

Kosmosetehnoloogia rakendused geoidi ja gravitatsioonivälja täpsustamiseks Eesti alal

Artu Ellmann¹, Tõnis Oja², Harli Jürgenson³ – ¹Tallinna Tehnikaülikool, ²Maa-amet, ³Eesti Maaülikool, e-post: artu.ellmann@ttu.ee

Eesti Teadusfond toetas 2008.–2011. a teadusgrandiga ETF7356 uuringuid teemal *Kosmosetehnoloogia rakendused geoidi ja gravitatsioonivälja täpsustamiseks Eesti alal*. Et granditegevus lõppes 2011. a alguses, siis on kohane saavutatud tulemused kokku võtta. Siinkohal piirdume vaid väga põgusa ülevaatega, kuna plaanis on koostada eraldi trükis, mis käsitleks granditegevust ning selle tulemusi juba üksikasjalikult. Mainigem, et granditegevuse üksikuid etappe on kirjeldatud juba ka ajakirja *Geodeet* mõnes eelnevas numbris (nr 38–40).

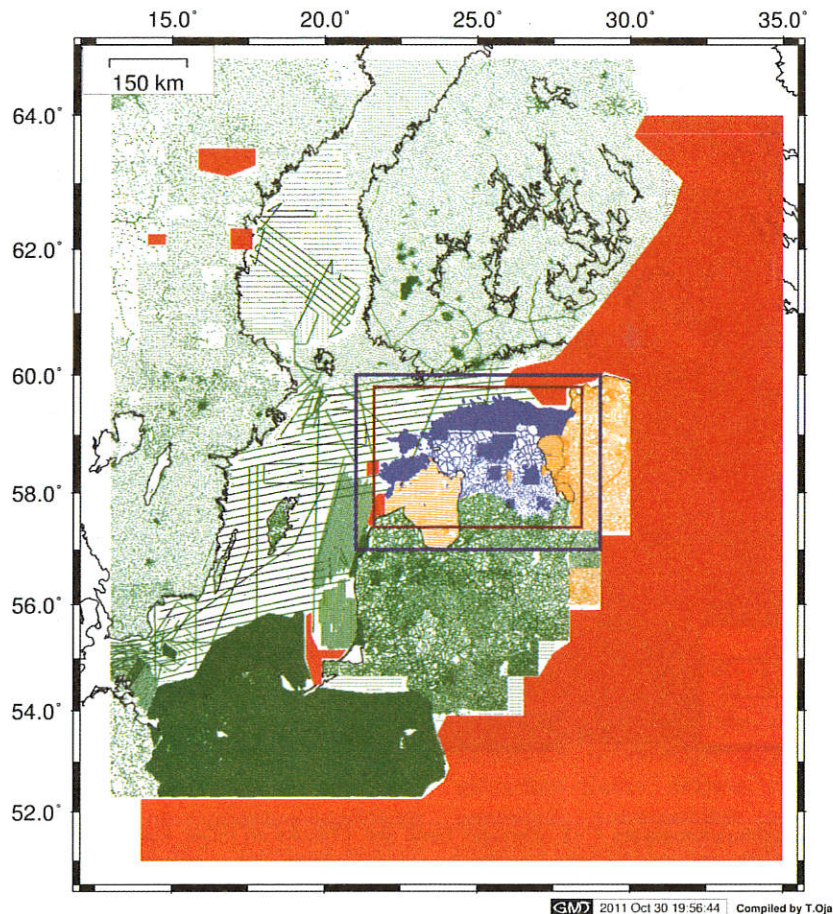
Granditeema terviktausta tutvustamiseks on kohane märkida, et paljudes inseneriülesannetes on vajalik teada füüsikalisi kõrgusi ning kõrgusmäärangu lähtepinna (nimetatakse seda geoidiks) kuju väga täpselt. Geoidi kuju saab arvutada Maa gravitatsioonivälja (veelgi konkreetsemalt – raskuskiirenduse anomaaliate) andmetest. Viimase aasta kümne kosmoseseire andmed on oluliselt täpsustanud teadmisi Maa gravitatsiooniväljast, kusjuures globaalse geoidi kuju „pikalaineline“ komponent on määratud juba mõne sentimeetri täpsusega. See omakorda võimaldab parendada ka regionaalseid geoidimodeleid. Nii oligi käesoleva granditegevuse eesmärgiks 1 cm täpsusega Eesti geoidimodeli arvutamine ja selleks töötati välja optimaalne lähenemisviis. Siin kasutasime globaalse geoidi pikalainelise trendi kombineerimist piirkondlike terrestriiliste mõõtmistulemustega (lühilaineline komponent), seega mõlemad andmetüübid on ühtlasi sisendandmeteks modifitseeritud Stokes'i (integraal)valemis. Paraku on meie varasematest uurimustest ilmnenu lubamatud vead Läänemeremaade andmetes. Seetõttu viidi eelnevalt läbi geoidiarvutuseks vajalike lähteandmete (gravimeetriliste mõõdistuste andmed, GPS/nivelleerimise punktid, digitaalsed topograafilised mudelid, globaalsed geopotsentsiaalvälja mudelid) kogumine, süstematiseerimine, kvaliteedi kontroll ja vigade elimineerimine. Gravimeetriliste andmete ettevalmistamine ongi üks töomahukamaid ning vastutusrikkamaid etappe igas geoidiarvutuses. On ilmne, et lähteandmete ebapiisav kvaliteet võib lagundada parimadki teoreetilised parendused arvutusmetoodikas. Täiendavalt oli vajalik (õnneks ka võimalik!) teha geodeetilisi mõõtmisi puudulikuks osutunud andmestikuga piirkondades Eestis.

