

Metsävaratiedon ajantasaistus – satelliittikuviin perustuva muutostulkinta

Loppuraportti

Kirjoittajat: Laura Sirro, Tuomas Häme, Yrjö Rauste, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Timo Pitkänen, Annika Kangas, Luonnonvarakeskus
Aki Hostikka, Suomen metsäkeskus
Markus Törmä, Suomen ympäristökeskus
Lauri Häme, Rosanna Huotari, Joni Norppa, Satellio Oy

Tiivistelmä

Hankkeessa kehitettiin muutostulkintamenetelmä ja pilottipalvelu metsän hakkuiden seurantaan. Menetelmä hyödyntää Copernicus Sentinel-2 -satelliittikuvien aikasarjaa ja AutoChange -muutostulkintamenetelmää. Menetelmää sovellettiin kolmella pilottialueella: Ähtärin, Liperin ja Parikkalan-Joutsenon seudulla vuosina 2015-2017 ja tulokset jaettiin vuonna 2018 julkaistun pilottipalvelun kautta. Muutostulkintojen luotettavuutta arvioitiin tarkoista satelliittikuvista kerätyn referenssiaineiston avulla ja Suomen Metsäkeskus koekäytti tulkintatuloksia toiminnassaan. Lisäksi hankkeessa kehitettiin menetelmiä hakatun pohjapinta-alan arviointiin ja maanmuokkauksen tunnistamiseen Sentinel-2 satelliittikuvista. Hankkeen tavoitteena oli myös metsätuhojen tunnistamiseen liittyvä menetelmäkehitys.

Tarkkojen satelliittikuvien avulla tehdyn virhearvioinnin tulosten perusteella avohakkuut tunnistettiin kehitetyllä menetelmällä hyvin. Lisäksi tunnistettiin voimakkaat harvennukset. Keskimääräinen kokonaisluokittelutarkkuus oli keskimäärin noin 90%. Hakatun puuston pohjapinta-alan arvioinnin tulokset olivat virhelukujen valossa lupaavia mutta maastotarkastusten perusteella mallit yliarvioivat hakatun puuston pohjapinta-alaa. Maanmuokkausta ei pystytty tunnistamaan luotettavasti. Tarvitaan lisätutkimuksia tarkemmalla ja monipuolisemmalla aineistolla, jotta voidaan sanoa missä olosuhteissa maanmuokkaus voidaan tunnistaa kaukokartoitusaineiston avulla. Metsätuhojen tunnistamiseen liittyen hankkeen käytössä ei ollut riittävästi soveltuvaa satelliitti- ja referenssiaineistoa varsinaista menetelmäkehitystä ja testausta varten.

Metsäkeskus piti koekäytön perusteella hakkuiden satelliittikuvaseurannan tuloksia hyödyllisinä. Hankkeen tuloksena metsälain toimeenpanon prosessit ovat uudistuneet Metsäkeskuksessa merkittävästi. Maa- ja metsätalousministeriö on muuttanut vuotuista tarkastusmääräystä vuodelle 2019. Metsänkäyttöilmoitusten maastotarkastusten painopiste on siirretty tapahtuneiden hakkuiden ja niiden laadun valvontaan aikaisemmasta etukäteisvalvonnasta. Hakkuiden jälkeiset tarkastuskohteet haetaan vertaamalla erotuskuvatulkinnan tuloksia muihin Metsäkeskuksen käytössä oleviin aineistoihin ja analysoimalla eroja. Toinen uuden aineiston mukanaan tuoma parannus Metsälain toimeenpanoon on, että kyetään valvomaan aiempaa paremmin, että metsänkäyttöilmoitukset toimitetaan. Satelliittikuvien muutostulkinnan tuloksia voidaan hyödyntää myös mm. metsätuhojen leviämisen torjunnassa, koska aineistojen avulla voidaan saada tietoa riskikohteista ja seurannan painopistettä pystytään keskittämään niihin.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet.....	4
2 Tutkimusosapuolet ja yhteistyö	4
3 Tutkimuksen tulokset	5
3.1 Tutkimusmenetelmät ja aineisto.....	5
3.1.1 Tutkimusalue	5
3.1.2 Aineiston hankinta ja esikäsittely.....	5
3.1.3 Muutostulkinnan menetelmäkehitys	7
3.1.4 Virhearvioinnin menetelmäkehitys.....	15
3.1.5 Muutostulkintojen laskenta ja niiden luotettavuuden arviointi	17
3.1.6 Palvelun kehitys ja palvelun pilotointi	17
3.2 Tutkimustulokset.....	18
3.2.1 Muutostulkinta ja virhearviointi	18
3.2.2 Palvelun pilotoinnin tulokset.....	27
3.3 Toteutusvaiheen arviointi	27
3.4 Julkaisut	27
4 Tulosten arviointi.....	28
4.1 Tulosten käytännön sovellutuskelpoisuus	28
4.2 Tulosten tieteellinen merkitys.....	28
5 Lähteet.....	29

1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Suomen metsäkeskus on päivittänyt metsävaratietoa tähän saakka lähinnä suunnitelluista hakkuista tehtyjen metsänkäyttöilmoitusten perusteella. Metsänkäyttöilmoitukset eivät kuitenkaan sovellu sellaisenaan metsävaratiedon päivitykseen, koska kaikki hakkuut eivät toteudu ilmoitetun kaltaisina ja osaa ilmoitetuista hakkuista ei tehdä lainkaan. Lisäksi, metsänkäyttöilmoitukset ovat voimassa kolme vuotta ja hakkuu voidaan toteuttaa voimassaoloaikana milloin tahansa. Lisähaasteen tuo se, ettei kaikista hakkuista tehdä lainkaan metsänkäyttöilmoitusta. Näistä syistä Metsäkeskuksella oli tarve hakkuidenseurantatyökalulle, joka antaisi vähintään vuosittain tietoa toteutuneista avohakkuista ja harvennuksista.

Euroopan unionin ja Euroopan avaruusjärjestön yhteisen Copernicus-ympäristöohjelman Sentinel-satelliitit ovat tuottaneet optista korkean erotuskyvyn (pikselikoko 10 m - 60 m riippuen kanavasta) satelliittiaineistoa vuodesta 2015. Aineisto on ilmaista ja sitä tuotetaan operatiivisesti. Korkean erotuskyvyn optinen satelliittiaineisto soveltuu hyvin metsän hakkuiden seurantaan ja aineiston katsottiin soveltuvan muutostulkintamenetelmän ja pilottipalvelun kehittämiseen Metsäkeskuksen tarpeita varten.

Hankkeen päätavoite oli kehittää menetelmä ja pilottipalvelu metsävaratiedon päivittämiseen ja metsälain valvomiseen satelliittikuvien avulla. Menetelmällä oli tarkoitus saada selville hakkuiden sijainti, ennuste hakkuutavasta ja arvio muutoksen ajankohdasta sekä arvio luotettavuudesta ja toimittaa kuviokartat käyttäjälle palvelurajapinnan kautta. Päähuomio oli hakkuiden havaitsemisessa mutta lisäksi harvennusten kohdalla pyrittiin arvioimaan hakatun puuston pohjapinta-alaa. Pilotissa käytettävän menetelmän rinnalla oli tavoitteena selvittää eri vuodeaikojen kuvien käytön mahdollisuuksia muutostulkinnassa. Talvi-, kevät- ja syyskuvien käyttö kesäkuvien rinnalla mahdollistaisi muutosten tiheimmän päivittämisen.

Lisäksi selvitettiin metsätuhojen havaitsemista ja maanmuokkauksen tunnistamista. Metsätuhojen kartoituksen tavoitteena oli pääasiassa kirjanpainajatuhojen paikantaminen satelliittikuvien aikasarjan avulla. Hankkeen kuluessa tuli esiin tarve maanmuokkauksen tunnistamiselle ja tästä johtuen hankkeessa selvitettiin mahdollisuuksia maanmuokkauksen ajankohdan määrittämiseen satelliittikuva-aineiston avulla.

2 Tutkimusosapuolet ja yhteistyö

Hankkeen tutkimusosapuolia olivat Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Luonnonvarakeskus, Suomen Metsäkeskus, Suomen ympäristökeskus ja Satellio Oy (nykyisin Terramonitor).

VTT koordinoi hanketta ja oli päävastuussa satelliittikuvien hankinnasta ja esikäsittelystä sekä muutostulkinnan menetelmäkehityksestä. Luonnonvarakeskuksen tärkein rooli oli kehittää ja soveltaa virhearviointimenetelmiä. Suomen ympäristökeskuksen päätehtävät liittyivät satelliittikuvien hankintaan ja esikäsittelyyn. Satellio kehitti Sentinel-2-kuvien aikasarjaan perustuvia menetelmiä ja automatisoituun prosessointiketjuun perustuvan muutostulkintapalvelun, jota testattiin laajasti Suomen alueella. Lisäksi Satellio tuotti pilottialueiden muutostulkintatulokset. Metsäkeskuksen päätehtävä oli palvelun vaatimusmäärittely ja pilotointi. Lisäksi Metsäkeskus toimitti hankkeen käyttöön aineistoja.

Hankkeessa tehtiin yhteistyötä usean tahon kanssa. Hanketta esiteltiin seminaareissa ja konferensseissa sekä kotimaassa, että ulkomailla minkä lisäksi hankkeeseen liittyen käytiin keskusteluja useiden kotimaisten toimijoiden kanssa, mm. jo hankkeen suunnitelmassa yhteistyökumppaniksi määritellyn Maanmittauslaitoksen kanssa.

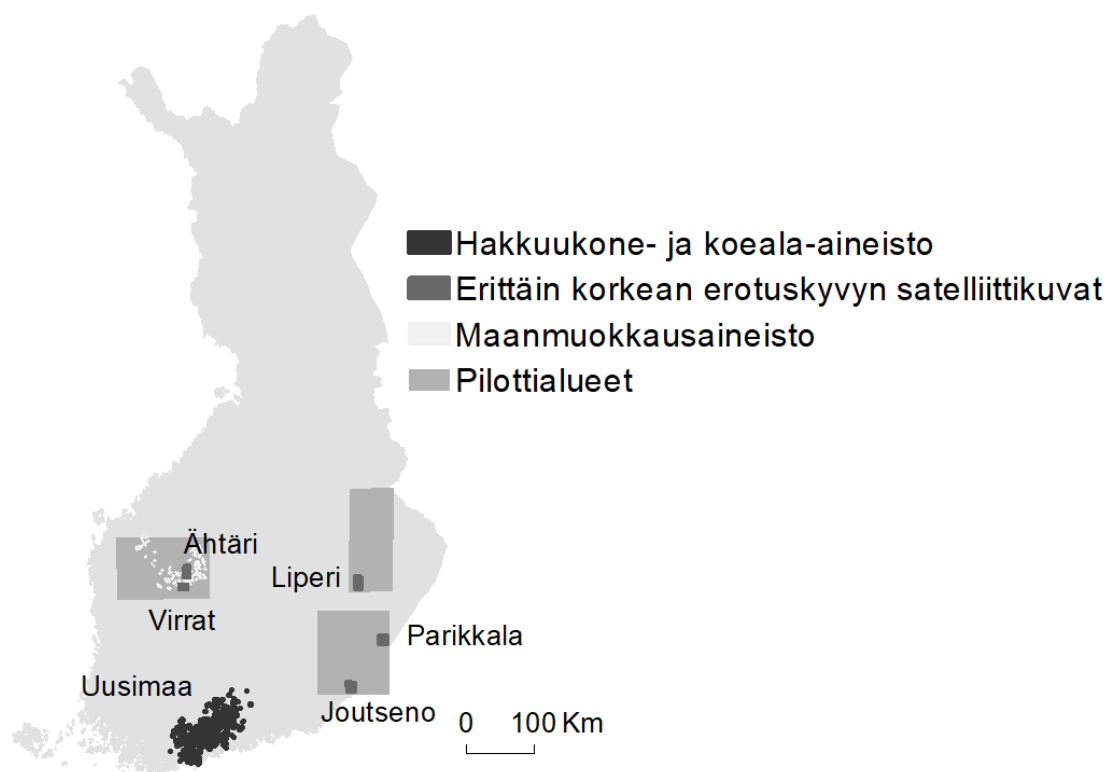
Hankkeen käyttöön saatiin aineistoja useilta toimijoilta. Metsäteholta saatiin hanketta varten hakkuukoneaineistoa menetelmäkehitystyössä käytettäväksi ja Euroopan avaruusjärjestöltä saatiin hakemuksen perusteella erittäin korkean erotuskyvyn kuva-aineistoa (Category-1 projektit C1F.33532 ja C1F.35754). Metsätoimijoilta saatiin Metsäkeskuksen kautta aineistoa maanmuokkauksen tunnistamisen kehitystyötä varten.

3 Tutkimuksen tulokset

3.1 Tutkimusmenetelmät ja aineisto

3.1.1 Tutkimusalue

Hankkeessa kehitettiin muutostulkintamenetelmä ja pilottipalvelu sovellettavaksi koko Suomen alueelle. Muutostulkintoja tehtiin eri puolella Suomea mutta keskeisten tulosten laskentaa ja palvelun pilotointia varten määriteltiin kolme pilottialuetta (Kuva 1). Hankkeen aikana määriteltiin viisi aluetta erittäin korkean erotuskyvyn satelliittiaineiston tilaamista varten. Alueet sijaitsevat Ähtärissä, Parikkalassa, Liperissä, Joutsenossa ja Virroilla. Näiden alueiden lisäksi menetelmäkehitystä tehtiin Uudellamaalla, mistä hankkeen käytössä oli Metsätehon keräämää ja käsittelemää hakkuukoneaineistoa sekä Metsäkeskuksen koeala-aineistoa.



Kuva 1. Hankkeen pilottialueet, virhearvioinnissa käytettyjen erittäin korkean erotuskyvyn kuvien sijainnit ja hakkuukone- ja koeala-aineistojen sijainnit.

