

Satelliittidatan hyödyntäminen verkosto- omaisuuden hallinnassa



SISÄLLYSLUETTELO

Lyhenteet	3
1 Johdanto	4
2 Tutkimuksen taustat ja tavoitteet	5
2.1 Taustatiedot	5
2.2 Tavoitteet ja aiheet	6
2.3 Tyyppitapaukset	7
2.4 Työn toteutustapa	7
2.5 Projektin ohjausryhmä	8
3 Satelliitit ja niiden tuottama data	9
3.1 Yleistä satelliiteista ja datasta	9
3.2 Optinen aineisto	10
3.3 Tutkasignaali (SAR)	14
3.4 Satelliittipohjaisen datan saatavuus ja tulevaisuuden näkymät	17
4 Sähköverkkoyhtiöiden tarpeet verkosto-omaisuuden hallintaan	20
4.1 Kasvillisuuden muodostama riski verkolle	20
4.2 Ulkopuolisen toiminnan muodostama riski verkolle	21
4.3 Tilannekuvan muodostaminen suurihäiriötilanteessa	22
5 Nykyiset menetelmät	24
5.1 Verkon kunto- ja kasvillisuustarkastukset	24
5.2 Verkkoa uhkaava ulkopuolinen toiminta	27
5.3 Tilannekuva myrskyssä ja myrskyn jälkeen	28
6 Satelliittidataan pohjautuvat menetelmät	31
6.1 Infrastruktuuririskien hallinta	32
6.2 Kasvillisuuden hallinta	37
6.3 Suurihäiriötilanteen hallinta	48
7 Nykyisten menetelmien ja satelliittipohjaisten ratkaisujen vertailu	55
7.1 Kasvillisuuden hallinta	55
7.2 Infrastruktuuririskien hallinta (Hälytys ulkopuolisesta verkkoa uhkaavasta toiminnasta)	64
7.3 Suurihäiriötilanteen hallinta (Tilanne myrskyssä/myrskyn jälkeen)	69
8 Johtopäätökset	73
8.1 Satelliittidatan hyödyntäminen verkosto-omaisuuden hallinnassa nykyhetkellä	73
8.2 Satelliittidatan hyödyntäminen verkosto-omaisuuden hallinnassa tulevaisuudessa	75



LYHENTEET

AI	Tekoäly (Artificial Intelligence)
ESA	Euroopan avaruusjärjestö (European Space Agency)
HR	Korkean resoluution aineisto (High Resolution)
KAH	Keskeytyksestä aiheutunut haitta
Lidar	Valotutka (Light detection and ranging)
ML	Koneoppiminen (Machine Learning)
NDVI	Normalisoitu kasvillisuusindeksi (Normalized Difference Vegetation Index)
SAR	Satelliittitutka-aineisto (Synthetic Aperture Radar)
UAV	Miehittämätön ilma-alus (Unmanned Aerial Vehicle)
VHR	Erittäin korkean resoluution aineisto (Very High Resolution)



1 JOHDANTO

Maata kiertävät satelliitit tuottavat jatkuvasti erityyppistä dataa ympäri maailman. Satelliittien keräämä aineisto sisältää paljon arvokasta tietoa maan pinnalla tapahtuvista asioista. Tähän mennessä tämän massiivisen tietomäärän hyödyntäminen sähköverkkojen hallinnassa on ollut hyvin vähäistä. Tästä syystä tämän tutkimushankkeen tarkoituksena on tuoda esille satelliittiaineiston mahdollisia käyttökohteita verkosto-omaisuuden hallinnassa.

Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, millaisissa olosuhteissa ja tilanteissa satelliittidataa on mahdollista hyödyntää verkosto-omaisuuden hallinnassa. Lisäksi tutkimuksessa käsitellään erilaisten satelliittipohjaisten menetelmien luotettavuutta sekä sopivuutta operatiiviseen käyttöön. Lisäksi raportissa tuodaan esiin satelliittipohjaisten menetelmien kustannuksia ja mahdollisesti saavutettavia hyötyjä.

Aikaisempien selvitysten pohjalta satelliittiaineiston potentiaalisiksi käyttökohteiksi verkosto-omaisuuden hallinnassa on tunnistettu verkon valvonta sekä erilaisten riskien tunnistaminen. Tutkimuksen aikana optisen satelliittidatan tarjoamia mahdollisuuksia tarkastellaan kasvillisuuden ja infrastruktuuririskien hallinnan osalta. Tämän lisäksi raportissa avataan SAR-tutkadatan soveltuvuutta myrskyn aiheuttamien vahinkojen kartoittamisessa ja tilannekuvan muodostamisessa.



2 TUTKIMUKSEN TAUSTAT JA TAVOITTEET

2.1 Taustatiedot

Keskeytyksetön ja luotettava sähkönsiirto ja -jakelu ovat toimivan nyky-yhteiskunnan peruspilareita. Satelliittien tuottama data ja sen koneoppimismalliperusteinen (ML) tiedon prosessointi ja tekoälypohjainen (AI) analysointi ovat lupaava vaihtoehto kustannustehokkaaksi menetelmäksi verkoston turvallisuuden ja luotettavan toiminnan varmistamiseen. HeadPower yhdessä Terramonitorin kanssa tuottivat Euroopan Avaruusjärjestölle (ESA) toteutettavuustutkimuksen (Feasibility Study), jonka lopputuloksena tunnistettiin kolme potentiaalista osa-aluetta, jotka tukevat verkosto-omaisuuden hallintaa ilman fyysistä läsnäoloa.

1. **Kasvillisuuden hallinta** tunnistaa kasvillisuuden aiheuttamat riskikohteet sekä auttaa kohdentamaan raivaustarvetta ja seuraamaan raivausurakoitsijan työsuoritusta
2. **Infrastruktuuririskien hallinta** tuottaa hälytyksiä verkoston alla, päällä tai lähitöällä tapahtuvasta riskialttiista toiminnasta, kuten kaivutyöt ja rakennuskohteet verkkoalueella. Esimerkiksi kaikki luvaton kaivuu maakaapelin päällä on riski, joka voi realisoitua sähkövikana vasta vuosien päästä.
3. **Suurhäiriötilanteen hallinta** nopeuttaa ja tehostaa viankorjausta muodostamalla tilannekuvan sääilmiöiden aiheuttamasta tuhosta johdoilla sekä niille johtavilla teillä.

Maa-alueista dataa tuottavien satelliittien määrä kasvaa jatkuvasti. Erityisesti datan saatavuus ja laatu ovat ottaneet kehitysaskelleita muutaman viime vuoden aikana ja kehitys vaikuttaa vain kiihtyvän. Perinteisten ihmisen silmälle näkyvien aallonpituuksien lisäksi satelliitit tuottavat dataa muun muassa infrapuna-alueella sekä tutkasensoreilla. Tämä kehitys yhdistettynä avoimen satelliittitiedon hyödyntämiseen on parantunut ESA:n tutkimuksessa tunnistettujen potentiaalisten kohteiden kustannustehokkuutta entisestään. Toteutettavuustutkimuksen tulokset olivat alustavia ja karkealla tasolla.



Tunnistetut kolme osa-aluetta nähtiin kuitenkin niin potentiaalisina, että HeadPower ja Terramonitor jatkoivat niiden tutkimista ja kehitystä jatkoprojektissa yhdessä suomalaisten jakeluverkkoyhtiöiden sekä eurooppalaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa. Myös tälle jatkoprojektille (Demonstration Project) myönnettiin ESA:n rahoitus. Jatkoprojektin tulokset eivät ole julkisia, minkä johdosta tämän ST-Poolin rahoittaman osaprojektin avulla on haluttu jakaa tietoisuutta myös laajemmin koko toimialalle.

2.2 Tavoitteet ja aiheet

Tämä ST-Poolin rahoittama tutkimusprojekti (osaprojekti) laajentaa yhdessä suomalaisten jakeluverkkoyhtiöiden ja eurooppalaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa toteutettavaa laajempaa jatkoprojektia. Osaprojektin tavoitteena on tutkia uusimman satelliittidatan tekoälypohjaista hyödynnettävyyttä sähköverkoston omaisuuden hallinnassa sekä tuottaa ajantasaista ja hyödynnettävää tietoa ST-poolin jäsenille. Tutkittavat osa-alueet liittyvät kasvillisuuden, infrastruktuuririskien ja suurhäiriötilanteen hallintaan. Osaprojektissa tuotetaan vastaus seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Millaisissa olosuhteissa ja tilanteissa satelliittidataa kannattaa hyödyntää verrattuna nykyisten menetelmien kustannuksiin ja nopeuteen?
2. Mikä on koneoppimis-/tekoälypohjaisen (ML/AI) satelliittidata-analyysin luotettavuus?
3. Mitkä ovat saavutettavat hyödyt suhteessa kustannuksiin?

Tutkimuksessa hyödynnetään laajasti optisen datan lisäksi ihmissilmälle näkymättömiä taajuuksia, kuten infrapunaa ja hyperspektriä sekä SAR-tutkadataa. Osaprojektissa tavoiteltavia hyötyjä ovat uusimman satelliittidatan hyödyntämisen parhaiden käytäntöjen ja nyky menetelmiin verrattuna uusien mahdollisuuksien tuominen verkkoyhtiöiden ja alan toimijoiden hyödynnettäväksi. ESA:n rahoittaman jatkoprojektin tulokset eivät ole julkisia, mutta osaprojekti mahdollistaa tutkimuskysymysten vastausten julkaisun koko toimialalle tämän tutkimusraportin muodossa.



2.3 Tyypitapaukset

Verkkoyhtiöt tarjoavat analysoitavaksi soveltuvat kohteet, joissa havaitut riskit ja kohteet voidaan analysoida ja varmentaa. Analysoitavat kohteet ja riskit määräytyvät verkkoyhtiöiden tarjoamien kohteiden mukaan. Osa kohteista käytetään tekoälyn luotettavuuden parantamiseen ja osa tulosten luotettavuuden analysointiin. Näin saadaan parempi lopputulos satelliittidatan ja sen tekoälypohjaisen analysoinnin luotettavuudesta verkosto-omaisuuden hallinnassa.

Tyypiverkot ovat seuraavat:

- Taajama-alueen jakeluverkko
- Haja-asutusalueen jakeluverkko

Tarkasteltavat kohteet ja riskitilanteet ovat seuraavat:

- Kasvillisuusriski
- Hälytys avohakkuusta
- Raivauksen vaikutus
- Hälytys ulkopuolisesta verkkoa uhkaavasta toiminnasta
- Tilannekuva myrskyssä/myrskyn jälkeen (SAR-tutkadata)

2.4 Työn toteutustapa

Projektin toteutuksesta ja tulosten julkaisusta vastaa HeadPower yhdessä Terramonitorin (Satellio Oy) ja ohjausryhmän kanssa. Tämä tutkimusprojekti toteutetaan osana laajempaa jatkokehitysprojektia, jossa tutkittavat verkkoalueet tulevat jatkoprojektiin osallistuvilta kanta- ja jakeluverkkoyhtiöiltä. Näin saadaan laaja otos erilaisia satelliittidatasta tekoälyn (AI) avulla tunnistettavia kohteita ja riskejä verkosto-omaisuudelle. Osallistuvat verkkoyhtiöt varmistavat oman verkostonsa osalta tulosten paikkansa pitävyyden kentällä. Näiden käytännön tarkastusten tulosten perusteella



opetetaan algoritmipohjaista tekoälyä sekä muodostetaan lopullinen tulos satelliittidatapohjaisen verkoston riskien analysoinnin luotettavuudelle. Osallistuvista yhtiöistä muodostetaan ohjausryhmät, jotka ohjaavat ja koordinoivat projektia, tuovat projektiin verkon omistajan tarpeet, tarpeellisen datan sekä arvioivat osaltaan tulosten hyödynnettävyyttä. Ohjausryhmä hyväksyy tarkemman toteutussuunnitelman sekä siihen mahdollisesti tehtävät muutokset.

Osana tätä tutkimusprojektia on toteutettu jakeluverkkoyhtiöille suunnattu kysely, jossa on selvitetty nykyisin käytössä olevia menetelmiä. Kyselyn vastauksia on hyödynnetty tutkimusraportissa.

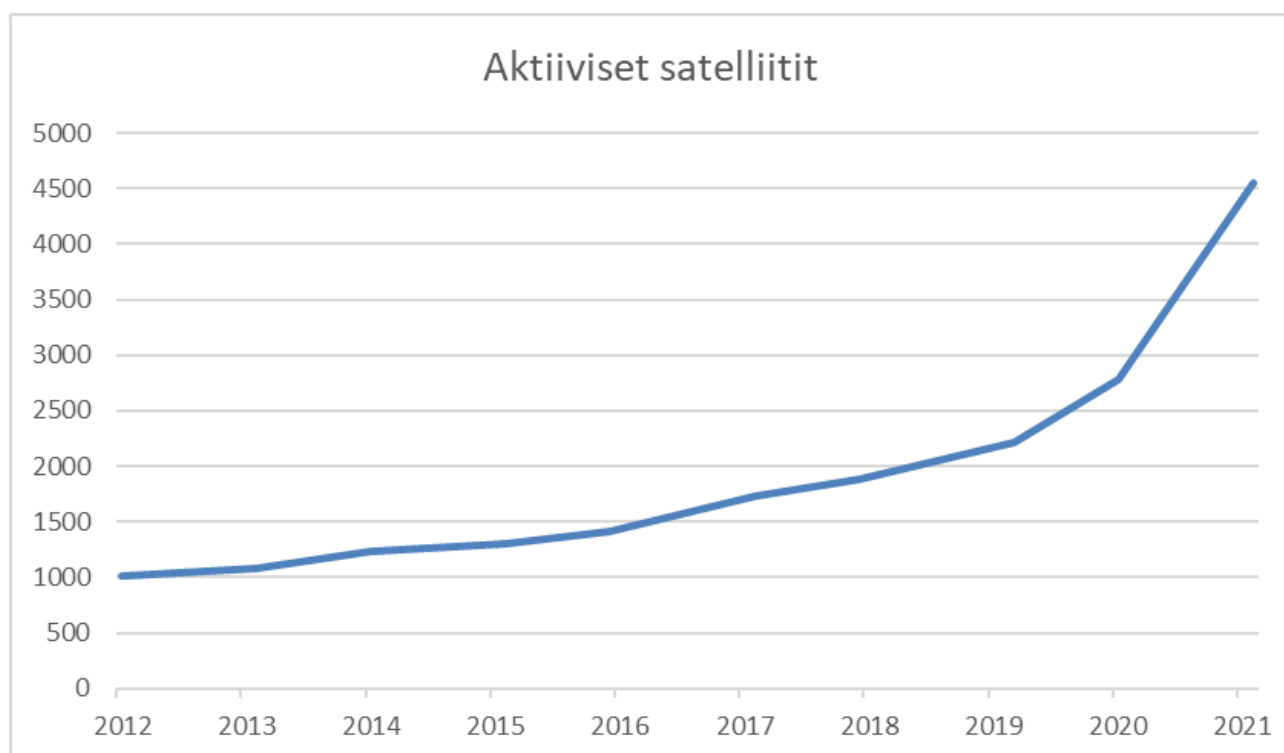
2.5 Projektin ohjausryhmä

Tutkimusprojektin ohjausryhmässä toimivat Janne Kerttula, Energiategollisuus ry; Mikko Jalonen, Fingrid Oyj; Sami Viiliäinen, Savon Voima Verkko Oy; Joni Norppa, Terramonitor sekä Antti Jukarainen, Timo Mutila ja Mikko Holm, HeadPower Oy. Ohjausryhmä kokoontui etäkokouksiin hankkeen aikana 7 kertaa. Ohjausryhmän kokoukset toimivat tilaisuuksina päivittää, seurata ja raportoida tutkimushankkeen etenemistä.

3 SATELLIITIT JA NIIDEN TUOTTAMA DATA

3.1 Yleistä satelliiteista ja datasta

Maata kiertävien satelliittien määrä on ollut viime vuosina selkeästi kasvamassa. Kesän 2022 alussa aktiivisten satelliittien lukumäärän arvioitiin olevan 5465. Vertailun vuoksi alkuvuoden 2022 aikana on uusia satelliitteja laukaistu yli 600 kappaletta, kun vielä vuonna 2012 aktiivisten satelliittien kokonaismäärä oli vain 989. Kymmenessä vuodessa satelliittien määrä on siis yli viisinkertaistunut. Kuvassa 1 on esitetty kuvaaja, joka havainnollistaa aktiivisten satelliittien määrän kehittymistä viimeisen kymmenen vuoden aikana. Kuten kuvaajasta voidaan havaita, on satelliittien määrä ollut kasvussa koko tarkasteluvälin, mutta erityisen voimakkaaksi kasvu on kiihtynyt muutaman viime vuoden aikana. (Tilasto on päivitetty 1. toukokuuta 2022, Lähde: UCS Satellite Database



<https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>)

Kuva 1. Maata kiertävien satelliittien määrän kehittyminen. Lähde: UCS Satellite Database.



