

MAAILMANLAAJUISET KORKEUTTA JA PINNANMUO-
TOJA MALLINTAVAT AVOIMET AINEISTOT

Jaakkola Timo

Opinnäytetyö
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

2022

Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Timo Jaakkola	Vuosi	2022
Ohjaaja	Teuvo Heimonen		
Työn nimi	Maailmanlaajuiset korkeutta ja pinnanmuotoja mallintavat avoimet aineistot		
Sivumäärä	49		

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli muodostaa yleiskäsitys laajoista maapallon kattavista korkeusmalliaineistoista. Tutkimuskysymys jakaantui kolmeen laajempaan kokonaisuuteen. Ensimmäisessä osassa perehdyttiin korkeusmallien määritelmiin ja niihin liittyviin termeihin. Toisessa osassa keskityttiin globaalien korkeusmallien yhteydessä käytettyjen tuotantotekniikoiden erityispiirteisiin. Kolmannessa osassa muodostettiin yhteenveto tunnetuimmista ja yleisimmin käytetyistä globaaleista korkeusmalleista, niiden laadusta ja aineistojen tarkkuuksista.

Työ perustui kirjallisuuslähteisiin. Tähän työhön rajatuista korkeusmalleista on tehty vertaisarvioituja tieteellisiä tutkimuksia runsaasti, joten työn yhteydessä ei tehty erikseen mittaustutkimusta.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi käsitys globaalien korkeusmallien laatuun vaikuttavista tekijöistä, tuotantoprosesseista ja korkeusmalliaineistojen lataus- ja katselupalveluista. Ehkä tärkein opinnäytetyön kautta saavutettu tulos liittyi laajojen alueiden korkeusmallien tunnistettavissa oleviin kehityskohteisiin ja todennäköisiin tuleviin trendeihin.

Avainsanat

Kaukokartoitus, satelliittikuvaus, geoinformatiikka, korkeudenmittaus

Degree Programme of
Land Surveying
Bachelor of Engineering

Author	Timo Jaakkola	Year	2022
Supervisor	Teuvo Heimonen		
Subject of thesis	Freely available global surface and elevation data models		
Number of pages	49		

The aim of this thesis was to increase awareness of the freely available global digital elevation models.

This thesis study was based on relevant literature references. There is a number of academic studies focused on global freely available DEMs accuracies, which is why the empirical measurement research was not conducted in this study. There were three main parts in this study. In the first part definitions and terminology around digital elevation models were defined. The second part concentrated on production techniques, theory, and the specifics of the global DEMs. In the third part the specifics of the most common and well known DEMs, their qualities and accuracies were summarized.

The result of this thesis is increased awareness of the variables that effect DEMs qualities and what elements you should concentrate on when using these global datasets. The second result was knowledge of various remote sensing data download and browsing services and application programming interfaces. The most important result was awareness of the technologies and trends related to the future global DEMs.

Key words

Remote sensing, satellite imagery, geoinformatics, altitude measurement

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	KORKEUSMALLIT JA KORKEUDEN MÄÄRITYS.....	9
2.1	Korkeuden määritelmä.....	9
2.2	Korkeusmallien käsite	10
2.3	Korkeusmalleihin liittyvää termistöä.....	11
2.3.1	Korkeusmalli.....	11
2.3.2	Maastomalli	12
2.3.3	Pintamalli.....	13
2.3.4	Muut korkeus- tai pintamallit.....	13
3	AINEISTOJEN LAATUTEKIJÄT	15
3.1	Korkeusmallien laadunhallintaan vaikuttavat muuttujat	15
3.2	Maanpinnan korkeusmalli vai pintamalli.....	15
3.3	Pikselikoko.....	16
3.4	Ajallinen resoluutio.....	17
3.5	Tietomalli	18
4	TUOTANTOTEKNIIKAN ERITYISPIIRTEET	19
4.1	Tuotantotekniikka.....	19
4.1.1	SAR.....	20
4.1.2	Elektro-optinen	22
4.2	Ympäristötekijöiden vaikutus korkeuden mittaamisen laatuun.....	23
4.2.1	Olosuhteet.....	24
4.2.2	Topografia	25
4.2.3	Maanpeite	26
5	AVOIMET KORKEUSMALLIT.....	28
5.1	Arvioitavien korkeusmallien rajaukset.....	28
5.1.1	SRTM.....	28
5.1.2	NASDADEM	30
5.1.3	ASTER GDEM.....	31
5.1.4	ALOS AW3D30	32
5.1.5	Copernicus DEM	34
5.1.6	MERIT DEM	36

5.1.7 ArcticDEM	36
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	39
7 POHDINTA	40
LÄHTEET	42

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites
DEM	Digital Elevation Model
DEMIX	Digital Elevation Model Intercomparison eXperiment
DGED	Defence Gridded Elevation Data
DSM	Digital Surface Model
DTED	Digital Terrain Elevation Data
DTM	Digital Terrain Model
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EGM96	Earth Gravitational Model 1996
EGM2008	Earth Gravitational Model 2008
ESA	European Space Agency
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGA	National Geospatial Intelligence Agency
NSF	National Science Foundation
PGC	Polar Geospatial Center
PRISM	Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping
RPC	Rational Polynomial Coefficients
SAR	Synthetic Aperture Radar
SETSM	Surface Extraction with TIN-based Search-space Minimization
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USGS	U.S. Geological Survey
WGS84	World Geodetic System 1984

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä laajoihin avoimiin maailmanlaajuisiin tai lähes maailmanlaajuisiin tarkkoihin korkeusmalliaineistoihin, niiden määritelmiin, tuotantotekniikkaan ja laatutekijöihin. Opinnäytetyö perustuu kirjallisuuslähteisiin.

Opinnäytetyössä käsiteltyjen korkeusmallien pikselikoko ja resoluutio rajataan enintään kolmeen kaarisekuntiin. Tämä pikselikoko vastaa päivántasaajalla noin yhdeksääkymmentä metriä.

Työn ulkopuolelle rajataan kansalliset, kaupalliset tai yksittäisten manneralueiden korkeusmallit. Opinnäytetyössä käsitellyt korkeusmallit ovat joko kokonaan avoimen lisenssin alaisia paikkatietoaineistoja tai rajoitettuja tieteelliseen tutkimustyöhön. Opinnäytetyön yhteydessä termillä korkeusmalli tullaan tarkoittamaan yleistä korkeutta esittävää rasteriaineistoa edellä kuvatuilla rajauksilla, ellei asiayhteydessä mainita toisin.

Vertausarvioituja tieteellisiä tutkimuksia maapallon kattavista korkeusmalliaineistoista on tehty runsaasti. Esimerkiksi viimeisen kolmen vuosikymmenen aikana aiheesta on julkaistu noin 200 tieteellistä artikkelia. (Mesa-Mingorance & Ariza-López 2020, 1.)

Monissa ympäristöön liittyvissä kysymyksissä korkeusmalli on edelleen keskeinen aineistolähde. Viime vuosina uusien ja entistä laadukkaampien korkeusmalliaineistojen tarve on korostunut ilmastotavoitteiden ja ympäristön muutoksen hallinnan yhteydessä (Schumann & Bates 2018; Uemaa, Ahi, Montibeller, Muru & Kmoch 2020, 1). Lisäksi uusia tai uudelleen prosessoituja laadukkaita maailmanlaajuisia korkeusmalleja on avattu kenen tahansa hyödynnettäviksi (ESA 2020).

Korkeusmalleja hyödynnetään lukuisissa sovelluksissa. Korkeustietoihin perustuvia sovellusalueita ovat esimerkiksi geomorfologia, merentutkimus, maa- ja metsätalouden sovellukset, hydrologia, yhdyskuntasuunnittelu, luonnon katastrofien torjunta, maanpuolustus, urheiluteknologia, turismi, kaukokartoitus ja pelimaailman virtuaalitodellisuus (Guth ym. 2021, 1–2). Lisäksi korkeusmallien

kautta voidaan esittää yleistä korkeustietoa ja visualisoida kartta- ja paikkatietoesityksiä (MML 2022).

Schumann & Bates (2020) korostavat artikkelissaan kontekstisidonnaista harkintaa riittävän laadukkaan korkeusmalliaineiston valintaan. Esimerkiksi kaupunkitulvien torjunnassa tarvitaan mallinnettua tietoa yhdyskuntarakenteen infrastruktuurista, mutta toisaalta mallinnuksen yhteydessä tukeutuminen pelkkään pintamalliin voi johtaa vääriin tulkintoihin.

Vallitsevista näkemyksistä johtuen tiedeyhteisö on todennut tarpeen määritellä tarkemmin korkeusmalleissa käytettävää terminologiaa ja laadunarviointimenetelmiä (Guth ym. 2021, 2). Tämän tunnistetun tarpeen myötä CEOS-toimikunnan alaisuuteen on perustettu DEMIX-työryhmä ohjaamaan ja harmonisoimaan maailmanlaajuisiin korkeusmalleihin liittyvää terminologiaa ja ohjaamaan aineistojen välistä vertailutyötä. Työryhmän tarkoituksena on tuottaa ohjeita ja lisätä ymmärrystä korkeusmalleihin liittyvistä asiakokonaisuuksista. (Strobl ym. 2021.)

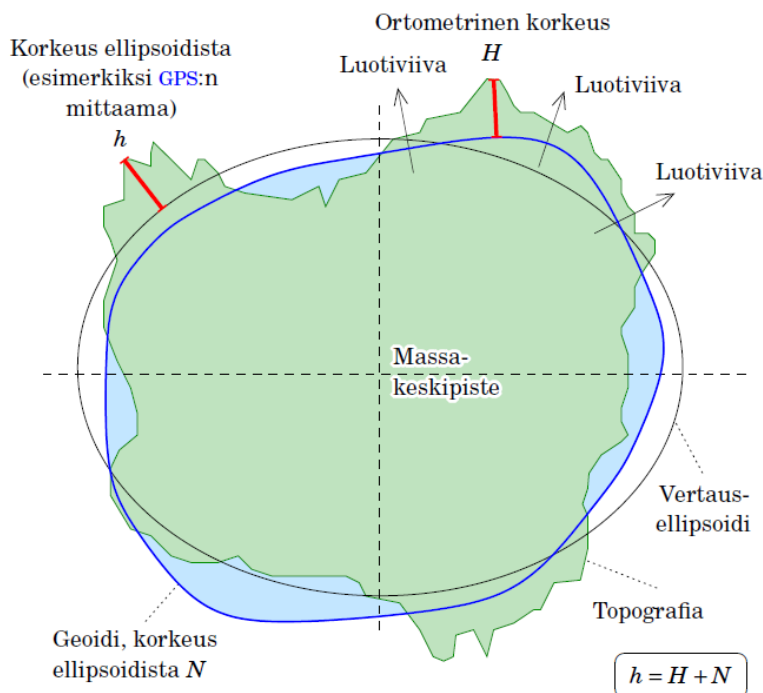
DEMIX-työryhmällä on kolme alatyöryhmää. Alatyöryhmien tarkoituksena on keskittyä 1) korkeusmalleihin liittyvään terminologiaan ja analytiikkaan 2) käytettävissä oleviin sovelluksiin ja algoritmeihin, sekä 3) edellä mainittujen testaamiseen ja validointiin. Kokonaisuutena DEMIX-työryhmän tavoitteena on muodostaa kriteeristö korkeusaineistojen laadun arviointia varten. (Strobl ym. 2021.)

2 KORKEUSMALLIT JA KORKEUDEN MÄÄRITYS

2.1 Korkeuden määritelmä

Ortometrississä korkeuksissa kohteen etäisyys määritetään suhteessa geoidiin (Kuva 1). Geoidi on maan fysikaalinen vertaustaso, jolla on yhtenäinen painovoimakentän tasapotentialipinta, eli geopotentiali. Toisin sanoen painovoima on aina vakio tietyn geoidimallin tasolla. Yleisemmin mittauksia palvelevien geoidien pinnat vastaavat likimain keskimerenpinnan tasoa. Manneralueilla tämä taso voidaan ymmärtää keskimerenpinnan jatkeena. (Laurila 2012; Vermeer 2019.)

Toinen tapa korkeuden määrittämiselle on mitata kohteen etäisyys suhteessa pyörähdysellipsoidiin (Kuva 1). Ellipsoidinen korkeus mitataan maan matemaattisesta pinnasta. Ellipsoidin ja geoidin välillä ei ole matemaattista yhteyttä, joten ortometrisen ja ellipsoidisen korkeuden väliset muunnokset perustuvat mittauksiin. Geoidin ja pyörähdysellipsoidin välinen ero on suurimmillaan noin 150 metriä. Ellipsoidisia korkeuksia käytetään etenkin satelliittipaikannusjärjestelmissä. (Laurila 2012, 165.)



Kuva 1. Korkeuksien peruskäsitteet (Vermeer 2019, 91)

Suomessa on käytössä N2000-korkeusjärjestelmä, jonka geoidimalli on FIN2005. N2000-korkeusjärjestelmän merenpinnan nollataso on Amsterdamin NAP-korkeusdatumin mukainen. Suomessa N2000 esittää normaalikorkeutta (Vermeer 2019, 91). Normaalikorkeus määritellään matemaattisen mallikentän, eli normaalipainovoiman keskiarvon mukaan. Tällä vältytään laskennassa puhtaasti ortometrisiin korkeuksiin liittyvistä kompleksisista fyysisen painovoimakentän parametreilta (Vermeer 2019, 436–437).

Paikalliset korkeusjärjestelmät perustuvat läheisesti globaaleihin järjestelmiin (Laurila 2012, 174). EGM96 ja EGM2008 ovat maailmanlaajuisia NGA:n julkaisemia ja ylläpitämiä globaaleja painovoimamalleja (NGA 2022). EGM96-malli esitetään 360 asteen normalisoitujen pallofunktioiden kautta (Bilker-Koivula & Ollikainen 2009, 5).

EGM2008 on EGM96-painovoimamallista päivitetty versio, joka esitetään 2159 normalisoitujen pallofunktioiden kautta (NGA 2022). EGM96 ja EGM2008 välinen keskimääräinen korkeusero on 50 cm. Suurimmillaan geoidimallien välinen ero on merten syvänteissä, joissa se voi olla noin 10 metriä (USNA 2021). EGM2008-geoidimallista on tuotettu 2,5 kaariminuutin geoidimalli ja vastaava jako EGM96-mallissa on 15 kaariminuuttia (NGA 2022).

2.2 Korkeusmallien käsite

Hawker, Bates, Neal & Rougier (2018) ovat todenneet, että perinteisesti korkeusmalleja on tuotettu mittaamalla tunnettuja pisteitä tai digitoimalla tiedot topografisista kartoista. Ensimmäiset korkeusmallit olivatkin mitatuista pisteistä tilastollisesti johdettuja aineistoja. Nykyisin korkeusmallit tuotetaan pääasiassa kolmella eri tekniikalla: fotogrammetrialla, laserkeilaamalla tai tutkainterferometrian menetelmillä.

