

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Magistritöö geograafias (30 EAP)

**Globaalsete kõrgusmudelite ASTER, MERIT, SRTM ja TanDEM-X
vertikaalse täpsuse hindamine**

Sander Ahi

Juhendajad: PhD Evelyn Uemaa,
PhD Merle Muru

Tartu 2020

Annotatsioon

Kõrgusmudeleid (DEM) ja nende derivaate kasutatakse üleujutuste prognoosimiseks, hüdroloogilises modelleerimises, linnade planeerimises jne. Varasemalt on globaalsete ASTER ja SRTM kõrgusmudelite täpsust korduvalt hinnatud, kuid MERIT ja TanDEM-X on vähe uuritud ning nende täpsus varieerub. Antud töös on analüüsitud ASTER, SRTM, MERIT ja TanDEM-X globaalsete kõrgusmudelite täpsust võrreldes kohalike võimalikult täpsete referentsmudelitega. Globaalsete kõrgusmudelite piksli suurused ühitati referentsmudelitega LiDAR või Pleiades-1A. Analüüsi oli sõltuvalt uurimisalast kaasatud 99 – 226 miljonit pikslit ning valitud meetodika võimaldas lisaks vigade kvantifitseerimisele hinnata ka pikslisisest väärtuste varieerumist. Globaalsete mudelite lahutamisel referentsmudelitest leiti veaarstrid. Lisaks arvutati kirjeldavad statistikud (keskmine viga, mediaanviga, ruutjuur ruutkeskmisest veast jne) kõikide uurimisalade kohta üldiselt ning lisaks analüüsiti viga ka nõlvakalde, nõlva ekspositsiooni ja maakatte klasside kaupa. Tulemustest selgus, et globaalsed kõrgusmudelid kujutavad kõrgema ja tihedama taimestikuga piirkonda referentsmudelitest kõrgemana ning suured erandid ilmnevad keeruka reljeefiga aladel. Vead suurenevad nõlvakalde kasvades ning on olemas seos nõlva ekspositsiooni ja vigade väärtuste vahel. Madalama resolutsiooniga MERIT ja TanDEM-X mudelite vead kasvavad nõlvakalde suurenedes kiiremini kui kõrgema resolutsiooniga ASTER või SRTM kõrgusmudelitel. Kokkuvõttes võib öelda, et kõrgusmudelite viga sõltub instrumendi omadustest, mõõtmise ja mudeli genereerimise parameetritest, uurimisala reljeefist ja maakattest.

Märksõnad: Kõrgusmudel, vertikaalne täpsus, valideerimine, maakate, reljeef, kaugseire

CERCS kood: P510 – Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia; T181 – Kaugseire

Abstract

Digital elevation models (DEM) and its derivatives are being used in flood modelling, hydrological modelling, city planning etc. ASTER and SRTM digital elevation models accuracy have been assessed in several previous studies, but MERIT and TanDEM-X model's accuracy have been less validated. In the current thesis, the accuracy of global elevation models ASTER, SRTM, MERIT and TanDEM-X were validated against local high-precision elevation models (LiDAR, Pleiades-1A). Global elevation models were resampled to the reference model resolution resulting in 99 – 226 million pixels for each study area. The error rasters were generated by subtracting global elevation models from the local reference models. To estimate the errors, descriptive statistics (median, mean, RMSE etc) were calculated. Analysis was done separately for the overall area and by different aspect, slope and land cover classes. Global elevation models depict areas with dense vegetation above reference data and large outliers occur in the areas with complex relief. Errors increase with slope and in certain aspect in high slope areas. The errors increase with slope more for lower resolution MERIT and TanDEM-X. In conclusion, the errors depend on the specs of the measurement instrument, model generation, relief and land cover of the study area.

Keywords: DEM, vertical accuracy, validation, land cover, relief, remote sensing

CERCS code: P510 – Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology; T181 – Remote sensing

Sisukord

Sissejuhatus	5
1 Teoreetiline taust	8
1.1 Kõrgusmodelid ja nende võimalikud vigade allikad.....	8
1.1.1 ASTER GDEM V2	11
1.1.2 SRTM V3.....	12
1.1.3 MERIT DEM	13
1.1.4 TanDEM-X	14
1.1.5 Pleiades-1A	16
1.1.6 LiDAR.....	16
2 Andmed ja meetodika	19
2.1 Andmed	19
2.1.1 Kõrgusmodelid.....	19
2.1.2 Maakate.....	20
2.2 Uurimisalad	20
2.2.1 Eesti uurimisala.....	20
2.2.2 Hiina uurimisala.....	22
2.2.3 Norra uurimisala	23
2.2.4 Uus-Meremaa uurimisala.....	25
2.3 Meetodika.....	26
2.3.1 Andmete eeltötlus	26
2.3.2 Vigade hindamine	29
3 Tulemused ja arutelu	31
3.1 Eesti uurimisala	31
3.2 Hiina uurimisala	37
3.3 Norra uurimisala.....	43
3.4 Uus-Meremaa uurimisala	48
4 Järeldused	54
Kokkuvõte	58
Summary	59
Tänuavaldused	60
Kasutatud kirjandus	61
Lisad	68
Lisa 1. Copernicuse globaalse maakatte klassifikatsioon	68

Lisa 2. Uurimisalade kõrgusmodelite vearastrite histogrammid.	69
Lisa 3. Eesti uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa....	70
Lisa 4. Eesti uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.....	72
Lisa 5. Eesti uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.....	74
Lisa 6. Hiina uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa...	76
Lisa 7. Hiina uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.....	78
Lisa 8. Hiina uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.....	80
Lisa 9. Norra uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa ..	82
Lisa 10. Norra uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.....	84
Lisa 11. Norra uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa ...	85
Lisa 12. Uus-Meremaa uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.....	87
Lisa 13. Uus-Meremaa uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.....	89
Lisa 14. Uus-Meremaa uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.....	91

Sissejuhatus

Kõrgusmodelite laialdane kasutamine paljudes kriitilise tähtsusega eluvaldkondades on suurendanud nõudlust täpsete kõrgusmodelite järele (Hu et al., 2017). Oluliste teguritena kõrgusmodeli valikul topograafiliste muutuste hindamisel on erinevad autorid välja toonud ajalise resolutsiooni, mudelite hankimise rahalise maksuvuse, ulatuse ja täpsustaseme (Dewitt et al., 2015). DeWitt (2015) toob oma artiklis välja, et mitmesugused kõrgusmodelid võivad kirjeldada erinevaid pindu ning need on arvatud erisuguste meetodikate alusel. See toob esile vajaduse tuvastada kõrgusmodelite ebatäpsused, et neid saaks seejärel arvesse võtta.

Viimase paarikümne aasta jooksul on loodud kaugeire abil mitmeid globaalseid kõrgusmudeleid. Tuntumad nendest on ASTER GDEM, SRTM DEM ja AW3D30 DEM, kuid antud nimekirja pole lõplik ja uusi produkte toodetakse juurde. Nende ühised väga olulised omadused on globaalne katvus ning keskmine resolutsioon (Hu et al., 2017). Globaalseid kõrgusmudeleid on mitmesuguste uurimisalade näitel varasemalt korduvalt uuritud ning nende vertikaalset täpsust erinevate referentsmudelite või -punktide suhtes hinnatud.

Bayburt et al. (2017) analüüsisid WorldDEM kõrgusmodelit võrreldes seda AW3D30, SRTM DSM-i (*Shuttle Radar Topography Mission*), ASTER GDEM2 (*ASTER Global Digital Elevation Model*) ja LiDAR DSM-iga (DSM - maakatte kõrgusmodel). Autorid tuvastasid esmalt LiDAR DSM-i (referentsmodel) ja WorldDEM kõrgusmodelite vahelised horisontaalsed nihked ning kasutades DEMSHIFT tarkvara eemaldasid need kui süsteemse vea. Analüüsi tarbeks eristasid autorid metsaga kaetud uurimisala kogu uurimisalast ja metsaga katmata piirkonnast. Seejärel arvutati filtreeritud referentspinna (DTM – maapinna kõrgusmodel) ja WorldDEM mudelite vaheline kõrguste erinevus ja leiti selle seos kõrguste vigade kaardiga, mis uuritava mudeliga kaasas oli. Lisaks analüüsiti juhusliku punkti ja naabruses paiknevate punktide vigade väärtusi ja võrreldi neid standardhälbega. Uuritud kõrgusmodelitest oli kõige täpsem WorldDEM, mille normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD) on erineva nõlvakalde klasside ja metsa maakatteklassiga piirkondades kõige madalam (kogu ala kohta NMAD=1,33 m). WorldDEM kujutas pinnamoe detaile paremini kui teised mainitud kõrgusmodelid. Lisaks leiti oodatav seos vigade väärtuste ja nõlvakalde vahel. Samamoodi tuvastati suuremad vead metsaga kaetud piirkonnas. Dewitt et al. (2015) uurisid kõrgusmodelite täpsust topograafiliste muutuste hindamise kontekstis West Virginia osariigis paikneval uurimisalal. Uurimistö eesmärgiks oli tuvastada erinevat tüüpi vigasid, et nendega oleks võimalik tulevastes analüüsidest arvestada. Referentsmudelina rakendati LiDAR DEM-i. Analüüsiti USGS topograafilise kaardi kõrgusjoontest tuletatud mudelit, SRTM kõrgusmodelit, SAMBDEM (*Statewide Addressing and Mapping Board Digital Elevation Model*) kõrgusmodelit ja ASTER GDEM2 kõrgusmodelit. Arvutati kirjeldavad statistikud, mille hulka kuulusid miinimum, maksimum, standardhälve, keskmine, asümeetriakordaja, ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE), mediaan, NMAD ja 68. ning 95. protsentil. Lisaks sooritati Shapiro Wilk test ja t-test ning võrreldi vigade väärtusi reljeefi ja erinevate maakatteklassidega. Madalaim RMSE oli USGS topograafilise kaardi alusel koostatud kõrgusmodelil ja SAMBDEM-il (vastavalt 6,14 m ja 3,05 m). Peamiste vigade allikatena nähti reljeefi ja maakatet. Walczak et al. (2016) analüüsisid kõrgusmodelite täpsust poldrite ruumala hindamise kontekstis Poolas paikneva uurimisala näitel. Autorid võrdlesid nelja kõrgusmodelit: SRTM, ASTER GDEM, aerofotodest fotogramm-meetriliselt tuletatud digitaalne kõrgusmodel ja referentsmodel LiDAR DEM (mis oli täiendatud globaalse asukoha määramise punktidega (GPS)). Esmalt hinnati referentsmudeli resolutsiooni mõju poldrite ruumalale. Seejärel võrreldi erinevate digitaalsete kõrgusmodelite alusel arvatud poldrite ruumalaid ja leiti referentspinna ja

analüüsitava kõrgusmodeli vahelised korrelatsioonid. Üleujutuste kaardistamisega seoses uurisid globaalsete kõrgusmodelite täpsust Khalid et al. (2016). Malaisia mandriosaal paikneva mitme uurimisala näitel võrdlesid autorid maapinnatõeseid GPS-punkte ASTER GDEM, SRTM ja GMTED (*Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010*) andmestikega. Autorid leidsid maapinnatõeste punktide ja analüüsitavate mudelite vastavate väärtuste vahelised kõrguse erinevused ning leidsid neile juba eelpool mainitud kirjeldavad statistikud. Lisaks leiti ka DEM-ide omavaheline korrelatsioon. Kõige madalama RMSE saavutas antud uurimisalal SRTM (6,054 m). Seejärel parandati SRTM kõrgusmodelit saadud kalibreerimisteguri valemi abil. Uut mudelit võrreldi antud piirkonna rannikualal mõõdistatud LiDAR kõrgusmodeliga. RMSE väärtuseks saavutati 0,449 m.

Kõrgusmodelite täpsust on võimalik analüüsida kasutades erinevaid meetodeid ja statistikuid. Höhle ja Höhle (2009) soovivad kasutada vigade hindamiseks mediaani, NMAD-i ja kvantiile. Nad ilmestavad nende kasulikkust fotogramm-meetriliselt ja aerolaserskaneerimise teel saadud digitaalsete kõrgusmodelite näitel. Autorite poolt soovitatud meetodika näeb ette järgmist: referentsandmete ja uuritava mudeli väärtuste erinevuste arvutamine, saadud andmestiku jaotuse uurimine histogrammi ja tihedusfunktsiooni abil, normaaljaotuse hindamine, kirjeldavate statistikute arvutamine, mitteparameetriselise jaotuse korral tõhusamate statistikute nagu kvantiilide kasutamine. Hirano et al. (2003) valideerisid GPS-punktide alusel nelja uurimisala näitel ASTER kõrgusmodeli täpsust. RMSE tulemuseks saadi 7 – 15 m. Gorokhovich ja Voustianiouk (2006) arvutasid SRTM kõrgusmodeli vertikaalset täpsust kahe uurimisala näitel. Võrdluseks kasutati GPS-punkte. Oluliste tulemustena saadi keskmised vead $7,58 \pm 0,60$ m ja $4,07 \pm 0,47$ m. Lisaks tuvastati tugev korrelatsioon nõlvakalde ja ekspositsiooniga. Holmes et al. (2000) arvutasid USGS topograafilise kaardi alusel loodud kõrgusmodeli vertikaalse täpsuse mõõdikud. Lisaks kirjeldavatele statistikutele loodi mitu stohhastilist simulatsiooni koos semivariogrammi mudelitega, et analüüsida vigade ruumilist jaotust ja korrelatsiooni. Artikli eesmärgiks oli hinnata kõrgusmodeli täpsuse mõju maapinna modelleerimisele. Näidiseksperimentina arvutati iga simulatsiooni kohta mitmed maastikuatribuudid (nõlvakalle ja teised hüdrooloogilised parameetrid). Suurimad vead tuvastati jõeorgudes ja muudes järsema reljeefiga piirkondades. Hodgson et al. (2003) võrdlesid nelja erinevat mõõdistamise meetodit: aerolaserskaneerimine, interferomeetriselise tehisaradar, kõrgusjoontest tuletamine ja stereokorrelatsioon (stereofotogramm-meetria). Võrreldi võra katvuse mõju mudeli täpsusele. Kõige suurema täpsuse saavutasid LiDAR-ist ja kõrgusjoontest tuletatud kõrgusmodel ($0,93$ m ja $7,43$ m). Lisaks võrreldi kõrgusmodelite vigasid maakatte ja nõlvakaltega.

Kõik eelpool nimetatud uurimused kasutasid mudelite hindamisel teatud referentsallikat ehk maapinnatõest lähteandmestikku, mille viga on hinnanguliselt alla 1 meetri. Hindamisel kasutati erinevaid statistilisi meetodeid või väljundeid nagu näiteks kirjeldavad statistikud, histogrammid, semivariogrammid ja korrelatsioon- ning regressioonanalüüsid kõrgusmodelite endi ja kõrgusmodelite ning sõltumatute tunnuste (referentsallika kõrgus, nõlvakalle, nõlva ekspositsioon, maakate) vahel. Lisaks on uuritud tühede (*void*) mõju digitaalsetele kõrgusmodelitele (Liu et al., 2019).

Autorile teadaolevalt ei ole tehtud kõrgusmodelite vigade hindamist süstemaatilisemalt mitmel erineva reljeefi ja maakattega uurimisalal ning kasutades referentsmudelina LiDAR andmeid ASTER, MERIT, SRTM ning TanDEM-X mudelite täpsuse hindamiseks. Varasemalt on ASTER, MERIT, SRTM ja TanDEM-X mudeleid küll koos hinnatud (Gesch, 2018), kuid kasutatud on enamasti ühte uurimisala ning geodeetilisi kontrollpunkte. Viimaste arv on mitu suurusjärku

väiksem antud uurimuses kasutatud referentsallikate pikslite arvust. Hirt et al. (2010) võrdlesid omavahel SRTM, Austraalia regionaalset GEODATA DEM-9S ver3 ja ASTER GDEM1 kõrgusmudeleid. Mudelite omavahelisse võrdluse kaasati 1 miljard punkti, kuid valideerimisel kasutati 7303 geodeetilist kontrollpunkti ja nivelleerimise reeperit.

Antud töö eesmärgiks on kvantifitseerida globaalsete kõrgusmudelite vigade suurused, asukohad ja seejärel analüüsida saadud tulemuste võimalikke põhjuseid. Töös võrreldavad globaalsed kõrgusmudelid on ASTER (NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, 2009), MERIT (Yamazaki et al., 2017), SRTM (USGS, 2015) ja TanDEM-X (Rizzoli et al., 2017). Maapinnatõese andmeallikana on kasutatud laserskaneerimiselt saadud mudelit ehk LiDAR DEM-i ja Hiina uurimispiirkonnas Pleiades-1A sensori andmetest tuletatud kõrgusmudelit (Middleton et al., 2016).

Töö väärtus seisneb selles, et kokku on võetud neli erineva reljeefi ja maakattega uurimispiirkonda erinevatest riikidest. Samuti on kõik referentsallikad 1 meetrise resolutsiooniga. See tähendab, et viga hinnatakse suurema arvu väärtuste alusel. Kuna madalama resolutsiooniga globaalsed kõrgusmudelid ühitatakse kõrgresolutsioonilise referentsmudeliga, on võimalik analüüsida pikslisisest varieerumist, mida senimaani on vähe tehtud (Yamazaki et al., 2017). Lisaks on MERIT DEM kui võrdlemisi uus produkt siamaani vähe uuritud (Archer et al., 2018; Gesch, 2018; Hirt, 2018; Liu et al., 2019).

Uurimistöös püstitati järgnevad hüpoteesid:

- 1) Suurema nõlvakaldega aladel on DEM-ide vead suuremad kui väikse nõlvakaldega aladel.
- 2) Nõlva ekspositsiooni mõju vigadele on varieeruv.
- 3) DEM-ide vead sõltuvad taimkattest – metsastel aladel on vead suuremad.

Töö esimene pool annab ülevaate kasutatud kõrgusmudelitest ja uurimispiirkondadest. Teine osa kirjeldab andmete eeltöötlust ja analüüsiks valitud meetodikat. Sellele järgneb kokkuvõte antud meetodika rakendamise tulemustest ning nende põhjal tehtud järeldustest.

1 Teoreetiline taust

1.1 Kõrgusmodelid ja nende võimalikud vigade allikad

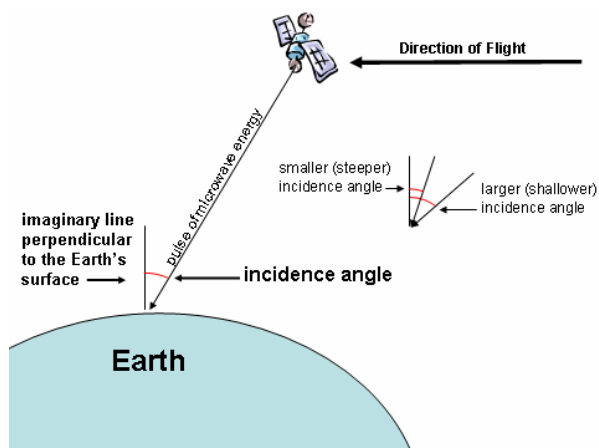
Numbriline kõrgusmodel (*digital elevation model* e DEM, edaspidi „kõrgusmodel“) tähendab üldisemas käsitluses seda, et iga teadaolevate horisontaalkoordinaatidega punkti jaoks on teada ka vertikaalkoordinaat z (Roosaare et al., 2019). Lisaks DEM-ile kui laiemalt kasutatavale terminile, kasutatakse ka lühendit DTM (*digital terrain model*) ehk numbriline maastikumudel (Roosaare et al., 2019) või maapinna kõrgusmodel (Maa-ameti Geoportaal, 2019a). Tulenevalt kaugseire mõõtevahenditest ei saa alati rääkida Maa pinnast, vaid hoopis aluspinnast ehk maapinnast koos sellel oleva maakattega. Selles tähenduses kasutatakse mõistet DSM (*digital surface model*) ehk digitaalne aluspinna mudel. (Roosaare et al., 2019) Tehniliselt on kõik töös rakendatavad digitaalsed kõrgusmodelid mingil määral DSM-id, kuid enamustes uurimustes käsitletakse neid ikkagi käepärasemalt (digitaalsete) kõrgusmodelitena. Antud töös kasutatakse termineid kõrgusmodel ja selle akronüümi DEM.

Kõrgusmudeleid on võimalik toota mitmel viisil: *in situ*, fotogramm-meetriliselt, aerolaserskaneerimise mõõdistustest ja interferomeetrilise tehisavaradari abil (Hodgson et al., 2003). Erinevate lähenemistega võivad kaasnedä mitmesugust laadi vead. Töös analüüsitud globaalsed kõrgusmodelid on genereeritud fotogramm-meetrilise ja interferomeetrilise meetodika abil.

Fotogramm-meetriliste meetoditega kaasnev peamine viga tuleneb sellest, et kõrgusväärtus saadakse esimeselt peegeldunud pinnalt. Enamasti pole selleks maapind, vaid taimkate või tehismaastik. (Gesch et al., 2016) Seega on antud maakattetüübiga piirkondades fotogramm-meetrilisel teel saadud kõrgusmodelites süstemaatiliselt suuremad kõrgusväärtused. Süstemaatilise vea suurus on maakatte klassiti erinev.

Lisaks mõjutab kõrgusväärtuste täpsust arvutamisel kasutatud stseenide arv. Rohkemate stseenidega saab tasandada anomaalseid piksli väärtuseid, mis võivad ainult kahe stseeni kasutamisest tuleneda. Anomaaliad on enamasti tingitud pilvkattest mõõdistamise hetkel. Mitme erineva ajatempliga stseeni kasutamine võib põhjustada suurt kõrgusväärtuste kõikumist lähestikku paiknevates piirkondades. Viimane tuleneb võimalikest muutustest pinnamoos, mis on toimunud kahe ülesvõtte jäädvustamise vahelisel ajal. (Dewitt et al., 2015) Mitmest erinevast stseenist koosnevat „rastrivirna“ (*rasterstack*) on kasutatud ASTER GDEM V2 (versioon 2) piksli väärtuste arvutamisel (ASTER GDEM Validation Team, 2011a). Geomeetrilised artefaktid võivad esineda arvutamisel kasutatud stseenide arvu muutumise kohtades või olla seotud stereokorrelatsiooni akna suurusega (Arefi and Reinartz, 2011; Tachikawa et al., 2011).

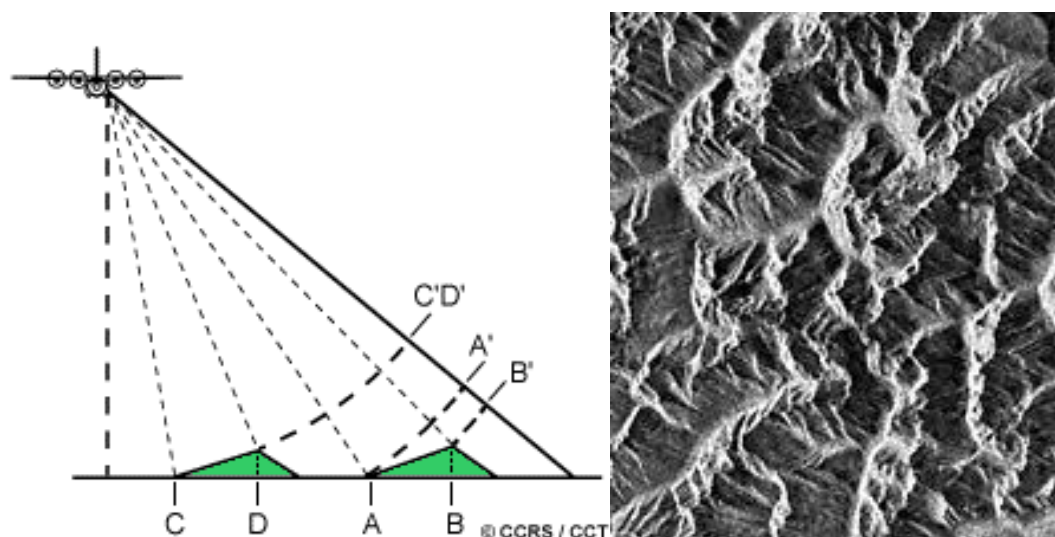
Interferomeetriliste meetoditega loodud mudelite täpsust mõjutab samuti taimkate, millest signaal suudab vaid osaliselt läbi tungida (Hodgson et al., 2003). Teiseks mõjutab mägistes piirkondades mudeli vertikaalset täpsust ülekate, vari ja radaripoolsete nõlvade kokkusurutus. Seda annab tasandada erineva vöödikõrguse (*height of ambiguity*) ja baasiga tehtud ülelendudega. (Gonzalez et al., 2009) Lisaks sõltub maapinna kirjeldusvõime ruumilisest resolutsioonist, mis on määratud signaali lainepikkuse, lennukõrguse ja langusnurgaga (Hodgson et al., 2003).



Joonis 1. Langemisnurka muutumine interferomeetrilise tehisavaradari meetodika korral (Allikas: Lang, 2005).

jalamilt peegeldunud signaali. Selle tulemusena asetub objekti tipp ekslikult radarile lähemale ja katab ära objekti jalami. Ülekate on kõige suurema mõjuga väikese langemisnurka korral, vaatevihu sensorile lähemas osas ja keerulise pinnamoega aladel (Joonis 3). (Natural Resources Canada, 2015)

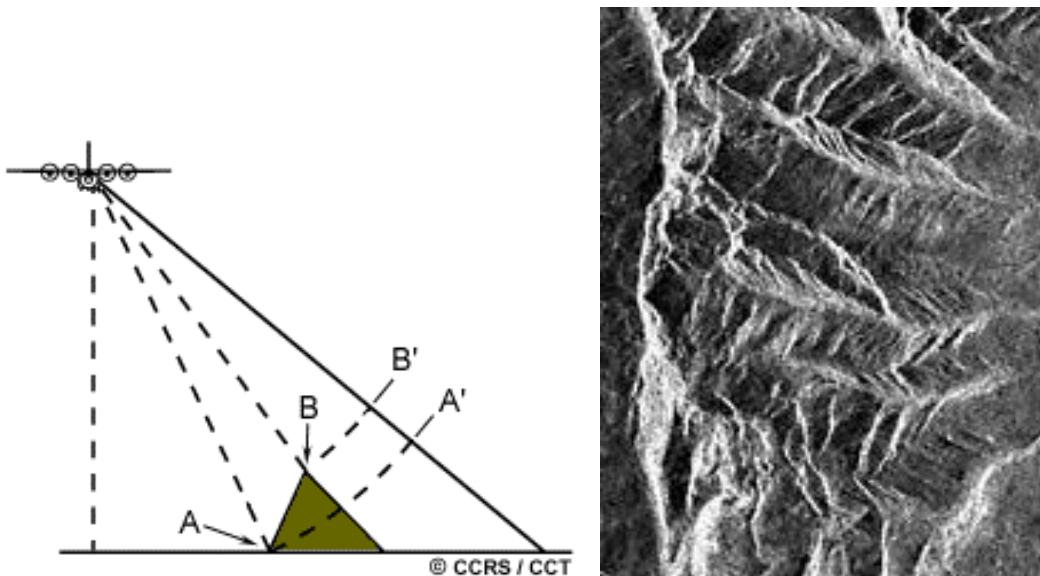
Vari ilmneb siis kui radari signaal ei jõua järsematel nõlvadel objektini (Chen et al., 2018). See ilmneb vaatevihu kaugemas osas, vertikaalsete objektide või järskude nõlvade taga. Kuna tagasipeegeldust ei toimu, kujutatakse antud piirkondi tumedana. Langemisnurka suurenedes varjutusefektide mõju kasvab (Joonis 4). (Natural Resources Canada, 2015)



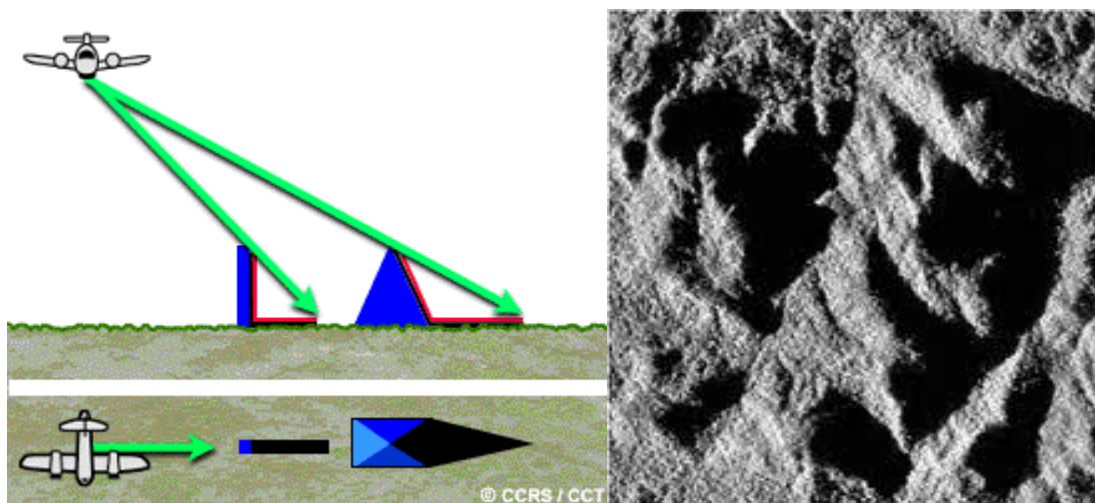
Joonis 2. Nõlvade kokkusurutus interferomeetrilise tehisavaradari meetodika korral (Allikas: Natural Resources Canada, 2015).

Radari poolsete nõlvade kokkusurutus ilmneb siis, kui radari signaal jõuab enne mäenõlvani kui selle tipuni. Radari poolne nõlv surutakse kokku ja seda nõlva kujutatakse lühemana. (Natural Resources Canada, 2015; Chen et al., 2018) Sõltuvalt nõlvakalde ja sensori signaali langemisnurka (Joonis 1) vahelisest suhtest, kokkusurutuse mastaap varieerub. Kõige suurem on kokkusurutuse efekt siis, kui signaali langemisnurk on risti nõlvaga. Kokkusurutud nõlvad kujutatakse eredana (Joonis 2). (Natural Resources Canada, 2015)

Ülekate ilmneb siis kui signaal jõuab enne objekti tipuni kui jalamini. Tipust tagasi peegeldunud signaal võetakse vastu enne



Joonis 3. Ülekate interferomeetrilise tehisavaradari meetodika korral (Allikas: National Resources Canada, 2015).

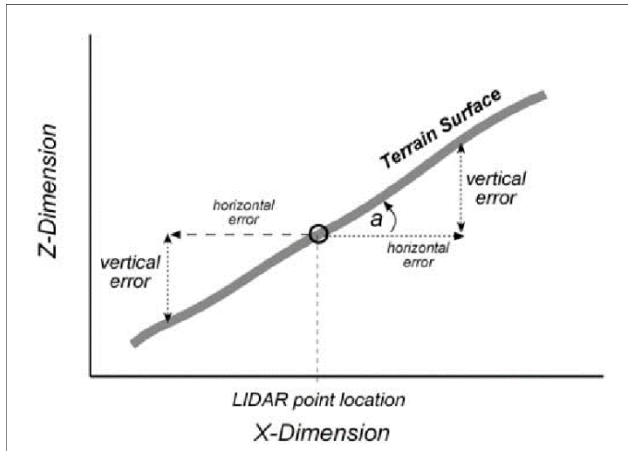


Joonis 4. Vari ja vaateväli interferomeetrilise tehisavaradari meetodika korral (Allikas: Natural Resources Canada, 2015).

Absoluutse kõrguse määramisel kasutatakse radari interferomeetrias ja stereofotogramm-meetrias maapinna kontrollpunkte. Absoluutne nihe tekib piirkondades, kus maapinna kontrollpunkte on vähe või need puuduvad. (Yamazaki et al., 2017) Lisaks ilmneb lennutrajektoori viga. Interferomeetriliste meetodite puhul tuleneb see sensori masti jääkliikumisest risti lennu suunale. Fotogramm-meetriliste meetodite vastav viga on sõltuv kaldenurgast sensori ja vaadeldava punkti vahel. (Rodriguez et al., 2006, *cit.* Yamazaki et al., 2017) Haavelmüra on tehisavaradari piltidele iseloomulik müra, mille tagajärjel esineb piltidel üksikuid ülevõimendatud (heledad) või alavõimendatud (tumedad) amplituudiga pikseleid, mis ei sisalda reaalseid andmeid vaadeldavate objektide kohta (Reisberg, 2015).

Kõrgusmudelites võib esineda horisontaalne viga (Joonis 5), mis on tugevas seoses kõrgusmudeli resolutsiooniga (Hodgson et al., 2005). Suurema andmetihedusega kõrgusmudelite täpsus on

kõrgem (Gong et al., 2000, *cit.* Hodgson et al., 2003). Mudeli horisontaalsed vead mõjutavad vigade väärtusi lihtsama pinnamoega aladel vähem kui keerukamates piirkondades, kus reljeef on muutlikum (Joonis 5).



Joonis 5. Horisontaalse vea ja vertikaalse vea seos LiDAR aerolaserskaneerimise punkti näitel (Allikas: Hodgson et al., 2005).

Globaalsete kõrgusmodelite resolutsioonid jäävad antud töös vahemikku 30 m kuni 90 m. Piksli väärtus saadakse tihedamate punktide keskmistamise teel. Sellise väärtuse tuletamise meetodil tekivad vertikaalsed vead, kuna reaalsuses ei jää kõrgusväärtus ühe piksli sees samaks. See efekt on eriti ilmekas keerukama reljeefiga piirkondades.

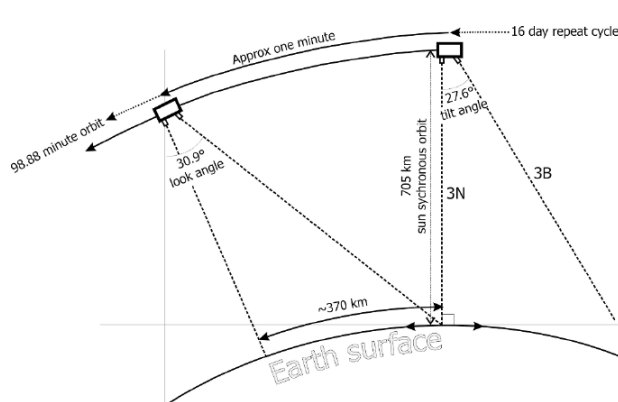
Jämedad vead tulenevad seadme tõrkest või selle kasutajast. Süsteemilised vead tulenevad mõõtmisel ning andmetöötlusel ja neid on võimalik automaatselt likvideerida. Juhuslikud vead on tekkinud juhuslikult ning nende avastamine on keeruline (Roosaare et al., 2019).

Kõrgusmodelite juures on tuvastatud kolm peamist vigade allikat (Fisher and Tate, 2006):

1. Lähteandmete täpsuse, tiheduse ja jaotuse muutumine sõltuvalt andmekogumise meetodikast
2. Lähteandmetest kõrgusmodeli tuletamisel tekkivad vead
3. Modelleeritava pinna omadustest ja kõrgusmodeli vahelisest suhtest tingitud vead.

1.1.1 ASTER GDEM V2

ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) sensor kogub informatsiooni NASA (*National Aeronautic and Space Administration*) satelliidilt Terra. Detektoril on nadiir- ja tagasivaatav kaamera, mis koguvad stereopaare (Joonis 6). Viimaseid kasutatakse kõrgusmodelite loomisel.



Joonis 6. ASTER sensor on varustatud kahe NIR (near Infrared) kaameraga: 3N ja 3B. Mõlema sensoriga sama maa-ala kaardistamiseks kulub 1 minut. Saadakse 60 km laiune stereopair. (Allikas: Quincey et al., 2014)

ASTER kõrgusmodel luuakse satelliitfotogramm-meetria põhimõtetest lähtuvalt. Kasutatakse kahte salvestist samast kohast erineva nurga all, millelt saab välja arvutada parallaxi. Parallaxiks nimetatakse lennusuunaga paralleelset objekti asukoha muutust foto raami suhtes (Roosaare et al., 2019). Stereopaaris on muutuse põhjuseks

reljeef. Kahe salvestise parallaxi erinevusest saab määrata maapinna suhtelise kõrguse. DEM-i täpsus omakorda sõltub maapinna kontrollpunktide arvust ja kvaliteedist. (Abrams, 2000)

Esimene ASTER globaalne DEM (ASTER GDEM V1) sai kõigile tasuta kättesaadavaks 29. juunil 2009. See väljastati NASA ja METI (*Ministry of Economy, Trade, and Industry of Japan*) koostööl. Mudel pandi kokku 1,2 miljonist stseenist ulatudes 83° N kuni 83° S. Produkti jagati 1° x 1° mosaiikidena. Üldine täpsus oli dokumentatsioonile tuginedes ligikaudu 20 m 95 % usaldusintervalli juures. (ASTER GDEM Validation Team, 2011b)

ASTER GDEM V2 valmis oktoobris 2011. Uuemal versioonil on sama struktuur, mis esimesel versioonil. Vigade minimeerimiseks on kasutatud rohkem stseene, lisaks on mudelil kõrgem horisontaalne resolutsioon ja parem veekogude mask. (ASTER GDEM Validation Team, 2011b) Stereopaaridest moodustatakse „rastrivirn“ ning lõplik kõrgusväärtus leitakse üksikute DEM-ide keskmisena (Gesch et al., 2016). ASTER GDEM V2 üldine täpsus on dokumentatsioonile tuginedes umbes 17 m 95 % usaldusintervalli juures (ASTER GDEM Validation Team, 2011b). Horisontaalne täpsus on 15 – 20 m (CE90) ja reaalne horisontaalne resolutsioon umbes 71 – 82 m (Tachikawa et al., 2011; Copernicus Programme Services, 2017).

ASTER GDEM V3 väljastati 5. augustil 2019. Tegu on edasiarendusega V2-st, kuid sisaldab anomaaliaid ja vigu, mis eelmistes versioonides puudusid (NASA Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2004). Seega selle kasutamine on hetkel piiratud.

Kõrgusmudeleid vahendatakse GeoTIFF formaadis, piksli suurusega 30 m x 30 m ning referentsellipsoidiks on WGS84 ja geoidiks EGM96 (ASTER GDEM Validation Team, 2011a).

Antud töös on kõikidel uurimisaladel kasutatud ASTER GDEM V2-e, mille andmekiht on alla laetud USGS (*United States Geology Service*) EarthExploreri andmebaasist oktoobris 2018 – jaanuaris 2019. Andmekiht sisaldab endas mosaiigi kõrgusmudelit, kvaliteethinnangut ja dokumentatsioonifaili. Kvaliteethinnang kirjeldab iga piksli mõõtmisel kasutatud stseenide arvu (Tabel 1). Üldjoontes kehtib trend, et mida vähem stseene piksli väärtuse arvutamisel kasutati, seda ebatäpsem antud kõrgus on. (ASTER GDEM Validation Team, 2011a) Stseenide arv antud analüüsis kasutatud uurimisaladel varieerub vahemikus -1 – 20. Negatiivne väärtus (-1) näitab, et kõrgusväärtus on asendatud SRTM V3 kõrgusmudeli väärtustega (ASTER GDEM Validation Team, 2009).

Tabel 1. Stseenide arv piksli kohta uurimispiirkonniti.