Suurin osa nykyisestä yli 5000 satelliiteista on tarkoitettu ensisijaisesti kaupalliseen käyttöön. Kaupallisten satelliittien ohella muita merkittäviä käyttäjäryhmiä ovat valtiot sekä sotilasorganisaatiot. Satelliitit tarjoavat käyttäjäryhmilleen lukuisia eri käyttökohteita. Tyypillisiä käyttökohteita kaupallisille satelliiteille ovat muun muassa viestintä-kommunikaatio, kaukokartoitus (earth observation), ilmastonmuutoksen havainnointi ja tuotekehitys. Kaukokartoitus tarjoaa erilaisia menetelmiä, joiden avulla on mahdollista havainnoida maan pinnalla tapahtuvia asioita.

Kaukokartoitus satelliitit tuottavat joka päivä suuren määrän erilaista dataa kattaen koko maapallon. Tarjottuja datalähteitä ovat muun muassa optinen kuva-aineisto, lämpötilatiedot, sää sekä erilaiset tutka-aineistot. Vastaavien aineistojen kerääminen satelliittien sijaan muista lähteistä olisi useissa tapauksissa äärimmäisen työlästä ja monin verroin kalliimpaa. Satelliittien tarjoamat datalähteet pitävät sisällään paljon arvokasta tietoa, josta on jatkojalostamisella mahdollista tuottaa hyödyllisiä ratkaisuja moniin eri tarpeisiin.

3.2 Optinen aineisto

Optisilla sensoreilla varustetut satelliitit tuottavat jatkuvasti kuva-aineistoa maan pinnalta kattaen laajan maantieteellisen alueen. Optinen aineisto sopii hyvin esimerkiksi laajojen maapinta-alojen muutosten sekä kasvillisuuden analysointiin. Satelliittien sensorit vastaanottavat useita eri aallonpituuksia ja värispektrikanavia. Osa kanavista vastaanottaa näkyvää valoa, mutta lisäksi mukana on esimerkiksi erilaisia infrapunakanavia, jotka vastaanottavat ihmisilmälle näkymättömiä aallonpituuksia. Eri aallonpituuksia ja kanavia on mahdollista hyödyntää aineiston analysoinnissa ja niiden avulla on mahdollista tunnistaa ja erotella erilaisia materiaaleja, aineita ja kohteita tutkitulta alueelta.

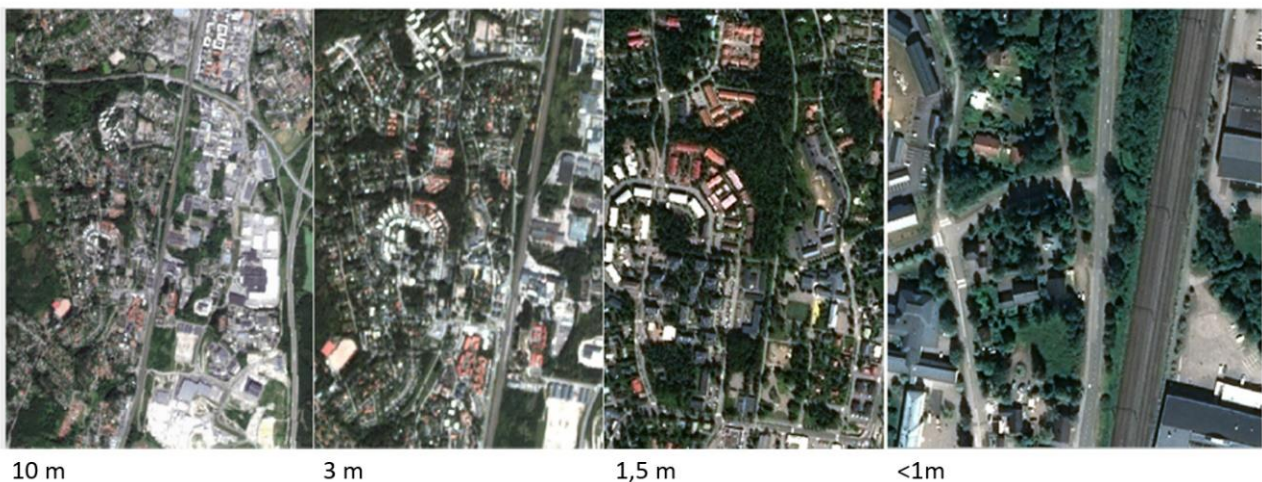
Optisilla sensoreilla varustetut satelliitit ovat niin sanotusti passiivia, eli ne vastaanottavat kohteen lähettämää tai heijastamaa sähkömagneettista säteilyä, mutta eivät itse lähetä sitä. Tämä tuo omat rajoitteensa optisen aineiston käyttöön, sillä se vaatii suoraa



näkyvyyttä kohteeseen. Käytännössä optisen aineiston käyttö ei onnistu esimerkiksi pilvipeitteen läpi tai heikoissa valaistusolosuhteissa.

Satelliitit ja niiden sensorit ovat ominaisuuksiltaan erilaisia, ja niiden tuottamassa kuva-aineistossa on merkittäviä eroja laadussa, kustannuksissa ja saatavuudessa. Vastaanottavien sensorien tekniset ominaisuudet vaikuttavat muun muassa kuva-aineiston erottelukyvyn sekä laatuun. Eroja on myös kyvykkyydessä vastaanottaa erilaisia aallonpituuksia ja kanavia. Kuva-aineiston tarkkuuden ja erottelukyvyn osalta optinen aineisto voidaan jakaa karkeasti kolmeen kategoriaan resoluution eli kokoon, jota yksi pikseli esittää maanpinnalla:

- **Avoin aineisto**, jossa resoluutio on tarkimmillaan 10 metrin luokkaa
- **Korkean resoluution aineisto**, (HR), jossa resoluutio vaihtelee yhden metrin ja noin viiden metrin välillä
- **Erittäin korkean erottelukyvyn aineisto**, (VHR), jossa on resoluutio alle yhden metrin luokkaa



Kuva 2. Esimerkkejä optisesta satelliittidatasta eri resoluutioilla.

Ideaalitilanteessa käytössä olisi aina mahdollisimman tarkka ja tuore kuva-aineisto. Reaalimaailmassa satelliittien tekninen kapasiteetti kerätä aineistoa ja etenkin kuva-aineiston kustannukset vaikuttavat merkittävästi siihen, millaisen aineiston käyttö on taloudellisesti järkevää. Useissa käyttötapauksissa resoluutioltaan heikompi aineisto



riittää haluttujen asioiden tunnistamiseen. Tämä korostuu erityisesti tekoälypohjaisissa ratkaisuihin, sillä koneellisesti tulkittuna kuvat sisältävät paljon sellaista tietoa, jota ihmissilmällä ei ole mahdollista havaita. Eri laatuisten aineistojen avulla voidaan siis nähdä tapauskohtaisesti erilaisia käyttötarkoituksia. Seuraavaksi esitellään näiden kolmen eri laatuisten satelliittiaineiston tärkeimpiä ominaisuuksia sekä mahdollisia käyttökohteita.

Optista aineistoa on saatavilla sekä avoimista että kaupallisista lähteistä. Avointa aineistoa tarjoavat esimerkiksi kansalliset avaruusjärjestöt ja tässä hankkeessa on hyödynnetty Euroopan avaruusjärjestö ESA:n tarjoamaa Sentinel-2 aineistoa. Kaupallista aineistoa tarjoavia yrityksiä on maailmanlaajuisesti useita ja niiltä löytyy paljon erilaisilla sensoreilla varustettuja satelliitteja, jotka tuottavat optista aineistoa eri tarkkuuksilla, sisältäen erilaisia kanavia. Tarkimpia satelliittikuvien toimijat kuvaavat pääosin tilausten perusteella, jolloin aineistoa ei ole saatavilla aina kaikilta alueilta. Tilatut kuvat toimitetaan ensin tilaajalle, minkä jälkeen ne tulevat usein pienellä viiveellä myyntiin kuvapankkeihin. Avoimista lähteistä hankittu kuva-aineisto häviää yleensä resoluution tarkkuudessa kaupallisille aineistoille, eikä niiden kuvausajankohdista ja kohteista ole mahdollista vaikuttaa. Toisaalta avoimet lähteet tarjoavat tasalaatuisen, keskenään helposti verrattavan ja kustannustehokkaan ratkaisun, jossa uutta aineistoa saadaan varmuudella säännöllisin väliajoin.

Taulukko 1. Yhteenveto erityyppisistä optisista satelliittiaineistoista ja niiden tärkeimmistä ominaisuuksista.

Satelliitti ja sen tuottama data	Mihin soveltuu, mahdollisuudet	Tärkeimmät tekniset ominaisuudet	Vahvuudet	Heikkoudet
Optinen avoin, resoluutiossa 10 m (Sentinel)	Sopii laajojen pinta-alojen toistuvaan kartoitukseen. Sopii esimerkiksi hakkuutulkintaan sekä varauksin uusien teiden ja muiden kohtuullisen	Multispektrisatelliitti, jossa on useita eri kanavia. Mahdollistaa erilaisten analyysien tekemisen verrattuna	Kustannuksiltaan edullista ja saatavuus on hyvä. Uutta aineistoa saatavilla keskimäärin 2 kertaa viikossa. Aineisto on hyvä laatuista eikä	Resoluutiosta johtuen minimi alue, jolla analyysijä voidaan tehdä, on noin 30x30m. Resoluutiosta johtuen muutoksen



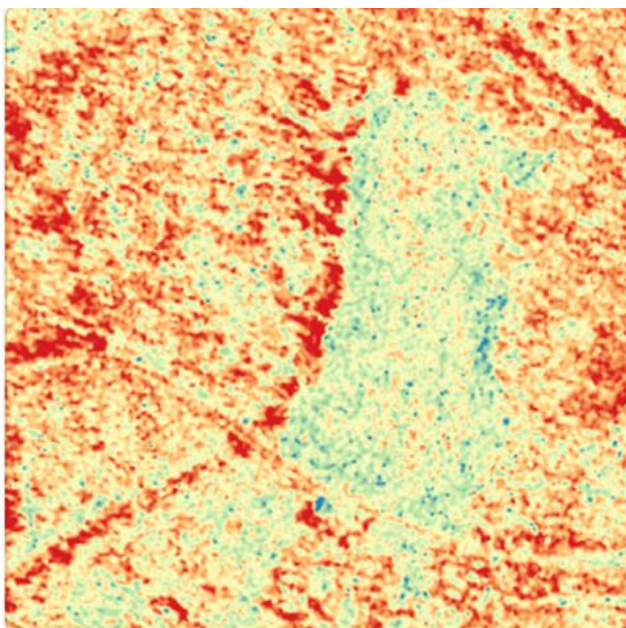
Satelliitti ja sen tuottama data	Mihin soveltuu, mahdollisuudet	Tärkeimmät tekniset ominaisuudet	Vahvuudet	Heikkoudet
	kokoisten maanpinnan muutosten tunnistamiseen.	kaupallisiin satelliitteihin.	sisällä laatu poikkeamia. Lisäksi aineiston koneluennallinen tarkkuus on hyvä.	määrittäminen on ajoittain vaikeaa. Lisäksi kaikissa optisissa aineistossa haasteena on valon määrä ja ilmakehän esteet (kuten pilvet).
Optinen HR, 1-5 m resoluutio. Useita lähteitä.	Samat käyttökohteet kuin avoimella aineistolla. Lisäksi kykenee havaitsemaan objekteja, jotka ovat tarkemmissa aineistoissa vajan ja karkeammassa omakotitalon kokoluokassa. Näin ollen aineistolla mahdollista tunnistaa esim. rakennustyömaita ja rakennuskannassa tapahtuvia muutoksia. Lisäksi HR-aineiston avulla pystytään havaitsemaan pieniä metsäalueiden muutoksia sekä satelliittilähteestä riippuen arvioimaan myös linjakatujen etäisyyksiä.	Teknisissä ominaisuuksissa vaihtelua satelliittilähteen mukaan. Tyypillisesti sisältävät näkyvän valon kanavat (RGB), lähi-infrapun ja infrapun sekä mahdollisesti pankromaattista resoluutiota tarkentavan mustan värikanavan. HR-tasoista aineistoa tarjoavat satelliitit kuvaavat systemaattisesti koko maapalloa.	Aineiston kustannusta voidaan varauksin pitää kohtuullisena. Myös aineiston saatavuus melko hyvää, sillä karkeampaa aineistoa saatavilla jopa päivittäin ja tarkempaakin vähintään vuosittain. Mahdollisuus on demand -tyyppisen kuvien tilaukseen halutuilta alueilta.	Datan laadussa selkeää vaihtelua lähteen mukaan. Joillakin toimijoilla laadullista vaihtelua jopa saman satelliittikonstellation sisällä.
Optinen VHR, < 1 m resoluutio. Useita lähteitä.	Samat käyttökohteet kuin avoimella ja HR-aineistolla. Lisäksi mahdollista tunnistaa 1 m kokoluokkaa olevat kohteet, esim. autot	Sisältää tyypillisesti samat värikanavat kuin HR-aineistossa, mutta tarkempina. Satelliittien teknisistä kyvyistä ja tallennuskapasiteetista johtuen ei kuvaa	Isojen asutuskeskusten lähellä aineistoa saatavissa kohtuullisen kattavasti. Toisaalta syrjäseuduilta ja metsäisiltä alueilta	Maantieteellisen skaalauksen kannalta korkeat kustannukset. Tekniset rajoitteet satelliiteissa (ei kykyä toistuvaan, laajamittaiseen datan tuottoon),



Satelliitti ja sen tuottama data	Mihin soveltuu, mahdollisuudet	Tärkeimmät tekniset ominaisuudet	Vahvuudet	Heikkoudet
	ja jopa yksittäiset puut (varauksin).	systemaattisesti kaikkia sijainteja.	saatavuus usein heikompaa.	toisaalta tilanne kehittynyt huomattavasti muutaman vuoden aikana.

3.3 Tutkasignaali (SAR)

SAR eli synteettisen apertuurin tutka (Synthetic Aperture Radar) on mikroaaltoalueella toimiva kaukokartoitus instrumentti. SAR-tutkan erottelukyky perustuu antennin liikkeeseen, jonka ansiosta tutka pystyy luomaan kohteestaan äärimmäisen tarkan kuvan. Toimiessaan tutka lähettää maahan sähkömagneettista säteilyä, joka heijastuu maanpinnasta takaisin kaikuina. Tutka mittaa heijastuneen säteilyn arvon, mikä mahdollistaa maassa olevien kohteiden havaitsemisen ja paikallistamisen. Kuvaava SAR-tutka muodostaa vastaanottamistaan signaaleista "kuvaa". Kuvan muodostaminen perustuu siihen, että maanpinnalla olevat erilaiset kohteet heijastavat takaisin erisuuruisia signaaleja, joiden avulla erilaiset kohteet on mahdollista erottaa toisistaan. SAR-tutkan tuottama aineisto ei siis ole värejä sisältävää optista kuvaa, vaan mitatuista signaaleista koneellisesti jälkikäsittelemällä muodostettuja visualisointeja, joissa eri voimakkuuksisille signaalialueille on annettu tietty väritys. Kuvassa 3 esimerkki SAR-aineiston visualisoinnista.



Kuva 3. Esimerkki SAR-tutkadatan visualisoinnista. Kuvassa punertavat alueet esittävät heikompia signaaleja, jotka ovat heijastuksia esimerkiksi kasvillisuudesta. Vihreät ja sinertävät alueet kuvaavat voimakkaampia signaaleja, jotka ovat heijastuksia muun muassa paljaasta maanpinnasta ja metallin tai kiven kaltaisista kovista objekteista.

SAR-tutkan etu optiseen aineistoon verrattuna on, että se mahdollistaa kuvaamisen ilman näkyvyyttä maan pinnalle esimerkiksi pilvipeitteen läpi tai yöaikaan ilman valoa. Sen haasteena on kuitenkin optiseen aineistoon verrattuna kuvien suhteellinen alhainen resoluutio, joka johtuu SAR-aineistolle ominaisesta kohinasta, joka luo epätarkkuutta visuaaliseen kuvaan. Lisäksi tutkadatan prosessointi ja analysointi ovat optiseen aineistoon verrattuna huomattavasti haastavampaa, sillä sen hyödyntäminen vaatii huomattavasti enemmän esiprosessointia etenkin koneluentaa käytettäessä.

