

SUOMEN YMPÄRISTÖN HAVAINNOINTI
SATELLIITTAINEISTOSTA

Anni Leppämäki

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

2021

Tekniikka ja liikenne
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

| | | | |
|--------------------------------|---|-------|------|
| Tekijä | Anni Leppämäki | Vuosi | 2021 |
| Ohjaaja(t) | Teuvo Heimonen | | |
| Toimeksiantaja | Lapin ammattikorkeakoulu | | |
| Työn nimi | Suomen ympäristön havainnointi satelliittiaineistosta | | |
| Sivu- ja liitesivumäärä | 41 + 0 | | |

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä Suomen ympäristön havainnointiin hyödyntämällä satelliittikaukokartoituksesta saatavaa aineistoa. Työssä tutustuttiin pohjatietoon ympäristön havainnoinnista, satelliittikaukokartoituksesta, kaukokartoitussatelliiteista sekä satelliittidatasta.

Työssä perehdyttiin satelliittidatan hyödyntämiseen ja satelliittikaukokartoitukseen Suomessa. Työssä esiteltiin erilaisia satelliittidatajärjestelmiä, jotka mahdollistavat satelliittidatan käsittelyn.

Tutkimusosiossa tutustuttiin ympäristön havainnointiin satelliittiaineistosta käytännön tasolla. Opinnäytetyössä syvennettiin tietoutta moneen satelliittikaukokartoituksen osa-alueeseen, ja osaaminen kehittyi.

Avainsanat

Kaukokartoitus, satelliittikuvaus, prosessointi, analyysi

Technology, Communication and
Transport
Degree Programme in Land
Surveying Engineering
Bachelor of Engineering

| | | | |
|--------------------------|---|------|------|
| Author | Anni Leppämäki | Year | 2021 |
| Supervisor | Teuvo Heimonen | | |
| Commissioned by | Lapland University of Applied Sciences | | |
| Subject of thesis | Observing the Environment of Finland from Satellite Material | | |
| Number of pages | 41 + 0 | | |

The purpose of this thesis was to study observing the environment of Finland from satellite material. The study includes exploring the theory of earth observation, satellite imaging, earth observation satellites and satellite data.

In this thesis study satellite data processing was explored in theory and observing the environment of Finland was explored in practice. In this thesis The study process remarkably built up the author's knowledge in various fields of satellite remote sensing.

This thesis explores how the satellite data can be used in observing environment and how remote sensing from satellites is utilized in Finland. This study presents some satellite data services used in satellite data processing.

Key words

Analysis, processing, remote sensing, satellite imagery

SISÄLLYS

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 6 |
| 2 | SATELLIITTIKAUKOKARTOITUS | 7 |
| 3 | KAUKOKARTOITUSSATELLIITIT | 9 |
| 3.1 | Copernicus..... | 9 |
| 3.2 | Landsat..... | 10 |
| 3.3 | EOS..... | 10 |
| 3.4 | NOAA POES..... | 11 |
| 3.5 | RADARSAT | 11 |
| 4 | SATELLIITTIDATAN HYÖDYNTÄMINEN | 12 |
| 5 | SATELLIITTIKAUKOKARTOITUS SUOMESSA..... | 15 |
| 5.1 | SYKE | 15 |
| 5.2 | Paikkatietokeskus | 16 |
| 5.3 | Suomen Metsäkeskus..... | 17 |
| 5.4 | Bitcomp..... | 17 |
| 5.5 | Aalto-yliopisto | 17 |
| 5.6 | ICEYE | 18 |
| 6 | SATELLIITTIDATAJÄRJESTELMÄT | 19 |
| 6.1 | EarthExplorer..... | 19 |
| 6.2 | EO Browser | 20 |
| 6.3 | Open Access Hub..... | 21 |
| 6.4 | RUS | 22 |
| 6.5 | SNAP..... | 23 |
| 6.6 | TARKKA | 23 |
| 6.7 | QGIS..... | 24 |
| 7 | SUOMEN YMPÄRISTÖN TUTKIMUS SATELLIITEISTA | 26 |
| 7.1 | Lumen tutkimus satelliiteista | 26 |
| 7.2 | Lumipeittoalan tutkimus Sentinel-2-datasta | 27 |
| 8 | TULOKSET..... | 36 |
| 9 | POHDINTA..... | 38 |
| | LÄHTEET..... | 40 |

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

| | |
|-------|---|
| AI | Artificial Intelligence |
| AVHRR | Advanced Very High-Resolution Radiometer |
| DEM | Digital Elevation Model |
| EE | EarthExplorer |
| EEA | European Environment Agency |
| EO | Earth Observation |
| EOS | Earth Observing System |
| EROS | Earth Resources Observation |
| ESA | European Space Agency |
| ETM+ | Enhanced Thematic Mapper Plus |
| FGI | Finnish Geospatial Research Institute |
| FTY | Forest Type |
| GIF | Graphics Interchange Format |
| GRD | Ground Range Detected |
| ML | Machine Learning |
| MSI | Multi Spectral Instrument |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NOAA | National Oceanic and Atmospheric Administration |
| OLI | Operational Land Imager |
| POES | Polar Orbiting Environmental Satellites |
| QZSS | Quasi-Zenith Satellite System |
| RAR | Real Aperture Radar |
| RUS | Research and User Support |
| SAR | Synthetic-Aperture Radar |
| SCA | Snow-covered area |
| SCE | Snow Cover extend |
| SNAP | Sentinel Application Platform |
| SWE | Snow water equivalent |
| SYKE | Suomen Ympäristökeskus |
| TIRS | Thermal Infrared Sensor |
| USGS | U.S. Geological Survey |
| WKT | Well-Known-Text |

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aihe on Suomen ympäristön havainnointi satelliittiaineistosta. Tutkimuksen tarkoituksena on perehtyä ympäristön havainnointiin satelliittiaineistosta, siihen käytettäviin ohjelmistoihin, sovelluksiin sekä näiden mahdollisuuksiin. Tarkoituksena on myös suorittaa käytännön tutkimusta satelliittidatapalveluilla satelliittiaineistoa hyödyntäen sekä edistää omaa osaamista satelliittiaineiston käsittelyssä, prosessoinnissa ja analysoinnissa.

Projektissa tutustutaan alan kirjallisuuteen satelliittikaukokartoituksesta, satelliittiaineistosta sekä satelliittiaineiston prosessoinnista ja analysoinnista. Siinä tutustutaan myös aihekokonaisuutta käsitteleviin muihin tiedejulkaisuihin. Niin ikään siinä perehdytään satelliittiaineiston havainnoinnin järjestelmiin ja tarkastellaan tarkemmin projektin kannalta kiinnostavampia havaintoja. Projektin aikana on myös otettu yhteyttä suomalaisiin satelliittialan asiantuntijoihin satelliittidatan havainnoinnista, tutkimuksesta ja mahdollisuuksista Suomen ympäristön kannalta. Heidän haastatteluistaan on esitetty projektin kannalta olennaisia seikkoja.

Opinnäytetyön päätavoitteena on syventyä Suomen ympäristön havainnointiin satelliittiaineistosta käytännön tasolla ja toteuttaa omaa tutkimusta satelliittiaineistoa hyödyntäen satelliittidatajärjestelmiä. Henkilökohtaisena tavoitteena on kehittää ja soveltaa omaa osaamista satelliittikaukokartoituksen käytänteissä. Työssä perehdytään Suomen ympäristön havainnoinnin tarkoitukseen soveltuviin satelliittidatapalveluihin ja menetelmiin. Tutkimukseen valitaan niistä käyttötarkoitukseen soveltuvimmat ja suoritetaan niillä omaa Suomen ympäristön havainnointia satelliittidataa prosessoimalla sekä sitä analysoimalla.

2 SATELLIITTIKAUKOKARTOITUS

Kaukokartoituslaite voi kulkea lentokoneen, helikopterin, miehittämättömän ilma-aluksen eli dronen, avaruussukkulun tai satelliitin mukana. Kaukokartoituslaite voi olla myös maanpäällinen, esimerkiksi asennettu sensori, joka voi olla mobiililaitteessa taikka eläimen tai ihmisen mukana. Kaukokartoitussatelliitit havainnoivat Maata avaruudesta, ja tästä käytetään kaukokartoituksessa lyhennettä EO eli Earth observation. Kaukokartoitussatelliitit havainnoivat Maata esimerkiksi kuvaamalla ja mittaamalla Maan pintaa, vesistöjä ja ilmakehää. Suurin osa Maan kaukokartoitusdatasta on saatu satelliittikaukokartoituksen avulla avaruudesta.

Kaukokartoitussatelliitit mittaavat halutusta kohteesta dataa sähkömagneettisten aaltojen avulla. Kohteen fysikaaliset, kemialliset ja geometriset ominaisuudet vaikuttavat sähkömagneettisen säteilyn heijastusominaisuuksiin, joiden avulla voidaan mitata myös kohteen muita ominaisuuksia. Kohteesta havaittava sähkömagneettinen säteily on yleisimmin kohteesta heijastuvaa auringon säteilyä, kohteen, lämpösäteilyä tai mittalaitteen lähettämää ja kohteen heijastamaa säteilyä. Kun säteily kulkee ilmakehän läpi, muuttuu sen suunta, voimakkuus sekä spektrinen jakauma. Näitä vaikutuksia pyritään mallintamaan ja niistä aiheutuvia virheitä korjaamaan. (ICEYE 2021b.)

Kaukokartoitusdataa voidaan kerätä passiivisilla tai aktiivisilla laitteilla. Passiiviset laitteet, kuten erilaiset kamerat, keilaimet, radiometrit ja spektrometrit, mittaavat kohteesta heijastunutta tai sen lähettämää säteilyä eli emissiota, kuten valoa ja lämpöä. Passiivinen kaukokartoitus ei onnistu pimeällä tai pilvien lävitse. Aktiiviset laitteet lähettävät itse sähkömagneettista säteilyä ja mittaavat takaisin maanpinnasta tai atmosfääristä heijastuneen ja sironneen säteilyn määrää. (ICEYE 2021b.)

Useat aktiiviset laitteet sisältävät tutka- ja laser-teknologiaa. RAR-tutka eli todellisen apertuurin tutka sekä SAR-tutka eli synteettisen apertuurin tutka ovat menetelmiä, joita hyödynnetään satelliittikaukokartoituksessa. Tutkaan perustuva satelliittikaukokartoitus on kustannustehokas menetelmä, sillä sen ylikulkuaikaan

ei vaikuta pilvipeitteisyys eivätkä muut sääolosuhteet. Kartoituksen sykli perustuu satelliitin kiertorataparametreihin, jotka määrittävät ajan kuvausten välillä. SAR-tutka on ainoa kaukokartoitusinstrumentti, joka pystyy näkemään pilvien lävitse ja pystyy tuottamaan luotettavaa dataa pimeällä. Tämä on tärkeää erityisesti Suomen kannalta, sillä Pohjois-Eurooppa on yksi niistä alueista, joka on pilvien peittävä suuren osan ajasta. Muita tällaisia ovat esimerkiksi Kaakkois-Aasia sekä Etelä-Amerikan sademetsät. Tämän vuoksi SAR-tutka on suosittu satelliittikuvauslaite. Sen haittapuolia on heikko resoluutio, koska kiertorata on 600–900 kilometriä. (ICEYE 2021b.)

Satelliiteilla voidaan kuvata Maan pintaa, vesistöjä ja ilmakehää sekä mitata maan geoidia, vetovoimaa ja magneettikenttää. Satelliittien avulla saadaan ajantasaista tietoa ympäristöstä globaalisti, sillä satelliittikuvauksella voidaan kattaa laajoja alueita säännöllisin väliajoin. Satelliittikaukokartoitus mahdollistaa myös vaikeasti tai mahdottomasti lähestyttävien alueiden tutkimuksen. Satelliittien avulla voidaan havainnoida ympäristöä kaikkialla Maapallolla lähes samanaikaisesti. (Maanmittauslaitos 2021.)

3 KAUKOKARTOITUSSATELLIITIT

Kaukokartoitussatelliittien yksi tärkeistä tehtävistä on jatkuva maailmanlaajuinen ympäristön havainnointi eli ympäristötiedon kerääminen. Ensimmäiset kaukokartoitussatelliitit olivat asevoimien ja tiedotuspalvelujen operoimia tiedustelusatelliitteja. Muita satelliitteja ovat esimerkiksi sääsatelliitit, joita hyödynnetään sään seuraamisessa ja ennustamisessa. Kaukokartoitussatelliitteja käytetään nykyään myös hätätilojen monitorointiin, meritilojen ja rajojen valvontaan sekä ympäristönsuojeluun. Tällä hetkellä kaukokartoitusta tuodaan esille yhä enemmän ympäristön suojelun yhtenä tehokkaimpana työvälineenä.