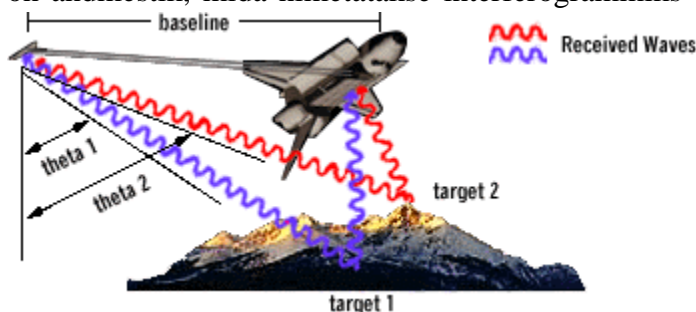
Uurimispiirkond	Miinumum	Maksimum	Mood	Keskmine	Standardhälve
Eesti	-1	9	5	4,9	1,2
Hiina	1	13	7	8,1	2,0
Norra	1	9	5	5,0	1,2
Uus-Meremaa	4	20	10	11,3	2,2

1.1.2 SRTM V3

SRTM-i missioon käivitus 11. veebruaril 2000. Kümne päeva jooksul koguti piisavalt andmeid kaardistamiseks kogu maakera ala, mis jääb +/- 60° laiuskraadide vahele. Informatsioon salvestati kasutades raadiolainete spektripiirkonna C- ja X-kanaleid (~25 – 75 mm) ja globaalne kõrgusmudel arvutati spektripiirkonna C abil. Andmeid töötles JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) ja levitab USGS EROS andmekeskus (*United States Geological Survey's EROS Data Center*). (NASA Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2016)

SRTM-i puhul on tegu kaugseire aktiivsüsteemiga. Missiooni käigus kasutati interferomeetrilist tehisavaradarit (IFSAR – *Interferometric Synthetic Aperture Radar*), mis võimaldab välja saata elektromagnetlaineid, mis seejärel sihtmärgilt tagasi peegelduvad ja vastuvõtja poolt kinni püütakse (Hanssen, 2001). Antud meetodi eeliseks passiivsete süsteemide (sh satelliitfotogramm-meetria) ees on see, et mikrolainete sagedusvahemikku jäävad elektromagnetlained neelduvad atmosfääris vähe ja seega ei sega vaatlusi pilved (Dewitt et al., 2015). Lisaks ei vaja radarsüsteemid valgust ja antud lained tungivad osaliselt läbi taimestiku (Hanssen, 2001).

SRTM kogus andmeid samal ajal kahest erinevast vaatepunktist, mis on omavahel eraldatud fikseeritud kauguse ehk baasjoonega (Joonis 7) (NASA Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2020). Niimoodi leitakse kahe kujutise faasierinevus, mille tulemuseks on andmestik, mida nimetatakse interferogrammiks (Hanssen, 2001). Interferogrammi faasipilt



Joonis 7. Andmete kogumine kahest vaatepunktist (Allikas: NASA JPL, 2020).

näitab kahe lähtepildi faasierinevust, mis faasi tsüklilisuse tõttu kordub 2π järel (Ferretti et al., 2007). Tavaliselt antakse faasipilt vikerkaarevärvides, kus igale faasi väärtusele vahemikus $0 - 2\pi$ vastab kindel spektrivärv ühtlasel gradiendil punasest violetseni (Hanssen, 2001).

Ühele faasierinevuse täistsüklile interferogrammil vastab poole lainepikkuse suurune maapinna deformatsioon, kuna edasi-tagasi läbitav

teepikkus objekti ja radari vahel muutus terve lainepikkuse võrra. Faasimuutused on tõlgendatavad ainult teiste interferogrammi punktide kaudu. Absoluutne deformatsiooni ulatus on tuletatav stabiilse punkti põhjal interferogrammil või maapealsete geodeetiliste mõõtmiste (näiteks GPS) abil. (Hanssen, 2001) Teades kahe antenni vahelist kaugust, erinevust tagasi peegeldunud signaalides ja kaldenurka nadiiri ja tagasivaatava antenni vahel, on võimalik välja arvutada sihtmärgi topograafiline kõrgus (NASA Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2020). Arvutatud DEM-idest moodustatakse seejärel $1^\circ \times 1^\circ$ suurused ruudud.

SRTMi ruumiline lahutus on 1 kaaresekund ehk ekvaatoril ~ 30 m ja absoluutne kõrgusviga on leitud olevat ~ 9 m või madalam (Rodriguez et al., 2005). Samas vertikaalne täpsus võib varieeruda sõltuvalt reljeefist ja taimkattest (Dewitt et al., 2015). Horisontaalne täpsus (CE90) on keskmiselt 7 – 12 m (Copernicus Programme Services, 2017). Reaalne horisontaalne resolutsioon on umbes 72 – 77 m (Tachikawa et al., 2011).

Antud analüüsis on kasutatud SRTM versiooni 3.0, mis on alla laetud USGS EarthExploreri andmebaasist oktoobris 2018 - jaanuaris 2019.

1.1.3 MERIT DEM

MERIT kõrgusmudel valmis 2017. aastal edasiarendusena radartechnoloogia (SRTM3 v2.1) või optilise fotogramm-meetria (AW3D-30m v1) abil loodud DEM-idest (Yamazaki et al., 2017). Eelpool mainitud numbrilistelt kõrgusmudelitelt eemaldati absoluutne nihe, lennutrajektooris tingitud müra, haavelmüra (*speckle noise*) ning taimkattest tingitud viga (Yamazaki, 2018).

Yamazaki et al. (2017) hinnangul suurenes peale vigade eemaldamist pikslite arv, mille vertikaalne täpsus on suurem kui 2 m 19 %. Vea 90. protsentiil oli ± 12 m. Arvestades ainult selliseid piirkondi,

mille nõlvakalle on väiksem kui 10 %, leiti sama näitaja olevat ± 5 m. Viga tulenes pikslisisest väärtuste varieerumisest mägistest piirkondades ning lisaks sõltus see maakattest. Suurema detailsuseastmega maastiku elemendid nagu väikesed kanalid, jõed jms struktuurid pole hästi esindatud. Sellest hoolimata on MERIT DEM suurema täpsusega madalate alade (näiteks jõelammide) modelleerimisel tänu vigade eemaldamisele ning kõrgusmodel kuvab sellevõrra detailsemalt jõevõrgustikke ja reljeefe, mille täpsus SRTM ja AW3D30 mudelites puudulik oli.

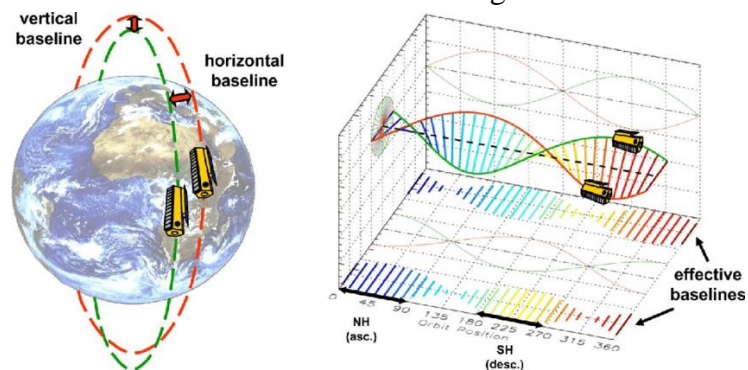
Kuna mudel on AW3D30 ja SRTM kõrgusmodelite edasiarendus, jääb MERIT DEM-i horisontaalne täpsus samasse vahemikku 7 – 12 m (Copernicus Programme Services, 2017).

Kõrgusmodeli horisontaalne resolutsioon on ekvaatoril ~ 90 m, katab maapinda vahemikus 90° N – 60° S, kasutab ellipsoidi WGS84 ning geoidi EGM96 (Yamazaki, 2018).

Antud analüüsiks laeti vajalikud andmed alla mudeli kodulehelt (http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM/) $5^\circ \times 5^\circ$ suuruste ruutudena geoTIFF formaadis märtsis 2018.

1.1.4 TanDEM-X

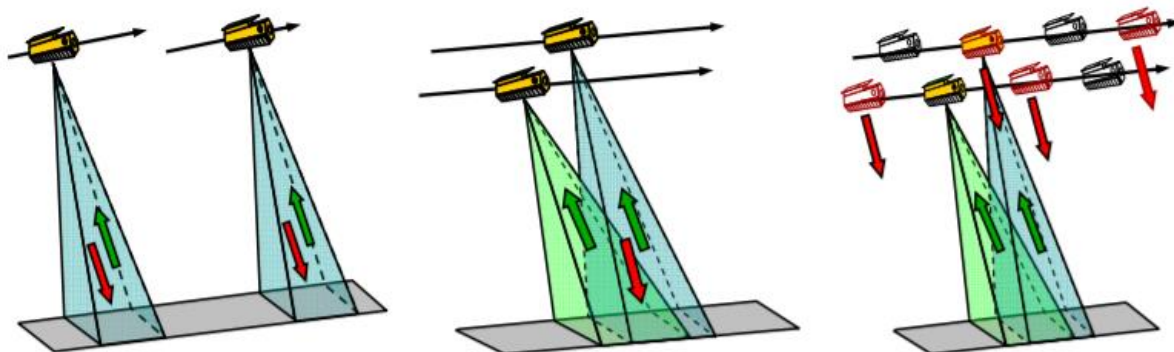
TanDEM-X (*TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements*) on missioon, mille eesmärgiks seati luua ühelaadne ja täpne kujutis maa pinnast (sh kõrgusandmetest) (DLR, 2020). Seda tehakse tehisavaraadri tehnoloogia abil. Missioon koosneb kahest identsest satelliidist, mis



tiirlevad tandemina Maa orbiidil (Joonis 8). Satelliitide baasjoon jääb vahemikku 120 – 500 m. (Wessel, 2018) Baasjoon varieerub tänu satelliitide heeliksikuljusele asetusele orbiidil liikudes (Younis et al., 2007).

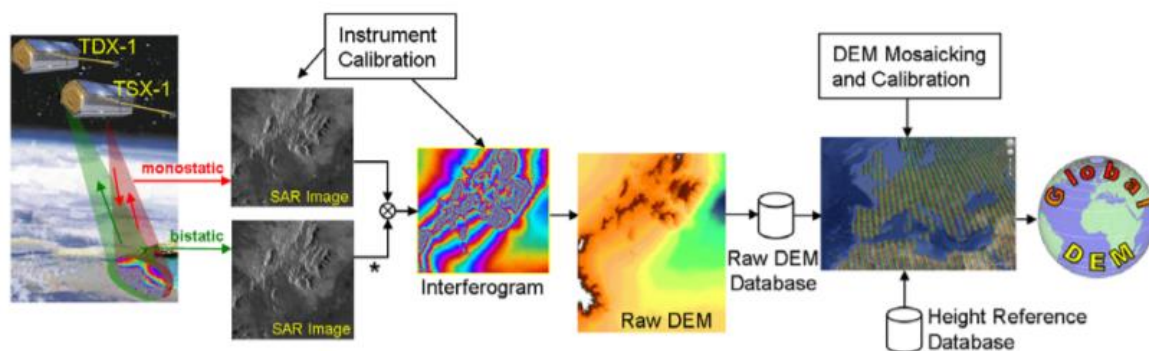
Joonis 8. TanDEM-X satelliitiformatsioon. Baasjoon (baseline) on funktsioon orbiidi asendist. (Allikas: Younis et al., 2007)

Andmete kogumine toimus aastatel 2011 – 2015. 2015. aasta jaanuaris andmete kogumine lõpetati ja globaalne kõrgusmodel valmis 2016. aasta septembriks. (DLR, 2020; EOC Geoservice, 2020)



Joonis 9. TanDEM-X kõrgusmodeli mõõtmisrežiimid. Vasakult järjestikuline monostaatiline režiim, bistaatiline režiim ja vahelduv bistaatiline režiim. DEMide jaoks kasutati esimest kahte (Allikas: Gonzalez et al., 2009)

Kõrgusmodeli genereerimisel kasutatakse eelpool kirjeldatud interferomeetria loogikat. Ühe stseeni loomiseks kombineeritakse kahel erineval viisil kogutud SAR kujutist. Esimene kujutis saadakse selliselt, et kasutatakse ühte satelliiti saatjana. Maapinnalt tagasi hajunud signaal registreeritakse seejärel samaaegselt mõlemas satelliidis. (Zink et al., 2007) Antud meetodit nimetatakse bistaatiliseks andmekogumise režiimiks (Zink et al., 2008). Teine kujutis saadakse monostaatilist ülesvõtet kasutades (Joonis 9). Antud juhul toimivad mõlemad satelliidid saatjana ning registreerivad seejärel tagasihajunud signaali samaaegselt. Lihtsustatult luuakse seejärel interferogramm, millest on võimalik sarnaselt eelpool mainitule genereerida esialgne kõrgusmodel. (Zink et al., 2007) Esialgsete kõrgusmodelite loomine käib mitmes faasis. Esmased andmeülesvõtted kogutakse missiooni esimesel aastal võrdlemisi väikesel baasil, aga samas suurel vöödikõrgusel. Teisel aastal kasutatakse suuremat baasi ja madalamat vöödikõrgust. Kolmandal aastal keskendus missioon keerulisema reljeefiga piirkondadele. Kasutatakse kolmandat baasi ja vöödikõrguse kombinatsiooni ning tehakse uued ülesvõtted aladelt, mis missiooni eelmistes etappides olid mõjutatud varjude, ülekatete ja radaripoolsete nõlvade kokkusurutuse poolt. Mitmes faasis kogutud andmed aitavad kõrgusmodelit kalibreerida ja vigasid eemaldada. Kõrgusmodelitest koostatakse „rastrivirn“, milles toimub täiendav süstemaatiliste vigade parandamine täpsema regionaalse referentspinna alusel. Seejärel genereerib protsessor globaalse DEM-i (Joonis 10). (Gonzalez et al., 2009)



Joonis 10. DEM-i loomise tootmisahel (Allikas: Gonzalez et al., 2009).

Antud analüüsis kasutatud kõrgusmodeli piksli suurus on taandatud ekvaatoril mõõtes ~92,78 meetrini (algset 12 meetrise resolutsiooniga digitaalset kõrgusmodelit Saksa Kosmosekeskuse Geoportaal allalaadimiseks ei väljasta) ja katab kõik maamassid poolusest pooluseni. (EOC Geoservice, 2020) Mudeli geodeetiliseks daatumiks on WGS84 ellipsoid (Wessel, 2018).

Kõrgusväärtused jämedamas mudelis on leitud kõrgema resolutsiooniga DEM-ide piksli väärtuste keskmistamise teel. Piksleid, mis agregeerimisel langevad ainult osaliselt uude pikslisse, kaasatakse proportsionaalselt. (Wessel, 2018)

Kuigi nimeliselt on TanDEM-X kõrgusmodel, on tegelikult tegemist maakatte kõrgusmodeliga, mis kujutab maapinda koos sellel oleva maakattega (Roosaare et al., 2019; EOC Geoservice, 2020).

Mudeli absoluutne vertikaalne täpsus on suurem kui 10 m ning suhtelist vertikaalset täpsust defineeritud pole (Wessel, 2018). Hawker et al. (2019) arvutasid umbes 1,4 miljoni referentspunkti alusel TanDEM-X kõrgusmodeli ruutkeskmiseks veaks 3,10 m. Horisontaalne täpsus (CE90) on

kõrgem kui 10 m (Wessel, 2018). Antud uurimuse tarbeks laeti ~90 m resolutsiooniga kõrgusmudel alla Saksa Kosmosekeskuse Geoportaalist novembris 2018 – jaanuar 2019.

1.1.5 Pleiades-1A

Pleiades-1A satelliitsensori programm käivitati 16. detsembril 2011. Satelliidil on neli spektraalkanalit (sinine, roheline, punane, infrapunane) ja ruumiline lahutus 0,5 m ning asukohatäpsus 3 m, mida on võimalik maapinna kontrollpunktide abil tõsta 1 meetrini (Satellite Imaging Corporation, 2017).

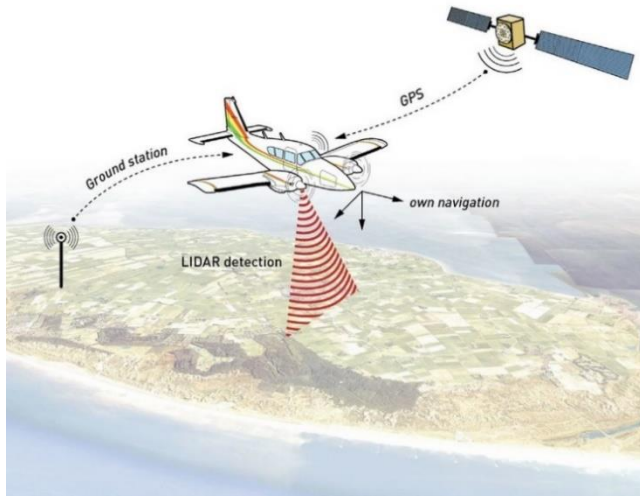
Antud uurimistöös on kasutatud Pleiades-1A DEM-i referentspinnana ühes uurimispiirkonnas Põhja-Hiinas. Mainitud kõrgusmudel on loodud kasutades viite stereopaari 23. aprillist, 17. juulist, 24. juulist ja 25. juulist 2014. Töötamiseks kasutati Leica fotogramm-meetria moodulit ERDAS Imagine tarkvaras. Loodi ratsionaalne polünoomiaalne funktsioon (*rational polynomial function - RPF*), mis hindab pildi ja maapinna koordinaatide vahelist seost. Antud funktsioonis olevaid asendivigu parandati sidumispunktide abil. RPF mudeli korrigeerimisele järgnes liikuva aknaga pikslite sobitamine. Akna suuruseks oli 9 x 9 pikslit ja korrelatsioonikoefitsient 0,3 – 0,7. Maapinna punktide asukohtadest stereopaaril trianguleeriti antud punkti asukoht 3D ruumis. Paariti sobitamise ja trianguleerimise teel saadud punktiple keskmitati 1 meetriste plokkide kaupa, mille järel loodi splain funktsiooni abil 1 m resolutsiooniga rastervõre. Saadud kujutis ortorektifitseeriti. (Middleton et al., 2016) Keskmine punktitiheus on 7,58 p/m² (OpenTopography, 2016). Vertikaalset täpsust pole defineeritud.

Varasemad uurimused eri piirkondade kohta on leidnud sama meetodikaga toodetud DEM-i vertikaalseks täpsuseks umbes 0,5 m, mis saadi numbrilist kõrgusmudelit GPS kontrollpunktidega võrreldes (Bagnardi et al., 2016). Maavärina järgsete muutuste uurimisel California osariigis tuvastati Pleiades-1B kujutistest loodud kõrgusmudeli vertikaalseks täpsuseks ~0,3 m (Zhou et al., 2015). Nasir et al. (2015) valideeris 10 meetrise resolutsiooniga Pleiades-1A stereopaaride abil loodud kõrgusmudelit, võrreldes seda LiDAR mõõdistustest loodud DEM-iga, mille vertikaalne täpsus oli 15 cm. Tulemuseks saadi RMSE 5,2 m, mis on väiksem kui ASTER või SRTM kõrgusmudelitel. Autorid soovivad selle üheks põhjuseks välja edasi- ja tagasivaatavad kaamerad, mis võimaldavad keerulisema topograafiaga alasid paremini kaardistada ning kõrgema resolutsiooni võrreldes teiste globaalsete kõrgusmudelitega.

Kuna antud analüüsi tarbeks kasutatud kõrgusmudeli vertikaalset täpsust pole välja toodud, siis tuleb suhtuda antud tulemustesse teatava ettevaatusega. Sellegipoolest on DEM-i punktitiheus ja resolutsioon uuritavas piirkonnas oluliselt kõrgem kui analüüsitavatel mudelitel.

1.1.6 LiDAR

LiDAR (*Light Detection and Ranging*) on võrdlemisi uus kõrgusandmete allikas (Dewitt et al., 2015). Tegu on kaugseire meetodiga ja sarnaselt SRTM ja TanDEM-X kõrgusmudelitega on tegemist kaugseire aktiivsüsteemiga. Võrreldes eelpool mainitud DEM-idega, pole tegu globaalse ulatusega kõrgusmudeliga.



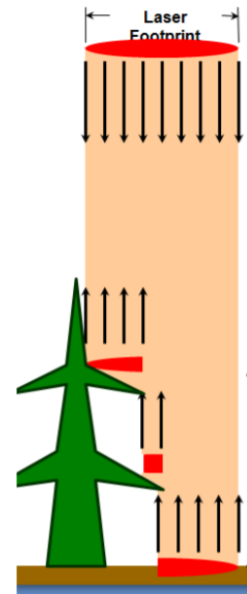
Joonis 11. Õhusõidukilt maapinna aerolaserskaneerimiseks vajalikud komponendid (Allikas: van der Schriek and Beex, 2017).

Aerolaserskaneerimisel saadud kõrgusandmete täpsus sõltub sensori asukoha ja asendi mõõtmise täpsusest, sensori vaateväljast, skaneerimise omadustest ja lennukõrgusest (Dewitt et al., 2015). Skaneerimise omadusi kirjeldavad laserkiire hajuvus, lainepikkus ja kiirte kiirgamise sagedus (Hodgson et al., 2003).

Tänapäeva LiDAR sensorid suudavad eristada mitut tagasipeegeldust (Joonis 12). Signaali tagasi peegeldumise ajast ja intensiivsusest on võimalik eristada maakatte tüüpi. (Hodgson et al., 2003)

Aerolaserskaneerimisega kaasneb mitut tüüpi võimalikke vigasid (Montealegre et al., 2015; Maa-ameti Geoportaal, 2019b):

- diskreetsusest põhjustatud vead tulenevad tagasipeegelduste liigitamisest erinevatesse klassidesse. Tiheda alustaimestikuga aladel, kus tagasipeegeldus ei ole saadud mitte maapinnalt, vaid alustaimestiku pealt, võib juhtuda, et alustaimestik lisatakse maapinna osaks;
- klassifitseerimise vead on seotud punktide filtreerimisalgoritmidega, mis sisaldavad sisendparameetreid, mille järgi arvutatakse tulemus. Sisendparameetrite piirväärtuste või neid ületavate väärtuste korral ei pruugi algoritm korrektselt töötada. Näiteks laugele maapinnale sobivate parameetrite puhul jäävad lokaalsed järsakud korrektselt maapinnaks klassifitseerimata. Samas kui kasutada liigendatud maapinna parameetreid, võib saada lauge maapinna hulka haaratud ka ebaühtlane taimestik. Filtreerimisalgoritmide töötavad kõige paremini lamedal ja ühelaadses piirkonnas.



Joonis 12. Laserpulsi jagunemine mitmeks osaks (Allikas: Metsur, 2012).

Antud töös on erinevate uurimispiirkondade juures mõõdistused tehtud iseseisvate projektide raames (Tabel 2). Tegu pole ühelaadse produktiga nagu eelpool mainitud viisidel saadud kõrgusmodelid.

LiDAR andmed on alla laetud OpenTopography (<https://opentopography.org/>), Maa-ameti Geoportaali (<https://geoportaal.maaamet.ee/>) ja Norra Kaardistus- ja Kadastriameti kõrgusandmete andmebaasist Hoydedata (<https://hoydedata.no/LaserInnsyn/>) ajavahemikus oktoobris 2018 – märtsis 2019.

Tabel 2. LiDAR DEM-ide keskmine punktihedus ja vertikaalne täpsus (Metsur, 2012; Ramboll Kart OG 3D, 2012; Maa-amet, 2015; Greater Wellington Regional Council, 2017; Terratec, 2017a, 2017b, 2018; Kartverket, 2020)

Uurimispiirkond	Möödistamise aasta	Keskmine punktihedus	Vertikaalne täpsus	Horisontaalne täpsus
Eesti	2015	0,45 p/m ²	~9 – 14 cm	17 – 33 cm
Norra	mai 2012 juuli 2017, oktoober 2017, august 2018, september 2018,	2 – 5 p/m ²	~3 – 12 cm	25 – 50 cm
Uus-Meremaa	2013	1,73 p/m ²	10 – 15 cm	-

2 Andmed ja meetodika

2.1 Andmed

2.1.1 Kõrgusmudelid

Analüüsis kasutati peatükis 1.1 kirjeldatud kõrgusmudeleid ASTER, MERIT, SRTM ja TanDEM-X. Referentsmudelina kasutati Eesti, Norra ja Uus-Meremaa uurimisaladel LiDAR andmetel põhinevat kõrgusmudelit ja Hiina uurimisala puhul Pleiades-1A andmetel põhinevat kõrgusmudelit.

Võrdlusesse kaasatud kõrgusmudelid erinevad üksteisest resolutsiooni, meetodika ja mõõdistamise aja poolest. Need tegurid mõjutavad DEM-ide arvulist täpsust, mis omakorda piiravad nende kasutusvaldkondi. Tabelis 3 on välja toodud analüüsis kasutatud kõrgusmudelite ruumiline ja ajaline resolutsioon, kogumise meetodika ja mudeli loomise järgselt tuvastatud hinnanguline või oodatav täpsus. Tegu on andmestikuülese näitajaga. Piirkonniti võib antud näitaja sõltuda mitmetest tingimustest ja seetõttu erineda. Peamiste sõltumatute muutujatena on välja toodud maakatte tüüp ja reljeef (Hodgson et al., 2003; Dewitt et al., 2015; Gesch et al., 2016). Edaspidine analüüs keskendubki globaalsete mudelite ning referentsmudelite omavahelisele võrdlusele ja mainitud tegurite mõju tuvastamisele. Viimast silmas pidades toimus ka uurimisalade valik.

Tabel 3. Analüüsis kasutatavad kõrgusmudelid.

Andmestik	Resolutsioon	Meetod	Hinnanguline vertikaalne täpsus	Mõõdistamise aeg	Allikas
ASTER GDEM V2	30 m	Satelliitfotogramm-meetria	17 m	~2011	(ASTER Validation Team, 2011b)
SRTM	~30 m	Interferomeetriline tehisavaradar	~9 m	Veebruar 2000	(Rodriguez et al., 2005; NASA Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2016)
MERIT DEM	~90 m	Arvutuslikult parandatud IFSAR-ist ja satelliitfotogramm-meetriast	~12 m	2000 – 2017	(Yamazaki et al., 2017)
TanDEM-X	~90 m	Interferomeetriline tehisavaradar	<10 m	2011 – 2015	(Rizzoli et al., 2017; Wessel, 2018)
PLEIADES-1A *	1 m	Satelliitfotogramm-meetria	0,5 – 1 m	aprill, juuli 2014	(Bagnardi et al., 2016; Middleton et al., 2016)
LiDAR*	1 m	Aerolaserskaneerimine	3 – 15 cm	2012 – 2013, 2015, 2017 – 2018	(Ramboll Kart OG 3D, 2012; Maa-amet, 2015; Greater Wellington Regional Council, 2017; Terratec, 2017a, 2017b, 2018; Maa-ameti Geoportaali, 2019b)

* - referentspinnana kasutatavad kõrgusmudelid

2.1.2 Maakate

Maakatte analüüsi tarbeks laeti alla Copernicuse globaalse maakatte kaardikiht, mis on 20° x 20° suuruste ruutudena alla laetav veebilehelt <https://lcviewer.vito.be/download>. Andmekihi resolutsioon on 100 m ja katab kõik antud analüüsis kasutatud uurimisalad. Kasutatud on ÜRO Toidu- ja Põllumajandusorganisatsiooni arendatud maakatte klassifikatsioonisüsteemi (*LCCS – Land Cover Classification System*). Maakate on liigitatud referentsaasta 2015 alusel 23 klassi (Lisa 1). (Buchhorn et al., 2019) Antud analüüsi tarbeks on suletud ja avatud metsade alamklassid koondatud üldisteks suletud ja avatud metsa klassideks.

2.2 Uurimisalad

Uurimisalade valikul lähtuti peamiselt kahest kriteeriumist: 1) võimalikke vigasid põhjustavad tegurid; ja 2) referentsmudelite kättesaadavus.

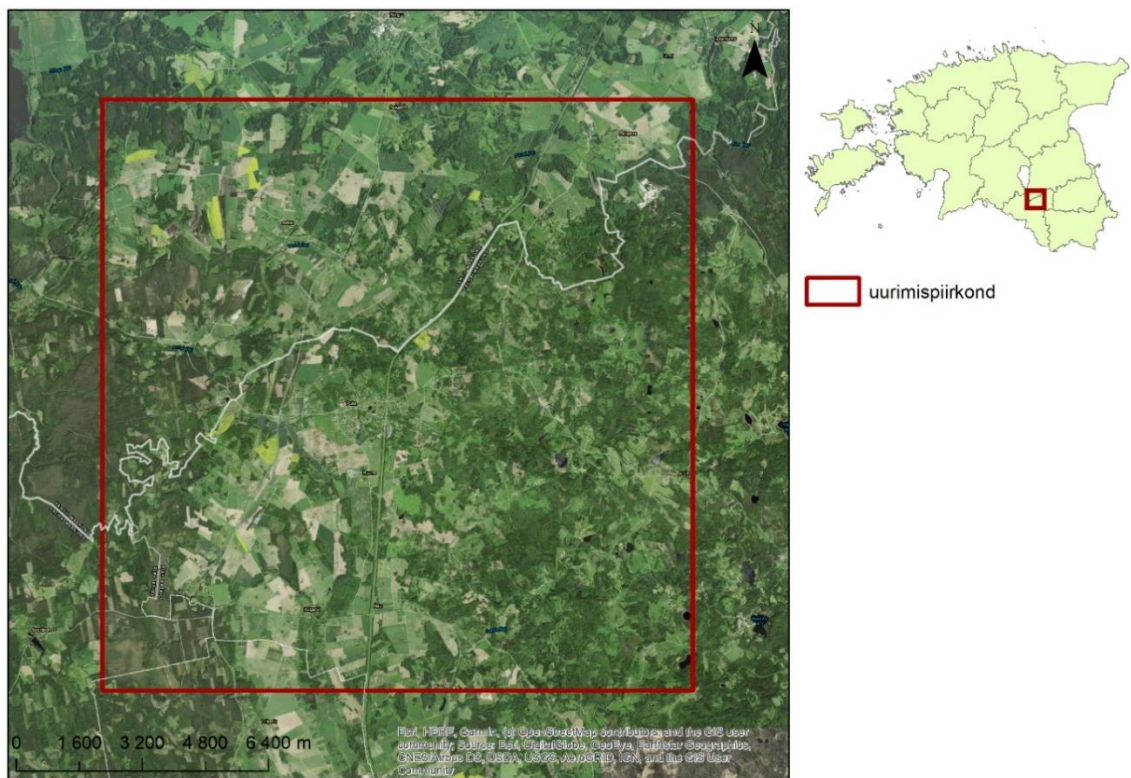
Silmas pidades kõrgusmudelite võimalike vigade seost reljeefi ja maakattega, oli oluline valida uurimisalad, mis võimaldavad antud tegurite mõju kirjeldada. Uurimisalad kombineerivad endas mitmesuguseid maakatteklasse ja pinnavorme.

Lisaks uurimuse eesmärgile, piiras alade valikut referentspindade kättesaadavus. Kõrgeresolutsiooniliste kõrgusmudelite valmistamine on ressursimahukas ning nende katvus pole globaalne. Erinevate projektide käigus loodud DEM-id on avaandmetena koondatud mitmesugustele eelpool mainitud veebilehtedele.

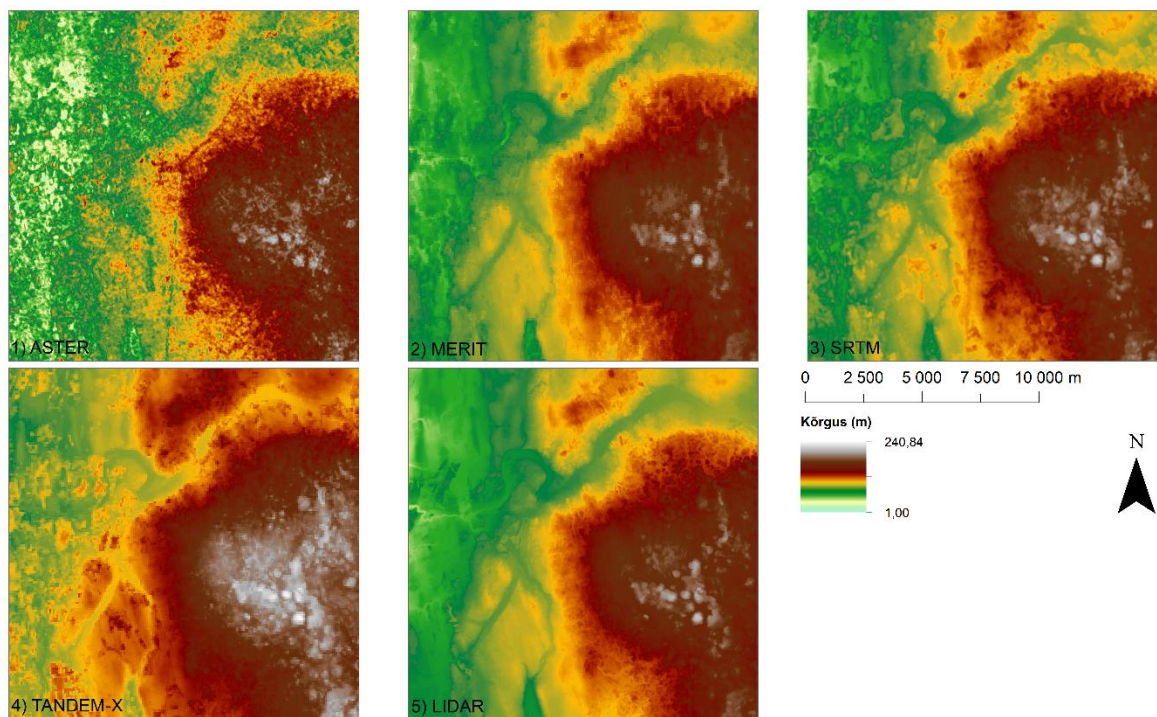
Järgnevalt on esitatud ülevaade uurimisalade üldisest informatsioonist ja iseloomust. Kokku valiti analüüsiks neli uurimisala.

2.2.1 Eesti uurimisala

Eesti uurimisala paikneb Tartu ja Valga maakonna vahelisel piiril, Võrtsjärve lõunatipust vähem kui 4 km ida suunas ja hõlmab 225 km² (Joonis 13). Sellest umbes 116 km² (~52 %) moodustab suletud mets. Uurimisalast umbes 28 % on põllumaa või muul viisil haritav maa ja ~17 % on kaetud avatud metsaga, kus võrade liitus jääb vahemikku 15 – 70 % (Buchhorn et al., 2019). Teiste maakatteklasside osakaal on madalam. Uurimisalasse jääb Puka alevik 565 elanikuga ja mitu väiksemat küla (Maa-amet, 2020). Kõrgused jäävad referentsmudeli alusel vahemikku 40 m ja 218 m, kuid globaalsete DEM-ide kõrguste varieerumine on suurem (Joonis 14).



Joonis 13. Eesti uurimisala (Allikas: Maa-amet, 2020).



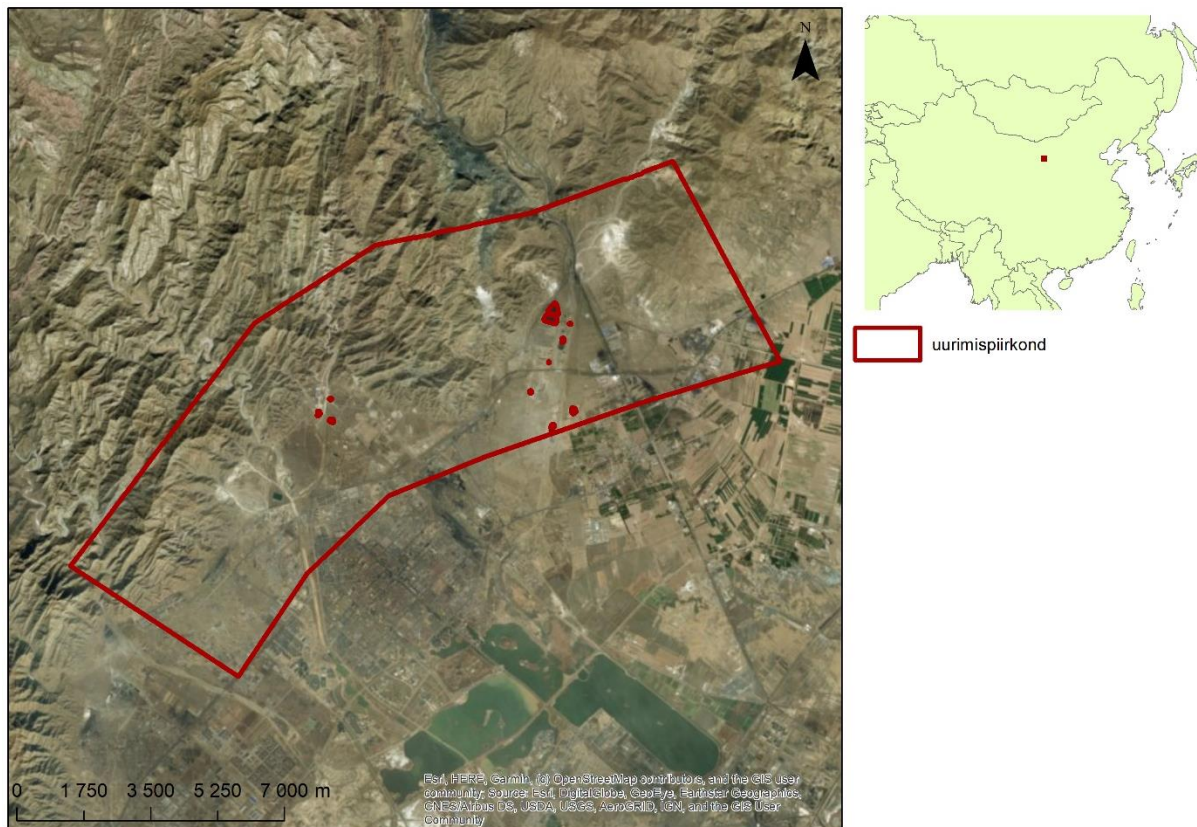
Joonis 14. Eesti uurimisala kõrgusmodelid.

2.2.2 Hiina uurimisala

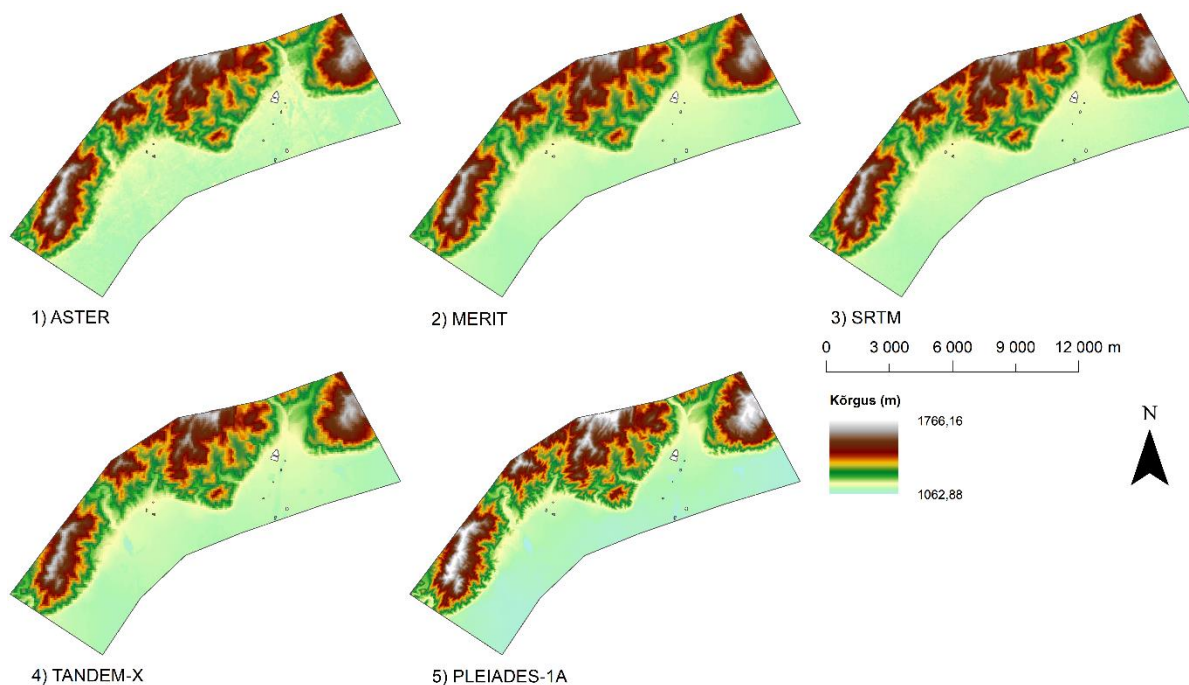
Hiina uurimisala asub Mongooliast lõuna pool Hiinas Ningxia Hui autonoomsel territooriumil. Piirkond on ümbritsetud tektooniliste murrangujoontega (Middleton et al., 2016). Sellest tingituna iseloomustab ala muutlik reljeef. Ühelt poolt piirab uurimisala Ordosi platoo ja teiselt poolt Helani mäed ning Alxa kõrb (Joonis 15).