Samaan tapaan kuin optista aineistoa myös SAR-dataa on saatavilla avoimista lähteistä ja kaupallisilta toimijoilta. Avointa tutka-aineistoa on niin ikään saatavilla ESA:n Sentinel-ohjelman kautta. SAR-aineiston hyödyntäminen kaupallisiin tarkoituksiin on varsin uusi suuntaus, eikä tutka-aineistoa tarjoavia kaupallisia toimijoita ole vielä yhtä montaa kuin optisella aineistolla. Tässä hankkeessa on hyödynnetty suomalaisen Iceye:n toimittamaa SAR-aineistoa.

Taulukko 2. Yhteenveto erityyppisistä SAR-aineistoista niiden tärkeimmistä ominaisuuksista.

Satelliitti ja sen tuottama data	Mihin soveltuu, mahdollisuudet	Tärkeimmät tekniset ominaisuudet	Vahvuudet	Heikkoudet
Avoin synteettinen tutka-aineisto (SAR), Sentinel.	Sopii laajojen pinta-alojen kartoitukseen sekä esimerkiksi avohakkuiden kaltaisten suurten muutosten tunnistamiseen.	Aineiston teoreettinen enimmäisresoluutio on 5 m, mutta käytännön sovelluksissa kohteiden täytyy olla tätä suurempia. Satelliitti kattaa koko maailman 12 päivän kierrolla, joten uutta aineistoa tulee 1–2 viikon välein.	Aineiston on kustannuksiltaan edullista ja sitä on saatavilla säännöllisesti. Aineisto on laadukasta eikä sisällä laatupoikkeamia. Lisäksi staattiset kuvauskulmat helpottavat datan käsittelyä. Optiseen aineistoon verrattuna tutka-aineiston etuna on, että esim. pilvien kaltaiset ilmakehän esteet eivät haittaa aineiston käyttöä.	Datan prosessointi on vaativaa ja sitä on haasteellista automatisoida. Teknologian takia maassa tapahtuvat muutokset kuten vuodenajat (esim. puiden lehdet, lumi) ja kosteusolosuhteet saavat "kuvat" näyttämään hyvin erilaiselta ajankohdan mukaan.
Tarkka synteettinen tutka-aineisto (SAR), Iceye.	Hankkeessa toteutettujen kenttätestien perusteella tällä aineistoilla saatetaan tunnistaa jopa yksittäisiä johtokadulle kaatuneita puunrunkoja. Tämän lisäksi aineistoa on mahdollista käyttää esim. yksittäisten objektien muutostulkintaan sekä pylväiden mahdollisten	Aineiston teoreettinen resoluutio on noin 0,5–1 m. Tämä mahdollistaa pientenkin synteettisten kohteiden (esim. metalli) ja kovien pintojen tunnistamisen.	Uutta ja ajantasaista aineistoa mahdollista saada jopa päivittäin ja tulevaisuudessa jopa useita kertoja päivässä.	Sisältää samoja haasteita kuin avoin SAR-aineisto. Lisäksi tarkemmassa aineistossa kuvauskulmat vaihtelevat eri satelliittikonstellat ion sisällä, mikä vaikeuttaa aineiston käsittelyä. Nykyisellään tarkemman SAR-aineiston kustannus on suhteellisen korkea ja saatavuus vaihtelevaa.



Satelliitti ja sen tuottama data	Mihin soveltuu, mahdollisuudet	Tärkeimmät tekniset ominaisuudet	Vahvuudet	Heikkoudet
	liikkumisen havaitsemiseen.			Esimerkiksi Ukrainan sota on vaikuttanut aineiston saatavuuteen, kun satelliittien kapasiteetti on ollut varattuna muualla. Toisaalta tilanteen uskotaan parantuvan tulevaisuudessa, kun satelliittien määrä kasvaa.

3.4 Satelliittipohjaisen datan saatavuus ja tulevaisuuden näkymät

Kuten jo aikaisemmin todettiin, maata kiertävien satelliittien määrä on ollut selvässä kasvussa jo pidemmän aikaa. Erityisen voimakkaaksi kasvu on kiihtynyt muutaman viime vuoden aikana, mikä on näkynyt myös kaukokartoitussatelliittien määrässä. Toimialalle on tullut useita uusia satelliittidataa tuottavia yrityksiä, jotka tuottavat omien satelliittiensä avulla päivittäin uutta aineistoa ympäri maailman.

Aineiston määrän kasvaessa myös sen markkinat ovat kehittyneet. Tarjonnan ja kilpailun kasvu on laskenut satelliittidatan kustannuksia viime vuosien aikana. Aikaisemmin markkina on suosinut voimakkaasti suuria globaalisti toimivia yrityksiä, jotka ovat ostaneet määrällisesti paljon aineistoa suoraan sen toimittajilta. Pienempiä erinä tilaaville toimijoille hinnat ja aineiston saatavuus ovat olleet merkittävästi heikompia. Lisäksi toimintatapa on vaatinut sitoutumista yksittäisiin datan tarjoajiin, jotta kustannukset on saatu pidettyä aisoissa. Viime vuosien aikana markkinoille on kuitenkin ilmestynyt muutamia datan jälleenmyyntiin keskittyviä toimijoita, joiden kautta on mahdollista ostaa usean eri satelliittidatatoimittajan aineistoja.



Kaukokartoitus-satelliittien määrän ohella myös niiden tuottama aineiston laatu on parantunut. Satelliittien kantamien sensoreiden ominaisuudet ovat kehittyneet merkittävästi viime vuosien aikana. Sensorit kykenevät tuottamaan entistä tarkempaa aineistoa. Lisäksi modernit sensorit kykenevät vastaanottamaan aikaisempaa useampia kanavia ja aallonpituuksia. Kehitys ei koske pelkästään optista aineistoa, vaan myös muun tyyppisten aineistojen laatu ja saatavuus ovat parantuneet. Toisaalta uusien kaupallisten satelliittitoimijoiden myötä myös datan prosessoinnissa, laadussa ja teknisissä ominaisuuksissa on vaihtelevuutta jopa samojen satelliittikonstellaatioiden sisällä.

Samaan aikaan kun satelliittidatan saatavuus ja laatu ovat monipuolistuneet, myös kyky hyödyntää erityyppistä dataa on kehittynyt. Teknisen kehityksen ansiosta kyky ja nopeus prosessoida suuria määriä dataa parantuu jatkuvasti. Lisäksi satelliittidatan hyödyntämiseen liittyen on viime vuosien aikana ollut runsaasti eri alojen yritysten tutkimus ja tuotekehitys hankkeita, joista nyt toteutettu SatNetMonitor-hanke on vain yksi esimerkki. Yritysvetoisten hankkeiden lisäksi satelliittidatan hyödyntämiseen liittyen tehdään tällä hetkellä paljon tieteellistä tutkimusta, jonka kautta tietoisuus erilaisista satelliittidatan analysointimenetelmistä ja käyttökohteista leviää ja kehittyy jatkuvasti.

Globaalilla tasolla satelliittidatapohjaisten palveluiden markkinoiden kooksi on arvioitu 5,97 miljardia Yhdysvaltain dollaria vuonna 2020. Arvioissa markkinoiden odotetaan kasvavan vuoteen 2028 mennessä 20,73 miljardiin dollariin (kuva 4).



Kuva 4. Satelliittidatapohjaisten palveluiden markkinoiden koko 2016–2028. Lähde: Satellite Data Services Market | 2021 – 2028 | Global Industry Size Report.

Kasvun vauhdittajiksi on nimetty erityisesti satelliittiaineiston hyödyntäminen etävalvonnassa sekä katastrofien hallinnassa useilla eri toimialoilla. Myös kuluttajapuolella kiinnostus ajantasaiseen optiseen satelliittiaineistoon on kasvanut Google Earthin kaltaisten työkalujen ansiosta. Kysynnän ohella myös satelliittien sensorien kehittyminen ja hintojen lasku on mahdollistanut pienempien toimijoiden ryhtymisen datan tarjoajiksi, mikä on omalta osaltaan lisännyt kilpailua ja tarjontaa markkinoilla. (Lähde: Satellite Data Services Market | 2021 – 2028 | Global Industry Size Report)



4 SÄHKÖVERKKOYHTIÖIDEN TARPEET VERKOSTO-OMAISUUDEN HALLINTAAN

Seuraavissa kappaleissa sähköverkkoyhtiöiden tarpeita verkosto-omaisuuden hallintaan käsitellään satelliittidatan tarjoamien mahdollisuuksien näkökulmasta.

4.1 Kasvillisuuden muodostama riski verkolle

Yli puolet Suomen sähköjohdoista kulkevat metsissä. Ilmajohdon päälle kaatuvat tai taipuvat puut ovat yleisin sähkökatkoihin johtava syy Suomessa. Sähkönjakelun toiminnan varmistamiseen kannalta on tärkeää tunnistaa kasvillisuuden aiheuttamat riskit verkolle. Kasvillisuusriskiä aiheuttavat esimerkiksi sähköverkon alla oleva aluskasvillisuus sekä verkon läheisyydessä oleva metsäalueet ja muu kasvillisuus. Verkkoyhtiöt tekevät säännöllisesti töitä kasvillisuusriskin arvioimiseksi sekä riskien minimoimiseksi.

Nykyisellään raivauksia tehdään pääosin aikaperusteisesti ja joissain tapauksissa raivaustarvearvioinnin pohjalta. Jos raivaustarve kyettäisiin tunnistamaan riittävällä tarkkuudella, olisi aikaperusteisesta raivauksesta mahdollista siirtyä suuremmissa määrin tarveperusteiseen raivaukseen. Tarveperusteinen raivaus mahdollistaisi monissa tapauksissa harvemmin tehtävät raivaukset sekä resurssien kohdistamisen tehokkaammin todellisen tarpeen mukaan.

Vierimetsällä tarkoitetaan sähkölinjan molemmilla puolilla välittömässä läheisyydessä olevaa puustoaluetta. Tällä alueella kasvavat puut voivat kasvaessaan tai esimerkiksi voimakkaiden luonnonilmiöiden ja lumikuorman takia kaatuessaan tai taipuessaan aiheuttaa riskiä sähkönjakelulle. Vierimetsän vaarallisten puiden kaataminen tapahtuu johtokadun raivauksen yhteydessä tai kunnossapitotarkastusten pohjalta. Tarkastusten välillä on keskimäärin kuuden vuoden väli, minkä seurauksena osa tapauksista voi jäädä tunnistamatta. Tästä syystä systemaattinen ja säännöllinen tapa vaarallisten puiden,



vierimetsän muutosten ja kasvillisuusrisikin havainnointiin riittävän aikaisessa vaiheessa lisäisi verkon toimintavarmuutta ja vähentäisi kasvillisuuden aiheuttamaa riskiä.

Jakeluverkon läheisyydessä tehtävät avohakkuut voivat joissain tapauksissa muodostaa riskin ilmajohtoverkolle. Jos avohakkuussa johtokadun ja hakkuuaukean väliin jätetään yksittäisiä puita, muodostavat nämä puut kohonneen riskin ilmajohtoille. Riski puiden kaatumisesta sähkölinjan päälle on kohonnut, sillä aukean reunalle jääneet yksittäiset puut ovat alttiimpia tuulelle kuin samat puut tiiviin metsäalueen reunalla. Koska avohakkuut ovat pääosin metsäomistajien omillaan alueillaan itsenäisesti suorittamia, ei verkkoyhtiöillä useinkaan ole tietoa kaikista verkon läheisyydessä tehdyistä avohakkuista. Nykyisellään tällaisten riskin muodostavien avohakkuiden havaitsemiseen ei ole käytössä systemaattista tapaa, vaan ne havaitaan verkon tarkastusten ja kunnossapitotöiden yhteydessä tai pahimmassa tapauksessa vasta vahingon jo tapahduttua. Tästä syystä systemaattinen ja riittävän usein toteutettava tapa riskin muodostavien avohakkuiden tunnistamiseen lisäisi jakeluverkon toimintavarmuutta ja turvallisuutta.

4.2 Ulkopuolisen toiminnan muodostama riski verkolle

Luonnonilmiöiden ohella myös ihmisen toiminta voi muodostaa riskin keskeytyksettömälle sähkönjakelulle tai vaarantaa sähköturvallisuuden. Tällaisissa tapauksissa puhutaan usein ulkopuolisen toiminnan muodostamasta riskistä sekä ilmajohto- että maakaapeliverkolle. Käytännön esimerkkejä tällaisesta toiminnasta ovat erilaiset vieraat esineet, rakennelmat tai muu toiminta verkon välittömässä läheisyydessä. Esimerkkejä mahdollisista esineistä, jotka voisivat aiheuttaa riskiä verkolle ovat puutavaran varastointi, linjojen alle pysäköidyt ajoneuvot, erilaiset rakennelmat sekä luvattomat uudet rakennukset. Lisäksi verkolle uhkaa voivat aiheuttaa muutokset ympäristössä sekä verkon välittömään läheisyyteen ilmestyvät työmaat, hakkuuaukeat, kaivutyöt tai uudet tiet. Edellä mainitun kaltainen toiminta on useimmiten luvatonta, eikä verkon omistajilla ole useinkaan tietoa näistä. Nykyisessä



maailmantilanteessa myös infraa kohtaan tahallisesti aiheutettujen häiriötilanteiden riskinhallinta voi nousta merkittävämmäksi skenaarioksi tulevaisuudessa.

4.3 Tilannekuvan muodostaminen suurhäiriötilanteessa

Sähkönjakelun suurhäiriöiden pääasiallisia aiheuttajia ovat voimakkaat luonnonilmiöt, kuten myrskyt, ukkonen ja talven lumikuormat. Tällaisissa tilanteissa esimerkiksi kaatuneet puut ja voimakkaan tuulen takia lentävät oksat vaurioittavat ilmajohtoverkkoa aiheuttaen katkoksia sähkönjakelussa. Sähkönjakelun suurhäiriötilanteessa sähköttömien asiakkaiden määrää nousee vikojen seuraksensa suureksi laajoilla alueilla. Suurhäiriötilanteesta palautuminen vaatii nopeaa ja merkittävää resurssien käyttöä, mikä poikkeaa selkeästi verkkoyhtiöiden normaalitoiminnasta. Suurhäiriötilanteessa verkkoyhtiöt pyrkivät mahdollisimman nopeaan tilannekuvan muodostamiseen, minkä jälkeen on mahdollista suunnitella ja toteuttaa verkon viankorjaukset ja näin ollen palauttaa verkon toiminta normaaliksi.

Tilannekuvan muodostamiseen olennaisena osana kuuluu verkon vikapaikkojen paikantaminen. Keskijänniteverkon osalta vikaantuneet kohteet kytetään useimmissa tapauksissa käyttökeskuksessa rajaamaan johtolähtöjen tarkkuudella pienemmille verkkoalueille. Pienjänniteverkon osalta tiedot sähköttömistä kohteista saadaan etäluettavien mittareiden ja/tai asiakasilmoitusten perusteella. Kummassakaan tapauksessa ei automaattisesti päästä kiinni tuhojen todelliseen laajuuteen, korjaustarpeeseen tai vian aiheuttajaan. Nämä tiedot ovat olennaisessa asemassa, kun vikoja lähdetään korjaamaan. Tämän seurauksena tarkan vikapaikan, vahinkojen laajuuden ja vian aiheuttajan määrittäminen vaatii useissa tilanteissa visuaalista havaintoa kohteesta ja sen aiheuttajasta. Käytännössä tämä tarkoittaa joko käyntiä vikapaikalla tai ilmasta käsin tapahtuvaa vikapaikkojen tunnistusta.

Akuutin viankorjauksen jälkeen haasteen muodostavat piilevät ongelmat, jotka voivat pahentua viaksi. Usein syynä ovat kaatumaisillaan olevat tai päällystettyyn johtoon nojaavat puut, joista ei saada tietoa muuten kuin paikan päällä käymällä. Pahimmillaan



tämä voi vaatia laajojen verkostoalueiden tarkastamista akuuttien vikojen korjauksen jälkeen.



5 NYKYISET MENETELMÄT

5.1 Verkon kunto- ja kasvillisuustarkastukset

Nykyisellään verkon kunto- ja kasvillisuustarkastukset suoritetaan lähes poikkeuksetta kahdella tarkastusmenetelmällä, eli maasta sekä ilmasta käsin tehtävillä tarkastuksilla. Molempia tarkastusmenetelmiä käytetään rinnakkain täydentämään toisiaan, jolloin tarkastukset ovat sisällöltään ja tarkastuskohteiltaan hieman toisistaan poikkeavat.