Yhdysvaltalainen Landsat-järjestelmä on ensimmäinen ei-sotilaallinen operatiivinen satelliittikaukokartoitusjärjestelmä. Se on ollut toiminnassa vuodesta 1972. Euroopan satelliittikaukokartoitusjärjestelmä Copernicus on rahoitettu Euroopan unionin (EU) julkisin varoin ja on ollut toiminnassa vuodesta 2015. Näiden lisäksi on kaupallisia kaukokartoitussatelliitteja, joiden tarkkuus on usein parempi mutta kattavuus heikompi. (Maanmittauslaitos 2021.)

3.1 Copernicus

Copernicus on EU:n ja ESA:n yhteinen kaukokartoituksen ohjelma. Sentinel-1, -2, -3, -5p ja -6 ovat Copernicus-ohjelmalle kohdennettuja satelliittihankkeita. Sentinel-4 ja -5 ovat Eumetsatin sääsatelliitteja. ESA ja Eumetsat vastaavat yhdessä satelliittien toiminnoista. (Copernicus 2021b.) Valmistuessaan Copernicus-ohjelma sisältää kuusi satelliittihanketta, joissa kaikissa toimii kaksi satelliittia. Copernicus-ohjelman tarjoama data on maksutonta ja avoimesti käytettävissä. Copernicus on tällä hetkellä maailman suurin satelliittidatan tuottaja. Tässä tutkimuksessa perehdytään tarkemmin Sentinel-1 ja -2 satelliittihankkeisiin, sillä niistä saatavaa aineistoa hyödynnetään tässä tutkimuksessa.

Sentinel-1 satelliittihanke koostuu Sentinel-1A ja -1B satelliiteista. Ne toimittavat dataa ympäri vuorokauden, sillä ne kantavat mukanaan C-kanavan SAR-instrumentteja. Nämä tutkat mahdollistavat kuvantamisen myös pimeässä ja pilvisessä säässä. Sentinel-1-kokonaisuus kuvaa koko Maapallon kuuden päivän välein. (ESA 2021c.)

Sentinel-2-satelliittihankekokonaisuuden muodostavat Sentinel-2A- ja Sentinel-2B-satelliitit. Kumpikin kantaa mukanaan optista MSI-instrumenttia, jossa on 13 spektrikanavaa. Näiden instrumenttien spatiaalinen erotuskyky on 10–60 metriä, mikä riippuu spektrikanavasta. Sentinel-2-kokonaisuus kuvaa saman alueen viiden päivän välein päiväntasaajalla. Sentinel-2-data on jaettu tasoihin 1C ja 2A. Satelliittien tuottama data on myös radiometrisesti ja geometrisesti oikaistu ja leikattu 110 x 110 kilometrin osioiksi. (Snow Cover Mapping with Sentinel-2 2019.)

3.2 Landsat

Landsat on NASAn toteuttama kaukokartoitussatelliittiohjelma, jota operoi USGS. Landsat on maailman pisimpään käynnissä ollut optisen kaukokartoituksen satelliittijärjestelmä. Sen satelliitit ovat kuvanneet Maata avaruudesta käsin jatkuvasti vuodesta 1972. Landsat-satelliittijärjestelmästä Landsat 7- ja Landsat 8 -satelliitit ovat tällä hetkellä aktiivisia ja tuottavat aineistoa. Landsat 9 -satelliitti on kehitteillä, ja sen laukaisuvalmius-ajankohta on syyskuussa 2021. Landsat 7 -satelliitin mukana on ETM+-sensori eli temaattinen kartoittaja. Landsat 8 kantaa mukanaan OLI-kuvauslaitetta sekä TIRS-instrumenttia eli termisen infrapunan sensoria. (USGS 2021b.)

3.3 EOS

EOS on NASA:n satelliittikartoitusohjelma, johon myös Landsat-satelliitit kuuluvat. Terra eli EOS AM-1 on EOS:n lippulaiva, jonka tehtävänä on ilmaston tutkimus. Terra kantaa mukanaan viittä erilaista kaukokartoituksen sensoria Maan ympäristön tarkkailemiseksi. ASTER on lämpöemissio- ja heijastusradiometri,

CERES on pilvien ja Maan säteilevän energian järjestelmä, MISR on monikulmainen kuvaus-spektrofotometri, MOPITT mittaa troposfäärin saasteita, ja MODIS on kohtalaisen resoluution kuvaus-spektroradiometri. (NASA 2021a.)

Muita EOS:n aktiivisia satelliitteja ovat Aqua, joka tutkii veden kiertokulkua. Aura, joka tutkii otsonisuhdanteita sekä muutoksia ilmanlaadussa. CloudSat, joka mittaa pilvien rakennetta ja päällekkäisyyttä, sekä niiden neste-, jää- ja vesipitoisuuksia. CALIPSO tutkii aerosolien ja pilvien osuutta Maan ilmaston sääntelyssä. SMAP mittaa maanperän kosteutta sekä olomuotoa. OCO-2 mittaa atmosfäärin hiilidioksidipitoisuuksia ja ICESat-2 mannerjään massaa, pilvien ja aerosolien korkeuksia sekä Maan topografiaa ja kasvillisuuden ominaisuuksia. (NASA 2021b.)

3.4 NOAA POES

NOAA POES on NOAA:n eli Yhdysvaltain liittovaltion sää- ja valtamerentutkimusorganisaation satelliittijärjestelmä. NOAA POES -satelliitit kiertävät Maata polaariradalla ja tuottavat dataa sään ennustamista ja kasvillisuuden tutkimusta varten. AVHRR on satelliittien mukanaan kantama laajakaista-radiometri, joka aistii lähi-infrapunan sekä elektromagneettisen spektrin termisen infrapunan. NOAA POES AVHRR -dataa on vapaasti saatavilla esimerkiksi ESA:n TPM Online Dissemination -järjestelmästä. (ESA 2021a.)

3.5 RADARSAT

RADARSAT on CSA:n eli Kanadan avaruusjärjestön kaupallinen satelliittijärjestelmä. Radarsat-1-satelliitti oli käytössä 1995–2013. RADARSAT-2 on laukaistu 2007 ja on edelleen aktiivinen. RADARSAT-satelliitit kantavat mukanaan SAR-instrumentteja. RADARSAT-2-dataa on saatavilla vapaasti ESA:n TPM Online Dissemination -järjestelmästä. (ESA 2021b.)

4 SATELLIITTIDATAN HYÖDYNTÄMINEN

Satelliitti-instrumentit tallentavat säteilyä, joka prosessoidaan raakadataksi, jota voidaan analysoida. Analysointia voidaan tehdä erilaisilla satelliittidataohjelmistoilla selaimessa. Analyysia voidaan myös suorittaa ammattikäyttöön tarkoitetuilla kaukokartoitusohjelmistoilla tai käyttöön tarkoitetuilla algoritmeilla (ICEYE 2021b).

Satelliittidatan spatiaalinen resoluutio eli maastoerotuskyky tarkoittaa pienimmän erottuvan kohteen kokoa. Spektraalinen erotuskyky tarkoittaa instrumentin kykyä havaita aallonpituusalueita. Radiometrinen resoluutio tarkoittaa instrumentin kykyä tallentaa maastokohteesta tullut säteily eli, kuinka hyvin säteilyn voimakkuuden erot on havaittavissa. Temporaalinen erotuskyky tarkoittaa sitä, kuinka usein satelliitti kuvaa saman alueen maanpinnalla. Vaadittu resoluutio riippuu kuvauksen käyttötarkoituksesta. (ICEYE 2021b.)

Satelliittidata kehittyä jatkuvasti. Uusi teknologia ja sen nopea käyttöönotto mahdollistavat sen vauhdikkaan kehityskulun. Tarkemman resoluution satelliittiaineistojen yleistyessä mahdollisuudet lisääntyvät entisestään. Kun dataa on enemmän saatavilla, voidaan sitä yhdistää muualta saadun datan kanssa, analysoida tehokkaammin. Analysointia voidaan suorittaa yhä vaivattomammin koneoppimisen ja tekoälyn avulla.

Satelliiteista saatava kaukokartoitusdata mahdollistaa Maan resurssien, ekosysteemien ja ilmiöiden tehokkaan seurannan. Dataa voidaan hyödyntää monenlaisiin tieteellisiin, administratiivisiin sekä kaupallisiin tarkoituksiin. Oikea-aikainen sekä paikkansapitävä data auttaa käyttäjää ymmärtämään ihmisen vaikutuksia ympäristöön, jota taas voidaan hyödyntää tietopohjaiseen päätöksentekoon ja toimenpiteisiin. (ICEYE 2021b.)

Esimerkkejä satelliittidatan hyödyntämisestä:

- Energia: vesivarantojen, sademäärien, lumimäärien, verkostojen ja putkistojen seuranta sekä infrastruktuurien turvaaminen
- Maatalous: viljelykasvien ja -maiden seuranta, ruokaturvallisuuden seuranta, sadonkorjuun arviointi, kestävän maatalouden tukeminen
- Metsätalous: metsänhoidon suunnittelu ja laittomien hakkuiden torjunta
- Ilmastonmuutos: tieteellistä näyttöä geofysikaalisista muuttujista, ilmastoindikaattoreista ja ilmastoindekseistä
- Kalastus: laittoman kalastuksen torjunta
- Kansalaisturvallisuus ja humanitaarinen apu: koordinoitua ennusteita ja vastatoimet merkittävässä katastrofeissa ja humanitaarisissa kriiseissä
- Kehitys ja yhteistyö: sovelluksia maatalouden, ruokaturvallisuuden, metsän hävittämisen, aavikoitumisen sekä biodiversiteetin seurantaan
- Maankäyttö: kaupunki- ja aluesuunnittelu, infrastruktuurin suunnittelu ja rakentamisen seuranta sekä yksityiskohtaiset karttatuotteet
- Meriliikenne: merenkulun seuranta, jäävuorien seuranta ja öljyvuotojen havainnointi
- Terveys: ilmanlaadun seuranta ja tautien leviämisen kartoittaminen
- Vakuutukset: riskien mallintamisen sovellukset, hasardien ja tuhojen arviointi sekä korvausvaatimusten hallinta
- Turismi: rannikkoalueiden, lumipeitteiden ja vesien seuranta
- Turvallisuus: maa- ja rannikkorajojen valvonta
- Ympäristö: ilmakehän koostumuksen, lumen, jään ja biodiversiteetin tarkkailu sekä metsien, maaperän ja rannikkoalueiden seuranta sekä veden kierron parametrien, vesien laadun ja pinnan tasojen havainnointi.

(Copernicus Brochure 2015, 8–9)

Satelliiteista saatavaa dataa prosessoimalla saadaan luotettavaa ja selkeää kuvamateriaalia, joka on niin ihmisille kuin algoritmeille lukukelpoista. Koska satelliitit on varustettu erilaisin sensorein, on myös niiden tuottama datasisältö erilaista. Kun satelliittidataa halutaan prosessoida luettavaksi informaatioksi, on valittava tarkoin niin raakadatan lähde, analysointivälineet kuin prosessit. Näihin valintoihin vaikuttavat esimerkiksi prosessoinnin tarkoitus sekä lopputuotteen käyttötarkoitus. Koneoppivat (lyh. ML) algoritmit ovat tehokkaita työkaluja satelliittidatan analysointiin. Niitä voidaan hyödyntää esimerkiksi mallintamisessa, halutun informaation tunnistamiseen massiivisista datavirroista sekä muihin monimutkaisiin prosesseihin, jolloin datan tulkinta on nopeampaa ja helpompaa. Algoritmit voivat skannata valtavia määriä dataa ja kehittää mallinnuksia, havaita muutoksia sekä ennustaa tulevia tilanteita tekoälyn (lyh. AI) avulla. (ICEYE 2021.)

Satelliittidatan prosessointi:

1. datan hankinnan suunnittelu
 - haluttu alue, kuvan ominaisuudet, tiheys, ajoitus
2. kuvien hankinta ja niiden linkittäminen maa-asemalle
3. kuvien prosessointi analysointia varten
4. datan analysointi
 - tarvittaessa yhdistetään muualta hankittuun dataan
5. laadun valvonta
6. informaation vahvistus
7. luettavan informaation toimitus
 - esimerkiksi visualisoinnit ja raportit.

(ICEYE 2021.)

5 SATELLIITTIKAUKOKARTOITUS SUOMESSA

Satelliittikaukokartoituksesta saatavaa dataa voidaan hyödyntää Suomessa laajasti. Maailmalla suuria satelliittikaukokartoitusaineiston käyttökohteita ovat suurkaupunkien ilmansaasteiden tarkkailu sekä metsäpalojen ja muiden hasardien ajantasainen seuranta. Suomessa avointa satelliittidataa käytetään niin viljelysten, tulvien, levätilanteiden kuin laittomien metsähakkuiden seurantaan. Satelliittikaukokartoitusta hyödyntää niin valtion laitokset kuin paikkatiedon yritykset. Satelliittidataan perustuvaa liiketoimintaa on Suomessa yhä enenevässä määrin. Myös suomalaisia satelliitteja on laukaistu onnistuneesti avaruuteen.