Uurimisala pindala on 103 km², millest umbes 52 % moodustab lage maa või hõre taimestik. Viimane tuleneb sellest, et tegu on üsna kuiva ja kaljuse piirkonnaga. Hinnanguliselt 24 % on tehismaastik ja 20 % on kaetud rohumaaga. Uurimisalasse jäävad mitu elamu- ja tööstuspiirkonda.

Murrang joonistub välja ka referentsmudelilt, kus on märgata ligi 700 meetrist kõrgusväärtuste varieerumist (Joonis 16). Kõrgused uurimisalal jäävad vahemikku 1063 m ja 1766 m (Joonis 16).



Joonis 15. Hiina uurimisala asukoht ja maakasutus. Algandmestikus on osa veekogudest ja andmelünkadest välja lõigatud (Allikas: Natural Earth, 2020).



Joonis 16. Hiina uurimisala kõrgusmodelid.

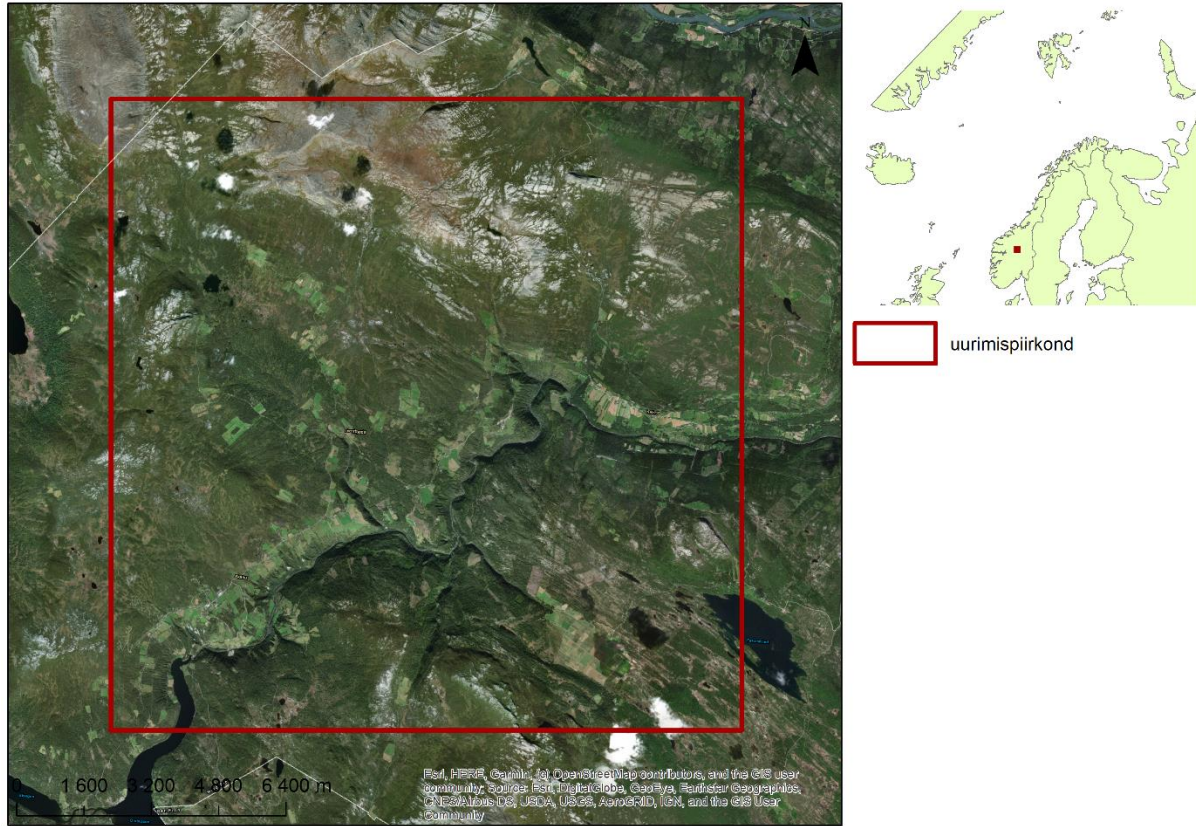
2.2.3 Norra uurimisala

Norra uurimisala pindala on 193 km². Sellest umbes 192 km² paikneb Innlandeti maakonnas Nord-Froni omavalitsuses. Piirkonna loodenurk ulatub Seli omavalitsusse.

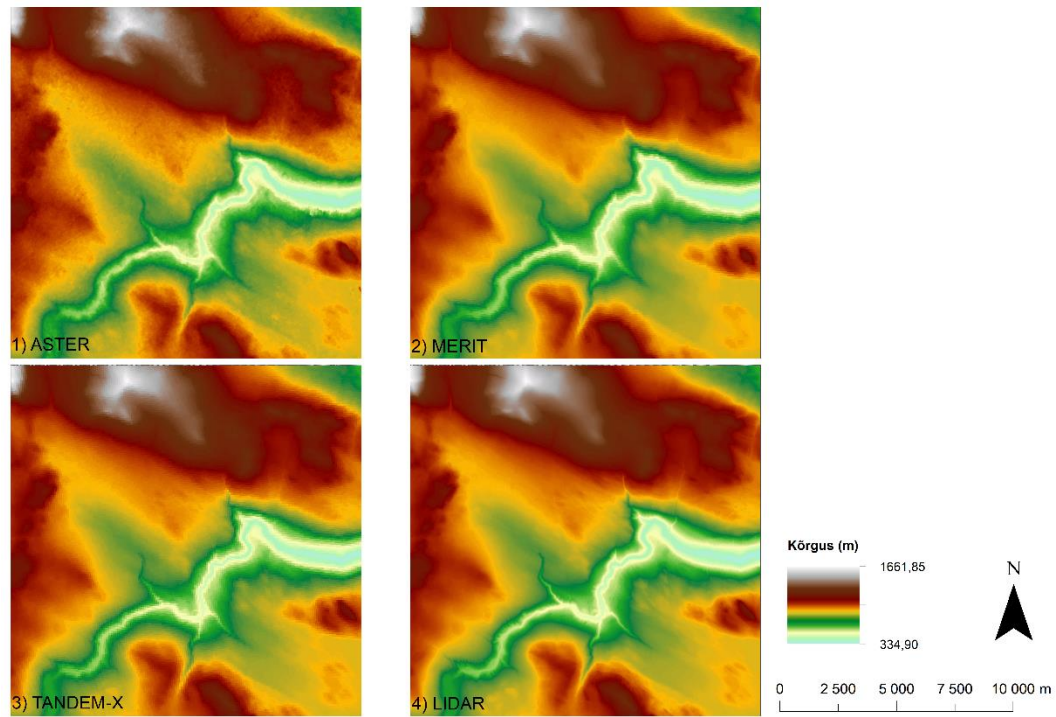
Olulisemad kõrgusmodelilt tuvastatavad pinnamoed on Vinstra jõgi, Jotunheimeni ja Rondane'i mäestike vaheline mägine piirkond, mille kõrgeim uurimisala piiridesse jääv tipp on Saukampen (1659 m) ala loodeosas (Joonis 17).

Uurimisalast ligikaudu 44 % moodustab suletud mets, 37 % rohumaa ja 12 % avatud mets. Ülejäänud ala on peamiselt kaetud rohumaa, põõsastiku ja vähesel määral põllumaa, veekogude, märgalade ja lageda maa või hõreda taimestikuga. Kõrgused uurimisalal jäävad vahemikku 335 m ja 1662 m (Joonis 18).

Antud uurimisala jääb SRTM kõrgusmodeli ulatusest välja. Seega kasutatakse võrdluses nelja kõrgusmodelit (ASTER, MERIT, TanDEM-X ja LIDAR).



Joonis 17. Norra uurimisala asukoht ja maakasutus (Allikas: Natural Earth, 2020).



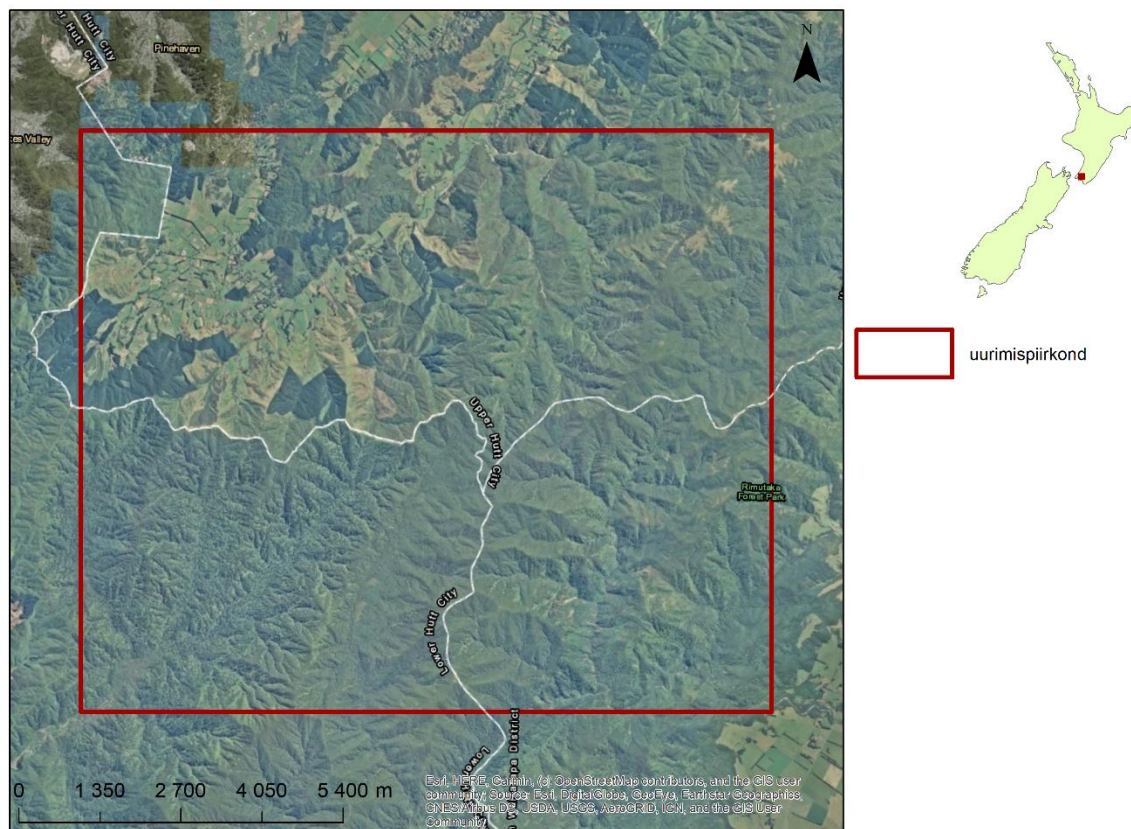
Joonis 18. Norra uurimisala kõrgusmodelid.

2.2.4 Uus-Meremaa uurimisala

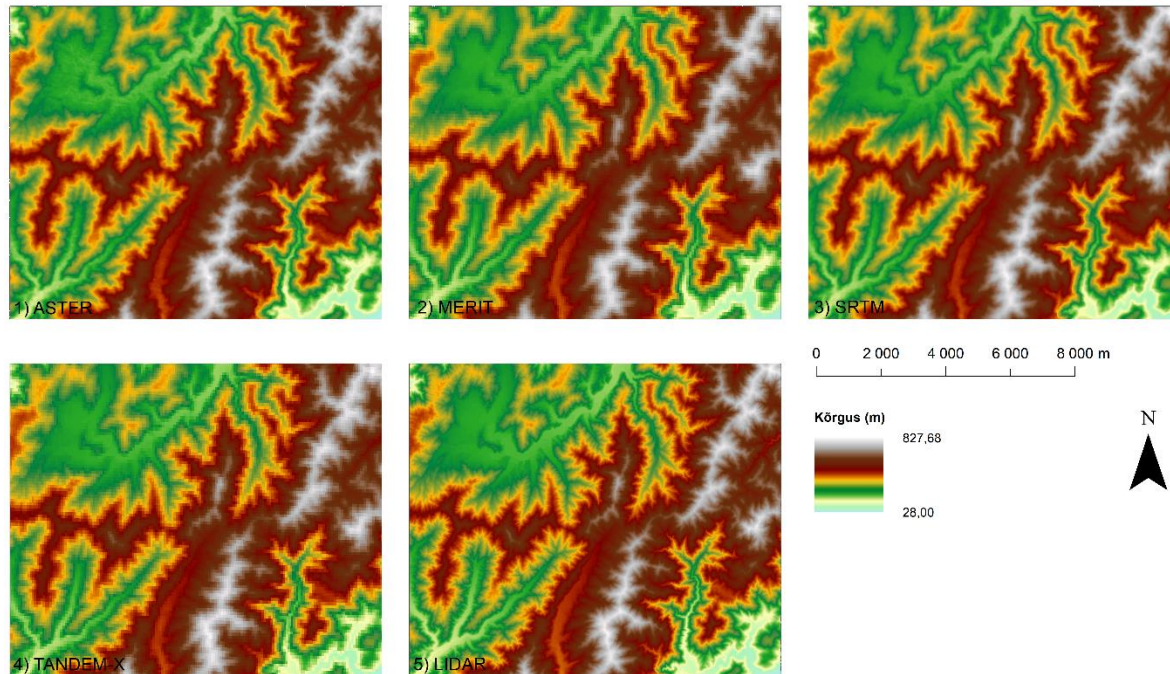
Uurimisala asub Uus-Meremaa põhjasaare lõunaosas kolme administratiivse piirkonna (Lower Hutt City, Upper Hutt City ja South Wairarapa) piiride ristumiskohas Wellingtoni sadama ja Wairarapa järve vahel. Ala jääb osaliselt Rimutaka metsapargi piiridesse (Joonis 19).

Analüüsitava ala pindala on 111 km², millest umbes 89 % moodustab suletud mets. Piirkonda iseloomustavad laialehised metsad, mis sõltuvalt aastaajast lehti ei langeta (Buchhorn et al., 2019). Teised uurimisala piiridesse jäävad maakatte klassid on rohumaa, avatud mets, põõsastik ja haritav maa.

Tegu on reljeefse piirkonnaga, kus mäeharjad vahelduvad mäekurudega (Joonis 20). Kõrgused jäävad referentsmudeli alusel vahemikku 33 m ja 828 m, kuid globaalsete DEM-ide kõrguste varieerumine on suurem (Joonis 20).



Joonis 19. Uus-Meremaa uurimisala asukoht ja maakasutus (Allikas: Natural Earth, 2020).



Joonis 20. Uus-Meremaa uurimisala kõrgusmodelid.

2.3 Metoodika

2.3.1 Andmete eeltöötlus

Analüüsi on kaasatud sõltuvalt uurimispiirkonnast neli kuni viis kõrgusmodelit (SRTM DEM-i ulatus on kuni +/-60 laiuskraadi). Eristatud on globaalsed või peaaegu globaalsed kõrgusmodelid ja regionaalse või lokaalse ulatusega referentsmodelid. Viimaste täpsus on oluliselt kõrgem ülejäänud mudelite oodatavast täpsusest. Seega kasutatakse neid kõrge täpsusega topograafilisi pindu võrdluse alusena.

Võrdlus seisneb analüüsitava ja referentsmodeli vahelises lahutustehtes. Tegu on kaardialgebra ja horisontaalse vea minimeerimiseks on vajalik, et kõrgusmodelid oleksid uurimisala ulatuses kohakuti.

Lähteandmed on erinevas ruumilises resolutsioonis, ulatuses, horisontaalses ja vertikaalses koordinaatsüsteemis. Uurimisala võib alla laetud lähteandmetes paikneda mitmel kaardilehel.

Referentsmodelitele on algselt defineeritud kohalikud koordinaatsüsteemid (Tabel 4).

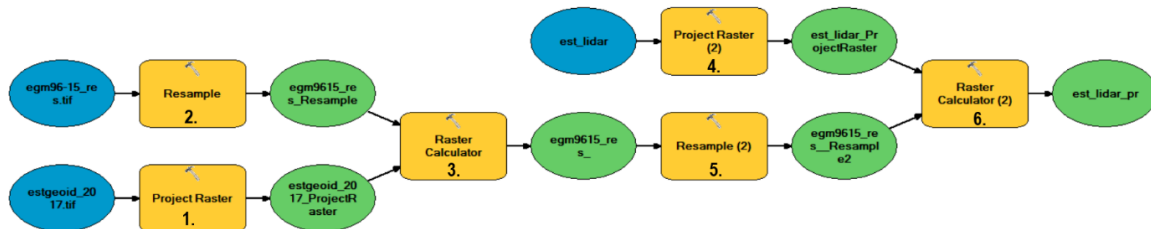
Esmalt teostati mitmel kaardilehel paiknevate uurimisalade mosaiikimine üheks rasterobjektiks. Järgmine oluline samm oli ortomeetriline teisendus. Antud töös uurimisobjektiks olevate kõrgusmodelite kõrgusväärtused (v.a TanDEM-X) on ortomeetrilised. See tähendab seda, et kõrgusväärtus on defineeritud geoidi ja topograafilise pinna vahel. Geoidid on igal referentsmodelil erinevad. Samas globaalsed DEM-id (v.a TanDEM-X) on kõik arvutatud EGM96 geoidi suhtes. Teades geoidide kõrgusväärtusi, on võimalik sooritada rasterobjektidega aritmeetiline tehe, mille eesmärgiks on leida geoidide vaheline kõrguserinevus. Vajaminevad geoidid (v.a EST-GEOID2017) on alla laetud .tif formaadis Agisofti vastavalt veebilehelt (<https://www.agisoft.com/downloads/geoids/>). Eesti geoid on hangitud ASCII formaadis Maaametilt (Ellmann et al., 2017).

Tabel 4. Referentsmodelite koordinaatsüsteemid ja geoidid.

Uurimisala	Horisontaalne koordinaatsüsteem	Vertikaalne koordinaatsüsteem	Geoid
Eesti	L-EST 97 (EPSG: 3301)	EH2000	EST-GEOID2017 (Ellmann et al., 2017).
Hiina	WGS1984 UTM Zone 48N (EPSG: 32648)	WGS84	WGS84
Norra	ETRS 1989 UTM Zone 33N (EPSG: 25833)	NN2000	NN 2000
Uus-Meremaa	NZGD 2000 New Zealand Transverse Mercator (EPSG: 2193)	NZVD2016	NZVD2016

Referentsmodelilt geoidide kõrguserinevuse lahutamise tööde järjekord oli järgmine (Joonis 21):

1. Referentsmodeli geoidi rasterobjekt viidi globaalsesse WGS84 koordinaatsüsteemi.
2. Alla laetud EGM96 geoidi rasterobjekti piksli suurus ühitati punktis 1 saadud tulemuse piksli suurusega ning toimus sellega snäppimine.
3. Lahutustehe: EGM96 - kohalik geoid.
4. Referentsmodel teisendati WGS84 koordinaatsüsteemi.
5. Lahutustehte tulemuse (punkt 3) resolutsiooni ühitamine ning snäppimine punkti 4 tulemusega.
6. Lahutustehe: punkt 4 tulemus - punkt 5 tulemus.



Joonis 21. Regionaalselt geoidilt kõrgusväärtuste teisendamine EGM96 geoidile. Referentsmodeli kõrgusväärtustest lahutatakse EGM96 ja referentsmodeli geoidi vaheline kõrguste erinevus.

Hiina uurimisala referentsmodel on sarnaselt TanDEM-X kõrgusmodelile arvatud WGS84 ellipsoidi suhtes. Ellipsoidaalne ja ortomeetiline kõrgus on geoidi kõrgusega seotud järgneva valemiga (EOC Geoservice, 2020):

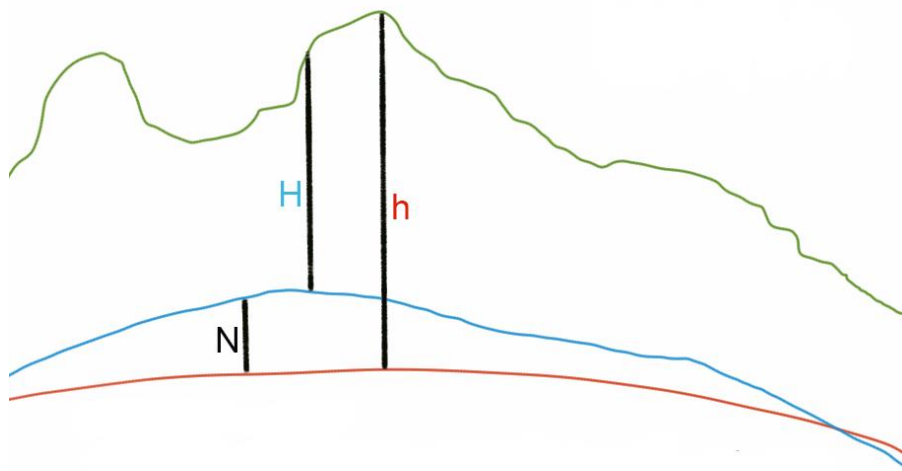
$$h = H + N,$$

kus

h – ellipsoidaalne kõrgus

H – ortomeetiline kõrgus

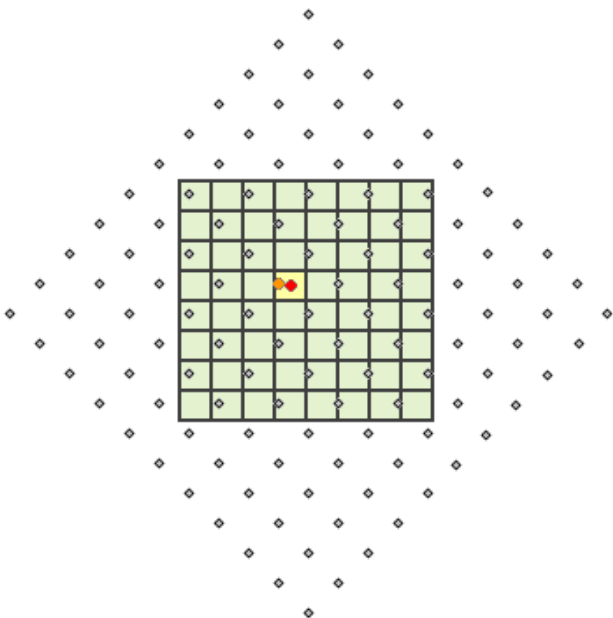
N – geoidi kõrgus (Joonis 22).



Joonis 22. Seosed ortomeetrilise (H) ja ellipsoidaalse kõrguse (h) ning geoidi kõrguse (N) vahel (Allikas: Osedok, 2015).

WGS84 ellipsoidi ja EGM96 geoidi vaheline kõrguste erinevus on .tif formaadis rasterobjektina kaasas ArcGIS installatsiooniga. Kaardialgebrat rakendades on sarnaselt ülaltooduga üksteisega kohakuti seatud rasterobjektidega sooritatud aritmeetiline tehe ja DEM-idest on maha lahutatud kõrguste erinevus.

Järgmine etapp andmete eeltöötlemises on analüüsis osalevate kõrgusmodelite resolutsiooni ja ulatuse ühitamine referentspinna piksli suurusega. See on oluline rasterobjektide vahelises lahutustehtes, kus horisontaalse vea minimeerimiseks peavad pikslid omavahel kohakuti paiknema.



Joonis 23. Lähima naabri meetod teisendamisel. Oranž punkt saab kollase piksli keskpunkti (punase punkti) väärtuse (Allikas: Esri, 2019).

Resolutsiooni ühitamisel kasutati lähima naabri meetodit (Joonis 23). See tähendab seda, et piksli väärtus uues rasterobjektis vastab lähimale piksli väärtusele lähteandmestikus (Esri, 2019). Teisisõnu teisendades ~30 m resolutsiooni ~1 meetrini, genereeritakse 900 algse piksli väärtusega 1 m x 1 m suurust pikslit.

Andmete eeltöötlemiseks kasutati ArcMap 10.6 tarkvara (ESRI, 2018a).

2.3.2 Vigade hindamine

Samasse koordinaatsüsteemi, resolutsiooni ja ulatusse viidud ning üksteisega kohakuti asetatud rasterobjektidega sooritati lahutustehe, mille tulemusi kasutatakse järgmistes tööetappides:

$$\Delta h = Z_{ref} - Z_{model},$$

kus

Z_{ref} – referentsmudel

Z_{model} – uurimise all olev kõrgusmudel.

Selle tulemusena saadi nn vearaster. Kuna enamus vearastrite väärtuste jaotustest ei olnud normaaljaotusele vastavad (Lisa 2), siis arvutati vigade hindamiseks nii parameetrilised kui ka mitteparameetrilised statistikud: miinimum, maksimum, RMSE, keskmine, mediaan, standardhälve, asümmeetriakordaja, ekstsess, NMAD, 68,3. ning 95. protsentiil. Protsentiilid on hajuvuse paremaks hindamiseks võetud vea absoluutväärtusest.

Suure täpsusega DEM-i iseloomustab väike miinimum-maksimum vahemik, normaalne ühemodaalne jaotus nullilähedase keskmisega, madal assümmeetriakordaja, madal RMSE, madal keskmine viga, madal NMAD, madal standardhälve ja madal 95. protsentiil (Daniel and Tennant, 2007, *cit.* Dewitt et al., 2015). RMSE kirjeldab kõige selgemini vea suurust, samas mediaanviga ning keskmine viga kirjeldavad paremini vea suunda. Kuna kõik kõrgusmudelid ei ole normaaljaotusega, on võrdluses eelistatud mediaani kui mitteparameetrilist statistikut. Vea suuruse hindamisel on kasutatud RMSE-d. Vigu analüüsiti kogu uurimisala üleselt kui ka maakatte, nõlvakalde ja nõlva eksponeerituse klasside kaupa. Copernicuse globaalse maakatte tüübid klassifitseeriti kümnesse klassi (Tabel 5; Lisa 1) ja igale klassile arvutati eraldi eelnevalt mainitud põhistatistikud ja koostati karp-diagrammid.

Nõlvakalded ja nõlva ekspositsioon jaotati kaheksasse klassi (Tabel 5) ning arvutati samuti põhistatistikud. Nõlva eksponeeritus ehk ekspositsioon määrab nõlva langemise ehk avanemise suuna kraadides (0° - põhi, 90° - ida, 180° - lõuna, 270° - lää). Nõlva ekspositsiooni viga võib olla seotud sensori lennutrajektoori, vaatevälja, võimaliku horisontaalse nihke ja kohaliku reljeefiga. Interferomeetriliste meetodite puhul mõjutab seda signaali langemisnurk (Natural Resources Canada, 2015; Yamazaki et al., 2017). Antud töös eeldati, et nõlva ekspositsioonil on mõju vigadele ainult järsematel nõlvadel, seega hinnati ekspositsiooni mõju ainult üle 15 kraadistel nõlvadel.

Nõlvakalde ja ekspositsiooni arvutamisel kasutati ArcMap 10.6.1 (ESRI, 2018b). Statistike arvutamiseks ja karp-diagrammide loomiseks kasutati R versiooni 3.6.2 (R Core Team, 2019) ning selle pakette 'sf' (Pebesma, 2018), 'raster' (Hijmans, 2020) ja 'purrr' (Henry and Wickham, 2019) ja Pythoni versiooni 3.6 ning selle pakette 'scipy' (Virtanen et al., 2020), 'numpy' (Oliphant, 2006) ja 'rasterio' (Gillies and others, 2019).

Lisaks hinnati kvalitatiivselt erindite asukohta ja vigade paiknemist erineva nõlvakalde ja maakatte tüübiga piirkondades. See on läbi viidud peamiselt vearastrilt väärtuste ruumilist paiknemist analüüsides.

Tabel 5. Nõlvakalde, nõlva eksponeerituse ja maakatte klassid.

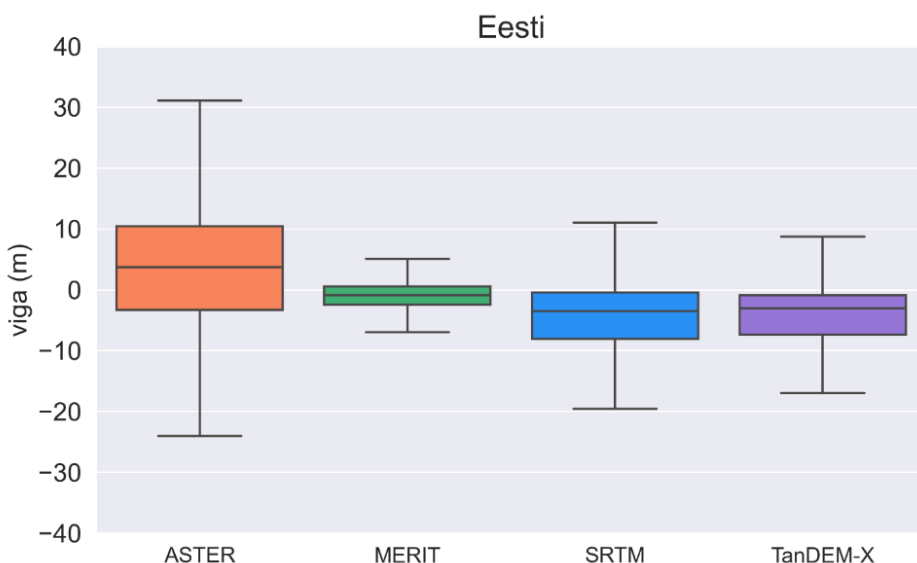
Nõlvakalde klass	Nõlvakalle	Nõlva ekspositsiooni klass (ilmakaar)	Suuna nurk	Maakatte klass	Maakatte tüüp
klass 1	0 – 5°	klass 1 (N)	337,501 – 22,5°	klass 1	suletud mets
klass 2	5 – 10°	klass 2 (NE)	22,501 – 67,5°	klass 2	avatud mets
klass 3	10 – 15°	klass 3 (E)	67,501 – 112,5°	klass 3	põõsastik
klass 4	15 – 20°	klass 4 (SE)	112,501 – 157,5°	klass 4	rohumaa
klass 5	20 – 25°	klass 5 (S)	157,501 – 202,5°	klass 5	haritav maa
klass 6	25 – 30°	klass 6 (SW)	202,501 – 247,5°	klass 6	tehismaastik
klass 7	30 – 35°	klass 7 (W)	247,501 – 292,5°	klass 7	lage maa/hõre taimestik
klass 8	>35°	klass 8 (NW)	292,501 – 337,5°	klass 8	märgalad
				klass 9	lumi ja jää
				klass 10	vesi

3 Tulemused ja arutelu

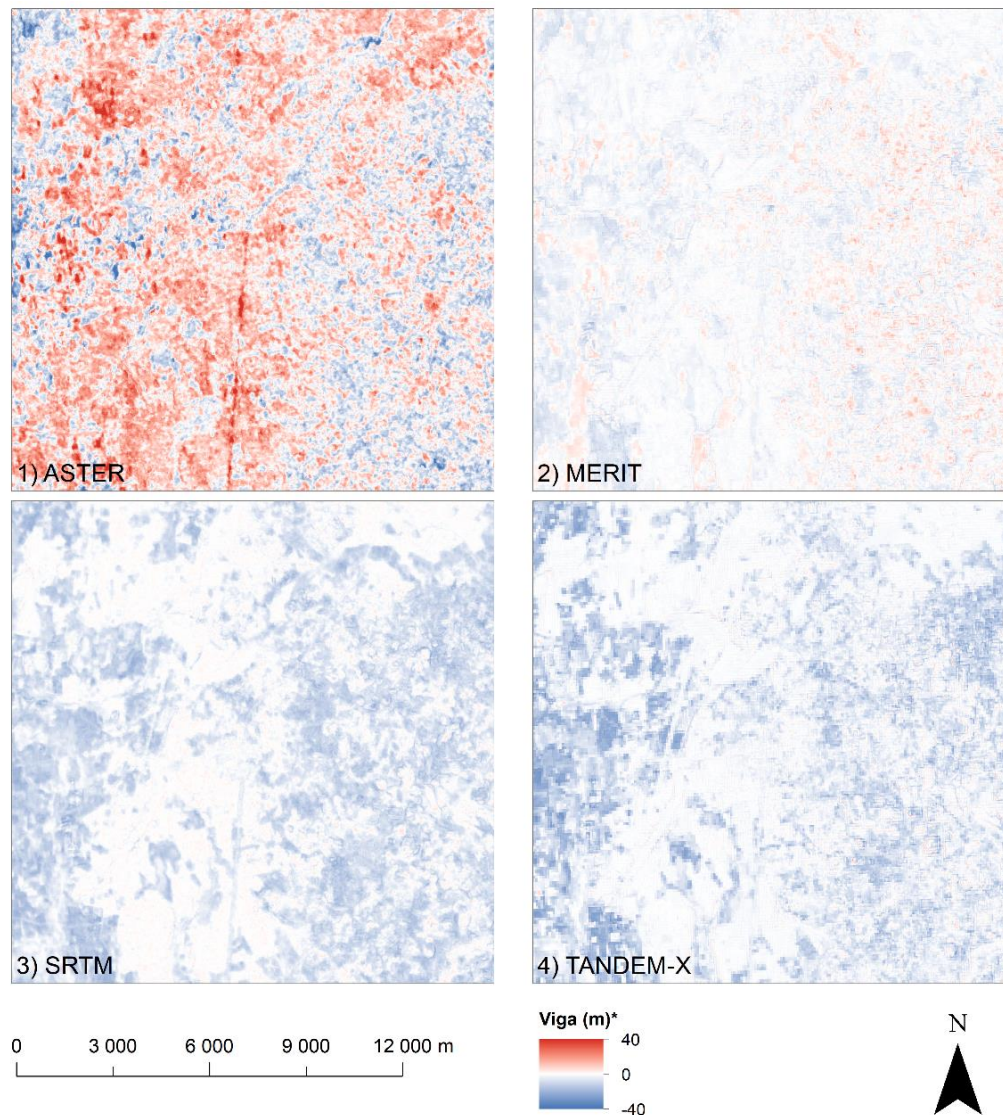
3.1 Eesti uurimisala

Eesti uurimisalal on SRTM ja TanDEM-X kõrgusmodelite vead suunalt valdavalt negatiivsed (Joonised 24 ja 25) st nende kõrgusväärtused on referentsmudeli (LiDAR) vastavast väärtusest suuremad (Joonisel 25 sinisega märgitud). Suurem osa SRTM DEM-i vigasid jääb karp-diagrammi vuntside väärtuste alusel vahemikku -20 m ja 11 m ja TanDEM-X vead vahemikku -17 m ja 9 m (joonis 24). SRTM ja TanDEM-X kõrgusmodelite vigade RMSE, mediaanvea ning keskmise vea väärtused on üsna sarnased, RMSE vastavalt 6,59 m ja 7,16 m, mediaanviga vastavalt -3,51 m ja -3,06 m ning keskmine viga vastavalt -4,57 m ja -4,81 m (Tabel 6). Samuti on vigade hajuvus sarnane, kuigi vigade miinimum ja maksimum väärtused on suuremad TanDEM-X kõrgusmodeli puhul. TanDEM-X kõrgusmodeli mediaanviga on madalam, kuid 95. protsentiil on suurem. See näitab, et TanDEM-X sisaldab rohkem väga kõrge veaväärtusega erindeid kui SRTM.

ASTER ja MERIT kõrgusmodelite vigades pole selgelt ülekaalus positiivsed ega negatiivsed vead. ASTER DEM-i vead on Eesti alal kõige suurema hajuvusega. Samas on ASTER kõrgusmodeli keskmine viga väiksem kui SRTM ja TanDEM-X kõrgusmodelitel ning mediaanviga on ainult natuke suurem. Kõik kõrgusmodelid on üksteisest statistiliselt oluliselt erinevad. MERIT DEM-i vigade mediaan, keskmine, hajuvus ning RMSE on kõige väiksemad. See tähendab seda, et MERIT on kõige kõrgema täpsusega.



Joonis 24. Eesti uurimisala vigade karp-diagrammid. Karbi keskjoon näitab mediaani, karbi ülemine ja alumine serv märgib 75. ja 25. protsentiili (1. ja 3. kvartiili) ning vuntsid markeerivad kvartiilidest 1,5 korda suuremaid või väiksemaid väärtusi. Erindeid karp-diagrammidel ei kuvata, kuigi mudelite vertikaalse täpsuse hindamisel on neid kasutatud.



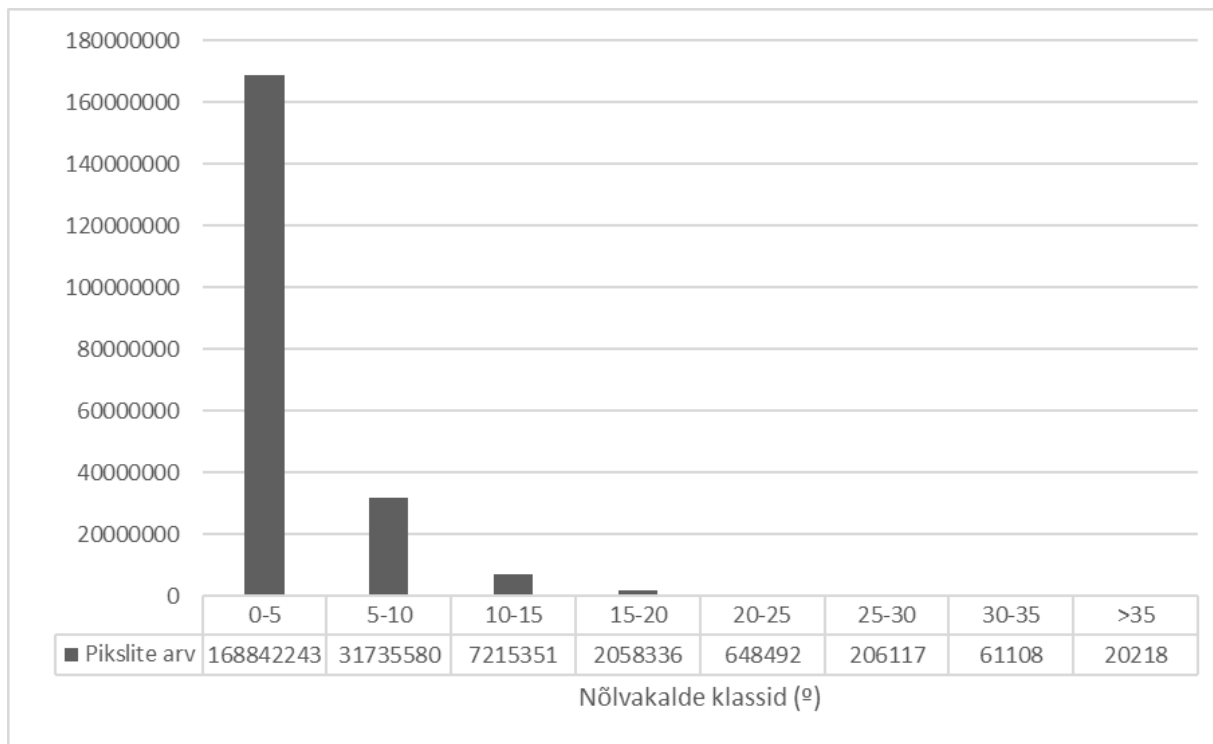
Joonis 25. Vigade ruumiline jaotus Eesti uurimisalal. Värviskaala klassifitseerimisel on välja jäetud erindid, et suurem osa vigadest oleks paremini loetavad.