3.1.2 Aineiston hankinta ja esikäsittely

3.1.2.1 Sentinel-2 -satelliittikuvat

Muutostulkinnan ensisijaisena lähdeaineistona käytettiin Copernicus Sentinel-2-satelliittikuva-aineistoa. Sentinel-2-konstellaatio koostuu kahdesta identtisestä satelliitista, jotka tuottavat satelliittikuva-aineistoa päivittäin. Suomen alueella Sentinel-2-satelliitit tuottavat tällä hetkellä

kuvia 2-3 päivän välein. Sentinel-2-aineistoa tarjoavat useat eri rajapintaoperaattorit, kuten EU:n ja ESA:n Scihub, Sodankylän kansallinen satelliittipalvelukeskus, Amazon Web Services (AWS) sekä Sentinel Hub.

Sentinel-2-aineistoa hankkeessa käytettiin kahdella tapaa. Sitä ladattiin interaktiivisten käyttöliittymien kautta ja käsiteltiin manuaalisesti kuva kualta. Lisäksi hankkeessa kehitettiin automaattinen menetelmä Sentinel-2-satelliittikuvien lataamiseen avoimista rajapinnoista sekä ladatun aineiston esikäsittelyyn.

Esikäsittelyn kannalta suurimmaksi haasteeksi todettiin pilvisten kuvien käsittely siten että muutostulkinta onnistuu luotettavasti. Pilvimaskien tuottamiseksi testattiin automaattisia algoritmeja FMask (Zhu ym. 2015), Idepix (<https://github.com/bcdev/snap-idepix>) ja Sen2cor (<http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/>), Envimon (Parmes ym. 2017). Lisäksi arvioitiin Sentinel-2 tason 2A aineistoon sisältyvää pilvimaskia. VTT:n kehittämä Envimon-menetelmä tuotti parhaan tuloksen. Tuloksista mikään ei kuitenkaan ollut riittävän hyvä käytettäväksi sellaisenaan. Tästä syystä Sentinel-2 -kuvien pilvimaskit menetelmäkehitystä ja kuvakohtaisia muutostulkintoja varten tehtiin paikkatieto-ohjelmalla manuaalisesti visuaalisena tulkintana kuvista tehtyjä oikea- ja väärävärikuva käyttäen. Pilottipalvelua varten kehitettiin automaattinen menetelmä pilvisen kuva-aineiston hylkäämiseen.

3.1.2.2 Erittäin korkean erotuskyvyn satelliittikuvat

Euroopan avaruusjärjestön kautta saatiin erittäin korkean erotuskyvyn satelliittiaineistoa viideltä alueelta (Taulukko 1). Virhearviointia varten hankitut vuosien 2015, 2016 ja 2017 yhteensä kahdeksan erittäin korkean erotuskyvyn kuvaa orto-oikaistiin käyttäen Maanmittauslaitoksen avoimen aineiston korkeusmallia, jonka pikselikoko oli 2 m. Oikaistuista kuvista tehtiin pankromaattisella kanavalla terävöitetyt oikea- ja väärävärikompositiot (Kuva 2) referenssiaineiston keräämistä varten.

Taulukko 1. Käytössä ollut erittäin korkean erotuskyvyn kuva-aineisto. Aineistojen nimet viittaavat Pléiades-1A/B ja WorldView-2 -satelliitteihin.

Alue	Vuosi 2015	Aineisto	Vuosi 2016	Aineisto	Vuosi 2017	Aineisto
Ähtäri	15.8.2015	Pléiades	14.9.2016	Pléiades	24.7.2017	Pleiadés
Parikkala	20.8.2015	WV2	13.9.2016	Pléiades	-	-
Liperi	31.8.2015	WV2	19.9.2016	Pléiades	14.8.2017	Pleiadés
Joutseno	17.8.2015	WV2	19.9.2016	Pléiades	-	-
Virrat	20.8.2015	Pléiades	13.9.2016	Pléiades	-	-



Kuva 2. Pala erittäin korkean erotuskyvyn Pléiades-kuvasta 15.8.2015. Vasemmalla oikeavärikuva ja oikealla väärävärikuva (R: lähi-infra, G: punainen, B: vihreä). Pléiades -kuvat © CNES 2015 distribution Airbus DS.

3.1.2.3 Referenssiaineisto

Hankkeessa oli käytettävissä metsiin liittyvää paikkatietoaineistoa useasta lähteestä (Kuva 1):

- Metsäkeskuksen koeala-aineistoa Uudeltamaalta
- Metsäkeskuksen kuvioitaista metsävaratietoa <https://www.metsaan.fi/paikkatietoaineistot>
- Metsätehon keräämää ja käsittelemää kuviomuotoista hakkuukoneaineistoa Uudeltamaalta
- Corine2012-aineistoa
- Metsäkeskuksen metsämaski <https://www.metsakeskus.fi/metsamaski>
- Metsänkäyttöilmoitusaineistoa Metsäkeskuksesta <https://www.metsaan.fi/paikkatietoaineistot>
- Maanmuokkausaineistoa metsätoimijoilta Ähtärin seudulta.

Metsäkeskuksen koeala-aineisto sisälsi 831 maastossa vuonna 2015 mitattua koealaa ja se sisälsi laajan joukon metsämuuttujia. Aineistoa hyödynnettiin muutostulkinnassa käytettävien Sentinel-2 aallonpituuskanavien valinnassa ja sen avulla kehitettiin puuston tilavuusmalli, jota käytettiin puuston tilavuuden muutoksen arvioinnissa muutostulkinnan yhteydessä.

Muutostulkinnassa käytettävien Sentinel-2-kanavien valinnassa käytettiin myös Metsätehon keräämää ja käsittelemää kuviomuotoista hakkuukoneaineistoa. Hakkuukoneaineisto oli mitattu vuosina 2015-2016 ja se sisälsi mm. hakkuutavan, hakkuun ajankohdan ja hakkuulle hakattujen puiden sijaintien perusteella lasketut maantieteelliset rajat 738 kuviolle. Tätä aineistoa käytettiin muutostulkinnassa käytettävien Sentinel-2-kanavien valinnassa ja lisäksi yhdessä Metsäkeskuksen kuviomuotoisen metsävaratiedon kanssa hakatun pohjapinta-alan mallintamisen referenssiaineistona.

Muutostulkinnan kohdistamiseen metsäalueille käytettiin metsämaskia. Hankkeen alussa hyödynnettiin metsämaskina Corine-maankäyttöluokitusta ja Metsäkeskuksen päivitetty metsämaski otettiin käyttöön vuoden 2017 aikana.

Metsänkäyttöilmoituksia käytettiin muutoksen luokittelun apuaineistona ja erittäin korkean erotuskyvyn kuvien alueen osituksessa referenssiaineiston keräämistä varten. Lisäksi niitä käytettiin menetelmäkehityksessä muutostulkintatulosten laadun arviointiin.

Maanmuokkausten paikallistamisen menetelmäkehitystä varten metsäyhtiöiltä saatiin kaksi vektoriaineistoa muokatuista kuvioista ja niiden muokkauspäivämääristä. Näissä aineistoissa muokkauspäivämäärät tiettävästi perustuivat urakoitsijoiden laskutuspäivämääriin. Tarkempaan analyysiin valittiin UPM:ltä saatu aineisto, joka sisälsi eniten kuvioita valitulla Ähtärin tutkimusalueella. Ensimmäisten maanmuokkaukaskartoituskokeiden jälkeen saatiin Asta-järjestelmästä haettu muokkauspäivämääräaineisto, joka vastannee paremmin muokkauksen todellista toteutuspäivää. Lisäksi Metsäkeskukselta saatiin noin 30 kuvion maastotarkastusaineisto tulkituista maanmuokkauksista metsähallituksen mailla Ähtärissä.

3.1.3 Muutostulkinnan menetelmäkehitys

3.1.3.1 Muutostulkinnan menetelmäkehityksen osat ja tavoitteet

Muutostulkinnan menetelmäkehitystyö jakautui useaan osaan, joista keskeisimmän tavoite oli avohakkuiden ja harvennusten paikantaminen. Hakkuiden paikantamiseen ja tunnistamiseen liittyvä kehitystyö voidaan jakaa edelleen kahteen osaan: Kahden kuvan väliseen muutostulkintaan ja aikasarjaan perustuvaan muutostulkintaan. Päätyökaluna molemmissa osissa oli AutoChange-menetelmä ja -ohjelma (Häme ym. 1998), jota on jatkokehitetty viime vuosina usean tutkimushankkeen yhteydessä. Kahden ajankohdan muutostulkintaan liittyvän kehitystyön päätavoitteena oli määritellä AutoChangen ja sen tuluskanavien perusteella

tehtävän luokittelun parametrit aikasarjamenetelmää varten. Lisäksi tutkittiin eri vuodenaikojen aineiston käyttöä muutostulkinnassa.

Harvennusten ja avohakkuiden paikantamisen lisäksi tutkittiin hakatun pohjapinta-alan arviointia, kirjapainajatuhojen havaitsemista sekä maanmuokkauksen ajankohdan määrittämistä Sentinel-2-aineiston avulla.

3.1.3.2 AutoChange-menetelmä

AutoChange-muutostulkintamenetelmä perustuu kahden ajankohdan satelliittiaineiston hierarkkiseen luokitteluun. Satelliittikuvan pikselit luokitetaan ensimmäisen ajankohdan kuvan näytteiden perusteella ohjaamattomasti pääluokkiin pikseleiden heijastussuhdearvojen perusteella. Kuhunkin pääluokkaan kuuluvat pikselit luokitellaan jälkimmäisen kuvan näytteiden perusteella edelleen alaluokkiin. Kullekin alaluokalle lasketaan muutoksen voimakkuus jälkimmäisen kuvan kanavien heijastussuhdearvoja käyttäen. Muutoksen tyyppi lasketaan jälkimmäisen kuvan NDVI-kasvillisuusindeksin ja punaisen kanavan heijastussuhteen perusteella lasketun biomassaindeksin avulla. Tuloksena on neljä muutostyyppiä, joista kaksi ennustaa biomassan vähenemistä ja kaksi biomassan lisääntymistä. AutoChange tuottaa jokaiselle kohdepikselille seuraavat tunnusluvut:

- Maanpeitettä kuvaava pääluokka
- Alaluokka
- Muutostyyppi
- Muutoksen voimakkuus
- Ensimmäisen ajankohdan biomassaindeksi

AutoChangen tuluskanavien perusteella tehtävän muutoksen luokittelun pääperiaate on, että pikseli luokitellaan hakkuuksi, jos sen pääluokka edustaa metsää ensimmäisen ajankohdan satelliittikuvassa, sen muutostyyppi ennustaa biomassan vähenemistä ja muutoksen voimakkuus ylittää harvennuksille tai avohakkuille määritellyn muutoksen voimakkuuden kynnsarvon.

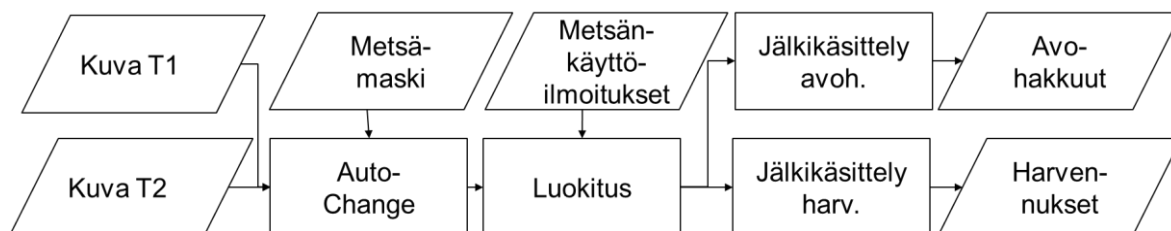
Jos maastoaineistoa on saatavilla, muutoksen luokittelussa käytettävät kynnsarvot voidaan määrittää sen avulla. Luotettavaa maastoaineistoa ei kuitenkaan ole yleensä käytettävissä. Suomen alueella on käytettävissä Metsäkeskuksen metsämaski, jota käytettiin tässä hankkeessa kohdistamaan muutostulkinta metsäalueille.

Ensimmäisen ajankohdan kuvassa metsää edustavat pääluokat voidaan myös määrittää esimerkiksi tarkastelemalla satelliittiaineistoa ja muutuskanavia ja nimeämällä luokat interaktiivisesti niiden avulla. AutoChange numeroi pääluokat oletusarvoisesti punaisen kanavan heijastussuhteen perusteella kasvavaan järjestykseen. Metsäpikseleiden heijastussuhde on punaisella kanavalla yleensä alhainen, korkeintaan 5%. Koska pääluokat edustavat tiettyä heijastussuhteen tasoa, voidaan löytää kynnsarvo T, jota pienemmät arvot eli pääluokat 1...T määritellään metsäksi.

Samoin kuin metsää edustavat pääluokat, kynnykset AutoChangen tuottamalle muutoksen voimakkuudelle valitaan usein interaktiivisesti tarkastelemalla lähtöaineistoa ja muutoksen voimakkuuskanavaa.

3.1.3.3 Muutostulkinnan parametrien määrittäminen kahden ajankohdan kuvista

Kahden ajankohdan muutostulkinnan (Kuva 3) päätavoitteena oli löytää parhaat muutostulkintaan soveltuvat Sentinel-2 -kuvien aallonpituuskanavat, AutoChange-ohjelman keskeiset parametrit ja AutoChangen tuluskanaviin perustuvan muutoksen luokittelun parametrit aikasarjamenetelmää varten.



Kuva 3. Kahden kuvan muutostulkintaketju yksinkertaistettuna.

AutoChangen parametriarvoja säädettiin aiempaa herkemiksi pienille muutoksille. Esimerkiksi tyypillisesti ensimmäisen kuvan klusteriluokkien määrä on useita kymmeniä ja toisen ajankohdan alaluokkien määrä esimerkiksi kolme, jolloin usein kaksi alaluokkaa kutakin pääluokkaa kohti edustaa muuttumatonta tai vähän muuttunutta metsää ja yksi avohakkuuta. Koska tässä tutkimuksessa tavoitteena oli löytää myös keskisuuria muutoksia eli harvennuksia, tehtiin koemuutostulkintoja eri alaluokkien määrillä. Oletus oli, että tarvitaan useampia alaluokkia, jotta voidaan löytää myös harvennuksia.