Nykytermein korkeusmalli määritellään maanpinnan digitaaliseksi numeeriseksi esitykseksi, johon liittyvät tuotetut korkeuspisteet ja pisteiden väliselle pinnalle laskettavat korkeusarvot. Mallinnettu topografia on aina jonkinlainen yleistyys eikä maan fyysistä pintaa pystytä esittämään täsmällisesti matemaattisesti laskien. Siten korkeusmalli voidaan käsitteellisesti jäsentää käytettävän tietomallin tai korkeustietojen laskennassa käytettävien algoritmien kautta. (Guth ym. 2021, 1–3.)

Tyypillinen korkeusmallin esitystapa on rasterihila. Siinä yksittäinen pikseli esittää korkeutta suhteessa korkeusdatumiin (Hawker ym. 2018). Korkeusmalleja voidaan esittää myös kolmioverkkomuodossa (MML 2022), mutta esimerkiksi Guth (2021) kumppaneineen määrittelevät kolmioverkot, pistepilvet ja korkeuskäyrät määritelmän ulkopuolelle niiden tallennusmuodon vuoksi.

2.3 Korkeusmalleihin liittyvää termistöä

Korkeusaineistoihin liittyvään terminologiaan liittyy osittaista epäjohdonmukaisuutta. Aineiston hyödyntäjien pitäisikin olla tietoisia mitä pintaa mallinnetulla korkeustiedolla esitetään. Lisäksi aineiston tuottajien vastuulle kuului kuvata riittävän yksiselitteisesti, mihin pintaan tuotettu aineisto on rajattu.

Strobl (2021, 396) kumppaneineen määrittelevät tutkimuksessaan joukon pintoja, jotka voidaan yleistää käsitteellisesti korkeusmallin alle. Näistä mainittakoon jään ja lumen pinta, paljaan maan pinta, merenpinta, merenpohjan pinta, rakennetun ympäristön pinta tai kasvillisuuden pinta.

Suoraa suomenkielistä vastinetta kaikille korkeuspintaa käsitteleville termeille on hankala määritellä. Esimerkiksi kansallisissa korkeusaineistoissa käytettävä terminologia ei ole kaikissa tapauksissa täysin yhtenevä suhteessa kansainväliseen termistöön.

2.3.1 Korkeusmalli

Korkeusmallin kansainvälisellä termillä DEM viitataan yleistä korkeutta kuvaavaan digitaaliseen aineistoon tietyssä tunnetussa koordinaattijärjestelmässä. Varsinaista rajausta käytettävän tietomallin tai tiedon tallennusmuodon suhteen ei tehdä, mutta yleisenä tallennusmuotona on rasteri (MML 2022). Tallennusmuodon rajauksessa on kuitenkin jonkin verran tulkintaeroja (Guth ym. 2021).

Kansainvälisten tutkimusten perusteella termiä DEM käytetään laajasti yläkäsitteenä kuvaamaan tietyn kontekstisidonnaisen pinnan korkeutta. Korkeus voidaan määritellä maanpinnan tasoon, korkeimman pinnan tasoon tai esimerkiksi jäätikön tasoon. Tutkimuksissa korostetaan, että korkeusmalli on määriteltävä käytötapauksesta riippuen haluttuun pintaan rajaten. (Guth ym. 2021.)

Esimerkki kontekstisidonnaisuudesta on USGS:n julkaisema määrittelydokumentti, missä DEM tunnustetaan paljaan maan tasoon (Arundel, Archuleta, Phillips, Roche & Constance 2015). Määritelmä on johdonmukainen, koska esimerkiksi geologisessa kontekstissa tutkimuskohteena ovat maaperään ja maankuoreen liittyviä ilmiöt, eivätkä niinkään kasvillisuuden tai rakennetun ympäristön pinnat.

2.3.2 Maastomalli

Maastomalli voidaan karkeasti suomentaa sanoista Digital Terrain Model (DTM). Kansainvälisten tutkimusten perusteella se tarkoittaa useimmissa tapauksissa paljaan maan korkeusmallia (Kuva 2). Paljaan maan korkeusmallista on poistettu kasvillisuus ja ihmisen rakentamat elementit. Tarvittaessa jäätiköiden, vesistöjen tai vastaavien elementtien tunnistamiseen on käytettävä maskia tai määriteltäviä ne tapauskohtaisesti mukaan. (Guth ym. 2021.)

Yllä olevat määritelmät poikkeavat hieman esimerkiksi Maanmittauslaitoksen käyttämästä termistöstä, jossa maastomallissa huomioidaan elementtejä maapeitteestä (MML 2022). Lisäksi maastomalli yhdistetään infrarakentamisen yhteydessä tietomallinnuksen lähtöaineistoksi, joka koostuu taiteviivoista ja pisteistä. Se kuvaa maaston pinnan lisäksi maaston rakenteita (YIV 2015; Liikennevirasto 2017).

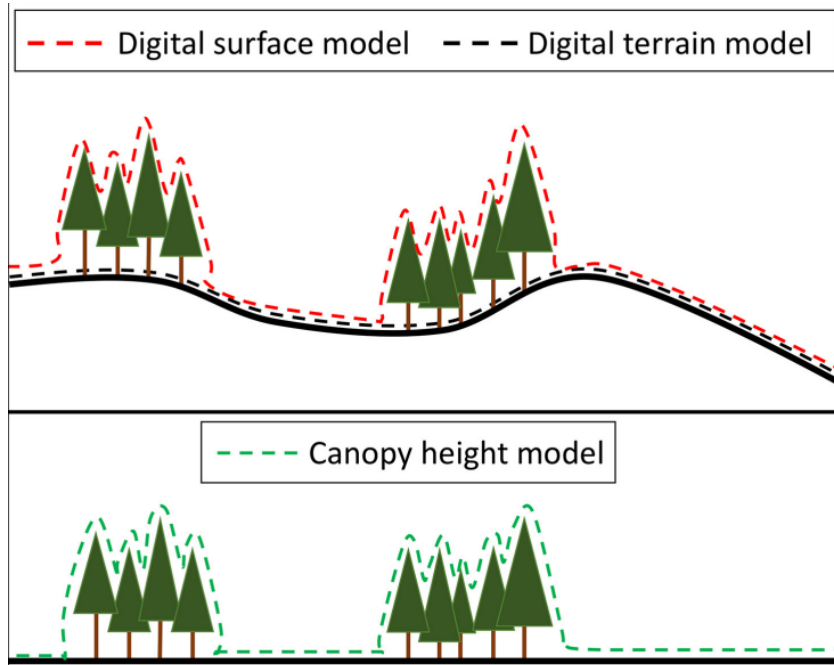
Suomen kansallinen korkeusmalliaineisto KM2 on Maanmittauslaitoksen määritelmän mukaan maanpinnan korkeutta kuvaava korkeusmalli, johon eivät kuulu maanpinnalla olevat irtonaiset geologiset kohteet, ihmisen luomat rakenteet tai muut ei pysyvät pinnanmuodot (KMTK laatumalli 2016).

Voidaankin päätellä, että suomennettuna maastomalli ei vastaa täysin kansainvälistä merkitystä termille DTM. Sen sijaan tulisikin käyttää esimerkiksi termiä maanpintamalli tai paljaan maan korkeusmalli.

2.3.3 Pintamalli

Pintamallin kansainvälisellä termillä DSM tarkoitetaan pinnan korkeinta kohtaa, joka kohtaa ilmakehän (Kuva 2). Pintamallissa on mukana kasvillisuus, jäätiköt ja

ihmisen rakentamat elementit. Pintamalli esittää maanpintaa ainoastaan avoimilla alueilla. Maanmittauslaitoksen määrittelemä onkin yhtenevä kansainvälisten tutkimusten kanssa. (Guth ym. 2021; Uemoto 2021, 34–35; MML 2022.)



Kuva 2. Digitaalisiin korkeusmalleihin liittyviä määritelmiä (Meddens ym. 2018, 175)

2.3.4 Muut korkeus- tai pintamallit

Luvussa 2.3 jo esiteltyjen yleisesti tunnettujen termien lisäksi voidaan tunnistaa joukko erilaisille korkeuspintaa esittäville malleille tai hybridikorkeusmalleille (Taulukko 1).

Taulukko 1. Erilaisia korkeuspintaa esittäviä malleja (Guth ym. 2021, 7–8)

Termi	Selite
TBDEM <i>Topographic-Bathymetric DEM</i>	Korkeusmalli, jossa yhdistetään maa-alueen pinta ja merenpohjan pinta
BDEM <i>Bathymetric DEM</i>	Merenpohjan syvyysmalli
PDEM <i>Planetary DEM</i>	Planeetan tai asteroidin korkeusmalli
SSG <i>Sensor Surface Grid</i>	Sensoripintamalli, jossa korkeustiedot kerätään kaikuluotaamalla, optisesti mittaamalla, laserpulssilla tai tutkasignaaleilla
NVS <i>Non Vegetated Surface</i>	Pintamalli, josta on poistettu kasvillisuus
NUS <i>Non Urbanized Surface</i>	Pintamalli, josta on poistettu rakennettu ympäristö
nDSM <i>Normalized DSM</i>	Paljaan maan ja pintamallin erotus. Ei ole varsinainen korkeusmalli, mutta pinnalla voidaan esittää kasvillisuuden ja rakennusten korkeuksia
CHM <i>Canopy Height model</i>	Pinnalla esitetään vain kasvillisuuden korkeus
DHM <i>Digital Height Model</i>	Malli esittää kohteiden korkeuksia

3 AINEISTOJEN LAATUTEKIJÄT

3.1 Korkeusmallien laadunhallintaan vaikuttavat muuttujat

Avoimia laajojen alueiden korkeusmallien laatua ja tarkkuutta on tutkittu hyvin paljon ja niistä on julkaistu lukuisia tutkimuksia. Laadun arviontiin ei kuitenkaan ole ollut tähän mennessä kattavaa kriteeristöä (Strobl ym. 2021).

Yhteistä tehdyille tutkimuksille on se, ettei korkeusmallien laatu muodostu pelkästä korkeustarkkuudesta, vaan laatutekijät muodostuvat laajemmin tutkimuskontekstin ympärille. (Guth ym. 2021.)

Korkeusmallien laatuun vaikuttavat useat eri muuttujat. Tuotantoprosessissa määritetään aineiston horisontaalinen ja vertikaalinen koordinaatisto, poistetaan mahdollisia sensorivirheitä ja lasketaan matemaattisesti havaintoarvoista pikselin kokoa vastaava korkeusarvo. (Guth ym. 2021.)

Korkeusmallien tuotantoon liittyviä mahdollisia virhelähteitä voidaan tunnistaa useita. Ne liittyvät sensorista johtuvaan kohinaan ja kaistavirheisiin (Farr ym. 2007; Tarekegn & Sayama 2013), korkeuspinnan interpolointivirheisiin (Wise 2007; Szabó, Singh & Szabó 2015) tai erilaisiin maankäyttöön ja sensorin havaitseman spektriin liittyviin tekijöihin (Farr ym. 2007; LaLonde, Shortridge & Messina 2010). Lisäksi on huomioitava sensorin kiertorataan tai kalibrointiin liittyvät virheet (Wise 2011), unohtamatta inhimillisiä virhelähteitä (Fisher & Tate, 2006; Wechsler 2007).

3.2 Maanpinnan korkeusmalli vai pintamalli

Lähtökohtaisesti kaikki globaalit korkeusmallit ovat pintamalleja niiden tuotantotekniikasta johtuen. Korkeusmallit eivät kuitenkaan kaikissa tapauksissa kuvaa yksiselitteisesti pinnan korkeinta kohtaa alueesta riippuen. Tutkimuksissa on todettu, että aineistojen välillä on suuria eroja, miten hyvin ne vastaavat todellisiin pinnan muotoihin. Esimerkiksi synteettisen apertuurin tutkaan eli SAR-tekniikkaan perustuvien korkeusmallien kohdalla tutkasignaali heijastuu pääasiassa kasvillisuuden latvuksesta, mutta osa signaalista läpäisee sen. Kasvillisuuden

läpäisevyys riippuu käytettävästä aallonpituudesta, olosuhteista ja kasvillisuuden lehvästöstä. (Uuema ym. 2020; Garrote 2022.)

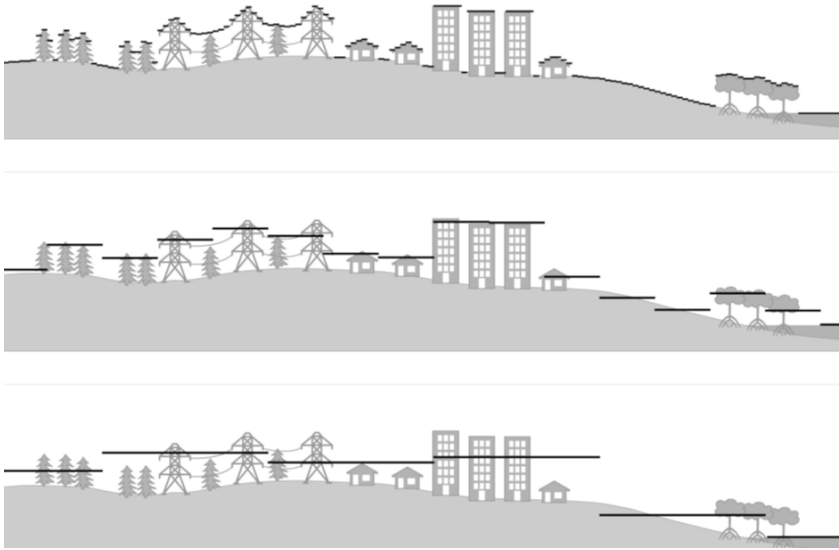
Tulvamallinnuksessa on hyvin merkityksellistä tunnistaa korkeutta esittävä pinta. Tulvien ennaltaehkäisyn kannalta kasvillisuuden ja ihmisen rakentaman infrastruktuurin huomioimista pidetään oleellisena, mutta toisaalta vedenuomien mallintamisen kannalta tarvitaan tietoa paljaan maan muodoista. Globaalien korkeusmallien käytettävyys on siten ollut rajallista eri pintojen tunnistamisen rajoituneisuudesta johtuen. (Schumann & Bates 2018; Schumann & Bates 2020.)

3.3 Pikselikoko

Pikselikoon vaikutus korkeusvaihteluiden erotuskykyyn havainnollistetaan kuvassa 3. Yhdeksänkymmenen metrin pikselin sisälle mahtuu teoriassa yhdeksänkertainen määrä korkeusarvojen vaihtelua verrattuna kolmenkymmenen metrin alueelle. Todellinen maastonkorkeus voi muuttua jyrkästi 90 m kokoisella alueella eivätkä kaikki pinnan muodot erotu vastaavalta alueella. Käytännössä laskennalliset korkeusarvot voivat olla liian matalia huippukorkeuksien kohdalla ja liian korkeita alaspäin aukeavilla alueilla. (Uuema ym. 2020, 17.)