Tabel 6. Eesti uurimisala vigade põhistatistikud.

Statistik	Muutuja	ASTER DEM	MERIT DEM	SRTM DEM	TanDEM-X DEM
Miinumum	Δh	-64,46	-20,93	-27,31	-38,81
Maksimum	Δh	70,83	20,30	15,57	21,69
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	Δh	11,22	3,01	6,59	7,16
Keskmine	Δh	3,54	-0,87	-4,57	-4,81
Mediaan	Δh	3,71	-0,93	-3,51	-3,06
Keskmine/Mediaan	Δh	0,95	0,93	1,30	1,57
Standardhälve	Δh	10,64	2,88	4,75	5,31
Assümeetriakordaja	Δh	-0,06	0,18	-0,65	-1,33
Ekstsess	Δh	3,91	4,69	2,51	4,62
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	Δh	10,21	2,23	5,14	3,79
68,3 protsentiil	$ \Delta h $	10,91	2,73	6,81	5,92
95 protsentiil	$ \Delta h $	21,74	6,13	13,35	15,92

Nõlvakalle

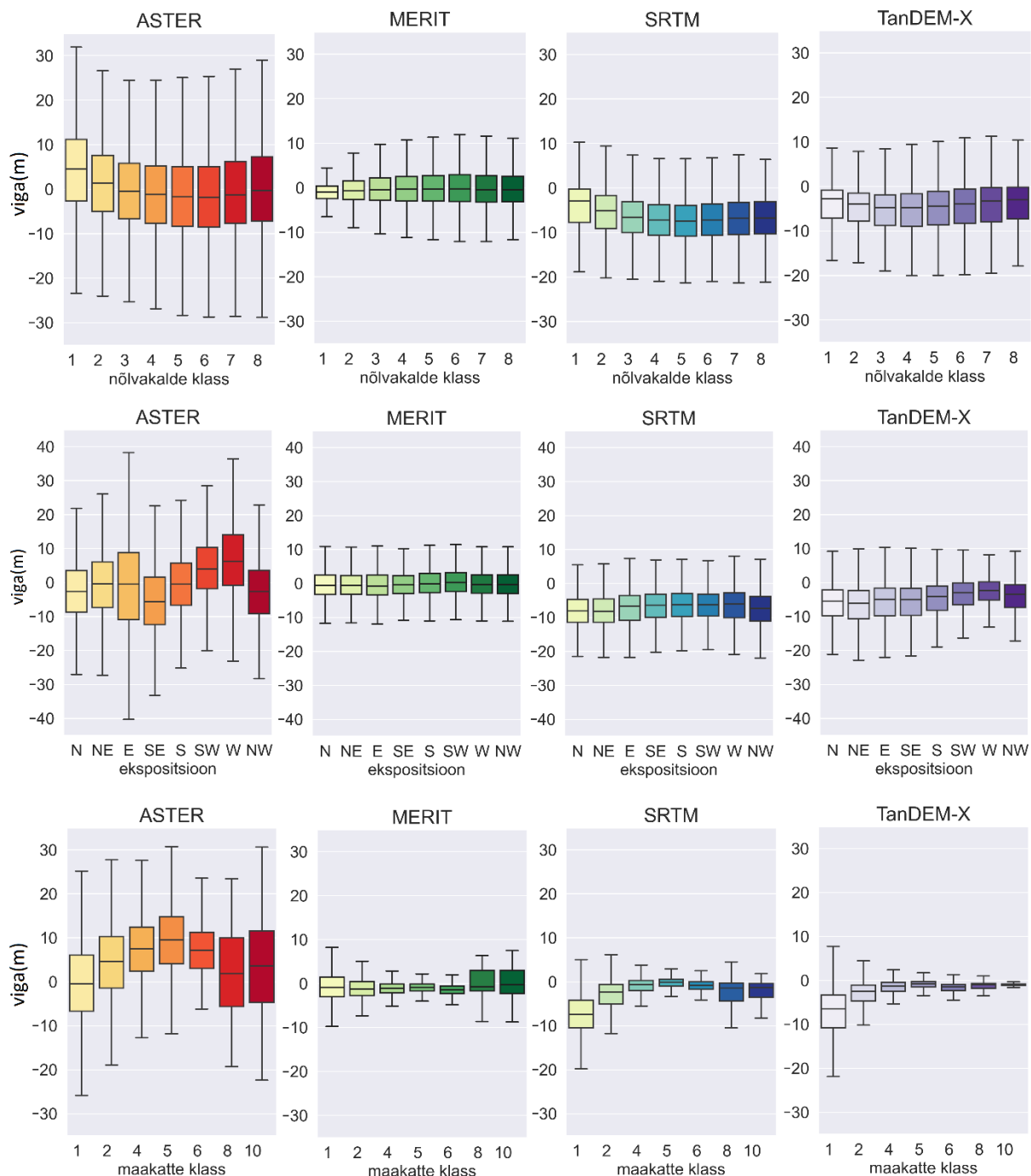
Eesti uurimisala on valdavalt tasane, kus enamus piksleid jääb nõlvakalde klassi 0 – 5° (Joonis 26). Seega nõlvakalde mõju on Eesti uurimisala näitel vähem märgata ning selget seost nõlvakalde ja vigade vahel välja ei joonistu. SRTM ja TanDEM-X kõrgusmodelite puhul mediaanviga kasvab nõlvakalde suurenedes, kuid siis väheneb päris suurte nõlvakallete puhul. See võib olla seotud erisuunaliste vigade omavaheliste interaktsioonidega.



Joonis 26. Eesti uurimisala nõlvakalde histogramm.

MERIT kõrgusmodeli vigade jaotus nõlvakalde klassides erineb ülejäänud kõrgusmodelite omast (Joonis 27). Kõrgusmodeli mediaanviga läheb nõlvakalde kasvades nullile lähemale, kuid samas vigade hajuvus selgelt suureneb.

RMSE nõlvakalde suurenedes pigem kasvab, kuigi see muutus on lihtsama pinnamoe tõttu väiksem ja stabiliseerub keskmisest järsemate nõlvakallete juures (15 – 25°) (Lisa 3). RMSE ASTER kõrgusmodeli juures alguses väheneb, kuni siis suuremate nõlvakalleteni, mil see taas kasvama hakkab. Kõrge RMSE kõige laugemas nõlvakalde klassis on selgitatav antud klassis ilmnevate suurte positiivsete (ASTER) või negatiivsete (ASTER, SRTM, TanDEM-X) erinditega.



Joonis 27. Eesti uurimisala kõrgusmodelite vigade karp-diagrammid nõlva kalde (ülemine rida), nõlva ekspositsiooni (keskmine rida) ja maakatte (alumine rida) klasside kaupa. Erindeid karp-diagrammidel ei kuvata, kuigi mudelite vertikaalse täpsuse hindamisel on neid kasutatud. Nõlvakalle: klass 1 0 – 5°; klass 2 5 – 10°; klass 3 10 – 15°; klass 4 15 – 20°; klass 5 20 – 25°; klass 6 25 – 30°; klass 7 30 – 35°; klass 8 >35°. Maakate: klass 1 suletud mets; klass 2 avatud mets; klass 4 rohuma; klass 5 haritav maa; klass 6 tehismaastik; klass 8 märgalad; klass 10 vesi.

Nõlva ekspositsioon

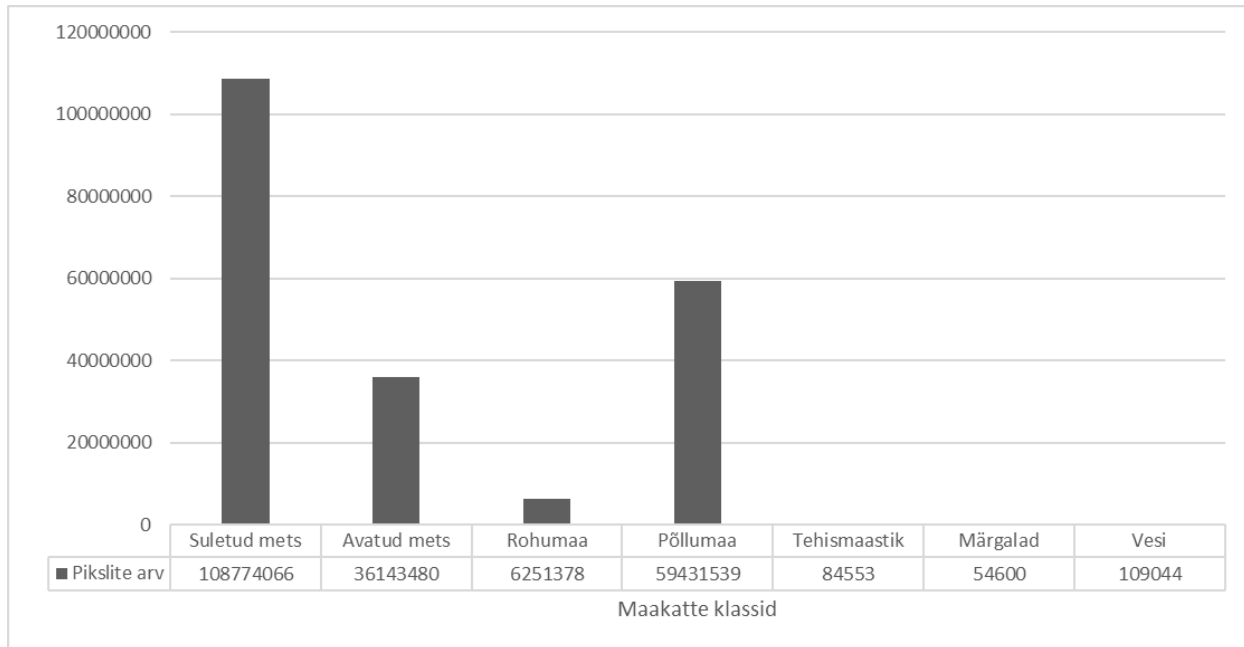
Nõlva eksponeerituse mõju Eesti uurimisalal on minimeeritud, sest järsemaid nõlvu Eesti uurimisalal on vähe (üle 15 kraadiseid nõlvu oli 1,4 % kogu uurimisalast).

Nõlva asetuse muutusega kaasnev vea väärtuse varieerumine on kõige selgemini tuvastatav ASTER kõrgusmudelil, kus mediaanviga on positiivne (4,00 m ja 6,28 m) SW ja W nõlva ekspositsiooni klassides ning negatiivne mediaanviga on suurim SE nõlva ekspositsiooni klassides (Joonis 27; Lisa 4). Seda võib selgitada ASTER kõrgusmudelil varem tuvastatud horisontaalne nihe suunas SW, SSW (Tachikawa et al., 2011). Samas esineb ASTER kõrgusmudelil palju mitmesugust müra ja teist tüüpi vigu, mistõttu on keeruline ilma täiendavate analüüsideta lõplikku hinnangut anda.

SRTM ja TanDEM-X kõrgusmudelite juures on mediaanviga kõikide klasside juures negatiivne (Lisa 4). See on kõige lähemal nullile klassis W (Joonis 27). Viimast võib selgitada nõlvade ning sensorite orbiidi ja signaali langusnurga vaheline asend. Antud analüüsi kontekstis peaksid positiivse suunaga vead ilmnema sensori vaatevälja poole avanematel nõlvadel ning negatiivsed vead sensorist eemalduvatel nõlvadel. TanDEM-X lennu parameetrid (langusnurk 37 – 45°, tõusev orbiit ja paremale vaatav sensor) võiksid selgitada nullilähedasemat mediaanviga eelpool mainitud suunas, kuid vajalikud oleksid täiendavad analüüsid. SRTM lennu parameetrid antud kaardiruudu kohta puuduvad. Samas leidis Niculita (2018) sarnaselt siinsele tööle, et SRTM kõrgusmudeli puhul oli nõlva ekspositsiooni mõju väike ja pigem seletas ekspositsiooni vigade erinevuse ära kindla ekspositsiooniga suured nõlvakalded.

Maakate

ASTER kõrgusmudel annab suure positiivse vea madala taimkattega aladel st ASTER mudeli kõrgusväärtused on madalamad referentsmudelist (Joonis 25 ja 27; Lisa 5). Sarnast nihet on täheldatud ka varasemates analüüsides (Gesch et al., 2016). ASTER GDEMv2-s on küll seda nihet vähendatud ent kuna kalibreerimistegur on arvatud tuginedes pinnale, kus ilmnevad maapinnast kõrgemal olevatest objektidest tingitud nihked, siis pole eelpool mainitud viga täielikult eemaldatud (Rexer and Hirt, 2014). Samas globaalse trendina on täheldatud, et ASTER kujutab maapinda tegelikkusest kõrgemana (Dewitt et al., 2015). Antud analüüsis kirjeldab seda negatiivne assümeetriakordaja, keskmine ning mediaanviga. Kolmandaks võivad ASTER kõrgusmudeli täpsust mõjutada mitmesugused geomeetrilised artefaktid, mis on seotud üleminekuomadega ühelt stseenide arvult teisele, stseenide arvuga ja veekogudega (ASTER GDEM Validation Team, 2009, *cit.* Arefi and Reinartz, 2011) . Lisaks on ASTER mõjutatud kõrgsageduslikust mürast, mis on tingitud parema resolutsiooni saavutamiseks kasutatud väiksemast stereokorrelatsiooni aknast (Tachikawa et al., 2011). Eeltoodud põhjustel ilmneb uurimisel nii suuri positiivseid kui ka negatiivseid vigu.



Joonis 28. Eesti uurimisala maakatte klasside histogramm.

Eesti uurimisalal, mis on üldjoontes lihtsa pinnamoega, on suurema kaaluga maakattest tingitud viga. Maakattest kõige suurema osa moodustavad suletud metsad (Joonis 28). MERIT, SRTM ja TanDEM-X on kõige ebatäpsemad metsaga kaetud aladel. Eelpool mainitud kõrgusmodelite RMSE-d suletud metsaga aladel on vastavalt 3,56 m, 8,60 m ja 9,40 m. Avatud metsaga aladel on vastavad näitajad 3 – 5 m (Lisa 5). On selge, et suurema võra katvusega metsades on viga suurem. Tulemus on oodatav, sest et interferomeetrilise tehisavaradari signaal ei suuda tagasipeegeldumisel täielikult puude võrast läbi tungida. Lisaks võib viga mõjutada ruumihajuvuse efekt, kus signaal hajub osaliselt puuvõras (Japan Association of Remote Sensing, 1996). See vähendab interferomeetrilise faasi täpsust ja seega ka kõrgusmodeli täpsust (Alberga, 2004). Kahes metsa maakatte klassis on vigade hajuvuse statistikud samuti suuremad (Joonis 27; Lisa 5). MERIT kõrgusmodelist on suurem osa taimkatte vigasid filtreerimise ja muude meetoditega eemaldatud, seega antud mudeli vead on kõrge taimestikuga klassides väiksemad (Yamazaki et al., 2017). Taimkattest tingitud vead on negatiivsed, kuna mudelid kujutavad pinda referentsmudelidest kõrgemana.

SRTM kõrgusmodeli viga on klassides „märgalad“ ja „veekogud“ võrdlemisi suur (RMSE vastavalt 5,57 m ja 3,90 m) (Lisa 5). Tegu on interferomeetrilise meetodika artefaktiga, kus veekogude kohal on madalam koherentsus ja tagasipeegeldumine, mis takistab faasi korrektset lahtipakkimist. MERIT ja TanDEM-X kõrgusmodeli vastavad statistiku väärtused on väiksemad. Tegu võib olla kas teatud tüüpi vigade eemaldamise ja seejärel veekogude korrektse konstandiga „täitmisega“ või siis TanDEM-X mitmest ülelennust koosneva missiooni ja suuri erindeid parandava TanDEM-X protsessori ITP töö tulemusega (Rizzoli et al., 2017).

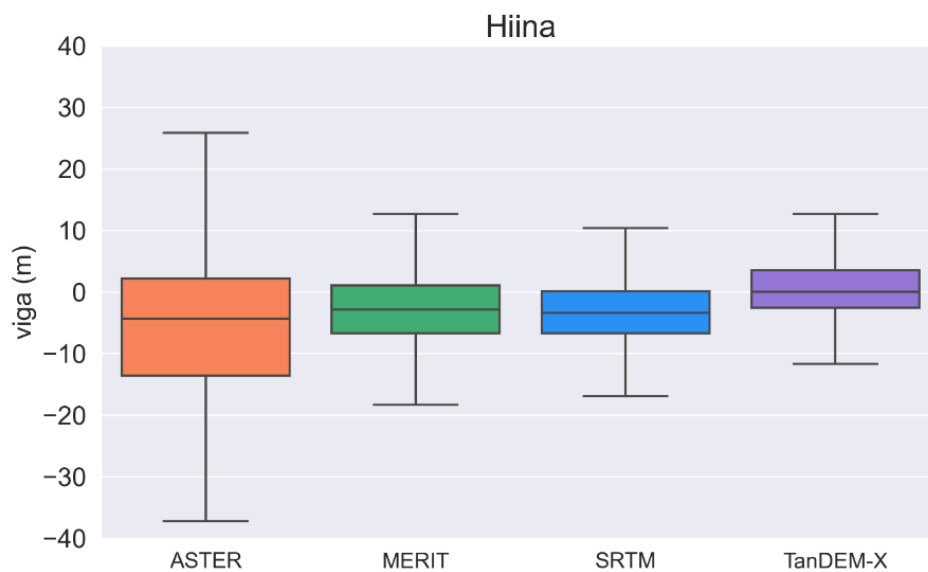
Asulate ja muude linnaliste alade viga on MERIT, SRTM ja TanDEM-X kõrgusmodeli juures väike, mis on mõnevõrra üllatav, sest et kõik eelpool mainitud mudelid on tegelikult maakatte kõrgusmodelid (kuigi MERIT-ist on suur osa taimkattest tingitud vigasid eemaldatud). Võimalik on, et antud objektid on võrreldes maakatte andmestiku resolutsiooniga (100 m) väga väikeste mõõtmetega. Analüüsi kaasatakse piksleid, kus tegelikult tehisobjekt puudub.

3.2 Hiina uurimisala

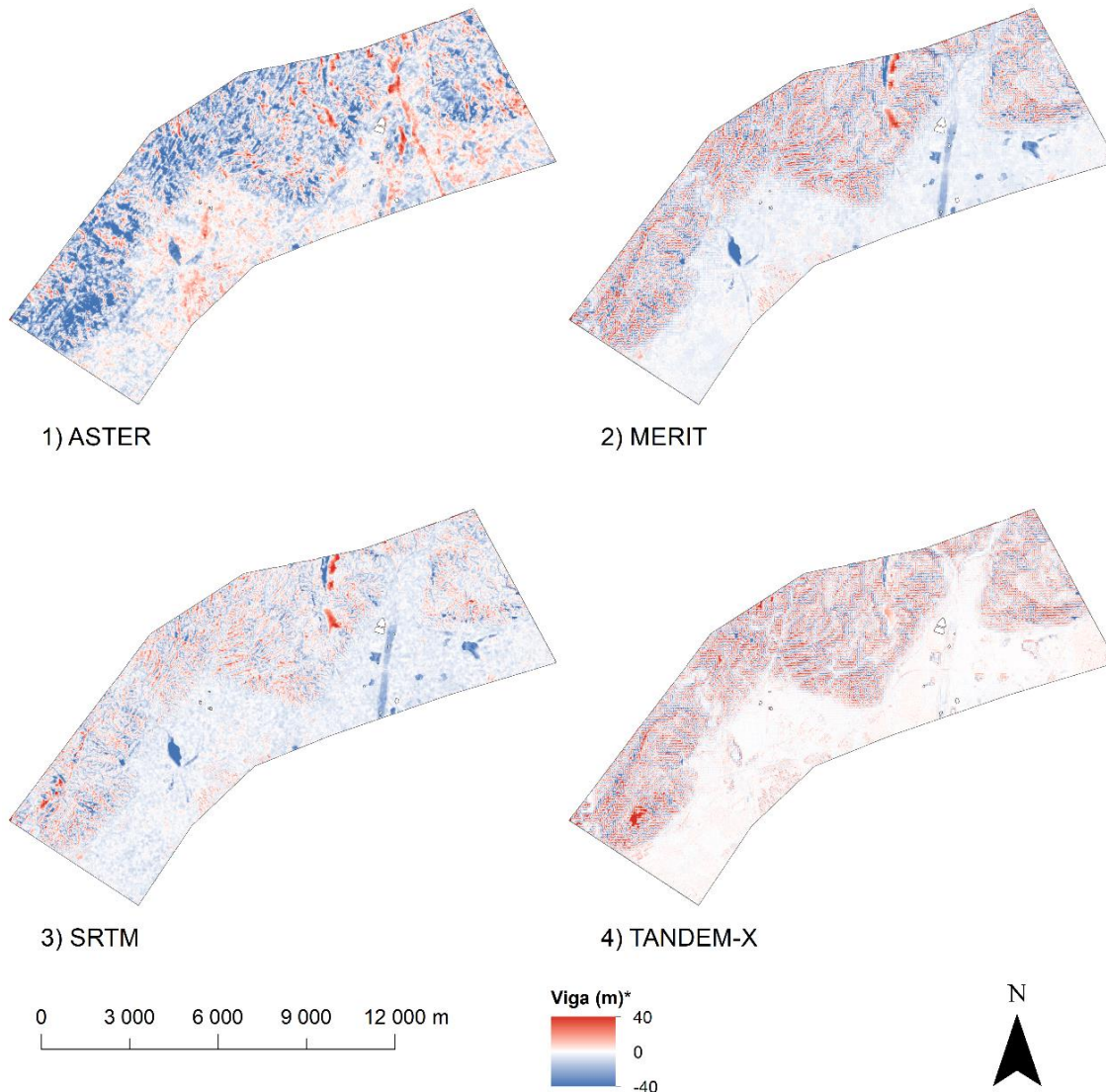
Hiina uurimisalal on kõrgusmodelite vead valdavalt negatiivsed (st nende kõrgusväärtused on referentspinna (Pleiades-1A) vastavast väärtusest kõrgemal), kuigi esineb ka suuri positiivseid erindeid (Joonis 29 ja 30; Tabel 7). Eristuvad MERIT, SRTM ja TanDEM-X, mille vigade väärtused on uurimisala üleselt lähemal maapinnatõesele Pleiades-1A kõrgusmodelile. Suurem osa MERIT kõrgusmodeli vigasid jääb karp-diagrammi vuntside väärtuste alusel vahemikku -18 m ja 13 m, SRTM kõrgusmodeli vead vahemikku -17 m ja 10 m ning valdav osa TanDEM-X vigasid on vahemikus -12 m ja 13 m (Joonis 29).

MERIT ja SRTM kõrgusmodelite vigade mediaan ja keskmine on üsna sarnased ja suunalt negatiivsed jäädes 2 – 4 m vahemikku. TanDEM-X vigade mediaan ja keskmine on kõige madalamad ja suunalt positiivsed, vastavalt 0,05 m ja 0,52. RMSE on kõige madalam SRTM kõrgusmodeli puhul (Tabel 7).

Sarnaselt Eesti uurimisalale on ASTER kõrgusmodeli vead Hiina alal kõige suurema hajuvusega (95. protsentiil: 34,30 m) ning ka mediaanviga ja keskmine viga on kõige suurem võrreldes teiste kõrgusmodelitega (Tabel 7). Vead on erinevalt teistest kõrgusmodelitest rohkem negatiivse suunaga.



Joonis 29. Hiina uurimisala karp-diagrammid. Karbi keskjoon näitab mediaani, karbi ülemine ja alumine serv märgib 75. ja 25. protsentiili (1. ja 3. kvartiili) ning vuntsid markeerivad kvartiilidest 1,5 korda suuremaid või väiksemaid väärtusi. Erindeid karp-diagrammidel ei kuvata, kuigi mudelite vertikaalse täpsuse hindamisel on neid kasutatud.



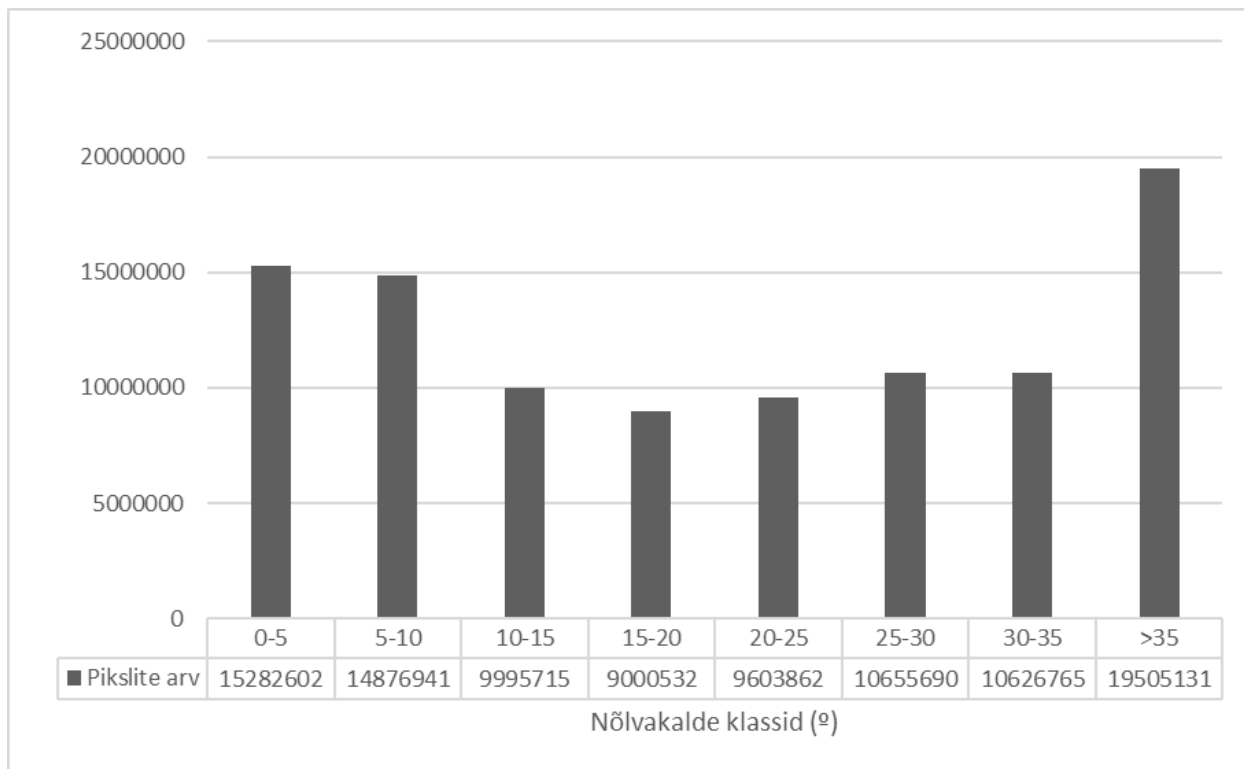
Joonis 30. Vigade ruumiline jaotus Hiina uurimisalal. Värviskaala klassifitseerimisel on välja jäetud erandid, et suurem osa vigadest oleks paremini loetavad.

Tabel 7. Hiina uurimisala vigade põhistatistikud.

Statistik	Muutuja	ASTER DEM	MERIT DEM	SRTM DEM	TanDEM-X DEM
Miimumum	Δh	-311,89	-323,10	-318,89	-319,35
Maksimum	Δh	437,89	422,19	418,89	425,04
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	Δh	16,67	12,49	10,08	11,18
Keskmine	Δh	-6,65	-2,75	-3,27	0,52
Mediaan	Δh	-4,32	-2,83	-3,41	0,05
Keskmine/Mediaan	Δh	1,54	0,97	0,96	10,83
Standardhälve	Δh	15,28	12,19	9,54	11,16
Assümeetriakordaja	Δh	-0,42	1,27	2,70	2,01
Ekstsess	Δh	18,31	37,82	96,15	53,62
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	Δh	11,19	5,75	5,05	4,53
68,3 protsentiil	$ \Delta h $	12,72	8,86	7,06	7,26
95 protsentiil	$ \Delta h $	34,30	25,94	18,72	23,38

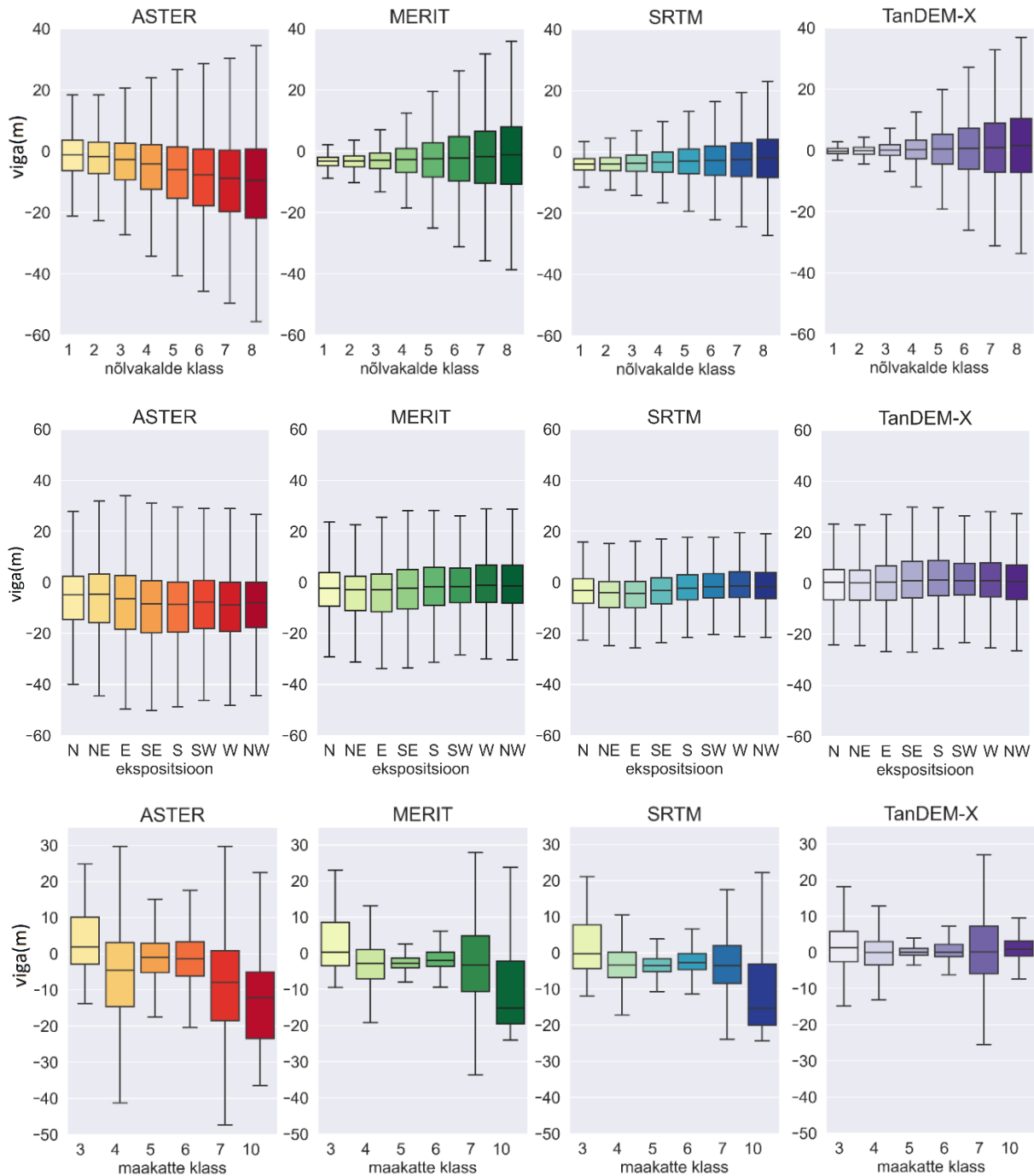
Nõlvakalle

Hiina uurimisalal seonduvad vead eelkõige reljeefiga, kuna maakate on valdavalt lage või madala taimkattega. Uurimisala reljeef on väga varieeruv ning kõik nõlvakalde klassid on suhteliselt ühtlaselt esindatud (joonis 31).



Joonis 31. Hiina uurimisala nõlvakallete histogramm

Üldine trend Hiina uurimisalal on see, et mida suuremaks muutub nõlvakalle, seda vähem täpsemad on antud kõrgusmudelid ning vigade hajuvus suureneb (Joonis 32; Lisa 6). Sarnaselt Eesti uurimisalale on kõige suurema veaga ASTER, mille vigade mediaanväärtus muutub nõlvakalde kasvades negatiivsemaks (alla 5 kraadistel nõlvadel on viga -1,12 m ja üle 35 kraadistel nõlvadel juba -9,45 m). See viga võib olla osaliselt tingitud horisontaalsest nihkest, mis on ASTER GDEM V2 valideerimisraporti kohaselt 0,13 kaaresekundit ida suunas ja 0,19 kaaresekundit lõuna suunas (Tachikawa et al., 2011). See tähendab, et antud asetusega nõlvadel on ASTER kõrgusmudel referentsmudelist kõrgemal ja vastassuunal avanevatel nõlvadel on vastupidine efekt. Samas võib ka antud nihke arvutamisel kasutatud 10 m GSI DEM olla referentsmudeli suhtes nihkes. Horisontaalset nihet antud uurimuses hinnatud pole.



Joonis 32. Hiina uurimisala kõrgusmodelite vigade karp-diagrammid nõlva kalde (ülemine rida), nõlva ekspositsiooni (keskmine rida) ja maakatte (alumine rida) klasside kaupa. Erindeid karp-diagrammidel ei kuvata, kuigi mudelite vertikaalse täpsuse hindamisel on neid kasutatud. Nõlvakalle: klass 1 0 – 5°; klass 2 5 – 10°; klass 3 10 – 15°; klass 4 15 – 20°; klass 5 20 – 25°; klass 6 25 – 30°; klass 7 30 – 35°; klass 8 >35°. Maakate: klass 3 põõsastik; klass 4 rohumaa; klass 5 haritav maa; klass 6 tehismaastik; klass 7 lage maa/hõre taimeistik; klass 10 vesi.

Kõrgusmodelid ülehindavad kõrgusi väga järskude nõlvadega kuristikus ja orgudes ning pigem alahindavad kõrgusi mägede harjadel (Joonis 30). Sarnasele järeldusele on jõutud ka varem (Kramm and Hoffmeister, 2019).

TanDEM-X on madala reljeefiga piirkondades kõige täpsem (RMSE: 3,28 m). Sellele järgneb MERIT (RMSE: 7,08 m), kuid antud trend muutub suurema nõlvakaldega piirkondades, kus kõige täpsemaks osutub SRTM (RMSE: 14,35 m) (Lisa 6).

Varasemalt saadud tulemused on näidanud, et suurema nõlvakaldega piirkondades on kõige täpsem MERIT, millele järgneb TanDEM-X ning kõige vähem täpsem on SRTM. Eelpool mainitud analüüsis erinesid kõige suurema (>15 °) nõlvakalde klassi RMSE-d kõrgusmodelite võrdluses ligikaudu 2,5 m (MERIT: 4,95 m, SRTM: 7,40 m ja TanDEM-X 6,42 m). (Hawker et al., 2019) Siin toodud tulemused erinevad varasemalt kirjutatud artiklis tuvastatud vigadest, kuid MERIT, SRTM ja TanDEM-X kõrgusmodelite vigade erinevus jääb ligikaudu 3 meetri piiresse (Lisa 6). MERIT ja TanDEM-X kõrgusmodeli kõrgem viga keerulise reljeefiga piirkondades võib olla seotud madalama resolutsiooniga, mis raskema reljeefiga piirkondades rohkem mõju avaldab. Madalama resolutsiooniga piksli sees võib kõrgus muutuda mitukümmend meetrit. Sellest tingituna tekivad samasse suurusjärku jäävad vead.

Nõlva ekspositsioon

Hiina uurimisalal jaotub ASTER kõrgusmodeli mediaanviga nõlva ekspositsiooni klassides vastupidiselt teistele kõrgusmodelitele (Joonis 32). Üldine vea suund on tugevalt negatiivne, kuid põhja suunas langevates nõlva ekspositsiooni klassides N ja NE on mediaanvea absoluutväärtus väiksem. Samas on märkimisväärne klassi W mediaanvea väärtus (Joonis 32; Lisa 7). ASTER kõrgusmodeli üldise SW-SSW suunalise nihke korral peaksid lõuna poole avanevad nõlvad olema referentsmodelist kõrgemad ja põhjapoolsed nõlvad referentsmodelist madalamad. Ent antud juhul on klassi mediaanviga tugevalt negatiivne. Trend pole selgelt välja joonistunud.

MERIT ja SRTM vead jagunevad ühte moodi. Kõige positiivsemad mediaanvead on klassis W (Joonis 32; Lisa 7). Kuna MERIT kasutas algandmetena suures osas SRTM v2.1, siis teatav sarnasus on oodatav. Samas kuna metaandmeid andmete allalaadimisel kaasas polnud, on lennuinfo andmete puudumisel raske järeldusi teha. Analüüsi tulemused langevad kokku Niculita (2018) leituga. Vead on vahemikus NE-SW nullile kõige lähemal. Autor seostas vea ruumilist jaotust kindlates suundades avanevate nõlvade suurema nõlvakaldega.