5.1 SYKE

SYKE eli Suomen ympäristökeskus on valtion monialainen tutkimus- ja asiantuntijalaitos, joka pyrkii ratkaisemaan yhteiskunnallisia ympäristökysymyksiä. SYKE hyödyntää satelliittikaukokartoitusta Suomen ympäristön tilan seurannassa. SYKE seuraa esimerkiksi Itämeren pintaleväkukintoja sekä Itämeren ja Suomen suurimpien järvien pintalämpötiloja, sameutta, a-klorofyllipitoisuuksia, näkösyvyyttä sekä humuspitoisuuksia. SYKE seuraa myös lumipeitettä Pohjois-, Keski- ja Itä-Euroopassa sekä järvien jääpeitteitä Itämeren valuma-alueilla. Satelliittiaineistoa käsitellään Sodankylän kansallisessa satelliittidatakeskuksessa, ja SYKE:n tuottamia koosteita ja aikasarjoja voi seurata TARKKA-karttapalvelussa. (SYKE 2021a.)

SYKEN tarjoama satelliittidata kuuluu avoimen tietoaaineiston käyttöluvan piiriin, ja sitä on saatavilla SYKEN Satelliittihavaintojen rajapinnoilta. SYKE tulee mainita lähteenä, mikäli tuotteita käytetään julkisessa tarkoituksessa. SYKE käyttää havainnointiin Sentinel-2-, Sentinel-3-, Landsat-8- ja TERRA MODIS -instrumentteja. Käytössä on ollut myös NOAA:n NOAA-AVHRR, NASA:n AQUA MODIS, TERRA MODIS ja AMSR-E, ESA:n ENVISAT MERIS ja CSA:n RADARSAT. (SYKE 2021a.)

SYKE tutkii tällä hetkellä Suomen ympäristöä tuottamalla aineistoa, joka liittyy Itämeren ja Suomen järvien vedenlaatuun, lumipeitteeseen, järvien jääpeitteeseen, kasvillisuuteen, maanpeitteeseen, maankäyttöön ja habitaatteihin sekä näiden muutoksiin. Syke hyödyntää satelliittidataa myös tosivärikuvien muodossa jäätilanteiden, jokivesien ja resuspension aiheuttamien rannikoiden samentumien sekä sinileväesiintymien havainnointiin. SYKE käyttää omia laskentajärjestelmiään ja hyödyntää rajapinnoilta saatavaa aineistoa. Satelliittiaineiston käyttö ympäristön seurannassa on kasvussa, ja SYKE aikoo parantaa palveluaan esimerkiksi tekoälymenetelmien ja pilvilaskennan tehokkaammalla käytöllä. (Koponen 2021.)

5.2 Paikkatietokeskus

Maanmittauslaitoksen tutkimus- ja asiantuntijalaitos Paikkatietokeskus FGI kehittää paikkatietoa ja tekee siihen liittyvää tutkimustyötä. Paikkatietokeskus on kehittänyt Suomessa esimerkiksi maatalouden kartoitusmenetelmiä, metsävarojen kartoitusta sekä lumikarttojen tuottamista. Uusimmissa tutkimussovelluksissa on keskitytty automaattiseen muutostulkintaan ja tiheiden aikasarjojen käyttöön. Paikkatietokeskus on myös kehittänyt EODIE:n, satelliittikuvien prosessointijärjestelmän. Järjestelmä mahdollistaa suurten satelliittiaineistojen käsittelyn automatisoinnin. Tämä yksinkertaistaa satelliittidatan käytön erilaisissa sovelluksissa. EODIE-järjestelmää on hyödynnetty esimerkiksi maatalouden ja metsän kartoituksen sovelluksissa. (Maanmittauslaitos 2021.)

Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskus tutkii tällä hetkellä Suomen ympäristöä seuraamalla esimerkiksi pelto- ja metsälohkojen kasvillisuusindeksivasteiden muutoksia kasvukaudella Sentinel-2-satelliittiaineistoa hyödyntäen. Paikkatietokeskus käyttää tutkimuksessaan enimmäkseen EODIE-järjestelmää. Käytössä on ollut myös ESA:n SNAP-ohjelmisto. Paikkatietokeskuksen tavoitteena on tulevaisuudessa pyrkiä laajentamaan EODIE-järjestelmän käyttöä tutkimuksessaan ja yhdistää satelliittidatasta saatavien laajojen alueiden aineistoja tarkempien aineistojen kuten laserkeilauspilvien kanssa. (Puttonen 2021.)

5.3 Suomen Metsäkeskus

Suomen Metsäkeskuksen tehtävä on ylläpitää ja julkaista avointa metsävaratietoa niin metsänomistajille kuin metsäalan organisaatioille. Aineisto on ollut avointa vuodesta 2018 ja on metsäalan keskeinen tietolähde. Metsäkeskus hyödyntää satelliittidataan perustuvaa metsien valvontapalvelua metsähakkuiden seurantaan maanlaajuisesti. Seurannalla valvotaan metsien kestävä hoitoa ja metsälain noudattamista. Seuranta palvelusta vähentää tarvittavien maastokäyntien määrää huomattavasti. Metsien valvontapalvelun on kehittänyt Suomalainen Bitcomp oy yhdessä Simosol Oy:n kanssa. (Bitcomp 2021.)

5.4 Bitcomp

Bitcomp Oy on suomalainen älykkäisiin metsäjärjestelmiin erikoistunut yritys, joka hyödyntää satelliittidataa metsä- ja luonnonvara-alan aineistopalveluiden ja analyysien tekemisessä (Bitcomp 2021). Bitcomp tutkii tällä hetkellä Suomen ympäristöä seuraamalla metsien hakkuita, metsien terveydentilaa, metsien tiheyttä ja metsätuhoja. Bitcomp on myös tehnyt viljelykasvien kartoitusta satelliittiaineistosta. Bitcomp hyödyntää tutkimuksessaan ESA:n Sentinel-satelliittidataa sekä kaupallisten satelliittien dataa. Bitcomp työskentelee myös ESA:n rahoittamassa projektissa satelliittimonitoroinnin palveluiden kehittämiseksi. (Härkönen 2021.)

5.5 Aalto-yliopisto

Aalto-yliopistossa toteutetaan avaruustekniikan tutkimusta sekä koulutusta painopisteen ollessa kaukokartoituksessa. Avaruustekniikka on osa yliopiston elektroniikan ja nanotekniikan laitosta. Aalto-satelliittisarja on opiskelijaprojektina toteutettu satelliittisarja. Ensimmäinen suomalainen satelliitti on Aalto-1-nanosatelliitti, joka laukaistiin 2017. Nanosatelliitin paino on alle 10 kilogrammaa. Aalto-yliopistossa on viimeisimmän tekniikan tutkimusinfrastruktuuri, joka mahdollistaa kansainvälisesti arvostetun tutkimuksen tekemisen kokeellisen työn

avulla. Aalto-yliopisto tekee tutkimusta esimerkiksi Metsähovin radiotutkimusasemalla, joka on Suomen ainoa tähtitieteellinen radio-observatorio. (Aalto-yliopisto 2018.)

Aalto-yliopistossa erilaiset tutkimusryhmät tutkivat myös Suomen ympäristöä satelliittiaineistosta. Yksi tutkimusryhmä suorittaa esimerkiksi metsän kaukokartoitusta suoritetaan satelliittiaineistoa hyödyntämällä. Tutkimukseen käytetään esimerkiksi Sentinel-2 MSI-, Landsat TM-, Landsat ETM+-, Landsat OLI-, MODIS Terra- ja MODIS Aqua -aineistoja. Tulevaisuuden suunnitelmissa satelliittiaineiston tutkimuksen suhteen tutkimusryhmällä on päästä testaamaan EnMAP-satelliitin hyperspektristä aineistoa. Satelliitin oletettu laukaisuaikajankohta on loppuvuodesta 2021. (Rautiainen 2021.)

5.6 ICEYE

ICEYE oy on suomalainen satelliittikaukokartoituspalveluja kehittävä avaruusteknologian yritys. ICEYE on maailman ensimmäinen yritys, joka on laukaissut avaruuteen SAR-tutkalla varustetun mikrosatelliitin eli satelliitin, jonka paino on alle 100 kilogrammaa. ICEYE:n palvelut perustuvat SAR-tutkalla saatavaan dataan. SAR-tutka mahdollistaa datankeruun myös pimeällä ja pilvisellä säällä. ICEYE:n satelliittikuvausmenetelmä mahdollistaa halutun alueen kuvaamisen muutaman tunnin välein. ICEYE:n asiakkaat käyttävät kaukokartoituspalvelua esimerkiksi merenkulussa, katastrofihallinnassa, vakuutus- ja turvallisuusalalla. (ICEYE 2021a.)

ICEYE seuraa globaalisti esimerkiksi jäävuoria, jäätiköitä ja luonnonkatastrofeja. Suomessa ICEYE on erityisesti keskittynyt metsäarviointeihin ja maankäytön muutoksiin. Koska ICEYE:llä on tällä hetkellä satelliittikonstellaatiossaan 10 satelliittia kiertoradalla, pystytään samoja lokaatioita tarkastelemaan päivittäin. ICEYE käyttää tutkimuksessaan omien algoritmien lisäksi myös ESA:n SNAP-työkalua. (Strong 2021.)

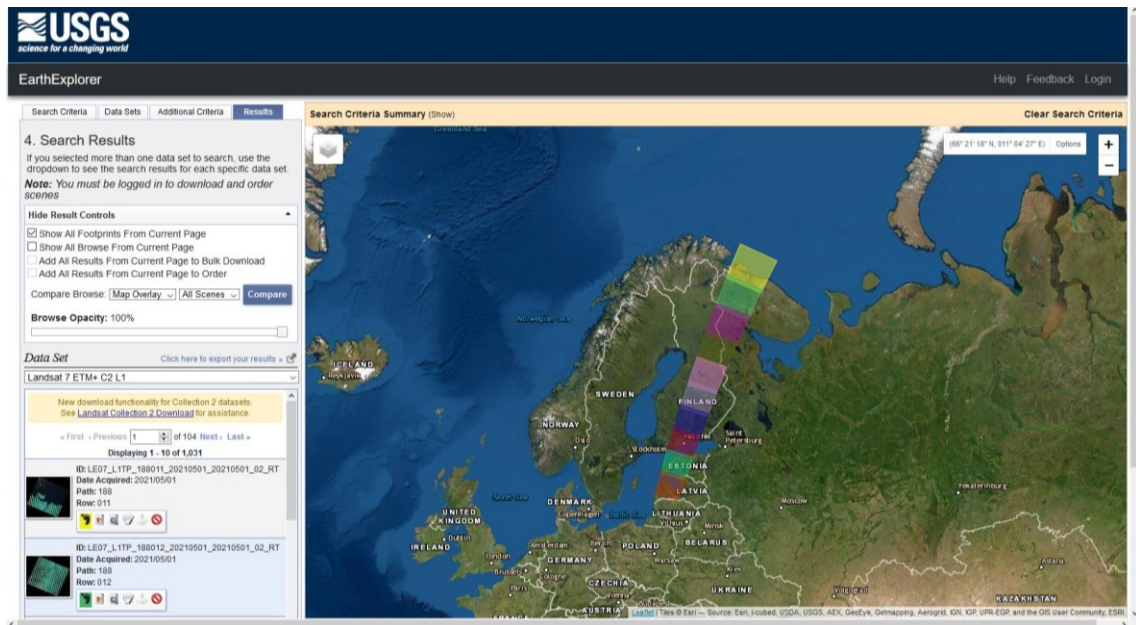
6 SATELLIITTIDATAJÄRJESTELMÄT

Satelliittidatajärjestelmät mahdollistavat satelliittikuvien käyttämisen edullisesti. Dataa on saatavilla myös julkisesti ja ilmaiseksi. Alkuperäiset raat satelliittikuvat sisältävät dataa, jota voidaan tulkita erilaisilla satelliittidataohjelmistoilla. Ohjelmistoilla satelliittiaineistojen ominaisuuksia voidaan prosessoida, yhdistellä, vertailla ja todentaa jatkoanalyysyä varten. Näin aineistoja prosessoimalla ja analysoimalla voidaan ympäristön muutoksia havaita, monitoroida ja analysoida tehokkaammin ja sitä kautta saavuttaa merkittäviä hyötyjä. (ICEYE 2021.)

6.1 EarthExplorer

EarthExplorer (EE) on selainpohjainen satelliittidatajärjestelmä, jolla pääsee käsiksi USGS:n EROS-arkistoihin. EROS-arkistot pitävät sisällään kattavasti kaukokartoitusdataa yli 70 vuoden ajalta kansakunnallisella (U.S.) kattavuudella sekä yli 50 vuoden ajalta Maapallon kattavuudella. EarthExplorer tarjoaa graafisen käyttäjärajapinnan, jossa voidaan määritellä alueita ja suorittaa kyselyitä useille kokoelmille samanaikaisesti. EE:llä on pääsy yli 180 datakokoelmaan. Kokoelmat sisältävät ilma- ja satelliittikuvia, korkeusdataa, peitteisyystuotteita, digitalisoituja karttoja sekä muuta USGS:lle ja sen yhteistyökumppaneille moninaisia projekteja varten kaukokartoitettua dataa. (EarthExplorer 2012.)