Kuvassa 3 havainnollistetaan korkean resoluution pintamallin uudelleen laskennan vaikutus kohti suurempaa pikselikokoa. Korkeat ja matalat pikseliarvot pehmenevät siirryttäessä suuremmille pikselikoon arvoille. Esimerkiksi mäkien taitekohdissa pikselin korkeusarvo voi olla todellisen pinnan alapuolella.

Kaikissa tapauksissa tarkka erotuskyky ei kuitenkaan takaa parasta mahdollista laatua. Suurella resoluutiolla on mahdollista päästä riittävän tarkkaan lopputulokseen, jos aineisto on muuten virheetöntä. (González-Moradas & Viveen 2020; Uuema ym. 2020; Garrote 2022.)



Kuva 3. Korkeustiedon uudelleen laskennan vaikutus suhteessa pinnan todelliseen korkeuteen (Guth ym. 2021, 14)

Musta poikkiviiva kuvaa korkeusmallin laskettua korkeusarvoa kolmella eri pikselikokoalla. Ylin kuva esittää 2 m pikselikokoa, keskimäinen kuva pikseliarvoa 30 m ja alimmainen 90 m pikseliä (Kuva 3).

3.4 Ajallinen resoluutio

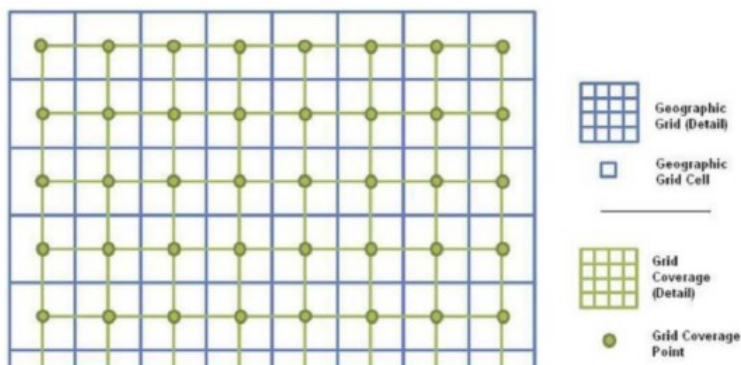
Korkeusmallin ajallisella tarkkuudella tarkoitetaan sitä, kuinka vanhaa kerätty korkeushavaintoaineisto on, milloin se on tuotettu korkeusmalliksi ja kuinka usein aineistoa on päivitetty tuotantohetken jälkeen. (Hawker ym. 2018; Schumann & Bates 2018; Guth ym. 2021.)

Esimerkiksi erittäin suosittu Shuttle Radar Topography Mission SRTM-korkeusmalli on tuotettu vuonna 2000 vain 11 päivän aikana (Farr ym. 2007). Maapallon topografia on jatkuvassa muutoksessa, joten todennäköisesti nykyhetken maan pinnanmuodot ovat erinäköiset suhteessa aineiston tuotantohetkeen (Sampson, Smith, Bates, Neal & Trigg 2016; Scumann & Bates 2018). Scumann & Bates (2018) jatkavat, että käytettävä aineisto pitäisikin sovittaa aina kuhunkin ajanhetkeen.

3.5 Tietomalli

Käytettävän rasteritietomallin määrittely- ja laskentavaiheessa tehdään lopullisen tuotteen kannalta merkittäviä valintoja. Korkeusmalli on aina yleistys, jossa lasketut arvot tallennetaan tietomallista riippuen pikselin keskikohtaan tai sen nurkkapisteeseen. Lisäksi globaalit korkeusmallit tallennetaan poikkeuksetta maantieteelliseen koordinaatistoon, mikä on huomioitava siirryttäessä pallopinnalta tasopinnalle. (Guth ym. 2021.)

RasterPixellsPoint-tietomallissa tiedon tallennus perustuu pisteisiin ja siitä johdettuun gridiin. Tallennettujen korkeuspisteiden välille muodostuu hila, joka on jaollinen maantieteellisen pinnan kanssa (Kuva 4). Kyseinen tiedon tallennustapa mukaa DTED-standardia. (Copernicus DEM 2020; Guth ym. 2021, 9–11.)



Kuva 4. RasterPixellPoint-tietomallin periaate (Copernicus DEM 2020, 13)

Toinen tyypillinen tallennustapa on RasterPixellsArea-tietomalli. Kyseisessä tietomallissa tallennus tapahtuu aluemaisena kohteena. Tässä tietomallissa tallennettu tieto ei ole jaollinen maantieteellisen gridin kanssa. Tallennustapa altistaa kuitenkin pikseliarvojen siirtymälle suhteessa solujakoon (Guth ym. 2021, 9–11.)

Korkeusmallien tuotteistamisen yhteyteen sisältyy mittausvaiheen sensorivirheiden korjaamista ja havaintoarvojen tasoittamista. Mittaustieto tallennetaan lopulliseen rasterisoluun interpolointimenetelmiä hyödyntäen. Näissä menetelmissä käytetyt prosessit altistavat laskentavirheille ja korostavat käytettävien algoritmien laadun merkitystä. (Guth ym. 2021.)

4 TUOTANTOTEKNIIKAN ERITYISPIIRTEET

4.1 Tuotantotekniikka

Maailmanlaajuiset korkeusmallit tuotetaan aktiivisesti tutkasignaaliin ja sen paluueijastukseen perustuen tai passiivisesti optiseen kaukokartoitusmenetelmiin pohjautuen (Hawker ym. 2018; Uuemaa ym. 2020, 5; Garrote 2022, 6). Paikalliset korkeusmallit perustuvat pääasiassa laserkeilaukseen (MML 2022). Lisäksi laseriin perustuvaa korkeudenmittausta tuotetaan satelliiteista, mutta sitä voidaan käyttää lähinnä muiden korkeustuotteiden kalibroinnin tukena (Guth & Geoffroy 2021, 2258). Osa tässä työssä käsitellyistä korkeusmalleista ovat selvästi laskennallisia fuusiokorkeusmalleja, eivätkä sisällä primääriä korkeuden mittausta (Yamazaki ym. 2017; Hawker ym. 2018).

Gloaalissa korkeuden mittauksessa hyödynnetään sähkömagneettista säteilyä. Sähkömagneettinen säteily etenee valon nopeudella ja se muodostuu sähkö- ja magneettikentässä tapahtuvasta värähtelystä (CCRS 2019; Kaava 1).

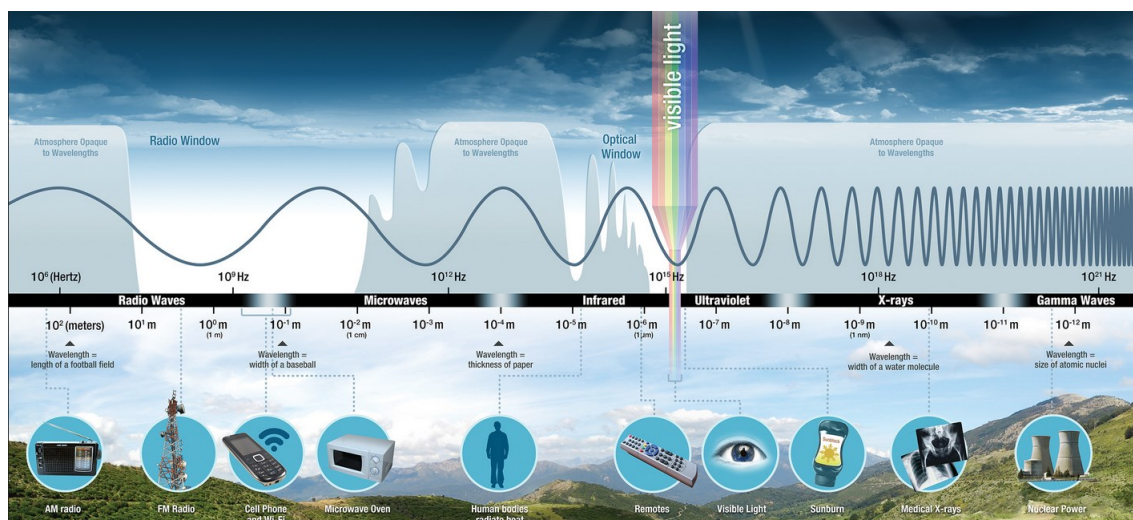
$$c = \lambda \nu \tag{1}$$

missä

λ on aallonpituus (m)
 ν on taajuus (jakso / sekunti, Hz)
 c on valonnopeus (3×10^8 m/s)

Optisissa kaukokartoitusmenetelmissä aallonpituudet vaihtelevat $0,4 \mu\text{m}$ – $0,7 \mu\text{m}$ välillä (Kuva 5). Optisen alueen korkeusmalliaineistoja voidaan tuottaa myös lähi-infrapuna-alueella (Satellite Imaging Corporation 2022).

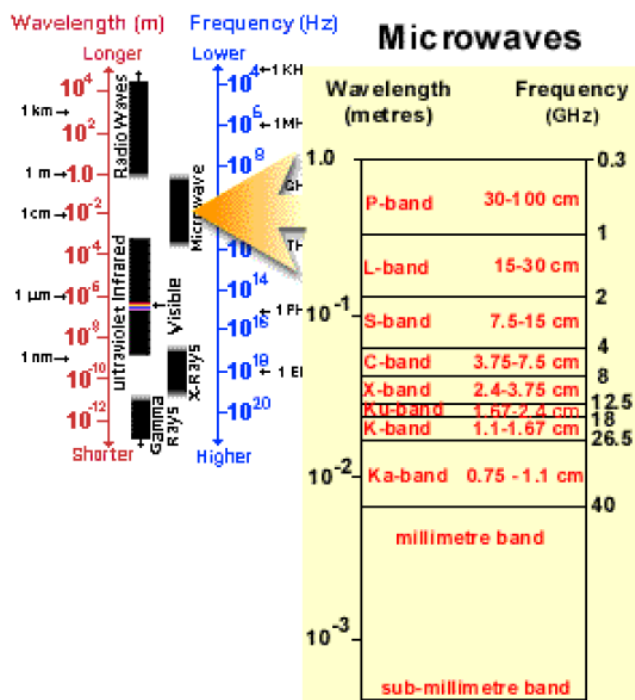
Tutkatekniikkaan perustuvat korkeusmallit tuotetaan aktiivisesti mikroaaltoihin ja sen paluukaiun mittaamisen perusteella. Mikroaaltojen aallonpituus on 1 cm – 100 cm (Kuva 5).



Kuva 5. Sähkömagneettinen spektri (NASA 2022)

4.1.1 SAR

Maailmanlaajuisten korkeusmallien tuotannossa hyödynnetään SAR-instrumenttejä. Satelliittien tuottama aallonpituus on pääasiassa 2,4 cm – 7,5 cm eli ne toimivat X- ja C-kaistassa (Hawker ym. 2018; Kuva 6.). Mikroaallot mahdollistavat kuvaamisen myös yöllä ja pilvisellä säällä (CCRS 2019).



Kuva 6. Mikroaaltojen luokittelu eri kaistakokonaisuuksiin (CCRS 2019)

SAR-menetelmällä tuotetut korkeusmallit perustuvat tutkainterferometriaan. Menetelmä perustuu tutkasignaalien vaihe-eroon, kun kohdetta mitataan kahdesta eri sijainnista. (InSAR Principles 2007; Kuva 7; Treuhaft 2022.)

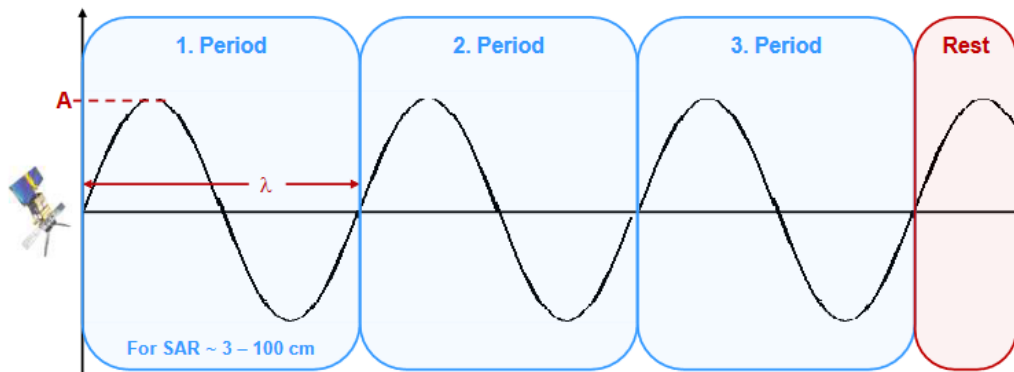
Vaihe on sähkömagneettisen aallon jakso, jota kuvataan kierrosten kautta. Vaiheiden määrää ja siihen liittyvää murto-osaa voidaan mitata. Vaihe voidaan siten määrittellä Treuhaftia (2022) mukaillen kaavalla 2.

$$\text{vaihe} = \frac{d}{\lambda} \quad (2)$$

missä

d on lähettimen etäisyys

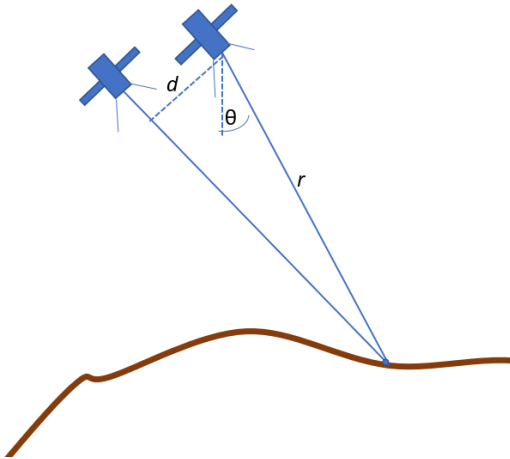
λ on aallonpituus



Kuva 7. Sähkömagneettisen aallon vaihe (Meyer 2021)

Vaihe-eroon perustuvassa mittauksessa sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus ja taajuus ovat yhtenäiset. Kun signaalia tuottava sensori etenee, siirtyy myös aaltoliikkeen aloituspiste. Sijainnit voivat olla peräisin kahdesta eri satelliitista tai ne voivat perustua vain yhteen satelliittiin. Esimerkkejä kahden sensorin käytöstä ovat SRTM ja TanDEM-X. (InSAR Principles 2007; Meyer 2021.)

Meyeriä (2021) mukaillen etäisyydet saadaan laskettua tutkasignaaliin perusteella, koska signaalin aika ja nopeus tunnetaan. Kolmas muuttuja on suunta. Korkeus on siten kahden pisteen siirtymästä muodostunut sähkömagneettisen aaltoliikkeen ero (Kaava 3).