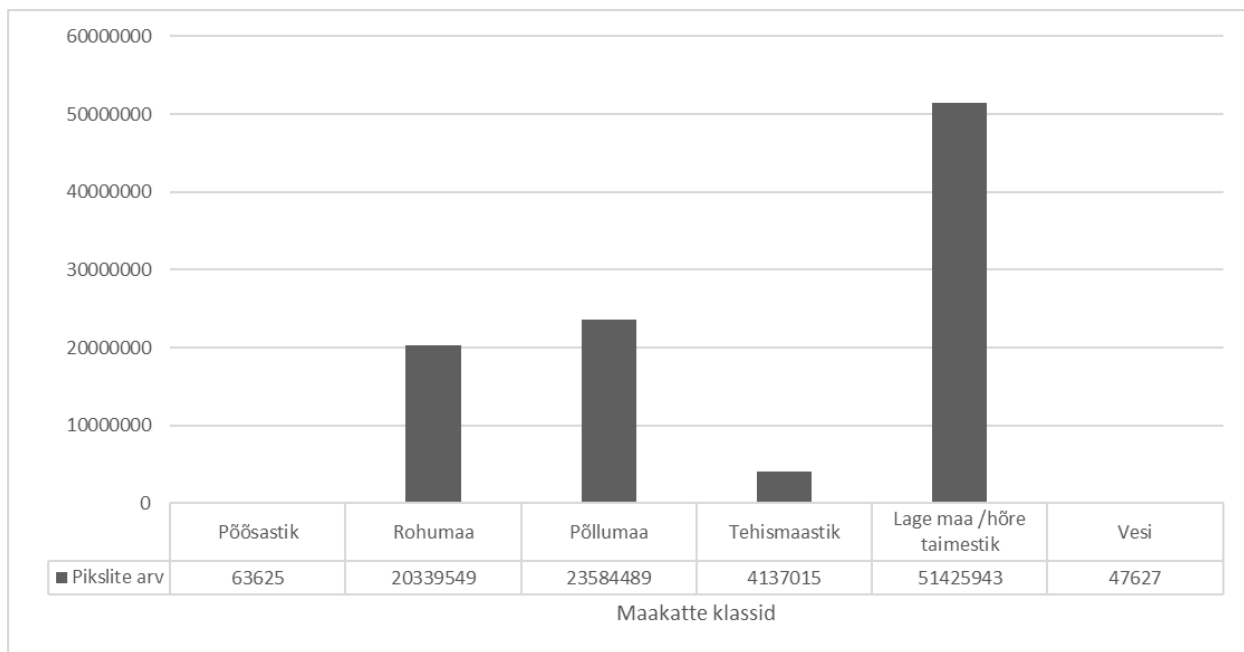
TanDEM-X kõrgusmodeli tulemus on osaliselt sarnane MERIT ja SRTM kõrgusmodelitega, kuid positiivsemad mediaanvead on klassides S ja SW.

Maakate

Suurema osa Hiina uurimisalast võtavad enda alla hõredam ja madalam maakate. Metsa antud uurimisasal pole (Joonis 33).

ASTER, MERIT ja SRTM on oma vigade muustritelt sarnased, kuigi vigade suurused on erinevad (Joonis 32). Suurimad vead on lageda maa või hõreda taimestiku ja veekogude maakatte klassides. RMSE väärtused on vastavalt ASTER kõrgusmodelil 19,97 m ja 17,34 m; MERIT kõrgusmodelil 15,09 m ja 14,45 m; SRTM kõrgusmodelil 11,97 m ja 14,91 m (Lisa 8). Mediaanvead ja keskmised vead on lageda maa või hõreda taimestiku maakatte klassi puhul oluliselt väiksemad kui veekogude klassis (Lisa 8). Veekogude puhul on vead kõikide kõrgusmodelite puhul va TanDEM-X tugevalt negatiivsed st globaalsed kõrgusmodelid hindavad ala kõrgemaks võrreldes referentsmodeliga. Veekogud on teada madala tagasipeegeldumisega. Võimalik on pikslite mööda registreerimine. See võiks selgitada ASTER kõrgusmodeli suurt viga antud klassis. SRTM ja MERIT kõrgusmodelite viga veekogude osas on praktiliselt võrdne. Veekogud on ülehinnatud nii fotogramm-meetrite kui ka interferomeetrite meetodite puhul. Esimesel juhul on viga tingitud

kas veekogu madalast kontrastist võrreldes naabruses olevate pikslitega või referentsmudeliga võrreldes teistsugusest konstandist, mida veekogude maskimisel kasutati. Teisel juhul tekib viga faasi lahti pakkimisel, kuna veekogud on väga madala koherentsuse ja tagasi peegeldumisega. (Hodgson et al., 2003; Hawker et al., 2019) TanDEM-X kõrgusmudeli puhul antud müra ei teki, mis võib olla tingitud mudeli ajalisest ulatusest. Mudeli metaandmetega alla laetud vee indikatsiooni kaardikiht (WAM) veekogu ei tuvastanud. Samas kõrgusmudelilt endalt ja vearastrilt on veekogude kaldajoonte reljeef ära tuntav. Uurimisalal paiknevate järvede veetase võib ajas muutuda või sootuks ära kuivada.



Joonis 33. Hiina uurimisala maakatte klasside histogramm.

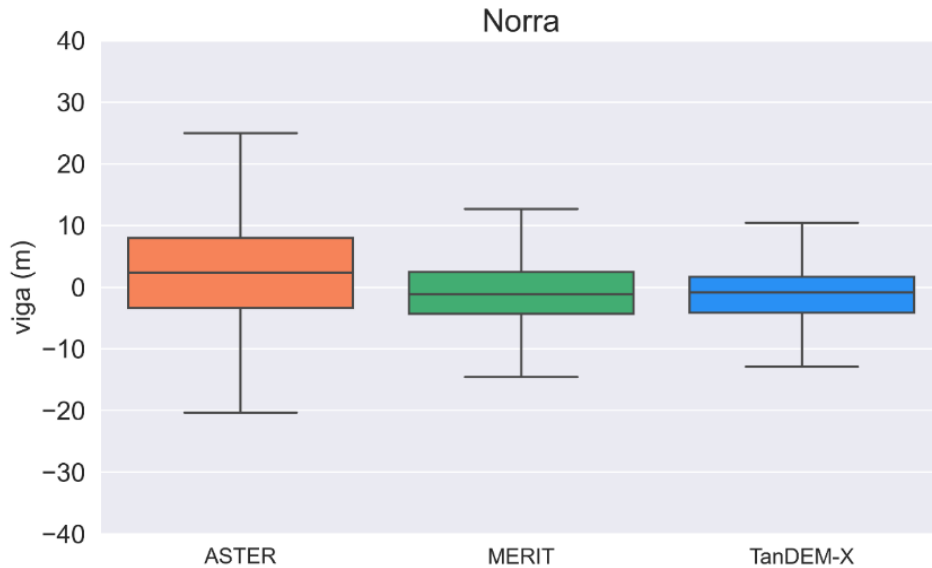
Lageda maa või hõreda taimestikuga aladel esineb suuri vigasid nii negatiivses kui ka positiivses suunas. Suured vead lagedal või hõreda taimestiku maakatte klassides on selgitatavad sellega, et antud piirkonnad on keerulise reljeefiga. Seega suure tõenäosusega pole antud viga põhjustatud maakattetüübist. Sama efekt on tuvastatav rohumaa klassis. ASTER kõrgusmudeli vead on eelpool mainitud klassides kõige suuremad ja rohkem negatiivsemad (Joonised 32; Lisa 8). Platool paiknevad madalamad maakattetüübid nagu haritav maa ja tehismaastik on suhteliselt väikse veaga. Tehismaastikul on sellegipoolest suurem RMSE. ASTER kõrgusmudelil jäävad need 7–8 m juurde ja MERIT kõrgusmudelil 4–5 m vahemikku ning SRTM kõrgusmudelil 5 m juurde. Põõsastiku vead on 1 – 2 m suuremad (Lisa 8). SRTM ja MERIT on tasasel alal Hiina uurimispiirkonnas praktiliselt võrdsete vigadega. Keerukama reljeefiga piirkonnas on SRTM täpsem.

Lameda reljeefiga platool on kõige täpsem TanDEM-X. Keerukama reljeefiga piirkondades muutub SRTM täpsemaks. Selle põhjuseks võib olla TanDEM-X kõrgusmudelil kõrgem resolutsioon. Erinevates maakatte klassides on kõige madalama täpsusega ASTER. Kirjeldatud tulemusi kinnitavad hajuvusmõõdikud (protsentiilid, NMAD ja standardhälve) (Joonis 32; Lisa 8).

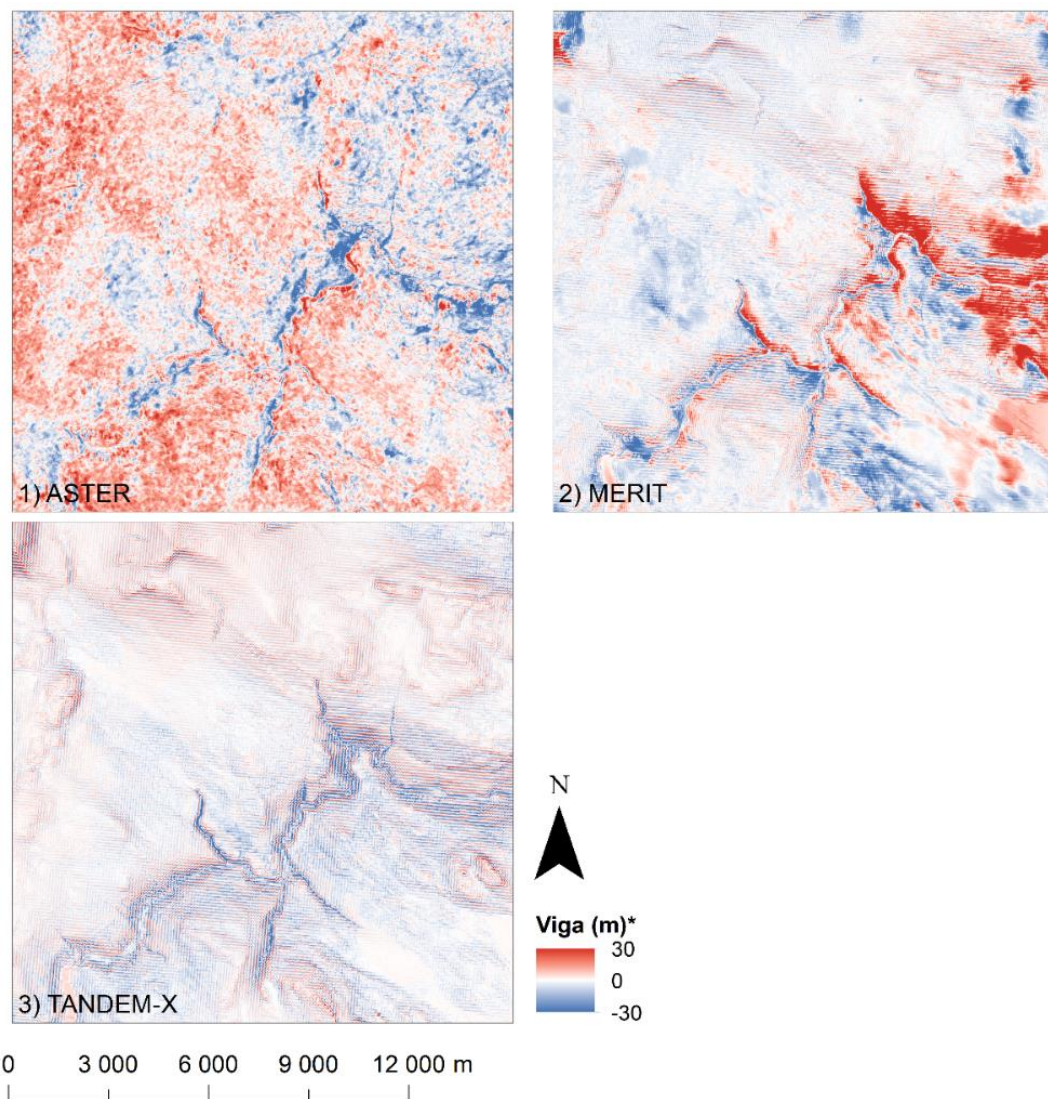
3.3 Norra uurimisala

Norra uurimisalal esineb ASTER ja MERIT kõrgusmudelites nii positiivseid kui ka negatiivseid vigasid (Joonised 34 ja 35; Tabel 8). Suurem osa ASTER vigasid jäi karp-diagrammi vuntside väärtuste alusel vahemikku -20 m ja 25 m ja MERIT DEM-i vead vahemikku -15 m ja 13 m (Joonis 34). MERIT kõrgusmudeli vigade mediaan ja keskmine on ASTER kõrgusmudelist madalamad: mediaanviga vastavalt -1,13 m ja 2,41 m ning keskmine viga vastavalt -0,20 m ja 1,85 m. Samuti olid väiksemad NMAD ja 68,3. protsentiil (NMAD: 5,03 m ja 8,39 m; 68,3. protsentiil: 5,96 m ja 9,11 m). RMSE ning 95. protsentiil on MERIT kõrgusmudelil marginaalselt kõrgemad (Tabel 8). See võib tuleneda sellest, et MERIT DEM-il esineb rohkem väga kõrge väärtusega erindeid.

TanDEM-X kõrgusmudeli miinimum ja maksimum väärtused on kõige madalamad. Samamoodi on TanDEM-X DEM-i RMSE ja 95. protsentiil kõige väiksem ning NMAD ja keskmine viga on madalamad kui ASTER kõrgusmudelil, mediaanviga on natuke parem MERIT ja ASTER kõrgusmudeli vastavast väärtusest. Madal 95. protsentiil näitab väiksemat erindite arvu (Tabel 8). Viimast kinnitab vearaster (Joonis 35), kus TanDEM-X kõrgusmudelil on võrreldes teiste DEM-idega äärmuslikke vigade väärtusi oluliselt vähem.



Joonis 34. Norra uurimisala karp-diagrammid. Karbi keskjoon näitab mediaani, karbi ülemine ja alumine serv märgib 75. ja 25. protsentiili (1. ja 3. kvartiili) ning vuntsid markeerivad kvartiilidest 1,5 korda suuremaid või väiksemaid väärtusi. Erindeid karp-diagrammidel ei kuvata, kuigi mudelite vertikaalse täpsuse hindamisel on neid kasutatud.



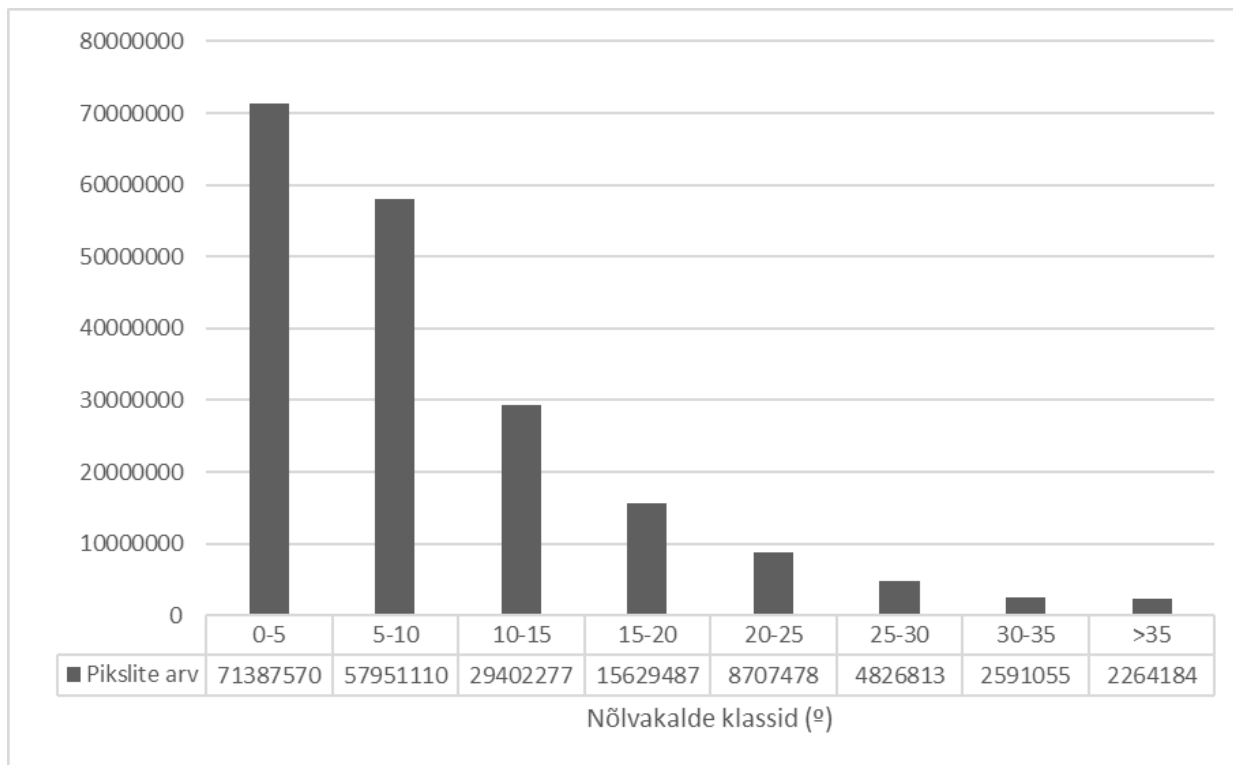
Joonis 35. Vigade ruumiline jaotus Norra uurimisalal. Värviskaala klassifitseerimisel on välja jäetud erindid, et suurem osa vigadest oleks paremini loetavad.

Tabel 8. Norra uurimisala vigade põhistatistikud.

Statistik	Muutuja	ASTER DEM	MERIT DEM	TanDEM-X DEM
Miinumum	Δh	-120,72	-84,66	-86,75
Maksimum	Δh	94,10	134,28	73,76
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	Δh	9,99	10,49	6,84
Keskmine	Δh	1,85	-0,20	-1,52
Mediaan	Δh	2,41	-1,13	-0,87
Keskmine/Mediaan	Δh	0,77	0,18	1,75
Standardhälve	Δh	9,81	10,49	6,67
Assümeetriakordaja	Δh	-0,77	1,82	-0,98
Ekstsess	Δh	6,74	15,34	9,31
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	Δh	8,39	5,03	4,29
68,3 protsentiil	$ \Delta h $	9,11	5,96	4,91
95 protsentiil	$ \Delta h $	19,40	21,96	14,33

Nõlvakalle

Norra uurimisala reljeef on võrdlemisi lihtne ja väga palju suure nõlvakaldega alasid uurimisalale ei jää (Joonis 36). Teatavat nõlvakalde varieerumist põhjustab Vinstra jõeorg ja üksikud mäed piirkonna loode- ja kaguosas.



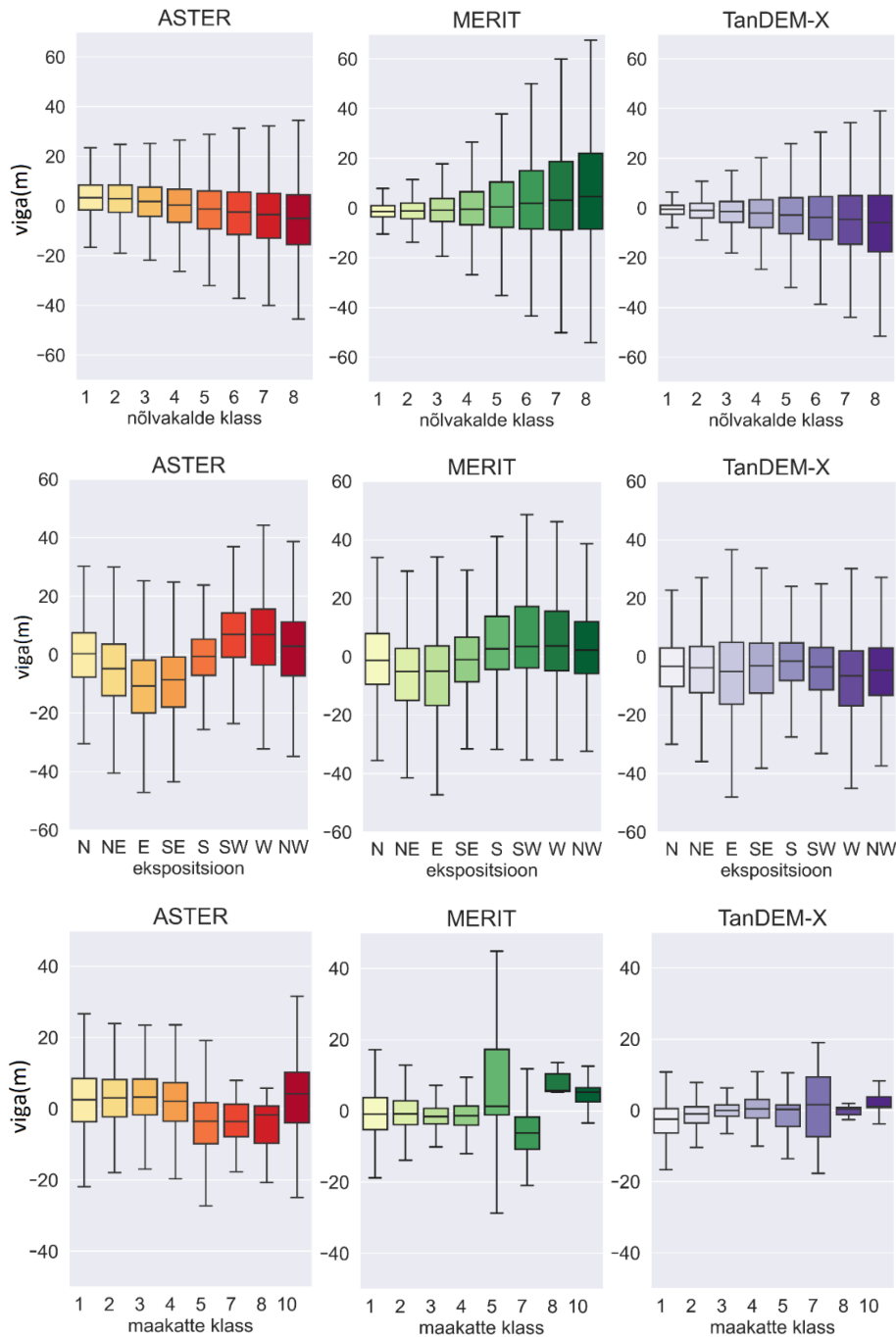
Joonis 36. Norra uurimisala nõlvakallete histogramm.

Kõigi kolme kõrgusmudeli vigade varieeruvus suureneb nõlvakalde suurenedes (Joonis 37). Samas kui MERIT kõrgusmudeli mediaanviga muutub madalast negatiivsest väärtusest nõlvakalde suurenedes kõrgemaks positiivseks väärtuseks, siis ASTER ja TanDEM-X kõrgusmudelite puhul kasvab viga nõlvakalde suurenedes negatiivses suunas. Tegu võib osalt olla maakattest tingitud nihkega. Samas liigub ASTER ja TanDEM-X kõrgusmudeli assümeetriakordaja nõlvakalde suurenedes nullile lähemale. See näitab, et madalama ja lihtsama reljeefi juures on vead valdavalt negatiivsed, kuid keerukama reljeefi puhul ilmnevad lisaks negatiivsetele vigadele ka suured positiivsed vead. MERIT kõrgusmudelil on taimkatte vead suures osas eemaldatud, mistõttu eelpool mainitud iseloomulikke väärtuste jaotumist ei toimu.

MERIT kõrgusmudeli RMSE on nõlvakalde esimeses klassis ASTER kõrgusmudelil parem. See on vastavalt ASTER kõrgusmudelil 9,00 m ja MERIT kõrgusmudelil 6,04 m. Samas nõlvakalde suurenedes kasvab RMSE MERIT kõrgusmudelil kiiremini. Küündides kõige järsema nõlvakalde klassi juures ligikaudu 30 meetrini. Samas kui ASTER kõrgusmudeli vastav statistik on 17,25 m. 95. protsentiili väärtused on ASTER ja MERIT kõrgusmudelitel vastavalt 35,56 m ja 57,48 m. Suurem erindite arv on tõenäoliselt põhjustatud esimese madalamast resolutsioonist (Lisa 9).

TanDEM-X kõrgusmudeli RMSE väärtus on nõlvakalde esimeses klassis kõige madalam – 3,76 m (Lisa 9). RMSE küll nõlvakalde suurenedes kasvab, kuid kasv on aeglasem kui MERIT kõrgusmudelil ja samaväärne ASTER kõrgusmudeliga. Väiksem viga suurema nõlvakaldega

aladel võib olla tingitud sellest, et kasutatud on erinevate parameetritega mitut ülelendu. MERIT kõrgusmudeli genereerimisel rakendati optilise fotogramm-meetria meetodikat ühe ülelennu raames (Purinton and Bookhagen, 2017). Lisaks võib viimasel esineda teatav horisontaalne nihe.



Joonis 37. Norra uurimisala kõrgusmudelite vigade karp-diagrammid (erinditeta) nõlva kalde (ülemine rida), nõlva ekspositsiooni (keskmine rida) ja maakatte (alumine rida) klasside kaupa. Erindeid karp-diagrammidel ei kuvata, kuigi mudelite vertikaalse täpsuse hindamisel on neid kasutatud. Nõlvakalle: klass 1 0 – 5°; klass 2 5 – 10°; klass 3 10 – 15°; klass 4 15 – 20°; klass 5 20 – 25°; klass 6 25 – 30°; klass 7 30 – 35°; klass 8 >35°. Maakate: klass 1 suletud mets; klass 2 avatud mets; klass 3 põõsastik; klass 4 rohuma; klass 5 haritav maa; klass 7 lage maa/hõre taimestik; klass 8 märgalad; klass 10 vesi.

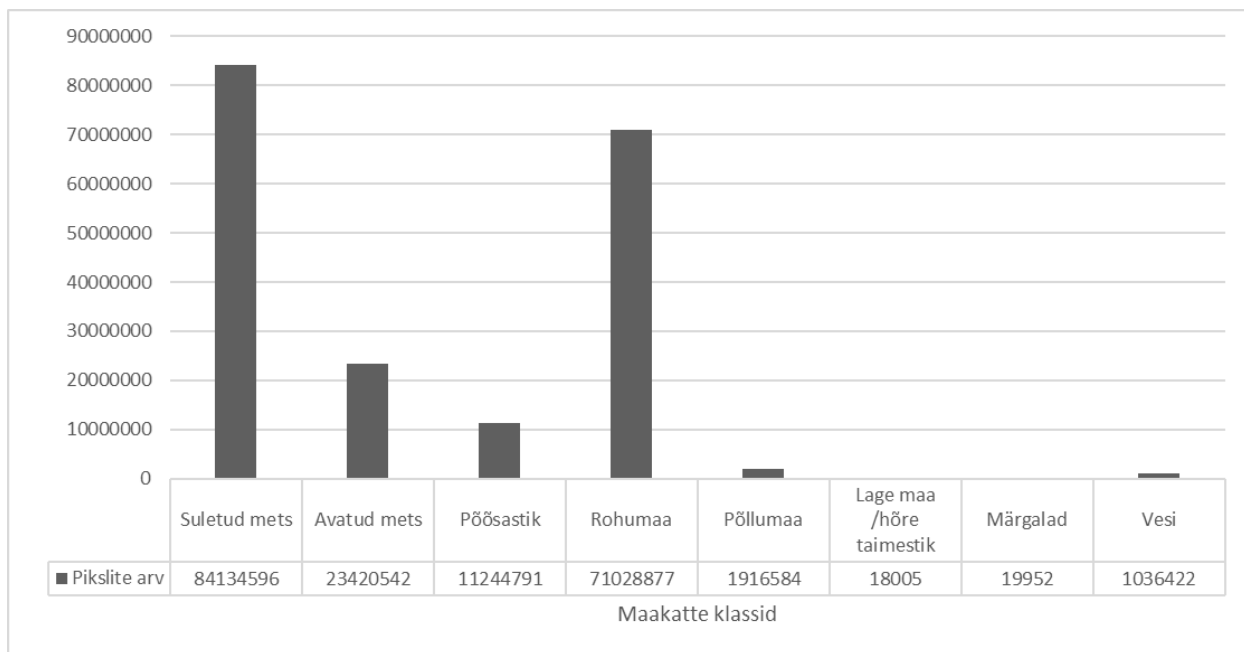
Nõlva ekspositsioon

ASTER ja MERIT kõrgusmodelite mediaanvead on suurema positiivse väärtusega SW ja S nõlvadel (Lisa 10). ASTER kõrgusmodeli puhul on kõige tugevam vastandumine E ja SW klasside vahel. See näitab peamist nihke suunda. MERIT kõrgusmodeli jaoks on klassid SE ja N tõenäoliselt üleminekuklassid, kus esineb nii positiivseid kui ka negatiivseid vigasid (Joonis 37; Lisa 10). Vigade suunda ilmestab kõige paremini vearaster (Joonis 35), kus on märgata edela suunas voolava jõe edelasse, läände ja loodesse avanevatel kallastel positiivseid vigu ning kirdesse ja idasse avanevatel kallastel valdavalt negatiivseid vigu. MERIT kõrgusmodeli aluseks on Norras AW3D30 kõrgusmodel, mis kasutab ühte ülelendu (Purinton and Bookhagen, 2017). Sellest tingituna võib suurema vea puhul tegu olla optilise artefaktiga, mis tuleneb vaatenurgast, kus üks jõe kallas on sensori poole ja teine eemale.

TanDEM-X kõrgusmodelil on igas klassis negatiivne mediaanviga, kuid see on nullile kõige lähemal klassis S. Suurim vastandumine on klassides W ja S (Lisa 10). Erinevalt ASTER ja MERIT kõrgusmodelist on trend nõrk. Sooritatud on mitu ülelendu erinevate parameetritega, mis aitavad kaasa topograafiliselt maapinnatõesema mudeli loomisele. Erinevalt MERIT kõrgusmodelist pole vead jõe eri kallastel oluliselt eristatavad.

Maakate

Norra uurimisala on valdavalt kaetud suletud metsaga (Joonis 38). Läbi erinevate maakatte klasside on kõige täpsem TanDEM-X. Sellele järgnevad MERIT ja ASTER.



Joonis 38. Norra uurimisala maakatte klasside histogramm.

Suuremad kõrgusmodelite vead (RMSE) ilmnevad suletud metsa maakatte klassis (8 – 12 m) (Lisa 11). ASTER kõrgusmodelil esinevad suured negatiivsed erindid veekogude maakatte klassis. Teistel kõrgusmodelitel on antud klassi viga madalam (Lisa 11).

Samas on märkimisväärselt kõrged ka rohumaa ja haritava maa RMSE väärtused. Need on vastavalt ASTER kõrgusmodelil 9,04 m ja 11,59 m; MERIT kõrgusmodelil 8,81 m ja 19,76 m ja

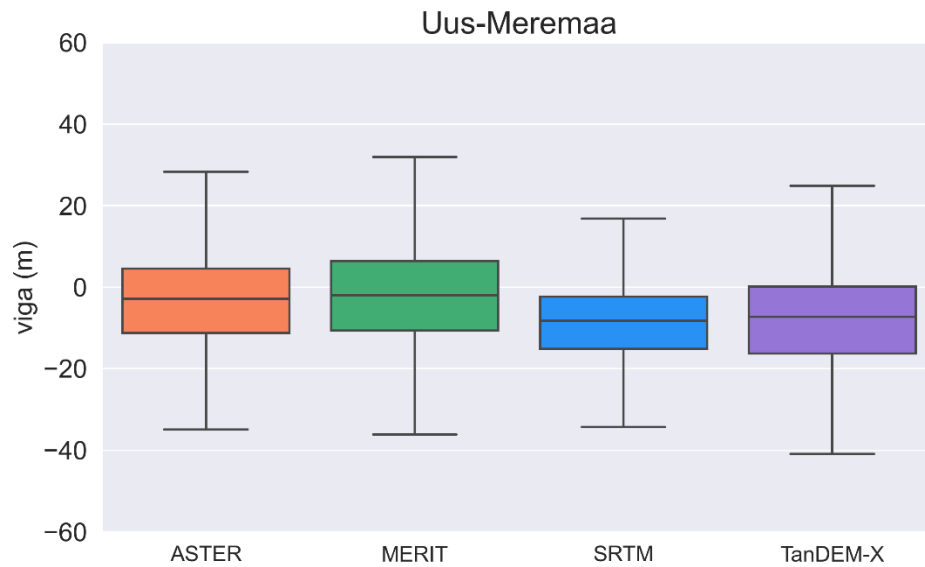
TanDEM-X kõrgusmudelil 5,59 m ja 9,27 m. ASTER kõrgusmudeli puhul on vigade ilmnemine madala taimestikuga aladel ka varem tuvastatud (Arefi and Reinartz, 2011; Tachikawa et al., 2011; Gesch et al., 2016). Samas MERIT on tehtud inferomeetrilise meetodiga, mille puhul peaks madalama taimkattega alad olema väiksema veaga, kuna signaal jõuab suurema tõenäosusega maapinnani (Hodgson et al., 2003). MERIT DEM-i keskmise vea (8,72 m) ja mediaanvea (1,30 m) suur erinevus viitab sellele, et esineb suur arv väga kõrge väärtusega erindeid. Suured vead võivad olla tingitud reljeefist st madala taimkattega alad on valdavalt suure nõlvakaldega piirkondades. Selle hindamiseks arvutati statistikud maakatte klasside kaupa ainult esimese nõlvakalde klassi jaoks (Tabel 9). Tulemused näitavad, et MERIT kõrgusmudeli haritava maa RMSE väärtus on nüüd peaaegu kolm korda madalam. Seega võib öelda, et madala taimkatte suur viga MERIT kõrgusmudeli puhul on antud juhul tingitud nõlvakaldest. MERIT kõrgusmudeli vead on lihtsama reljeefiga piirkondades peaaegu igas klassis (v.a märgalad) ASTER kõrgusmudeli vigadest väiksemad. Keerulisema reljeefiga aladel võib olukord olla vastupidine (Tabel 9; Lisa 11).

Tabel 9. Kõrgusmudelite RMSE-d ja 95. protsentiili väärtused maakatte klassides 0-5° nõlva kalde aladel.

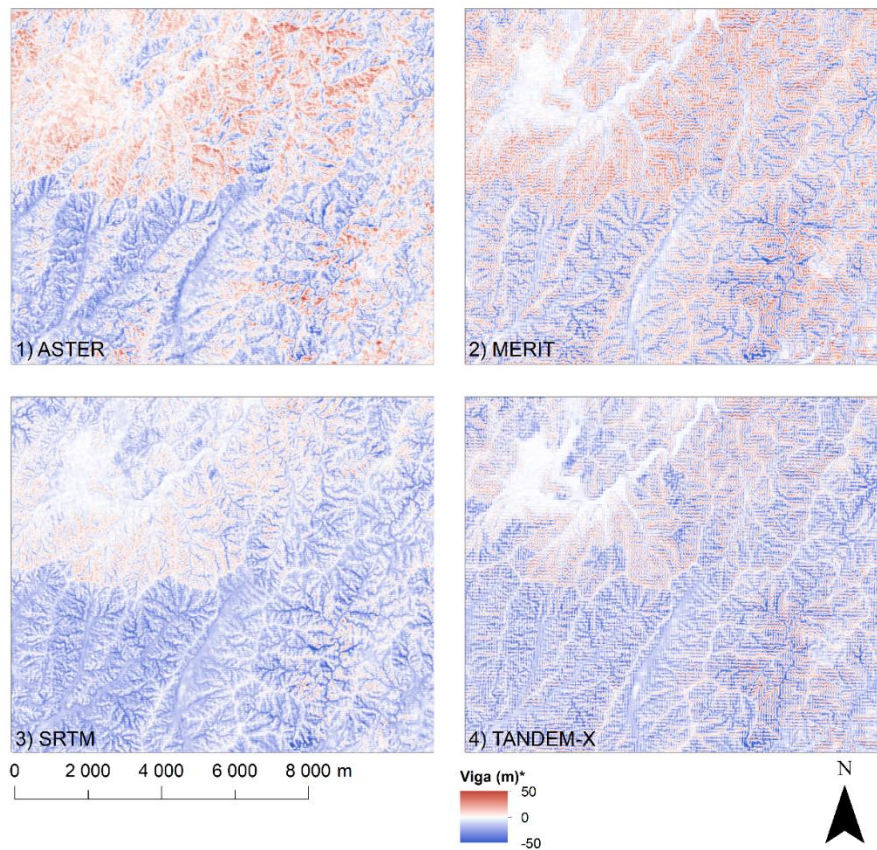
Maakatte klass	ASTER-RMSE	ASTER-95 pr	MERIT-RMSE	MERIT-95 pr	TanDEM-X-RMSE	TanDEM-X-95 pr
Suletud mets	8,87	17,25	7,26	14,66	4,84	9,29
Avatud mets	8,40	16,49	6,37	12,30	3,27	6,38
Põõsastik	8,56	16,76	4,63	8,83	2,41	5,00
Rohumaa	8,86	17,11	4,82	7,85	3,06	6,31
Haritav maa	11,63	24,48	7,05	9,48	2,75	2,83
Märgalad	7,94	16,71	8,20	11,27	1,09	2,06
Veekogud	17,99	32,93	6,13	9,55	2,83	5,05

3.4 Uus-Meremaa uurimisala

Uus-Meremaa uurimisalal esineb ASTER ja MERIT kõrgusmudelitel nii positiivseid kui ka negatiivseid vigasid. Kuigi assümeetriakordaja on antud DEM-idel kergelt negatiivne. SRTM ja TanDEM-X kõrgusmudelites esinevad valdavalt negatiivsed vead st kõrgusmudelid paiknevad referentsmudelist kõrgemal (Joonised 39 ja 40; Tabel 10). Kõrgusmudelite RMSE väärtused jäävad vahemikku 12 – 15 m. Mediaanvea poolest eristuvad SRTM ja TanDEM-X, kus on märgata 4 – 6 m negatiivsemat nihet kui ASTER ja MERIT kõrgusmudelites (Joonis 39; Tabel 10). SRTM kõrgusmudeli hajuvus on kõige madalam. Suurem osa SRTM kõrgusmudeli vigasid jääb karp-diagrammi vuntside väärtuste alusel vahemikku -34 m ja 17 m (Joonis 39). Samas on 95. protsentiili väärtused ASTER ja SRTM kõrgusmudelitel praktiliselt võrdsed. Viimane iseloomustab väga kõrgete vigade hulka antud uurimisala kõrgusmudelites.



Joonis 39. Uus-Meremaa uurimisala karp-diagrammid. Karbi keskjoon näitab mediaani, karbi ülemine ja alumine serv märgib 75. ja 25. protsentiili (1. ja 3. kvartiili) ning vuntsid markeerivad kvartilidest 1,5 korda suuremaid või väiksemaid väärtusi. Erindeid karp-diagrammidel ei kuvata, kuigi mudelite vertikaalse täpsuse hindamisel on neid kasutatud.



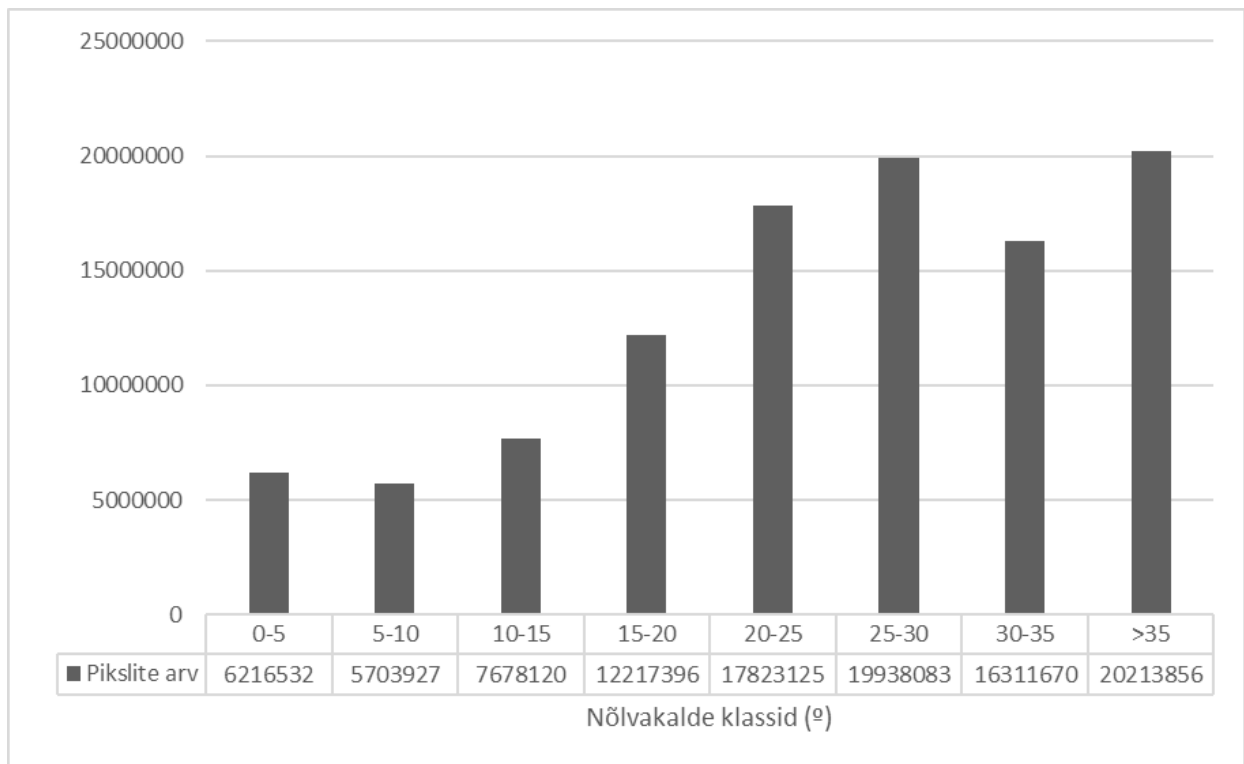
Joonis 40. Vigade ruumiline jaotus Uus-Meremaa uurimisalal. Värviskaala klassifitseerimisel on välja jäetud erandid, et suurem osa vigadest oleks paremini loetavad.