Käyttäjä voi hakea haluttuja alueita osoitteella, postinumerolla, paikannimellä tai käyttämällä interaktiivista karttaa maantieteellisen alueen määrittämiseksi. Kyselyitä voidaan suorittaa samaan aikaan useille datakokoelmille, myös tietyillä päivämääräväleillä (Kuvio 1). Datahaun tuloksien sijainnin voi tarkastaa ”show footprint” -painikkeella tai ”show all footprints from current page” -valinnalla, jolloin hakutulokset näkyvät kartalla yksittäin tai kaikki kerralla. Hakutuloksia kartalla painamalla saa esiin kuvan metatiedot. Hakutuloksia voi myös valita vertailuun keskenään. Käyttäjä voi myös esittää pyynnön tiedosta, jota ei ole välittömästi saatavissa arkistosta. (EarthExplorer 2012.)

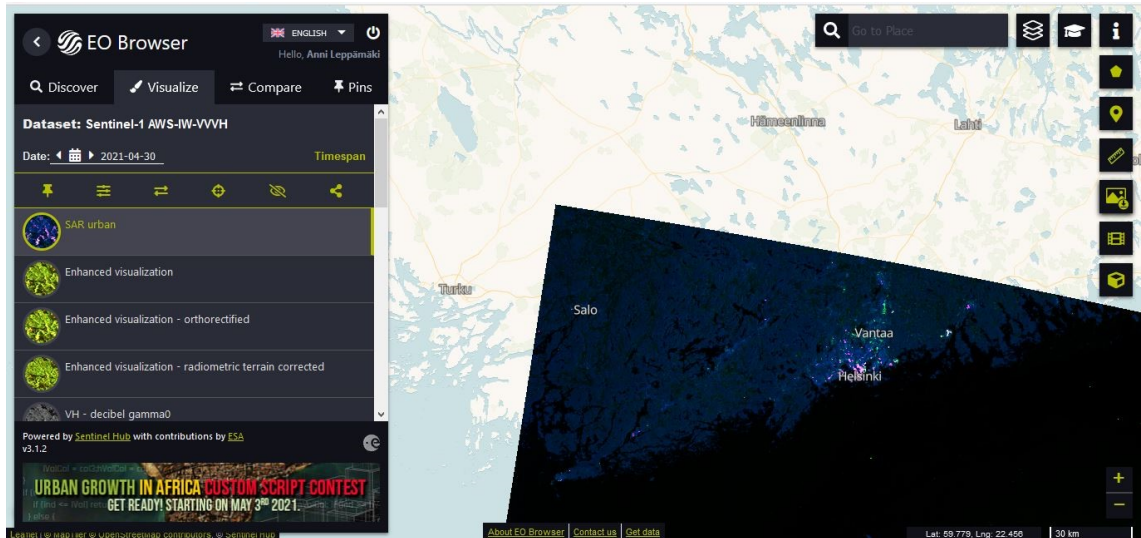


Kuvio 1. Datakokoelmien haku ja ”jalanjälkien” esitys kartalla EarthExplorer-palvelussa. (USGS 2021a.)

6.2 EO Browser

Sentinel hub EO Browser on ESA:n satelliittidatapalvelu, joka mahdollistaa satelliittikuvien selaamisen ja vertailun selaimessa maksuttomasti. Järjestelmässä käyttäjä voi tarkastella Sentinel-1-, -2, -3 ja -5P-, Landsat 5-, Landsat 7-, Landsat 8-, Envisat Meris-, MODIS-, DEM-, Proba-V- ja GIBS-satelliittituotteita (Sentinel Hub 2021).

Järjestelmässä käyttäjä voi siirtyä haluamalleen alueelle karttaa liikuttamalla tai käyttämällä hakutoimintoa ja määrittää haluamansa alueen kuvien tulostamista varten. Hakutoiminnossa voi valita haluamansa hakukriteerit, kuten halutun datakokoelman ja tarkastelun aikavälin (Kuvio 2). Tuloksia voi tarkastella eri lähteistä, ja niitä voi visualisoida kartalla. Käyttäjät voivat tutkia aineistoja, niiden metatietoja ja suorittaa analyysejä. Järjestelmässä voi myös kiinnittää (Pin) haluttuja visualisointeja myöhempää käyttöä varten tai valita visualisointeja vertailuun ja vertailla niitä Compare-välilehdellä. Järjestelmällä voi myös luoda omia kustomoituja visualisointeja, raportteja sekä havainnollistavia timelapse-videoita.

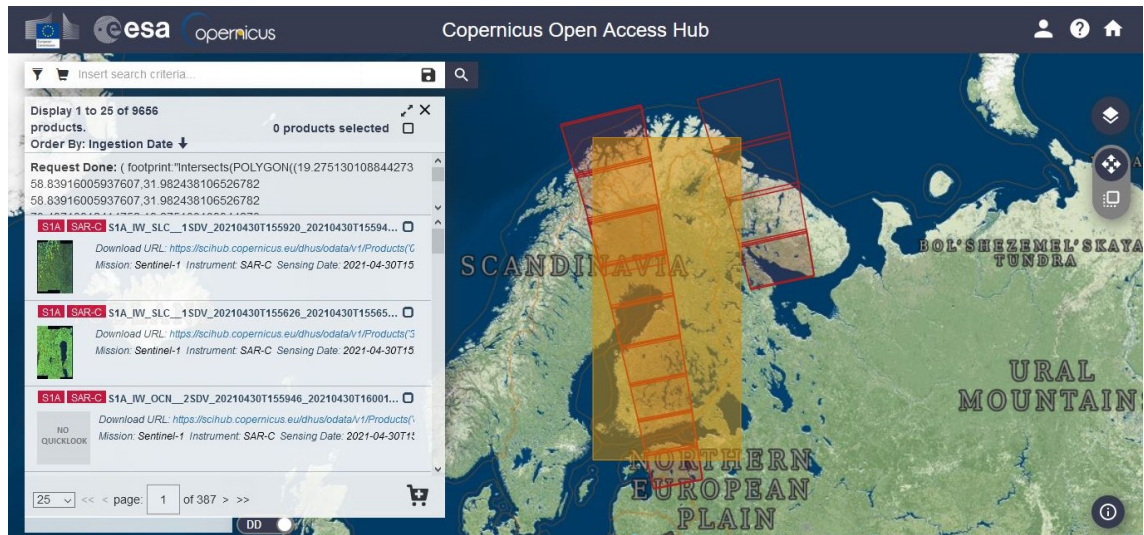


Kuvio 2. Datakokoelmien haku ja visualisointi kartalla EO Browserilla. (Sentinel Hub 2021-)

Sentinel hub EO Browser -verkkosivuilla on ohjeita ja tutoriaaleja järjestelmän käyttöön niin aloittelijoille kuin kehittyneemmille käyttäjille. Verkkosivuilla on myös tietoa järjestelmän soveltamisesta ja webinaareja järjestelmän käyttöön liittyen.

6.3 Open Access Hub

Copernicus Open Access on ESA:n selainpohjainen satelliittidatajärjestelmä, joka tarjoaa pääsyn tarkastelemaan Sentinel-1-, -2- ja -3-tuotteita (Copernicus 2021a). Copernicus Open Access Hub -järjestelmässä haluttu alue voidaan määrittellä karttatyökalun avulla. Käyttäjä voi myös tarkastella karttatasoa niin navigaatio- kuin aluutilassa. Tekemällä hakukyselyn pääsee tarkastelemaan tuloksia ja niiden yksityiskohtia. Kyselyn voi suorittaa tekstihakuna hakukentässä (Full text bar) tai edistynyt haku -toiminnolla (advanced Search), jossa voi valita hakutuloksien kriteerit, kuten halutun datasetin ja tarkasteluajankohdan (Kuvio 3). Saadut hakutulokset näkyvät listalla ja niiden sijainti eli ”jalanjälki” on esitettyä kartalla.



Kuvio 3. Datakokoelmien haku ja tulosten ”jalanjälkien” esitys kartalla Copernicus Open Access Hub -palvelussa. (Copernicus 2021a.)

Hakukyselyitä voi myös tallentaa tallennusominaisuutta käyttämällä. Haluttuja hakutuloksina saatuja tuotteita voi ladata yksitellen tai siirtää niitä ”kärriin”. Kärriin voi kerätä useita hakutuloksena saatuja tuotteita, ja ne voidaan ladata massalatauksena. (Copernicus 2019.)

6.4 RUS

RUS on ESA:n avoin palvelu, jonka on rahoittanut Euroopan komissio. Palvelun tarkoituksena on edesauttaa ja kannattaa Copernicus-satelliittiohjelman käsittämistä ja tukea sen satelliittiaineiston opetuksen, tutkimuksen sekä kehityksen toimintaa. RUS on Sentinel-satelliittiaineiston käyttäjille tarkoitettu palvelu, joka tarjoaa neuvontapalveluja, kouluttautumismahdollisuuksia sekä vapaan pääsyn tehokkaiseen tietojenkäsittelyn ohjelmistoihin, kuten SNAP-työkalupakettiin niitä asentamatta. (RUS 2017)

6.5 SNAP

ESA on kehittänyt useita työkaluja ja työkalupakkeja satelliittidatan visualisoinnin, analysoinnin ja prosessoinnin mahdollistamiseksi. SNAP on ESA:n kehittämä yleinen sovellusalueista kaikille Sentinel-työkalupakeille. SNAP on avoimen lähdekoodin järjestelmä, joka on hyvä satelliittiaineiston käsittelyyn ja tutkimukseen. SNAP mahdollistaa esimerkiksi nopean kuvien selaamisen ja navigoinnin jopa suurilla kuva-aineistoilla, edistyneen tasojen hallinnan, halutun alueen tarkan määrittämisen tilastoja ja graafeja varten sekä karttaprojektoiden rektifioinnin. Toimintoina on myös esimerkiksi automaattinen SRTM DEM -lataus sekä aineistokirjasto suurien arkistojen käsittelyä varten. SNAP järjestelmän voi ladata ESA:n verkkosivuilta, ja sen pyörittämiseen vaaditaan 32- tai 64-bittinen Windows-, Mac- OS X- tai Linux-käyttöjärjestelmä. (ESA 2021d.)

6.6 TARKKA

TARKKA on SYKEN julkinen tarkan maastoerotuskyvyn satelliittikuvien karttapalvelu. Tämä suomalainen satelliittidatapalvelu on avattu 2017. Avoin palvelu on maksuton ja toimii selaimessa. Karttapalvelun avoimia tietoja ovat tuottaneet esimerkiksi SYKEN tietokeskus ja ELY-keskus. Palvelu tarjoaa tarkan erotuskyvyn (10–60 m) sekä keskierotuskyvyn (0,3–1 km) satelliittikuvia. Satelliittidatapalvelussa voi tarkastella esimerkiksi tosivärikuvia ja vedenlaatuaineistoa. (Alasalmi & Kervinen 2020.)

TARKKA-palvelu hyödyntää tarkan resoluution satelliittihavainnoissa Sentinel-S2A- ja Sentinel-S2B-satelliitteja sekä Landsat-8-satelliitin OLI-instrumentin havaintoja. Satelliitti-instrumentit ylittävät Suomen alueen muutaman kerran viikon aikana ja kuvaavat kerralla vain tietyn kaistaleen. Tämän vuoksi TARKKA-palvelun yhden päivän tuotteet eivät kata koko Suomen aluetta. Nämä kaistaleet on erotettavissa tosivärikuvissa. (Kuvio 4). Keski-resoluution satelliittihavainnoissa hyödynnetään Sentinel-3-satelliitin OLCI- ja SLSTR-instrumenttien tuottamia havaintoja. Aikaisempien vuosien aineistot perustuvat myös NOAA AVHRR-, Envisat MERIS- ja MODIS-instrumenttien havaintoihin. (Bruun & Kervinen 2021.)



Kuvio 4. Satelliittidatan haku ja esitys TARKKA-palvelussa. (SYKE 2021b.)

TARKKA-palvelu on kehitetty satelliittihavaintojen jakeluun, ja sen avulla voi seurata ympäristön muutoksia. Karttapalvelusta voi seurata maanpinnan ja kasvuston muutoksia, lumi- ja jäättilannetta, veden tilaa, levätilanteita, tulvia, ruoppauksia, siitepölymääriä vesien pinnoilla sekä talviajan sameus- ja pintalämpötilatietoja.