Muutostulkinnassa käytettävät Sentinel-2 aallonpituuskanavat valittiin analysoimalla Uudenmaan tutkimusalueella Metsäkeskuksen koeala-aineistoa ja koealoille poimittuja Sentinel-2 -kuvien (Taulukko 2) kanavien heijastusarvoja. Lisäksi analysoitiin hakkuukoneaineistoa ja hakkuukuvioille poimittuja Sentinel-2-kanavien heijastussuhteiden keskimääräisiä erotuksia ajankohtien välillä. Korrelaatioanalyysin tulosten perusteella laskettiin edelleen koemuutostulkintoja eri kanavayhdistelmillä. Muutostulkinnan kanavat valittiin koemuutostulkintojen ja hakkuukoneaineiston hakatun pohjapinta-alan korrelaatioanalyysin perusteella.

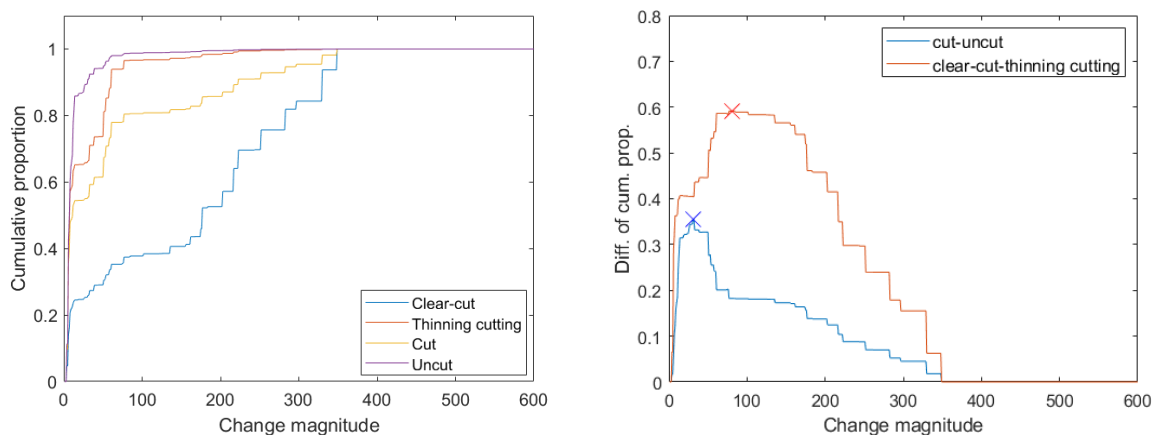
Taulukko 2. Kahden kuvan tulkinnoissa käytetyt Sentinel-2 kuvat.

Tulkinta	Kuvan 1 ajankohta	Kuvan 2 ajankohta
Uusimaa 2015-2016	17.8.2015	31.8.2016
Ähtari 2015-2016	23.8.2015	13.9.2016
Liperi 2015-2016	21.8.2015	14.9.2016
Ähtari 2015-2017	23.8.2015	5.9.2017
Liperi 2015-2017	21.8.2015	9.7.2017
Pariikkala 2015-2016	21.8.2015	28.8.2016
Joutseno 2015-2016	21.8.2015	28.8.2016
Virrat-länsi 2015-2016	23.8.2015	13.9.2016
Virrat-itä 2015-2016	20.8.2015	13.9.2016
Ähtari 2016-2017	13.9.2016	6.9.2017
Liperi 2016-2017	14.9.2016	9.7.2017

Hankkeessa kehitettiin kaksi menetelmää muutoksen automaattiseen luokitteluun metsänkäyttöilmoitusaineiston avulla. Vaikka metsänkäyttöilmoitusaineisto ei kerro luotettavasti metsän muutoksista, hakkuun todennäköisyys on suurempi ilmoitusten alueella kuin niiden ulkopuolisella metsäalueella. Samoin avohakkuiden todennäköisyyden voidaan olettaa olevan suurempi avohakkuista tehtyjen metsänkäyttöilmoitusten alueella kuin harvennuksista tehtyjen metsänkäyttöilmoitusten alueella. Kehitetyt menetelmät perustuivat AutoChangen tuottamien alaluokkien nimeämiseen ja muutoksen voimakkuuden kynnsarvon määrittämiseen.

AutoChangen alaluokkien nimeämiseen perustuvassa menetelmässä alaluokat nimettiin hierarkkisesti sen perusteella, onko kyseisen alaluokan osuus suurempi metsänkäyttöilmoitusten alueella vai niiden ulkopuolisella metsäalueella ja edelleen onko alaluokan osuus suurempi avohakkuista vai harvennuksista tehtyjen ilmoitusten alueella.

Muutoksen voimakkuuteen perustuvassa menetelmässä tarkasteltiin muutoksen voimakkuuden kumulatiivista histogrammia metsänkäyttöilmoitusten alueella ja niiden ulkopuolisella metsäalueella (Kuva 4). Oletuksena oli, että muutoksen voimakkuuden pienten arvojen osuus on suurempi metsänkäyttöilmoitusten ulkopuolella kuin sisäpuolella ja suurilla muutoksen voimakkuuden arvoilla osuus on suurempi metsänkäyttöilmoitusten alueella kuin niiden ulkopuolella. Tavoitteena oli löytää muutoksen voimakkuuden arvo, jonka ylittävien pikseleiden osuus on suurempi metsänkäyttöilmoitusten alueella kuin niiden ulkopuolella. Tästä arvosta alkaen kumulatiivisten osuuksien ero metsänkäyttöilmoitusten sisäpuolisella ja ulkopuolisella alueella alkaa pienentyä. Arvo, jolla kumulatiivisten osuuksien ero on suurimmillaan, asetettiin harvennusten kynnyksarvoksi. Vastaavasti verrattiin kumulatiivisten histogrammien kehitystä avohakkuu- ja harvennusmetsänkäyttöilmoitusten alueella ja näin saatiin avohakkuiden kynnyksarvo.



Kuva 4. Muutoksen voimakkuuden kumulatiivinen histogrammi metsänkäyttöilmoitusten avulla määritellyissä ositteissa. Vasemmalla kunkin ositteen kumulatiivinen histogrammi ja oikealla histogrammien erotukset ja rasteilla merkittynä valitut kynnyksarvot.

Molempia metsänkäyttöilmoitusainestoa hyödyntäviä menetelmiä sovellettiin pilottialueilla käyttäen Sentinel-2 kuvia (Taulukko 2) ja metsänkäyttöilmoituksia. Saaduille muutostulkinnoille laskettiin virhearviot erittäin korkean erotuskyvyn kuvista kerättyä referenssiaineistoa käyttäen.

3.1.3.4 Avohakkuiden ja harvennusten paikantaminen aikasarjan avulla

Kahden kuvan välisten tulkintojen perusteella hankkeessa kehitettiin kuvien aikasarjaa hyödyntävä muutostulkintamenetelmä (Kuva 5, Kuva 6). Aikasarjamenetelmässä tutkittava alue jaetaan ennalta määrättyihin ruutuihin ja jokaisen ruudun kohdalle tehdään muutostulkinta perustuen usean eri ajankohdan satelliittikuvaan. Tässä tapauksessa kunkin ruudun koko oli 6 km x 6 km. Se perustui Suomessa käytettävään karttalehtijakoon (https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/old/UTM_lehtijakopdf.pdf).

Aikasarjamenetelmässä kuvien pilvisuus otetaan huomioon kolmessa eri vaiheessa. Ensimmäiseksi otetaan huomioon Sentinel-2 -kuvien metatiedoissa ilmoitettu pilvisuus. Metatietojen ilmoittama pilvisuus on suuntaa antava ja sen avulla voidaan hylätä täysin pilviset Sentinel-2-kuvat. Toisessa vaiheessa Sentinel-2-kuva pilkotaan ruutuihin ja jokaiselle ruudulle muodostetaan Sentinel-2-kuvien aikasarja. Sitten satelliittikuvien aikasarja ladataan rajapinnasta ja rajataan ruutujen mukaisesti. Näin satelliittiaineisto saadaan niin sanottuun kuvalaattamuotoon (engl. tile). Kuvalaatat joissa satelliittiaineisto kattaa vain osan ruudusta hylätään.

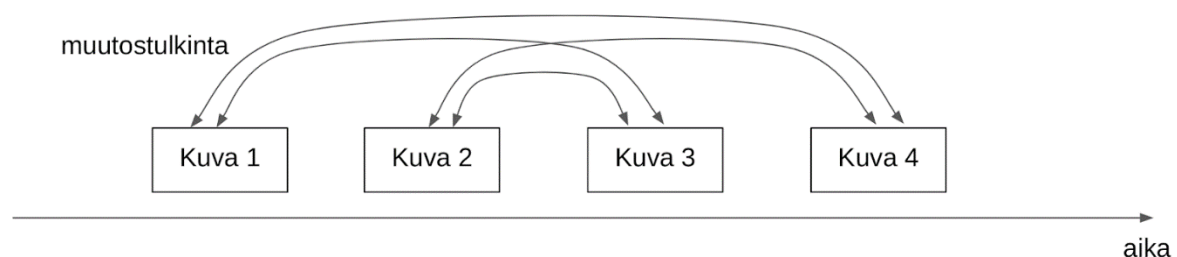
Seuraavassa vaiheessa kunkin ruudun poikkeavat kuvalaatat hylätään aikasarjan avulla. Poikkeavalla kuvalaattalla tarkoitetaan tässä kuvalaattoja jotka eroavat merkittävästi aikasarjan

enemmistöstä. Tämä toteutetaan tarkastelemalla satelliittiaineiston aikasarjan kanavien pikseliarvojen jakaumaa kullekin pikselille. Tämän vaiheen tarkoituksena on poistaa tulkinnasta kuvat jotka sisältävät pilviä, niiden varjoja tai muita elementtejä jotka voivat häiritä aikasarjamuutostulkintaa. Seuraavia mittareita käytettiin poikkeavien kuvalaattojen tunnistamisessa.

- Cirrus: Sentinel-2-kuvan kanavan 10 (SWIR-Cirrus) pikseleiden lukumäärä joiden arvo ylittää tietyn kynnsarvon.
- Kirkkaat pikselit: Sentinel-2-kuvan kanavan 2 (sininen) pikseleiden lukumäärä joiden arvo ylittää tietyn kynnsarvon.
- Eroavaisuus pikselimediaanista: Sentinel-2-kuvan kanavan 2 pikseleiden lukumäärä jotka poikkeavat pikselikohtaisesta aikasarjamediaanista enemmän kuin tietyn kynnsarvon verran. Tätä mittaria käytetään sekä epätavallisen kirkkaiden että epätavallisen tummien pikselien lukumäärän arviointiin.

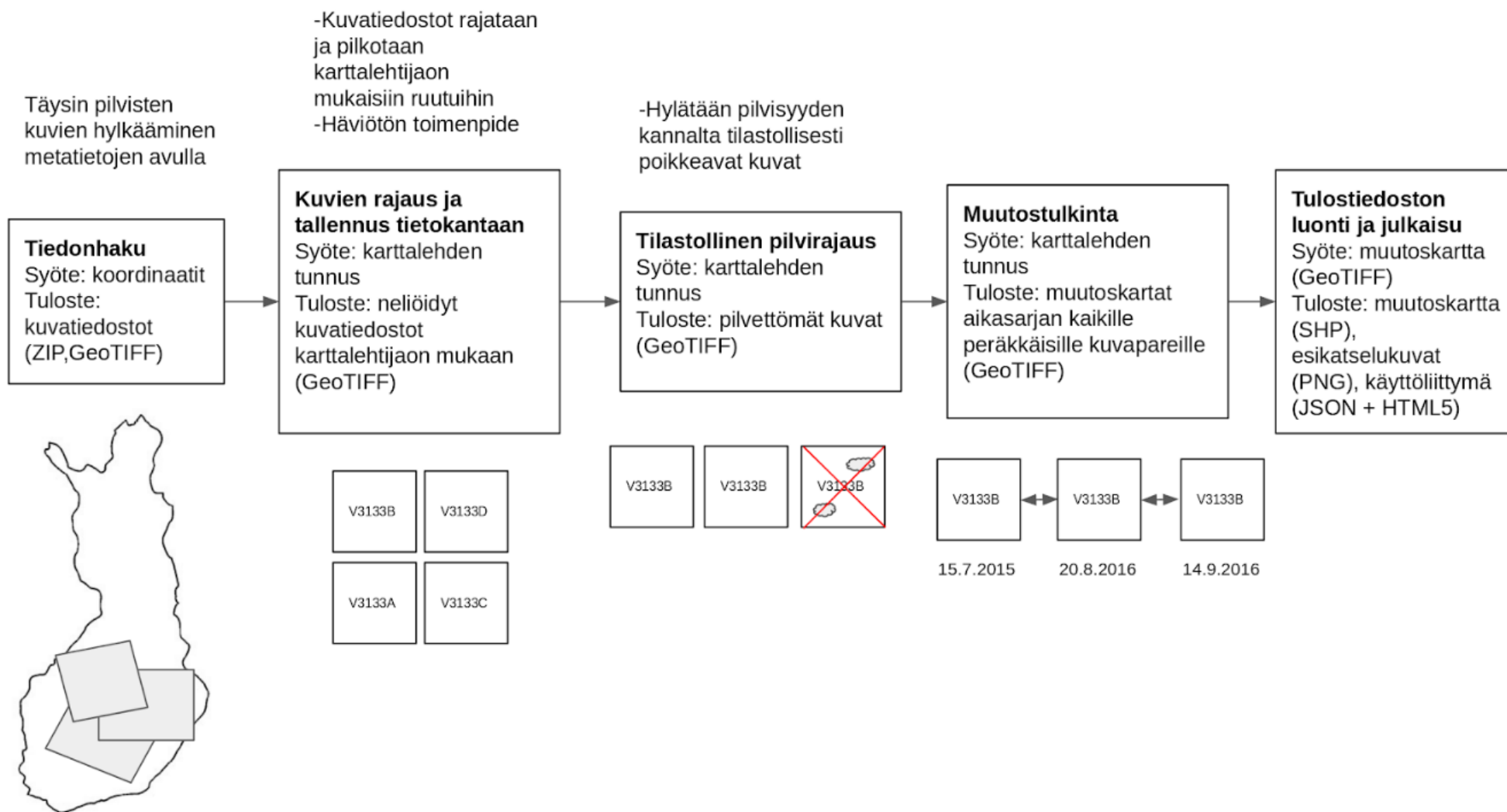
Jäljelle jääville kuville tehdään aikasarjamuutostulkinta, jossa jokainen muutostulkinta varmistetaan hyödyntämällä useampaa kuvaparivertailua. Varmistamalla muutostulkinta aikasarjaa hyödyntäen poistetaan yksittäisten kuviin jäljelle jääneiden pilvien aiheuttamat virhetulkinnat.