Tabel 10. Uus-Meremaa uurimisala vigade põhistatistikud

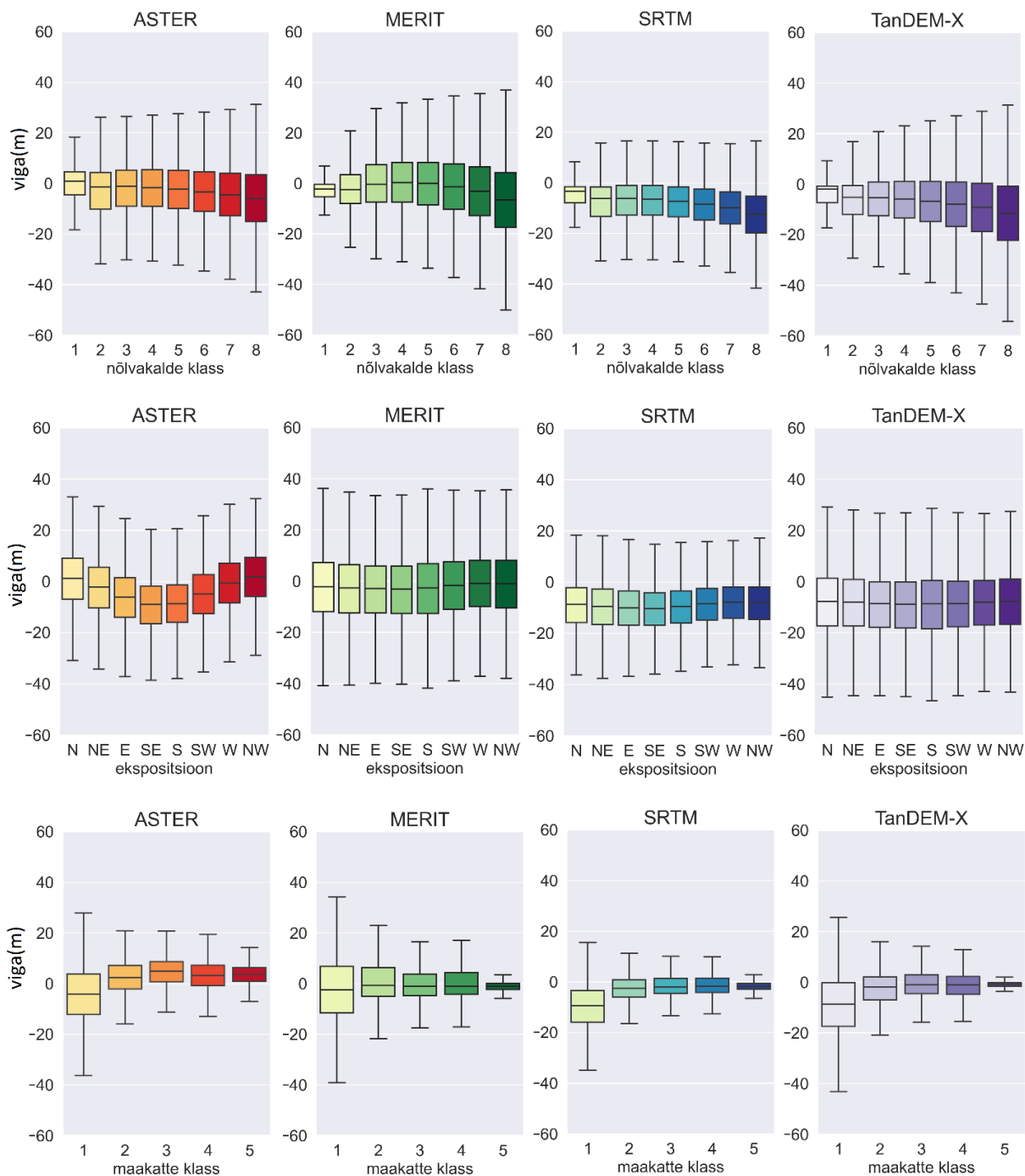
Statistik	Muutuja	ASTER DEM	MERIT DEM	SRTM DEM	TanDEM-X DEM
Miinumum	Δh	-88,23	-100,46	-126,29	-99,96
Maksimum	Δh	69,36	76,32	46,28	64,79
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	Δh	12,26	13,58	13,07	15,05
Keskmine	Δh	-3,32	-2,38	-9,00	-8,03
Mediaan	Δh	-2,89	-2,01	-8,27	-7,26
Keskmine/Mediaan	Δh	1,15	1,18	1,09	1,11
Standardhälve	Δh	11,80	13,37	9,47	12,74
Assümeetriakordaja	Δh	-0,07	-0,19	-0,43	-0,19
Ekstsess	Δh	3,24	3,41	3,63	3,25
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	Δh	11,67	12,62	9,38	12,08
68,3 protsentiil	$ \Delta h $	12,03	13,12	13,21	14,79
95 protsentiil	$ \Delta h $	24,32	27,11	25,33	30,05

Nõlvakalle

Uus-Meremaa uurimisala pinnamood on väga keerukas, mis väljendub ka pikslite arvu ehk vigade jaotumises nõlvakalde klassidesse. Kõige rohkem on >35 kraadiseid nõlvasid. Kõige väiksema pindalaga on antud uurimisalal esimesed kaks klassi, mis moodustavad kogu uurimisalast ainult 11 %. Samas kaheksas klass üksinda hõlmab 19 % ning kolm kõige järsema nõlvakaldega klassi moodustavad 56 % kogu uurimisala pindalast (Joonis 41).



Joonis 41. Uus-Meremaa uurimisala nõlvakalde histogramm.



Joonis 42. Uus-Meremaa uurimisala kõrgusmodelite vigade karp-diagrammid (erinditeta) nõlva kalde (ülemine rida), nõlva ekspositsiooni (keskmine rida) ja maakatte (alumine rida) klasside kaupa. Erindeid karp-diagrammidel ei kuvata, kuigi mudelite vertikaalse täpsuse hindamisel on neid kasutatud. Nõlvakalle: klass 1 0 – 5°; klass 2 5 – 10°; klass 3 10 – 15°; klass 4 15 – 20°; klass 5 20 – 25°; klass 6 25 – 30°; klass 7 30 – 35°; klass 8 >35°. Maakate: klass 1 suletud mets; klass 2 avatud mets; klass 3 põõsastik; klass 4 rohumaa; klass 5 haritav maa.

Nõlvakalde klasside üleselt erinevad ASTER ja SRTM kõrgusmodelite vigade jaotus MERIT ja TanDEM-X kõrgusmodelite vigade jaotusest. Kõikide kõrgusmodelite RMSE ja hajuvusstatistikud küll kasvavad nõlvakalde suurenedes, kuid kasvutempo on erinev. Seda

kirjeldavad kõige paremini RMSE väärtused, mis on ASTER, MERIT, SRTM ja TanDEM-X kõrgusmudelitel kõige väiksemas nõlvakalde klassis võrdlemisi sarnased (vastavalt 8,37 m, 7,25 m, 8,47 m ja 8,06 m), kuid nõlvakalde suurenedes kasvab TanDEM-X kõrgusmudeli RMSE kõige kiiremini. Klassis $>35^\circ$ on vastavad statistiku väärtused järgmised: ASTER kõrgusmudelil 14,89 m, MERIT kõrgusmudelil 17,28 m, SRTM kõrgusmudelil 16,77 m ja TanDEM-X kõrgusmudelil 19,23 m (Lisa 12). TanDEM-X kõrgusmudeli viga on tabelites toodud statistikutele tuginedes kõige suurem. Sarnaselt MERIT DEM-ile võib TanDEM-X kõrgusmudeli kiirem kasvutempo olla tingitud madalamast resolutsioonist keerulise reljeefiga piirkonnas. Lisaks võib täpsust mõjutada TanDEM-X kõrgusmudeli sensori ja lennuparameetrid ning interferomeetriliste meetodite tundlikkus järskude nõlvade ja kõrge taimkatte suhtes.

Kõrgusmudelite mediaanviga muutub suuremates nõlvakalde klassides negatiivsemaks (Joonis 42). Tegu on suures osas maakatte ja reljeefivigade kumuleerumisega.

ASTER kõrgusmudeli kõrgem NMAD väärtus esimeses nõlvakalde klassis (samas kui mediaanviga on kergelt positiivne) võrdluses teiste DEM-idega viitab positiivsete erindite suuremale arvule. Tegu on ainult ASTER kõrgusmudelile iseloomuliku omadusega, kus ka kõige laugemas nõlvakalde klassis leidub suuri erindeid nii positiivses kui ka negatiivses suunas. See võib olla seotud erinevat laadi vigadega, mis ASTER DEM-i genereerimisel tekkida võivad (Arefi and Reinartz, 2011; Tachikawa et al., 2011).

Nõlva ekspositsioon

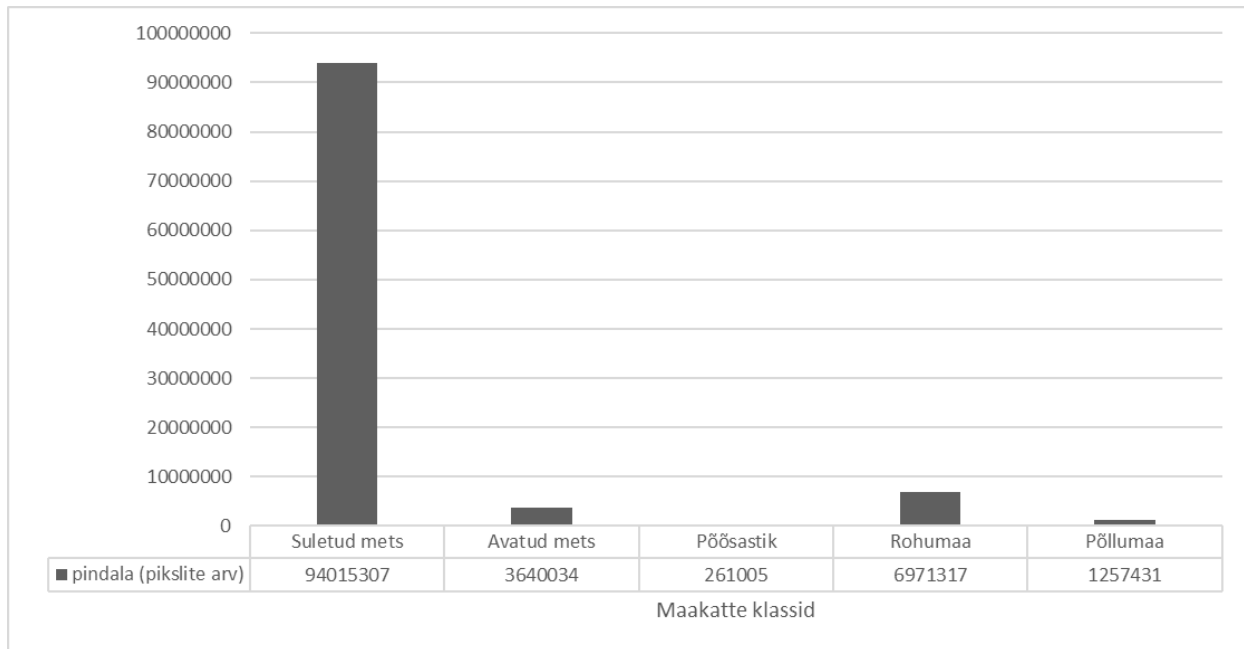
Uus-Meremaa uurimisalal on ASTER kõrgusmudeli mediaanvigade varieerumine nõlva ekspositsiooni klassides väga suur. Siintoodud analüüsi kontekstis on kergelt positiivsed nihked NW ja N suundades avanevatel nõlvadel ning tugevalt negatiivsed nihked nende vastaskülgedel SE ja S (Joonis 42; Lisa 13). ASTER kõrgusmudeli puhul võib seda seletada varem tuvastatud nihe SW-SSW suunas, mis tähendaks teiste tegurite puudumisel positiivseid vigu põhja ja lääne suunas avanevatel nõlvadel (Tachikawa et al., 2011).

MERIT, SRTM ja TanDEM-X kõrgusmudelites on nõlva ekspositsioonist tingitud vigade varieerumine nõrk. MERIT ja SRTM kõrgusmudelites toimub suurim vigade varieerumine SE-E ja NW-W suunas avanevate nõlvade vahel (Joonis 42; Lisa 13). TanDEM-X kõrgusmudeli mediaanvigade jaotus nõlva ekspositsiooni klassides oluliselt ei muutu. Suurim, kuid sellegipoolest marginaalne vigade varieerumine toimub SE ja S ning NW ja N suunas avanevate nõlvade vahel (Joonis 42; Lisa 13).

SRTM ja TanDEM-X kõrgusmudelite juures on nõlva ekspositsiooni klasside üleselt märgata tihedast taimkattest tingitud negatiivset nihet. Samuti joonistub välja SRTM kõrgusmudeli väiksem hajuvus võrreldes teiste kõrgusmudelitega (Joonis 42; Lisa 13).

Maakate

Uurimisalast 89 % moodustab suletud mets (Joonis 43), mis tekitab antud analüüsi kontekstis negatiivset nihet. Mudeli pind asub referentsmudelist (LiDAR) kõrgemal. Selle mõju tuleb selgemalt esile SRTM ja TanDEM-X kõrgusmudelite juures. Samas on antud efekti märgata ka ASTER kõrgusmudeli ja vähem MERIT kõrgusmudeli juures. MERIT kõrgusmudelilt on suurem osa taimkattest tingitud vigasid eemaldatud.



Joonis 43. Uus-Meremaa uurimisala maakatte klasside histogramm.

Suletud metsades on RMSE kõikidel kõrgusmodelitel võrdlemisi sarnane (13 – 16 m). Kõikide kõrgusmodelite mediaanvead antud klassis on negatiivsed (taimkattest tingitud mõju, kus signaal ei suuda puuvõrast täielikult läbi tungida), kuid SRTM ja TanDEM-X kõrgusmodelitel on see umbes 4 – 7 m negatiivsem (Lisa 14). Üldjoontes on ASTER ja SRTM suletud metsa klassis täpsemad, sest et mudelid on reljeefi suhtes vähem tundlikumad kui MERIT või TanDEM-X kõrgusmodelid. ASTER kõrgusmodel on antud uurimisalas teiste uurimisaladega võrreldes suhteliselt täpsem arvatavasti seetõttu, et kaasatud on rohkem stereopaare (Tabel 1).

Madalama maakattega aladel võrdsustuvad vead veelgi rohkem. Haritaval maal jäävad mudelite RMSE-d vahemikku 3 – 5 m (Lisa 14). ASTER kõrgusmodeli mõnevõrra suurem RMSE (5,29 m) võib olla iseloomulik positiivsele nihkele (kõrgusmodel madalamal referentsmudelist) ja erinditele, mis antud kõrgusmodeli juures ilmnedavad võivad (Arefi and Reinartz, 2011; Tachikawa et al., 2011; Gesch et al., 2016). Antud oletus vajab edasist analüüsi.

4 Järeldused

Uurimisalade üleselt tuleb välja kaks peamist põhjust, mille tõttu kõrgusmodelid maapinda täpsemalt või ebatäpsemalt kujutavad. Nendeks on reljeefi keerukus ja maakate. Keerulist reljeefi on raske kaardistada, sest et see toob interferomeetriliste meetodite puhul kaasa sensori orbiidist ja mõõdistusparameetritest tulenevad geomeetrilised moonutused nagu radaripoolsete nõlvade kokkusurutus, ülekate ja varjutus (Dewitt et al., 2015). Optiliste meetodite puhul seostub viga peamiselt mudeli genereerimisel kasutatud erineva ajalise ulatusega stereopaaridega. Viimastel võib esineda lokaalseid erinevusi, mis paaride kokku registreerimisel tekitab järsematel nõlvadel suuremaid vigasid (Szabó et al., 2015). Maakattest tingitud viga on peamiselt põhjustatud signaali tagasipeegeldumisest enne maapinda ning võimalikust hajumisest ja müra, mis tekib interferomeetriliste meetodite puhul puuvõrades ja liikuvates lehtedes (Rizzoli et al., 2017).

Nii reljeefi kui taimkatte saab väga lihtsustatult jagada kaheks klassiks: kõrge ja/või tihe taimestik, madal ja/või hõre taimestik; keeruline reljeef (järsud nõlvad), lihtne reljeef (lauged nõlvad või nende puudumine). Nendest klassidest saab moodustada neli kombinatsiooni, milles on välja toodud antud tingimuste juures kõige täpsemad või ebatäpsemad mudelid ning nende kitsaskohad.

1. Kõrge ja/või tihe taimestik ning keeruline reljeef

Uus-Meremaa uurimisala (mis on mäginine ning mida katavad igihaljad lehtmetsad) näitel on sellistes tingimustes kõige täpsem SRTM. SRTM kõrgusmodel on MERIT ja TanDEM-X DEM-idest kõrgema resolutsiooniga, mis tagab keerulisema reljeefiga aladel maapinnatõesema mudeli. Samas on SRTM koos TanDEM-X kõrgusmodeliga tundlik tiheda taimkatte suhtes. Mediaanviga suletud metsaga aladel on nendel mudelitel oluliselt suurem kui ASTER ja MERIT kõrgusmodelitel. Seega on ilmne, et taimkate põhjustab tegelikust reljeefist suuremaid kõrgusväärtusi. Samas on keeruka reljeefi mõju taimkattest olulisem. MERIT ja TanDEM-X kõrgusmodelite RMSE väärtused ulatuvad suurema nõlvakaldega aladel 33 – 36 meetrini. SRTM kõrgusmodeli puudumisel on valik keerulisem. ASTER on kõrgema resolutsiooni tõttu reljeefi suhtes vähem tundlikum, kuid sisaldab see-eest palju mitmesuguseid artefakte. Need tulevad hästi välja Eesti ja Norra uurimisaladel, kus reljeefist sõltumata ilmneb suuri positiivseid ja negatiivseid erindeid igal pool.

2. Kõrge ja/või tihe taimestik ning lihtne reljeef

Eesti uurimisala näitel on sellistes tingimustes kõige täpsem MERIT kõrgusmodel. RMSE on antud uurimisalal üle 3 m madalam SRTM kõrgusmodeli vastavast väärtusest. MERIT kõrgusmodeli aluseks on suures osas SRTM, millest on mitmesugused vead eemaldatud (sealhulgas ka taimkatte vead). Seetõttu kujutab MERIT metsa maakatte klassides maapinda võrdlemisi tõeselt. SRTM ja TanDEM-X kõrgusmodelite kõrgushinnangud metsastel aladel on suuremad kui referentsmudelil. Kui Eesti alal on MERIT kõige täpsem, siis Norra uurimisalal on TanDEM-X kõrgusmodeli RMSE uurimisala üleselt ja ka igas maakatte klassis MERIT kõrgusmodelist väiksem. Seda isegi kõige laugema nõlvakaldega suletud metsaga aladel. TanDEM-X kõrgusmodeli kõrgusväärtused erinevates piirkondades on mõõdetud mitmesuguste lennuparameetritega ning on võimalik, et Norra uurimisalal on suudetud sellest tulenevalt madalamat resolutsiooni kompenseerida.

3. Madal ja/või hõre taimestik ning keeruline reljeef

Sellistes tingimustes on Hiina uurimisala näitel kõige täpsem SRTM. Selle RMSE peamiselt lagedal või hõreda taimestikuga mägede nõlvadel ($>15^\circ$) on 9 – 14 m, samas näiteks MERIT kõrgusmodelil on vastavad statistiku väärtused 11 – 18 m ja TanDEM-X kõrgusmodelil 9 – 18 m (Lisa 6). See ilmestab seda, et keerulisema reljeefiga piirkondades kasvab madalama resolutsiooniga mudelite viga nõlvakalde suurenedes kiiremini. Juhul kui SRTM kõrgusmodelit saadaval pole, on hinnangut anda keerulisem. ASTER kõrgusmodelil on küll Hiina uurimisala näitel mägedes suured peamiselt negatiivsed vead (referentsmodel paikneb globaalsest kõrgusmodelist madalamal), kuid samas näiteks Norras või Uus-Meremaal on mudel vastava piirkonna üks täpsematest, isegi arvestades võimalikke artefakte. Hiinas analüüsitud erinev muster võib olla tingitud mäestiku teistsugusest iseloomust, kus esineb palju väikesemõõtmelisi mäeharju ja -orge ning kuristikke, mis toovad endaga kaasa suuri erindeid (Kramm and Hoffmeister, 2019). Teiseks põhjuseks võib olla stereopaaride mööda registreerimiste suurem mõju väga muutliku reljeefiga piirkonnas.

4. Madal ja/või hõre taimestik ning lihtne reljeef

Antud juhul on kolm kõrgusmodelit – MERIT, SRTM ja TanDEM-X – üsna võrdsed. Tuues näiteks Eesti ja Hiina uurimisala peamiselt tasasel maa-alal paikneva haritava maa klassi, on näha vigade sarnaseid väärtusi. Mõlemal uurimisalal on kolm mudelit antud maakatte klassis oma vigadelt väga sarnased ning sõltuvalt lokaalsetest tingimustest võib kõige täpsem olla TanDEM-X või MERIT. SRTM on ilma olulise taimkatteta aladel eelmistega peaaegu võrdväärne.

Alati pole aga pinnamood nii selgesti eristatav. Seega üldine hinnang on, et SRTM on universaalselt kõige täpsem. Seda peamiselt tänu kõrgele resolutsioonile. Isegi kui tegu on taimkatte suhtes tundliku kõrgusmodeliga. Mudeli oodatav täpsus on 16 m ja varem tuvastatud absoluutne vertikaalne viga (CE90) on leitud 9 m (Rodriguez et al., 2005; Szabó et al., 2015). Dewitt et al. (2015) analüüsisid SRTM kõrgusmodelit võrdluses LiDAR kõrgusmodeliga ning saavutasid täpsuseks (RMSE) 14,90 m. Walczak et al. (2016) kasutasid referentsmodelina LiDAR kõrgusmodelit ja GPS mõõdistusi ning tuvastasid SRTM kõrgusmodeli RMSE väärtuseks 5,40 m. Käesolevas analüüsis tuvastati sarnase suurusjärguga RMSE vead: Eesti uurimisalal 6,59 m, Hiina uurimisalal 10,08 m ning Uus-Meremaa uurimisalal 13,07 m. Seega võib öelda, et käesolevas töös leitud SRTM kõrgusmodeli täpsus on kooskõlas varasemalt tehtud analüüsidega, kuid see sõltub piirkonna pinnamoest ja maakattest. Antud analüüsi prooviti kaasata võimalikult keeruliste omadustega uurimisalasid. Sellest tulenevalt ka muutlikud täpsustasemed.

Täpsuselt järgmised on MERIT ja TanDEM-X. Mudelite oodatav vertikaalne täpsus on TanDEM-X kõrgusmodelil ligikaudu 10 m ja MERIT kõrgusmodelil ligikaudu 5 m (LE90) (Yamazaki et al., 2017; Wessel, 2018). Hawker et al. (2019) hindasid MERIT ja TanDEM-X kõrgusmodelite RMSE väärtuseks vastavalt 2,32 m ja 3,10 m. Geschi (2018) tulemused jäid samasse suurusjärku. Antud näitajatega võrreldes on mõlema mudeli vead käesoleva uuringu põhjal kolmel uurimisalal suuremad. See võib olla tingitud uurimisalade keerulistest reljeefi omadustest, mis viga suurendavad. Samas Eesti uurimisala vigade väärtused on eelpool mainitud autorite analüüsi tulemustega võrdlemisi sarnased. MERIT ja TanDEM-X on reljeefist rohkem mõjutatud. Seda peamiselt madalama resolutsiooni tõttu. TanDEM-X kui interferomeetrilise meetoodika tulemus, on segatud taimkattest ning järskudest nõlvadest. MERIT kõrgusmodelist on taimkatte vead eemaldatud, mistõttu antud teguri mõju on väiksem, kuid on reljeefi suhtes samuti tundlik.

ASTER kõrgusmodeli täpsus on üldjoontes kõige madalam, kuid seal võib ilmneda lokaalseid erisusi. Selle oodatav vertikaalne täpsus on 17 m. Tachikawa et al. (2011) tuvastasid võrdluses

18 207 GPS reeperiga RMSE väärtuseks 8,68 m. Samas Dewitt et al. (2015) leidsid võrdluses LiDAR mõõdistustega RMSE väärtuseks 16,77 m. Walczak et al. (2016) mõõtsid statistiku tulemuseks võrdluses LiDAR kõrgusmudeli ja GPS mõõdistustega 3,97 m. Antud analüüsis mõõdeti ASTER kõrgusmudeli RMSE väärtuseks Eesti uurimisalal 11,22 m, Hiina uurimisalal 16,67 m, Norra uurimisalal 9,99 m ja Uus-Meremaa uurimisalal 12,26 m. Vigade suurused küll varieeruvad, kuid need on nõlvakalde esimeses klassis ja haritava maa maakatte klassis suuremad kui MERIT, SRTM või TanDEM-X kõrgusmudelitel. See näitab, et isegi lihtsama maakatte ja reljeefiga aladel võib ilmnedagi suuri vigu. Vead võivad tuleneda geomeetristest artefaktidest, mis on seotud kasutatud stereopaaride arvu või nende vähesusega, väiksema stereokorrelatsiooni aknaga, horisontaalse nihkega, maakattega ja pikslite mööda registreerimisega stereopaaride „virnamisel“ (Arefi and Reinartz, 2011; Tachikawa et al., 2011; Szabó et al., 2015). Geomeetriste artefaktide, stereopaaride arvu, stereokorrelatsiooni akna, horisontaalse nihke ja pikslite mööda registreerimisega seotud vigu antud analüüsis põhjalikumalt ei uuritud.

Reljeefi puhul võib lisaks nõlvakalde suurusele oluline olla ka nõlva suund. Eriti ilmeks on see Norras, kus ASTER ja MERIT mudelite kõige positiivsemad vead on valdavalt edela- ja läänenõlvadel ning negatiivsemad vead nende vastassuundadel. Muudel uurimisaladel on nõlva ekspositsiooni klasside vigade erinevused väiksemad. SRTM kõrgusmudeli puhul ja ka teiste interferomeetriste sensorite puhul mõjutavad vea suunda ja suurust orbiidi asend ja signaali langusnurk (Szabó et al., 2015). Viimased on olulised parameetrid sensori poole ja eemale avanevate nõlvade kaardistamisel. Lisaks mõjutab vea väärtusi ekspositsiooni klassides nõlvakalle ning potentsiaalselt ka horisontaalne nihe.

Antud uurimuses tehtud analüüsi kitsaskohaks on asjaolu, et mudelid võivad olla horisontaalses nihkes. Kuigi ühte koordinaatsüsteemi registreerimine ja mudelite referentspinna külge snäppimine peaks antud süstemaatilist viga minimeerima, siis ei pruugi see kogu võimalikku horisontaalset nihet eemaldada. Täiendavate analüüsidega on võimalik globaalsete kõrgusmudelite nihe kõrvaldada. Varasemalt on kasutatud kõrgusmudeli nihutamist referentspinna suhtes piksel piksli haaval näiteks kaheksas põhisuunas ning seejärel leitud asend, kus vigade keskmine erinevus ja standardhälve on kõige väiksem (Niculita, 2018). Teine kitsaskoht on asjaolu, et pole teada erinevat tüüpi vigade täpsed seosed ja osakaalud. Täiendavalt peaks analüüsima üksteise suhtes näiteks nõlvakalde, nõlva ekspositsiooni ja maakatte suhtelist mõju vea suurusele. Kolmandaks võib esineda uurimisalades ajalisest resolutsioonist tulenevaid erinevusi (referentsmudeli ja globaalse kõrgusmudeli mõõdistamise vahepeal võib olla toimunud muutused kaardistatava pinna maakattes või pinnamoes). See võib tekitada näilisi vigasid, mis pole seotud otseselt mudeli endaga. Neljandaks on Hiina uurimisalal kasutatud Pleiades-1A mõõdistustest tuletatud DEM-i, mille vertikaalne täpsus pole teada. Arvatavasti on tegu sellegipoolest antud uurimisalal uurimise all olevatest kõrgusmudelitest (ASTER, MERIT, SRTM ja TanDEM-X) kõrgema täpsusega mudeliga (Zhou et al., 2015; Bagnardi et al., 2016; Satellite Imaging Corporation, 2017). Vead võivad ilmnedagi samuti LiDAR kõrgusmudelites, sest on teada, et isegi aerolaserskanereimise signaal ei pruugi taimestikust täielikult läbi tungida (Hodgson et al., 2003). Võimalikud vead võivad ilmnedagi ka aerolaserskanereimise punktide klassifitseerimisel (Maa-ameti Geoportaal, 2019b).

Analüüsi tulemuste alusel osutusid olulisteks kõrgusmudelite täpsust mõjutavateks teguriteks maapinna reljeef (sh nõlvakalle ja ekspositsioon), kõrgusmudeli resolutsioon ja sellega seotud pikslisisene varieerumine, maakate ning ASTER kõrgusmudeli puhul on võimalikud geomeetriste artefaktide ilmnemine ja stereokorrelatsiooni viga. Kõikide antud vigade alge on

aga seotud sensori sisemiste parameetrite (nagu lainepikkus) ja mõõdistusparameetritega (baas, langusnurk, orbiidi suund, ülelendude arv, sensori vaatenurk jms).

Tulemused toetavad püstitatud hüpoteese. Nõlvakalde suurenedes kõrgusmodelite täpsus kahaneb. Vead erinevates suundades avanevatel nõlvadel varieeruvad sõltuvalt uurimisala asukohast ja omadustest. Maakattel on oluline mõju kõrgusmodelite täpsusele. Antud analüüsi kontekstis ilmneb metsastel aladel negatiivne nihe. Viimane on kõige väiksem MERIT kõrgusmodelis.

Kokkuvõte

Käesolevas töös hinnati nelja globaalse kõrgusmodeli (ASTER, MERIT, SRTM, TanDEM-X) õigsust referentsmudelite suhtes. Tulemusi analüüsid selgus, et vigade suurus ja nende hajuvus on erinevates uurimisalades oluliselt erinev. Lokaalsed vead võivad erineda globaalsetest hinnangutest. Peamiste vigasid põhjustavate asjaoludena tuvastati nõlvakalle ja nõlva ekspositsioon, kõrgusmudelite resolutsioon ning maakate. Põhjused, miks antud tegurid vigu põhjustavad, on seotud mõõteinstrumentide sisemiste parameetrite ning missioonide ülesehitusega.

Uurimisalade lõikes osutus kõige stabiilsemaks SRTM, mis on kõrgema resolutsiooniga kui MERIT ja TanDEM-X ning on seetõttu reljeefi muutlikkuse suhtes vähem tundlikum. Interferomeetrilise meetodina on küll tegu pigem maakatte kõrgusmudeliga, kuid erinevused referentsmudelitest on võrreldes teiste kõrgusmudelitega enamasti väiksemad.

MERIT ja TanDEM-X on oma vigade jaotuselt sarnased. TanDEM-X kõrgusmodeli erisus tuleneb tundlikkusest taimkatte suhtes. Taimkatet kujutatakse maapinnast kõrgemana. MERIT kõrgusmudelitest on antud vead eemaldatud. Mõlemad mudelid on ASTER ja SRTM kõrgusmudelitest madalama resolutsiooniga, mistõttu muutub maapinna võimalikult korrektne kujutamine keerulisema pinnamoega aladel raskemaks.

ASTER on kokkuvõttes kõige ebatäpsem, kuid selles hinnangus võib ilmned lokaalseid erinevusi. Seda peamiselt tänu kõrgemale resolutsioonile, mis aitab reljeefi maapinnatõesemalt kujutada. Samas ilmneb ASTER kõrgusmudelil mitut tüüpi vigasid, mis kõrgema resolutsiooni kasutegurit vähendavad. ASTER kõrgusmudel sisaldab endas suuri vigasid ehk erindeid, mis on suure tõenäosusega tingitud peamiselt mudeli genereerimise loogikast. Kombineeritakse erineva ajaulatusega stereopaare. Kasutatud stereopaaride arv erineb piirkonniti ning üleminekuvaldel tekivad artefaktid. Lisaks seisnevad genereerimisel tekkivad vead stereopaaride valesti sidumisest, mis võimenduvad keerulise pinnamoega aladel (Szabó et al., 2015). Samamoodi kujutatakse maapinda madala maakattega aladel madalamal referentspinnast ja kõrge taimkattega aladel kõrgemal sellest. Andmete töötlusel võib tekkida ka väiksemast stereokorrelatsiooni aknast tingitud vead. Eelpool mainitud mudeli genereerimisel tekkivate vigade võimalikku ulatust peab täiendavalt edasi uurima. Antud analüüs keskendus ainult sensori poolt kaardistatava pinna muutlikkuse mõjule kõrgusmodeli täpsusele.

Kokkuvõttes võib öelda, et töös püstitatud eesmärgid said täidetud. Kõikide analüüsitud globaalsete kõrgusmudelite täpsus väheneb suurema nõlvakalde juures. Samas on nõlva ekspositsioonil mudelite täpsusele varieeruv mõju. Maakattel on samuti arvestatav mõju kõrgusmudelite täpsusele. Madalaim täpsus ilmneb enamasti metsastel aladel. Kõikides kõrgusmudelites võib ilmned suuri vigasid ja analüüsiks sobiliku kõrgusmodeli valikul tuleb lähtuda lokaalsetest tingimustest. Mõnede suuremat detailsusastet nõudvate analüüside juures ei pruugi ükski analüüsitud kõrgusmudel täpsusnõuetele vastata ja sellega peab arvestama. Töö tulemusi on võimalik arvesse võtta kõrgusmodeli valikul ning üks võimalikke edasiarendusi on globaalse minimeeritud veaga kõrgusmodeli loomine.

Vertical accuracy assesment of global digital elevation models ASTER, MERIT, SRTM and TanDEM-X

Sander Ahi

Summary

There are various global digital elevation models available that have been generated using wide selection of remote sensing methods. There are many possibilities of errors and topographical areas depicted incorrectly. Interferometric and photogrammetric methods are sensitive to land cover. Signal does not penetrate vegetation completely. In addition moving leaves could cause additional noise (Rizzoli et al., 2017). Relief is the other concern. Horizontal errors are magnified in high-relief areas and also interferometric radars have distinct distortions in different parts of mountain slopes relative to the position of an instrument (Dewitt et al., 2015). Complicated terrain errors could be present in photogrammetric methods as well. The aim of the current thesis was to estimate the errors of the four most common global DEMs: ASTER, MERIT, SRTM and TanDEM-X. LiDAR and stereo-photogrammetric Pleiades-1A were used as reference (ground truth) datasets. Four study areas from Estonia, China, Norway and New Zealand were chosen for the analysis. Error rasters were created by subtracting global DEMs from reference models. Before the subtraction, models were converted to the same coordinate system and pixel size and then snapped together. Geoid differences were removed if necessary. Error estimations were done by calculating statistics (mean, median, NMAD, RMSE etc) for the whole study area, and for different slope, aspect and land cover classes.

Results obtained revealed major errors in different land cover classes and in high relief areas. Analysis confirmed that there is a negative bias in vegetated areas. Models depict terrain above the reference model in forested parts of study area. In addition there are big outliers in high-relief parts of terrain. These distortions are mainly caused by the position of an instrument relative to the ground or certain stages in DEM generation processes (stacking, co-registration).

Errors could be significantly different from area to area. Error values are dependent of local topographic and land cover conditions. They could be much higher than global accuracy measures indicate.

In conclusion, SRTM is in most cases the most accurate DEM. It is relatively robust to high-relief terrain thanks to it's higher resolution. Lower resolution MERIT and TanDEM-X are behaving quite similar. The most significant difference is the sensitivity to tree canopy. MERIT is based on SRTM with errors removed. This includes tree canopy error as well. ASTER is in most cases the least accurate because of it's many distortions and biases.

The choice of DEM for a planned analysis or project must be taken with care. Local conditions must be considered. In some geographical regions for more finely scaled research none of the given digital elevation models could be used or possible errors must be considered.

Tänuavaldused

Täna oma juhendajaid Evelyn Uuemaad ja Merle Muru, kes mulle antud teema välja pakkusid ja kes nõu andsid ja vajadusel alati aitasid. Samuti täna Bruno Montibellerit, Raivo Aunapit ja Kiira Mõisjat, kes paari jooksva küsimusega abi osutasid. Lisaks täna kõiki, kes mulle keelenõu andsid.

