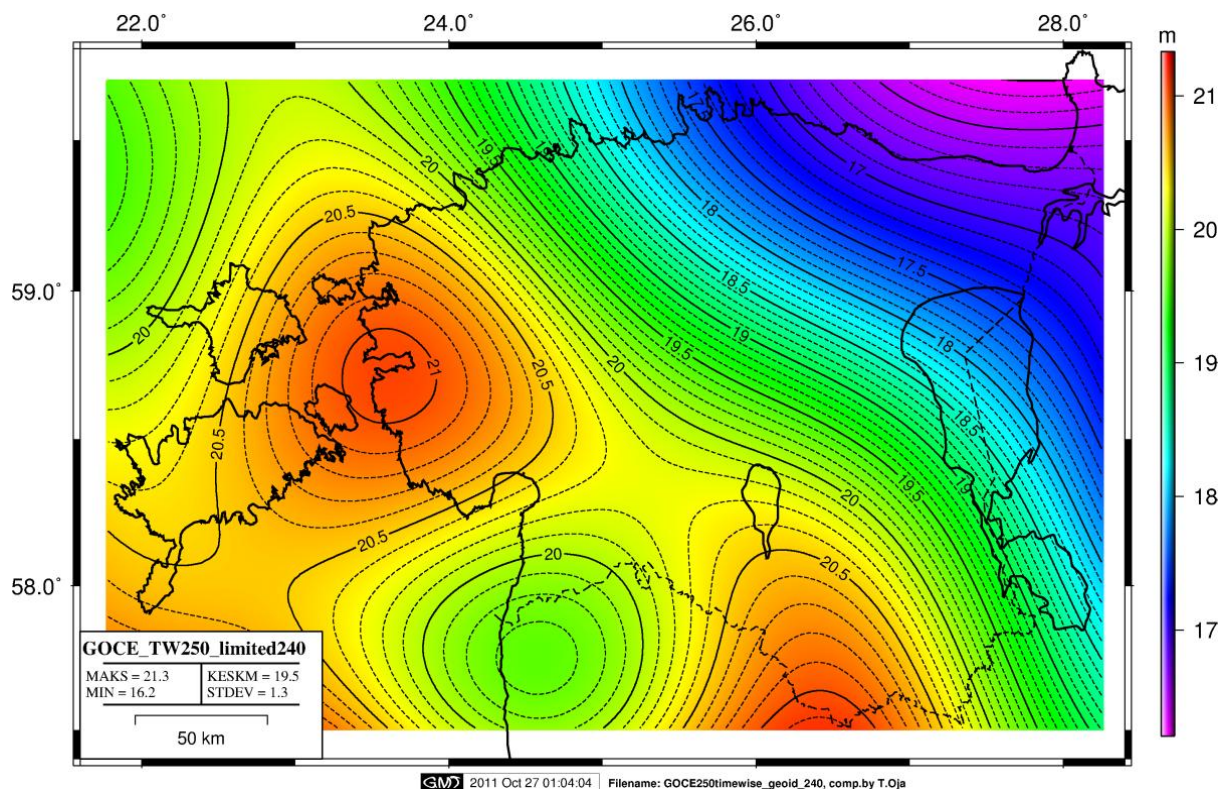
Geoidist Eestis üldiselt

Üsna levinud on arvamus, et geoidi pind Eestis on sujuv ning eriti ei muutu, välja arvatud üldine kirde-edelasuunaline kallak ning mõned muhud ning lohud siin-seal (väike muhuke nüüd ka Luusika kandis). See peaks üsna lihtsaks tegema geoidi „õigeks“ korrigeerimise GNSS/nivelleerimise andmestiku põhjal. Selle arvamuse peale esitan artikli viimased pildid, kus on esitatud gravimeetiline geoid (joonis 5) enne pikalainelise komponendi taastamist (ehk siis liitmist) globaalsest Maa raskusjõuvälja mudelist (joonis 6).