TARKKA-palvelun käyttöliittymästä pääsee tarkastelemaan satelliittiaineistoja selaamalla karttanäkymää tai paikan haulla. Halutun koosteen voi määritellä antamalla päivämäärän, valitsemalla aineistojen näkymät, satelliittiaineistot ja tausta-aineistot (Kuvio 4). Käyttöliittymästä voi myös valita täydentäviä GIS-aineistoja, vertailuaineistoja sekä animaatioita. Palvelun käyttöön on kattavat ja yksityiskohtaiset käyttöohjeet. (Alasalmi 2020.)

6.7 QGIS

QGIS on avoimen ja vapaan lähdekoodin työpöytäohjelmisto, joka mahdollistaa monipuolisen paikkatiedon, myös satelliittiaineiston, käsittelyn. Ohjelmistolla voi visualisoida, prosessoida ja analysoida aineistoja sekä luoda karttoja ja 3D-mallinnuksia. QGIS tarjoaa käyttäjälle tukea järjestelmän käyttöön, ohjeita, tutoriaaleja sekä muiden käyttäjien esimerkkejä ohjelmiston käytöstä. QGIS tukee monia

tietokantaformaatteja, ja sillä voidaan käyttää eri paikkatietopalveluiden tarjoamia online-tietokantoja. Järjestelmään voidaan asentaa myös erilaisia lisäosia, ja edistynyt käyttäjä voi ohjelmoida näitä itse.

QGIS-järjestelmällä paikkatietoaineistoa voidaan käsitellä monipuolisesti. Järjestelmä mahdollistaa vektori- ja rasteritasojen luomisen, muokkaamisen, monitoroinnin ja tulostamisen. Analysointiin voi hyödyntää myös QGIS-laajennusosia. QGIS voidaan myös integroida muiden avoimen lähdekoodin paikkatietojärjestelmien kanssa. QGIS on helppokäyttöinen ja ilmainen avoimen lähdekoodin jatkuvasti kehittyvä työkalu paikkatietoaineiston käsittelyyn.

7 SUOMEN YMPÄRISTÖN TUTKIMUS SATELLIITEISTA

Tehdyn taustatutkimuksen myötä selvisi, että Suomen ympäristön havainnoinnissa satelliittiaineistosta on keskitytty erityisesti vesialueiden, metsien ja peltojen havainnointiin. Kuitenkin haluttiin tutkia erästä toista seikkaa, joka on olennainen Suomessa, nimittäin lunta. Lumi on tärkeä mutta myös vahinkoja aiheuttava tekijä pohjoisella pallonpuoliskolla, jossa Suomi sijaitsee. Lumen määrän ja laadun muutokset aiheuttavat kansallisia ja globaaleja muutoksia monissa olosuhteissa. Lumi on tärkeä resurssi niin turismin kuin vesivoiman toteutuksen kannalta.

Lumipeitteen seuranta ja tutkimus on tärkeää monelta asian kannalta. Lumen syvyys on pienentynyt etenkin Etelä-Suomessa, lumikausi lyhentynyt ja jääpeitteiden laajuudet vähentyneet Suomessa jatkuvasti. Sademäärät ja niiden olomuodot vaikuttavat talvien lumitilanteisiin sekä lumen laatuun. Lumi- ja jääpeitteiden tutkimus on tärkeää esimerkiksi ilmastotutkimuksen, teiden kunnossapidon, tulvaennusteiden, merenkulun, kattojen lumikuormien ja ekologisten prosessien kannalta. Lumen ja jään tutkimuksessa pyritään oppimisen lisäksi luomaan mallinuksia, joilla ennustaa lumi- ja jääpeitteiden muutoksia. Lumitutkimuksessa pyritään määrittämään esimerkiksi lumipeitteisiä alueita (SCA), lumen syvyyttä, lumen vesiarvoa, nestemäisen veden pitoisuutta sekä heijastussuhdetta eli albedo.

Tässä työssä tutkitaan Suomen lumipeitteitä ja tutustutaan uusien paikkatiedon järjestelmien ja menetelmien käyttöön. Tätä työtä varten löydettiin muutamia ohjeita tämänkaltaisen datan prosessoinnin ja analyysin tekemiseen. Niitä päätettiin soveltaa tämän tutkimustyön tekemisessä.

7.1 Lumen tutkimus satelliiteista

Maan lumipeitettä voidaan tutkia käyttäen monien eri satelliittien tuottamaa dataa. Optisten satelliittien kuva-aineistosta voidaan havainnoida lumen peittoalaa, joka perustuu multispektraaliseen dataan. Optisten satelliittien keräämästä da-

tasta voidaan havainnoida esimerkiksi pintojen heijastuskykyä sekä tuulen mukana lentävää lunta. Kyseisellä metodilla ei kuitenkaan pystytä havainnoimaan lunta pilvien läpi tai valottomissa olosuhteissa.

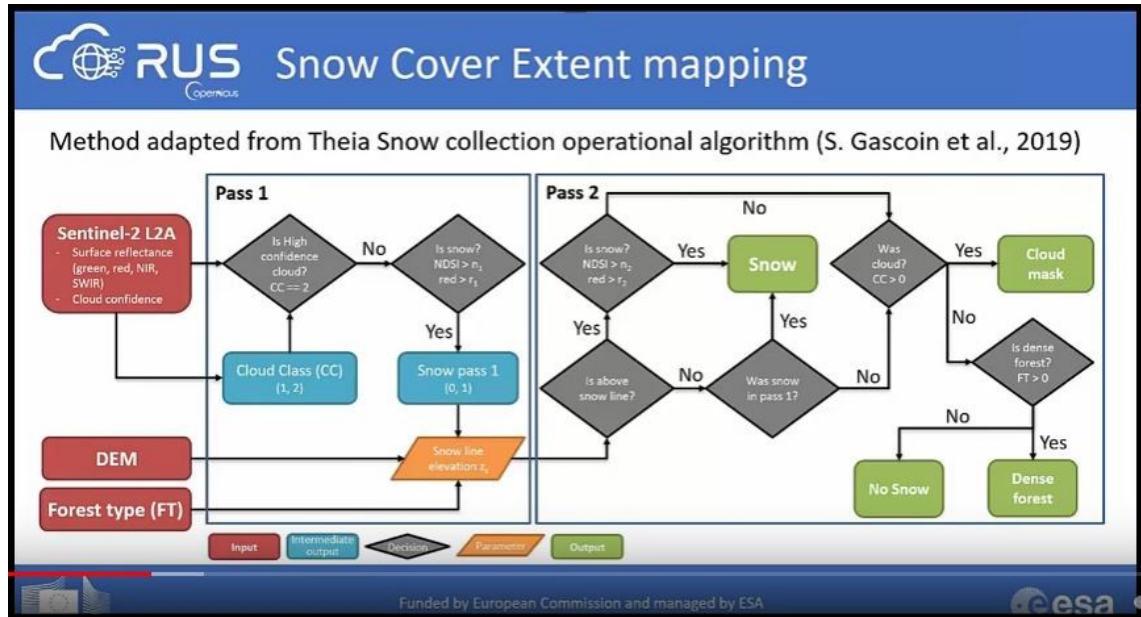
SAR-satelliitit pystyvät keräämään dataa myös pilvisissä ja pimeissä olosuhteissa. SAR-satelliittiaineistosta voidaan prosessoinnin avulla paikantaa esimerkiksi lumipeittoaloja, sulan lumen alueita, havainnoida muutoksia sulamisessa ja luoda esimerkiksi tulvaennusteita. InSAR-menetelmällä voidaan SAR-aineistosta havainnoida sekä kuivan että märän lumen alueita. SCE eli märän lumipeittoalan havainnointi SAR-aineistosta on kuitenkin yleisemmin käytetty menetelmä.

Useat lähteet, kuten SYKE, Copernicus Land Monitoring Service, ESA CCI SNOW sekä Theia Snow tarjoavat aineistoa lumipeitteisyydestä. Näiden palveluiden ongelmaksi muodostuu usein kuitenkin se, että aineistoa ei ole halutulla resoluutiolla, alueella tai ajankohdalla.

7.2 Lumipeittoalan tutkimus Sentinel-2-datasta

Tässä työssä hyödynnetty ohjeistus on Copernicus RUS -webinaari lumipeitteen kartoittamisesta Sentinel-2-aineistoa hyödyntämällä. Webinaarin demossa prosessoidaan Sentinel-2-dataa ESA:n SNAP työkalupakettia käyttämällä. (Snow Cover Mapping with Sentinel-2 2019.)

Tutkimus aloitettiin tutustumalla RUS-webinaariin lumipeitteen kartoittamisesta Sentinel-2-datasta. Ohjeistuksessa käytettävä metodi on mukautettu versio Theia Snow -kokoelman algoritmista (Kuvio 5). Käytettävä aineisto on Sentinel-2 MSI L2A -dataa. Demossa hyödynnetään lisäksi myös EEA:n metsätyyppiaineistoa sekä SRTM DEM -dataa. (Snow Cover Mapping with Sentinel-2 2019.)

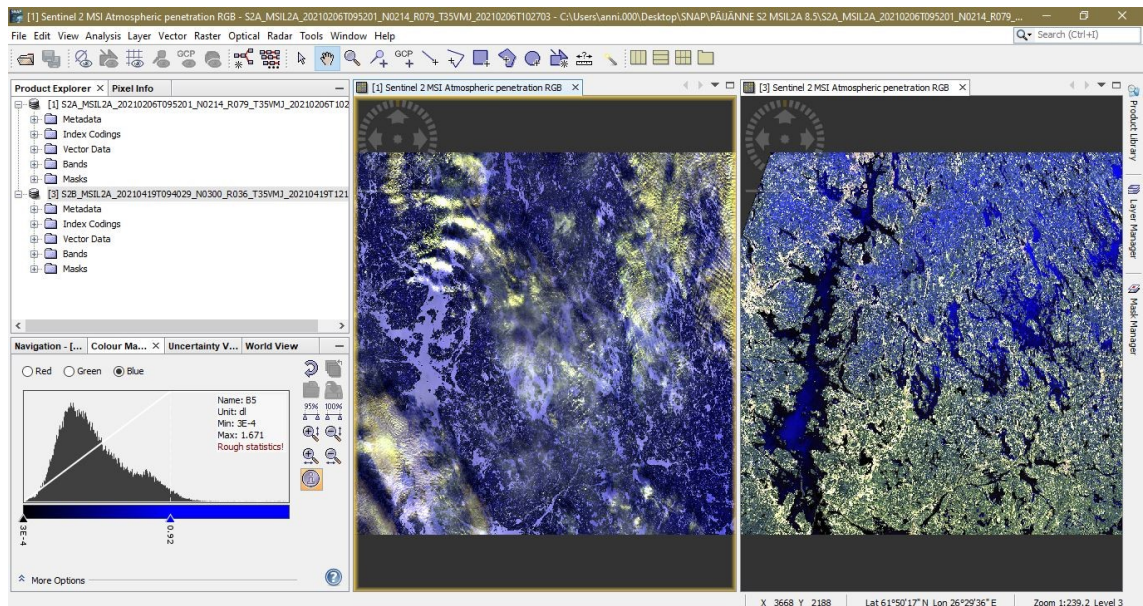


Kuvio 5. Lumipeitteen kartoittamisen algoritmi. (Snow Cover Mapping with Sentinel-2 2019.)

Työskentely aloitettiin hakemalla halutut aineistot Copernicus Open Access Hub -palvelusta. Aineistojen lataamiseksi palveluun tulee kirjautua sisään. Tarkasteltavaksi aineistotyyppiä valittiin Sentinel-2 MSI2A. Tarkastelukohteeksi valittiin Joutsa, joka sijaitsee tämän hetken lumirajalla. Aineistot valittiin päiviltä 6.2. ja 19.4.2021, sillä näillä päivillä on vähäpilviset aineistot. Etenkin talviaikaa tarkastellessa Sentinel-2-aineistoista tulee ottaa huomioon, että pilvettömiä kuvia ei välttämättä ole runsaasti, myös valoisaa kuvantamisaikaa on vähemmän kuin kesällä. Tavoitteena oli tarkastella, kuinka tällä prosessoinnilla havaitaan lumipeitteen muutoksia kyseisellä alueella ja aikavälillä. Open Access Hub tarjoaa suoraan lataukseen aineistoa noin kuukauden ajalta. Tätä vanhemmat aineistot ovat offline-tilassa. Offline-aineiston latauspainiketta painamalla aineisto siirtyy omaan ”kärryyn” ja lähettää latauspyynnön. Jonkin ajan kuluttua aineisto on ladattavissa oman ”kärryyn” kautta. Aineistot ladattiin ja ladatut aineistot avattiin SNAP-ohjelmassa.