Maasta käsin tehtävät tarkastukset

Maasta käsin tehtävät tarkastukset toteutetaan kävelemällä johtokatua pitkin. Verkon kuntohavainnot perustuvat tarkastajan suorittamaan visuaaliseen tarkasteluun. Tarkastusten tarkka sisältö vaihtelee hieman verkkoyhtiöittäin, mutta maastotarkastusten ensisijaisena tavoitteena on torjua turvallisuuteen ja toimintavarmuuteen liittyviä riskejä. Tarkastusten kohteena ovat erityisesti verkon komponentit ja niiden kunto. Lisäksi kasvillisuusriskien arviointi kuuluu osaksi tarkastuksia, mutta niiden osuus tarkastusten sisällöstä on selvästi pienempi. Tarkastukset perustuvat verkonhaltijan lakisääteiseen velvollisuuteen varmistaa sähkölaitteiden turvallisuus. Taulukkoon 3 on kerätty jalkaisin tehtäviin tarkastuksiin liittyviä tunnuslukuja. Luvut pohjautuvat osana projektia toteutetun kyselyn vastauksiin.

Taulukko 3. Maasta käsin tehtävät tarkastukset tunnusluvut.

Kustannus	100–200 €/km
Tarkastusnopeus	0,5–2 km/h
Tarkastusväli	6 vuotta
Torjuttavat riskit	1. Sähköturvallisuuden varmistaminen työntekijöille ja maallikoille 2. Keskeytyksettömän sähkönsiirron varmistaminen

Maasta käsin tehtävien tarkastusten nopeus on voimakkaasti riippuvainen maasto-olosuhteista. Erittäin vaikeakulkuisessa maastossa tarkastusnopeus voi jäädä taulukossa esitettyyn 0,5 kilometriin tunnissa, kun taas tasaisessa helppokulkuisessa maastossa voidaan päästä moninkertaisiin nopeuksiin. Maaston ohella myös tarkastusten sisällössä ja laajuudessa voi olla eroja eri toimijoiden kesken, mikä luonnollisesti vaikuttaa tarkastusten keston. Myös verkon ikä ja yleinen kunto vaikuttavat tarkastusten keston. Koska maastotarkastukset perustuvat vahvasti ihmisen tekemään työhön, ovat tarkastusten kustannukset suoraan verrannollisia tarkastusnopeuteen. Kyselyn vastauksissa kilometrikustannuksen arvioitiin olevan 100–200 euron välillä.

Tarkastukset toistetaan säännöllisin väliajoin sekä PJ- että KJ-verkolle. Kyselyn vastausten perusteella maasta käsin tehtävät verkon kunto- ja kasvillisuustarkastukset toistetaan PJ- ja KJ-verkolle keskimäärin kuuden vuoden välein.

Helikopterilla ilmasta käsin tehtävät tarkastukset

Helikopterilla toteutettavat lentotarkastukset ovat maasta käsin tehtävien tarkastusten ohella toinen laajalti käytössä oleva menetelmä jakeluverkon määräaika- ja kunnossapitotarkastusten tekemiseen. Kuten maasta käsin tehtävien tarkastusten tapauksessa, myös ilmasta tehtävillä tarkastuksilla pyritään hallitsemaan verkon turvallisuuteen ja käyttövarmuuteen liittyviä riskejä. Taulukkoon 4 on koottu helikopteritarkastusten tunnuslukuja. Myös nämä luvut pohjautuvat osana projektia toteutetun kyselyn vastauksiin.

Taulukko 4. Helikopteritarkastusten tunnusluvut.

Kustannus	35–110 €/km (sisältää aineiston keruun ja analysoinnin)
Tarkastusnopeus	40–80 km/h
Tarkastusväli	2–12 vuotta
Torjuttavat riskit	1. Sähköturvallisuuden varmistaminen työntekijöille ja maallikoille 2. Keskeytyksettömän sähkönsiirron varmistaminen

Helikopterilla toteutettavat lentotarkastukset toteutetaan lentäen matalalla lentokorkeudella linjojen suuntaisesti. Vaikka tarkastukset toteutetaan ilmasta käsin, on tarkastusnopeudessa jonkin verran vaihtelua riippuen maastosta, verkon rakenteesta ja verkon lähellä olevasta asutuksesta. Lisäksi tarkastusten sisältö ja käytettävät havaintolaitteet vaikuttavat jonkin verran nopeuteen. Kyselyn vastausten perusteella tarkastusnopeudeksi arvioitiin 40–80 km/h.

Helikopteritarkastuksen kustannukset määräytyvät suurelta osin tarkastusten sisällön ja aineiston keruutavan mukaan. Lentotarkastukset perustuvat pääosin havaintolaitteiden keräämään aineistoon, jonka hyödyntäminen vaatii myös havaintoaineiston tulkinna ja analysoinnin. Yleisimpiä havaintojen keräysmenetelmiä ovat valo-/videokuvaus sekä laserkeilaus. Kyselyn vastauksissa arvioitiin kustannusten olevan 35–110 euron välillä tarkastettua verkkokilometriä kohden. Kustannus kattoi yleisimmin palvelun, joka sisälsi laserkeilauspohjaisen kasvillisuusanalyysin sekä valokuva-aineiston verkon kriittisistä komponenteista.

Helikopterilla tehtäviä lentotarkastuksia toteutetaan säännöllisesti KJ-verkolle. PJ-verkon osalta lentotarkastuksia ei useimmissa tapauksissa käytetä. Maastotarkastuksista poiketen lentotarkastusten tarkastusvälissä on selvästi enemmän vaihtelua eri yhtiöiden välillä. Kyselyn vastausten perusteella tarkastusväli vaihtelee yhtiöittäin 2:sta 12:een vuoteen. Monissa tapauksissa KJ-verkon osalta vuorotellaan maasto- ja lentotarkastusten välillä, jolloin tarkastukset suoritetaan 6 vuoden välein joka toinen ilmasta ja joka toinen maasta.

Modernin kuvausteknologian ja kuvakulman ansiosta helikopterista otetusta valokuva-aineistosta kyetään tunnistamaan sellaisia yksityiskohtia, joita ei ole mahdollista tarkastaa maasta käsin. Laserkeilausaineisto taas mahdollistaa erittäin tarkan havaintomateriaalin muodostamisen esimerkiksi kasvillisuudesta ja rakennuksista sekä niiden etäisyyksistä verkon komponentteihin. Tästä syystä laserkeilausta hyödynnetään erityisesti kasvillisuushavaintojen tekemiseen. Lisäksi lentotarkastusten etuna esimerkiksi maastotarkastuksiin verrattuna on se, että kerätty kuva- ja

laserkeilausaineisto jää verkon omistajan haltuun, jolloin sitä on mahdollista hyödyntää myös muihin käyttötarkoituksiin.

Droonit ja muut UAV-laitteet

Viime vuosien aikana on ollut jonkin verran tutkimushankkeita, uutisointeja ja erilaisia pilotointeja miehittämättömien ilma-alusten käytöstä sähköverkkojen tarkastuksissa. Koska kyseessä on varsin tuore menetelmä, halusimme toteuttamassamme kyselyssä selvittää, onko drooneja tai mahdollisesti muita UAV-laitteita otettu operatiiviseen käyttöön verkon kunto- ja kasvillisuustarkastuksissa. Saamiemme vastausten perusteella tällaisia miehittämättömiä ilma-aluksia ei vielä nykyisellään ole laajamittaisessa operatiivisessa käytössä. Vastauksista selvisi, että esimerkiksi droonien käyttöön liittyen on tehty joitain pilotointeja, mutta laajamittaiseen käyttöön niitä ei vielä tähän mennessä ole otettu.

5.2 Verkkoa uhkaava ulkopuolinen toiminta

Verkkoa uhkaavien ulkopuolisten riskien havaitseminen vaatii verkon jatkuvaa valvontaa. Kyselyn avulla selvitimme keinoja, joilla jakeluverkkoyhtiöt valvovat omia verkkoalueitaan. Vastauksissa todettiin, että tällä hetkellä käytössä ei ole systemaattista tapaa kerätä tietoa ulkopuolisen toiminnan muodostamista riskeistä. Nykyisellään tietoa mahdollisista riskeistä saadaan satunnaisten ilmoitusten perusteella tai niitä huomataan muiden verkkoon liittyvien kunnossapitotöiden yhteydessä. Ilmoitukset koostuvat pääosin maallikkojen sekä verkon parissa työskentelevien urakoitsijoiden havaitsemista riskikohteista. Ulkopuolisilta tulevat ilmoitukset on lähes poikkeuksetta käytävä tarkistamassa paikan päällä. Verkon kuntotarkastukset ovat ainoa käytössä oleva menetelmä, jossa verkolle tehdään laajamittaisia ja systemaattisia tarkastuksia. Sitä ei kuitenkaan voida pitää erityisen nopeana tai tehokkaana tapana havaita akuutteja riskitilanteita, sillä tarkastusväli on useimmiten useampia vuosia.



5.3 Tilannekuva myrskyssä ja myrskyn jälkeen

Tilannekuvan muodostamisessa tärkeää on muodostaa mahdollisimman tarkka kuva vahinkojen laajuudesta, vioittuneista kohteista sekä vian aiheuttajista. Verkkoyhtiöt saavat tiedon vikaantuneista johtolähdöistä, mutta vahinkojen todellinen laajuus täytyy käydä toteamassa paikan päällä. Nykyiset vikakohteiden todentamiseen käytössä olevat menetelmät voidaan kategorisesti jakaa maasta ja ilmasta käsin tehtävään vikapaikkojen tunnistamiseen.

Maasta käsin tapahtuvan vikapaikkojen tunnistaminen

Perinteisesti vahingot on kartoitettu maastossa paikan päällä. Kyselyn vastauksissa todettiin, että vikapaikkojen paikannuksessa hyödynnetään mahdollisuuksien mukaan erilaisia kulkuneuvoja sekä jalkaisin partiointia. Käytössä on esimerkiksi autoja, mönkijöitä sekä moottorikelkkoja maaston sekä vallitsevien olosuhteiden ja vuodenajan mukaan.

Maasta käsin tapahtuvassa vikapaikkojen tunnistamisessa vasteaika on yleensä varsin lyhyt, vaikkakin ajoissa on erittäin suurta vaihtelua tapauskohtaisesti. Parhaassa tapauksessa kohteeseen päästään lähtemään välittömästi, kun tieto mahdollisesta viasta on saatu. Kohteeseen siirtymisen kuluva aika on kuitenkin vahvasti riippuvainen etäisyyksistä, maastosta sekä käytettävissä olevan henkilöstön määrästä. Lisäksi suurhäiriötilanteessa vikapaikkoja voidaan joutua priorisoimaan. Kyselyn vastauksissa todettiin, että yksittäisten vikojen osalta vasteaika on noin 0–5 tunnin luokkaa.

Yksittäistapauksissa ja suurhäiriötilanteessa vasteaika voi venyä merkittävästi tätä pidemmäksi, koska voimakkaiden myrskyjen aikaan maastossa liikkuminen voi olla vaarallista. Useimmissa matalapainemyrskyissä vikojen rajausta voidaan kuitenkin tehdä myrskyn aikana, mutta varsinaisen vian korjaamistyön aloittamisessa voidaan joutua odottamaan pahimpien puuskien laantumista. Lisäksi vasteaikaan voi vaikuttaa voimakkaiden syöksyvirtausten aiheuttama paikallinen runsas puiden kaatuminen teille, mikä hidastaa ja vaikeuttaa kohteeseen pääsemistä. Näin voimakkaat luonnonilmiöt ovat



kuitenkin harvinaisia ja yleensä puiden teille kaatuminen on niin harvinaista ja vähäistä, että se ei juurikaan viivästytä kohteeseen pääsemistä.

Laajojen vahinkojen kartoittamiseen menetelmä on varsin hidas. Maastossa jalkaisin liikuttaessa päästään vallitsevien olosuhteitten mukaan vain muutaman kilometrin tuntinopeuksiin. Mönkijän tai muun maastoon sopivan ajoneuvon avulla tarkastusnopeus voi nousta noin 10–15 km/h luokkaan. Paras tilanne on kuitenkin autoteiden vieressä kulkevilla ilmajohdoilla, jotka on mahdollista tarkastaa hyödyntäen esimerkiksi henkilöautoa. Ilman teille kaatuneita puita tällaisissa tilanteissa tarkastusnopeus voi nousta luokkaan 30–50 km/h.

Ilmasta käsin tapahtuva vikapaikkojen tunnistaminen

Lentotarkastukset ovat laajalti käytössä oleva menetelmä suurhäiriötilanteiden jälkeiseen tilannekuvan muodostamiseen. Ilmasta käsin on mahdollista muodostaa tilannekuva laajoilta alueilta varsin nopeasti. Lisäksi lentotarkastuksia käytetään tarkempaan vikapaikkojen paikantamiseen ilmajohtoverkossa. Lentotarkastukset toteutetaan pääosin helikopterista käsin tehtyjen näköhavaintojen perusteella.

Verkkoyhtiöillä ei ole käytössään omia helikoptereita, vaan niiden käyttö ostetaan palveluna ulkopuoliselta toimijalta. Koska kalusto ei ole omaa, liittyy ulkopuolisen palvelun käyttöön riski siitä, että helikoptereita ei ole saatavilla aina oman tarpeen mukaan. Tästä syystä verkkoyhtiöt ovat pyrkineet varmistamaan helikopterien saatavuuden sopimusten avulla. Verkon laajuuden mukaan sopimus voidaan tehdä myös useammasta helikopterista. Kyselyyn vastanneiden yhtiöiden osalta käytössä olevien helikoptereiden määrä vaihteli yhden ja viiden välillä.

Helikoptereiden käyttöön liittyy keliolosuhteisiin liittyviä rajoitteita. Kyselyn vastauksissa esiin nousivat säähän liittyen voimakas tuuli sekä lentämisen estävät jäätävät olosuhteet. Lisäksi myös esimerkiksi sumusta tai pimeydestä johtuva heikko näkyvyys voi estää helikoptereiden käytön.



Taulukko 5. Tilannekuvan muodostaminen myrskyssä tai myrskyn jälkeen, helikoptereiden käyttöön liittyviä tunnuslukuja.

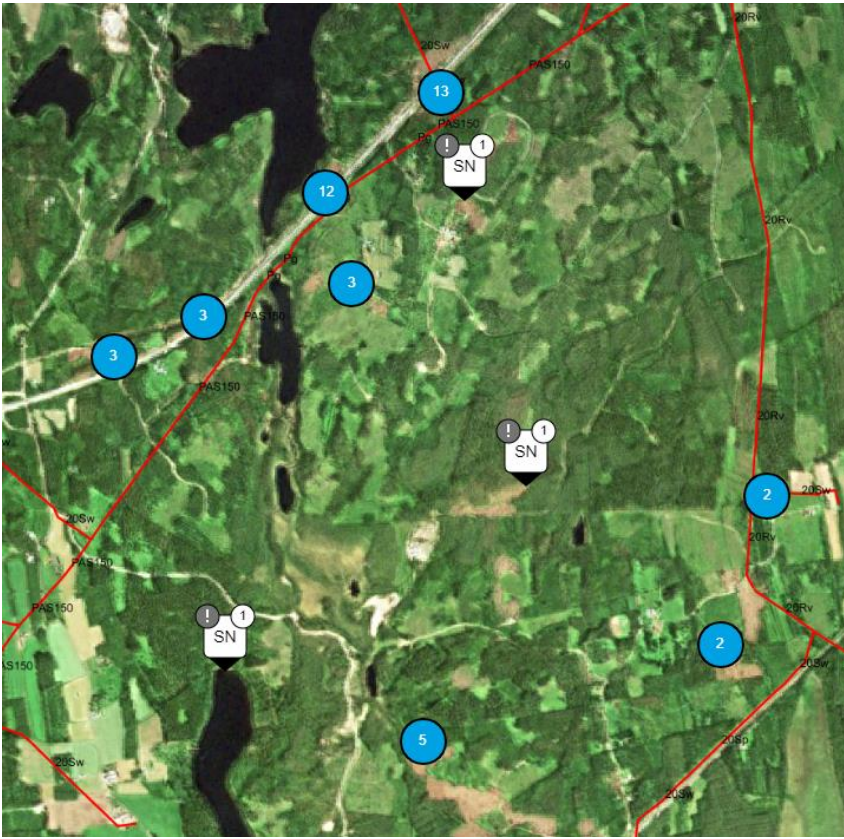
Kustannus	10–50 €/km
Tarkastusnopeus	50–100 km/h
Vasteaika	1–24 tuntia
Käyttöön liittyvät rajoitteet	1. Vaikeat olosuhteet: heikko näkyvyys, pimeys, voimakas tuuli ja jäätävät olosuhteet 2. Konekapasiteetin rajallisuus

Kyselyn vastausten perusteella droonien ja muiden UAV-laitteiden osalta tilanne on vastaava kuin verkon kunto- ja kasvillisuustarkastuksissa. Muutamalla yhtiöllä laitteita on ollut pienimuotoisessa käytössä tai kokeilussa, mutta tätä laajempaan käyttöön menetelmä ei ole tähän mennessä levinnyt.