Nagu näha, kõigub lokaalse geoidi pind üsna märgatavalt. Kui joonist 6 võrrelda EST-GEOID2011 mudelpinna pildiga (vt Ellmann jt artikli joonist), siis on kerge märgata, et Eesti geoidi mudelis domineerib globaalne pikalaineline signaal. Kuid ± 1 või isegi ± 2 cm täpsusega geoidi arvutamisel ei tohiks kindlasti unustada lühilainelisi "kohaliku päritoluga" variatsioone, mis jäävad küll globaalse signaali varju, kuid oma olulise panuse annavad nemadki. Ning nende alahindamine või arvestamata jätmine ei paranda kindlasti arusaamist Eesti geoidi pinna varieeruvusest.



Joonis 5. Gravimeetrilise geoidi lokaalsed variatsioonid enne globaalse lainetuse komponendi taastamist geoidi modelleerimise protsessis. Ühikud cm!



Joonis 6. Globaalse GOCE satelliitmissiooni mõõtmiste põhjal koostatud pikalaineline geoidi muster. Ühikud m!

Kokkuvõte

Käesolev artikkel heitis pilgu 2010. a suvest käivitunud raskuskiirenduse anomaalväljade ning geoidi mudelpinna modelleerimisarvutuste kõrgipolele. Vaatluse alla tuli üks gravimeetrilistest andmetest üsna tühi piirkond Kirde-Eestis Luusika ja Venevere soo vahel, kus uute mõõtmistega selgitati välja raskuskiirenduse anomaalvälja kerge $+6...+7$ mGal ulatuses. Selle mõju geoidi pinnale hinnati ligi $+3$ cm. Omaette teema on Luusika kerke põhjused, mille selgitamiseks oleks vaja kaasata geofüüsikalisi, geoloogilisi jms andmeid ning vastavaid uurimismeetodeid.

Sarnaseid puuduliku gravimeetrilise andmestikuga kaetud alasid leidub Eestimaal veel mitmeski paigas (Jõgeva, Tartu, Rapla, Lääne, Pärnu maakond), mistõttu ei saa välistada Luusika kerkega sarnaste struktuuride olemasolu ka mujal. Enne valgete laikude katmist uute ja tihedamate mõõdistusandmetega tuleb ± 1 cm täpsusega (gravimeetrilise) geoidi arvutamisse suhtuda teatud ettevaatusega. Ka geoidi korregeerimine GNSS/nivelleerimise punktide põhjal ei vii oluliselt parematele tulemustele – nimetatud punkte on hetkel selgelt liiga hõredalt. GNSS/nivelleerimise andmestiku tihendamine tasemele, kus Luusika kerke sarnased struktuurid saaksid korregeeritud (iga paari km tagant), osutuks ebareaalseks ettevõtmise äärmiselt suure kulukuse tõttu. Selgelt parem valik on jätkata gravimeetriliste mõõdistamistega valgetel laikudel. Uued mõõdistamiskampaaniad ka hetkel käivad ning lähiaastatega on lootus kogu Eesti territoorium katta piisavalt tiheda andmestikuga ± 1 cm (ja miks mitte ka $\pm 1/2$

cm!) täpsusega geoidi arvutamiseks. Viimane ei saa toimuda küll enne riikliku kõrgussüsteemi ning selle realiseerimise uuendamist.

Kokkuvõtteks, raskuskiirenduse anomaalväljade ning geoidi modelleeringud Eesti aladel on oluliseks osaks riigi geodeetilise süsteemi ja raamistiku funktsioneerimisel. Selleks on nähtud hulga vaeva, ning tagatud on edasinegi vaev, kuid samas õnneks ka avastamisrõõm ning rahulolu üha täpsustuvatest Maa raskusjõuvalja mudelitest.

Märkused

Raskuskiirenduse anomaalvälja ja geoidi modelleerimiseks ning kaardipiltide joonistamiseks on kasutatud vabatarkvara GMT (gmt.soest.hawaii.edu). Raskuskiirenduse anomaalväljad võrgustati muudetava elastsusega kõverpinna (ingl continuous curvature with adjustable tension) meetodil, gravimeetrilise geoidi undulatsiooni võrgustik arvutati Stokes'i integraalvalemi tasapinnalisest lähendusest 2-mõõtmelise Fourier' kiire teisenduse (2D FFT) kaudu.

Viited

1. Ellmann, A., Kall, T., Oja, T. (2009): Toward unification of terrestrial gravity data sets in Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 58(4), 229 - 245
2. Ellmann, A., Oja, T. (2008): Füüsikalise geodeesia ja gravimeetria alused. Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 294 lk