Aineiston tarkastelu aloitettiin avaamalla kummankin tuotteen RGB-kuvaikkuna ja muokkaamalla niiden RGB-profiileja valitsemalla kanavien arvoiksi $R = B12$, $G = B11$ JA $B = B5$. Näillä arvoilla kasvillisuus näyttäytyy vihreän eri sävyissä, lumi sinisenä ja vesi tummansinisenä tai mustana. Kun arvot on asetettu, kuvat aukeavat näytölle tarkasteltavaksi. Valitsemalla Window-välilehdeltä Tile Evenly,

kuvat aukeavat samalle näytölle, jossa niitä voidaan tarkastella ja zoomata yhtä aikaa. Kuvista voidaan huomata, että lumen ja veden rajaa voi olla hankala hahmottaa etenkin Suomen olosuhteissa (Kuvio 6). Mikäli kuvassa esiintyy pilviä, etenkin kirkkaan valkoisia pilviä, saattaa se vaikuttaa koko kuvan väritykseen. Värejä voidaan muokata vasemman alakulman Colour manipulation -ikkunassa muokkaamalla värien histogrammeja. Kun verrattavien kuvien värit vastaavat mahdollisimman hyvin toisiaan, on niitä helpompi vertailla keskenään. Käsittelyissä kuvissa voidaan havaita ero lumipeitteen laajuudessa. Vasemmassa kuvassa näkyy myös ohuita pilviä (Kuvio 6).



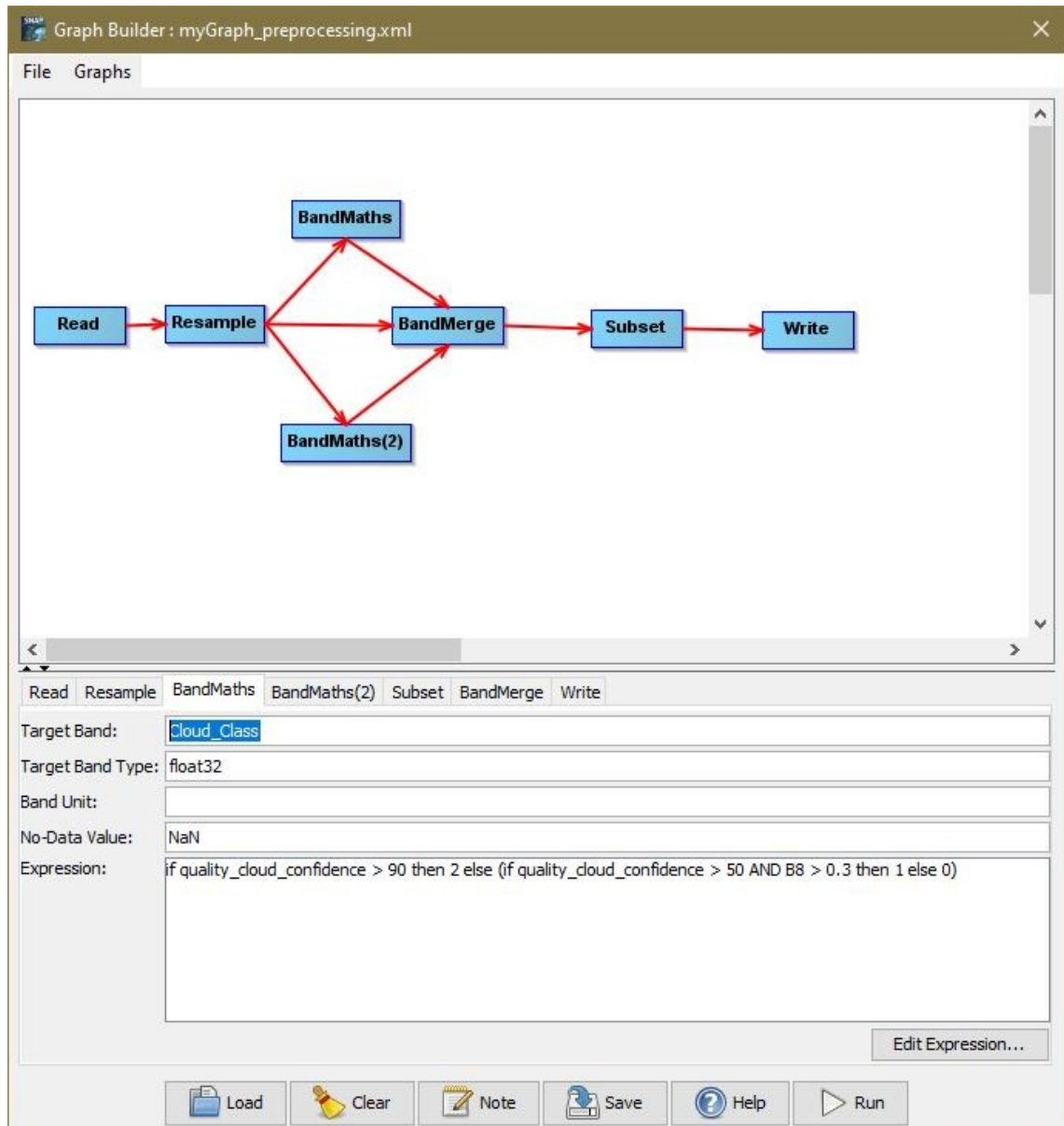
Kuvio 6. Aineistot kuvattuna muokatuilla RGB-profiileilla SNAP-järjestelmässä.

Ensimmäinen vaihe on aineistojen esiprosessointi. Koska prosessi sisältää useita kohtia, tehdään se Graph Builder -työkalun avulla, joka on yläpalkissa tai Tools-valikossa. Graph Builderilla voi luoda omia graafeja erilaisia prosesseja varten ja tallentaa niitä myöhempää käyttöä varten. Graafi sisältää aluksi vain operaatiot Read ja Write eli data output. Näiden väliin rakennetaan graafi painamalla tyhjiin välitilaan hiiren oikealla näppäimellä, painamalla Add, valitsemalla haluttu operaattori ja luomalla yhteys edelliseen operaattoriin nuolella laatikon reunasta vetämällä. Graafi rakennettiin lisäämällä siihen operaattorit Resample, BandMaths x 2, BandMerge ja Subset (Kuvio 7). Resample muokkaa aineistot samaan pikselikokoon. BandMath on laskutoimitus kaistojen arvoilla, ja sen tuloksena saadaan uusi kaista (Band). Kumpikin toimitus luo yhden uuden kaistan.

BandMerge lisätään graafiin, jotta prosessi yhdistää mukaan myös alkuperäisen datan. Subset-operaattori luo aineistosta uuden osajoukon, ja tällä voidaan muokata esimerkiksi aineiston kokoa ja kaistojen määrää.

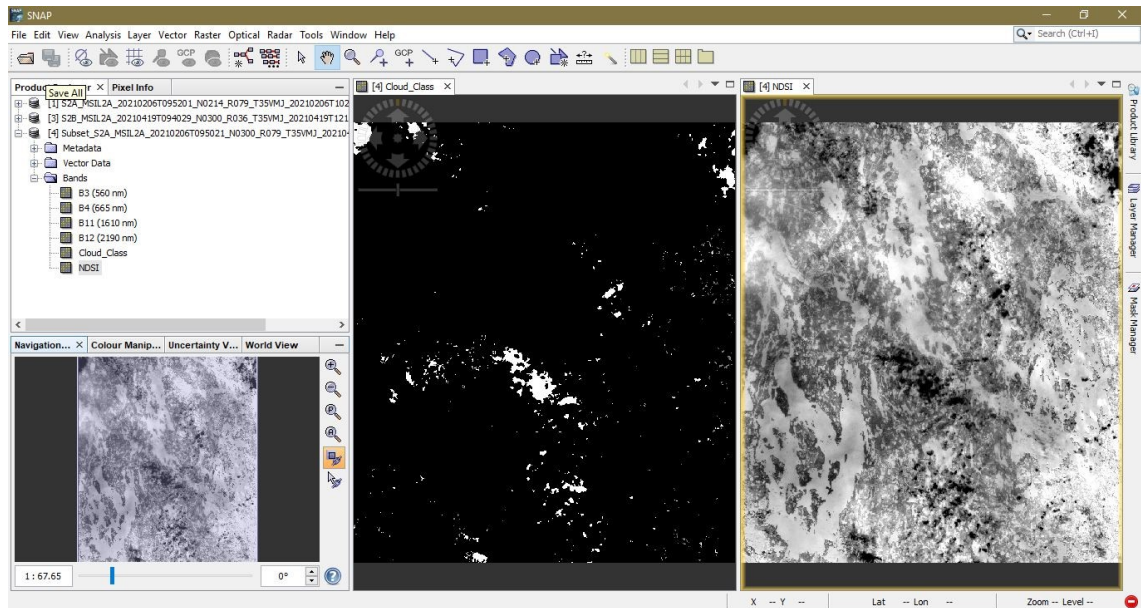
Mikäli tarkoituksena on prosessoida useita aineistoja kerralla, tallennetaan graafi, avataan BatchProcessing, lisätään avoimet aineistot, poistetaan ei-halutut aineistot, ladataan tallennettu graafi ja aloitetaan prosessin parametrien määrittely. Sateelliittiaineistot ovat raskaita prosessoida, ja oma tietokone ei tähän joukkoprosessointiin kyennyt, joten aineistot prosessoitiin yksi kerrallaan. Kummassakin vaihtoehdossa parametrit määritetään samalla tavalla ja tulos on sama. Read-osiossa määritellään prosessin lähtöaineisto. Resample-osiossa määritellään, minkä perusteella uuden aineiston pikselikoko määritetään. Pikselikoon voi määrittellä referenssikaistan, tavoitekorkeuden ja -leveyden tai pikseliresoluution mukaan. Subset-osiossa määritellään halutut kaistalähteet, uudet kaistatulokset sekä koordinaatit (Kuvio 7). RGB-kuvasta valittiin haluttu tarkastelualue piirtämällä suorakulmion Rectangle drawing tool -työkalulla ja kirjoittamalla geometrian WKT-muotoon. Koordinaatit liitetään Geographic Coordinates -kenttään WKT-muodossa, ja alue näkyy kartalla.

BandMaths-osioissa määritellään haluttu laskutoimitus, jolla rakennetaan uusi haluttu kaista. Nimetään kaista ja määritetään No-Data Value. Ensimmäisessä laskutoimituksessa tehdään kaista, jossa on esitettyinä vain pilvet. Edit Expression -kohdassa määritellään toimituksen lauseke (Kuvio 7). BandMaths2-osiossa määritellään NDSI-kaista eli normalisoitu lumieron indeksi. Tämän lauseke on yksinkertaisempi: $(B3 - B11)/(B3 + B11)$. B3 on viherä kaista ja B11 lyhyen infrapunan kaista. Lopuksi määritellään Write-osiossa kirjoitettavan tuloksen kansio ja suoritetaan prosessi valitsemalla Run.



Kuvio 7. Esiprosessoinnin graafi ja laskutoimituksen lauseke SNAP-ohjelmassa.

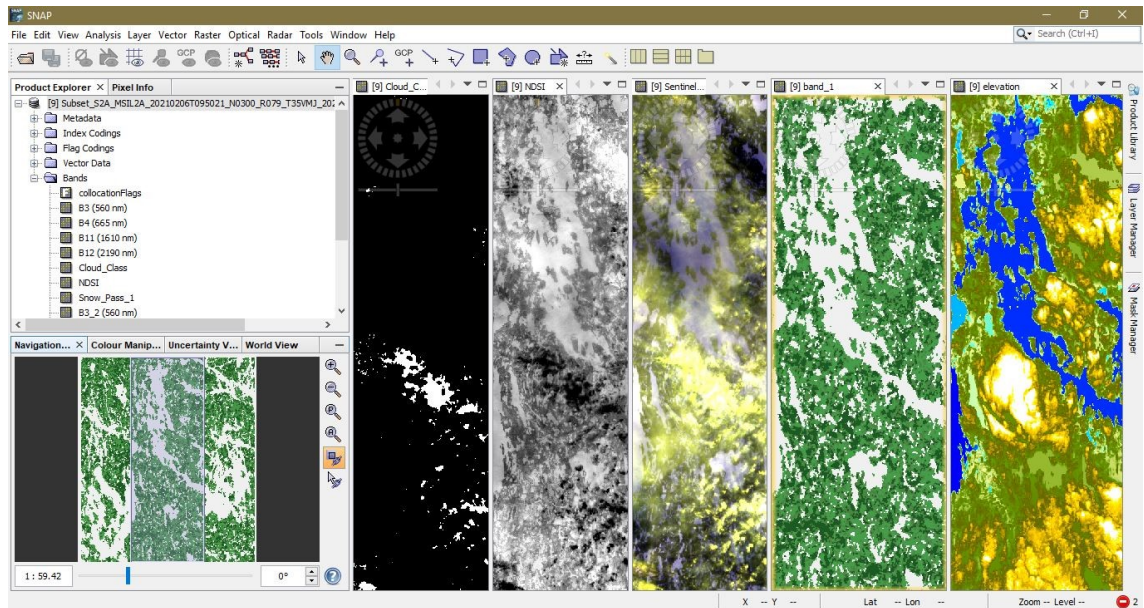
Uudet aineistot ilmestyvät Product Explorer -listaukseen. Uuden aineiston Bands -listauksessa ovat nyt uudet kaistat, jotka voi avata näytölle tarkasteltavaksi. NDSI-kuvissa lumi ja pilvet erottuvat valkoisina, pilvet himmeämpinä ja lumi kirkkaampana (Kuvio 8). Tämä esitystapa ei kuitenkaan ole paras mahdollinen, mikäli lumisen alueen päällä on pilviä. Cloud_Class-kuvissa on näkyvissä vain pilvet sekä joitakin yksittäisiä satunnaisia valkoisia pikseleitä (Kuvio 8).