Kasutatud kirjandus

- Abrams, M., 2000. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *Int. J. Remote Sens.* 21, 847–859. <https://doi.org/10.1080/014311600210326>
- Alberga, V., 2004. Volume decorrelation effects in polarimetric SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42, 2467–2478. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.837330>
- Archer, L., Neal, J.C., Bates, P.D., House, J.I., 2018. Comparing TanDEM-X Data With Frequently Used DEMs for Flood Inundation Modeling. *Water Resour. Res.* 54, 10,205–10,222. <https://doi.org/10.1029/2018WR023688>
- Arefi, H., Reinartz, P., 2011. Accuracy enhancement of ASTER global digital elevation models using ICESat data. *Remote Sens.* 3, 1323–1343. <https://doi.org/10.3390/rs3071323>
- ASTER GDEM Validation Team, 2011a. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 - Summary of Validation Results August 31, 2011. United States.
- ASTER GDEM Validation Team, 2011b. ASTER GDEM 2 README. United States.
- ASTER GDEM Validation Team, 2009. ASTER Global DEM Validation Summary Report. United States.
- Bagnardi, M., González, P.J., Hooper, A., 2016. High-resolution digital elevation model from tri-stereo Pleiades-1 satellite imagery for lava flow volume estimates at Fogo Volcano. *Geophys. Res. Lett.* 43, 6267–6275. <https://doi.org/10.1002/2016GL069457>
- Bayburt, S., Kurtak, A.B., Büyüksalih, G., Jacobsen, K., 2017. Geometric accuracy analysis of worldDEM in relation to AW3D30, srtm and aster GDEM2. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* 42, 211–217. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-211-2017>
- Buchhorn, M., Smets, B., Bertels, L., Lesiv, M., Tsendbazar, N.-E., Herold, M., Fritz, S., 2019. Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: epoch 2015: Globe. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3243509>
- Chen, X., Sun, Q., Hu, J., 2018. Generation of Complete SAR Geometric Distortion Maps Based on DEM and Neighbor Gradient Algorithm. *Appl. Sci.* 8, 2206. <https://doi.org/10.3390/app8112206>
- Copernicus Programme Services, 2017. Overview of Global DEM: Assessment of the current global DEMs and requirements for an updated global DEM.
- Daniel, C., Tennant, K., 2007. In *The DEM User's Manual*, in: Maune, D.F. (Ed.), *DEM Quality Assessment, Digital Elevation Model Technologies and Applications*. ASPRS, Bethesda, MD, pp. 395–440.
- Dewitt, J.D., Warner, T.A., Conley, J.F., 2015. Comparison of DEMs derived from USGS DLG, SRTM, a statewide photogrammetry program, ASTER GDEM and LiDAR: Implications for change detection. *GIScience Remote Sens.* 52, 179–197. <https://doi.org/10.1080/15481603.2015.1019708>
- DLR, 2020. TanDEM-X - the Earth in three dimensions [WWW Document]. URL

- <https://www.dlr.de/content/en/missions/satellite-tandem-x/tandem-x.html> (viimati vaadatud 02.03.2020).
- Ellmann, A., Märdla, S., Oja, T., 2017. Eesti geoidi mudel EST-GEOID2017.
- EOC Geoservice, 2020. The TanDEM-X 90m Digital Elevation Model [WWW Document]. URL https://geoservice.dlr.de/web/dataguide/tdm90/#further_information_mission (viimati vaadatud 02.03.2020).
- Esri, 2019. Cell size and resampling in analysis [WWW Document]. URL <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/performing-analysis/cell-size-and-resampling-in-analysis.htm> (viimati vaadatud 27.03.2020).
- ESRI, 2018a. ArcGIS Desktop: Release 10.6.
- ESRI, 2018b. ArcGIS Desktop: Release 10.6.1.
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., Massonet, D., 2007. InSAR Principles-Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, TM-19, The Netherlands: ESA Publications.
- Fisher, P.F., Tate, N.J., 2006. Causes and consequences of error in digital elevation models. *Prog. Phys. Geogr.* 30, 467–489. <https://doi.org/10.1191/0309133306pp492ra>
- Gesch, D., Oimoen, M., Danielson, J., Meyer, D., 2016. Validation of the ASTER global digital elevation model version 3 over the Conterminous United States. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* 41, 143–148. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-143-2016>
- Gesch, D.B., 2018. Best practices for elevation-based assessments of sea-level rise and coastal flooding exposure. *Front. Earth Sci.* 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00230>
- Gillies, S., others, 2019. Rasterio: geospatial raster I/O for {Python} programmers.
- Gong, J., Li, Z., Zhu, Q., Shu, H., Zhou, Y., 2000. Effects of various factors on the accuracy of DEMs: an intensive experimental investigation. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 66, 1113–1118.
- Gonzalez, J.H., Bachmann, M., Böer, J., Fiedler, H., Krieger, G., Zink, M., 2009. TanDEM-X mission and DEM accuracy. *Proc. wave Propag. Commun. microwaves Syst. Navig. WFMN.*
- Gorokhovich, Y., Voustianiouk, A., 2006. Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. *Remote Sens. Environ.* 104, 409–415. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.05.012>
- Greater Wellington Regional Council, 2017. Greater Wellington Regional Lidar Project Survey Summary [WWW Document]. URL https://cloud.sdsc.edu/v1/AUTH_opentopography/www/metadata/WellingtonLidarSurveySummary.pdf (viimati vaadatud 11.05.2020).
- Hanssen, R.F., 2001. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, Remote Sensing and Digital Image Processing. Springer Netherlands.
- Hawker, L., Neal, J., Bates, P., 2019. Accuracy assessment of the TanDEM-X 90 Digital Elevation Model for selected floodplain sites. *Remote Sens. Environ.* 232.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111319>

Henry, L., Wickham, H., 2019. purrr: Functional Programming Tools.

Hijmans, R.J., 2020. raster: Geographic Data Analysis and Modeling.

Hirano, A., Welch, R., Lang, H., 2003. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 57, 356–370. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00164-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00164-8)

Hirt, C., 2018. Artefact detection in global digital elevation models (DEMs): The Maximum Slope Approach and its application for complete screening of the SRTM v4.1 and MERIT DEMs. *Remote Sens. Environ.* 207, 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.037>

Hirt, C., Filmer, M.S., Featherstone, W.E., 2010. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9s ver3 digital elevation models over Australia. *Aust. J. Earth Sci.* 57, 337–347. <https://doi.org/10.1080/08120091003677553>

Hodgson, M.E., Jensen, J., Raber, G., Tullis, J., Davis, B.A., Thompson, G., Schuckman, K., 2005. An Evaluation of Lidar-derived Elevation and Terrain Slope in Leaf-off Conditions. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 71, 817–823. <https://doi.org/https://doi.org/10.14358/PERS.71.7.817>

Hodgson, M.E., Jensen, J.R., Schmidt, L., Schill, S., Davis, B., 2003. An evaluation of LIDAR- and IFSAR-derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs. *Remote Sens. Environ.* 84, 295–308. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00114-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00114-1)

Höhle, J., Höhle, M., 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 64, 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.02.003>

Holmes, K.W., Chadwick, O.A., Kyriakidis, P.C., 2000. Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling. *J. Hydrol.* 233, 154–173. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00229-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00229-8)

Hu, Z., Peng, J., Hou, Y., Shan, J., 2017. Evaluation of recently released open global digital elevation models of Hubei, China. *Remote Sens.* <https://doi.org/10.3390/rs9030262>

Japan Association of Remote Sensing, 1996. 3.5 Volume Scattering [WWW Document]. URL <http://wtlab.iis.u-tokyo.ac.jp/wataru/lecture/rsgis/rsnote/cp3/cp3-5.htm> (viimati vaadatud 12.04.2020).

Kartverket, 2020. Hoydedata [WWW Document]. URL <https://hoydedata.no/LaserInnsyn/> (viimati vaadatud 02.03.2020).

Khalid, N.F., Din, A.H.M., Omar, K.M., Khanan, M.F.A., Omar, A.H., Hamid, A.I.A., Pa'Suya, M.F., 2016. Open-source digital elevation model (DEMs) evaluation with gps and lidar data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* 42, 299–306. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W1-299-2016>

Kramm, T., Hoffmeister, D., 2019. A Relief Dependent Evaluation of Digital Elevation Models on Different Scales for Northern Chile. *ISPRS Int. J. Geo-Information* 8.

<https://doi.org/10.3390/ijgi8100430>

- Lang, M., 2005. Radar monitoring of hydrology in Maryland's forested coastal plain wetlands: Implications for predicted climate change and improved mapping.
- Liu, K., Song, C., Ke, L., Jiang, L., Pan, Y., Ma, R., 2019. Global open-access DEM performances in Earth's most rugged region High Mountain Asia: A multi-level assessment. *Geomorphology* 338, 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.012>
- Maa-amet, 2020. Haldus- ja asustusjaotus: Maa-amet 01.03.2020.
- Maa-amet, 2015. Kõrgusandmed.
- Maa-ameti Geoportaal, 2019a. Kõrgusmudelid [WWW Document]. URL <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Korgusmudelid-p508.html> (viimati vaadatud 15.04.2020).
- Maa-ameti Geoportaal, 2019b. Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid [WWW Document]. URL <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid-p499.html> (viimati vaadatud 02.03.2020).
- Metsur, M., 2012. LIDAR Leica ASL50-II. Maa-ameti Fotogramm-meetria osakond.
- Middleton, T.A., Walker, R.T., Parsons, B., Lei, Q., Zhou, Y., Ren, Z., 2016. Journal of Geophysical Research : Solid Earth A major , intraplate , normal-faulting earthquake : The 1739 Yinchuan event in northern China 4, 293–320. <https://doi.org/10.1002/2015JB012355>.
- Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., de la Riva, J., 2015. A comparison of open-source LiDAR filtering algorithms in a Mediterranean forest environment. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 8, 4072–4085. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2436974>
- NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, 2009. ASTER global digital elevation model [data set]. NASA EOSDIS L. Process. DAAC. <https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.002>
- NASA Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2020. Shuttle Radar Topography Mission: Instrument Interferometry Explained - More Detail [WWW Document]. URL <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/instrumentinterfmore.html> (viimati vaadatud 02.03.2020).
- NASA Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2016. Shuttle Radar Topography Mission: Data Products [WWW Document]. URL <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataprod.htm> (viimati vaadatud 02.03.2020).
- NASA Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2004. ASTER Global Digital Elevation Map Announcement [WWW Document]. URL <https://asterweb.jpl.nasa.gov/> (viimati vaadatud 22.01.2020).
- Nasir, S., Iqbal, I.A., Ali, Z., Shahzad, A., 2015. Accuracy assessment of digital elevation model generated from pleiades tri stereo-pair, in: 2015 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). pp. 193–197. <https://doi.org/10.1109/RAST.2015.7208340>
- Natural Earth, 2020. Admin 0 – Countries [WWW Document]. URL <https://www.naturalearthdata.com/downloads/50m-cultural-vectors/50m-admin-0-countries-2/> (viimati vaadatud 22.01.2020).

- Natural Resources Canada, 2015. Radar Image Distortions [WWW Document]. URL <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensing-tutorials/microwave-remote-sensing/radar-image-distortions/9325> (viimati vaadatud 02.04.2020).
- Niculita, M., 2018. Assessing the accuracy of SRTM altitude data for the hilly area in northeastern Romania. <https://doi.org/https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.27074v1>
- Oliphant, T.E., 2006. A guide to NumPy. Trelgol Publishing USA.
- OpenTopography, 2016. East Helanshan Fault, northern China [WWW Document]. URL <https://portal.opentopography.org/lidarDataset?opentopoID=OTLAS.062016.32648.1> (viimati vaadatud 29.03.2020).
- Osedok, 2015. Geoid Height [WWW Document]. mapitGIS. URL <https://mapitgis.com/geoid-height-extension/> (viimati vaadatud 27.03.2020).
- Pebesma, E., 2018. Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. R J. 10, 439–446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- Purinton, B., Bookhagen, B., 2017. Validation of digital elevation models (DEMs) and comparison of geomorphic metrics on the southern Central Andean Plateau. Earth Surf. Dyn. 5, 211–237. <https://doi.org/10.5194/esurf-5-211-2017>
- Quincey, D.J., Bishop, M.P., Kääh, A., Berthier, E., Flach, B., Bolch, T., Buchroithner, M., Kamp, U., Khalsa, S.J.S., Toutin, T., others, 2014. Digital terrain modeling and glacier topographic characterization, in: Global Land Ice Measurements from Space. Springer, pp. 113–144.
- R Core Team, 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing.
- Ramboll Kart OG 3D, 2012. Rapport for Laserskanning/hoydekurver - Midt-Gudbrandsdalen 2012 - LACHOP21.
- Reisberg, L., 2015. Metsa raiealade tuvastamine Sentinel-1 SAR andmete põhjal.
- Rexer, M., Hirt, C., 2014. Comparison of free high resolution digital elevation data sets (ASTER GDEM2, SRTM v2.1/v4.1) and validation against accurate heights from the Australian National Gravity Database. Aust. J. Earth Sci. 61, 213–226. <https://doi.org/10.1080/08120099.2014.884983>
- Rizzoli, P., Martone, M., Gonzalez, C., Wecklich, C., Borla Tridon, D., Bräutigam, B., Bachmann, M., Schulze, D., Fritz, T., Huber, M., Wessel, B., Krieger, G., Zink, M., Moreira, A., 2017. Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 132, 119–139. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008>
- Rodriguez, E., Morris, C.S., Belz, J.E., 2006. A global assessment of the SRTM performance. Photogramm. Eng. Remote Sens. 72, 249–260. <https://doi.org/https://doi.org/10.14358/PERS.72.3.249>
- Rodriguez, E., Morris, C.S., Belz, J.E., Chapin, E.C., Martin, J.M., Daffer, W., Hensley, S., 2005. An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.
- Roosaare, J., Mõisja, K., Aunap, R., 2019. Geoinformaatika. Õpik kõrgkoolidele. Tartu Ülikooli

Kirjastus, Tartu.

- Satellite Imaging Corporation, 2017. Pleiades-1A Satellite Sensor (0.5m) [WWW Document]. URL <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/pleiades-1/> (viimati vaadatud 02.03.2020).
- Szabó, G., Singh, S.K., Szabó, S., 2015. Slope angle and aspect as influencing factors on the accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM databases. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C* 83–84, 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.06.003>
- Tachikawa, T., Kaku, M., Iwasaki, A., 2011. Aster GDEM version 2 validation report. Rep. to ASTER GDEM Version 2.
- Terratec, 2018. Laserskanning for Nasjonal Detaljert Høydemodell - NDH Ringebu-Fron-Gausdal 5pkt 2018.
- Terratec, 2017a. Laserskanning for Nasjonal Detaljert Høydemodell - NDH Olstappen-Heidalsmuen 2pkt 2017.
- Terratec, 2017b. Laserskanning for Nasjonal Detaljert Høydemodell - NDH Ringebu-Fron-Gausdal 5pkt 2017.
- USGS, 2015. Shuttle radar topography mission (SRTM) 1 Arc-Second global. *US Geol. Surv.* <https://doi.org/10.5066/F7PR7TFT>
- van der Schriek, M., Beex, W., 2017. The application of LiDAR-based DEMs on WWII conflict sites in the Netherlands. *J. Confl. Archaeol.* 12, 94–114. <https://doi.org/10.1080/15740773.2017.1440960>
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T.E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S.J., Brett, M., Wilson, J., Jarrod Millman, K., Mayorov, N., Nelson, A.R., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C.J., Polat, İ., Ilhan, Feng, Y., Moore, E.W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E., Harris, C.R., Archibald, A.M., Ribeiro, A.H., Pedregosa, F., van Mulbregt, P., Contributors, S. 1. 0, 2020. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nat. Methods* 17, 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Walczak, Z., Sojka, M., Wrózyński, R., Laks, I., 2016. Estimation of polder retention capacity based on ASTER, SRTM and LIDAR DEMs: The case of Majdany Polder (West Poland). *Water (Switzerland)* 8. <https://doi.org/10.3390/w8060230>
- Wessel, B., 2018. TanDEM-X ground segment--DEM products specification document. EOC, DLR, Oberpfaffenhofen, Germany, Public Document TD-GS-PS-0021, Issue 3.2.
- Yamazaki, D., 2018. MERIT DEM: Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM [WWW Document]. URL http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_DEM/ (viimati vaadatud 02.03.2020).
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O’Loughlin, F., Neal, J.C., Sampson, C.C., Kanae, S., Bates, P.D., 2017. A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophys. Res. Lett.* 44, 5844–5853. <https://doi.org/10.1002/2017GL072874>
- Younis, M., Krieger, G., Fiedler, H., Hajnsek, I., Werner, M., Zink, M., Moreira, A., 2007.

- TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution radar interferometry. Proc. Int. Radar Symp. 2007-Janua, 3317–3341. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.900693>
- Zhou, Y., Parsons, B., Elliott, J.R., Barisin, I., Walker, R.T., 2015. Assessing the ability of Pleiades stereo imagery to determine height changes in earthquakes: A case study for the El Mayor-Cucapah epicentral area. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120, 8793–8808. <https://doi.org/10.1002/2015JB012358>
- Zink, M., Krieger, G., Fiedler, H., Hajnsek, I., Moreira, A., 2008. The TanDEM-X Mission Concept, in: 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar. pp. 1–4.
- Zink, M., Krieger, G., Fiedler, H., Moreira, A., 2007. The TanDEM-X mission: Overview and status, in: Proceedings of ENVISAT Symposium. pp. 3944–3947. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4423711>

Lisad

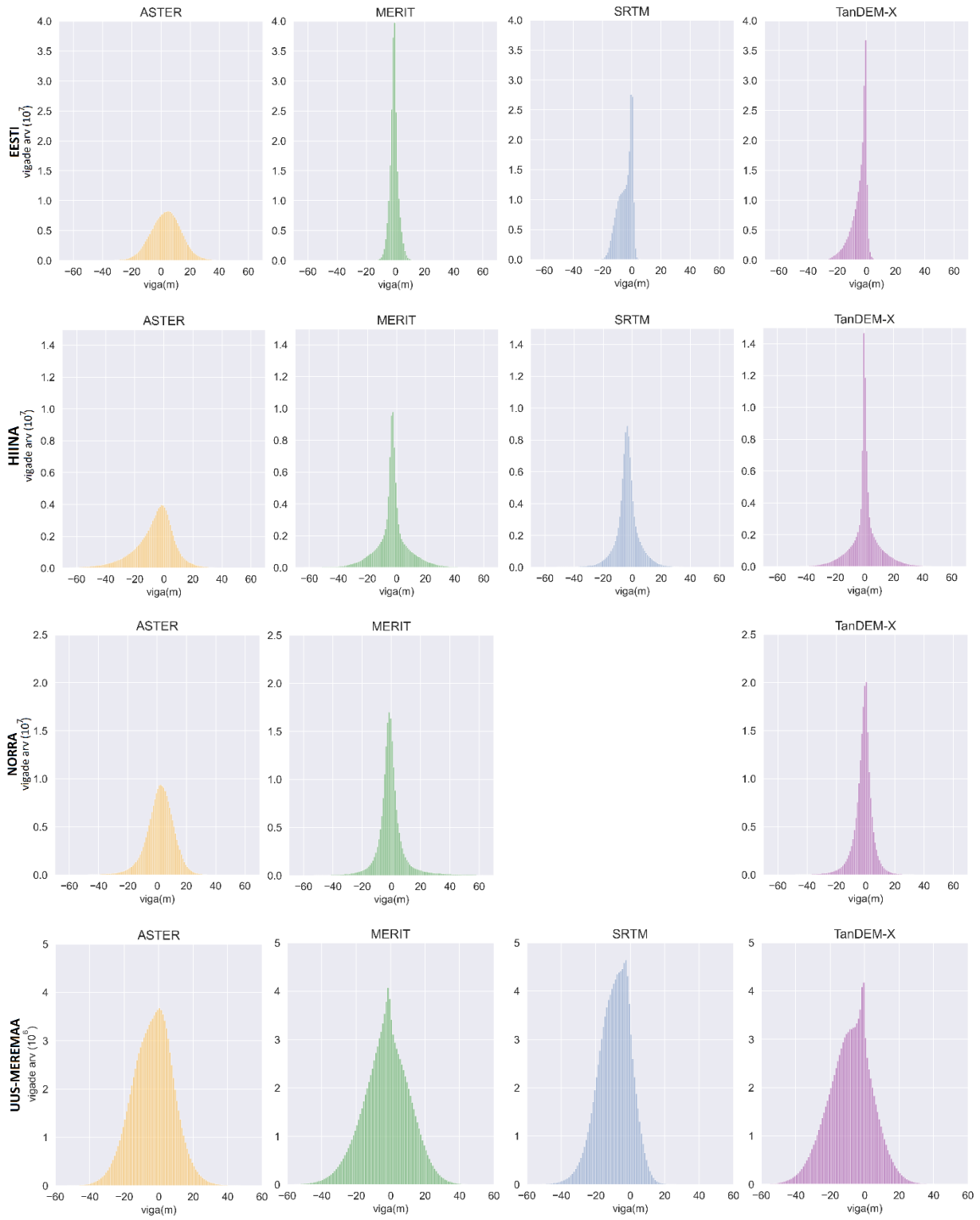
Lisa 1. Copernicuse globaalse maakatte klassifikatsioon

Table 4: Discrete classification coding

Map code	UN LCCS level	Land Cover Class	Definition according UN LCCS	Color code (RGB)	
0	-	No input data available	-	40, 40, 40	
111	A12A3A10B2D2E1	Closed forest, evergreen needle leaf	tree canopy >70 %, almost all needle leaf trees remain green all year. Canopy is never without green foliage.	88, 72, 31	suletud mets
113	A12A3A10B2D2E2	Closed forest, deciduous needle leaf	tree canopy >70 %, consists of seasonal needle leaf free communities with an annual cycle of leaf-on and leaf-off periods	112, 102, 62	suletud mets
112	A12A3A10B2D1E1	Closed forest, evergreen, broad leaf	tree canopy >70 %, almost all broadleaf trees remain green year round. Canopy is never without green foliage.	0, 153, 0	suletud mets
114	A12A3A10B2D1E2	Closed forest, deciduous broad leaf	tree canopy >70 %, consists of seasonal broadleaf free communities with an annual cycle of leaf-on and leaf-off periods.	0, 204, 0	suletud mets
115	A12A3A10	Closed forest, mixed	Closed forest, mix of types	78, 117, 31	suletud mets
116	A12A3A10	Closed forest, unknown	Closed forest, not matching any of the other definitions	0, 120, 0	suletud mets
121	A12A3A11B2D2E1	Open forest, evergreen needle leaf	top layer- trees 15-70 % and second layer- mixed of shrubs and grassland, almost all needle leaf trees remain green all year. Canopy is never without green foliage.	102, 96, 0	avatud mets
123	A12A3A11B2D2E2	Open forest, deciduous needle leaf	top layer- trees 15-70 % and second layer- mixed of shrubs and grassland, consists of seasonal needle leaf free communities with an annual cycle of leaf-on and leaf-off periods	141, 116, 0	avatud mets
122	A12A3A11B2D1E1	Open forest, evergreen broad leaf	top layer- trees 15-70 % and second layer- mixed of shrubs and grassland, almost all broadleaf trees remain green year round. Canopy is never without green foliage.	141, 180, 0	avatud mets
124	A12A3A11B2D1E2	Open forest, deciduous broad leaf	top layer- trees 15-70 % and second layer- mixed of shrubs and grassland, consists of seasonal broadleaf free communities with an annual cycle of leaf-on and leaf-off periods.	160, 220, 0	avatud mets
125	A12A3A12	Open forest, mixed	Open forest, mix of types	146, 153, 0	avatud mets
126	A12A3A12	Open forest, unknown	Open forest, not matching any of the other definitions	100, 140, 0	avatud mets
20	A12A4A20B3(B9)	Shrubs	These are woody perennial plants with persistent and woody stems and without any defined main stem being less than 5 m tall. The shrub foliage can be either evergreen or deciduous.	255, 187, 34	põõsastik
30	A12A2(A6)A20B4	Herbaceous vegetation	Plants without persistent stem or shoots above ground and lacking definite firm structure. Tree and shrub cover is less than 10 %.	255, 255, 76	rohuma

Map code	UN LCCS level	Land Cover Class	Definition according UN LCCS	Color code (RGB)	
90	A24A2A20	Herbaceous wetland	Lands with a permanent mixture of water and herbaceous or woody vegetation. The vegetation can be present in either salt, brackish, or fresh water.	0, 153, 180	märgala
100	A12A7	Moss and lichen	Moss and lichen	250, 230, 160	
60	B16A1(A2)	Bare / sparse vegetation	Lands with exposed soil, sand, or rocks and never has more than 10 % vegetated cover during any time of the year	180, 180, 180	lage maa/hõre taimeestik
40	A11A3	Cultivated and managed vegetation/agriculture (cropland)	Lands covered with temporary crops followed by harvest and a bare soil period (e.g., single and multiple cropping systems). Note that perennial woody crops will be classified as the appropriate forest or shrub land cover type.	240, 150, 255	haritav maa
50	B15A1	Urban / built up	Land covered by buildings and other man-made structures	250, 0, 0	tehismaaistik
70	B28A2(A3)	Snow and ice	Lands under snow or ice cover throughout the year.	240, 240, 240	lumijää
80	B28A1B1	Permanent water bodies	lakes, reservoirs, and rivers. Can be either fresh or salt-water bodies.	0, 50, 200	vesi
200	B28A1B1 ¹	Open sea	Oceans, seas. Can be either fresh or salt-water bodies.	0, 0, 128	vesi

Lisa 2. Uurimisalade kõrgusmodelite vearastrite histogrammid.



Lisa 3. Eesti uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa

L3 Tabel 1. Eesti uurimisala ASTER vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	4,20	1,32	-0,31	-1,04	-1,45	-1,53	-0,71	-0,36
Mediaan	4,49	1,31	-0,42	-1,22	-1,74	-1,87	-1,27	-0,29
Keskmine/mediaan	0,94	1,01	0,74	0,85	0,83	0,82	0,56	1,24
Standardhälve	10,74	9,80	9,56	9,88	10,22	10,14	10,69	11,01
Miinum	-64,46	-64,26	-62,25	-60,44	-52,32	-51,49	-41,20	-40,70
Maksimum	70,83	70,77	70,74	67,80	67,38	49,48	48,67	40,94
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	11,53	9,89	9,57	9,94	10,32	10,26	10,72	11,02
Assümeetriakordaja	-0,12	0,04	0,16	0,20	0,26	0,24	0,17	-0,21
Ekstsess	3,96	4,06	4,10	4,03	3,93	3,42	3,40	3,46
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	10,24	9,38	9,22	9,52	9,90	10,00	10,15	10,69
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	11,28	9,51	9,22	9,61	10,05	10,09	10,27	10,38
95 protsentiil ($ \Delta h $)	22,31	19,19	18,48	19,19	20,00	20,04	21,48	22,71

L3 Tabel 2. Eesti uurimisala MERIT vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	-0,97	-0,51	-0,27	-0,19	-0,14	-0,02	-0,23	-0,24
Mediaan	-0,98	-0,69	-0,45	-0,34	-0,29	-0,24	-0,50	-0,43
Keskmine/mediaan	1,00	0,73	0,59	0,56	0,48	0,09	0,45	0,56
Standardhälve	2,66	3,42	3,96	4,30	4,53	4,66	4,60	4,66
Miinum	-20,65	-20,74	-20,93	-19,26	-18,93	-20,69	-20,55	-19,78
Maksimum	18,94	19,12	19,96	19,52	20,30	20,26	19,74	17,05
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	2,83	3,45	3,97	4,30	4,53	4,66	4,60	4,67
Assümeetriakordaja	0,06	0,21	0,12	0,08	0,07	0,13	0,12	0,01
Ekstsess	4,70	3,86	3,54	3,43	3,38	3,31	3,40	3,96
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	2,03	3,08	3,71	4,04	4,25	4,43	4,35	4,22
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	2,56	3,29	3,80	4,13	4,34	4,51	4,44	4,30
95 protsentiil ($ \Delta h $)	5,81	6,88	7,96	8,64	9,14	9,30	9,24	9,45

L3 Tabel 3. Eesti uurimisala SRTM vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	-4,24	-5,60	-6,67	-7,25	-7,44	-7,20	-6,95	-6,86
Mediaan	-2,90	-5,14	-6,55	-7,17	-7,42	-7,17	-6,85	-6,70
Keskmine/mediaan	1,46	1,09	1,02	1,01	1,00	1,00	1,01	1,02
Standardhälve	4,70	4,69	4,64	4,70	4,82	4,86	4,94	5,11
Miinum	-25,22	-25,24	-27,31	-26,03	-25,61	-24,28	-23,79	-23,76
Maksimum	15,52	15,39	15,45	15,57	15,55	15,32	14,54	6,43
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	6,33	7,30	8,12	8,64	8,87	8,69	8,52	8,56
Assümeetriakordaja	-0,75	-0,36	-0,19	-0,15	-0,09	-0,06	-0,11	-0,23
Ekstsess	2,64	2,38	2,49	2,58	2,67	2,70	2,69	2,66
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	4,63	5,44	5,18	5,10	5,16	5,15	5,38	5,37
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	6,32	8,00	9,06	9,63	9,87	9,60	9,44	9,24
95 protsentiil ($ \Delta h $)	13,15	13,72	14,41	15,06	15,43	15,23	15,22	15,60

L3 Tabel 4. Eesti uurimisala TANDEM-X vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	-4,70	-5,13	-5,66	-5,68	-5,30	-4,88	-4,64	-4,55
Mediaan	-2,75	-3,98	-4,74	-4,83	-4,41	-3,91	-3,30	-3,01
Keskmine/mediaan	1,71	1,29	1,19	1,18	1,20	1,25	1,40	1,51
Standardhälve	5,31	5,12	5,49	5,84	6,13	6,46	6,73	6,73
Miinum	38,81	38,70	38,47	38,44	38,03	38,03	37,89	37,11
Maksimum	19,76	19,62	21,69	21,33	20,83	19,38	17,87	14,35
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	7,10	7,24	7,88	8,15	8,11	8,10	8,17	8,12
Assümeetriakordaja	-1,42	-1,04	-0,76	-0,66	-0,70	-0,74	-0,96	-1,32
Ekstsess	4,76	4,33	3,94	3,79	4,01	4,18	4,44	5,49
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	3,46	4,28	4,88	5,28	5,37	5,50	5,34	4,93
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	5,65	6,52	7,48	7,77	7,47	7,20	6,79	6,15
95 protsentiil ($ \Delta h $)	16,04	15,26	16,05	16,62	16,70	16,87	17,81	18,47

Lisa 4. Eesti uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa

L4 Tabel 1. Eesti uurimisala ASTER kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	-2,44	-0,31	-0,02	-5,22	-0,42	4,29	7,20	-2,63
Mediaan	-2,67	-0,45	-0,51	-5,66	-0,51	4,00	6,28	-2,68
Standardhälve	9,17	10,20	16,36	11,04	9,09	9,38	12,65	10,30
Miinumum	-60,44	-52,08	-53,48	-53,78	-50,63	-40,77	-41,04	-52,20
Maksimum	61,46	60,38	65,55	65,35	55,54	55,36	67,80	67,63
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	9,49	10,20	16,36	12,21	9,10	10,32	14,56	10,63
Assümeetriakordaja	0,18	0,31	0,24	0,20	0,12	0,16	0,62	0,09
Ekstsess	3,42	3,51	3,54	3,98	3,29	3,46	4,80	3,86
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	9,06	9,87	14,67	10,32	9,16	8,98	10,96	9,49
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	9,53	10,00	15,61	12,01	9,04	10,02	12,86	10,18
95 protsentiil ($ \Delta h $)	18,28	19,88	33,44	23,56	17,56	20,11	29,57	20,96

L4 Tabel 2. Eesti uurimisala MERIT kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	-0,48	-0,42	-0,37	-0,29	0,16	0,44	-0,06	-0,23
Mediaan	-0,54	-0,56	-0,73	-0,46	-0,12	0,22	-0,28	-0,31
Standardhälve	4,46	4,37	4,56	4,11	4,36	4,31	4,12	4,32
Miinumum	-20,69	-19,15	-15,85	-18,42	-18,65	-18,19	-15,95	-18,47
Maksimum	19,27	19,45	17,91	17,90	20,30	18,92	17,65	17,99
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	4,48	4,39	4,57	4,12	4,36	4,33	4,12	4,32
Assümeetriakordaja	-0,03	0,08	0,28	0,10	0,23	0,13	0,19	0,00
Ekstsess	3,37	3,39	3,42	3,58	3,40	3,42	3,19	3,32
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	4,19	4,13	4,20	3,90	4,10	4,08	4,02	4,06
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	4,31	4,24	4,36	3,97	4,17	4,14	4,06	4,15
95 protsentiil ($ \Delta h $)	9,02	8,80	9,22	8,14	8,79	8,68	8,15	8,76

L4 Tabel 3. Eesti uurimisala SRTM kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	-8,10	-8,07	-7,30	-6,70	-6,43	-6,45	-6,53	-7,50
Mediaan	-8,11	-8,17	-6,75	-6,41	-6,33	-6,33	-6,08	-7,39
Standardhälve	4,72	4,73	5,09	4,64	4,54	4,54	5,09	4,94
Miinumum	-26,03	-24,23	-24,33	-24,84	-23,65	-23,77	-24,04	-25,88
Maksimum	14,65	14,92	15,05	15,32	15,57	15,26	14,65	14,95
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	9,37	9,36	8,90	8,15	7,87	7,89	8,28	8,98
Assümeetriakordaja	-0,08	0,02	-0,32	-0,24	-0,14	-0,10	-0,20	-0,14
Ekstsess	2,62	2,69	2,81	2,70	2,49	2,69	2,74	2,60
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	4,99	5,08	5,31	5,04	5,01	4,86	5,29	5,38
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	10,46	10,51	9,68	9,01	8,77	8,73	8,90	9,98
95 protsentiil ($ \Delta h $)	15,88	15,76	16,30	14,53	14,02	14,10	15,36	15,78

L4 Tabel 4. Eesti uurimisala TanDEM-X kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	-6,42	-6,98	-6,17	-6,14	-4,92	-3,43	-2,54	-4,31
Mediaan	-5,52	-6,15	-4,94	-5,05	-4,11	-2,95	-2,33	-3,51
Standardhälve	5,97	6,25	6,27	6,03	5,86	5,31	4,82	5,74
Miinumum	-38,03	-35,60	-33,32	-38,21	-38,44	-32,66	-32,80	-35,77
Maksimum	14,68	13,89	13,26	14,10	21,33	19,22	16,53	16,29
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	8,77	9,37	8,80	8,61	7,65	6,32	5,45	7,18
Assümeetriakordaja	-0,76	-0,74	-0,84	-0,83	-0,57	-0,28	-0,41	-0,71
Ekstsess	3,83	3,66	3,71	4,08	3,73	3,76	4,74	4,23
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	5,46	5,99	5,80	5,60	5,14	4,72	3,93	4,74
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	8,44	9,21	8,39	8,33	7,09	6,01	4,98	6,38
95 protsentiil ($ \Delta h $)	17,74	18,83	18,44	17,28	15,93	12,92	10,86	15,26

Lisa 5. Eesti uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa

L5 Tabel 1. Eesti uurimisala ASTER kõrgusmodeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Suletud	Avatud	Haritav		Tehismaastik	Märgalad	Veekogud
	mets	mets	Rohumaa	maa			
Keskmine	-0,15	4,46	7,07	9,35	7,47	1,82	3,61
Mediaan	-0,43	4,59	7,48	9,49	7,18	1,85	3,61
Keskmine/mediaan	0,36	0,97	0,95	0,98	1,04	0,98	1,00
Standardhälve	10,37	9,47	9,09	8,99	6,72	9,55	11,13
Miinum	-64,46	-60,90	-55,20	-54,13	-6,21	-19,29	-22,40
Maksimum	60,57	70,83	55,01	66,32	26,83	23,43	30,65
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	10,37	10,47	11,51	12,97	10,04	9,73	11,70
Assümeetriakordaja	0,15	0,06	-0,81	-0,18	0,49	-0,09	0,09
Ekstsess	4,35	4,73	7,78	4,70	3,11	2,05	2,29
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	9,44	8,65	7,47	7,89	6,10	11,97	12,17
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	9,61	10,04	11,52	13,44	9,61	10,88	11,85
95 protsentiil ($ \Delta h $)	20,55	20,32	21,17	23,88	21,60	16,77	22,60

L5 Tabel 2. Eesti uurimisala MERIT kõrgusmodeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Suletud	Avatud	Haritav		Tehismaastik	Märgalad	Veekogud
	mets	mets	Rohumaa	maa			
Keskmine	-0,76	-1,02	-1,15	-0,93	-1,32	0,02	0,27
Mediaan	-0,87	-1,26	-1,09	-0,86	-1,43	-0,71	-0,30
Keskmine/mediaan	0,88	0,82	1,06	1,08	0,92	-0,02	-0,89
Standardhälve	3,48	2,70	1,96	1,52	1,24	2,90	3,37
Miinum	-20,93	-18,68	-13,45	-16,09	-5,15	-11,43	-8,75
Maksimum	20,30	19,96	12,58	18,94	4,19	6,34	7,51
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	3,56	2,89	2,28	1,78	1,81	2,90	3,39
Assümeetriakordaja	0,08	0,45	-0,22	-0,08	0,51	-0,43	0,06
Ekstsess	3,52	4,44	5,71	7,73	3,32	4,11	2,64
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	3,33	2,27	1,48	1,14	1,25	2,62	3,61
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	3,47	2,81	2,04	1,56	2,05	3,06	3,57
95 protsentiil ($ \Delta h $)	6,96	5,63	4,55	3,61	3,00	5,00	7,31

L5 Tabel 3. Eesti uurimisala SRTM kõrgusmodeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Suletud	Avatud	Haritav		Tehismaastik	Märgalad	Veekogud
	mets	mets	Rohumaa	maa			
Keskmine	-7,47	-3,18	-1,15	-0,49	-0,90	-3,05	-2,35
Mediaan	-7,44	-2,36	-0,62	-0,08	-0,86	-1,42	-1,37
Keskmine/mediaan	1,00	1,35	1,85	6,28	1,05	2,15	1,71
Standardhälve	4,26	3,58	2,42	1,97	1,29	4,67	3,11
Miinumum	-27,31	-26,15	-20,98	-22,40	-4,13	-21,51	-16,45
Maksimum	9,62	9,66	7,11	15,57	3,83	4,48	1,81
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	8,60	4,79	2,68	2,03	1,57	5,57	3,90
Assümeetriakordaja	-0,13	-1,09	-2,14	-2,70	0,11	-1,82	-1,56
Ekstsess	2,54	4,25	11,47	15,92	3,11	6,11	5,52
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	4,60	3,10	1,62	1,12	1,26	2,23	2,02
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	9,59	4,18	1,79	1,18	1,60	2,75	2,86
95 protsentiil ($ \Delta h $)	14,58	10,31	5,58	4,15	3,25	14,44	8,91

L5 Tabel 4. Eesti uurimisala TanDEM-X kõrgusmodeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Suletud	Avatud	Haritav		Tehismaastik	Märgalad	Veekogud
	mets	mets	Rohumaa	maa			
Keskmine	-7,52	-3,34	-1,63	-1,11	-1,45	-1,86	-1,30
Mediaan	-6,45	-2,47	-1,26	-0,78	-1,44	-1,01	-0,99
Keskmine/mediaan	1,17	1,35	1,30	1,42	1,00	1,85	1,31
Standardhälve	5,65	3,63	2,05	1,86	1,22	2,74	1,28
Miinumum	-38,81	-30,10	-19,46	-25,23	-4,63	-14,64	-15,12
Maksimum	21,69	19,50	11,42	14,30	3,10	1,57	7,46
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	9,40	4,93	2,62	2,16	1,89	3,31	1,82
Assümeetriakordaja	-0,79	-1,64	-1,65	-3,07	0,73	-3,34	-4,01
Ekstsess	3,45	7,24	9,75	23,26	3,83	14,12	30,96
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	5,23	2,49	1,34	0,93	1,03	0,66	0,23
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	9,38	3,95	2,10	1,37	2,09	1,56	1,09
95 protsentiil ($ \Delta h $)	18,61	10,59	5,28	4,25	3,23	7,25	3,82

Lisa 6. Hiina uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa

L6 Tabel 1. Hiina uurimisala ASTER vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	-1,49	-2,58	-4,10	-5,94	-7,81	-9,40	-10,49	-11,28
Mediaan	-1,12	-1,76	-2,67	-4,09	-5,96	-7,71	-8,89	-9,45
Keskmine/mediaan	1,34	1,47	1,53	1,45	1,31	1,22	1,18	1,19
Standardhälve	9,56	10,22	11,74	13,34	14,60	15,67	16,66	20,44
		-	-	-	-	-	-	-
Miinumum	-153,50	158,34	158,71	158,46	194,93	194,81	199,62	311,89
Maksimum	237,72	307,75	308,05	309,38	314,04	310,21	323,34	437,89
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	9,67	10,54	12,43	14,60	16,56	18,28	19,68	23,35
Assümeetriakordaja	-0,35	-0,81	-1,07	-1,04	-0,91	-0,87	-0,80	0,69
Ekstsess	7,48	8,99	9,30	7,99	7,34	6,75	6,47	21,71
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	7,32	7,58	8,72	10,47	12,20	13,59	14,70	16,45
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	7,72	8,14	9,57	11,76	14,06	16,06	17,61	19,49
95 protsentiil ($ \Delta h $)	20,13	22,05	26,00	30,40	34,05	37,06	39,52	45,05