Kogutud punktandmete põhjal (ligikaudu pool miljonit punkti, vt joonis 1) koostati tervet Läänemere regiooni kattev ühtlane (sammuga 1'x2' kaareminutit, ca 1,8 km x 1,8 km) gravianomaaliade võrgustik, vt joonis 2. Siinjuures oli abiks SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) ja LIDAR andmetel põhinev hübriidmaastikumudel.

Saadud andmetega arvutati 1'x2' sammuga gravimeetiline geoidimudel GRAV-GEOID2011, mis seejärel ühildati Eestis kehtiva geodeetilise süsteemiga. Selleks korregeeriti gravimeetrilist geoidimodelit riikliku geodeetilise võrgu punktide EUREF-EST97 ellipsoidaalsete ja Balti 1977 kõrgussüsteemi (BK77) normaalkõrguste väärtuste põhjal, tulemuseks mudelpind EST-GEOID2011, vt joonis 3. Märkimist väärib, et gravimeetrilise geoidimodeli arvutamiseks kasutati gradiomeetrilise satelliidi (GOCE – *Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*) uusimate andmete põhjal koostatud globaalset geopotsentsiaali mudelit GO_CONS_GCF_2_TIM_R2.

Jääkhälbed gravimeetrilise geoidi ühildamisest geodeetilise ja kõrgusvõrgu kõrgusväärtustega võimaldasid hinnata mudelpinna EST-GEOID2011 täpsuseks hetkel $\pm 1,3$ cm. See täpsushinnang on otseses sõltuvuses EUREF-EST97 ellipsoidaalsete ja BK77 normaalkõrguste väärtuste täpsusest, lisaks on see mõjustatud maakerkest. Testarvutused, kuhu kaasati uusimad nivelleerimisandmed ning maakerke mudeli prognoosid, parendasid mudeli EST-GEOID2011 täpsushinnangut väärtuseni ± 1 cm ja alla sellegi. Seega peale uue kõrgussüsteemi realiseerimist ning maakerke usaldusväärse mudeli kaasamist peaks geoidi mudeli täpsus ± 1 cm ka käesolevast gravimeetrilisest geoidimodelist lähtudes saavutatav olema.

Märkigem, et geoidi mudel on riikliku infrasysteemi oluline osa. Granditegevuse tulemusena saadi täpsem geoidimudel kui senine Keskkonnaministri 05.02.2004. a määrusega ametlikustatud geoidimudel EST-GEOID2003 (kahe geoidimodeli omavaheliste erinevuste arutelu leiab samuti käesolevast ajakirjast, vt Oja jt). Nii kehtestatigi Keskkonnaministeeriumi 26.10.2011 määrusega nr 64 geoidimudel EST-GEOID2011 Eesti Vabariigi geodeetilise süsteemi koostisosana.