Kuvio 8. NDSI- ja Cloud_Class-kaistat esitettynä kuvina SNAP-ohjelmassa.

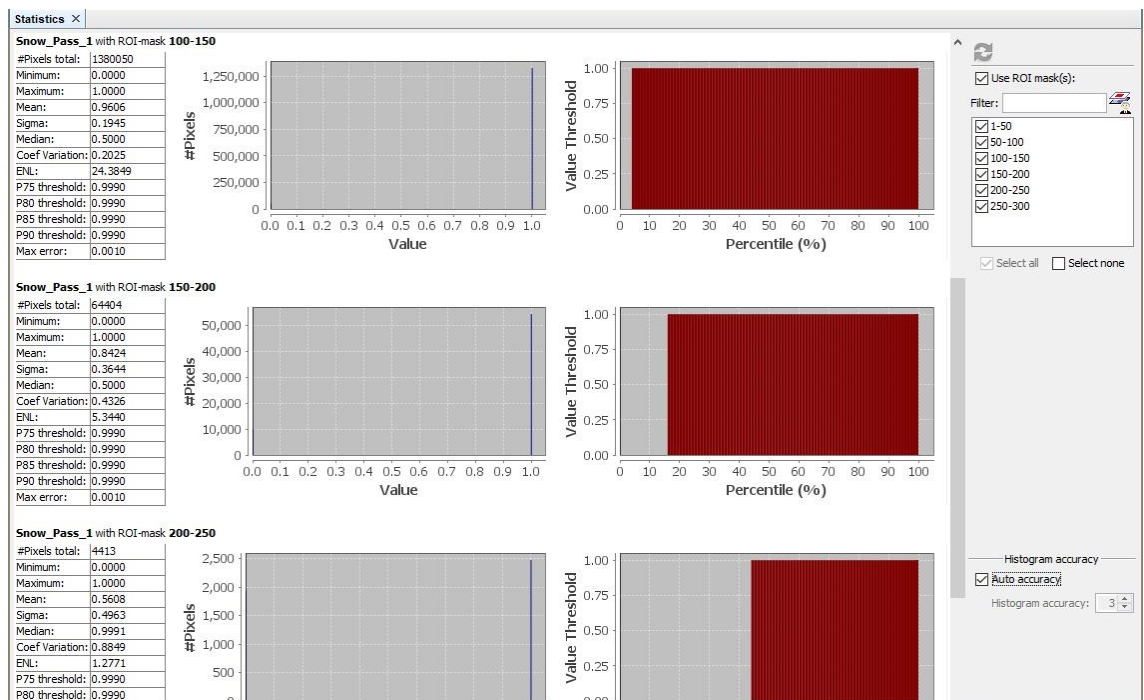
Seuraavaksi prosessoitiin NDSI:n eli normalisoitu lumieron indeksin. Prosessigraafiin sisätyi kaksi lähtöaineistoa, laskutoimitus lumihavaintojen laskemiseksi, alkuperäisaineiston yhdistäminen sekä korkeusaineiston lisääminen. Toisena lähtöaineistona Read2 käytetään RUS-demossa EEA:n 2015 FTY-aineistoa. Tutkimuksessa käytettiin samaa metsätyyppi-aineistoa ja aineisto ladattiin Copernicus Land Monitoring Service -palvelusta. GEOtiff-aineisto avattiin SNAP-ohjelmassa ja se modifioitiin muuhun aineistoon sopivaksi käyttämällä Collocation-työkalua. Master-tuotteeksi valitaan haluttu lähdeaineisto, jonka mukaiseksi aineisto halutaan modifoida. Slave-tuotteeksi valitaan kohdeaineisto. Prosessin laskutoimituksessa luodaan ensimmäinen lumikaista ja AddElevation-osiossa määritetään prosessissa käytettävä korkeusmalli. Demossa käytetään SRTM DEM -aineistoa, mikä ei yllä tarkastellulle alueelle, SNAP ilmoittaa, mikäli kuva-alue on DEM-alueen ulkopuolella. Tutkimuksessa käytettiin Copernicus 30m Global DEM -aineistoa.

Tuloksena saatujen aineistojen RGB kuvaikkunat avattiin ja määriteltiin värien arvoiksi $R = B12$, $G = B11$, $B = B4$. Myös kaistat Cloud_Class, NDSI, elevation sekä band_1 eli metsätyyppi-kaista avattiin. Valitsemalla Tile Evenly kaikki kuvat saa näkyviin kerralla, jolloin niitä voi havainnoida yhtä aikaa (Kuvio 9). Näin voidaan esimerkiksi tarkastella korkeusvaihteluiden vaikutusta lumen esiintyvyyteen kuvissa.



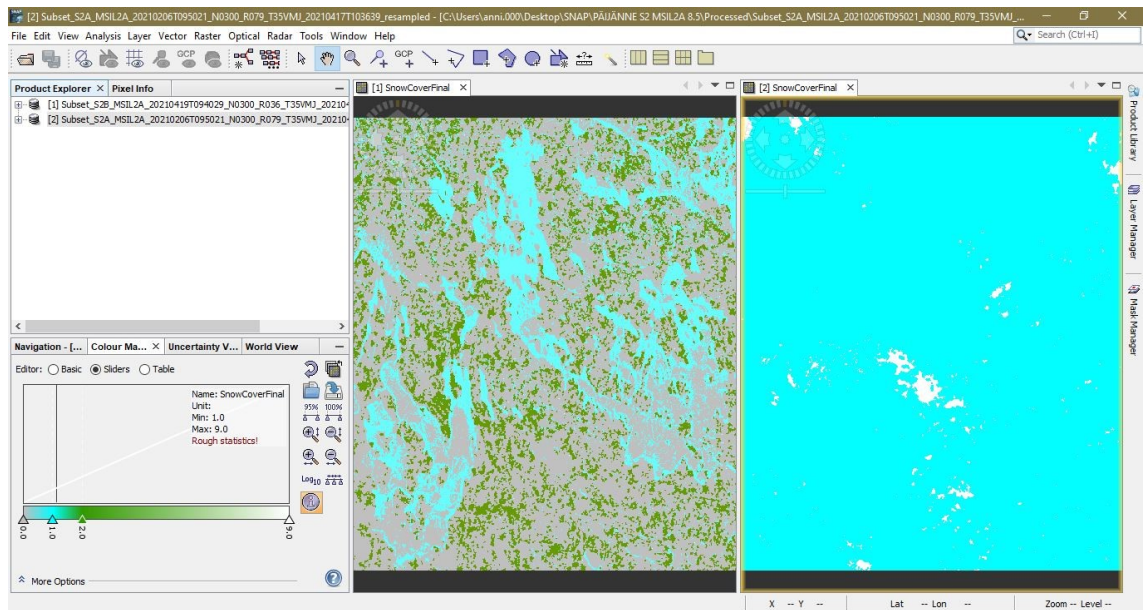
Kuvio 9. Pilvet, lumialue, RGB-, metsätyyppi- ja korkeusmallikuvat esitettyinä SNAP-ohjelmassa.

Alueelle tehtiin maski Mask Manager -työkalulla käyttämällä BandMath-lausekkeita. Maskin avulla voi havainnollistaa lumen sijoittumista eri korkeuksille mutta myös suorittaa tilastoanalyysia. Kohdekaista valittiin ja sille tehtiin analyysi käyttämällä tehtyä maskia. Analyysissä saadaan tulokseksi lumipeitteen prosentiosuudet eri korkeuksilla merenpinnasta (Kuvio 10).



Kuvio 10. Lumipeitteen prosentiosuudet tilastoanalyysissä SNAP-ohjelmassa.

Viimeisenä prosessina suoritettiin BandMath-laskutoimitus, jolla määritettiin lopullisen varman lumen peittämä alue. Lauseke if (Cloud_Class < 2 AND elevation > 50 AND NDSI > 0.150 AND B4 > 0.04) OR SnowBand1 == 1 then 1 else (if Cloud_Class > 0 then 9 else (if band_1 == 2 then 2 else 0)) määrittää, että mikäli mikään näistä väittämistä ei ole tosi, on kyseessä oltava 0 eli ei lunta. Tuloksena saatiin mustavalkoinen kuva, joka ei ole havainnollinen. Kuvalle luotiin oma väripaletti ja muokattiin värien arvot sopiviksi. Harmaa on varmaa ei-lumenpeittämää alaa, turkoosi lumen peittämä alue, vihreä metsää ja valkoiset alueet pilviä (Kuvio 11). Näin kaikki tarvittavat attribuutit ovat selkeästi havainnollistettuina ja kuvia on helppo verrata toisiinsa. Valmiit tiedostot voi tallentaa viemällä ne eri tiedostomuodoissa myöhempää käyttöä varten. Aineistoa voi jatkojalostaa esimerkiksi QGIS-ohjelmassa.



Kuvio 11. Lopputuotteet SNAP-ohjelmassa, vas. 19.4 ja oik. 6.2.2021.

Kuvista voidaan havaita selkeä ero lumipeitteen laajuudessa, eli lumi on sulanut suurilta osin päivien 6.2. ja 19.4 välillä. Jäljellä oleva lumi on myös selkeästi sijoittunut etenkin vesialueille ja niiden reunoille vesien ollessa vielä osin jäässä. Kuvista nähdään myös, että lunta on ollut paljon helmikuussa 2021. Hyödynnetyssä RUS-webinaarin demossa tarkasteltiin vuoren yläosan lumipeitettä, joka oli pieni alue, korkealla, huomattavasti puuttomammalla alueella. Suomi eroaa alueena. Korkeutta Joutsan alueella on muutama sata metri merenpinnasta ja metsää sekä vesialueita on sitäkin enemmän.

Suomessa lumi peittää talvella parhaimmillaan koko Suomen. Tällöin satelliittikuvat ovat pelkkää valkoista. Niistä esimerkiksi pilvet ovat hankalasti erotettavissa. Aineistoa prosessoimalla saadaan eroteltua kokovalkoisesta kuvasta niin pilvet kuin lumen peittämät metsät. Pelkästä satelliittikuvasta voidaan vain päätellä, missä näkyy lunta. Prosessoimalla saadaan tietää paljon enemmän.

Tämänkaltaisten prosessien avulla lumipeitteitä tutkimalla voidaan seurata tarkasti muutoksia Suomen ympäristössä. Tällaista aineistoa lumipeitteisyydestä voidaan hyödyntää Suomessa esimerkiksi keväällä sulamisaikaan tulvaennusteiden tekemiseen ja teiden kunnossapidon suunnitteluun. Etelä-Suomessa lumikausi on lyhentynyt, mutta pohjoisessa lumi pakkautuu yhä pienemmille alueille. Tällaisilla alueilla lumipeitteen tutkimusta voidaan hyödyntää esimerkiksi kattojen lumikuormien arvioinnissa. Tällaisessa arvioinnissa voisi olla hyötyä myös SAR-satelliittidatasta, josta voidaan havainnoida lumen kosteutta, joka vaikuttaa lumen laatuun, kuten painoon. Laajemmin lumipeitteiden tutkimusaineistoa voidaan hyödyntää esimerkiksi sulavat lumen valuma-alueiden monitoroinnissa sekä muussa vesistömallinnuksessa ja ympäristötutkimuksessa.

8 TULOKSET

Tutkimusta suorittaessa tarkasteltiin Suomen ympäristöä käytännön tasolla satelliittiaineistoa prosessoimalla. Prosessoimalla Sentinel-2-aineistoa saadaan siitä enemmän tietoa kuin pelkästä satelliittikuvasta. Hyödyntämällä muita kaukokartoitusaineistoja ja yhdistelemällä näiden ominaisuuksia saadaan kattava kuva Suomen ympäristöstä, tässä tapauksessa Joutsan lumitilanteesta ja sen muutoksista 6.2. ja 19.4.2021.

Lopputuotteita tarkastelemalla ja vertailemalla huomataan eroja, joista voidaan tehdä päätelmiä ympäristön tilasta. Olennainen muutos, joka aineistosta voidaan päätellä, on lumipeitteen pieneneminen kevään edetessä ja lumen sulaessa. Tämä huomataan jo ensimmäisistä RGB-kuvista, mutta huomioon on otettava monia seikkoja ennen kuin saadaan selville tarkka lumenpeittoala.