6 SATELLIITTIDATAAN POHJAUTUVAT MENETELMÄT

Tutkimushankkeen lähtökohtana oli löytää satelliittidataan perustuvia työkaluja, joiden avulla on mahdollista tunnistaa erilaisia kasvillisuuden sekä ihmisten tekemien muutosten aiheuttamia riskejä. Kuvassa 5 on havainnollistettu sitä, miten tunnistetut riskikohteet on mahdollista esittää kartalla yhdessä verkkotiedon kanssa. Erilaisten riskien tunnistamisen lisäksi hankkeen aikana tutkittiin SAR-tutkadatan tarjoamia mahdollisuuksia myrskyn aikaiseen ja sen jälkeiseen tilannekuvan määrittämiseen. Tämän kappaleen aikana tarkemmin tarkasteltavat teemat ja riskikohteet ovat seuraavat:

- Infrastruktuuririskien hallinta
 - Verkon läheisyydessä tapahtuvien muutosten tunnistaminen
- Kasvillisuuden hallinta
 - Kasvillisuuden indeksointi: hoitotarpeen määrittäminen ja tehtyjen raivausten todentaminen
 - Avohakkuiden tunnistaminen
- Suurhäiriötilanteen hallinta
 - SAR-tutkadatan hyödyntäminen



Kuva 5. Satelliittiaineiston avulla tunnistetut riskikohteet on esitetty kartalla. Kuvassa on esitetty ainoastaan keskijänniteverkko, ja verkosta etäällä olevat havainnot ovat pienjänniteverkkoon liittyviä kohteita.

6.1 Infrastruktuuririskien hallinta

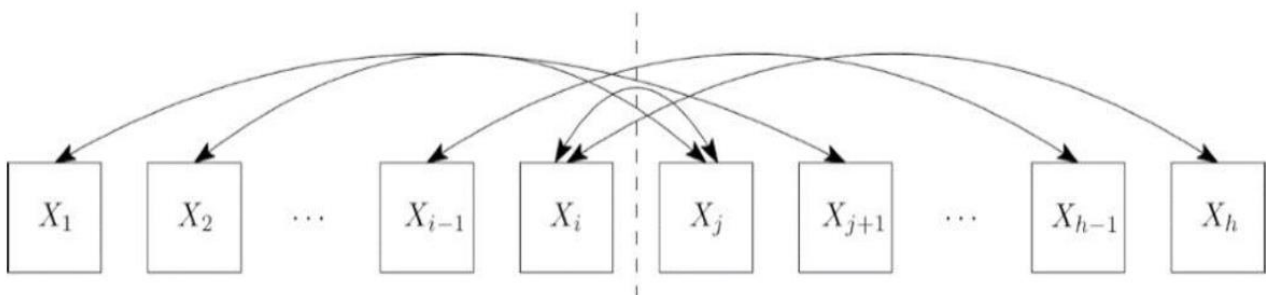
Infrastruktuuririskien hallinta perustuu muutostulkintaan, joka tunnistaa erilaisia pääosin ihmisten tekemiä muutoksia sähköverkon läheisyydessä. Muutostulkinnan avulla on mahdollista tunnistaa muun muassa kaivutöitä, rakentamista, työmaita, uusia rakennelmia tai muita ei toivottuja toimintoja verkon alueella. Verkon läheisyyteen ilmestyneiden uusien objektien lisäksi muutostulkinnan avulla on mahdollista tunnistaa myös kasvillisuudessa tapahtuvia muutoksia, kuten linjojen raivaukset, hakkuut tai muut maapinta-alla tapahtuvat muutokset.

Muutostulkintamenetelmä

Hankkeen aikana kehitetyn muutostulkintamenetelmän tarkoituksena on tunnistaa ennakkoon määritellyllä alueella tapahtuvia muutoksia. Analyysissä algoritmi hyödyntää useita datapisteitä ja aikasarjoja analysoimaan alueella tapahtuvia muutoksia. Kuvassa 6 on havainnollistettu muutostulkinta-algoritmin toimintaperiaatetta. Analyysin tekeminen vaatii vähintään kaksi kuvaa samasta kohteesta, jolloin kuvien ottohetken välillä tapahtuneita muutoksia on mahdollista tunnistaa. Käytännössä tunnistettavat muutokset voivat olla erilaisia värityksessä sekä muodoissa tapahtuvia eroavaisuuksia, joita on ilmestynyt analysoitavaan kuva-aineistoon kuvien ottohetken välillä. Pelkän muutosten havaitsemisen lisäksi algoritmi osaa tunnistaa ja luokitella muutokset niiden tyyppin mukaan.

Muutostulkintaprosessi etenee seuraavasti:

1. Kuvien automaattinen haku eri palveluista
2. Kuvien automaattinen yhdenmukaistaminen, skaalaus, kohdistaminen, pilvien & varjojen hallinta
3. Aikasarjan kuvien analysointi



Kuva 6. Muutostulkinnan toimintaperiaate.

Muutostulkinta-algoritmi on tekoälyyn pohjautuva, joten se on mahdollista opettaa havaitsemaan vääriä indikaatioita, kuten vuodenaikojen vaihteluista tai varjojen muutoksista johtuvia havaintoja. Edellä mainittujen tekijöiden aiheuttamia "vääriä havaintoja" on mahdollista vähentää käyttämällä kuvasarjoja, joissa on useita kuvia



samasta kohteesta. Tällaisten useiden kuvien kuvasarjojen ansiosta on mahdollista välttää esimerkiksi valosta johtuvia värimuutoksia, jotka saatettaisiin kahden kuvan muutostulkinnassa luokitella muutokseksi.

Muutostulkintaan liittyy myös tiettyjä rajoitteita. Koska tulkinta aikasarjakuvien välillä tapahtuviin muutoksiin väreissä ja muodoissa, ei analyysi kykene tunnistamaan muutoksia esimerkiksi kesäkuvien ja lumisten talvikuvien välillä.

Käytetty satelliittiaineisto ja sen tarkkuus vaikuttaa siihen, minkä kokoisia objekteja kuvista on mahdollista havaita. Avoin satelliittiaineisto mahdollistaa pinta-alaltaan suurten muutosten, kuten avohakkuiden tunnistamisen. HR-aineistoon pohjautuen kyetään havaitsemaan keskimäärin noin omakotitalon kokoisia kohteita. VHR-laatusella aineistolla on mahdollista havaita henkilöauton kokoluokassa olevia kohteita. Edellä esitetyt kokoluokat ovat suuntaa antavia ja joissain tapauksissa myös näitä pienempiä kohteita voi olla mahdollista havaita. Pelkän objektin koon lisäksi havaittavuuteen vaikuttavat esimerkiksi tarkasteltavan kohteen väri sekä auringonvalon suunta, joka vaikuttaa etenkin varjojen muodostumiseen.



Kuva 7. Esimerkki muutostulkinta-algoritmin havaitsemista muutoksista.

Muutostulkinnan tuloksia infrastruktuuririskien hallinnassa

Hankkeen aikana muutostulkintaa pilotoitiin yhteensä viiden jakeluverkkoyhtiön alueella. Muutostulkintaa toteutettiin sekä HR- että VHR-tasoisella satelliittiaineistolla.

HR-aineistolla tulkintaa tehtiin yhteensä 4300 kilometriä kattavalle verkkoalueelle. VHR-aineistolla vastaavaa tulkintaa tehtiin 900 verkkokilometrille. Lisäksi avoimella satelliittiaineistolla tulkintaa toteutettiin avohakkuiden osalta ja sen tulokset on esitetty kappaleessa 6.2. Hankkeen aikana muutostulkintaa toteutettiin kaksi havaintokierrosta, joista molemmista toimitettiin pilottikäyttäjille uudet havainnot. Havaintokierrosten välillä muutostulkinta-algoritmiin tehtiin hienosäätöä käyttäjien antaman palautteen pohjalta.

Pilotoinnin aikana saadut tulokset infrastruktuuririskien tunnistamisen osalta olivat rohkaisevia. Hankkeen aikana tunnistettiin yhteensä noin 800 erilaista muutosta, joita pilottikäyttäjät pääsivät tarkastelemaan. Taulukossa 6 on esitetty tarkemmin, miten hyvin algoritmi on kyennyt tunnistamaan muutoksia eri havaintokategorioissa. Osumatarkkuus ja taulukossa esitetyt prosentit perustuvat pilottikäyttäjien tekemään luokitteluun havaintojen paikkansapitävyydestä. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että algoritmin ilmoittaessa muutoksesta kyseessä oli aina muutos, mutta havaintotyyppien luokittelussa oli enemmän haasteita.

Taulukko 6. Tutkimushankkeessa pilotoidun muutostulkinnan osumatarkkuus havaintotyypeittäin. Luokitellut havainnot tarkoittavat pilottikäyttäjien läpikäymiä ja tarkastamia havaintoja. Varmistettu oikeaksi kuvaa sitä osuutta luokitelluista havainnoista, jotka on todettu pilottikäyttäjien toimesta aiheelliseksi.

Havaintotyyppi	HR-aineisto		VHR-aineisto		Yhteensä	
	Luokitellut havainnot	Varmistettu oikeaksi	Luokitellut havainnot	Varmistettu oikeaksi	Luokitellut havainnot	Varmistettu oikeaksi
Rakennustyömaa	52	71 %	42	81 %	94	76 %
Avohakkuu	45	76 %	12	17 %	57	63 %
Uusi rakennus	14	86 %	33	100 %	47	96 %
Harvennus	8	75 %			8	75 %
Uusi objekti	2	100 %	6	83 %	8	88 %
Uusi tie	3	33 %	4	100 %	7	71 %
Raivaus	2	100 %	1	100 %	3	100 %
Poistunut rakennus			2	100 %	2	100 %
Yhteensä	126	75 %	100	81 %	226	77 %



Saatujen tulosten osalta voidaan todeta, että parhaat tulokset saatiin havaitsemalla fyysisiä objekteja, kuten rakennuksia, rakennelmia tai esineitä, ja niissä tapahtuvia muutoksia. Lisäksi ihmisten maastoon tekemät muutostyöt, esimerkiksi hakkuut, raivaukset ja maarakennustyöt, kyettiin tunnistamaan luotettavasti. Toisaalta osassa havaintoluokista tapausten määrä on verrattain pieni, minkä seurauksena eteenkin kyseisten havaintotyyppien tuloksiin tulee suhtautua pienin varauksin.

Saavutettujen tulosten osalta on tärkeää ymmärtää, että muutosten havaitseminen on usein kompromissi suuren havaintojen määrän ja oikeiden havaintojen välillä. Havaintojen määrää on mahdollista lisätä keventämällä kriteerejä, joiden pohjalta havainto muodostetaan. Näin toimittaessa myös väärin havaintojen määrä kasvaa. Samaan tapaan tiukentamalla seulaa voidaan parantaa muutostulkinnan osumatarkkuutta, mutta samalla riskin muodostavia kohteita voi jäädä huomaamatta. Tätä asiaa sivuttiin muutamia kertoja pilottikäyttäjien sekä tämän osaprojektin ohjausryhmän kanssa käydyissä keskusteluissa. Yleinen näkemys oli, että kohtuullinen määrä ylimääräisiä havaintoja on parempi kuin tilanne, jossa olennaisia muutoksia jää havaitsematta. Saavutettuja tulostasoja pidettiin yleisesti ottaen hyvänä.

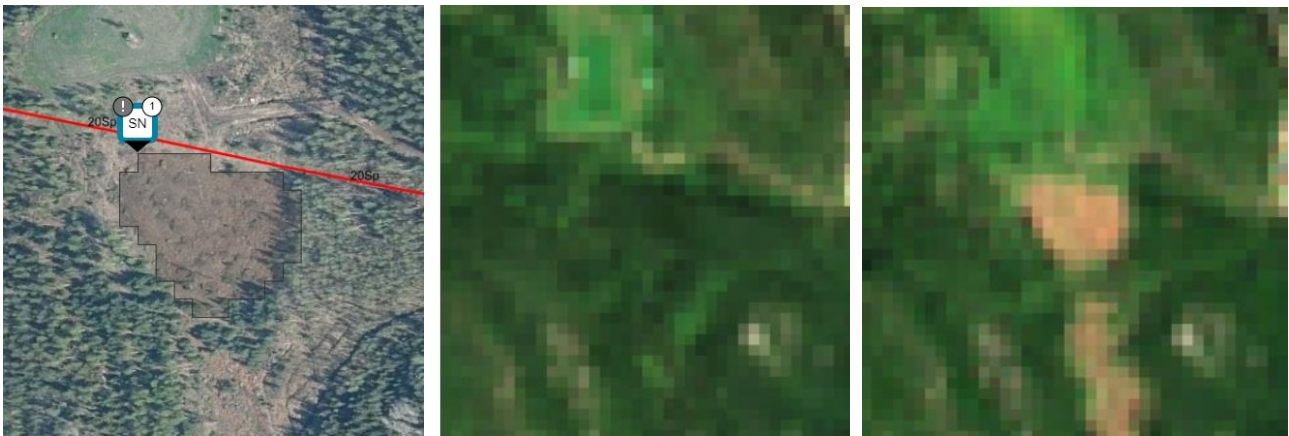
Muutostulkinnan tuloksien osalta on syytä muistaa, että muutostulkinta-algoritmi on osittain itseoppivaa. Tämä tarkoittaa, että lisäämällä kuvien lukumäärää aikasarjoissa sekä tuottamalla tekoälylle lisää oppimisdataa, on vastaavalla menetelmällä mahdollista saada tulevaisuudessa nykyistä parempia tuloksia. Osoituksena tästä toimii hankkeen aikana saatujen tulosten vertailu kahden havaintokierroksen välillä. Ensimmäiseen havaintokierrokseen verrattuna oikeaksi varmistettuja havaintojen määrä kaikista luokitelluista HR- ja VHR-tasoisista havainnoista parani 19 prosenttiyksikköä. Tässä vertailussa luokiteltujen havaintojen määrä oli ensimmäisellä kierroksella 121 ja toisella 105, joten tulosta voidaan pitää tilastolliselta merkitsevyydeltään vähintäänkin suuntaa antavana.



6.2 Kasvillisuuden hallinta

Linjan lähellä tapahtuvien avohakkuiden tunnistaminen (muutostulkinta)

Hankkeen aikana avohakkuiden tunnistamista pilotoitiin yhteensä viiden jakeluverkkoyhtiön alueella, joka kattoi kaikkiaan 95 000 verkkokilometriä. Hakkuiden tunnistaminen perustui perusrakenteeltaan samaan muutostulkinta-algoritmiin, jota hyödynnettiin myös infrastruktuuririskien hallinnassa, mutta avohakkuiden tunnistamisessa hyödynnettiin avoimen satelliittiaineiston mahdollistamia pidempiä aikasarjoja. Avoimen aineiston hyödyntäminen oli mahdollista, koska avohakkuiden tapauksissa muutokset ovat pinta-alaltaan suuria.



Kuva 8. Esimerkki avoimen satelliittiaineiston pohjalta tehdystä avohakkuuhavainnosta.

Pilotoinnin aikana saadut tulokset avohakkuiden tunnistamisen osalta olivat rohkaisevia. Hankkeen aikana tunnistettiin kaikkiaan hieman yli 1800 avoimeen aineiston perustuvaa avohakkuutapausta. Pilottikäyttäjien läpikäymistä avohakkuuhavainnoista 80 % todettiin aiheellisiksi. Tulokset on esitetty myös taulukossa 7.

Taulukko 7. Tulokset avohakkuiden tunnistamisesta avoimen satelliittiaineiston pohjalta.

Havaintotyyppi	Luokitellut havainnot	Varmistettu oikeaksi
Avohakkuu	310	80 %



Merkittävä osa tarpeettomista havainnoista oli liian etäällä verkosta olevia kohteita, joissa muutos oli tulkittu oikein, mutta etäisyyden takia ne eivät muodostaneet uhkaa verkolle. Lisäksi palautteen perusteella virheellisiä havaintoja aiheuttivat värivirheitä sisältävät kuvat, jotka olivat päässeet prosessoinnin läpi. Kuvassa 9 havainnollistettu mahdollisia virrehavaintojen aiheuttajia. Virheellisten havaintojen osalta on kuitenkin syytä muistaa, että tekoälypohjainen tulkinta on päätetty kompromissi, jossa tietty määrä virheellisiä havaintoja on parempi kuin useat tunnistamatta jääneet aiheelliset tapahtumat.