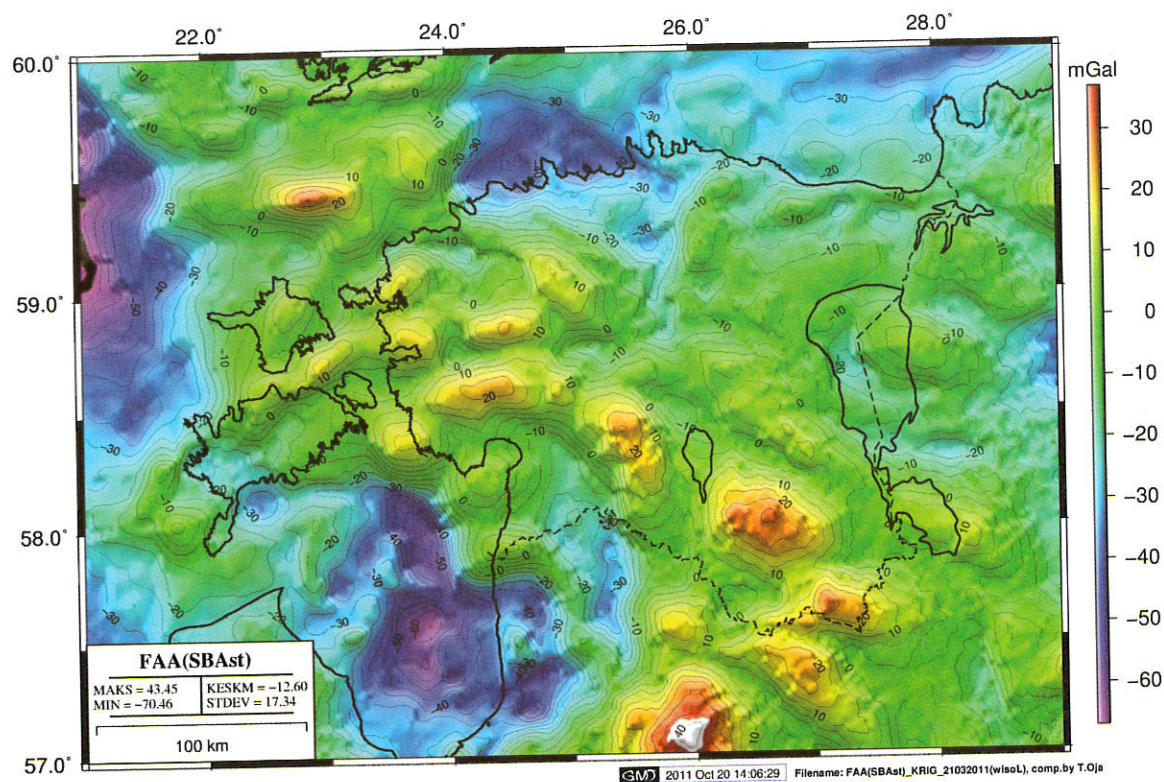


Joonis 1. Teadusgrandi ETF7356 arvutusteks koostatud gravimeetriline andmebaas u 0,5 mln punktiga. Sinised punktid – Eesti gravimeetriline andmestik, oranž – NSV Liidu geoloogiaettevõtete poolt mõõdistatud andmestik, roheline – Põhjamaade Geodeesia komisjoni andmebaas (seisuga 2001) ja Läti, Leedu uuemad gravimeetrilised andmed, punane – kõrgresolutsioonilise globaalse geopotentsiaali mudeli EGM2008 põhjal arvutatud punktid (sammuga 1'x2') andmetühjadele aladele. Kastidega on tähistatud joonistel 2 ja 3 kujutatud uurimisalad.