Ensimmäinen huomio optisten satelliittien aineistoista ovat pilvet. Mitä vähemmän pilviä on kuvan päällä häiritsemässä prosessointia, sen tarkempia tuloksia saadaan. Etenkin Suomessa, jossa satelliittikuvat ovat talvisaikaan valoisan ajan lyhyden ja pilvisyyden takia pilvettömiä, kuvia ei välttämättä ole saatavilla, kun halutaan tarkastella lunta. Mikäli kuvassa kuitenkin on pilviä, voidaan niiden vaikutusta pienentää prosessoimalla. Tämä on tärkeä ominaisuus, ja näitä prosesseja tulisi kehittää mahdollisimman tehokkaiksi, sillä pilvet ja valon määrä pohjoisilla alueella ovat seikkoja, joihin ei voi vaikuttaa.

Kun operoidaan Suomessa, on otettava huomioon ensinnäkin puuston vaikutus lumipeitteeseen. Prosessoimalla aineistoa saadaan lumipeitteen laskentaan liitettyä esimerkiksi EEA:n metsätyyppitietoa, jolloin saadaan yhä tarkemmin laskettua oletettu lumipeitteisyys myös puuston alla, jonne Sentinel-2-satelliitti ei näe. Tämän tutkimuksen prosessoinnissa käytettiin EEA:n 2015 FTY -aineistoa, joka oli vanha 2021 lumitilanteen tutkimukseen. Mikäli halutaan saada mahdollisimman tarkkoja tuloksia, tulisi käyttää mahdollisimman tuoretta dataa.

Ympäristön havainnointi satelliittiaineistosta on monivaiheinen prosessi, joka vaatii aikaa. Aineistojen prosessointi omalla tietokoneella oli hidasta. Aineisto piti rajata pieneksi prosessoinnin helpottamiseksi. Tämänkaltaiseen prosessointiin voi suositella normaalia tehokkaamman tietokoneen tai prosessointijärjestelmän käyttöä pilvipalvelusta. Mikäli tutkittava alue kuitenkin on pieni, saattaa prosessointi onnistua.

Prosessoinnissa tärkeintä on huomioida kaikki tarvittavat seikat. Koko prosessointi on lähinnä matemaattisten lausekkeiden kertomista järjestelmälle ja näiden välissä odottelua, kun järjestelmä suorittaa laskentaa. Harjoitellessa kuitenkin tapahtuu virheitä, jolloin prosessit pitää välillä toistaa useasti. Tämä on kuitenkin tärkeää virheiden kautta oppimista. Hyödynnetty webinaarin demo kesti alle tunnin, oma kahden kuvan prosessointini noin kolme päivää. Prosessoinnin oppiminen vaatii valtavasti toistoja ja erilaisten aineistojen kanssa työskentelemistä.

9 POHDINTA

Satelliittidatan jatkuva saanti ja havainnointi mahdollistavat globaalien resurssien hallinnan lähes reaaliajassa. Satelliittiaineiston käyttö kasvaa jatkuvasti, ja uusia käyttötarkoituksia kehitetään koko ajan. Satelliittikaukokartoituksesta saatavalla aineistolla on tärkeä ja kasvava rooli monilla aloilla. Se ei rajoitu vain tekniikan alaan. Kun satelliiteista saatava aineisto on myös avointa ja helposti lähestyttävissä, on kansalaisten helpompi ymmärtää sitä, ottaa se osaksi arkea ja mahdollisesti myös kehittää sen käyttöä eteenpäin.

Koneoppiminen ja tekoäly ovat mahdollisuus ja työkalu yhdessä satelliittikaukokartoituksen kanssa. Niiden hyödyntäminen satelliittidatan hyödyntämisessä lieenee vasta alussa. Erilaisilla menetelmillä voitaisiin kehittää uusia tapoja tarkastella, mitä muutoksia Maapallolla tapahtuu päivittäisellä tasolla. Yhä tarkemmalla monitoroinnilla pystyttäisiin yhä tehokkaammin puuttumaan esimerkiksi luonnon suojeleluun ja kartoittamaan niin ihmisen kuin luonnon aiheuttamia katastrofeja.

Satelliittiaineistot ovat ennen kaikkea tehokas tapa havainnoida ympäristöä, mutta ei tule unohtaa eroa niiden tarkkuudessa maastoaineistoon verrattuna. Ympäristöä havainnoidessa tulee ymmärtää kohdeympäristöä ja lopputuotteen käyttötarkoitusta, jotta osataan valita edullisimmat tutkimusmenetelmät oikean tuloksen saamiseksi.

Maastotutkimuksista saatava data on tarkempaa ja luotettavampaa mutta vaikeampaa toteuttaa täydellisesti. Kaikille alueille pääsy voi tiettyinä aikoina olla hankalaa, vaarallista tai mahdotonta. Satelliittiaineistolla tehtävä tutkimus on nopeampaa. Suurien alueiden tutkimus helpottuu, ja näiden tutkimusten perusteella voidaan tehokkaammin päättää ne paikat, joista halutaan tarkempaa maastotutkimusdataa.

Koska satelliittiaineiston prosessointi perustuu aina laskennallisiin toimituksiin, jatkuva kohdeaineiston ja kohteen attribuuttien tutkimus on tärkeää laskutoimitusten paremman tarkkuuden ja varmuuden takaamiseksi. Esimerkiksi lumen ja

metsän rakenne vaikuttaa lumipeitteen ominaisuuksiin. Parempi tietämys tutkittavien kohteiden rakenteesta ja ominaisuuksista parantaisi myös aineiston prosessointia ja analyysiä.

Satelliittidatan prosessointi on suurten tiedostokokojen vuoksi hankalaa normaaleilla tietokonealustoilla. Tähän on jo nyt kehitetty pilvialustoilla toimivia ratkaisuja. Toivottavasti myös näitä kehitetään jatkossa eteenpäin, jotta yhä useammalla on mahdollisuus päästä tarkastelemaan satelliittidataa ja kehittämään uusia prosessointitapoja ja sovelluksia.

Suomen ympäristön havainnointiin satelliittiaineistosta talviaikaan vaikuttaa suurilta osin Suomen maantieteellinen sijainti. Pilvisyys, valon puuttuminen ja kaamos hankaloittavat ja voivat estää optisen satelliittidatan saamisen pohjoisilta alueilta ajoittain.

Koska lumi on globaalisti suurin luonnollinen veden lähde ja Suomessa monin puolin läsnä oleva vaikuttaja, tulisi sitä tutkia enemmän. Suomi eroaa lähivaltioista maantieteellisesti, jolloin lumen alueelliset vaikutukset ovat osin erilaisia kuin esimerkiksi Ruotsissa ja Norjassa. Yhdistelemällä ja kehittämällä erilaisia kaukokartoitusaineistoja, maastotutkimusta sekä mallinnuksia tullaan saamaan edelleen tarkempaa dataa lumen kehityskulusta, muutoksista sekä luomaan yhä tarkempia ennusteita näiden suhteen.

Satelliittikaukokartoitus ja sen sovellukset ovat nopeasti kasvava tieteenala myös ja etenkin Suomessa. Niiden mahdollisuudet tuntuvat äärettömiltä. Satelliitit pienenevät, data tarkentuu, prosessointi nopeutuu, ja lopputuloksena tullaan saamaan luotettavampaa aineistoa Suomen sekä koko globaalin ympäristön tilasta ja muutoksista.

LÄHTEET

Aalto yliopisto 2018. Elektroniikan ja nanotekniikan laitos. Viitattu 10.5.2021
<https://www.aalto.fi/fi/elektroniikan-ja-nanotekniikan-laitos>.

Alasalmi, H. 2020. Käyttöliittymän toiminnot. SYKE-EO. Viitattu 30.4.2021
<https://wiki.tiimeri.fi/pages/viewpage.action?pageId=71733323>

Alasalmi, H. & Kervinen, M. 2020. Yleistä. SYKE-EO. Viitattu 30.4.2021
<https://wiki.tiimeri.fi/pages/viewpage.action?pageId=70192859>.

Bitcomp 2021. Metsävaratietojen ajantasaisuus automatisoituu. Viitattu 2.5.2021
<https://bitcomp.com/fi/2020/05/27/metsavaratiedon-automatisointi/>

Bruun, E. & Kervinen, M. 2021. Aineistot. SYKE-EO. Tiimeri-wiki. Viitattu 30.4.2021
<https://wiki.tiimeri.fi/display/sykeEO/Aineistot>.

Copernicus 2019. Userguide, Graphical User Interface. Viitattu 30.4
<https://scihub.copernicus.eu/userguide/GraphicalUserInterface>.

Copernicus 2021a. Copernicus Open Access Hub. Viitattu 30.4
<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

Copernicus 2021b. Infrastruktuuri, kaukokartoitussatelliitit. Viitattu 8.4.2021
<https://www.copernicus.eu/fi/copernicus/infrastruktuuri>.

Copernicus Brochure 2015. European Commission. Viitattu 8.4.2021
https://www.copernicus.eu/sites/default/files/documents/Copernicus_brochure_EN_web_Oct2017.pdf.

EarthExplorer 2012. General Information Product 136. USGS. Viitattu 28.4.2021
<https://pubs.usgs.gov/gip/136/pdf/gip136.pdf>.

ESA 2021a. NOAA POES. Viitattu 2.5.2021 <https://earth.esa.int/eogateway/missions/noaa>

ESA 2021b. RADARSAT. Viitattu 2.5.2021 <https://earth.esa.int/eogateway/missions/radarsat>.

ESA 2021c. Sentinel-1. Viitattu 6.5.2021 <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>

ESA 2021d. SNAP. Viitattu 4.5.2021 <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>.

Härkönen, S. 2021. Satelliittiaineiston tutkimus. Bitcomp Oy:n kehityspäällikön haastattelu. Sähköposti anni.leppamaki@edu.lapinamk.fi 26.3.2021. Tulostettu 10.5.2021.

ICEYE 2021a. About ICEYE. Viitattu 2.5.2021 <https://www.iceye.com/company>.

ICEYE 2021b. Satellite Data. Viitattu 27.4.2021 <https://www.iceye.com/satellite-data#C1>.

Koponen, S. 2021. Satelliittiaineiston tutkimus. SYKE:n tietokeskuksen ryhmäpäällikön haastattelu. Sähköposti anni.leppamaki@edu.lapinamk.fi 6.4.2021. Tulostettu 10.5.2021.

Maanmittauslaitos 2021. Satelliittikaukokartoitus. Viitattu 8.4.2021 <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/satelliittikaukokartoitus>.

NASA 2021a. About Terra. Viitattu 8.4.2021 <https://terra.nasa.gov/about>.

NASA 2021b. Current Missions. Viitattu 8.4.2021 <https://eosps.gsfc.nasa.gov/current-missions>.

Puttonen, E. 2021. Satelliittiaineiston tutkimus. Maanmittauslaitoksen tutkimuspäällikön haastattelu. Sähköposti anni.leppamaki@edu.lapinamk.fi 22.4.2021. Tulostettu 10.5.2021.

Rautiainen, M. 2021. Satelliittiaineiston tutkimus. Aalto-yliopiston professorin haastattelu. Sähköposti anni.leppamaki@edu.lapinamk.fi 10.5.2021. Tulostettu 10.5.2021.

RUS 2017. The RUS Service. Research and User Support. Viitattu 6.5.2021 <https://rus-copernicus.eu/portal/the-rus-service/>.

Saephan, S. 2018. Flood Mapping with Sentinel-1 Data Using SNAP And QGIS. Open.gis.lab. Viitattu 6.5 <https://opengislab.com/blog/2018/5/14/flood-mapping-with-sentinel-1-data-using-snap-and-qgis>.

Sentinel Hub 2021. EO Browser. Viitattu 28.4.2021 <https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/>.

Snow Cover Mapping with Sentinel-2 2019. Webinaari. Toim. Tereza Šmejkalová. RUS Copernicus. Training kit. Viitattu 6.5.2021 <https://www.youtube.com/watch?v=qvMaDkdJ2Ac>.

Strong, S. 2021. Remote sensing questions. ICEYE:n analytiikan varapääjohtajan haastattelu. Sähköposti anni.leppamaki@edu.lapinamk.fi 3.5.2021. Tulostettu 10.5.2021.

SYKE 2021a. Satelliittihavainnot. Viitattu 8.4.2021 https://www.syke.fi/fi-FI/Avoin_tieto/Satelliittihavainnot.

SYKE 2021b. TARKKA. Viitattu 2.5.2021 <https://www.i4.ymparisto.fi/i4/fin/tarkka/index.html>.

Trofaier, A. 2018. Monitoring Snow & Ice from space. ESA. Viitattu 5.5.2021 https://land.copernicus.eu/news/sentinels-contributing-to-s-i-monitoring/at_download/file.

USGS 2021a. EarthExplorer. Viitattu 2.5.2021 <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

USGS 2021b. Landsat Satellite Missions. Viitattu 8.4.2021 <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-satellite-missions>.