L6 Tabel 2. Hiina uurimisala MERIT vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	-3,74	-3,82	-3,45	-3,04	-2,74	-2,47	-2,06	-1,24
Mediaan	-3,27	-3,21	-2,95	-2,66	-2,41	-2,15	-1,80	-1,10
Keskmine/mediaan	1,15	1,19	1,17	1,14	1,14	1,15	1,14	1,12
Standardhälve	6,01	7,16	8,86	10,35	11,71	13,04	14,23	17,80
		-	-	-	-	-	-	-
Miinumum	-127,89	127,76	127,78	137,31	192,02	191,90	197,72	323,10
Maksimum	230,33	326,24	328,88	330,21	345,65	331,04	341,82	422,19
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	7,08	8,11	9,51	10,79	12,02	13,27	14,38	17,85
Assümeetriakordaja	-1,44	-1,15	-0,44	-0,16	-0,05	-0,11	-0,12	1,87
Ekstsess	28,80	20,85	13,68	8,88	7,51	5,62	5,15	34,07
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	2,02	2,55	3,72	5,69	8,27	10,66	12,52	13,81
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	4,41	4,80	5,98	8,17	10,28	12,07	13,52	14,96
95 protsentiil ($ \Delta h $)	13,44	17,01	20,56	23,09	25,30	27,22	28,89	32,30

L6 Tabel 3. Hiina uurimisala SRTM vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	-4,23	-4,26	-3,86	-3,39	-3,09	-2,88	-2,61	-2,06
Mediaan	-3,97	-3,91	-3,64	-3,31	-3,07	-2,84	-2,54	-2,00
Keskmine/mediaan	1,07	1,09	1,06	1,02	1,01	1,01	1,03	1,03
Standardhälve	5,87	6,51	7,36	7,92	8,49	9,16	9,88	14,20
		-	-	-	-	-	-	-
Miinum	-121,41	121,40	123,18	131,45	190,93	190,81	197,62	318,89
Maksimum	233,72	329,75	330,05	331,38	338,35	332,21	345,34	418,89
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	7,24	7,78	8,31	8,62	9,03	9,60	10,22	14,35
Assümeetriakordaja	-1,23	-1,37	-0,77	-0,40	-0,10	-0,17	-0,17	3,93
Ekstsess	30,58	27,01	22,68	17,12	17,22	12,36	11,54	83,50
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	2,76	3,12	3,92	4,93	6,05	7,15	8,15	9,33
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	5,43	5,64	6,08	6,72	7,52	8,30	9,01	10,12
95 protsentiil ($ \Delta h $)	11,85	14,15	15,92	16,85	17,76	18,79	19,96	23,48

L6 Tabel 4. Hiina uurimisala TanDEM-X vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	-0,23	-0,20	0,06	0,29	0,41	0,51	0,82	1,86
Mediaan	-0,25	-0,20	0,02	0,27	0,48	0,67	0,92	1,61
Keskmine/mediaan	0,92	1,01	3,78	1,06	0,85	0,76	0,89	1,16
Standardhälve	3,27	4,62	6,74	8,76	10,54	12,15	13,52	17,49
		-	-	-	-	-	-	-
Miinum	-124,56	124,42	124,45	128,44	189,64	189,52	195,33	319,35
Maksimum	232,59	332,83	335,91	337,24	351,59	338,08	348,42	425,04
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	3,28	4,63	6,74	8,77	10,55	12,16	13,55	17,59
Assümeetriakordaja	-0,24	0,25	0,46	0,31	0,22	0,09	0,07	2,18
Ekstsess	48,77	36,78	22,27	12,42	9,73	6,49	5,66	37,74
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	1,11	1,61	2,65	4,52	7,24	9,86	11,86	13,09
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	1,35	1,96	3,62	6,30	8,84	11,03	12,78	14,42
95 protsentiil ($ \Delta h $)	6,39	9,95	15,11	19,09	22,15	24,88	27,24	31,47

Lisa 7. Hiina uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa

L7 Tabel 1. Hiina uurimisala ASTER kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	-7,18	-7,59	-8,79	-10,25	-10,68	-9,55	-10,34	-9,56
Mediaan	-4,81	-4,72	-6,51	-8,47	-8,63	-7,72	-8,91	-8,00
Standardhälve	16,57	18,41	18,60	17,94	17,47	16,38	16,14	15,23
	-	-	-	-	-	-	-	-
Miinum	311,06	310,64	311,89	311,42	302,60	303,34	-310,44	-306,40
Maksimum	437,89	391,01	339,94	358,73	401,15	375,19	350,08	401,63
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	18,06	19,92	20,57	20,66	20,47	18,96	19,17	17,98
Assümeetriakordaja	-0,72	-0,63	-0,11	0,41	-0,07	-0,22	-0,04	-0,06
Ekstsess	18,24	15,39	15,67	19,75	17,41	16,08	13,49	15,73
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	12,15	13,61	15,12	14,81	14,22	13,72	14,17	12,96
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	13,80	15,17	16,92	17,63	17,18	16,10	17,27	15,86
95 protsentiil ($ \Delta h $)	36,26	40,70	41,00	40,53	40,80	37,91	38,48	36,46

L7 Tabel 2. Hiina uurimisala MERIT kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	-2,93	-4,22	-4,09	-2,52	-1,42	-1,12	-0,58	-0,84
Mediaan	-2,22	-2,86	-2,99	-2,31	-1,84	-1,62	-1,23	-1,35
Standardhälve	14,75	14,14	14,82	15,10	14,44	13,50	13,84	14,40
	-	-	-	-	-	-	-	-
Miinum	322,74	322,32	320,59	323,10	311,50	315,02	-322,12	-305,22
Maksimum	422,19	381,82	374,24	379,40	385,44	373,59	368,56	385,93
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	15,04	14,75	15,37	15,31	14,51	13,55	13,85	14,43
Assümeetriakordaja	0,12	1,03	1,36	1,89	1,54	1,24	0,82	0,55
Ekstsess	25,52	32,40	32,94	36,58	28,25	25,97	21,16	18,44
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	9,77	9,79	10,91	11,41	11,04	10,10	10,86	10,94
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	12,09	12,18	12,85	13,01	12,62	11,65	12,15	12,47
95 protsentiil ($ \Delta h $)	29,77	29,65	29,84	29,02	28,29	27,01	27,64	29,06

L7 Tabel 3. Hiina uurimisala SRTM kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	-3,72	-4,97	-4,94	-3,25	-1,80	-1,32	-0,86	-1,37
Mediaan	-3,22	-4,14	-4,29	-3,26	-2,30	-1,83	-1,39	-1,76
Standardhälve	11,33	10,90	11,46	11,35	10,51	10,05	10,56	10,77
	-	-	-	-	-	-	-	-
Miinum	314,06	313,64	318,89	314,42	302,82	306,34	-313,44	-296,40
Maksimum	418,89	380,70	366,94	380,73	382,15	377,10	372,08	382,63
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	11,93	11,98	12,48	11,81	10,67	10,14	10,60	10,85
Assümeetriakordaja	0,45	2,74	3,37	4,75	4,03	2,92	1,79	1,27
Ekstsess	66,25	88,14	90,16	113,29	94,81	78,95	59,20	54,28
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	7,09	7,30	7,69	7,55	7,27	7,00	7,47	7,46
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	8,77	9,38	9,63	8,89	8,25	7,82	8,16	8,32
95 protsentiil ($ \Delta h $)	21,38	22,48	22,31	20,01	18,79	18,54	19,94	20,31

L7 Tabel 4. Hiina uurimisala TanDEM-X kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	-0,76	-0,74	0,14	1,70	2,30	1,74	1,35	0,29
Mediaan	0,30	0,18	0,45	1,01	1,16	1,05	1,03	0,64
Standardhälve	13,89	13,09	13,86	14,45	14,02	12,90	13,27	13,59
	-	-	-	-	-	-	-	-
Miinum	318,99	318,56	316,84	319,35	307,74	311,26	-318,37	-312,30
Maksimum	425,04	387,76	380,18	385,34	388,30	380,18	375,16	388,78
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	13,91	13,11	13,86	14,55	14,21	13,02	13,34	13,59
Assümeetriakordaja	0,15	1,59	2,06	2,50	2,01	1,71	1,11	0,59
Ekstsess	32,65	44,08	42,28	43,88	32,60	32,15	26,41	23,37
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	8,67	8,63	9,93	10,53	10,23	9,22	9,91	9,93
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	10,81	10,48	11,43	11,98	11,84	10,80	11,30	11,51
95 protsentiil ($ \Delta h $)	27,49	26,06	26,66	27,44	27,55	25,74	26,27	27,37

Lisa 8. Hiina uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa

L8 Tabel 1. Hiina uurimisala ASTER kõrgusmodeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Põõsastik	Rohumaa	Haritav		Lage	
			maa	Tehismaastik	maa/Hõre	taimestik
Keskmine	3,50	-6,48	-1,27	-1,36	-9,61	-13,14
Mediaan	1,87	-4,59	-1,03	-1,32	-7,91	-12,19
Keskmine/mediaan	1,87	1,41	1,24	1,03	1,21	1,08
Standardhälve	7,63	15,40	6,95	8,32	17,50	11,31
Miinum	-13,76	-311,89	-48,07	-57,87	-201,52	-36,51
Maksimum	24,86	302,60	38,61	65,70	437,89	24,27
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	8,39	16,71	7,06	8,43	19,97	17,34
Assümeetriakordaja	0,26	-0,66	-0,24	-0,47	0,05	0,01
Ekstsess	2,08	9,52	4,87	6,68	18,12	2,06
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	8,77	12,81	6,02	7,05	14,12	14,02
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	9,08	14,08	6,30	7,45	16,78	20,40
95 protsentiil ($ \Delta h $)	16,24	34,52	14,21	16,46	39,43	31,39

L8 Tabel 2. Hiina uurimisala MERIT kõrgusmodeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Põõsastik	Rohumaa	Haritav		Lage	
			maa	Tehismaastik	maa/Hõre	taimestik
Keskmine	2,29	-2,94	-2,75	-0,96	-2,82	-11,30
Mediaan	0,33	-2,85	-2,73	-1,95	-3,28	-15,10
Keskmine/mediaan	6,96	1,03	1,01	0,49	0,86	0,75
Standardhälve	6,41	12,26	3,64	4,80	14,83	9,00
Miinum	-9,47	-323,10	-63,99	-41,48	-199,61	-24,02
Maksimum	23,05	330,08	32,10	61,71	422,19	25,31
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	6,81	12,61	4,56	4,89	15,09	14,45
Assümeetriakordaja	0,50	-0,09	-4,55	0,99	1,44	0,38
Ekstsess	1,92	19,35	53,80	8,62	29,80	1,61
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	6,71	5,98	1,94	2,75	11,35	8,18
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	6,59	9,17	3,70	3,91	12,93	19,36
95 protsentiil ($ \Delta h $)	12,92	26,81	6,48	10,50	29,00	20,86

L8 Tabel 3. Hiina uurimisala SRTM kõrgusmodeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Haritav			Lage		Veekogud
	Põõsastik	Rohumaa	maa	Tehismaastik	maa/Hõre taimestik	
Keskmine	1,49	-3,36	-3,55	-1,78	-3,22	-11,85
Mediaan	-0,21	-3,40	-3,46	-2,64	-3,50	-15,35
Keskmine/mediaan	-7,01	0,99	1,03	0,68	0,92	0,77
Standardhälve	6,53	9,22	4,00	5,06	11,53	9,06
Miinum	-11,91	-318,89	-64,25	-42,28	-199,52	-24,33
Maksimum	21,11	329,60	32,97	63,70	418,89	25,92
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	6,70	9,81	5,35	5,36	11,97	14,91
Assümeetriakordaja	0,40	-0,32	-3,34	0,74	3,08	0,42
Ekstsess	1,88	50,63	36,77	8,86	78,89	1,74
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	7,34	5,15	2,70	3,27	7,65	8,96
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	6,98	7,20	4,80	4,85	9,06	19,72
95 protsentiil ($ \Delta h $)	12,27	18,68	8,32	10,21	21,32	22,05

L8 Tabel 4. Hiina uurimisala TanDEM-X kõrgusmodeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Haritav			Lage		Veekogud
	Põõsastik	Rohumaa	maa	Tehismaastik	maa/Hõre taimestik	
Keskmine	1,85	-0,32	0,37	1,02	0,88	1,30
Mediaan	1,27	-0,06	0,04	0,09	0,17	0,84
Keskmine/mediaan	1,46	5,72	9,16	10,97	5,06	1,55
Standardhälve	5,63	11,35	2,26	3,94	13,65	4,97
Miinum	-15,84	-319,35	-34,46	-35,66	-197,23	-12,22
Maksimum	21,84	336,67	49,73	65,45	425,04	49,20
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	5,93	11,36	2,29	4,07	13,68	5,14
Assümeetriakordaja	0,32	-0,18	0,75	1,45	2,14	2,36
Ekstsess	2,58	25,51	19,51	7,12	41,39	16,51
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	6,01	4,80	1,30	2,34	9,72	3,36
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	5,66	7,70	1,38	2,56	11,08	3,31
95 protsentiil ($ \Delta h $)	11,49	24,46	4,54	9,63	26,37	8,91

Lisa 9. Norra uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa

L9 Tabel 1. Norra uurimisala ASTER vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	3,10	2,74	1,49	-0,34	-2,28	-3,61	-4,41	-5,86
Mediaan	3,31	2,90	1,85	0,38	-1,15	-2,39	-3,40	-4,96
Keskmine/mediaan	0,94	0,94	0,81	-0,90	1,97	1,51	1,30	1,18
Standardhälve	8,44	8,73	9,52	11,06	13,15	14,58	15,05	16,23
	-	-	-	-	-	-	-	-
Miinum	120,72	-96,70	112,24	112,77	113,17	112,17	109,35	104,88
Maksimum	70,48	74,87	93,52	93,47	93,64	94,10	90,05	75,07
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	9,00	9,15	9,64	11,06	13,35	15,02	15,68	17,25
Assümeetriakordaja	-0,84	-0,29	-0,35	-0,55	-0,59	-0,49	-0,38	-0,21
Ekstsess	9,69	4,21	4,40	5,09	5,35	4,92	4,39	3,81
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	7,42	8,12	8,69	9,77	11,21	12,57	13,32	14,74
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	8,47	8,84	9,10	9,97	11,51	13,02	13,96	15,87
95 protsentiil ($ \Delta h $)	17,20	18,02	19,07	21,87	27,19	31,23	32,29	35,56

L9 Tabel 2. Norra uurimisala MERIT vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	-1,09	-0,85	-0,14	0,81	2,55	4,57	6,38	8,33
Mediaan	-1,34	-1,18	-0,88	-0,48	0,46	1,88	3,11	4,57
Keskmine/mediaan	0,81	0,72	0,15	-1,68	5,50	2,43	2,05	1,82
Standardhälve	5,94	7,87	10,97	14,45	17,82	20,78	23,54	25,53
Miinum	-74,30	-75,45	-84,66	-84,43	-83,80	-82,92	-79,57	-78,59
Maksimum	129,33	132,93	133,93	134,22	134,28	134,22	134,05	132,94
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	6,04	7,91	10,97	14,47	18,00	21,28	24,39	26,85
Assümeetriakordaja	1,55	1,66	1,43	0,96	0,76	0,68	0,67	0,69
Ekstsess	23,89	19,95	12,21	7,37	5,22	4,30	3,89	3,72
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	3,38	4,68	6,89	9,84	13,33	16,93	19,89	21,88
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	4,05	5,19	7,48	10,62	14,28	17,92	20,86	23,11
95 protsentiil ($ \Delta h $)	11,39	15,52	22,70	31,47	38,97	45,36	52,05	57,48

L9 Tabel 3. Norra uurimisala TanDEM-X vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	-0,84	-1,16	-1,67	-2,44	-3,35	-4,31	-4,99	-6,46
Mediaan	-0,49	-0,95	-1,38	-2,02	-2,81	-3,78	-4,55	-5,86
Keskmine/mediaan	1,73	1,22	1,21	1,21	1,19	1,14	1,10	1,10
Standardhälve	3,66	5,13	6,96	9,22	11,39	13,05	14,52	16,91
Miinumum	-76,01	-76,03	-76,01	-75,97	-82,25	-86,75	-86,56	-86,06
Maksimum	63,01	62,86	62,91	71,28	73,74	73,76	73,36	73,31
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	3,76	5,26	7,15	9,54	11,87	13,75	15,36	18,10
Assümeetriakordaja	-1,50	-0,48	-0,37	-0,35	-0,32	-0,24	-0,17	-0,12
Ekstsess	17,18	6,24	4,84	4,36	3,76	3,33	3,14	3,09
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	2,61	4,38	6,15	8,31	10,71	12,82	14,51	16,78
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	2,90	4,65	6,49	8,73	11,15	13,29	15,07	17,69
95 protsentiil ($ \Delta h $)	7,36	10,55	14,32	19,16	23,76	27,24	30,21	36,22

Lisa 10. Norra uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa

L10 Tabel 1. Norra uurimisala ASTER kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	-0,99	-5,85	-11,57	-9,93	-1,33	6,36	5,64	1,08
Mediaan	0,32	-4,77	-10,69	-8,64	-0,65	6,90	6,86	2,87
Standardhälve	13,38	13,89	14,44	13,79	10,37	13,21	16,93	15,25
Miinum	-112,23	-113,17	-97,57	-80,24	-81,70	-82,79	-81,69	-104,92
Maksimum	94,10	66,29	54,89	66,55	70,94	74,24	73,91	69,85
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	13,41	15,07	18,51	17,00	10,46	14,66	17,84	15,29
Assümeetriakordaja	-0,76	-0,60	-0,46	-0,49	-0,49	-0,10	-0,31	-0,61
Ekstsess	5,96	4,28	3,61	3,60	4,88	4,80	4,17	4,08
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	11,18	13,01	13,42	12,57	9,12	11,19	14,04	13,41
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	11,44	13,80	17,67	15,80	9,30	14,10	16,70	14,32
95 protsentiil ($ \Delta h $)	27,16	29,86	37,42	35,06	20,95	27,66	36,18	30,83

L10 Tabel 2. Norra uurimisala MERIT kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	-0,02	-6,00	-6,96	-0,38	7,10	8,74	7,27	3,80
Mediaan	-1,30	-5,04	-4,97	-1,01	2,67	3,51	3,67	2,21
Standardhälve	16,59	16,80	16,99	15,48	18,73	20,31	19,74	15,67
Miinum	-77,45	-84,23	-84,26	-84,43	-74,08	-71,19	-61,44	-66,70
Maksimum	134,28	133,77	132,07	113,04	113,23	109,15	110,96	131,44
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	16,59	17,84	18,36	15,49	20,03	22,12	21,04	16,13
Assümeetriakordaja	0,63	0,31	-0,18	0,63	1,31	1,14	1,15	0,87
Ekstsess	5,74	6,10	4,27	6,01	5,33	4,79	5,44	6,52
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	12,80	12,88	14,63	11,34	12,47	13,82	14,63	12,98
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	13,87	15,16	16,04	12,50	13,54	15,61	15,70	13,61
95 protsentiil ($ \Delta h $)	35,05	37,85	39,37	32,82	46,42	51,45	47,10	32,57

L10 Tabel 3. Norra uurimisala TanDEM-X kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	-3,87	-4,78	-5,73	-4,24	-1,99	-4,63	-8,14	-5,50
Mediaan	-3,28	-3,75	-5,10	-3,12	-1,57	-3,51	-6,59	-4,66
Standardhälve	10,36	12,86	15,57	13,96	10,80	12,73	15,66	13,28
Miinum	-73,42	-72,50	-73,53	-74,01	-82,04	-86,56	-86,06	-86,75
Maksimum	73,76	71,71	71,94	62,48	62,90	62,35	62,72	61,49
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	11,06	13,72	16,59	14,59	10,98	13,54	17,65	14,37
Assümeetriakordaja	-0,28	-0,33	-0,13	-0,33	-0,37	-0,52	-0,54	-0,41
Ekstsess	3,79	3,74	2,97	3,55	4,35	4,31	3,86	4,06
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	9,73	11,57	15,64	12,56	9,54	10,71	13,79	11,91
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	10,35	12,51	16,62	13,49	9,92	11,77	15,68	13,13
95 protsentiil ($ \Delta h $)	22,37	28,45	32,33	30,05	22,24	28,67	37,24	29,11

Lisa 11. Norra uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa

L11 Tabel 1. Norra uurimisala ASTER kõrgusmodeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Suletud mets	Avatud mets	Põõsastik	Rohumaa	Haritav maa	Lage maa		Veekogud
						/hõre	Märgalad	
Keskmine	1,79	2,59	3,12	1,66	-4,80	-3,52	-4,14	1,91
Mediaan	2,51	3,02	3,31	2,09	-3,53	-3,60	-1,76	4,25
Keskmine/mediaan	0,71	0,86	0,94	0,79	1,36	0,98	2,36	0,45
Standardhälve	10,71	9,01	8,22	8,88	10,54	5,66	6,49	17,62
Miinumum	-113,17	-81,49	-46,26	-69,31	-64,60	-17,73	-20,73	-120,72
Maksimum	94,10	62,01	44,70	51,30	33,06	7,98	5,79	65,06
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	10,86	9,38	8,79	9,04	11,59	6,67	7,70	17,72
Assümeetriakordaja	-0,80	-0,76	-0,38	-0,47	-1,03	-0,17	-0,85	-2,29
Ekstsess	6,29	6,17	4,49	4,61	5,77	2,06	2,63	16,24
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	8,99	7,75	7,50	8,00	8,48	6,82	4,44	10,41
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	9,77	8,79	8,47	8,56	9,39	6,68	5,73	12,05
95 protsentiil ($ \Delta h $)	21,24	18,15	17,36	17,77	23,85	13,11	16,71	31,07

L11 Tabel 2. Norra uurimisala MERIT kõrgusmodeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Suletud mets	Avatud mets	Põõsastik	Rohumaa	Haritav maa	Lage maa		Veekogud
						/hõre	Märgalad	
Keskmine	0,02	0,46	-1,36	-0,79	8,72	-6,09	8,01	3,55
Mediaan	-0,95	-0,84	-1,60	-1,36	1,30	-6,23	5,77	5,23
Keskmine/mediaan	-0,02	-0,55	0,85	0,58	6,73	0,98	1,39	0,68
Standardhälve	12,12	9,80	5,20	8,77	17,73	6,49	2,65	5,06
Miinumum	-76,33	-70,49	-42,86	-84,66	-74,31	-20,94	5,23	-23,74
Maksimum	110,15	124,47	76,16	134,28	97,23	12,53	13,55	17,25
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	12,12	9,81	5,37	8,81	19,76	8,90	8,44	6,18
Assümeetriakordaja	1,31	2,27	2,05	2,61	1,13	0,29	0,17	-1,52
Ekstsess	10,15	17,59	26,13	27,70	5,37	2,83	1,27	4,66
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	6,65	4,88	3,18	3,98	7,72	6,70	0,78	2,32
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	7,76	5,69	3,79	4,74	14,29	9,81	10,21	6,57
95 protsentiil ($ \Delta h $)	26,04	19,65	9,66	16,20	43,79	16,47	11,49	9,94

L11 Tabel 3. Norra uurimisala TanDEM-X kõrgusmodeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Suletud mets	Avatud mets	Põõsastik	Rohumaa	Haritav maa	Lage maa /hõre taimestik	Märgalad	Veekogud
Keskmine	-3,36	-1,56	-0,06	0,41	-1,37	0,99	-0,01	1,72
Mediaan	-2,49	-1,03	-0,01	0,39	0,28	1,61	0,35	1,06
Keskmine/mediaan	1,35	1,52	6,52	1,03	-4,82	0,61	-0,04	1,62
Standardhälve	7,55	5,57	3,07	5,57	9,17	9,58	1,10	2,56
Miinum	-86,75	-74,01	-33,14	-63,09	-54,84	-17,70	-2,65	-27,52
Maksimum	62,72	63,88	26,48	73,76	47,32	19,02	1,98	17,85
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	8,27	5,79	3,07	5,59	9,27	9,63	1,10	3,08
Assümeeetriakordaja	-1,03	-1,06	0,03	-0,02	-0,67	-0,06	-0,92	-1,84
Ekstsess	8,21	11,97	6,38	8,01	4,83	1,75	2,41	19,33
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	4,98	3,33	2,37	3,87	3,54	12,45	0,74	1,00
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	6,20	3,90	2,59	4,35	7,66	11,25	0,98	2,99
95 protsentiil ($ \Delta h $)	17,34	12,04	6,36	11,54	20,27	15,69	2,06	5,16

Lisa 12. Uus-Meremaa uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

L12 Tabel 1. Uus-Meremaa uurimisala ASTER vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	-0,94	-2,85	-2,04	-1,97	-2,38	-3,19	-4,23	-5,70
Mediaan	0,96	-1,34	-1,20	-1,64	-2,32	-3,32	-4,47	-6,05
Keskmine/mediaan	-0,98	2,13	1,69	1,20	1,03	0,96	0,95	0,94
Standardhälve	8,31	10,23	10,55	10,75	11,12	11,68	12,42	13,75
Miinum	-88,23	-88,17	-88,07	-88,16	-87,59	-87,43	-87,36	-86,40
Maksimum	56,17	53,86	59,34	63,04	66,05	65,95	65,62	69,36
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	8,37	10,62	10,74	10,93	11,38	12,11	13,12	14,89
Assümeetriakordaja	-0,96	-0,36	-0,29	-0,14	-0,03	0,05	0,11	0,15
Ekstsess	4,19	3,09	3,22	3,18	3,12	3,10	3,09	3,14
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	6,22	10,20	10,41	10,69	11,09	11,66	12,43	13,74
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	7,00	10,37	10,43	10,76	11,30	12,13	13,27	15,16
95 protsentiil ($ \Delta h $)	17,76	21,15	21,35	21,53	22,29	23,63	25,47	28,72

L12 Tabel 2. Uus-Meremaa uurimisala MERIT vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	-2,93	-2,22	-0,42	0,13	-0,31	-1,46	-3,17	-6,61
Mediaan	-2,15	-2,42	-0,36	0,41	-0,07	-1,31	-3,12	-6,70
Keskmine/mediaan	1,36	0,92	1,19	0,31	4,37	1,11	1,02	0,99
Standardhälve	6,63	10,25	11,55	12,00	12,53	13,27	14,16	15,96
Miinum	-89,27	-89,28	-89,59	-88,06	-89,11	-88,77	-89,09	100,46
Maksimum	51,28	76,32	75,95	75,69	75,24	75,07	74,66	74,15
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	7,25	10,48	11,55	12,00	12,54	13,35	14,51	17,28
Assümeetriakordaja	-0,39	-0,08	-0,23	-0,21	-0,14	-0,09	-0,04	-0,01
Ekstsess	9,00	4,19	3,54	3,32	3,14	3,04	3,00	3,03
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	3,31	8,51	11,03	11,67	12,42	13,32	14,31	16,14
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	5,27	9,74	11,14	11,78	12,45	13,36	14,57	17,50
95 protsentiil ($ \Delta h $)	15,68	21,15	22,87	23,64	24,57	26,05	28,23	33,32

L12 Tabel 3. Uus-Meremaa uurimisala SRTM vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	-5,53	-7,59	-7,14	-7,18	-7,73	-8,76	-10,12	-12,75
Mediaan	-3,34	-6,24	-6,17	-6,60	-7,41	-8,51	-9,89	-12,41
Keskmine/mediaan	1,66	1,22	1,16	1,09	1,04	1,03	1,02	1,03
Standardhälve	6,41	8,28	8,72	8,75	8,80	9,01	9,47	10,89
	-	-	-	-	-	-	-	-
Miinum	107,08	107,58	107,50	107,31	126,29	125,37	125,16	124,69
Maksimum	31,15	31,14	34,25	39,44	40,09	40,03	39,67	46,28
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	8,47	11,23	11,27	11,32	11,72	12,57	13,86	16,77
Assümeetriakordaja	-1,34	-0,55	-0,50	-0,38	-0,28	-0,22	-0,19	-0,25
Ekstsess	5,71	3,67	3,59	3,40	3,30	3,26	3,25	3,64
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	3,68	8,14	8,52	8,68	8,80	9,01	9,44	10,78
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	6,31	11,39	10,98	11,19	11,86	12,97	14,50	17,69
95 protsentiil ($ \Delta h $)	18,43	21,72	22,22	22,14	22,56	23,83	25,95	30,94

L12 Tabel 4. Uus-Meremaa uurimisala TanDEM-X vigade põhistatistikud nõlvakalde klasside kaupa.

Statistik	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35
Keskmine	-4,40	-6,37	-6,10	-6,33	-6,98	-7,97	-9,18	-11,41
Mediaan	-1,94	-5,22	-5,30	-5,85	-6,74	-7,90	-9,25	-11,69
Keskmine/mediaan	2,27	1,22	1,15	1,08	1,04	1,01	0,99	0,98
Standardhälve	6,75	9,33	10,45	11,09	11,84	12,74	13,73	15,48
Miinum	-89,01	-89,02	-89,03	-88,99	-88,25	-89,29	-88,84	-99,96
Maksimum	43,89	53,63	53,86	57,32	57,96	57,91	59,21	64,79
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	8,06	11,29	12,10	12,77	13,75	15,03	16,52	19,23
Assümeetriakordaja	-1,48	-0,49	-0,35	-0,20	-0,09	-0,02	0,03	0,07
Ekstsess	7,72	4,18	3,56	3,23	3,02	2,90	2,84	2,90
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	2,79	8,35	9,86	10,82	11,87	13,00	14,13	15,88
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	5,58	10,78	11,50	12,47	13,78	15,35	17,11	20,17
95 protsentiil ($ \Delta h $)	17,44	22,97	24,45	25,41	26,96	29,10	31,62	36,24

Lisa 13. Uus-Meremaa uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa

L13 Tabel 1. Uus-Meremaa uurimisala ASTER kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	1,12	-2,43	-6,40	-9,30	-8,83	-5,01	-0,83	1,69
Mediaan	1,14	-2,22	-6,17	-9,01	-8,76	-4,94	-0,64	1,83
Standardhälve	12,15	12,06	11,59	10,94	10,79	11,25	11,37	11,40
Miinum	-88,07	-88,16	-87,77	-87,70	-85,17	-69,32	-68,64	-69,06
Maksimum	69,36	67,96	56,66	53,59	45,58	53,99	59,44	66,05
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	12,20	12,30	13,24	14,36	13,94	12,32	11,40	11,52
Assümeetriakordaja	0,03	-0,01	-0,06	-0,13	-0,06	-0,06	-0,13	-0,06
Ekstsess	3,35	3,37	3,27	3,18	3,07	3,04	3,12	3,20
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	11,87	11,76	11,45	10,92	10,86	11,30	11,41	11,33
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	11,92	11,98	13,10	14,64	14,35	12,29	11,34	11,46
95 protsentiil ($ \Delta h $)	24,03	24,42	26,14	27,73	26,71	24,11	22,26	22,50

L13 Tabel 2. Uus-Meremaa uurimisala MERIT kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	-2,58	-3,24	-3,49	-3,60	-3,04	-1,89	-1,10	-1,33
Mediaan	-2,17	-2,68	-2,93	-3,06	-2,65	-1,61	-0,87	-1,03
Standardhälve	14,44	14,20	13,81	13,83	14,35	13,87	13,46	13,79
Miinum	-88,91	-99,47	100,46	-95,49	-88,98	-83,29	-78,71	-86,89
Maksimum	74,57	72,24	60,07	61,53	75,07	75,69	56,80	74,48
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	14,67	14,57	14,24	14,29	14,67	14,00	13,51	13,85
Assümeetriakordaja	-0,17	-0,23	-0,24	-0,23	-0,15	-0,12	-0,13	-0,14
Ekstsess	3,16	3,25	3,30	3,26	3,10	3,11	3,06	3,13
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	14,26	13,95	13,57	13,66	14,43	13,81	13,41	13,64
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	14,42	14,18	13,81	13,91	14,56	13,90	13,45	13,71
95 protsentiil ($ \Delta h $)	28,91	28,81	28,18	28,24	28,72	27,41	26,44	27,22

L13 Tabel 3. Uus-Meremaa uurimisala SRTM kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	-9,30	-10,01	-10,45	-10,76	-10,04	-8,91	-8,33	-8,44
Mediaan	-8,82	-9,47	-10,04	-10,34	-9,54	-8,49	-7,90	-7,98
Standardhälve	10,12	10,31	9,93	9,52	9,65	9,25	9,09	9,37
Miinumum	-	-	-	-	-	-	-	-
Maksimum	124,69	126,29	125,89	-85,49	107,41	106,11	-86,23	-86,25
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	40,90	40,04	38,09	32,23	39,84	46,28	36,59	39,99
Assümeetriakordaja	13,74	14,37	14,42	14,37	13,93	12,85	12,33	12,61
Ekstsess	-0,36	-0,40	-0,35	-0,32	-0,37	-0,30	-0,31	-0,30
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	3,52	3,68	3,59	3,51	3,82	3,53	3,28	3,23
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	10,12	10,31	9,89	9,38	9,30	9,07	8,99	9,37
95 protsentiil ($ \Delta h $)	13,90	14,59	14,88	14,96	14,20	13,05	12,43	12,74
	26,57	27,61	27,22	26,84	26,49	24,69	23,90	24,46

L13 Tabel 4. Uus-Meremaa uurimisala TanDEM-X kõrgusmodeli vigade põhistatistikud nõlva ekspositsiooni klasside kaupa.

Statistik	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Keskmine	-8,00	-8,37	-9,10	-9,23	-8,96	-8,84	-8,30	-7,93
Mediaan	-7,79	-7,98	-8,59	-8,79	-8,74	-8,57	-8,01	-7,68
Standardhälve	13,75	13,49	13,17	13,33	13,78	13,19	12,76	13,07
Miinumum	-89,29	-98,98	-99,96	-95,00	-85,70	-83,17	-81,07	-88,84
Maksimum	64,79	58,52	59,21	58,52	52,37	55,10	49,39	59,80
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	15,90	15,87	16,01	16,21	16,44	15,88	15,22	15,29
Assümeetriakordaja	-0,07	-0,12	-0,17	-0,15	-0,04	-0,09	-0,11	-0,08
Ekstsess	3,03	3,12	3,15	3,13	2,95	3,02	2,97	3,03
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	13,76	13,44	13,18	13,28	13,95	13,24	12,89	13,06
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	15,99	15,85	16,01	16,22	16,72	16,02	15,33	15,34
95 protsentiil ($ \Delta h $)	31,06	31,13	31,40	31,76	31,94	31,02	29,77	29,94

Lisa 14. Uus-Meremaa uurimisala kõrgusmodelite vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa

L14 Tabel 1. Uus-Meremaa uurimisala ASTER kõrgusmodeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Suletud mets	Avatud mets	Põõsastik	Rohumaa	Haritav maa
Keskmine	-4,13	2,42	4,86	3,15	3,39
Mediaan	-4,18	2,45	4,77	3,25	3,66
Keskmine/mediaan	0,99	0,99	1,02	0,97	0,93
Standardhälve	12,04	8,16	6,97	6,86	4,06
Miinumum	-88,23	-56,00	-20,58	-36,55	-18,34
Maksimum	69,36	44,46	40,14	38,54	19,63
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	12,73	8,51	8,50	7,55	5,29
Assümeetriakordaja	0,04	-0,06	0,37	-0,16	-0,48
Ekstsess	3,21	4,32	4,17	3,91	3,87
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	11,91	6,82	5,94	6,00	3,92
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	12,70	7,80	8,02	7,28	5,68
95 protsentiil ($ \Delta h $)	24,93	17,39	16,83	15,13	9,70

L14 Tabel 2. Uus-Meremaa uurimisala MERIT kõrgusmodeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Suletud mets	Avatud mets	Põõsastik	Rohumaa	Haritav maa
Keskmine	-2,70	0,56	-0,06	0,14	-1,18
Mediaan	-2,46	-0,70	-1,01	-1,06	-1,07
Keskmine/mediaan	1,10	-0,81	0,06	-0,13	1,10
Standardhälve	13,83	10,07	8,14	8,39	2,71
Miinumum	-100,46	-70,74	-30,90	-48,34	-22,05
Maksimum	76,32	48,41	41,03	42,93	29,51
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	14,10	10,09	8,14	8,40	2,96
Assümeetriakordaja	-0,16	0,20	0,73	0,43	0,66
Ekstsess	3,23	4,17	4,79	4,29	14,54
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	13,60	7,95	6,18	6,03	1,72
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	13,81	8,87	6,79	7,25	2,27
95 protsentiil ($ \Delta h $)	27,79	21,32	17,90	18,06	5,99

L14 Tabel 3. Uus-Meremaa uurimisala SRTM kõrgusmodeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Suletud mets	Avatud mets	Põõsastik	Rohumaa	Haritav maa
Keskmine	-9,94	-2,59	-1,56	-1,29	-1,85
Mediaan	-9,52	-2,51	-2,02	-1,73	-1,77
Keskmine/mediaan	1,04	1,03	0,77	0,75	1,04
Standardhälve	9,48	6,24	4,98	5,21	2,08
Miinumum	-126,29	-63,35	-20,41	-30,28	-20,47
Maksimum	46,28	29,46	19,13	22,89	10,85
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	13,74	6,76	5,22	5,37	2,78
Assümeetriakordaja	-0,34	-0,20	0,34	0,20	-0,37
Ekstsess	3,64	4,64	3,96	3,93	5,65
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	9,33	5,14	4,26	4,11	1,73
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	14,16	6,28	4,89	4,98	2,70
95 protsentiil ($ \Delta h $)	26,00	13,64	10,77	10,96	5,41

L14 Tabel 4. Uus-Meremaa uurimisala TanDEM-X kõrgusmudeli vigade põhistatistikud maakatte klasside kaupa.

Statistik	Suletud mets	Avatud mets	Põõsastik	Rohumaa	Haritav maa
Keskmine	-8,86	-2,38	-0,82	-1,22	-0,99
Mediaan	-8,60	-1,91	-0,95	-1,12	-0,80
Keskmine/mediaan	1,03	1,25	0,86	1,09	1,24
Standardhälve	12,99	9,40	7,70	7,81	2,49
Miinumum	-99,96	-67,51	-33,00	-47,15	-31,02
Maksimum	64,79	47,26	37,57	41,53	21,88
Ruutjuur ruutkeskmisest veast (RMSE)	15,73	9,69	7,74	7,91	2,68
Assümeetriakordaja	-0,10	-0,14	0,13	-0,08	-1,54
Ekstsess	3,17	4,49	4,85	4,68	19,60
Normaliseeritud absoluutne mediaanhälve (NMAD)	12,71	6,88	5,54	5,28	1,04
68,3 protsentiil ($ \Delta h $)	15,74	8,45	6,22	6,75	1,56
95 protsentiil ($ \Delta h $)	30,80	20,63	17,39	17,05	5,42

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Sander Ahi,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Globaalsete kõrgusmodelite ASTER, MERIT, SRTM ja TanDEM-X vertikaalse täpsuse hindamine“, mille juhendajad on Evelyn Uemaa ja Merle Muru, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Sander Ahi
22.05.2020