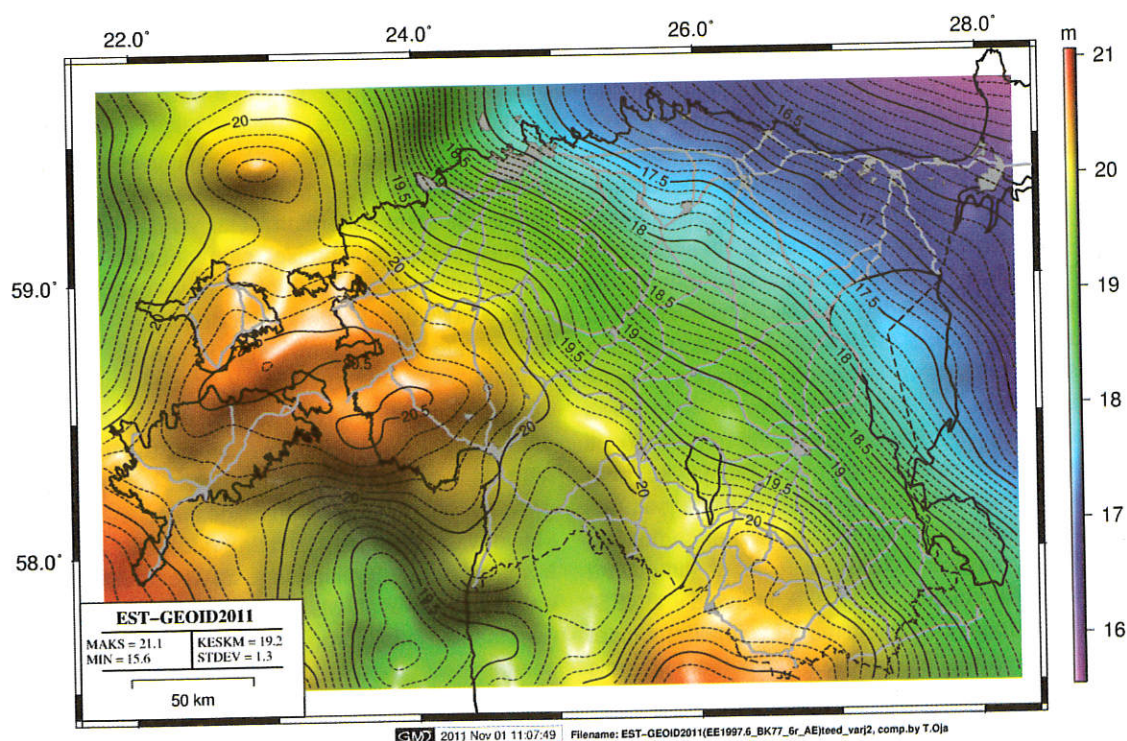
See osutub kindlasti vajalikuks Maa-ametile, Veeteede Ametile, Eesti Geoloogiakeskusele ja teistele Keskkonnaministeeriumi ning Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi haldusalas tegutsevatele asutustele. Potentsiaali mudeli kasutamiseks näeme ka Eesti Kaitsejõududes ning sisejulgeolekuasutustes. Võimaldab ju uus geoidimudel GNSS-tehnoloogiaga (*Global Navigation Satellite System*) saadud kõrguste täpset ümberarvutamist Eesti kõrgussüsteemi ametlikeks kõrgusteks (teisiseõnu, üleminekut geodeetilistelt kõrguselt normaalkõrgusele). Mainigem, et ka üleminekul nn Amsterdamini nullile (mis nüüd vist pisut enneaegselt sai meedias maha kuulutatud!) saab kasutada sedasama GRAV-GEOID2011 mudelit, kuid siis juba timmituna Amsterdamini kõrgussüsteemi kõrgusi omavate GNSS-nivelleerimise punktidega. Uus geoidimudel võimaldab täpset GNSS-kõrgusmäärangut riiklikus kõrgussüsteemis, mis seega on kiireks ning suhteliselt odavaks alternatiiviks tehnilisele nivelleerimisele. Esmajoones on tulemsed kasulikud geodeetiliste inseneriülesannete lahendamisel kogu riiki hõlmavate objektide (näiteks raud- ja maanteed,

side- ja jõukaablid jne) rajamisel ning haldamisel. Usaldusväärse geoidimudeli olemasolu on eelduseks taoliste tööde kulutuste vähendamiseks, samuti omab see olulist rolli rajatiste ekspluateerimisel ning ohutuse tagamisel. Samuti on geoidi täppismudeli olemasolu eelduseks klassikaliste (seni küllaltki kallite!) geodeetiliste võrkude rajamise põhimõtete revideerimiseks, ja seda just lihtsustamise suunas.

Hinnanguliselt annavad käesoleva projekti tulemsed ainekst mitmesugusteks interdistsiplinaarseteks analüüsideks ning tõlgendusteks. Esmajoones pakuvad geoidi ja gravitatsioonivälja (ja ennekõike selle ajalisi muutumisi) kirjeldavad mudelid teistele geoteadustele huvi näiteks kliimauuringutes, mitmesuguste loodusnähtuste, Maa siseehituse ja jätkuvalt Maad vormivate füüsikaliste protsesside (isostaasia, jääajajärgne maatoos jne) põhjuste uurimisel ja seletamisel. Veealade detailsem geoidimudel, kombineerituna merepinna topograafia ning atmosfääriprotsessidega (nt tormituuled), peaks võimaldama suurema täpsusega prognoosida rannikualasid tabavaid üleujutusi, nende ulatust ning võimalikku kahju.



Joonis 2. Raskuskiirenduse vabaõhuanomaaliade 1'x2' võrgustik Eesti alal. Ühikuks on mGal, kontuuridevahemik on 5 mGal. Negatiivsed ekstreemumid Riia lahes ja Põhja-Eestis viitavad väiksema tihedusega rabakivigraniidi massiividele aluskorras. Positiivsete anomaaliade vöönd suunaga kagust loodesse ühtib aga süvamurrangute vöönditega Pihkva-Paldiski ja Saaremaa-Mustvee joonel.