Kuva 9. Havainnollistavat esimerkit mahdollisista virrehavaintojen aiheuttajista. Vasemmanpuoleisessa kuvassa keskellä nähtävissä pilvien muodostamia valkoisia alueita, jotka on tulkittu virheellisesti muutokseksi ympäristössä. Oikeanpuoleisessa kuvassa voimakkaiden varjojen aiheuttamat mustat alueet ovat aiheuttaneet virrehavainnon.

Tarpeettomista havainnoista sekä etäällä verkostosta olevat kohteet että algoritmin tekemät virhetulkinnat liittyvät uuden palvelun rakentamiseen liittyvän kehitystyöhön ja oikeiden parametrien säätämiseen. Tästä syystä itse algoritmin kykyä ja tarkkuutta tunnistaa avohakkuita oikein voidaan perustellusti pitää vielä nyt saavutettua 80 %:a



korkeampana. Kehitys on näkynyt jo hankkeen aikana, ja tulokset ovat parantuneet huomattavasti kahden havaintokierroksen välillä, kuten taulukosta 8 voidaan havaita.

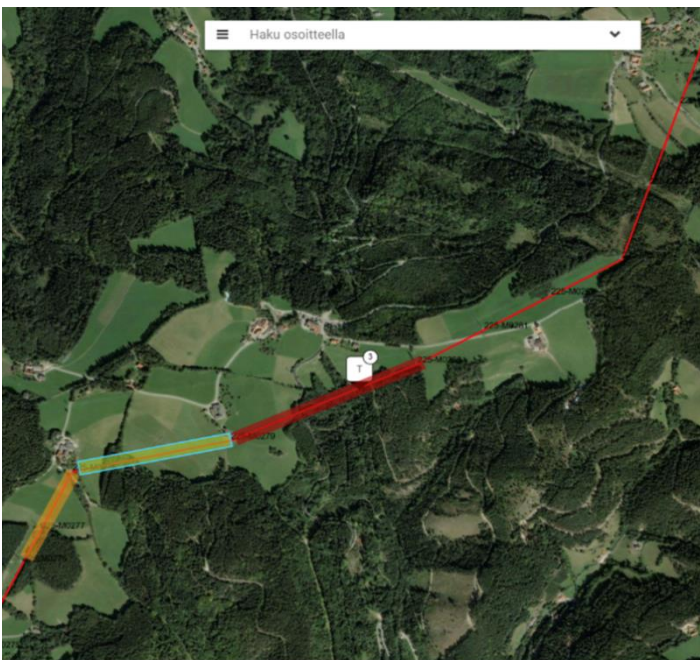
Taulukko 8. Avohakkuuhavaintojen tunnistamisen kehittyminen projektin aikana.

	2021		2022		Muutos 2021-> 2022
	Varmistettu oikeaksi	Luokitellut havainnot	Varmistettu oikeaksi	Luokitellut havainnot	
Avohakkuu	77 %	198	86 %	112	8 %



Kasvillisuuden indeksointi

Hankkeen aikana kasvillisuuden indeksointia pilotoitiin Suomessa viiden jakeluverkkoyhtiön alueella, joista kahden alueella toteutettiin tarkempaa tutkimusta kasvillisuusindeksin hyödyntämismahdollisuuksista. Tarkemman tutkimuksen kohteena oli avoimeen satelliittidataan perustuva malli, jossa tutkittiin yleisesti käytettyyn NDVI-arvoihin perustuvaa kasvillisuusindeksin kehittymistä pylväsvälillä useamman vuoden aikana. Tarkoituksena oli tutkia valitun satelliittiaineiston kyvykkyyttä sekä tarkkuutta tunnistaa muutoksia ja trendejä kasvillisuusindeksissä siten, että sen avulla olisi mahdollista tunnistaa kasvillisuuden raivaustarve sekä varmistaa tehdyt kasvillisuudenhallintatoimenpiteet. Tarkemmassa analyysissä pylväsvälejä tarkasteltiin kaikkiaan yli 7300 kappaletta.



Kuva 10. Kasvillisuuden indeksoinnin tavoitteena oli muodostaa pylväsväleille värikoodatut riskitasot, jotka kuvaavat kasvillisuuden verkolle muodostamaa riskiä (punainen: korkea, oranssi: kohtalainen ja vihreä: matala kasvillisuusriski).

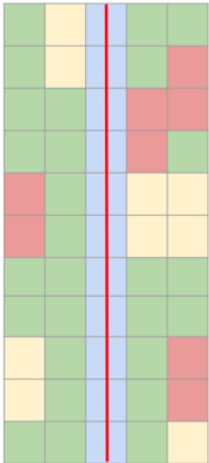


Tutkimus toteutettiin seuraavasti. Pilottiin osallistuneita verkkoyhtiöitä pyydettiin toimittamaan tiedot heidän verkkoalueellaan toteutetuista kasvillisuuden tarkastus- ja hoitotoimenpiteistä. Kyselyn avulla kerättiin seuraavat tiedot:

- Toteutetun kasvillisuuden hoitotoimenpiteen tyyppi (esim. aluskasvillisuuden raivaus, helikopteri sahaus tai linjan päälle kaartuva puu)
- Toimenpiteiden toteutuspäivämäärä
- Sijainti
- Tarkastuksen jälkeen todettu mahdollinen kasvillisuuden hoitotarve
- Alueen koko

Verkkoyhtiöiden toimittamien kunnossapitotietojen pohjalta ilmoitetuista sijainneista hankittiin avointa satelliittiaineistoa sekä useilta vuosilta ennen tehtyä kasvillisuudenhallinta toimenpidettä että vähintään yhdeltä vuodelta toimenpiteen jälkeen.

Analyysissä jokaista pylväsväliä tarkasteltiin itsenäisinä tapauksina, joille jokaiselle määriteltiin kasvillisuusindeksi ennen ja jälkeen verkkoyhtiöiden ilmoittamien kasvillisuudenhallintatoimenpiteen. Kuvassa 11 esimerkki miten, kasvillisuusindeksi pylväsvälille on määritelty. Analyysissä tarkasteltiin kasvillisuusindeksissä tapahtuvaa historiallista kehitystä useamman vuoden ajalta ennen toimenpiteen suorittamista sekä lyhyeltä ajalta toimenpiteen jälkeen. Laajasta aineistosta pyrittiin tunnistamaan mahdollista korrelaatiota tai muuta yhteyttä tiettyjen hoitotoimenpiteiden ja satelliittipohjaisen kasvillisuusindeksin tulosten välillä. Samaan tapaan verkkoyhtiöiden toimittaman tiedon pohjalta vertailtiin eroavaisuuksia kohteiden välillä, joille oli ilmoitettu tai ei ollut ilmoitettu hoitotarvetta. Tällä tavalla pyrittiin tutkimaan, onko mahdollista tunnistaa pylväsvälien kasvillisuusindeksille raja-arvo, joka osoittaisi kasvillisuuden hoitotarpeen.



Kuva 11. Yksinkertaistettu esimerkki pylväsvälin kasvillisuusindeksi määrittelystä. Kuvassa ruudut esittävät avoimen satelliittiaineiston pikseleitä, sininen alue kuvaa johtokatua ja punainen viiva ilmajohtoa. Lisäksi laidoilla olevat värit kuvaavat linjakadun viereisen kasvillisuuden intensiteettiä tarkasteltavien pikseleiden alueelta siten, että vihreissä pikseleissä kasvillisuusindeksi on matala, keltaisissa kohtalainen ja punaisissa korkea. Yksinkertaistettuna pylväsvälin kasvillisuusindeksi on määritetty laskemalla keskiarvo linjakadulle osuvien pikseleiden arvoista.

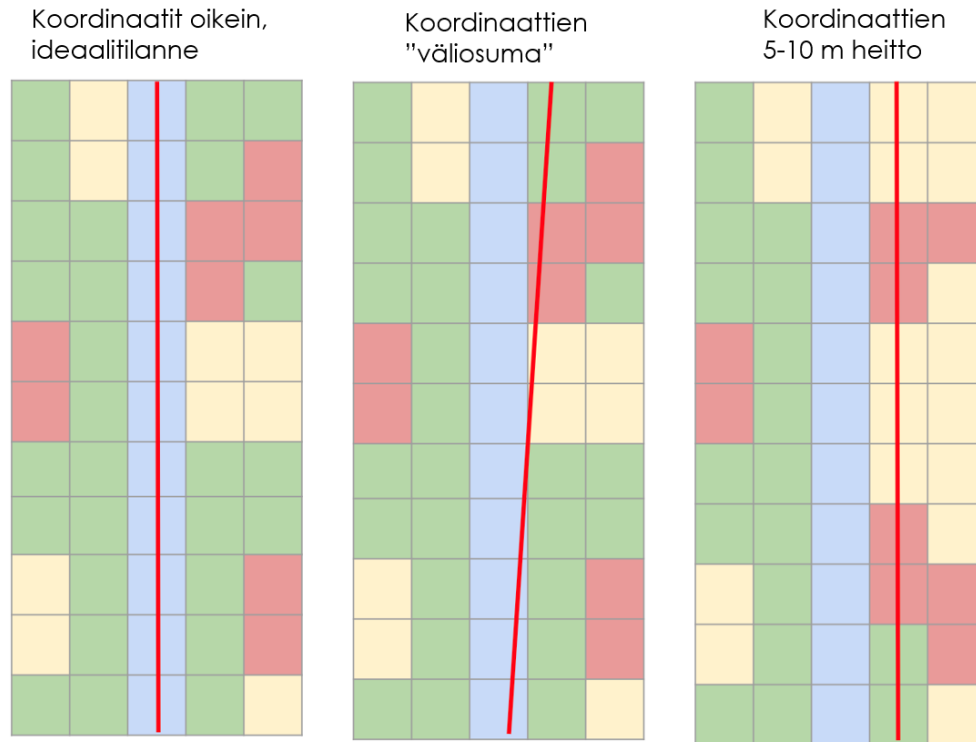
Satelliittipohjaiseen kasvillisuusanalyysiin ja sen tulosten tulkintaan liittyy tiettyjä haasteita. Esimerkiksi kasvillisuuden suurista alueellisesta ja kausittaisesta vaihtelusta johtuvat poikkeamat indeksissä on kyettävä erottamaan ja eliminoimaan pitkän aikavälin tarkastelussa. Tämä lisäksi menetelmään sisältyy myös teknisiä haasteita, jotka tuovat oman lisähaasteensa tarkasteluun. Avointa aineistoa hyödynnettäessä tarkasteltavat linjakadut ovat kapeita suhteessa käytetyn aineiston karkeaan resoluutioon. Tämän lisäksi hankkeen aikana havaittiin merkittäviä georeferointiin liittyviä haasteita.



Georeferointiin liittyvät haasteet vaikeuttavat kasvillisuusriskin määrittelyä. Epätarkkuutta havaittiin sekä verkkoyhtiöiden dokumentoimassa johtotiedossa että analysoitavassa satelliittiaineistossa. Aineiston epätarkkuus aiheuttaa sen, että analyysi kohdistuu osittain tai kokonaan väärin pikseleihin. Ideaalitulanteessa analysoitava johtokatu sijoittuu hyvin yksittäisten pikseleiden alueelle. Tämä ei kuitenkaan onnistu aina, vaan joissain tapauksissa linja osuu analysoitavien pikseleiden väliin, jolloin analyysi perustuu kahden pikselin yhteisarvoon. Erityisen ongelmalliseksi tilanne muuttuu, jos johtokadun tai kuvan koordinaatit heittävät useita metrejä. Tällöin analyysi voi kohdistua johtokadun sijaan esimerkiksi vierimetsään tai vieressä kulkevalle tielle. Georeferointiin liittyvää ongelmaa ja sen erilaisia esiintymismuotoja on havainnollistettu kuvissa 12 ja 13.



Kuva 12. Havainnollistava kuva georeferointiin liittyvistä haasteista. Johtokatu kiemurtelee metsäisellä alueella. Jännevälien 1 ja 3 koordinaatit (sininen linja) vaikuttavat noudattavan varjoisan johtokadun sijainteja. Jännevälin 2 koordinaatit vaikuttavat heittävän joitakin metrejä oletetusta johtokadusta (punainen viiva).



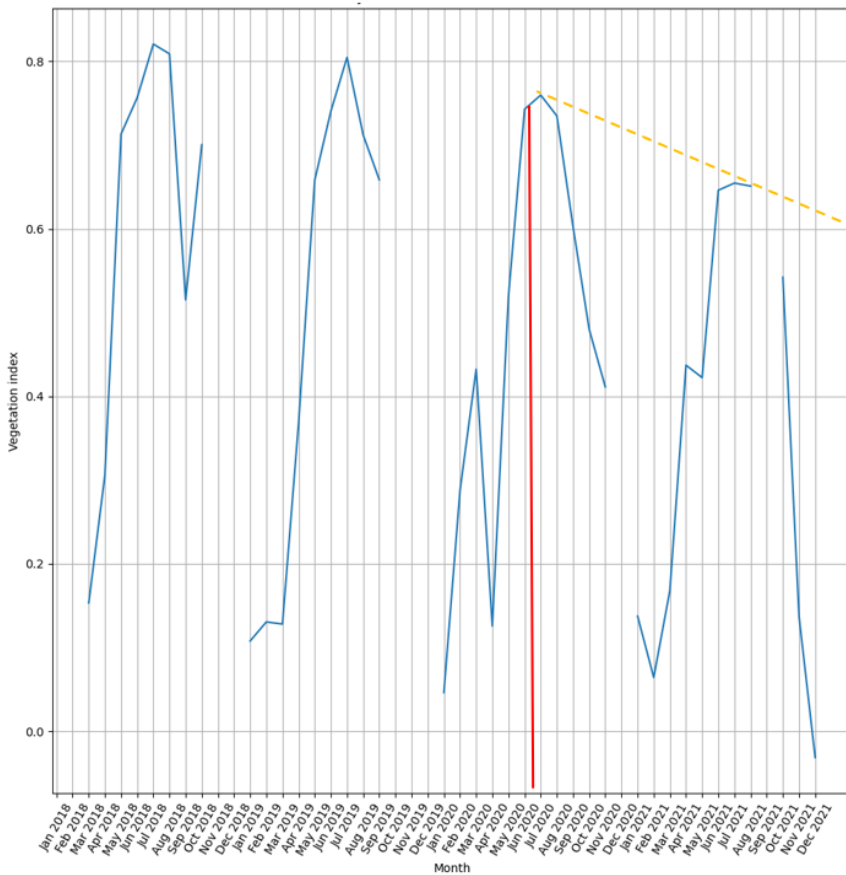
Kuva 13. Georeferointihaaste. Vasemmalla: Tavoitetilassa koneluettava johtokatu osuu hyvin yksittäisten pikseleiden alueelle. Keskellä: Jos linja osuu pikseleiden väliin, voi tulkinta perustua kahden pikselin yhteisarvoon. Oikealla: Jos johtokadun tai kuvan koordinaatit heittävät, voi analyysi osua kokonaan vääriin pikseleihin.

Kasvillisuuden indeksoinnin osalta tutkimuksen tulokseksi todetaan, että edellä esitetyn prosessin mukaisesti toteutettuna menetelmällä kyetään havaitsemaan avoimesta satelliittiaineistosta kasvillisuuden kasvun mukainen trendi. Tästä huolimatta luotettava raivaustarpeen määrittäminen pylväsvälille tämän menetelmän avulla on haastavaa muun muassa edellä esitettyjen teknisten haasteiden sekä ympäristössä tapahtuvien jatkuvien muutosten ja vaihtelun seurauksena. Tutkimuksen aikana tehtyjä havaintoja avataan seuraavaksi tarkemmin esimerkkitapausten kautta. Ensimmäiset kaksi esimerkkiä kuvaavat toteutettujen raivausten varmistamiseen liittyen tehtyjä havaintoja. Lisäksi kolmas esimerkki kuvaa raivaustarpeen määrittämiseen liittyviä haasteita.



Esimerkki 1

Kasvillisuusindeksissä on selkeä muutos, josta tehty raivaus on selvästi havaittavissa. Tilastollisesti tällaiset tapaukset esittävät kuitenkin vain pientä alle 10 %:n otantaa kaikista tarkastelluista kohteista.