$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{d}{r \sin(\theta)} \quad (3)$$

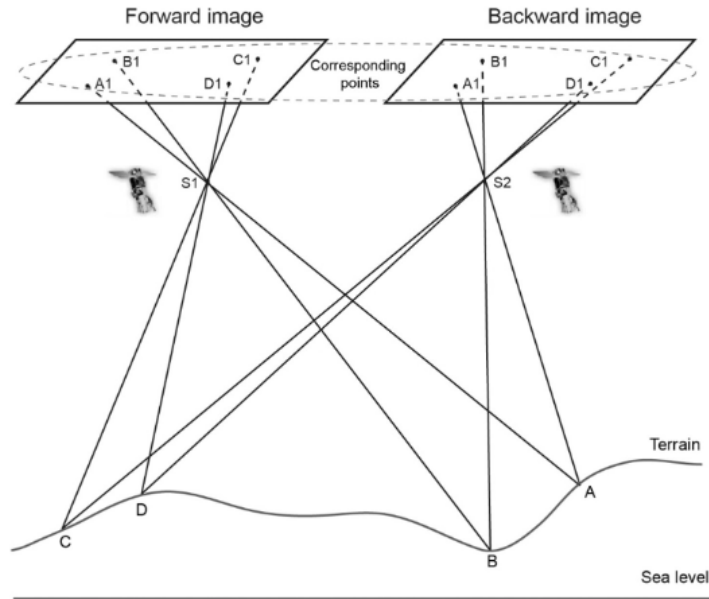
missä

Φ	on	korkeus InSAR menetelmällä
d	on	mittauskohtien erotus kohtisuoraan sensorista
λ	on	aallonpituus
θ	on	sensorin kulma
r	on	kuvaavan sensorin ja maanpinna etäisyys

4.1.2 Elektro-optinen

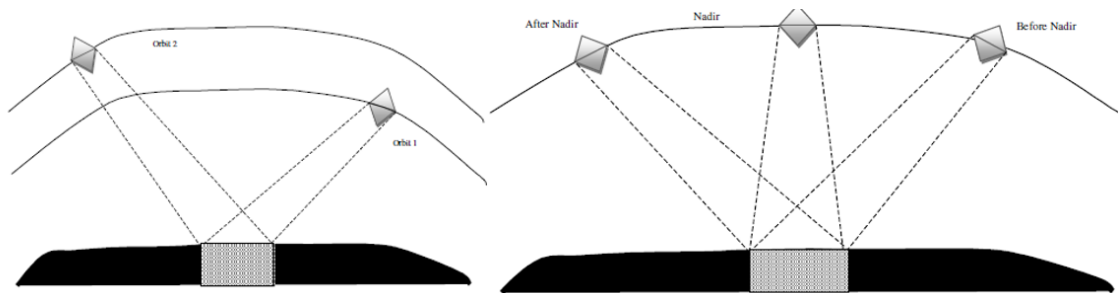
Optiseen kaukokartoitukseen perustuvassa korkeusmallien tuotannossa hyödynnetään ilmakuvauksestaakin tuttua stereokuvapeittoa ja kolmiulotteista mittausta. Mittauksessa projektion kuvaussäteet kulkevat kuvatasolle projektiokeskuksen kautta. Kuvat voidaan orientoida ja kohteet mitata, kun maaston kohta havainnoidaan kahdesta eri suunnasta ja kuvaussäteet, sekä vastinkuvaussäteet leikaavat kohdepisteessä (Kuva 8).

Sisäinen, keskinäinen ja ulkoinen orientointi on edellytys stereomittaamiselle, koska ainoastaan se mahdollistaa korkeuden määrittämisen satelliittikuvalta. Yksittäisten satelliittikuvien orientoinnin tulos voidaan esittää myös RPC-funktiolla, joka mahdollistaa tasokoordinaattien määrittämisen ilman stereomittaamista. (Luhmann, Robson, Kyle & Boehm 2013; Wang ym. 2019.)



Kuva 8. Stereomittauksen periaate (Wang ym. 2019, 110)

Satelliittien stereopeitto voidaan tuottaa kahdella erillisellä radalla olevalta satelliittisensorilta across-track menetelmällä tai samalta kiertoradalta along-track menetelmällä (Kuva 9).



Kuva 9. Vasemmalla across-track ja oikealla along-track stereopeittotekniikka (Deilami & Hashim 2011, 544–545)

4.2 Ympäristökijöiden vaikutus korkeuden mittaamisen laatuun

Luvun 3.2 mukaisesti kaikki laajojen alueiden korkeusmallit on käsiteltävä pinta-malleina. Tutkimusten perusteella maankäyttö ja topografian jyrkkyys vaikuttavat voimakkaimmin korkeusmallien korkeustarkkuuteen, mikäli muut suoranaiset virhelähteet on huomioitu. Myös kuvausolosuhteilla oli merkitystä aineistojen laatuun. (Uuemaa ym. 2020.)

4.2.1 Olosuhteet

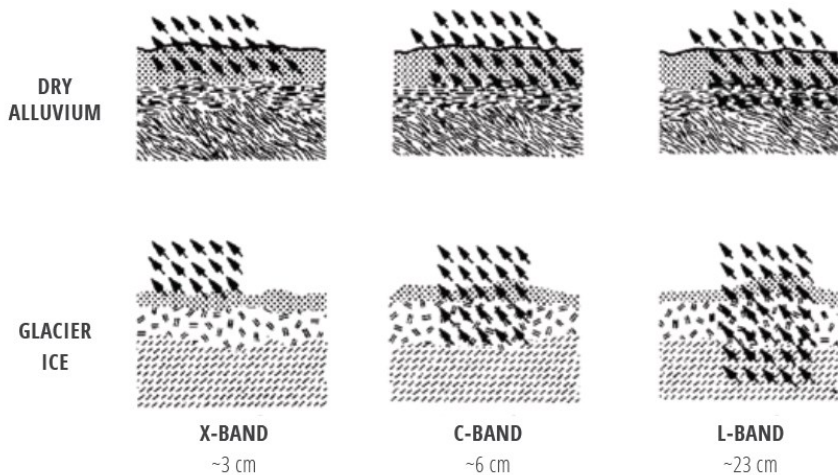
Olosuhteet vaikuttavat sekä optisesti että tutkatekniikalla tuotettuihin aineistoihin. Optisten menetelmien kohdalla pilvisuus on yksi merkittävin yksittäinen olosuhdemuuttaja, koska se estää visuaalisen havainnoinnin kokonaan. Esimerkiksi Suomessa pilvisiä päiviä on keskimäärin enemmän kuin poutaisia päiviä. Vuodenaikaiset vaihtelut ovat kuitenkin suuria (Ilmasto-opas 2022). Pilvisyyden lisäksi optisiin kuvaussensoreihin vaikuttavat varjot, sironta ja absorptio (CCRS 2019). Optisesti tuotettujen korkeusmallien prosessoinnissa hyödynnetäänkin esimerkiksi lumen, jään ja pilvien erotteluun kehitettyjä algoritmeja (ALOS 2022).

SAR-satelliittien tutkasignaalin takaisinheijastumiseen vaikuttavat vuodenajan mukaiset vaihtelut puiden lehvästössä. Lehdettömään aikaan tutkasignaalit läpäisevät puiden kasvustoa voimakkaammin verrattuna kasvukauteen. (Hawker, Neal & Bates 2019.)

Vastaavalla tavalla optisen kaukokartoituksen sovelluksissa lehdetön vuodentaika paljastaa maanpinnan todennäköisemmin verrattuna kasvukauteen ja siten vaikuttaa mitattavan pinnan määrittelyyn (CCRS 2019).

Lumi, jää ja kosteus vaikuttavat SAR-instrumentin suorituskykyyn. Märkä kasvusto ja lumi voimistavat tutkasignaalin sirontaa, koska tutkasignaali heijastuu voimakkaasti vettä sisältävistä pinnoista (Uemaa ym. 2020, 17). Toisaalta tutkimuksissa on todettu, että tutkasignaali läpäisee kuivaa jäävaippaa useiden metrien matkalta riippuen käytettävästä aallonpituudesta (Kuva 10; Rizzoli, Martone, Rott, & Moreira 2017).

Maaperän tiiveys yhdessä aallonpituuden kanssa vaikuttavat signaalin etenemiseen maaperässä. Lyhyet sähkömagneettiset signaalit heijastuvat takaisin lähempänä pintaa kuin pidemmät mikroaallot (Kuva 10).



Kuva 10. SAR-satelliittitutkien takaisinheijastuminen eri aallonpituuksilla jäisellä ja löyhällä maan pinnalla (Meyer 2019, 26)

4.2.2 Topografia

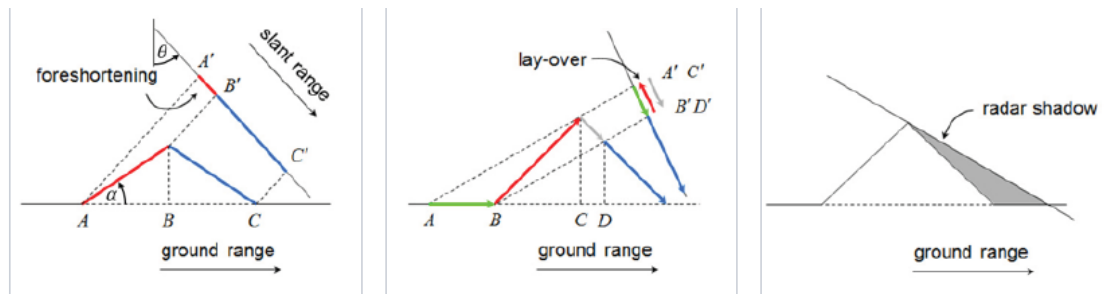
Tutkimusten perusteella korkeusvirheet kasvavat asteittain rinteiden jyrkkyyden kasvaessa. Topografia onkin ollut merkittävin korkeusvirheen selittäjä lukuisissa tutkimuksissa. (Szabó ym. 2015; Gdulová, Marešová & Moudrý 2020.)

Jyrkkyyden vaikutus korostuu erityisesti yli 10 asteen korkeuskulmilla (Gdulová ym. 2020). Hawker (2019) kumppaneineen analysoivat kolmea yleistä noin 90 m globaalia korkeusmallia. Heidän mukaansa korkeusarvojen keskineliövirhe kaksinkertaistui rinteiden kaltevuuden kasvaessa kuudesta asteesta viiteentoista asteeseen.

SAR-menetelmillä jyrkkyyden ja korkeusvirheen suhde selittyy osittain kolmella erilaisella geometriaan liittyvällä virheparametrilla: foreshortening, layover ja radar shadow (Kuva 11).

Foreshortening perustuu siihen, että rinteiden etäisyys suhteessa sensoriin pysyy täysin muuttumattomana. Näin rinteiden muoto ei kuvaudu oikein. Layover ilmiössä tutkasignaali saavuttaa vuoren huipun ennen pohjaa. Tämä aiheuttaa kuvan siirtymisen niin, että rinteiden seinämä kuvautuu vuoren huipun jälkeen. Radar shadow esiintyy tilanteissa, missä vastakkaiselle puolelle muodostuu varjo eikä kyseiseltä alueelta saada paluukaikua (Kuva 11). Todennäköisesti osa

geometriavirheistä voidaan korjata tai ainakin tunnistaa, koska perusparametrit tunnetaan.



Kuva 11. Kolme tyypillistä, erityisesti vuoristoisella alueella esiintyvää tutkakorkeusmallien geometriavirhettä (Meyer 2019, 24)

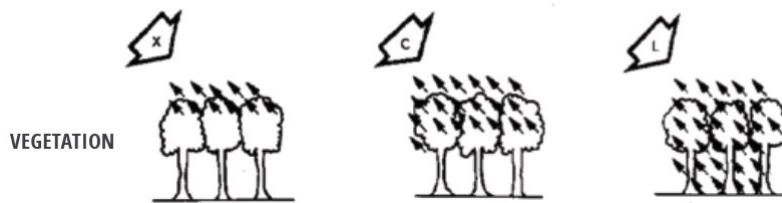
Kuvaussuunnalla ja kohteen topografialla on myös todettu olevan yhteys korkeustarkkuuden muodostumiseen. Nämä ilmiöt selittyvät kuvaavan sensorin kiertoradasta suhteessa kuvassa 11 esiteltyihin muuttujiin. Kuvaussuunnan vaikutus tarkkuuteen ei kuitenkaan ole yhtä voimakasta kuin jyrkkyyden merkitys. (Uemaa ym. 2020, 15–16.)

On myös todennäköistä, että erityisesti jyrkillä alueilla tutkatekniikalla tuotettujen korkeusmallien laatu kärsii tukikorkeuspisteiden puutteesta. Lisäksi korkeusvirheet selittynevät osittain resoluution vaikutuksesta (Kuva 3).

Optisilla menetelmillä tuotettujen korkeusmallien laatu kärsii vastaavasti geometrisistä virheistä. Esimerkiksi varjot, maastovirheet ja tuotannossa käytettävien tukipisteiden heikko laatu voivat vaikuttaa suoraan korkeusmallien lopulliseen tarkkuuteen. (ArcticDEM 2018a; Uemaa ym. 2020.)

4.2.3 Maanpeite

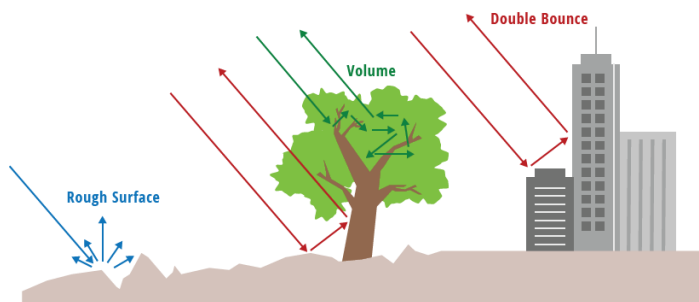
Kasvillisuudella ja erityisesti metsäisyydellä on todettu olevan vaikutusta korkeusmallien korkeustarkkuuteen. Lähtökohtaisesti tiheä metsäalue aiheuttaa korkeusarvojen positiivista vinoumaa. Tällä Uemaa (2020, 16) kumppaneineen tarkoittavat tutkasignaalin paluuheijastusta kasvillisuuden yläpinnoilta riippuen mittaamisessa käytetystä aallonpituudesta (Kuva 12).



Kuva 12. Kasvillisuuden läpäisevyys eri tutkasignaalin aallonpituuksilla (Meyer 2019, 26)

Maanpeitteeseen liittyvät korkeusvirheet selittyvät pääasiassa tutkasignaalin monitieheijastuksista (Kuva 13). Signaalin eteneminen kasvustossa riippuu kasvillisuuden tyypistä ja tiheydestä. Tasainen kasvillisuuden pinta tai viljelysmaa ei vaikuta korkeusvirheen suuruuteen yhtä voimakkaasti kuin runsaasti variaatioita sisältävä metsäalue. (Uemaa ym. 2020, 16–17.)