Aikasarjatulkinnan peruseriaate on esitetty alla olevassa esimerkikaaviossa (Kuva 5), jossa muutostulkinta kuvien 2 ja 3 välillä tehdään hyödyntämällä neljää eri aikasarjan kuvaa. Aikasarjamenetelmä perustuu oletukseen, että kahden kuvan A ja B välillä havaittava muutos näkyy myös kuvien C ja D välillä, jos C:n ajankohta ei ole kuvan A ajankohtaa myöhäisempi ja kuvan D ajankohta ei ole kuvan B ajankohtaa aikaisempi. Tämän oletuksen mukaan kaavion (Kuva 5) esimerkissä muutos, joka havaitaan Kuvien 2 ja 3 välillä, havaitaan myös vertailuissa (Kuva 1 - Kuva 3), (Kuva 1 - Kuva 4) ja (Kuva 2 - Kuva 4). Toisin sanoen muutostulkinta Kuvien 2 ja 3 välillä voidaan vahvistaa suorittamalla muutostulkinnat lisäksi kuvapareille (1,3), (1,4) ja (2,4).



Kuva 5. Aikasarjan hyödyntäminen muutostulkinnassa.

Aikasarjan kuvaparien väliset muutostulkinnat tehtiin AutoChange-menetelmällä ja kahden kuvan välisten muutostulkintatestien tuottamilla parametreilla. Kunkin kuvaparin tulkintoihin sovellettiin samoja parametreja sekä itse AutoChange-tulkinnassa että tuloksen luokittelussa. Tulosten jälkikäsitelyssä poistettiin muutokset, joiden pinta-ala oli alle puoli hehtaaria.



Kuva 6. Aikasarjamuutostulkinnan prosessointiketju.

3.1.3.5 Hakatun pohjapinta-alan arviointi

Hankkeen yhtenä tavoitteena oli arvioida harvennuksilla metsästä poistetun puuston pohjapinta-alaa. Tämä tieto olisi tarpeen metsävaratiedon päivittämiseksi ja lisäksi sen avulla voitaisiin tunnistaa harvennukset, joiden seurauksena on syntynyt uudistamisvelvoite. Hankkeessa laskettiin Metsätehon hakkuukoneaineiston, Metsäkeskuksen kuvioittaisen metsävaratiedon ja Sentinel-2 aineistosta tehdyn muutostulkinnan tuloksia käyttäen malleja harvennuksissa hakatun pohjapinta-alan osuudelle.

Hakkuukoneaineiston ja kuvioittaisen metsävaratiedon perusteella laskettiin kullekin hakkuukoneaineiston kuviolle hakatun pohjapinta-alan osuus. Jokaiselle hakkuukuviolle laskettiin myös keskimääräinen AutoChangen tuottama muutoksen voimakkuus. Alustavissa testeissä oli todettu, että mallissa olisi hyödyllistä käyttää muutostulkinnasta saatavan muutoksen voimakkuuden lisäksi tietoja lähtöajankohdan puuston pohjapinta-alasta ja pituudesta. Kullekin hakkuukoneaineiston kuviolle laskettiin siksi ensimmäisen ajankohdan kuvasta keskimääräinen AutoChange tuottama biomassaindeksi. Aineisto sisälsi kolme muuttujaa: muutoksen voimakkuus, ensimmäisen ajankohdan biomassaindeksi ja hakatun pohjapinta-alan osuus.

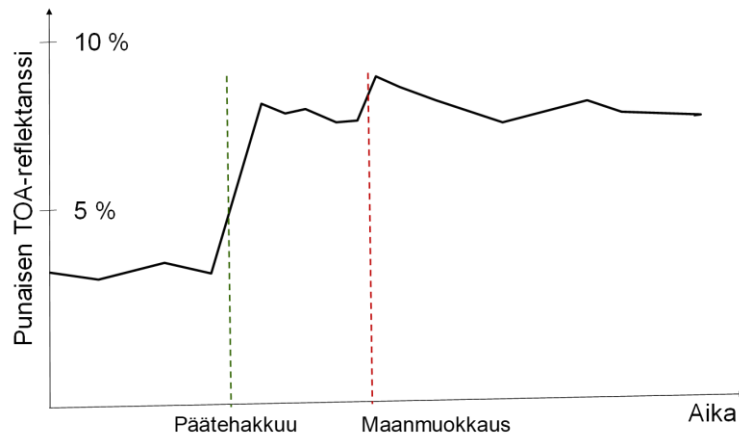
Aineistosta karsittiin kuviot, joiden hakkuutapa oli päätehakkuu. Osa kuvioista jouduttiin lisäksi hylkäämään pilvien vuoksi tai koska niille ei ollut käytettävissä soveltuvaa aineistoa kuvioittaisessa metsävaratiedossa. Tuloksena saatiin 95 kuvion aineisto. Näistä 55 pinta-alaltaan hehtaarin ylittävän kuvion joukko jaettiin opetus- ja testiaineistoon satunnaisesti. Opetusjoukossa oli 28 ja testijoukossa 27 näytettä.

Muutoksen voimakkuuden, biomassaindeksin ja hakatun pohjapinta-alan välille laskettiin kolme regressiomallia käyttäen opetusaineistoa. Malleja vertailtiin laskemalla keskimääräiset neliövirheet ja harhat opetusjoukolle ja testijoukolle.

3.1.3.6 Maanmuokkaus

Maanmuokkauksen kartoituksessa Ähtärissä käytetty Sentinel-2 kuva-aineisto saatiin ESA:n ja EU:n Scihub -järjestelmästä level-1C muotoisena kuva-aineistona noin 100 km x 100 km alueelta. Level-1C kuvissa pikseli esittää ilmakehän yläpuolisen heijastussuhteen (TOA), eikä sitä siis ole korjattu esimerkiksi aerosolien vaikutuksista. Kuville ei tehty pilvimaskausta eikä pilven varjojen tunnistusta, vaan nämä tehtävät jätettiin maanmuokkauksen havaitsemisalgoritmin huoleksi. Ähtärin aikasarja koostui 6 kuvasta (2 per kesä): 23.8.2015, 6.10.2015, 9.5.2016, 13.9.2016, 30.6.2017 ja 5.9.2017. Käyttöön valittiin parhaat pilvettömimmät kuvat kultakin ajankohdalta.

Toisin kuin avohakkuut, maanmuokkaus aiheuttaa melko pienen muutoksen verrattuna aikaisempaan, jo hakattuun tilanteeseen (Kuva 7). Alustavien visuaalisten ja histogrammitarkastelujen perusteella päädyttiin käyttämään punaista näkyvän valon kanavaa maanmuokkauksen havaitsemisalgoritmin perustana. Punaisella kanavalla kontrasti paljastuneen maan ja kasvillisuuden välillä oli korkein käytettävissä olevista 10 metrin Sentinel-2-kanavista (B2 = sininen, B3 = vihreä, B4 = punainen ja B8 = lähi-infrapuna). Muokkaukset näkyvät myös 1.6 μm :n ja 2.2 μm :n kanavilla (20 metriin pikseli), mutta kontrasti ei näillä kanavilla ollut punaista korkeampi.



Kuva 7. Pikselin heijastussuhteen kehitys päätehakkuussa ja maanmuokkauksessa kaavamaisesti.

Maanmuokkauksen havaitsemisalgoritmin syötteenä oli (Sentinel-2-kuvan lisäksi) hakkuukuviot, joille tehtiin 1 pikselin eroosio sijaintivirheiden ja reunaefektien vaikutusten vähentämiseksi. Sentinel-2-heijastussuhdearvot estimoidaan kuvion histogrammin huippuarvona satunnaisten virhelähteiden (esim. naapuripuuston varjot, kuvion sisäinen hajonta) vaikutusten vähentämiseksi. Ensimmäisenä maanmuokkausindikaattorina kokeiltiin punaisen ja vihreän heijastussuhteen suhdetta (R/G), mutta alustavien kokeilujen jälkeen päädyttiin 3 kanavan (punainen, vihreä ja sininen) tunnuslukuun: $R/(G+B)$, jota myöhemmin kutsutaan muokkausindeksiksi.

Maanmuokkauksen kynnyсарvo määritettiin Ähtärin alueen maastossa tarkastettujen kuviodien perusteella. Pilven kynnyсарvo määritettiin visuaalisesti määritettyjen pilvisten ja pilvettömien kuva-alueiden histogrammeista yli koko 6 kuvan aikasarjan.

Käytetty maanmuokkauksen havaitsemisalgoritmi kokonaisuudessaan:

- Tee kuviomaski havaituista hakkuista.
- Tee yhden pikselin eroosio kuviomaskille.
- Laske histogrammit aikasarjan kuvista ja määritä histogrammin huippuarvo:
 - Punaiselle kanavalle ja
 - $R/(G+B)$ suhteelle (muokkausindeksi).
- Poista huippuaikasarjasta ne havainnot, joissa punaisen heijastussuhde on yli 11.2 % (pilviset havainnot).
- Etsi jäljelle jääneestä aikasarjasta ensimmäinen havainto, jossa muokkausindeksi on yli 0.855.

Menetelmän tuottamia tuloksia verrattiin Asta-aineistoon. Lisäksi Metsäkeskus teki maastotarkastuksia tehtyjen maanmuokkausluokitusten perusteella.

3.1.3.7 Metsätuhot

Metsätuhojen suhteen hankkeen päähuomio oli kirjanpainajatuhoissa mutta myös myrskytuhojen havaitsemisen mahdollisuutta tarkasteltiin.

Kirjanpainajatuhojen havaitsemista tutkittiin vuoden 2015 elokuun erittäin korkean erotuskyvyn ja Sentinel-2 –aineistojen sekä hyönteistuhojen vuoksi tehtyjen metsänkäyttöilmoitusten avulla. Vain muutama ilmoitus osui erittäin korkean erotuskyvyn satelliittikuvien alueelle. Näiden ilmoitusten alueella kuva-aineistoja arvioitiin silmämääräisesti sekä oikea- että vääräväriskuvina. Lisäksi kirjanpainajatuhojen tunnistamisen menetelmäkehitystä varten ladattiin Metsäkeskuksen avointa metsänkäyttöilmoitusaineistoa kesältä 2017 ja 2018 ja vastaavien ajankohtien satelliittikuvia. Sentinel-2-kuvia verrattiin silmämääräisesti

metsänkäyttöilmoitusaineistoon ja laskettiin kahden ajankohdan erotuskuvia sekä kuvien kanavien heijastussuhteita, että kuvista laskettuja indeksejä käyttäen.

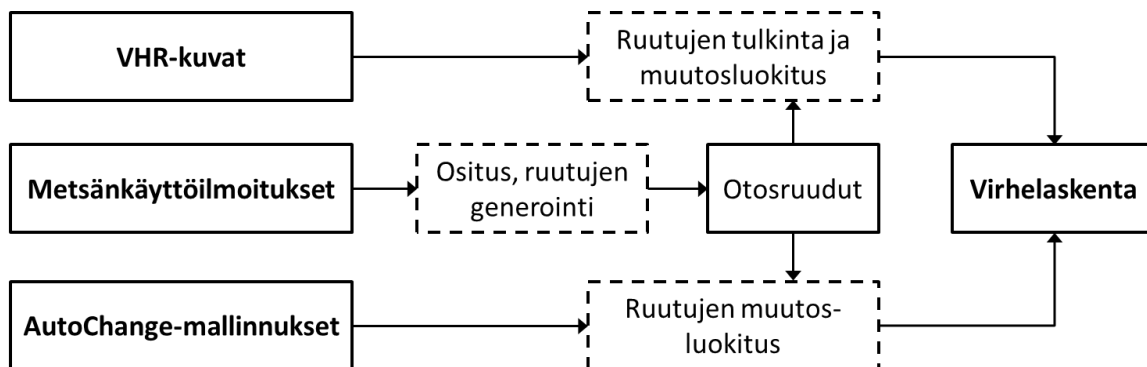
12.8.2017 riehuneen Kiira-myrskyn tuhoihin liittyen ladattiin Sentinel-2 -kuvia usealta ajankohdalta Kouvolan seudulta ja eri ajankohtien aineistoja analysoitiin silmämääräisesti.

3.1.4 Virhearvioinnin menetelmäkehitys

3.1.4.1 Referenssiaineiston kerääminen

Hakkuutulkintojen virhearviointi pohjautui referenssiaineistoon, joka kerättiin tulkitsemalla tutkitulla aikajaksolla tapahtuneet muutokset visuaalisesti käyttäen erittäin korkean erotuskyvyn satelliittikuvia (Taulukko 1) joista kukin kattoi 100 km² alueen. VHR-kuvien pikselikoko oli pankromaattisella kanavalla 0.5 m, joka vastaa käytännössä normaalisti käytössä olevien ilmakehu-aineistojen tarkkuutta. Osalta tutkimusalueita oli saatavilla kaksi kuvaa vuosilta 2015 ja 2016, ja osalta lisäksi kolmas kuva vuodelta 2017.

Koska koko aineiston muutosvertailu useaa aikatasoa käyttäen olisi ollut työmäärältään valtava, kerättiin referenssiaineisto otosten avulla (Kuva 8). Otokset olivat suorakulmaisia 30 x 30 m ruutuja ja ne valittiin satunnaisesti kolmea eri ositetta käyttäen: 1) alueilta joille oli hiljattain annettu avohakkuuta osoittava metsänkäyttöilmoitus, 2) alueilta joille oli hiljattain annettu harvennushakkuuta osoittava metsänkäyttöilmoitus, ja 3) alueilta jotka jäivät viimeaikaisten metsänkäyttöilmoitusten ulkopuolelle. Osituksella pyrittiin vähentämään ei-muuttuneiden alueiden yliedustusta ja varmistamaan että erilaisia muutoksia saadaan riittävä määrä virhearviointiin mukaan.