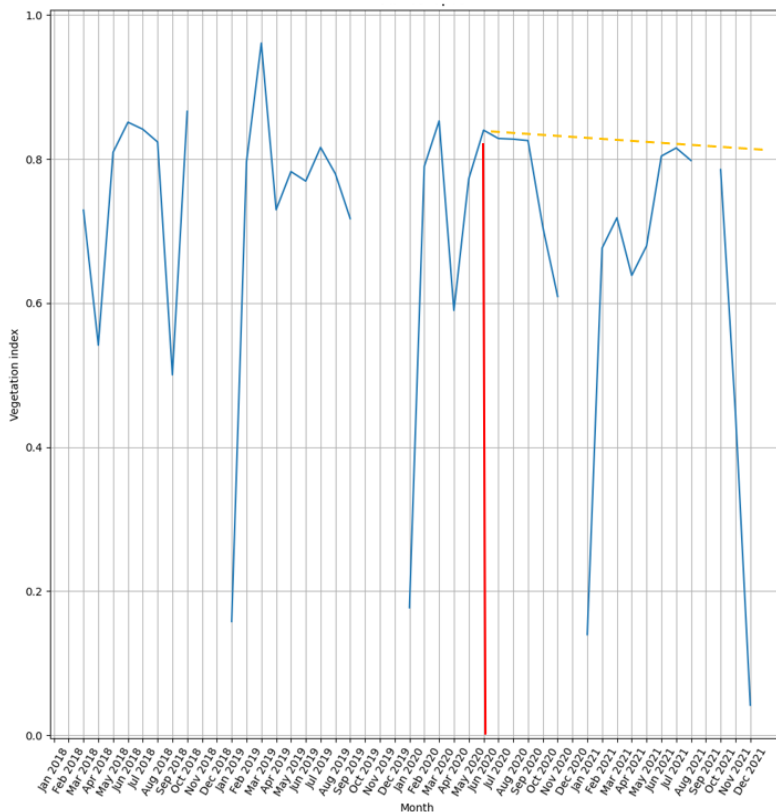


Kuva 14. Esimerkki selkeästä muutoksesta indeksissä. Johtoalueella raivaustarve tunnistettu 2020, raivaus on tehty 2020 ja kasvillisuusindeksi ja sen huippu on selkeästi laskenut vuodesta 2020 vuoteen 2021 (keltainen katkoviiva).



Esimerkki 2

Kasvillisuusindeksissä on havaittava muutos, joka on kuitenkin hyvin pieni. Laajassa aineistossa ilman tietoa tehdyistä raivauksista tällaisten tapausten tunnistaminen luotettavasti olisi äärimmäisen vaikeaa. Kasvillisuusindeksissä tapahtuvat hyvin pienet muutokset olivat tarkasteluaineiston tyyppitapauksia ja valtaosa havainnoista oli tällaisia.

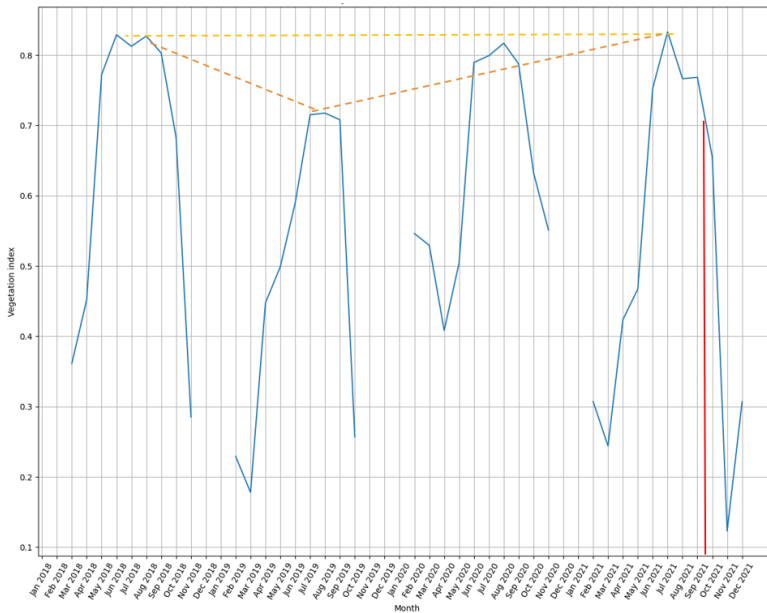


Kuva 15. Hyvin pieni muutos kasvillisuusindeksissä. Pitkä reunapuu 2020, raivaus tehty 2020 ja kasvillisuusindeksissä vuodesta 2020 vuoteen 2021 tapahtuu vain hyvin pieni lasku (keltainen katkoviiva).



Esimerkki 3

Kasvillisuusindeksissä tapahtuu kasvua, joka on myös havaittavissa. Vuosikohtainen vaihtelu indeksissä on kuitenkin niin pientä, että sen perusteella on mahdotonta luotettavasti osoittaa, milloin raivaustarve todellisuudessa ilmenee.

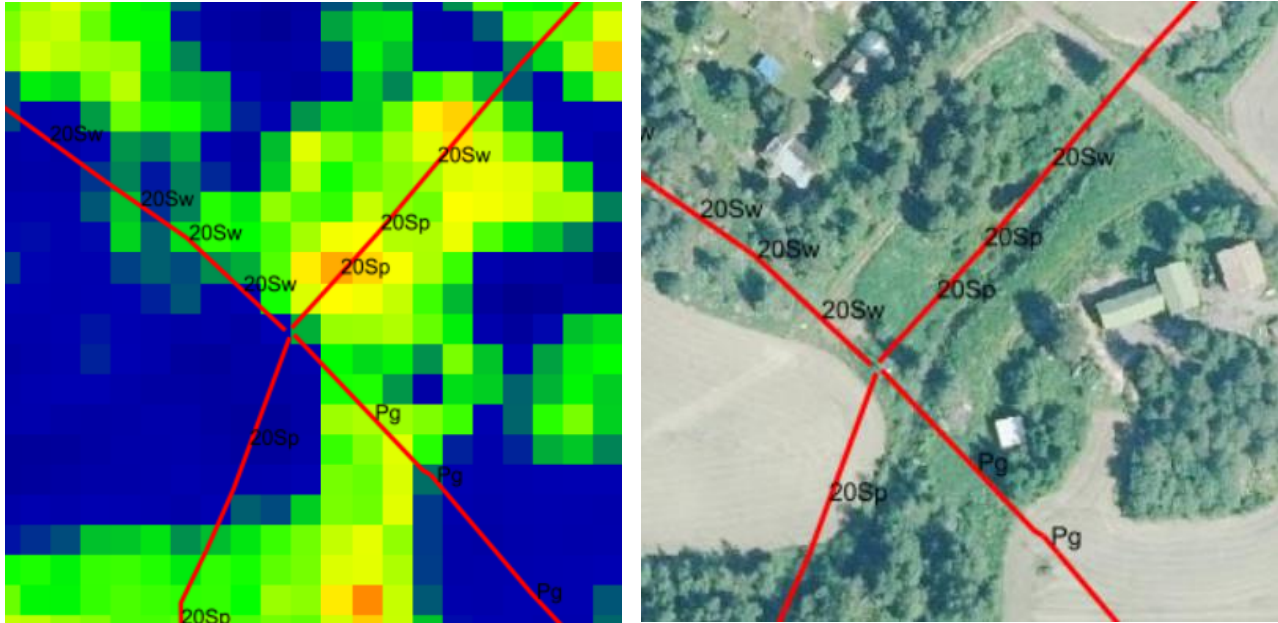


Kuva 16. Kasvillisuusindeksin vuosittainen vaihtelu on hyvin pientä. Johtoalueella ilmoitettu raivaustarve 2021. Edellisen kerran samalla pylväsvälillä on tapahtunut muutoksia kasvillisuudessa 2018–2019 ja raivaustarpeen määrittäminen vaikeaa koska vuosittainen vaihtelu hyvin pientä.

Vaikka kasvillisuuden indeksoinnin avulla ei nykytilanteessa kyetäkään tunnistamaan tarpeeksi luotettavasti raivaustarvetta tai todentamaan tehtyjä raivauksia, on samaa menetelmää mahdollista hyödyntää kuvaamaan kasvillisuuden osalta verkon yleistä tilaa sekä mahdollisia riskialueita. Kuvassa 17 esitetty verkon vuosikasvillisuusindeksi on kasvillisuusindeksiin pohjautuva kuvituskartta kasvillisuuden intensiteetistä eri alueilla. Tämän avulla on mahdollista tunnistaa erityisen voimakkaan kasvillisuuden alueita, joita on mahdollista hyödyntää esimerkiksi kasvillisuuden hoitotoimenpiteiden suunnittelussa ja riskialueiden havaitsemisessa. Ajantasaisen kasvillisuusindeksikartan



lisäksi on mahdollista näyttää arkistodataan pohjautuvia karttoja edellisten vuosien kasvillisuusindeksistä, mikä mahdollistaa vertailun edellisten vuosien ja nykytilan välillä.



Kuva 17. Vasemmalla esimerkkikuva vuosikasvillisuusindeksikartasta ja oikealla ilmakuva samasta paikasta (punainen: korkea, oranssi: kohtalainen ja vihreä: matala kasvillisuusindeksi).

6.3 Suurhäiriötilanteen hallinta

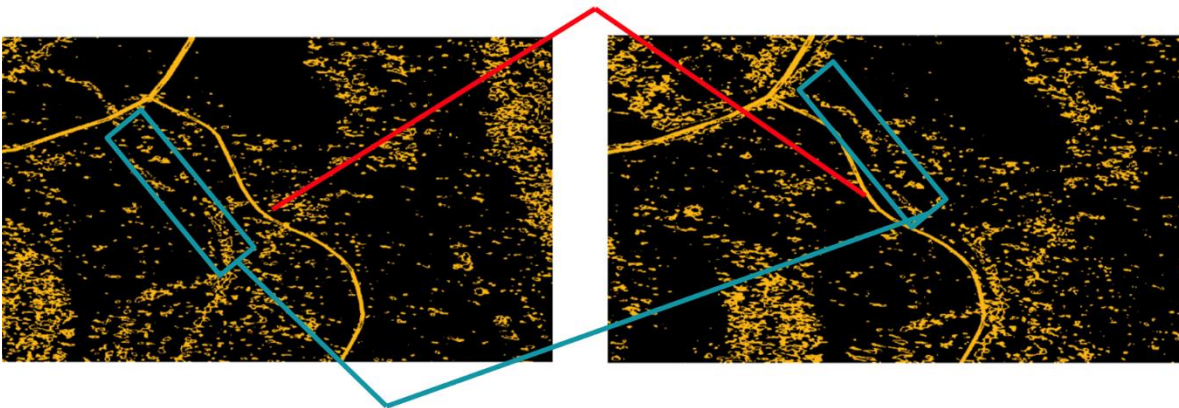
Suurhäiriötilanteiden hallinnan osalta hankkeen tavoitteena oli tutkia, kuinka hyvin satelliittidatan avulla kyetään muodostamaan tilannekuva myrskytuhoista myrskyn aikana sekä sen jälkeen. Mahdollisuuksia tutkittiin erityisesti tarkemman SAR-tutkadatan osalta, sillä se mahdollistaisi kohteiden tunnistamisen myös ilman suoraa näköyhteyttä kohteeseen. Tämä mahdollistaisi ajantasaisen tilannekuvan muodostamisen myrskyille tyypillisissä pimeissä ja pilvisissä olosuhteissa.

Hankkeen aikana SAR-datan hyödyntämistä pilotoitiin Suomessa yhden jakeluverkkoyhtiön alueella. Pilottialueella sijaitseva käytöstä poistettu verkkoalue, joka mahdollisti esimerkiksi puiden kaadot linjakaduille. Pilotoinnin aikana linjasta otettiin neljän kuvan aikasarjat joulukuun 2021 ja toukokuun 2022 välisenä aikana. Aikasarjaan



saatiin näin ollen kuvia eri vuodenajoilta, jonka ansiosta tunnistamista päästiin testaamaan sekä lumiseen talviaikaan että lehtivihreän aikaan.

Tarkan SAR-datan hyödyntäminen edellä kuvatun kaltaisiin käyttötarkoituksiin on uusi mahdollisuus, eikä sen hyödyntämiseen ole vielä muodostunut saman tapaisia vakiintuneita käytäntöjä kuin optisen aineiston käsittelyssä. Pilotoinnin aikana SAR-dataan jouduttiin tekemään huomattavan paljon esi- ja jälkikäsittelyä, koska datan prosessoinnissa tuli esille merkittävä aineiston georeferointiin liittyvä haaste. Kuvassa 18 on havainnollistettu esimerkin kautta poikkeaman suuruutta, missä koneluennallisesti käsitellyn datan kuvakoordinaattien paikat ovat heittäneet useita metrejä. Tilanteen ongelmallisuutta lisäsi se, että heitto koordinaateissa ei ollut systemaattinen, minkä seurauksena kuvien kohdistaminen vaatii manuaalista käsittelyä. Kohdistaminen oli välttämätöntä, koska ilman sitä tulkinta olisi tuottanut virheellisiä tuloksia.



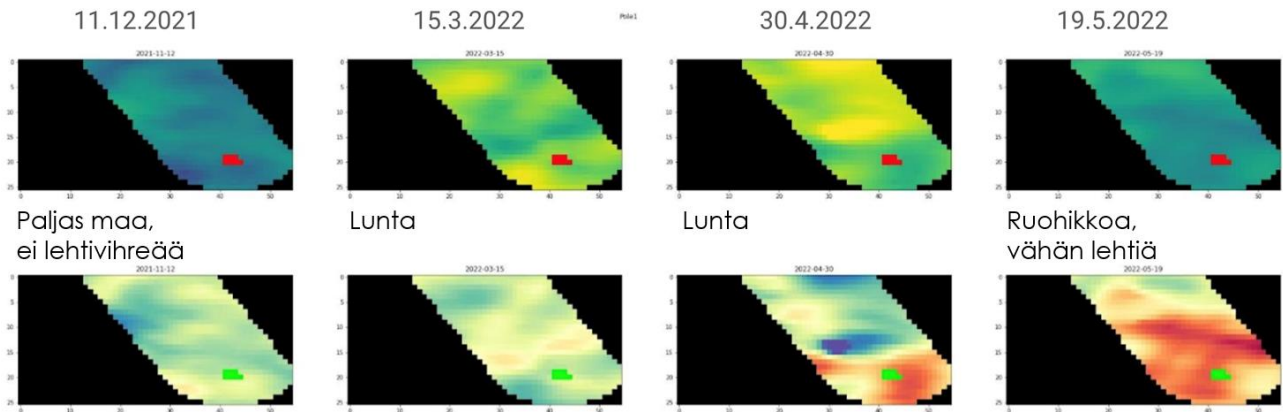
Kuva 18. Esimerkki georeferointihaasteesta, tien paikassa kymmenien metrien ero kuvien välillä kahden eri SAR-kuvan esiprosessointivaiheen jälkeen.

Georeferointiin liittyvien ongelmien takia tutkimusalueella sijaitseviin pylväisiin asennettiin alumiiniset tutkaheijastimet (reflektorit). Reflektorit helpottivat kuvien kohdentamista, sillä niistä heijastuvat voimakkaat signaalit olivat helposti tunnistettavissa tutka-aineistosta.



Kuva 19. Tutkaheijastimen asentaminen jännitetyösauvoilla ja lähikuva asennetusta heijastimesta.

SAR-aineiston tulkitseminen perustuu eri vahvuisten signaalien tarkasteluun. Signaalien voimakkuuden avulla on mahdollista tunnistaa eri materiaaleja sekä kohteita. Jatkuvasti muuttuva luonto tuo kuitenkin tämän tyyppiseen tarkasteluun oman haasteensa, koska myrskytuhoille ominaiset muutokset, kuten linjan päälle kaatuneet puut, on kyettävä tunnistamaan luotettavasti ympäristön muutoksista huolimatta. Haaste koskee erityisesti kasvillisuuden ja sen muutosten tunnistamista, sillä sähköverkon pylvät erotetaan pääosin hyvin signaalia heijastavien metalliorsien ansiosta. Kuvassa 20 on esitetty ympäristössä tapahtuvia muutoksia sekä kohteiden näkyvyyttä eri vuoden aikoina.