Kaupunkialueet erottuvat vastaavalla tavalla metsäalueiden kanssa, mutta virhelähteiden vaikutus ei ole yhtä merkittävää verrattuna metsäisiin alueisiin (Kuva 13; González-Moradas & Viveen 2020). Maanpeitteiden vaikutus on kuitenkin hyvin paikallista ja aineistokohtaiset erot ovat suuria (Uemaa ym. 2020, 16–17).



Kuva 13. Maanpinnan, kasvillisuuden ja rakennetun ympäristön vaikutus tutkasignaalin etenemiseen ja paluuheijastukseen (Meyer 2019, 29)

Lisäksi globaalit korkeusmallit ovat alttiita vesialueista johtuvista vääristymistä. Useimmissa korkeusmalliaineistoissa hyödynnetäänkin vesimaskia virheiden poissulkemiseksi. (Yamazaki ym. 2017; Uumaa ym. 2020.)

5 AVOIMET KORKEUSMALLIT

5.1 Arvioitavien korkeusmallien rajaukset

Luvussa viisi esitellään tunnetuimpia ja merkittävimpiä laajojen alueiden korkeusmalleja. Johdantolukuun viitaten aineistojen tarkkuus rajataan noin ≤ 90 metriin.

Analyysi perustuu kirjallisuuslähteisiin. Luvussa ei käydä johdonmukaisesti läpi aineistojen tarkkuuksia, vaan analyysin pääpaino on tuotannon kuvailussa ja tulokinnassa.

Tässä luvussa ei myöskään huomioida uusia tiettyyn pintaan kohdistuvia korkeusmalleja (Hengl, Leal Parente, Krizan & Bonannella 2020; Hawker & Neal 2021).

5.1.1 SRTM

Shuttle Radar Topography Mission eli SRTM on todennäköisesti tunnetuin lähes maailmanlaajuinen korkeusmalliaineisto ja samalla yksi NASA:n eniten ladatuimmista aineistoista. SRTM on tutkasensorilla tuotettu korkeusmalli (Earthdata 2020). Se kattaa noin 80 % maapallon maapinta-alasta (USGS 2018).

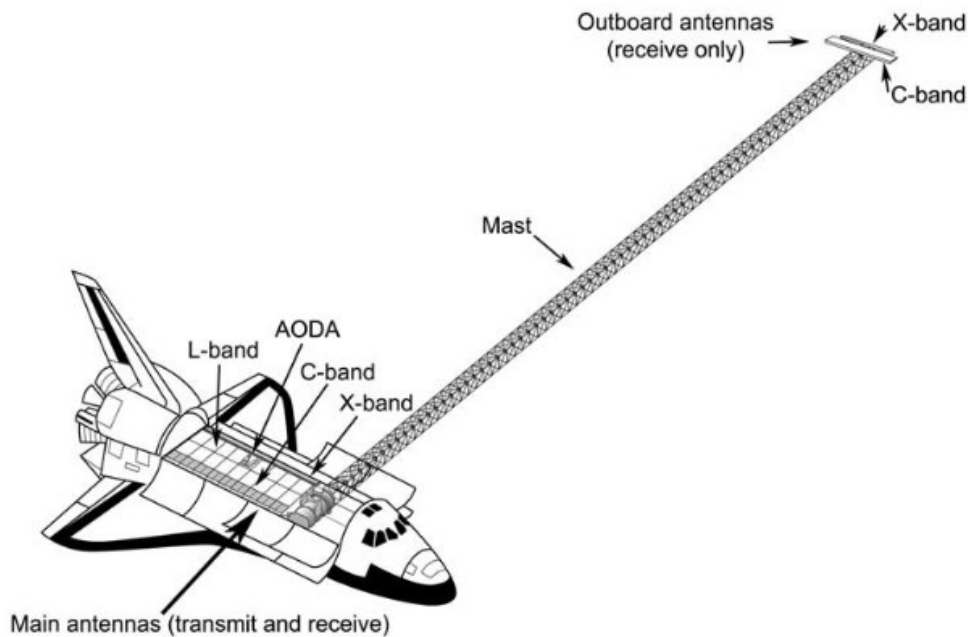
Aineiston keruu suoritettiin helmikuussa 2000 yhdentoista päivän aikana. Kuvauslustana toimi avaruussukkula Endeavour (Farr ym. 2007). Kuvaushankkeeseen osallistuivat NASA:n ja NGA:n lisäksi Saksan ja Italian avaruusjärjestöt (USGS 2018). Alun perin SRTM-korkeusmalli julkaistiin 90 m pikselikoolla, mutta vuonna 2014 Yhdysvallat julkaisi korkeusmallista 30 m resoluutiolla olevan avoimen korkeusmalliaineiston (USGS 2018).

SRTM-korkeusmallista on tehty useita eri versioita. Uusin versio on SRTM v3. Sen laatua on parannettu suhteessa edellisiin versioihin korjaamalla tutkainterferometriaan liittyviä virheitä, puuttuvia tai ylikorostuneita pikseliarvoja ja poistettu vesialueista johtuvaa kohinaa. (JPL 2022.)

SRTM-korkeusmallin korkeushavainnot on tuotettu kahdella synteettisen aperatuurin tutkalla. Kuvausteknologia perustui kahteen tutkasignaalia lähettävään instrumenttiin. Toinen tutkista oli C-kaistan ja toinen X-kaistan tutka (Kuva 14).

SRTM:n tapauksessa toinen tutka-antenni sijaitsi avaruussukkulan lastiruumassa ja toinen 60 metriä pitkän maston päässä. Pinnan korkeuden laskenta perustui kahden signaalin vaihe-eroon. (Farr ym. 2007.)

Avaruussukkulaan asennettu C-tutka tuotti jatkuvaa tutkapeittoa. X-tutka mittasi 50 km levyisiä kaistoja. X-tutkalla alueellinen peittoprosentti oli noin 40 % kuvaustehtävään rajatusta alueesta. Lisäksi kyseinen tutkainstrumentti toimi varasensorina mahdollisissa vikatilanteissa. (Farr ym. 2007.)



Kuva 14. Aineistohankinnassa käytetty avaruussukkula Endeavour ja tutkasensoreiden sijoittelu (Farr ym. 2007)

Tutkimusten mukaa SRTM on kärsinyt tyypillisistä tutkakorkeusmalleille ominaisista laatuongelmista (Magruder, Neuenschwander & Klotz 2021, 2). Lisäksi aineisto on jo yli kaksikymmentä vuotta vanhaa (Hawker ym. 2018; Schumann & Bates 2018). Korkeusmallin tarkkuusarvot vaihtelevat globaalien korkeusmallien tapaan varsin paljon. Yleisesti voidaan todeta, että suurimmat virheet syntyvät vaihtelevassa ja paljon korkeuseroja sisältävässä maastossa (Taulukko 2).

Taulukko 2. SRTM (USGS 2018)

SRTM	
<i>Kuvausvuodet</i>	2000
<i>Uusin päivitys</i>	2013
<i>Datum</i>	WGS84/EGM96
<i>Aluekattavuus</i>	60°N - 56°S
<i>Tuotantotekniikka</i>	SAR C / X-kaista
<i>Resoluutio</i>	90 m / 30 m
<i>Korkeustarkkuus¹</i>	<p>6 m MAE Farr ym. 2007</p> <p>6,8 m MAE Rodríguez, Morris & Belz 2006</p> <p>6, 6 m / 10 m / 13,1 m RMSE Uuema ym. 2020</p> <p>5 RMSE González-Moradas & Viveen 2020</p> <p>14,9 m RMSE Dewitt, Warner & Conley 2015</p> <p>7 m / 13 m RMSE Kolecka & Kozak 2014</p>
<i>Tasotarkkuus</i>	9,8 m Rodríguez, Morris & Belz 2006

¹ Kaikki listatut SRTM-korkeusmallit eivät ole samaa päivitysversiota

SRTM aineisto on ladattavissa rekisteröidyille käyttäjille: <https://search.earthdata.nasa.gov/search> tai <https://opentopography.org/>.

5.1.2 NASDADEM

NASADEM on SRTM-sensoridatan pohjalta uudelleen tuotettu korkeusmalli. NASADEM julkaistiin vuonna 2020. Sen pikselikoko on noin 30 metriä ja aluerajaus vastaa SRTM-korkeusmallia. (USGS 2020.)

NASADEM on yhdistelmä erilaisia korkeusmalliaineistoja. Sen tarkoitus on ollut korjata SRTM-korkeusmallin tiedettyjä virheitä. Voidaankin arvioida, että NASADEM on uuden sukupolven SRTM.

NASADEM:n sijainti- ja korkeustietojen tukemisessa on hyödynnetty ICESat- ja GLAS-satelliittilaserin tuottamia tietoja. Lisäksi aineiston hallinnassa on hyödynnetty TERRA-satelliitin optista stereokuvaveittoa ja AW3D30-korkeusmallista johdettuja pikseliarvoja täydentämään puuttuvia tietoja (Earthdata 2020; USGS 2022). Korkeusmallin tuotannossa on hyödynnetty useamman tutkakuvan tuotantotekniikkaa. Tämä menetelmä on parantanut aineiston korkeustarkkuutta entisestään (OpenTopography – NASADEM 2022).

Tehdyt parannukset ovat olleet merkittäviä aineiston laadun kannalta. Tehtyjen tutkimusten perusteella sen laatu on parantunut huomattavasti suhteessa SRTM-korkeusmalliin (Taulukko 3).

Taulukko 3. NASADEM (Earthdata 2020; USGS 2022)

NASADEM	
<i>Kuvausvuodet</i>	2000
<i>Uusin päivitys</i>	2020
<i>Datum</i>	WGS84/EGM96
<i>Aluekattavuus</i>	60°N - 56°S
<i>Tuotantotekniikka</i>	SAR C / X-kaista
<i>Resoluutio</i>	30 m
<i>Tarkkuus</i>	5,3 m <i>RMSE</i> <i>Buckley ym. 2020</i> 6, 4 m / 8, 6 m / 12,1 m <i>RMSE</i> <i>Uuemaa ym. 2020</i>

NASADEM on ladattavissa rekisteröidyille käyttäjille: <https://search.earthdata.nasa.gov/search> tai <https://opentopography.org/>.

5.1.3 ASTER GDEM

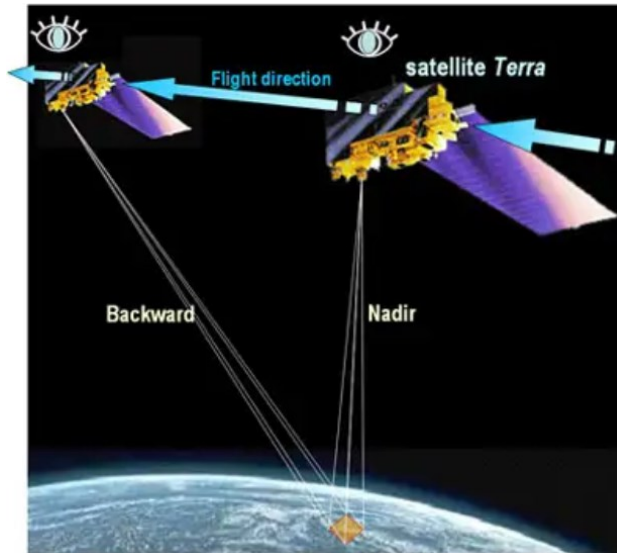
ASTER Global DEM on fotogrammetrisesti tuotettu globaali korkeusmalli, joka perustuu TERRA-satelliitin stereokuvapareihin. Korkeusmalli on tuotettu Japanin ja Yhdysvaltojen yhteistyöprojektina. (Earthdata 2019.)

Ensimmäinen versio ASTER GDEM -korkeusmallista tuotettiin vuonna 2009. Kolmas ja samalla uusin versio korkeusmallista julkaistiin kymmenen vuotta myöhemmin. Uusimmasta versiosta on korjattu huomattava määrä anomalioita ja muita pikselivirheitä. Lisäksi versiosta on tuotettu globaali vesimaskiaineisto. (Earthdata 2019.)

ASTER GDEM on tuotettu automaattisella prosessilla optisen lähi-infrapunakanavan stereokuvaparien pohjalta. Satelliittikuvien resoluutio on ollut 15 metriä. Stereokuvaparit on tuotettu peräkkäisinä kuvahavaintoina samalta satelliittiradalta kuvaten suoraan nadiiriin ja viistokuvina taaksepäin. (Kuva 15; USGS 2019.)

ASTER GDEM -aineistoa on tutkittu varsin kattavasti. Version 2 laatu on kärsinyt prosessointivirheistä ja pilvien aiheuttamista ongelmista. Korkeusmallin tarkkuus on ollut varsin heikko topografialtaan vaihtelevassa maastossa (Taulukko 4; Uuemaa ym. 2020). Kolmanteen versioon on tehty huomattavia laatua parantavia

muutoksia. Uusimmasta versiosta on poistettu pilvisyydestä johtuvia virheitä ja tasoitettu vesialueilla esiintyviä poikkeavia pikseliarvoja (Earthdata 2019; USGS 2019).



Kuva 15. TERRA-satelliitin kyky tuottaa stereokuvia perustui kahteen suuntaan kuvaavaan lähi-infrapunasensoriin (NewScientist - ASTER/METI/NASA 2009)

Taulukko 4. ASTER GDEM (USGS 2019)

ASTER GDEM	
<i>Kuvausvuodet</i>	2000–2013
<i>Uusin päivitys</i>	2019
<i>Datum</i>	WGS84/EGM96
<i>Aluekattavuus</i>	83°N - 83°S
<i>Tuotantotekniikka</i>	Optinen 0.52 μm – 0.86 μm
<i>Resoluutio</i>	30 m
<i>Tarkkuus</i>	20 m 95 % conf. ¹ USGS 2019 12,1 m SD error ¹ Abrams & Crippen 2019 17 m 95 % conf. ² Tachikawa ym. 2011 9, 2 m / 13, 5 m RMSE ² Uuemaa ym. 2020, 15

¹ ASTER GDEM v3

² ASTER GDEM v2

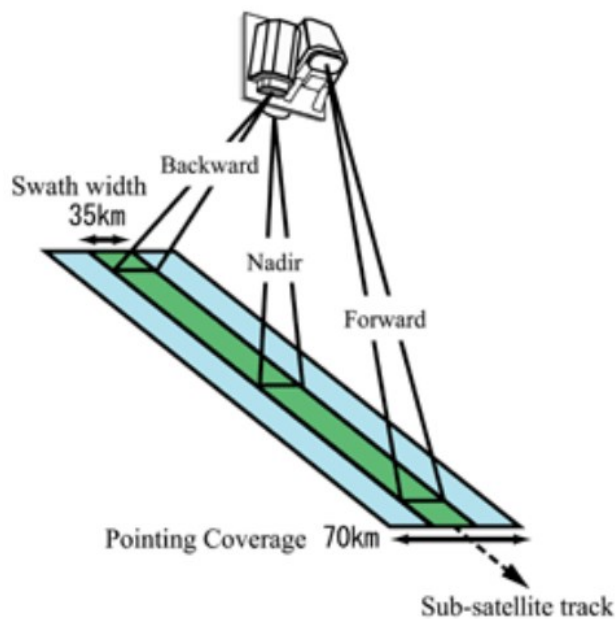
ASTER GDEM on ladattavissa rekisteröidyille käyttäjille: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>.