Kuva 8. Yksinkertaistettu kaaviokuva muutostulkinnan virhearvioinnista.

Otosruutuja luotiin noin 100 kappaletta kutakin ositetta, tutkimusaluetta ja yhden vuoden kuvaväliä kohden, jolloin tulkittavien ruutujen kokonaismääräksi saatiin 2110 kappaletta. Alkuperäisen suunnitelman mukaan otostulkintaa oli tarkoitus kokeilla usealla eri aikajaksolla, mutta VHR-kuvia oli saatavilla ainoastaan kahdelta tutkimusalueelta muuten kuin yhden vuoden jaksoissa. Lisäksi toisen ajallisesti kattavamman tutkimusalueen keskimäinen VHR-kuva (Liperi 2016) oli ohuiden yläpilvien vuoksi huonolaatuinen, joten päädyttiin siihen, että VHR-pohjainen referenssiaineiston keruu tehtiin ainoastaan yhden vuoden aikajaksoja käyttäen. Tulkinnessa kerättiin varsinaisten muutostietojen lisäksi myös lisätietoja, joiden arvioitiin mahdollisesti vaikuttavan automaattisen tulkinnan virheisiin (Taulukko 3). Havainnoidut lisätiedot muutososuuksia lukuun ottamatta valittiin sellaisiksi, että ne ovat saatavilla myös monilähde-VMI aineistoista ja siten tarpeen vaatiessa käytettävissä laajempien alueiden virhe-ennusteisiin.

Taulukko 3. Visuaalisessa referenssiaineistotulkinnassa tarkastellut muuttujat.

Muuttuja	Tulkinta
Puiden latvuspeitto metsämaalla (%); kaikki puut	Aiemmalta VHR-kuvalta
Puiden latvuspeitto metsämaalla (%); havupuut	Aiemmalta VHR-kuvalta
Puiden latvuspeitto metsämaalla (%);lehtipuut	Aiemmalta VHR-kuvalta
Puiden keskipituus (m)	Aiemmalta VHR-kuvalta
Puiden keskitilavuus (m ³ / ha)	Aiemmalta VHR-kuvalta
Muuttumattoman alueen osuus ruudusta (%)	Molemmilta VHR-kuvilta
Harvennushakaton alueen osuus ruudusta (%)	Molemmilta VHR-kuvilta
Harvennuksen aiheuttama tilavuuspoistuma (%)	Molemmilta VHR-kuvilta
Avohakaton alueen osuus ruudusta (%)	Molemmilta VHR-kuvilta
Avohakaton alueen koko (ha)	Myöhemmältä VHR-kuvalta
Kivennäis- ja turvemaiden jako	Muista tietolähteistä

3.1.4.2 Virheiden laskenta ja mallinnus

Virheiden laskentaa varten otosruuduille määriteltiin VHR- ja AutoChange-pohjaiset muutosluokitukset. VHR-tulkinnan suhteen otosruutu määriteltiin muuttuneeksi, mikäli vähintään puolet sen alasta oli visuaalisen tulkinnan avulla havaittu muuttuneen metsänhoitotoimenpiteiden vuoksi. Mikäli muuttuneeseen alaan sisältyi sekä harvennus- että avohakkuutoimenpiteitä, yksiselitteiseksi muutosluokaksi kirjattiin näistä kahdesta laajalaisempi.

AutoChange-tulosten osalta lähtökohtainen tulos oli liukuvasti vaihtuva muutosvoimakkuus, joten luokitusta varten tuli päättää harvennus- ja avohakkuiden tunnistamiseen liittyvät kynnsarvot. Koska kuvaparitulkinnassa histogrammin avulla optimoitujen kynnsarvojen (kappale 3.1.3.2) sopivuudesta aikasarjatulkintaan ei voitu olla varmoja, testattiin useita eri kynnsarvoja. Näitä kynnsarvoja kutsutaan tässä raportissa herkkyytstasoiksi. Herkkyytstasoja määriteltiin neljä: matala, melko matala, melko korkea ja korkea herkkyyys, joissa mataluus ja korkeus liittyvät muutosvoimakkuuden alarajoihin eri hakkuukategorioiden tunnistamiseksi. Virheet laskettiin erikseen kullekin tuotetulle herkkyytstasolle. Lisäksi kumulatiivisiin histogrammeihin perustuvaa optimoitujen kynnsarvojen määrittelyä testattiin aikasarjalähestymistavalle, ja laskettiin myös siihen liittyvät virheet.

Vertailua varten yleistettiin pikselikohtaisesti tunnistetut AutoChange-muutokset yhtenäisiksi aluemaisiksi kohteiksi 0.5 hehtaarin minimikokoa käyttäen, ja tarkasteltiin osuuko muuttuneeksi mallinnettu alue VHR-ruudun keskelle. Mikäli näin havaittiin olevan, AutoChange-luokitus pääteltiin muutoksen mukaiseksi. Muussa tapauksessa AutoChange-luokka määriteltiin ei-muuttuneeksi.

Kun otosruutukohtaiset VHR- ja AutoChange-muutosluokitukset oli laskettu, yhdistettiin ne toisiinsa luotettavuusarviointia varten. VHR-tulkintojen osalta alle 0.5 ha avohakkuulaikkuja pidettiin ei-muuttuneina alueina AutoChangen minimialuekokoa vastaavasti.

Luokkien vertailun lisäksi pyrittiin havaittujen virheiden ja VHR-kuvilta tulkittujen muuttujien (Taulukko 3) perusteella rakentamaan virhemalli, joka sopivat tausta-arvot syötteensä voisi tarkentaa virhearviota ja osoittaa sellaiset alueet joilla virheellisyyksien esiintyminen on tiettyjen metsäpiirteiden tai ympäristöolosuhteiden vuoksi oletetusti suurempaa. Tällöin uusien AutoChange-mallinnusten osalta voisi virhemallia käyttää kuvaamaan ennakoitavissa olevien virheiden alueellista jakautumista, ja luomaan tarkennettu ennuste luokitustarkkuuksista tekemättä tapauskohtaisesti työlästä ja hidasta referenssitulkintaa.

3.1.5 Muutostulkintojen laskenta ja niiden luotettavuuden arviointi

Muutostulkinnat laskettiin pilottialueilla aikasarjamenetelmällä soveltaen kahden kuvan muutostulkinnan avulla määriteltyjä parametriarvoja. Lisäksi laskettiin muutostulkinnat käyttäen muutoksen voimakkuudelle määriteltyjä herkkyystasoja.

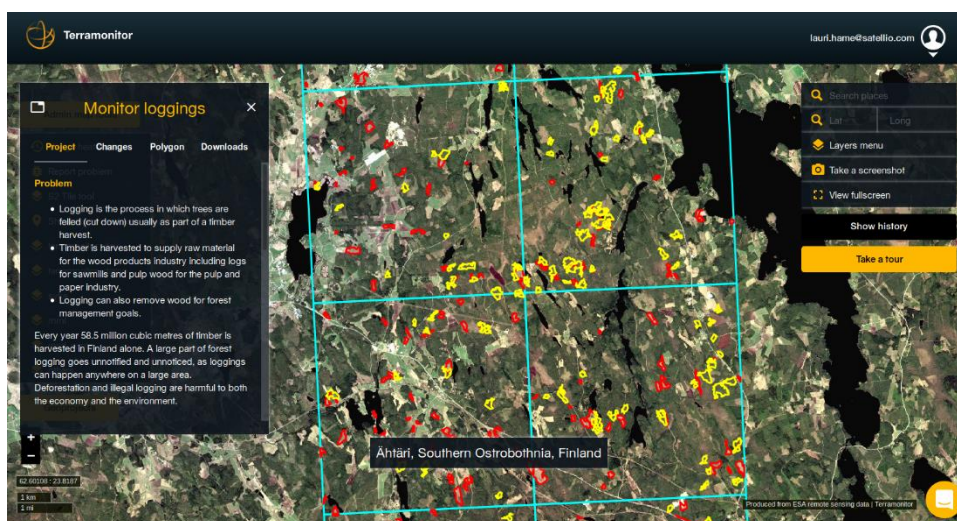
AutoChange-muutostulkintojen luotettavuuden arviointi perustui otosruutukohtaisten luokitusten vertailuun eri herkkyystasojä käyttäen. Vertailun pohjalta laskettiin kokonaisluokitustarkkuuden ja luokkakohtaisten tarkkuuksien lisäksi Cohenin kappa-arvo, joka ilmaisee luokitustarkkuuden ottaen satunnaisen yhteneväisyyden huomioon, sekä lisämetriikat jotka englanninkielisessä kirjallisuudessa tunnetaan nimillä *precision*, *recall* ja *F1*. Näistä *precision* kuvaa mallin antamien positiivisten ennusteiden oikeellisuutta, *recall* mallin kykyä löytää kaikki todellisuudessa positiiviset tapaukset, ja *F1* Cohenin kappa-arvon tapaan mallin yleistä suoriutumiskykyä verrattuna satunnaiseen tulokseen.

3.1.6 Palvelun kehitys ja palvelun pilotointi

Hankkeessa kehitettiin pilottipalvelu muutostulkinnan aikasarjamenetelmään perustuen. Palvelu tuottaa kategorisoidun analyysin hakkuun tyypistä (pääte-/kasvatushakkuu), geometriasta, muutoksen voimakkuudesta sekä aikavälistä jolloin muutos on tapahtunut. Lisäksi palveluun sisältyy luotettavuusarvio tulkinnan oikeellisuudesta.

Muutostulkintapalvelua kehitettiin Metsäkeskukselta saadun palautteen mukaisesti. Pilottipalvelussa julkaistavien muutostulkintatulosten tiedostomuodon määrittelyyn tehtiin tarkennuksia muutoksen tyyppin, luotettavuuden ja ajankohdan osalta. Palautteen perusteella palvelussa tuotettiin hakkuualueiden rajojen lisäksi hilamuotoinen tiedosto, joka ilmaisee keskimääräisen muutoksen voimakkuuden 50 m x 50 m neliöiden alueella maastossa. Hankkeessa kehitettiin menetelmä hilamuotoisen shapefile-tiedoston muodostamiseksi satelliittiaineistoon perustuen.

Muutostulkintapalvelun pilotti julkaistiin osoitteessa www.hakkuut.fi kesäkuussa 2018. Pilottipalvelu koostuu interaktiivisesta karttakäyttöliittymästä (Kuva 9), jonka avulla voi selata tunnistettuja muutoksia internet-selaimella sekä tiedostojen latausrajapinnasta jonka avulla palvelun käyttäjät voivat ladata muutostulkinnan tulokset integroitavaksi omaan tietojärjestelmäänsä CSV, GeoJSON-, Shapefile- ja GeoTiff-muodoissa. Käyttöliittymässä voi lisäksi hakea muutoksia päivämäärän sekä karttaruudun tunnuksen perusteella. Metsäkeskus koekäytti pilottipalvelua ja arvioi sen soveltuvuutta hakkuiden valvontaan.



Kuva 9. Muutostulkintapalvelun pilotin selainkäyttöliittymä.

Muutostulkintapalvelua pilotoitiin kolmella pilottialueella (Kuva 1) julkaisemalla muutostulkintatulokset vuosilta 2016-2017. Metsäkeskus teki maastotarkastuksia 2016-2017 aineiston perusteella. Vuoden 2018 tarkastukset pohjautuivat pilotointialueilla erotuskuvatulkintaan, jota analysoitiin muiden aineistojen kanssa.

3.2 Tutkimustulokset

3.2.1 Muutostulkinta ja virhearviointi

3.2.1.1 Kahden kuvan muutostulkintojen tulokset

AutoChangen parametrien testauksessa päädyttiin lisäämään alaluokkien määrää viiteen. Koemuutostulkintojen perusteella tämä vaikutti sopivalta määrältä, jolla saadaan esiin myös harvennuksia avohakkuiden lisäksi.

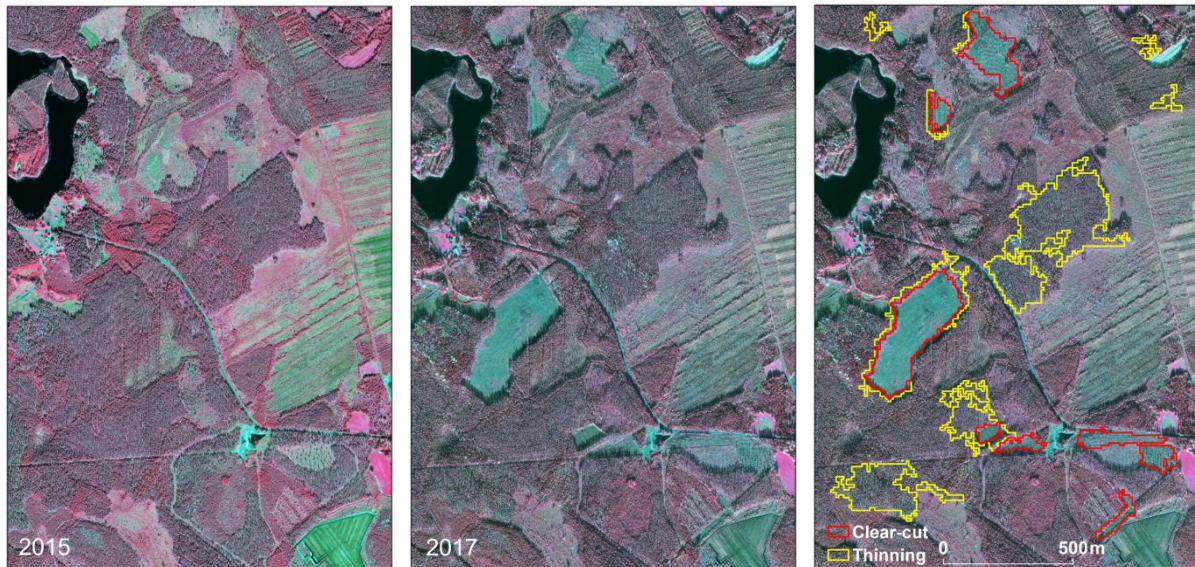
Sentinel-2 -kanavayhdistelmien testauksen perusteella erot tuloksissa eri yhdistelmillä olivat pieniä. Lähi-infrapunakanavan jättäminen pois muutostulkinnasta paransi hieman harvennusten havaitsemisen tuloksia. Tulosten perusteella ensimmäisen ajankohdan kuvasta valittiin muutostulkintaan kanavat: sininen (B2), vihreä (B3), punainen (B4), red edge (B5), lähi-infra (B8) ja molemmat lyhytaaltoinfrapunakanavat (B11 ja B12). Jälkimmäisestä kuvasta valittiin käytettäväksi muuten samat kanavat mutta lähi-infrapunakanava (B8) jätettiin pois tulkinnasta.