Joonis 3. Mudelpind EST-GEOID2011 (koos suuremate asulate ja peamiste maanteedega), mis on rakendatav EUREF-EST97 ellipsoidaalsete kõrguste ümberarutamiseks BK77 kõrgusteks ja vastupidi. Eesti alal kahanevad geoidi undulatsiooni väärtused (referentsellipsoidi GRS-80 suhtes) edela-kirde suunas enam-vähem ühtlaselt, 21...16 meetrini. Isojoonte vahe on 0,1 m.

Nüüd mõni sõna ka granditegevuse korralduslikust poolest. Granditegevust koordineeris TTÜ geodeesia õppetool (prof. A. Ellmann oli määratud grandihoidjaks) koostöös Eesti Maaülikooli geomaatika osakonna, Maa-ameti ja Eesti Geoloogiakeskusega. Tänuväärset võimaldasid loetletud asutused granditöödeks kasutada oma geodeetilisi seadmeid, samuti aitasid nad kanda jooksvaid kulusid ning võimaldasid oma töötajatel panustada ühistevusesse.

Grandietappide tulemuste tutvustamiseks ning edasise töö koordineerimiseks korraldati perioodiliselt laiendatud osalejaskonnaga koosolekuid ja seminare. Tulemuste tutvustamiseks ja erialaste teemadega kursis olemiseks oli vajalik pidevalt osaleda teaduskonverentsidel. Saadi ju kuulajatelt operatiivset tagasisidet projekti jooksvate tulemuste kohta. Projekti jooksul said kõik selleks soovi avaldanud võimaluse ettekandega osaleda rahvusvahelisel konverentsil või töögrupi koosolekul.

Tuleb nimetada, et käesolev projekt koondas esimest korda ühise mütsi alla sellise hulga gravitatsioonivälja modelleerimisega tegelevaid Eesti spetsialiste. Uurimistöö läbiviimises osalevaid kraadiõppureid (doktorandid-magistrandid) saime toetada ka osalise stipendiumiga. Olid ju nemad ühtlasi granditegevuses suurima koormuse kandjad, saades sellega oluliselt edasi arendada oma uurimistööd. Nende hooleks jäi nii mõõdistusmetoodikate väljatöötamine kui esialgsed arvutused. Uurimuse teadustulemusi on publitseeritud eelretsenseeritavates ajakirjades ja konverentsikogumikes, aga ka eestikeelses populaarteaduslikus ajakirjas Horisont. Seni on granditeemadel kaitstud neli magistriväitekirja, loodetavasti saavad sellest mõningast ainet praegu käsilolevad doktoriväitekirjad. Olgu

siinkohal loetletud lisaks autoritele veel teised granditegevuses osalenud: Tarmo All (Eesti Geoloogiakeskus / Keskkonnaministeerium), Anti Gruno (Maa-amet / TTÜ), Ahti Bloom (Maa-amet / TTÜ), Erkki Mäekivi (TTÜ), Maaülikoolist Tarmo Kall, Aive Liibusk, Kristina Türk, Martin Michelson, Tatjana Nikolenko ja Margis Sulaoja.

Rõõmustavalt on suur osa eelloetletutest osalemas uues teadusgrandis ETF8749 *Läänemere ja Eesti rannikumere kõrgusraamistiku määramine veetaseme monitooringu ja satelliitltimeetria andmetest* (grandihoidja Dr H. Jürgenson). Saab seda ju haakuva temaatika tõttu käsitleda n-ö teatepulga edasiandmisena.

Kokkuvõtvalt – teadusgrant ETF7356 võimaldas ühiselt tegutsedes rakendada mitmeid innovatiivseid mudeleid ning meetodikaid, lahendada hulgaliselt probleeme ning esitada tulemina täpsemad ja usaldusväärsemad (võrreldes senistega) raskuskiirendusvälja ja geoidi mudelid Eesti alale. Samas saavutatule puhkama jääda pole võimalust ega tahtmiski, sest neis valdkondades jätkub tegevust ju veel küllaga. Teadmised Maa raskusjõuvälja ning geoidi osas täienevad pidevalt, seda tänu nii globaalsete mudelite parendamisele rahvusvahelises ühistevuses (kosmose-satelliitide, -tehnoloogia abiga) kui ka meie enda ettevõtmistele Eestis. Näiteks on veel potentsiaali edasiselt parendada gravimeetrilist geoidimudelit, mille täpsus nii mõneski Eestimaa nurgas võib jääda tagasihoidlikumaks kui eeldatud (vt T. Oja artiklit käesolevas ajakirjas). Nii jätkubki praegu gravimeetrilise andmestiku täiendamine „valgete laikudega aladel“ nii Maa-ameti gravimeetria mõõterühma tegevusena kui uue teadusgrandi uuringute raames.