5.1.4 ALOS AW3D30

AW3D30 on JAXA:n tuottama avoin ja globaali 30 metrin resoluution korkeusmalli. AW3D30 on määrittelydokumenttien mukaisesti määritelty pintamalliksi ja

se perustuu kaupalliseen viiden metrin pintamallituotteeseen. (Opentopography – AW3D30 2022.)

AW3D30 on tuotettu fotogrammetrisesti ALOS-satelliitin tuottamien kuvien perusteella. ALOS-satelliitissa on käytetty pankromaattista optista PRISM-sensoria, jossa on kolme itsenäistä optista kameraa. Yksi kamera tuotti kuvia nadiirista ja kaksi erillistä kameraa kuvasi etuviistoon ja takaviistoon (Kuva 16). Tämä mahdollisti optisen stereopeiton tuottamisen 35 km leveydeltä saman aikaisesti. PRISM-sensorin spatiaalinen resoluutio nadiirista on 2,5 metriä. (ALOS PRISM 2022.)



Kuva 16. ALOS satelliitin PRISM-sensorin kolme itsenäistä pankromaattista kuvaussensoria (ALOS PRISM 2022)

AW3D30-korkeusmallin tuotannossa hyödynnetyt satelliittikuvat on tuotettu vuosien 2006–2011 aikana. Ensimmäinen versio korkeusmallista julkaistiin vuonna 2015 ja uusin versio on julkaistu alkuvuodesta 2022. Korkeusmallia on kehitetty vuosien varrella useaan otteeseen. Sen laatua on kohennettu käyttämällä vesistömaskia, sekä hyödynnety pilvien, lumen ja jään tunnistusalgoritmia. (ALOS World 3D-30m 2021; ALOS 2022.)

AW3D30:n laatua pidetään tutkimusten perusteella erittäin hyvänä. Sitä pidetään yhtenä laadukkaimmista globaaleista korkeusmalliaineistoista (Opentopography – AW3D30 2022). Tehdyt tieteelliset tutkimukset ovat vahvistaneet tätä asiaa.

AW3D30 säilyttää hyvän korkeustarkkuuden myös vaihtelevassa ja kompleksisessa maastossa (Uemaa ym. 2020, 15–16).

Aineiston korkeaa laatua selittää todennäköisesti perinteinen fotogrammetrinen tuotantomenetelmä. Passiivisella menetelmällä tuotettu AW3D30 on myös selkeästi määritelty pintamalliksi. Tämän lisäksi se on yleistetty viiden metrin kaupallisesta korkeusmallista, mikä osittain selittää avoimen aineiston korkeaa laatua. (Taulukko 5; Courty, Soriano-Monzalvo & Pedrozo-Acuña 2019.)

Taulukko 5. ALOS AW3D30 (ALOS World 3D-30m 2021; ALOS 2022)

ALOS World 3D AW3D30		
<i>Kuvausvuodet</i>	2006–2011	
<i>Uusin päivitys</i>	2022	
<i>Datum</i>	WGS84/EGM96	
<i>Aluekattavuus</i>	84°N - 84°S	
<i>Tuotantotekniikka</i>	Optinen 0.52 μm – 0.77 μm	
<i>Resoluutio</i>	30 m	
<i>Tarkkuus</i>	5 m <i>RMSE</i>	<i>Tadano ym. 2014</i>
	5 m <i>RMSE</i> ¹	<i>Takaku, Tadono & Tsutsui 2014</i>
	2 m <i>RMSE</i> ²	<i>Takaku, Tadono & Tsutsui 2014</i>
	4,4 m <i>RMSE</i>	<i>Tadano ym. 2016</i>
	5 m / 12 m / 14 m <i>RMSE</i>	<i>Uemaa ym. 2020</i>

¹ Jyrkkyyys > 30°

² Jyrkkyyys < 10°

AW3D30 on ladattavissa rekisteröidyille käyttäjille: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm tai <https://opentopography.org/>.

5.1.5 Copernicus DEM

Copernicus DEM on tuotettu 12 metrin Airbus WorldDEM-korkeusmallin pohjalta. Se on tuotteena pintamalli ja tuotannosta ovat vastanneet ESA, DLR ja Airbus. (Sentinel Online 2020.)

Korkeusmalli perustuu TanDEM-X satelliittitehtävään. Kyseisessä kuvaustehtävässä operatiivisia X-aallonpituusalueen satelliitteja oli kaksi kappaletta. Satelliittien muodostelmalla saavutettiin joustava ja saumaton cross-track ja long-track konfiguraatio erittäin tarkan korkeusmallin tuottamiseksi. Satelliitit lensivät niin kutsutulla Helix-radalla, jossa kappaleiden kiertoradat muodostivat nousevia solmuja. Tällä mahdollistettiin satelliittien radan säilyttäminen. (eoPortal 2022.)

Korkeusmallissa käytetty aineisto on kuvattu vuosien 2010–2015 välillä (Open-Topography – Copernicus DEM 2021). Vuonna 2019 ESA julkaisi yhdeksänkymmenen metrin Copernicus DEM -korkeusmalliaineiston ja vuotta myöhemmin tarkemman kolmenkymmenen metrin aineiston (Sentinel Online 2020).

Copernicus DEM jaetaan DTED- ja DGED-tietomalleissa GeoTIFF-tiedostomuodossa. Korkeusmalliaineiston tuottamisessa on hyödynnetty laajasti erilaisia menetelmiä virheiden poistamiseksi lopullisesta tuotteesta. (Copernicus DEM 2020.)

Tehdyissä tutkimuksissa Copernicus DEM -korkeusmallit ovat osoittautuneet tarjolla olevista aineistoista kaikista laadukkaimmiksi ja tarkimmiksi (Guth & Geoffroy 2021; Marešová ym. 2021, 13–15; Garrote 2022, 19). Tutkimuksissa on todettu, että 90 m Copernicus DEM -korkeusmalli on korkeustarkkuudeltaan lähes yhtä tarkka kuin vastaavasta aineistosta tuotettu 30 metrin korkeusmalli (Marešová ym. 2021, 6–7).

Guth & Geoffroy (2021, 2258) kuvaavat, että Copernicus DEM mallintaa ympäristön piirteet ja rakennetun ympäristön erittäin tarkasti. Sen pinta asettuu avonaisilla alueilla juuri todellisen maanpinnan yläpuolelle ja korkean kasvillisuuden alueilla puuston ja maanpinnan puoleen väliin. Se ei ole myöskään herkkä korkeusvaihteluille.

Taulukko 6. Copernicus DEM (Copernicus DEM 2020)

Copernicus DEM													
<i>Kuvausvuodet</i>	2010–2015												
<i>Uusin päivitys</i>	2020												
<i>Datum</i>	WGS84/EGM2008												
<i>Aluekattavuus</i>	90°N - 90°S												
<i>Tuotantotekniikka</i>	SAR X-kaista												
<i>Resoluutio</i>	90 m / 30 m												
<i>Tarkkuus</i>	<table border="0"> <tr> <td>< 4 m</td> <td>$LE90\%_{abs}$</td> <td>Copernicus DEM 2020</td> </tr> <tr> <td>< 2 m</td> <td>$LE90\%_{rel}^1$</td> <td>Copernicus DEM 2020</td> </tr> <tr> <td>< 4 m</td> <td>$LE90\%_{rel}^2$</td> <td>Copernicus DEM 2020</td> </tr> <tr> <td>< 6 m</td> <td>$CE90\%_{abs}$</td> <td>Copernicus DEM 2020</td> </tr> </table>	< 4 m	$LE90\%_{abs}$	Copernicus DEM 2020	< 2 m	$LE90\%_{rel}^1$	Copernicus DEM 2020	< 4 m	$LE90\%_{rel}^2$	Copernicus DEM 2020	< 6 m	$CE90\%_{abs}$	Copernicus DEM 2020
< 4 m	$LE90\%_{abs}$	Copernicus DEM 2020											
< 2 m	$LE90\%_{rel}^1$	Copernicus DEM 2020											
< 4 m	$LE90\%_{rel}^2$	Copernicus DEM 2020											
< 6 m	$CE90\%_{abs}$	Copernicus DEM 2020											

¹ Maaston jyrkkyys < 20 %

² Maaston jyrkkyys > 20 %

Copernicus DEM on ladattavissa rekisteröidyille käyttäjille: <https://panda.copernicus.eu> tai <https://finder.creodias.eu/>. ftp palvelu suurilla aineistomäärillä cdsdata.copernicus.eu. Copernicus DEM on ladattavissa myös <https://opentopography.org/>.

5.1.6 MERIT DEM

MERIT DEM on Tokion yliopiston tuottama globaali 90 m pikselikoon korkeusmalli. Se ei sisällä primääriä korkeuden mittausta, vaan MERIT DEM pohjautuu alle 60 leveyspiirillä SRTM-tutkakorkeusmalliin ja sitä pohjoisempaan AW3D30-korkeusmalliaineistoon. Lisäksi tuotteessa on käytetty Viewfinder Panorama aineistoa. (MERIT DEM 2018).

MERIT DEM -korkeusmallissa on hyödynnetty vesistö- ja puustomaskia. Tämä tasoittaa tutkakorkeusmalleille tyypillistä korkeustarkkuuden vaihtelua metsäisillä alueilla. Lisäksi korkeusmallista on poistettu tunnistettuja tutkainterferometriaan liittyviä virheitä. (Yamazaki ym. 2017; Uemaa ym. 2020.)

Yleisesti MERIT DEM -aineistoa pidetään varsin laadukkaana (Taulukko 7). Sen laatu kärsii jonkin verran jyrkillä alueilla. Myös metsäisillä alueilla aineiston laadussa on vaihtelua johtuen todennäköisesti metsämaskista. Tutkimusten perusteella MERIT DEM on vertailukelpoinen jopa 30 metrin korkeusmallien kanssa (Uemaa ym. 2020, 15–18; Garrote 2022). Sen käytettävyys kärsii kuitenkin siitä, että se perustuu jo vanhaan SRTM-dataan (Hawker ym. 2018).

Taulukko 7. MERIT DEM (MERIT DEM 2018)

MERIT DEM	
<i>Kuvausvuodet</i>	2000–2013
<i>Uusin päivitys</i>	2018
<i>Datum</i>	WGS84/EGM96
<i>Aluekattavuus</i>	90°N - 60°S
<i>Tuotantotekniikka</i>	SAR / Optinen ¹
<i>Resoluutio</i>	90 m
<i>Tarkkuus</i>	12 m <i>LE90%</i> Yamazaki ym. 2017 3 m / 12,5 m / 13,6 m / 10,5 m <i>RMSE</i> Uemaa ym. 2020

¹ Korkeusmalli on laskennallinen. Ei sisällä primääriä korkeudenmittausta.

MERIT DEM on ladattavissa rekisteröidyille käyttäjille: http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_DEM/.

5.1.7 ArcticDEM

ArcticDEM on NGA:n ja NSF:n aloitteesta tuotettu kahden metrin korkean resoluution pintamalliaineisto pohjoiselta alueelta. Korkeusmalli on tuotettu korkean resoluution optisten satelliittikuvien perusteella. Sen tuotannossa on hyödynnetty suurteholaskentaa ja avoimen lähdekoodin ohjelmistoja. Lisäksi aineiston

sijainnin ja korkeuden hallinnassa on hyödynnetty ICESat-satelliitin tuottamaa laserdataa. (ArcticDEM 2018a.)

Korkeusmallin tuotannosta on vastannut Yhdysvaltalainen PGC yhteistyökumppaneidensa kanssa. Korkeusmalli pohjautuu miljooniin WorldView-satelliittikonsellaation pankromaattisiin, noin 0,5 metrin resoluution stereokuvaan. Kuvien pohjalta on tuotettu 2 metrin pintamalli Ohion yliopiston tuottamalla SETSM-ohjelmistolla. Näiden lisäksi korkeusmallin tuotannossa on hyödynnetty NSF:n tarjoamaa suurteholaskentaa. (ArcticDEM 2018a.)

Korkeusmallin tuotanto perustui satelliittikuvien stereoparien autokorrelaatiotekniikkaan. Algoritmi iteroi stereokuvia aloittaen kuvien rajaamisen karkean resoluution satelliittikuvista. (Noh & Howat 2015.)

ArcticDEM-aineistoa jaetaan kahtena erilaisena tietotyyppinä: kaistoina ja mosaiikkeina. Kaistoina tuotettu korkeusmalli vastaa satelliittien kaistakohtaista kuvausaluetta. Korkeusmallin laajuus vaihtelee siten satelliittiradasta riippuen. Se jaetaan 32 bittisenä rasteriaineistona GeoTIFF-formaatissa projisoituna WGS84-koordinaatistoon. (ArcticDEM 2018b; Porter ym. 2018.)

Mosaiikkina tuotettu ArcticDEM on laadukas ja yhtenäinen korkeusmallituote. Aineistoa jaetaan 50 km x 50 km kokoisissa karttatiileissä. Aineiston tarkin resoluutio on kaksi metriä, mutta sitä jaetaan myös karkeampana pikselikokona. Mosaiikkina tuotettu aineisto on pitkälle prosessoitu lopullisen tuotteen laadun varmistamiseksi. Tiedostomuodot vastaavat kaistana tuotettua korkeusmallia. (ArcticDEM 2018b; Porter ym. 2018.)

Ensimmäinen versio ArcticDEM-korkeusmallista julkaistiin vuonna 2016 ja uusien päivitys toteutettiin vuonna 2018. Uusimman aineistopäivityksen mukaisessa tuotteessa on käytetty suodatusalgoritmeja esimerkiksi vuodenaikojen vaihteluista johtuvien muuttujien hallitsemiseksi. (ArcticDEM 2018b.)

ArcticDEM-aineisto on monella tavalla merkittävä aineisto. Sen vahvuutena pidetään kolmen erillisen satelliittiradan hyödyntämistä. Tämä on nopeuttanut tuotantoa huomattavasti. Lisäksi tuotantoprosessin toistamisesta on tehty tehokasta. (ArcticDEM 2018a.)