Metsänkäyttöilmoitusten hyödyntämiseen perustuvilla menetelmillä muutoksen voimakkuudelle lasketut kynnysarvot vaihtelivat melko paljon alueittain (Taulukko 4). Yksi merkittävä syy vaihteluun on Sentinel-2 -kuvien analyysin perusteella kuvien vaihteleva aerosolisäily. Erityisen paljon vaihtelua oli Liperin vuoden 2016 kuvassa mutta vuoden 2016 kuvat olivat kaiken kaikkiaan melko huonolaatuisia. Toisaalta merkittävä tekijä vaihteleviin rajoihin on metsänkäyttöilmoitusaineisto, joka ei ole referenssiaineistona luotettavaa. Koska aikasarjamenetelmä karsii muutoksia käyttäen useaa kuvaparia, valittiin harvennusten kynnysarvoksi pienin saatu arvo (24). Avohakkuiden kynnysarvoksi valittiin saatujen kynnysten mediaani (87).

Taulukko 4. Eri alueilla kahden kuvan muutostulkinnoissa saadut harvennusten ja avohakkuiden kynnysarvot.

Tulkinta	Harvennusten kynnysarvo	Avohakkuiden kynnysarvo
Ähtari 2015-2016	24	87
Liperi 2015-2016	26	46
Ähtari 2015-2017	46	86
Liperi 2015-2017	31	77
Parikkala 2015-2016	58	90
Joutseno 2015-2016	57	81
Virrat-länsi 2015-2016	46	68
Virrat-itä 2015-2016	53	101
Ähtari 2016-2017	42	102
Liperi 2016-2017	45	99

Kun tarkasteltiin metsänkäyttöilmoituksia soveltavilla menetelmillä laskettuja tulkintoja (esimerkki Kuva 10) ja virhearvioinnin tuloksia, tarkkuudet olivat hieman parempia alaluokkien osuuksien vertailuun perustuvaa menetelmää käytettäessä (Taulukko 5) kuin kynnysarvoja käytettävällä menetelmällä (Taulukko 6). Alaluokkiin perustuva menetelmä kuitenkin edellyttää, että jokaisen kuvan alueella on käytettävissä referenssiaineistoa. Kynnysarvot ovat paremmin siirrettävissä alueelta toiselle, jos kuvakohtaista aineistoa ei ole saatavilla.



Kuva 10. Pléiades -kuvat vuosilta 2015 ja 2017 ja Sentinel-2 kuvan avulla havaitut harvennukset ja avohakkuut. Pléiades -kuvat © CNES 2015,2017 distribution Airbus DS.

Taulukko 5. Virhearvioinnin tulokset alaluokkien osuuksien vertailuun perustuvalla menetelmällä kaikkien pilottialueiden näytteillä. TT= tuottajan tarkkuus (luokkaan i luokitettujen havaintojen todennäköisyys olla todellisuudessa luokkaa i), KT= käyttäjän tarkkuus (todellisuudessa luokkaa i olevien havaintojen osuus, joka on luokitettu luokkaan i).

		Referenssi (VHR)			
		Ei muutosta	Harvennus	Avohakkuu	yht. TT (%)
Luokitus (AC)	Ei muutosta	1460	74	36	1570
	Harvennus	53	50	7	110
	Avohakkuu	17	2	218	237
	yht.	1530	126	261	1917
	KT (%)	95.4	39.7	83.5	
Kokonaistarkkuus (%)		90.1 %			
Kappa		0.697			
Precision		79.8%			
Recall		71.6%			
F1		75.5%			

Taulukko 6. Virhearvioinnin tulokset muutoksen voimakkuuden kynnsarvojen määrittämiseen perustuvalla menetelmällä kaikkien pilottialueiden näytteillä. TT= tuottajan tarkkuus, KT= käyttäjän tarkkuus.

		Referenssi (VHR)			
		Ei muutosta	Harvennus	Avohakkuu	yht. TT (%)
Luokitus (AC)	Ei muutosta	1451	77	37	1565
	Harvennus	61	47	10	118
	Avohakkuu	18	2	214	234
	yht.	1530	126	261	1917
	KT	94.8	37.3	82.0	
Kokonaistarkkuus (%)		89.3%			
Kappa		0.674			
Precision		77.6%			
Recall		70.5%			
F1		73.9%			

Eri vuodenaikojen Sentinel-2 -aineiston käytön testauksesta saatujen alustavien tulosten mukaan avohakkuut voitiin erottaa AutoChange-menetelmällä jopa silloin, kun jälkimmäinen kuva oli talvikuukausilta, kunhan ensimmäinen kuva oli kesältä. Tämä syy on todennäköisesti se, että AutoChange-menetelmä ei vertaile kahta kuvaa suoraan keskenään. Jos taas ensimmäisen ajankohdan kuva oli lehdettömältä ajalta, muutostulkinta toimi merkittävästi huonommin, koska lehtimetsät ja aukeat alueet eivät erottuneet hyvin toisistaan ensimmäisen ajankohdan kuvassa. Harvennusten havaitseminen osoittautui hankkeen aikana herkäksi vuodenaikaisvaihtelulle. Jo hyvin pienet lehtipuiden muutokset syksyllä vaikuttivat kahden kuvan väliseen muutostulkintaan. Tulosten perusteella, kannattaa kahden kuvan muutostulkinnassa käyttää kuvia lähinnä aikaväliltä kesäkuu - syyskuulta. Jos mahdollista kannattaa rajoittaa juhannuksen ja elokuun lopun väliselle ajalle.

3.2.1.2 Aikasarjamenetelmän ja virhearvioinnin tulokset

Viiden virhearviointiin käytetyn ja VHR-kuvien kattaman alueen AutoChange-tulkitut muutosalat on esitetty taulukossa Taulukko 7. Valitusta herkkyydestä riippuen muuttuneet alueet kattoivat 2.67 – 12.49% koko metsämaasta tulkittuna koko aineiston aikajaksolla (2015-17).

Taulukko 7. AutoChangen aikasarjamenetelmän avulla tuottamat muutostulkinnat.

Herkkyytaso	Harvennuskuviot		Avohakkuukuviot		Kaikki muutokset
	Määrä	Kokonaispinta-ala (ha)	Määrä	Kokonaispinta-ala (ha)	Osuus metsämaasta
Matala	1268	4677	908	1436	12,49 %
Melko matala	519	1445	784	1227	5,46 %
Melko korkea	257	694	681	1076	3,62 %
Korkea	129	328	624	977	2,67 %

Virhearvioinnissa ongelmaksi muodostuivat VHR- ja Sentinel-kuvien toisistaan poikkeavat päivämäärät, joiden vuoksi muodostui paljon sellaisia VHR- ja AutoChange-tulkintojen pareja joissa tulkittu muutos oli erilainen, mutta eri aineistojen kattama ajanjakso oli vain osittain sama. Päivämäärien täsmäminen olisi ollut kuitenkin mahdotonta vaikka tiedot olisi kerätty maastohavainnoinnin avulla, ottaen huomioon laajan maastohavainnoinnin viemän ajan ja lukuisten eriaikaisten ja ennalta tuntemattomien satelliittikuvien hyödyntämisen AutoChange-muutostulkinnassa.

Havaittujen virheiden todenmukaista päättelyä varten luotiin lisäsääntöjä, joita sovellettiin silloin kun AutoChange (AC) oli havainnut muutoksen joka erosi VHR-tulkinnasta, mutta tulkintavälit olivat vain osittain samanaikaiset.

- Jos AC-luokka oli harvennus ja VHR-luokka avohakkuu, tai päinvastoin, päätettiin näiden tarkoittavan samaa muutosta mutta johtuvan mallinnusvirheestä tai epäsopivista herkkyyssrajoista. Tällöin AC-luokka pidettiin alkuperäisenä.
- Jos AC-luokka osoitti muutosta mutta VHR-tulkinnan mukaan muutoksia ei ollut tapahtunut, tarkasteltiin tulkintojen yhteisen aikavälin pituutta verrattuna koko AC-tulkintaväliin. Mikäli suurin osa AC-tulkintavälistä osui tulkintojen yhteiselle aikavälille, olisi muutoksen todennäköisemmin pitänyt tapahtua VHR-kuvien ajanjaksolla mutta VHR-tulkinnassa muutosta ei ollut havaittu. Tämän oletettiin tarkoittavan virhetulkintaa, ja AC-luokka pidettiin ennallaan. Vastakkaisessa tapauksessa, eli kun suurin osa AC-tulkintavälistä oli yhteisen ajanjakson ulkopuolella, muutoksen ajateltiin kuitenkin tapahtuneen muulloin ja AC-luokka muutettiin ei muuttuneeksi.

Kun edellä mainitut korjaukset oli tehty, laskettiin virhematriisit ja tuloksia kuvaavat tunnusluvut jokaiselle eri herkkyytasolle (Taulukot 8-11). VHR-tulkinnan mukaan 2110 havainnoidusta ruudusta 1677 (79.5%) oli muuttumattomia, 151 (7.2%) harvennushakattuja ja 282 (13.4%) avohakattuja. Käytetystä osituksesta huolimatta muuttuneita kohteita löytyi varsin vähän,

mutta kuitenkin riittävästi tarkkuusarviointia varten. Osa todellisesti tapahtuneista harvennuksista saattoi jäädä myös havaitsematta VHR-kuvilta mikäli ylimmän latvuserroksen suhteen muutokset olivat vähäisiä.

Kokonaisluokitustarkkuus on herkkyydestä riippumatta lähellä tai hieman yli 90%, mutta korkeat arvot liittyvät ennen kaikkea ei-muuttuneiden kohteiden tunnistukseen. Avohakkuiden tunnistus oli AutoChangen avulla kuitenkin varsin luotettavaa, ja herkkyydestä riippuen vähintään kolme neljästä avohakkuusta tunnistettiin oikein. Kun tunnistamatta jääneitä tai virheellisesti tunnistettuja avohakkuualoja tutkittiin tarkemmin, havaittiin että suurin osa niistä liittyi johonkin loogiseen ja selitettävissä olevaan piirteeseen, kuten resoluutio- ja oikaisueroihin kuva-aineistojen välillä, avohakkuualan kapeaan muotoon tai viereisen korkean metsän varjostukseen ja siten vähäisempään satelliittikuva-arvojen kirkkauteen, jotka joko pienensivät tai siirsivät avohakkuualan AutoChange-tunnistusta VHR-aineistoon verrattuna. Vaikka nämä seikat heikentävät virhematriiseissa esitettyjä ruutukohtaisesti laskettuja tunnistusluotettavuuksia, ovat vaikutukset käytännön kannalta kuitenkin vähäisiä.

Taulukko 8. VHR- ja AutoChange-muutosluokitusten (AC) vertailu matalalla herkkyydellä.

		Referenssi (VHR)			
		Ei muutosta	Harvennus	Avohakkuu	yht. TT (%)
Luokitus (AC)	Ei muutosta	1564	86	42	1692 92.4
	Harvennus	100	54	3	157 34.4
	Avohakkuu	13	11	237	261 90.8
	yht.	1677	151	282	2110
	KT	93.3	35.8	84.0	
Kokonaistarkkuus (%)		87.9%			
Kappa		0.645			
Precision		73.0%			
Recall		70.4%			
F1		71.7%			

Taulukko 9. VHR- ja AutoChange-muutosluokitusten (AC) vertailu melko matalalla herkkyydellä.

		Referenssi (VHR)			
		Ei muutosta	Harvennus	Avohakkuu	yht. TT (%)
Luokitus (AC)	Ei muutosta	1636	109	46	1791 91.3
	Harvennus	28	36	5	69 52.2
	Avohakkuu	13	6	231	250 92.4
	yht.	1677	151	282	2110
	KT	97.6	23.8	81.9	
Kokonaistarkkuus (%)		90.2%			
Kappa		0.681			
Precision		87.1%			
Recall		64.2%			
F1		73.9%			

Taulukko 10. VHR- ja AutoChange-muutosluokitusten (AC) vertailu melko korkealla herkkyytasolla.

		Referenssi (VHR)			
		Ei muutosta	Harvennus	Avohakkuu	yht. TT (%)
Luokitus (AC)	Ei muutosta	1656	121	57	1834 90.3
	Harvennus	12	27	2	41 65.9
	Avohakkuu	9	3	223	235 94.9
	yht.	1677	151	282	2110
	KT	98.7	17.9	79.1	
Kokonaistarkkuus (%)		90.3%			
Kappa		0.670			
Precision		92.4%			
Recall		58.9%			
F1		71.9%			

Taulukko 11. VHR- ja AutoChange-muutosluokitusten (AC) vertailu korkealla herkkyytasolla.

		Referenssi (VHR)			
		Ei muutosta	Harvennus	Avohakkuu	yht. TT (%)
Luokitus (AC)	Ei muutosta	1668	134	69	1871 89.2
	Harvennus	1	14	0	15 93.3
	Avohakkuu	8	3	213	224 95.1
	yht.	1677	151	282	2110
	KT	99.5	9.3	75.5	
Kokonaistarkkuus (%)		89.8%			
Kappa		0.637			
Precision		96.2%			
Recall		53.1%			
F1		68.5%			

Harvennushakkuiden suhteen tunnistustarkkuus oli avohakkuita heikompi, ja riippui huomattavasti valitusta herkkyytasosta. Harvennusten tunnistaminen vaikutti myös olevan tietyillä tutkimusalueilla heikompa kuin toisilla. Kattavan tarkastelun jälkeen tämän tulkittiin olevan etupäässä heikkolaatuisista ja syksyyn painottuvista Sentinel-2-kuvista johtuvaa, jolloin sekä yläpilvien esiintyminen kuvilla, että lehtien kellastuminen vaikuttivat tuloksiin.