Aineistoon liittyy myös heikkouksia. Sen tuotanto on perustunut täysin algoritmeihin eikä siihen ole liittynyt laajaa manuaalista laaduntarkastamista tai aineiston käsittelyä. Korkeusmallissa voi esiintyä anomaliaita tai puuttuvia pikseliarvoja. Lisäksi tuotteeseen ovat vaikuttaneet tyypilliset optisen aallonpituusalueen ilmiöt: ilmakehän ominaisuudet, varjot ja pilvet. (ArcticDEM 2018a.)

ArcticDEM-korkeusmallin korkeustarkkuus riippuu ulkopuolisten tukipisteiden käytöstä. Ilman tukipisteitä vertikaali ja horisontaalitarkkuus on noin neljä metriä. Mosaiikkina jaettavassa aineistossa tukipisteinä on kuitenkin käytetty ICESat-satelliitin korkeus- ja sijaintitietoja. (ArcticDEM 2018a.)

Aineiston lisenssi mahdollistaa sen vapaan käytön ja jakamisen. Jos aineistoa käytetään tieteellisissä julkaisuissa, siitä pyydetään tiedottamaan Polar Geospatial Centeriä (ArcticDEM 2017; Porter ym. 2018). ArcticDEM on ladattavissa <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Luvussa 5 arvioitiin seitsemää tähän opinnäytetyöhön rajattua korkeusmallituotetta. Niiden tarkkuudet ovat hyvin aluesidonnaisia ja korkeusmallien laatuun sekä käytettävyyteen liittyy useita muuttujia. Aineistojen yhteydessä käsitellyt tarkkuusluvut ovat tarkoitettu antamaan perusteita aineistokohtaisen arvioinnin tueksi. Lisäksi ne johdattelevat lukijaa alkuperäisen tutkimuksen lähteille.

Opinnäytetyössä arvioiduista korkeusmalleista SRTM on todennäköisesti ollut lähihistorian merkittävimpiä globaaleja paikkatietoaineistoja. Se on ollut aidosti ensimmäinen yhtenäinen lähes maailmanlaajuinen korkean resoluution korkeusmalliaineisto, joka on ollut ladattavissa ja käytettävissä vapaasti. Nykyisin SRTM on jo varsin vanhaa tuotantoa, mutta sen pohjalta on edelleen tuotettu uusia laadukkaita aineistoja. Näistä merkittävimpiä ovat NASADEM ja MERIT DEM.

Optisesti tuotettuja korkeusmalleja ovat ASTER GDEM ja AW3D30. Tuotantomenetelmällisesti niihin liittyvät omat vahvuutensa. Johtopäätöksenä voidaan todeta AW3D30 olevan yksi laadukkaimmista 30 metrin korkeusmalleista.

Viime vuosien merkittävimpiä aineistoavauksina voidaan pitää ESA:n Copernicus DEM -aineistoja. Tehdyt tutkimukset ovat osoittaneet, että ne ovat kokonaisuutena vertailuryhmän laadukkaimpia korkeusmallituotteita.

Myös arktisen alueen ArcticDEM-korkeusmallia voidaan pitää huomionarvoisena aineistokokonaisuutena, vaikka se määritelmän mukaisesti ei täysin sovi tämän opinnäytetyön rajaukseen. Kyseessä on erittäin laajalta alueelta tuotettu kahden metrin korkeusmalli, jonka tuotannossa on hyödynnetty optisia satelliittikuvia ja erittäin tehokkaita algoritmeja. ArcticDEM on osoitus siitä, että maailmanlaajuisesti on mahdollista tuottaa erittäin korkean resoluution korkeusaineistoja.

7 POHDINTA

Avoimiin globaaleihin korkeusmalleihin liittyen on ollut tunnistettavissa kolme kehityspolkua: a) korkean resoluution korkeusmallien tarjonnan lisääntyminen ja avaaminen b) yhdistelmäkorkeusmallien tai tiettyyn tarkoitukseen rajattujen korkeusmallien tuottaminen ja c) aineistojen jakelukanavien kehittyminen.

Vasta hiljattain julkaistujen ja harmonisoitujen korkeusmallien kuvaushetkestä on kulunut jo yli viisi vuotta. Maapalloa ja sen pintaa havainnoidaan avaruudesta jatkuvasti ja uusia satelliitteja tai satelliittiohjelmia kehitetään tiiviiseen tahtiin. Myös yksityiset avaruustoimijat mahdollistavat kaukokartoitukseen perustuvien tuotteiden valmistuksen enemmässä määrin. Voidaan siis päätellä, että tulevaisuudessa vastaavien korkeusmalliaineistojen tuotanto tulee edelleen jatkumaan.

Viime vuosina on tehty merkittäviä tutkimuksia erityyppisten korkeuspintojen tunnistamiseksi osana globaalia aineistokokonaisuutta. Yhdistelmäkorkeusmallien tai tiettyyn tarkoitukseen rajattujen korkeusmallien tuotanto edellyttää tehokkaita algoritmeja, joiden perusteella voidaan erotella esimerkiksi latvuspinta, rakenne pinta ja paljaan maan pinta. Näiden aineistojen tuotantoa tukevat satelliittilaseriin perustuva korkeudenmittausteknologia.

Toinen mahdollinen tulevaisuuden kehityspolku liittyy korkeusaineistojen päivitysprosessien kyvykkyyteen. On todennäköistä, että jatkossa korkeusmallien tuotanto on entistä enemmän jatkuvasti päivittyvää ja niiden päivitys tapahtuu asteittain. Tässä edesauttaa tuotantomenetelmien yhdistäminen, joissa voidaan hyödyntää mikroaaltoalueen ja optisen mittaamisen vahvuuksia. Suurteholaskenta, koneoppiminen ja tietokonenäön hyödyntäminen mahdollistaisi lähes reaaliaikaisen ja virhekorjatun korkeusaineistojen tuotannon rajattuna käyttäjän haluamaan pintaan mistä päin maapalloa tahansa.

Tuotantoteknologioiden kehittyminen mahdollistaisi myös resoluutioltaan erittäin korkealaatuisten korkeusmallien tuottamisen hyvin laajoilta alueilta. Optisilla kaukokartoitusmenetelmillä voidaan jo nyt tuottaa noin kahden metrin pikselikoon korkeusmallia lähes globaalisti. SAR-tekniikalla on mahdollista saavuttaa paikallisesti noin metrin resoluutioon perustuvia kuvia, mutta se vaatii kuvaavalta instrumentilta runsaasti energiaa. Korkeusmallien tuotantoon paremmin

soveltuvassa sensorimoodissa kuvauskyvyn voidaan arvioida soveltuvan tarkimillaan noin 10 m resoluutioon korkeusmallien tuotantoon, mutta paikallisesti pikselikoko voi olla merkittävästi pienempääkin.

Toisaalta korkeusmallien resoluution ja korkeustarkkuuden yhteys on tapauskohtaista. Esimerkiksi Copernicus DEM -korkeusmallien yhteydessä on todettu, että sen 90 metrin ja 30 metrin aineistojen korkeustarkkuuksien välillä ei ole merkittäviä eroja.

Kolmas selvä kehityspolku liittyy jakelukanavien monipuolistumisiin ja latauspalveluiden laadukkaisiin käyttökokemuksiin. Kaukokartoitusaineistojen käytettävyyttä ja hyödynnettävyyttä ovat lisänneet merkittävästi esimerkiksi NASA:n ja ESA:n latauspalvelut. Näiden lisäksi OpenTopography kokoaa yhteen lataus- ja katselupalveluun niin globaaleja kuin paikallisia korkeusaineistoja kaikkien hyödynnettäviksi.

Jakelukanavien kehittymiseen liittyvät myös jakeluteknologioiden monipuolisuus. Esimerkiksi OpenTopography ja ESA tarjoavat FTP-tiedonsiirtoprotokollaan tukeutuvien palveluiden lisäksi mahdollisuuden API-ohjelmointirajapinnoille. Myös selaimessa tapahtuvat kaukokartoitusaineistojen analyysit ja verkkopohjaiset tiedonsiirtoprotokollat mahdollistavat kokonaan uudenlaista liiketoimintaa eikä raskaiden aineistojen paikallinen lataaminen ole kaikissa käyttötapauksissa enää tarpeellista.

Lopuksi nostan esille muutamia jatkotyön kannalta mahdollisia tutkimusaiheita. Yksi jatkotyön aihe voisi olla perehtyä tietyn maailmanlaajuisen korkeusmalliaineiston tuotantoketjuun hieman syvällisemmin. Satelliitin mittaushavainnosta on hyvin pitkä matka valmiiksi tuotteeksi ja tähän prosessiin perehtyminen voisi olla hyvin antoisaa.

Toisena nostona on analytiikkaan perustuva työ, missä voisi arvioida laajemmin avoimiin globaaleihin kaukokartoitusteknologioiden perustuvien tuotteiden käyttöä ja soveltuvuutta kansallisten kartoitusohjelmien täydentäjänä. Maanmittauslaitoksen tuottamat laadukkaat paikkatietotuotteet tarjoaisivat ainutlaatuisen aineistokokoelman tämän työn tueksi.

LÄHTEET

Abrams, M & Crippen, R. 2019. ASTER GDEM V3 (ASTER Global DEM). Japan's Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI), National Aeronautics and Space Administration (NASA), Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology. User Guide Version 1. Viitattu 16.2.2022 https://lpdaac.usgs.gov/documents/434/ASTGTM_User_Guide_V3.pdf.

ALOS 2022. ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D - 30m (AW3D30)". Viitattu 17.2.2022 https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/data-set/aw3d30/aw3d30_e.htm.

ALOS PRISM 2022. PRISM Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping. Viitattu 17.2.2022 https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/alos/sensor/prism_e.htm.

ALOS World 3D-30m 2021. ALOS Global Digital Surface Model (DSM). ALOS World 3D-30m (AW3D30). Version 3.2/3.1. Product Description Edition 1.2. Viitattu 17.2.2022 https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/data-set/aw3d30/data/aw3d30v3.2_product_e_e1.2.pdf.

ArcticDEM 2017. Usage Guidelines. Viitattu 23.2.2022 <https://www.pgc.umn.edu/guides/stereo-derived-elevation-models/stereo-usage-guidelines/>.

ArcticDEM 2018a. Introduction to ArcticDEM. University Of Minnesota. Viitattu 23.2.2022 <https://www.pgc.umn.edu/guides/arcticdem/introduction-to-arcticdem/>.

–2018b. ArcticDEM. University of Minnesota. Viitattu 23.2.2022 <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>.

Arundel, S. T., Archuleta, C-A. M., Phillips, L. A., Roche, B. L. & Constance, E. W. 2015. 1-Meter Digital Elevation Model Specification. Techniques and Methods 11-B7. Viitattu 10.1.2022 <https://doi.org/10.3133/tm11B7>.

Bilker-Koivula, M. & Ollikainen, M. 2009. Suomen geoidimallit ja niiden käyttäminen korkeuden muunnoksissa. Geodeettinen laitos. Tiedote 29. Viitattu 19.1.2022 <https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/fgi/GLtiedote29.pdf>.

Buckley, S. M., Agram, P. S., Belz, J. E., Crippen, R. E., Gurrola, E. M., Hensley, S., Kobrick, M., Lavallo, M., Martin, J. M.; Neumann, M., Nguyen, Q. D., Rosen, P. A., Shimada, M., Simard, W & Tung, W. 2020. NASADEM User Guide v1; National Aeronautics and Space Administration: Washington, DC, USA. Viitattu 24.2.2022 https://lpdaac.usgs.gov/documents/592/NASADEM_User_Guide_V1.pdf.

CCRS 2019. Canada Centre for remote Sensing: Remote Sensing Tutorials. Viitattu 10.2.2022 <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>.

- Copernicus DEM 2020. Copernicus Digital Elevation Model Product Handbook. Viitattu 20.1.2022 https://spacedata.copernicus.eu/documents/20126/0/GEO1988-CopernicusDEM-SPE-002_ProductHandbook_11.00.pdf.
- Courty, L. G., Soriano-Monzalvo, J. C. & Pedrozo-Acuña, A. 2019 Evaluation of open-access global digital elevation models (AW3D30, SRTM, and ASTER) for flood modelling purposes. *Journal of Flood Risk Management* Vol. 12. No S1. Viitattu 17.2.2022 <https://doi.org/10.1111/jfr3.12550>.
- Deilami, K. & Hashim, M. 2011. Very High Resolution Optical Satellites for DEM Generation: A Review. *European Journal of Scientific Research* Vol. 49. No 4, 542–554.
- 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 Sensing* Vol. 52. No 2, 179–197. Viitattu 15.2.2022 <https://doi.org/10.1080/15481603.2015.1019708>.
- Earthdata 2019. New Version of the ASTER GDEM. Viitattu 16.2.2022 <https://earthdata.nasa.gov/learn/articles/new-aster-gdem>.
- Earthdata 2020. NASADEM: Creating a New NASA Digital Elevation Model and Associated Products. Viitattu 15.2.2022 <https://earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measurements/nasadem>.
- eoPortal 2022. TDX. Viitattu 21.2.2022 <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tandem-x>.
- ESA 2020. Copernicus DEM: 30 meter dataset now publicly available. Viitattu 20.1.2022 https://spacedata.copernicus.eu/explore-more/news-archive/-/asset_publisher/Ye8egYeRPLEs/blog/id/434960.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R. & Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D. & Alsdorf, D. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Review Of Geophysics* Vol. 45. Viitattu 20.1.2022 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2005RG000183>.
- Fisher, P. F. & Tate, N. 2006. Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in Physical Geography* Vol. 30. No 4, 467–489. Viitattu 20.1.2022 <http://doi.org/10.1191/0309133306pp492ra>.
- Garrote, J. 2022. Free Global DEMs and Flood Modelling—A Comparison Analysis for the January 2015 Flooding Event in Mocuba City (Mozambique). *Water* Vol. 14. No 2. Viitattu 15.1.2022 <https://doi.org/10.3390/w14020176>.
- Gdulová, K., Marešová, J. & Moudrý, V. 2020. Accuracy assessment of the global TanDEM-X digital elevation model in a mountain environment. *Remote*

Sensing of Environment Vol. 241. Viitattu 29.1.2022
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111724>.

González-Moradas, M. & Viveen, W. 2020. Evaluation of ASTER GDEM2, SRTMv3.0, ALOS AW3D30 and TanDEM-X DEMs for the Peruvian Andes against highly accurate GNSS ground control points and geomorphological-hydrological metrics. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 237. Viitattu 25.1.2022
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111509>.

Guth, P. L. & Geoffroy, T. M. 2021. LiDAR point cloud and ICESat-2 evaluation of 1 second global digital elevation models: Copernicus wins. *Transactions in GIS*. Vol. 25. No 5, 2245–2261. Viitattu 28.2.2022
<https://doi.org/10.1111/tgis.12825>.