Muutostunnistuksen suhteen parhaat tulokset sekä Cohenin kappa-arvon että F1-statistiikan mukaan saatiin melko matalaa herkkyytasoa käyttäen. Sopivan herkkyytason valinta kuitenkin riippuu tarkoituksesta, ja liittyy lähtökohtaisesti siihen miten paljon mahdollisesti oikeita muutostulkintoja halutaan painottaa suhteellisesti suuremman virhetulkintojen osuuden kustannuksella. Matalammilla herkkyytasolla on mahdollista löytää etenkin suurempi osa harvennuksista, mutta mikäli halutaan painottaa vähien resurssien tehokasta käyttöä, voi korkeampien herkkyytasojen käyttö olla perusteltua.

Kumulatiivisten histogrammien optimointiin perustuvat kynnysarvot tuottivat hieman paremman tuloksen kuin mikään yksittäinen vertailtu herkkyytaso (Taulukko 12). Tuloksia voi pitää hyvänä kompromissina herkkyytasojen välillä, mutta esimerkiksi VHR-tulkitut harvennukset ja avohakkuut sekoittuvat melko matalaa herkkyytasoa enemmän keskenään. Kaiken kaikkiaan on mahdotonta määrittää yleispäteviä kynnysarvoja koska arvot vaihtelevat yksittäisten satelliittikuvien ominaisuuksien mukaan, ja oikeiden muutosten ohella saatavien virhetulkintojen haitallisuus riippuu paljon sovelluksesta.

Taulukko 12. Virheet optimoiduilla herkkyyssrajoilla.

		Referenssi (VHR)			
		Ei muutosta	Harvennus	Avohakkuu	yht. TT (%)
Luokitus (AC)	Ei muutosta	1641	105	45	1791
	Harvennus	21	29	0	50
	Avohakkuu	15	17	237	269
	yht.	1677	151	282	2110
	KT	97.9	19.2	84.0	
Kokonaistarkkuus (%)		90.4%			
Kappa		0.686			
Precision		88.7%			
Recall		65.4%			
F1		75.3%			

Tavoitteena oli myös luoda virhemalli soveltamaan ja tarkentamaan havaittuja virheellisyyksiä kun AutoChange-tuloksia lasketaan uusille alueille. Mallinnusta tehtäessä kuitenkin havaittiin että VHR-havainnoinnissa tulkituilla metsien ominaisuuksia kuvaavilla piirteillä oli vain vähäistä merkitystä AutoChange-tulosten oikeellisuuden suhteen. Tämä tarkoittaa sitä, että virheanalyysin tulokset ovat yleistettävissä muille metsäalueille ilman erillistä mallia. Virhetulkinnat riippuivat suureksi osaksi sellaisista teknisistä parametreista (kuten herkkyyssrajoitukset) jotka käyttäjä voi itse valita, eikä metsäpiirteillä saada virhearviointiin olennaisia parannuksia. Suurimmaksi osaksi AutoChange-tulosten hyvyyteen vaikuttivat käytettyjen Sentinel-2- kuvien laatu ja kuvausajankohta. Tämän vuoksi virhemallia ei luotu. Mikäli tapauskohtaisesti halutaan saada tarkempia virhearvioita, tulee tämän tutkimuksen VHR-tulkintaa vastaava tarkkuusarviointi tehdä erikseen.

3.2.1.3 Hakatun pohjapinta-alan arviointi

Hakatun pohjapinta-alan osuudelle laskettiin opetusaineistoa käyttäen kolme mallia: lineaarinen, logaritminen ja ns. yhdistelmämalli:

$$\text{Lineaarinen} \quad ppa_{\%} = 0.45 * chmagn \quad (1)$$

$$\text{Logaritminen} \quad ppa_{\%} = 14.78 * \ln(chmagn) \quad (2)$$

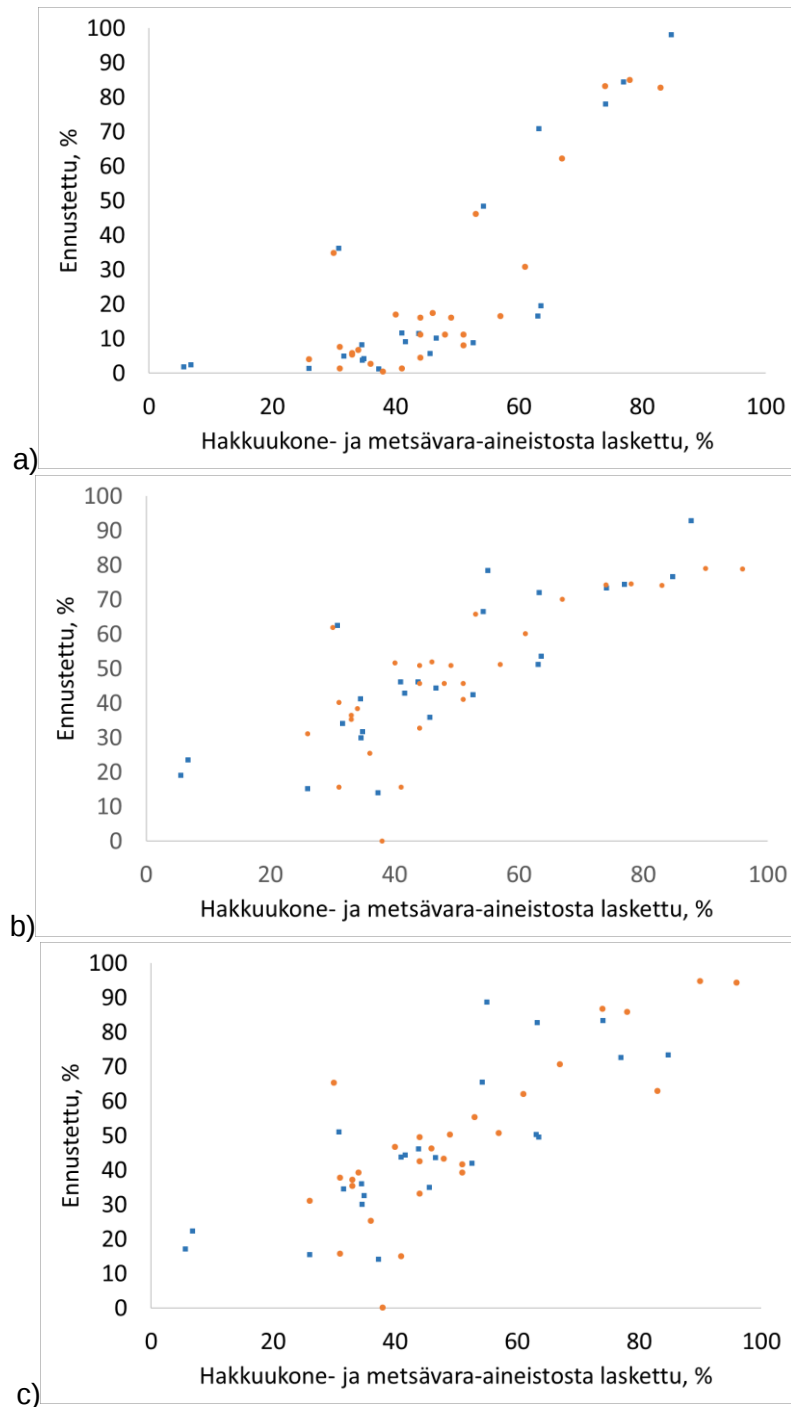
$$\text{Yhdistelmä} \quad ppa_{\%} = 0.237 * bmi * \ln(chmagn) + 0.001 * bmi * chmagn \quad (3)$$

missä $ppa_{\%}$ on hakatun pohjapinta-alan osuus, bmi on AutoChangen tuottama biomassaindeksi ja $chmagn$ on AutoChangen tuottama muutoksen voimakkuus,

Taulukko 13 sisältää malleilla lasketut virheet opetus- ja testijoukolle Kuva 11 esittää eri malleilla laskettujen hakatun pohjapinta-alan osuuden ennusteiden ja referenssiaineiston väliset pistediagrammit opetus ja testijoukolle.

Taulukko 13. Eri menetelmillä saadut virheet hakatun pohjapinta-alan osuuden arvioinnissa.

	Abs. RMSE (opetus)	Suht. RMSE (opetus)	Harha (opetus)	Abs. RMSE (testi)	Suht. RMSE (testi)	Harha (testi)
Lineaarinen	28.5%	57.5%	-21.3%	51.3%	95.9%	-8.8%
Logaritminen	8.8%	17.8%	-1.0%	29.4%	54.8%	5.7%
Yhdistelmä	13.4%	27.0%	-2.3%	18.1%	33.8%	-0.7%



Kuva 11. Erityyppisillä malleilla saadut pistediagrammit hakatun pohjapinta-alan osuuden ennusteen ja referenssiaineiston välillä. A) lineaarinen, b) logaritminen ja c) yhdistelmämalli. Oranssit näytteet edustavat opetusaineistoa ja siniset testiaineistoa. Kuvissa ei näytetä näytteitä joiden arvo ylittää 100%. Tällaisia näytteitä oli 3 kpl referenssinäytteissä ja 6 kpl lineaarisen mallin ennusteissa.

Maastotarkastusten perusteella lineaarinen malli yliarvioi hakattua pohjapinta-alaa. Epälineaarisiin malleihin perustuvilla ennusteilla ei tehty maastotarkastuksia hankkeen aikana. Numeeristen tulosten perusteella epälineaarisilla malleilla tehtyjen ennusteiden virheet ovat pienemmät kuin lineaarisella mallilla ja varsinkin yhdistelmämallilla saadut tulokset ovat samankaltaiset sekä opetus, että testijoukossa. Kuitenkin harhan (Taulukko 13) perusteella yliarvio olisi vielä suurempi muilla kuin lineaarisella mallilla.

Mallinnuksessa käytettävään aineistoon liittyy epävarmuustekijöitä, joista johtuen tuloksista ei voida tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä. Hakattu pohjapinta-ala ja ensimmäisen ajankohdan pohjapinta-ala poimittiin eri lähteistä, jolloin molempien aineistojen epätarkkuudet vaikuttivat yhdessä satelliittikuva-aineiston kanssa tuloksiin. Jotta saataisiin tarkempaa tietoa pohjapinta-alan arvioinnin mahdollisuuksista täytyisi kerätä aineisto, joka sisältää molempien kuvien ajankohtina mitattua tietoa puustosta sekä tiedon poistetun puuston pohjapinta-alasta.

3.2.1.4 Maanmuokkaus

Taulukko 14 listaa hankkeessa kehitetyn ja sovelletun maanmuokkausindeksin arvot käytetyille 6 Sentinel-2 kuvalle 26 suurimmassa referenssiaineiston muokkauksuviassa. Näistä kuvioista viisi jäi havaitsematta, koska indeksi ei missään vaiheessa ylittänyt määritettyä kynnyсарvoa. Joissakin tapauksissa tähän oli syynä se, ettei pian muokkauksen jälkeen ollut käytettävissä pilvetöntä Sentinel-2 kuvaa. Kymmenen muokkauksuviota havaittiin ennen todellista muokkauspäivää. Näissä tapauksissa syynä voi olla hakkuukoneen avohakkuun yhteydessä paljastama kivennäismaa tai hakkuutähteet, jotka todennäköisesti myös nostavat käytetyn muokkausindeksin arvoa.

Taulukko 14. Maanmuokkauksen havaitseminen 26 suurimmalle kuviolle. Kutakin kuvaa ja kuviota vastaavassa solussa on kuvion muokkausindeksin arvo kyseisessä kuvassa. Punaisella kirjoitettu indeksi tarkoittaa että muokkausindeksin arvo ylitti kuvassa kynnyksen ja algoritmi havaitsi muokkauksen. Viiva (-) tarkoittaa että kyseisessä kuvassa ei ole kuviolle tulkintakelpoista aineistoa. Viimeisessä sarakkeessa on satelliittihavainnon ja muokkauspäivämäärän erotus päivissä. Kuviot joissa päivien määrä on merkitty punaisella, on havaittu ennen muokkausta. Tähdellä () merkityt ovat jääneet havaitsematta.*

Kuvio	Muokkaus-päivä	Sentinel-2 Punainen/(vihreä+sininen)						Ero pv.
		2015-08-23	2015-10-06	2016-05-09	2016-09-13	2017-06-30	2017-09-05	
17	2016-06-29	-	0.7125	-	0.8315	0.9605	0.8165	366
22	2015-04-17	0.8065	0.6615	0.8905	0.8315	0.7545	0.7955	*
36	2016-10-29	-	0.5245	-	0.8265	0.9735	0.8145	244
37	2017-07-20	0.4975	0.4715	0.5545	0.4755	1.0835	0.8495	-20
39	2016-07-10	0.8425	0.8115	-	0.8915	0.9965	0.8185	355
47	2015-10-27	0.9385	0.8595	0.9405	0.8335	0.8735	0.7195	-65
48	2016-11-02	0.5065	0.5055	0.8895	0.7485	0.8105	0.6845	-177
56	2015-01-20	0.9255	0.7285	0.9475	0.7375	0.8375	0.6745	215
68	2017-08-14	-	0.5095	-	0.5005	1.0615	0.9255	-45
69	2017-05-27	-	0.4775	-	0.7395	0.8955	0.7235	34
85	2016-06-15	-	0.7525	-	0.7915	0.8575	0.5445	380
89	2016-11-14	0.5065	0.5275	0.6415	0.6075	0.6705	0.7745	*
99	2016-08-19	0.5125	-	0.5975	0.8105	-	-	*
100	2016-08-19	-	0.5395	-	0.8725	1.0385	0.7875	25
101	2016-10-05	0.4905	0.7075	0.9385	0.7955	1.0375	0.9225	-149
104	2017-07-31	-	0.5215	-	0.8215	1.0265	0.8725	-31
131	2016-08-17	0.4625	-	0.5745	0.7315	-	-	*
159	2016-07-06	0.5105	0.4875	0.9385	0.9515	0.9975	0.7645	-58
182	2017-05-22	0.4835	-	0.9245	0.8225	-	-	-378
206	2015-10-12	0.8345	0.7225	0.8945	0.7435	0.7705	0.7005	210
210	2015-12-01	0.9135	-	0.9605	0.8055	-	-	-100
218	2016-08-15	0.5595	-	0.6705	0.6395	-	-	*
219	2015-11-13	0.8355	0.7595	0.9135	0.7965	0.8215	0.8515	178
220	2017-08-14	-	0.4895	-	0.8075	1.0325	0.8325	-45
223	2016-12-07	0.5135	0.4995	0.6065	0.5985	1.0295	0.8635	205
227	2015-07-13	0.8795	0.7465	0.9125	0.8125	0.7255	0.7695	41

Maanmuokkaustulkintoja vertailussa Asta-aineistoon ja Metsäkeskuksen tekemissä maastotarkastuksissa todettiin, että maanmuokkauksen tunnistaminen onnistui huonommin

kuin oli alun perin toivottu. Metsäkeskuksen tarkastusten perusteella noin kolmannes tunnistetuista maanmuokkauksista oli todellisuudessa muokattu. Alustavien tulosten analyysin perusteella tehdyssä jatkokehityksessä ei päästy parempiin tuloksiin.