Guth, P. L., Van Niekerk, A., Grohmann, C. H., Muller, J-P., Hawker, L., Florinsky, I. V., Gesch, D., Reuter, H. I., Herrera-Cruz, V., Riazanoff, S. López-Vázquez, C., Carabjal, C. C., Albinet, C. & Strobl, P. 2021. Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. *Remote Sensing* Vol. 13, 1–9, 3581. Viitattu 20.1.2022
<https://doi.org/10.3390/rs13183581>.

Hawker, L., Bates, P., Neal, J. & Rougier, J. 2018. Perspectives on Digital Elevation Model (DEM) Simulation for Flood Modeling in the Absence of a High-Accuracy Open Access Global DEM. *Frontiers in Earth Science* Vol. 6. Viitattu 15.1.2022
<https://doi.org/10.3389/feart.2018.00233>.

Hawker, L., Neal, J. & Bates, P. 2019. Accuracy assessment of the TanDEM-X 90 Digital Elevation Model for selected floodplain sites. *Remote Sensing of Environment* Vol. 232. Viitattu 16.1.2022
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111319>.

Hawker, L. & Neal, J. 2021. FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM). Viitattu 22.2.2022
<https://data.bristol.ac.uk/data/data-set/25wfy0f9ukoge2gs7a5mqpq2j7>.

Hengl, T., Leal Parente, L., Krizan, J. & Bonannella, C. 2020. Continental Europe Digital Terrain Model at 30 m resolution based on GEDI, ICESat-2, AW3D, GLO-30, EUDEM, MERIT DEM and background layers (v0.3). Zenodo. Viitattu 22.2.2022
<https://doi.org/10.5281/zenodo.4724549>.

Ilmasto-opas 2022. Nykyinen ilmasto - 30 vuoden keskiarvot. Viitattu 14.2.2022.
https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/1c8d317b-5e65-4146-acda-f7171a0304e1/nykyinen-ilmasto-30-vuoden-keskiarvot.html#h_Pilvisyys_ja_auringonpaiste.

InSAR Principles 2007. Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. ESA TM-19. https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf.

JPL 2022. SRTM. Viitattu 15.2.2022. <https://science.jpl.nasa.gov/projects/srtm/>.

KMTK laatumalli 2016. Kansallisen maastotietokannan laatumalli: Korkeusmallit. V1.3. Viitattu 15.1.2022

https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/attachments/2017/05/KMTK_korkeusmallit_laatusakirja_2017-01-02.pdf.

Kolecka, N. & Kozak, J. 2014. Assessment of the accuracy of SRTM C- and X-Band high mountain elevation data: A case study of the Polish Tatra Mountains. *Pure Applied Geophysics* Vol. 71, 897–912. Viitattu 15.2.2022 <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00024-013-0695-5.pdf>.

LaLonde, T., Shortridge, A. & Messina, J. 2010. The influence of land cover on shuttle radar topography mission (SRTM) elevations in low-relief areas. *Transactions in GIS* Vol. 14. No 4, 461–479. Viitattu 17.1.2022 <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2010.01217.x>.

Laurila, P. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. 4. painos. Rovaniemen ammattikorkeakoulun julkaisusarja D nro. 3. Rovaniemen ammattikorkeakoulu.

Liikennevirasto 2017. Tie- ja ratahankkeiden maastotiedot. Mittausohje. Liikenneviraston ohjeita 18/2017. Viitattu 12.1.2022 https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-18_maastotiedot_mittausohje_web.pdf.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Boehm, J. 2013. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. De Gruyter, Inc. 690.

Magruder, L., Neuenschwander, A. & Klotz, B. 2021. Digital terrain model elevation corrections using space-based imagery and ICESat-2 laser altimetry. *Remote Sensing of Environment* Vol. 264. Viitattu 10.1.2022 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112621>.

Marešová, J., Gdulová, K., Pracná, P., Moravec, D., Gábor, L., Prošek, J., Barták, V. & Moudrý, V. 2021. Applicability of Data Acquisition Characteristics to the Identification of Local Artefacts in Global Digital Elevation Models: Comparison of the Copernicus and TanDEM-X DEMs. *Remote Sensing* Vol. 13. No 19, 3931. Viitattu 18.2.2022 <https://doi.org/10.3390/rs13193931>.

Meddens, A. J. H., Vierling, L. A., Eitel, J. U. H., Jennewein, J. S., White, J. C. & Wulder, M. A. 2018. Developing 5 m resolution canopy height and digital terrain models from WorldView and ArcticDEM data. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 218, 174–188. Viitattu 10.1.2022 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.010>.

MERIT DEM 2018. Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM. Viitattu 18.2.2022 http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM/index.html.

Mesa-Mingorance, J. L. & Ariza-López, F.J. 2020. Accuracy Assessment of Digital Elevation Models (DEMs): A Critical Review of Practices of the Past Three Decades. *Remote Sensing* Vol. 12. No 16, 1–27, 2630. <https://doi.org/10.3390/rs12162630>.

Meyer, F. J. 2019. *Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Principles, Data Access, and Basic Processing Techniques*. Teoksessa Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Thapa, R. B & Cherrington, E (toim.), *The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring*

and Biomass Estimation, 21–44. Viitattu 18.2.2022
<https://doi.org/10.25966/nr2c-s697>.

Meyer, F. J. 2021. GEOS 657. Microwave Remote Sensing. Graduate Level Course at the University Of Alaska Fairbanks. Lecture 12: Concepts of InSAR and Its Application to Mapping Topography. Viitattu 12.2.2022 <https://radar.community.uaf.edu/wp-content/uploads/sites/667/2021/02/2021-Lectures12-ConceptsofInSAR-smaller.pdf>.

MML 2022. Korkeusmallit. Viitattu 7.1.2022 <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/korkeusmallit>.

NASA 2022. Introduction to the Electromagnetic Spectrum. Viitattu 10.2.2022.
https://science.nasa.gov/ems/01_intro.

NewScientist - ASTER/METI/NASA 2009. Satellite creates best topographic map of the Earth. Viitattu 16.2.2022 <https://www.newscientist.com/gallery/2009june30-topographical-map/>.

NGA 2022. World Geodetic System 1984 (WGS 84). Viitattu 10.1.2022
<https://earth-info.nga.mil/index.php?dir=wgs84&action=wgs84>.

Noh, M-J. & Howat, I. M. 2015. Automated stereo-photogrammetric DEM generation at high latitudes: Surface Extraction with TIN-based Search-space Minimization (SETSM) validation and demonstration over glaciated regions. *GIScience & Remote Sensing* Vol. 52. No 2, 198–217. Viitattu 23.2.2022
<https://doi.org/10.1080/15481603.2015.1008621>.

OpenTopography – AW3D30 2022. ALOS World 3D - 30m. Viitattu 17.2.2022
<https://portal.opentopography.org/datasetMetadata?otCollectionID=OT.112016.4326.2>.

OpenTopography – Copernicus DEM 2021. Copernicus Global Digital Elevation Models. Viitattu 18.2.2022 <https://portal.opentopography.org/datasetMetadata?otCollectionID=OT.032021.4326.1>.

OpenTopography – NASADEM 2022. NASADEM Global Digital Elevation Model. Viitattu 16.2.2022 <https://portal.opentopography.org/datasetMetadata?otCollectionID=OT.032021.4326.2>.

Porter, C., Morin, P., Howat, I., Noh, M-J., Bates, B., Peterman, K., Keeseey, S., Schlenk, M., Gardiner, J., Tomko, K., Willis, M., Kelleher, C., Cloutier, M., Husby, E., Foga, S., Nakamura, H., Platson, M., Wethington, M, Jr., Williamson, C., Bauer, G., Enos, J., Arnold, G., Kramer, W., Becker, P., Doshi, A., D'Souza, C., Cummens, P., Laurier, F. & Bojesen, M. 2018. ArcticDEM. Viitattu 20.1.2022
<https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>.

Rizzoli, P., Martone, M., Rott, H. & Moreira, A. 2017. Characterization of Snow Facies on the Greenland Ice Sheet Observed by TanDEM-X Interferometric SAR Data. *Remote Sensing* Vol. 9. No 4, 315. Viitattu 22.1.2022
<https://doi.org/10.3390/rs9040315>.

- Rodríguez, E., Morris, C. S. & Belz, J. E. 2006. A global assessment of the SRTM performance. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* Vol. 72, No 3, 249–260. Viitattu 24.2.2022 <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.404.4045&rep=rep1&type=pdf>
- Sampson, C. C., Smith, A. M., Bates, P. D., Neal, J. C. & Trigg, M. A. 2016. Perspectives on open access high resolution digital elevation models to produce global flood hazard layers. *Frontiers Earth Science*. Vol. 3. No 85. Viitattu 27.1.2022 <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00085>.
- Satellite Imaging Corporation 2022. ASTER Satellite Sensor. Viitattu 10.2.2022 <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/aster/>.
- Schumann, G. J-P. & Bates, P. D. 2018. The need for a high-accuracy, open-access global DEM. *Frontiers Earth Science* Vol. 6. Viitattu 10.1.2022. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2018.00225>.
- Schumann, G. J-P. & Bates, P. D. 2020. Editorial: The Need for a High-Accuracy, Open-Access Global Digital Elevation Model. *Frontiers Earth Science* Vol. 8. viitattu 23.1.2022 <https://doi.org/10.3389/feart.2020.618194>.
- Sentinel Online 2020. Copernicus DEM 30 metre dataset now freely available 01 December 2020. Viitattu 18.2.2022 https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/news/-/asset_publisher/xR9e/content/copernicus-dem-30-metre-dataset-now-freely-available.
- Strobl, P. A., Bielski, C., Guth, P. L., Grohmann, C. H., Muller, J-P., López-Vázquez, C., Gesch, D. B, Amatulli, G., Riazanoff, S. & Carabajal, C. 2021. The Digital Elevation Model Intercomparison eXperiment DEMIX, a community-based approach at global DEM benchmarking. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Vol. XLIII-B4. XXIV ISPRS Congress (2021 edition). Viitattu 10.1.2022 <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLIII-B4-2021/395/2021/isprs-archives-XLIII-B4-2021-395-2021.pdf>.
- 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. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* Vol. 83–84, 137–145. Viitattu 20.1.2022 <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.06.003>.
- Tachikawa, T., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., Danielson, J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J., Abrams, M., Crippen, R. & Carabajal, C. 2011. ASTER global digital elevation model version 2—Summary of validation results. Report to the ASTER GDEM Version 2. Validation Team. Viitattu 16.2.2022 https://www.researchgate.net/publication/255280829_ASTER_Global_Digital_Elevation_Model_Version_2_-_Summary_of_validation_results.
- Tadano, T., Nagai, H., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K. & Iwamoto, H. 2016. GENERATION OF THE 30 M-MESH GLOBAL DIGITAL SURFACE MODEL BY ALOS PRISM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Vol. XLI-B4. XXIII ISPRS

Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. Viitattu 18.2.2022
<https://pdfs.semanticscholar.org/d5c2/be3e9f4533b0cd256bad47cbe308cde43229.pdf>.

Tadano, T., Ishida, H., Oda, F., Naito, S. & Iwamoto, H. 2014. PRECISE GLOBAL DEM GENERATION BY ALOS PRISM. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. II-4, ISPRS Technical Commission IV Symposium, 14–16 May 2014, Suzhou, China. Viitattu 17.2.2022 <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/II-4/71/2014/isprsannals-II-4-71-2014.pdf>.

Takaku, J., Tadono, T. & Tsutsui, K. 2014. Generation of high resolution global DMS from ALOS PRISM. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. XL-4. ISPRS Technical Commission IV Symposium, 14–16 May 2014, Suzhou, China. Viitattu 17.2.2022 <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-4/243/2014/isprsarchives-XL-4-243-2014.pdf>.

Tarekegn, T. H. & Sayama, T. 2013. Correction of SRTM artefacts by fourier transform for flood inundation modelling. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Seried B1 Vol. 69. No 4. Viitattu 14.1.2022
https://doi.org/10.2208/jscejhe.69.1_193.

Treuhaft, R. 2022. Interferometry Explained – More Detail. Jet Propulsion Laboratory. Viitattu 12.2.2022 <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/instrumentinterfmore.html>.

Uemoto, J. 2021. Refinement of interferometric SAR parameters using digital terrain model as an external reference. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. 175, 34–43. Viitattu 10.1.2022
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.02.017>.

USNA 2021. EGM96 and EGM2008 and Other Geoid Grids. Viitattu 10.1.2022
https://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/md_help/html/egm96.htm#GDAL_reads.

USGS 2018. USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. Viitattu 15.2.2022
https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects.

USGS 2019. NASA and METI Release ASTER Global DEM Version 3. Viitattu 16.2.2022 <https://lpdaac.usgs.gov/news/nasa-and-meti-release-aster-global-dem-version-3/>.

USGS 2020. Release of NASADEM Data Products. Viitattu 16.2.2022
<https://lpdaac.usgs.gov/news/release-nasadem-data-products/>.

USGS 2022. NASADEM_HGT v001. Viitattu 16.2.2022
https://lpdaac.usgs.gov/products/nasadem_hgtv001/.

Uuemaa, E., Ahi, S., Montibeller, B., Muru, M. & Kmoch, A. 2020. Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). *Remote Sensing* Vol. 12. No 21, 1–23, 3482. Viitattu 3.1.2022 <https://doi.org/10.3390/rs12213482>.

Vermeer, M. 2019. Geodesia: Kaiken perusta. Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE + TEKNOLOGIA 3/2019. Viitattu 20.1.2022 <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/41333>.

Wang, S., Ren, Z., Wu, C., Lei, Q., Gong, W., Ou, Q., Zhang, H., Ren, G. & Li, C. 2019. DEM generation from Worldview-2 stereo imagery and vertical accuracy assessment for its application in active tectonics. *Geomorphology* Vol. 336, 107–118. Viitattu 19.2.2022 <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.016>.

Wechsler, S. P. 2007. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and Earth System Sciences* Vol. 11, 1481–1500. Viitattu 5.2.2022 <https://hess.copernicus.org/articles/11/1481/2007/hess-11-1481-2007.pdf>.

Wise, S. 2007. Effect of differing DEM creation methods on the results from a hydrological model. *Computers & Geosciences* Vol. 33. No 10, 1351–1365. Viitattu 14.1.2022 <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.003>.

Wise, S. 2011. Cross-validation as a means of investigating DEM interpolation error. *Computers & Geosciences* Vol. 37. No 8, 978–991. Viitattu 19.1.2022 <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.12.002>.

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 *Geophysical Research Letters* Vol. 44. No 11, 5844–5853. Viitattu 13.2.2022 <https://doi.org/10.1002/2017GL072874>.

YIV 2015. Yleiset inframallivaatimukset. Osa 3 Lähtötiedot. Viitattu 4.2.2022 https://buildingsmart.fi/wp-content/uploads/2016/11/YIV2015_Mallinnusohjeet_OSA3_Lahtotiedot_V_1_0.pdf.