Tulosten perusteella ei voida sanoa, että maanmuokkauksen ajankohdan voi luotettavasti tunnistaa Sentinel-2-aineistosta. Kuitenkin, joskus maanmuokkaus on näyttäisi olevan tunnistettavissa Sentinel-2 -kuvista jopa silmämääräisesti. Tunnistamisen vaihtelevuus johtuu useista tekijöistä. Näistä keskeisimpiä tutkimuksessa tunnistettuja tekijöitä ovat seuraavat:

- Muokkaamattoman ja muokatun kuvion heijastussuhteiden välinen ero on merkittävästi pienempi kuin uudistuskypsän ja hakatun kuvion välinen ero, ja hakkuusta kulunut aika vaikuttaa muokkaamattoman ja muokatun kuvion heijastussuhteiden muutokseen.
- Muokatun kuvion heijastussuhde eri kanavilla riippuu mm. muokkaustavasta, kasvupaikkatyypistä, kuvausajankohdan säästä, pintamaan kosteudesta, vuodenajasta ja siitä miten pitkä aika muokkauksesta on kulunut.
- Satelliittikuvien laatu eli pilvisyys ja aerosolisisältö vaihtelevat, mikä vaikuttaa sekä tulkintakelpoisten kuvien saatavuuteen että heijastussuhteisiin.

Tulokset eivät oikeuta ehdottamaan kehitetyn menetelmän operatiivista käyttöä. Lisätutkimuksia tarvitaan siitä, miten maanmuokkauksen heijastussuhde käyttäytyy eri olosuhteissa ja eri tavoin toteutettuna. Tarkan aineiston avulla menetelmän parametreja voisi tarkentaa eri tilanteisiin sopiviksi. Aineiston tulisi sisältää tarkasti kullekin kuviolle tehty operaatiot ja niiden ajankohdat tarkasteltavana ajanjaksona sekä perustiedot kuvion kasvupaikkatyypistä sekä tietoa sääolosuhteista ja pintamaan kosteudesta tarkasteltavana kuvausajana ja optista kaukokartoitusaineistoa.

On mahdollista, että kyseisen aineiston perusteella maanmuokkauksen tunnistaminen ei onnistu automaattisesti ja luotettavasti optisesta keskiresoluution kaukokartoitusaineistosta. Jos kaikki muokkauksen erottuvuuteen vaikuttavat tekijät voitaisiin kartoittaa satelliittikuvista, on myös mahdollista, että muokkaukset voitaisiin jakaa kolmeen luokkaan:

1. varmasti muokattuihin,
2. varmasti muokkaamattomiin ja
3. niihin, joita ei voida havaita kunnollisen pilvettömän satelliittikuva-aineiston puuttumisen takia tai epäedullisten sää- ja maaperän kosteusolosuhteiden takia.

Aineiston avulla saataisiin joka tapauksessa hyödyllistä perustietoa metsän kierron tarkkailusta kaukokartoitusaineiston avulla.

3.2.1.5 Metsätuhot

Metsätuhoihin liittyen hankkeessa ei päästy kunnolla kehittämään tai testaamaan menetelmiä aineiston niukkuudesta johtuen.

Kirjanpainajatuhoista tehtyjen metsänkäyttöilmoitusten ja satelliittikuvien silmämääräisissä analyyseissä löydettiin kohteita, joissa kirjanpainajatuho voitiin havaita metsänkäyttöilmoituskuvioiden sisällä sekä erittäin korkean erotuskyvyn kuvissa, että Sentinel-2 kuvissa. Kuitenkin kirjanpainajatuhoihin liittyviä metsänkäyttöilmoituksia oli Sentinel-2 kuvien ajalta liian vähän, jotta niitä olisi voitu käyttää satelliittikuviin perustuvan menetelmän kehityksessä tai testauksessa.

Myrskytuhojen kohdalla, optisten pilvettömien kuvien saatavuus oli huono tarkastelluilla myrskytuhoalueilla Kouvolaan ympäristössä Kiira-myrskyn jälkeen pitkälle syksyyn. Tästä syystä varsinaisia tulkintoja ei voitu tehdä.

3.2.2 Palvelun pilotoinnin tulokset

Pilottipalvelun tuottamien tulosten ja Metsäkeskukseen saapuneiden metsänkäyttöilmoitusten vertailun perusteella näytti siltä, että kaikista toteutuneista hakkuista ei ollut jätetty lain vaatimaa metsänkäyttöilmoitusta. Koealueilta saatujen satelliittikuvien perusteella löytyi kymmeniä kohteita, joista ei löytynyt hakkuista vastaavaa metsänkäyttöilmoitusta. Osa kohteista sijoittuu taajamien kaava-alueille, joilla tehtävistä hakkuista ei edellytetä metsälain mukaista metsänkäyttöilmoitusta. Tulosten perusteella löydettiin myös kohteita, joissa oli hakattu metsälain tarkoittamia erityisen arvokkaita elinympäristöjä.

Muutostulkintojen luotettavuus todettiin riittävän hyväksi operatiiviseen käyttöön. Suurimmaksi haasteeksi luotettavuudelle todettiin mahdolliset aineistoon jäävät pilvet. Myös harvennusten paikantamisen luotettavuus todettiin käytännössä kohtuullisen hyväksi. Hankkeen viimevaiheissa tehdyissä maastotarkastuksissa kaikki harvennuksiksi luokitellut kohteet todettiin myös maastossa harvennuksiksi mutta hakattua pohjapinta-alaa yliarvioitiin.

3.3 Toteutusvaiheen arviointi

Hankkeen päätavoite toteutui hyvin. Hankkeessa kehitetyt muutostulkintamenetelmä löysi hyvin avohakkuut ja myös osan harvennuksista. Kehitetty pilottipalvelu vastasi Metsäkeskuksen tarpeita.

Muut hankkeen osa-alueet kärsivät käytettävissä olevan referenssiaineiston rajallisuudesta. Sekä maanmuokkauksen tunnistamista, hakatun pohjapinta-alan arviointia, että metsätuhojen tunnistamista varten tarvittaisiin tarkempaa ja suurempi määrä referenssiaineistoa.

Hankkeessa oli tarkoitus tutkia hyönteistuhoja mm. satelliittikuvien aikasarjan avulla. Tätä ei päästy tekemään tuhoista olemassa olevan aineiston vähäisyyden vuoksi. Lisäksi kirjanpainajatuhoalueet ovat Suomessa pinta-alaltaan pieniä, joten niiden tunnistaminen muutoksiksi ja erottaminen muista muutoksista on vaikeaa Sentinel-2-aineiston avulla.

3.4 Julkaisut

Artikkelit tieteellisissä sarjoissa

Hankkeessa on tekeillä kaksi tieteellistä lehtikäsikirjoitusta:

Sirro, L., Häme, L., Pitkänen, T., Häme, T., Rauste, Y., Törmä, M., Hostikka, A., Kangas, A. Forest cutting monitoring system using Sentinel-2 imagery.

Pitkänen, T., Sirro, L., Häme L., Häme, L. Törmä, M., Kangas, A. Errors related to automatized satellite-based change detection of boreal forests in Finland.

Muut julkaisut

Copernicus Sentinel-2 supports forestry in Finland, in ESA News, 29 January 2019.
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/news/-/article/copernicus-sentinel-2-supports-forestry-in-finland>

Satellites monitor forest changes in Finland in Copernicus4Regions, the ever growing use of Copernicus across Europe's regions, A selection of 99 user stories by local and regional authorities, NEREUS, EC and ESA, 2018.
http://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/copernicus4regions_2018.pdf

Esitykset ja posterit tieteellisissä kokouksissa ja konferensseissa

Using Sentinel -2 satellite images for automated detection of forest changes, Timo Pitkänen, Joint Meeting for the CARISMA and Nordic Co-operation Group for Forest Inventory, 22.-24.8.2018

Using Sentinel-2 satellite images for automated detection of forest changes. T. Pitkänen, A. Kangas, L. Sirro, T. Häme, L. Häme, ForestSAT 2018, 1.-6.10. 2018.

Using administrative information on planned forest cuttings as reference data for forest change detection, Laura Sirro, Timo Pitkänen, Tuomas Häme, Yrjö Rauste, Markus Törmä, Aki Hostikka, Lauri Häme, ESA Living Planet Symposium, 13.-17.5.2019.

4 Tulosten arviointi

4.1 Tulosten käytännön sovellutuskelpoisuus

Hankkeen tuloksena metsälain toimeenpanon prosessit ovat uudistuneet Metsäkeskuksessa merkittävästi. Maa- ja metsätalousministeriö on muuttanut vuotuista tarkastusmääräystänsä vuodelle 2019. Metsänkäyttöilmoitusten maastotarkastusten painopiste on siirretty tapahtuneiden hakkuiden ja niiden laadun valvontaan aikaisemmasta etukäteisvalvonnasta. Hakkuiden jälkeiset tarkastuskohteet haetaan vertaamalla erotuskuvatulkinnan tuloksia muihin Metsäkeskuksen käytössä oleviin aineistoihin ja analysoimalla eroja. Näin maastotarkastukset pystytään ohjaamaan hakkuiden toteutuksen valvonnan kannalta merkittävimpiin kohteisiin. Näiden tarkastusten yhteydessä kerätään myös luontoon liittyvää tietoa kevennetyllä luontolaatutarkastuksella. Näin saadaan huomattavasti entistä tarkastuskäytäntöä enemmän tietoa esimerkiksi säästöpuiden määrästä ja laadusta uudistushakkuualoilla.

Toinen uuden aineiston mukanaan tuoma parannus Metsälain toimeenpanoon on metsänkäyttöilmoitusten toimittamisen valvonnan tehostuminen. Laiminlyönnit havaitaan valtakunnassa kattavasti ja pääsääntöisesti varsin nopeasti hakkuun jälkeen. Havaitut metsälakirikkomukset eivät ehdi vanhenemaan, mikä on ollut ongelma ennen erotuskuvatulkinnan tulosten käyttömahdollisuutta.

Uudistamisen valvontaa uusi aineisto helpottaa ja tehostaa, koska sen avulla saadaan todennetuksi hakkuun ajankohta ja täsmennetyksi hakatun alueen geometria.

Aineistoa voidaan hyödyntää myös rahoituslain jälkihoitovelvoitteiden valvonnassa ja ympäristötukisopimusten noudattamisen seurannassa.

Metsätuhojen leviämisen torjunnassa aineiston avulla pystytään kartoittamaan mahdollisia riskikohteita ja keskittämään seurannan painopistettä niihin.

Metsäkeskuksen lisäksi menetelmän tuottamaa aineistoa voivat hyödyntää metsien rakenteesta ja siinä tapahtuvista muutoksista kiinnostuneet tahot.

4.2 Tulosten tieteellinen merkitys

Hankkeen tieteellinen uutuusarvo muodostuu muutostulkintamenetelmien kehittämisestä siten, että tulkinnassa voidaan soveltaa useamman kuvan aikasarjaa. Aikasarjan käyttö mahdollistaa kuvien käyttämisen muutostulkintaan ilman, että pilviä tarvitsee erikseen maskata pois. Erityisesti ohuiden harsopilvien ja pilvien heittämiä varjojen huomiointi on hankalaa, joten aikasarjan käyttö mahdollistaa tulkinnan automatisoinnin ja poistaa pilvistä johtuvia virhetulkintoja.

Tässä tutkimuksessa muutostulkintaan tehtiin perusteellinen luotettavuuden arvio käyttäen korkearesoluutioisia VHR kuvia. Virhetulkinta osoitti, että metsäalueen ominaisuuksilla ei ole merkittävää vaikutusta muutostulkinnan luotettavuuteen, mutta sen sijaan tulkinnan

parametrisoinnilla ja kuvien laadulla on hyvin selkeä vaikutus. Hankkeessa saatujen tulosten perusteella on mahdollista edelleen kehittää muutostulkintaa luotettavammaksi, esimerkiksi valitsemalla parametrit tarkasteltavan ilmiön ja käyttäjän vaatimusten suhteen optimaalisesti.

5 Lähteet

Parmes, E.; Rauste, Y.; Molinier, M.; Andersson, K.; Seitsonen, L. Automatic cloud and shadow detection in optical satellite imagery without using thermal bands—Application to Suomi NPP VIIRS images over Fennoscandia. *Remote Sens.* 2017, 9, 806

Häme, T., Heiler, I., San Miguel-Ayaz, J., 1998. An unsupervised change detection and recognition system for forestry. *Int. J. Remote Sens.* 19. <https://doi.org/10.1080/014311698215612>

Zhu, Z., Wang, S., Woodcock, C.E., 2015. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sens. Environ.* 159, 269–277. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2014.12>