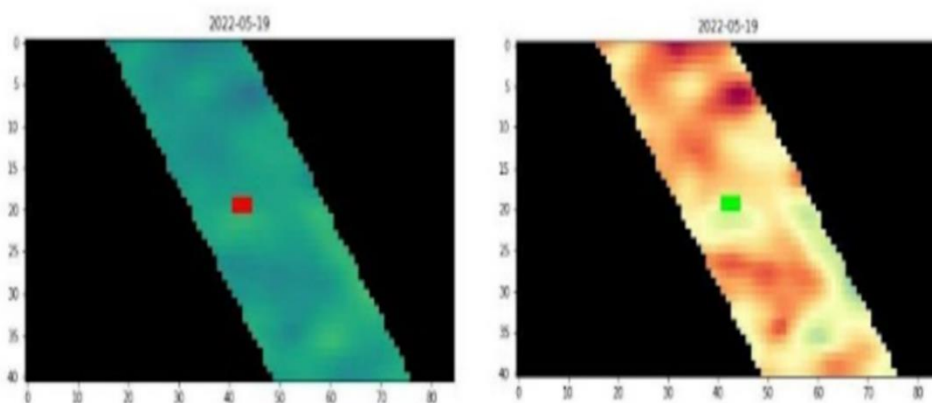
Kuva 20. SAR-kuva muuttuu ympäristön ja vuodenaikojen mukaan. Pylvään sijainti on merkitty kuviin punaisella tai vihreällä pisteellä. Ylempi kuvasarja esittää signaalin voimakkuutta, jossa keltainen kuvaa voimakasta ja vihreä heikkoa signaalia. Alempi kuva korostaa signaalin ääripäiden arvoja, jolloin punainen kuvaa heikompaa ja sininen voimakkaampaa signaalia.

Käytännössä tutkimuksen aikana SAR-aineiston soveltuvuutta testattiin tunnistamalla linjan päälle kaatuneita puita, jotka ovat myrskytuhoille tyypillisiä kohteita. Kaatuneiden puiden ohella tutka-aineistosta tunnistettiin myös omalla paikallaan pystyssä olevat pylvää, jotta niiden voitiin todeta olevan kunnossa.

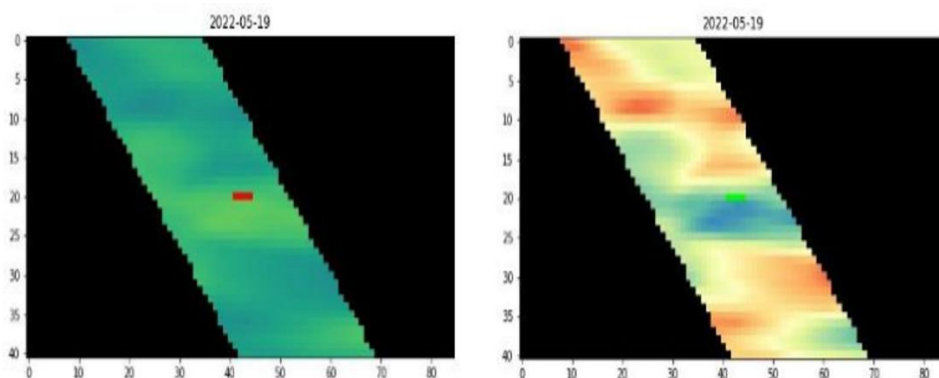
SAR-aineiston prosessointiin liittyvistä haasteista huolimatta tutkimuksen aikana onnistuttiin tunnistamaan osa linjan päälle kaatuneista puista. Taulukossa 9 on kuvattu tunnistamisen luotettavuutta eri kohteiden tunnistamisen osalta. Yhteenvetona saaduista tuloksista voidaan todeta, että sähköpylväät onnistuttiin tunnistamaan erittäin luotettavasti ja myrskytuhoille tyypillisistä kohteista linjan päälle kaatuneet puut yli puolissa tapauksista vähintään heikon signaalin avulla. Tuloksia arvioidessa on syystä muistaa, että tutkimuskohteessa osaan pylväistä oli asennettu tutkaheijastimia ja kaikkien kaatuneiden puiden sijainnit olivat tiedossa tulkintaa tehtäessä. Tämä tieto on tässä tutkimuksessa tarkasteltujen tapausten osalta helpottanut haluttujen kohteiden tunnistamista.

Taulukko 9. Tarkasteltavien kohteiden tunnistaminen SAR-aineistosta. Signaalin vahvuus kuvaa kuinka luotettavasti eri objektit tunnistettiin.

<i>Pylväät</i>		<i>Kaatuneet puut</i>		<i>Yhteensä</i>	
<i>Pylväs 1*</i>	Näkyvä	Puu 1	Epävarma	Näkyvä	7
<i>Pylväs 2*</i>	Näkyvä	Puu 2	Näkyvä	Epävarma	5
<i>Pylväs 3*</i>	Näkyvä	Puu 3	Epävarma	Ei näkyvä	2
<i>Pylväs 4*</i>	Näkyvä	Puu 4	Ei näkyvä		
<i>Pylväs 5*</i>	Epävarma	Puu 5	Ei näkyvä		
<i>Pylväs 6</i>	Näkyvä	Puu 6	Epävarma	*=tutkaheijastin	
<i>Pylväs 7</i>	Epävarma				
<i>Pylväs 8</i>	Näkyvä				

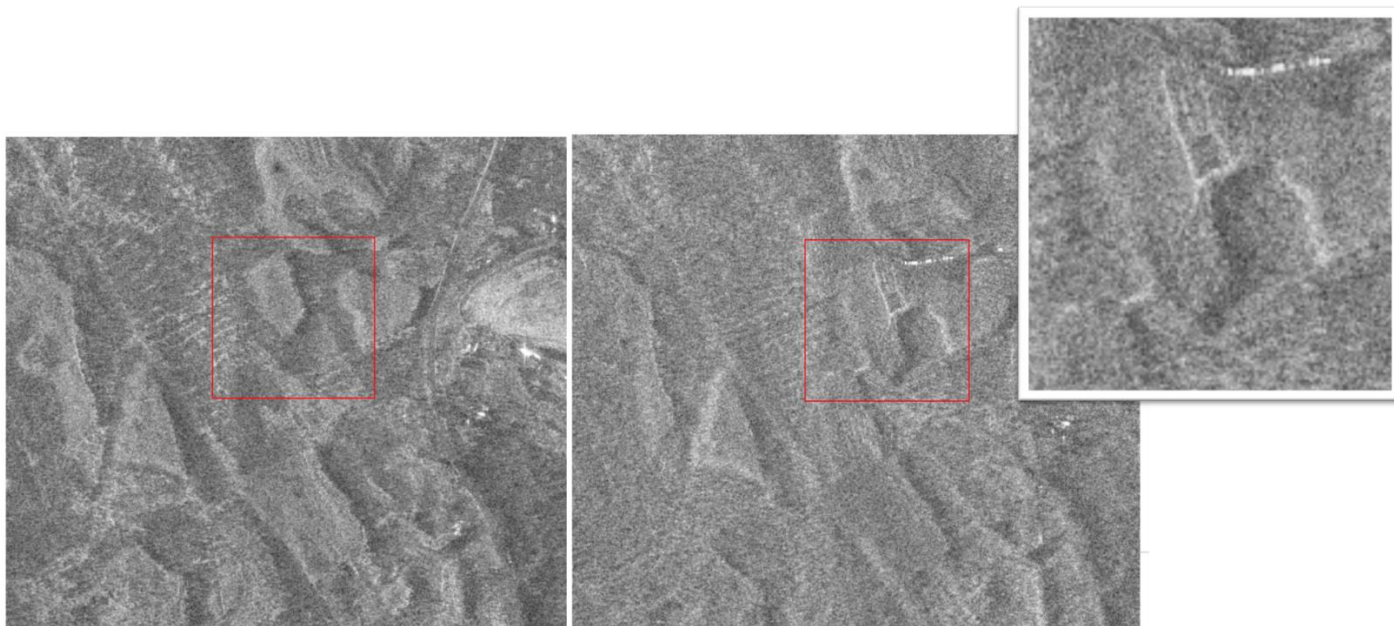


Kuva 21. Esimerkki oletetun puun vahvasta signaalista.



Kuva 22. Esimerkki mahdollisesti kaatuneen puun heikosta signaalista.

Tutkimuksen tulokset ja prosessin aikana kohdatut haasteet osoittavat, että SAR-aineiston hyödyntämisessä ollaan selvästi takamatkalla optisiin aineistoihin verrattuna, eikä se näin ollen ole vielä valmis hyödynnettäväksi operatiivisessa toiminnassa. Tuloksia voidaan tältä osin pitää oletettuina, sillä tutka-aineiston hyödyntäminen on varsin uusi suuntaus ja siihen liittyen on tehty vielä verrattain vähän tutkimus- ja kehitystyötä. Esimerkiksi georeferointiin liittyviin haasteisiin löydetään tulevaisuudessa hyvin todennäköisesti automatisoituja ratkaisuita, jotka tulevat vähentämään manuaalisen työn tarvetta. Tähän mennessä kehitystä on hillinnyt aineiston rajallinen saatavuus sekä korkeat hinnat, joihin voidaan odottaa muutosta, kun kilpailu alalla kasvaa ja markkinoille saadaan uusia aineiston tarjoajia. Samalla voidaan odottaa myös entistä enemmän tutka-aineistoon pohjautuvia ratkaisuita. Myös SAR-datan visualisoinnissa kuten kuva 23 osoittaa on vielä useita hyödyntämättömiä mahdollisuuksia.



Kuva 23. Esimerkki SAR-datalla havaitusta muutoksesta. Kuvat ennen ja jälkeen avohakkuun sekä pikkukuvassa punaisella rajattu alue suurennettuna.

7 NYKYISTEN MENETELMIEN JA SATELLIITTIPOHJAISTEN RATKAISUJEN VERTAILU

Seuraavien alaotsikoiden alla on esitetty vertailua nykyisten menetelmien sekä satelliittipohjaisten ratkaisujen välillä. Vertailuun kuuluu hankkeen tavoitteissa määritettyjen kohteiden ja riskitilanteiden osalta selvitykset satelliittidatan hyödyntämisen mahdollisuuksista, luotettavuudesta ja hyödyistä suhteessa kustannuksiin sekä verrattuna nykymenetelmiin.

7.1 Kasvillisuuden hallinta

Jakeluverkkoyhtiöille suunnatun kyselyn perusteella tunnistettiin kaksi laajalti käytössä olevaa menetelmään kasvillisuuden hallintaan. Nämä menetelmät olivat maastotarkastukset ja helikopteritarkastukset. Satelliittipohjaisen kasvillisuuden hallinnan osalta tarkasteltavat kohteet ja riskitilanteet olivat kasvillisuusriskin tunnistaminen, hälytys avohakkuusta ja raivauksen vaikutuksen todentaminen. Taulukossa 10 on esitetty vertailua nykyisin käytössä olevien menetelmien sekä satelliittiaineistoon pohjautuvien menetelmien välillä.

Taulukko 10. Kasvillisuuden hallintaan käytettävien menetelmien vertailu.

	Maastotarkastukset jalkaisin – Verkon kasvillisuus- ja kuntotarkastukset	Helikopteri – Verkon kasvillisuus- ja kuntotarkastukset	Satelliittipohjainen analyysi – Kasvillisuuden hallinta
Tarkastusten toteutustapa	Visuaalinen tarkastus	Visuaalinen tarkastus, lidar-skannaus ja valo-/videokuvaus	Satelliittiaineiston tekoälypohjainen analyysi
Menetelmien sisältö kasvillisuuden hallinnan osalta	Akuuttien kasvillisuusriskien havaitseminen (ajallisesti/ kustannuksellisesti kasvillisuuden osuus tarkastuksista pieni)	Lidar pohjainen kasvillisuuden mallintaminen ja analysointi Ympäröivän kasvillisuuden visuaalinen	Avohakkuuden tunnistaminen Kasvillisuuden indeksointi



	Maastotarkastukset jalkaisin – Verkon kasvillisuus- ja kuntotarkastukset	Helikopteri – Verkon kasvillisuus- ja kuntotarkastukset	Satelliittipohjainen analyysi – Kasvillisuuden hallinta
		havainnointi valokuvista tai helikopterista	
Mihin muuhun tarkastuksia käytetään?	Verkon komponenttien kunnan tarkastaminen (merkittävä osa tarkastusta)	Verkon komponenttien valokuvaus ja kunnan tarkastaminen (merkittävä osa tarkastusta)	Analysoinnin sivutuotteena muodostuneet erilaiset kartta- ja kuva-aineistot
Tarkastusväli	Tarkastukset toistetaan keskimäärin 6 vuoden välein	Yhtiökohtaista vaihtelua, tarkastukset toistetaan 2–12 vuoden välein	Avoimen aineiston avulla mahdollista toistaa kasvukauden aikana jopa viikoittain
Kustannus	<p>Yhden tarkastuskerran kustannus: 100–200 €/km</p> <p>Vuosikustannus: 17–33 €/km,a</p> <p>Kustannuksella katetaan kasvillisuuden ohella myös verkon kuntoon ja turvallisuuteen liittyviä tarkastuksia, jotka muodostavat merkittävän osan kokonaiskustannuksista</p> <p>Oletuksena että tarkastus toistetaan 6 vuoden välein</p>	<p>Yhden tarkastuskerran kustannus: 35–110 €/km</p> <p>Vuosikustannus: 6–18 €/km,a</p> <p>Kustannuksella katetaan kasvillisuuden ohella myös verkon kuntoon ja turvallisuuteen liittyviä tarkastuksia, jotka muodostavat merkittävän osan kokonaiskustannuksista</p> <p>Oletuksena että tarkastus toistetaan 6 vuoden välein</p>	<p>Yhden tarkastuskerran kustannus: 0,2–0,4 €/km</p> <p>Vuosikustannus: 3–6 €/km,a</p> <p>Kustannuksella katetaan avohakkuiden tunnistaminen avoimesta satelliittiaineistosta sekä kasvillisuusindeksikartan koostaminen</p> <p>Oletuksena että analyysi onnistutaan toteuttamaan kasvukauden aikana 15 kertaa</p> <p>Mahdollista hyödyntää myös tarkempia aineistoja, jolloin esim. HR-aineistoilla kustannus ja tarkastusten sisältö on vastaava kuin infrastruktuuririskien hallinnassa (taulukko 12)</p>
Nopeus	0,5–2 km/h, nopeus on riippuvainen maastosta	40–80 km/h	Prosessi koostuu automatisoidusta satelliittikuvien



	Maastotarkastukset jalkaisin – Verkon kasvillisuus- ja kuntotarkastukset	Helikopteri – Verkon kasvillisuus- ja kuntotarkastukset	Satelliittipohjainen analyysi – Kasvillisuuden hallinta
			<p>hankinnasta ja analysoinnista</p> <p>Avointa aineistoa saatavilla noin 2 kertaa viikossa. Lisäksi tarkempaa aineistoa mahdollista tilata haluamiltan alueilta joko arkistosta tai on demand -tyyppisesti. Pilvien takia analyysi ei välttämättä onnistu joka kuvasta.</p> <p>Kuva-aineiston prosessointi ja analysointi on automatisoitu, joten itse tulkinta tapahtuu koko verkkoalueelle minuuteissa/tunneissa</p>
Vahvuudet	<p>Mahdollista toteuttaa kasvillisuuden ohella myös muita tarkastuksia</p> <p>Ei tule käytännössä virrehavaintoja</p> <p>Mahdollista tehdä tarkastusten yhteydessä pienimuotoista kasvillisuuden poistoa</p> <p>Ympäristöystävällinen tarkastusmenetelmä, jolla pieni hiilijalanjälki</p>	<p>Lidar-skannaus mahdollistaa erittäin tarkan analyysin kasvillisuuden tilasta ja etäisyyksistä verkkoon</p> <p>Ei tule käytännössä virrehavaintoja</p> <p>Lidar-skannauksen osalta lopputulos on tasalaatuinen eikä riippuvainen tarkastajasta</p> <p>Mahdollista toteuttaa kasvillisuuden ohella myös muita tarkastuksia</p> <p>Verkosta otettuja tarkkoja kuvia mahdollista käyttää myös muissa tarkoituksissa</p>	<p>Nopea tapa tarkastella laajoja alueita. Avoimen aineiston avulla mahdollista toistaa tarkastukset useammin</p> <p>Automaattinen tekoälypohjainen tulkinta, ei tarvetta sitoa henkilöstöä tarkastuksiin</p> <p>Ympäristöystävällinen tarkastusmenetelmä, jolla pieni hiilijalanjälki</p> <p>Lopputulos on tasalaatuinen eikä riippuvainen tarkastajasta</p>



	Maastotarkastukset jalkaisin – Verkon kasvillisuus- ja kuntotarkastukset	Helikopteri – Verkon kasvillisuus- ja kuntotarkastukset	Satelliittipohjainen analyysi – Kasvillisuuden hallinta
Heikkoudet	Hidas menetelmä Korkea kustannus Korkeiden kustannusten ja hitauden takia ei mahdollista toteuttaa jatkuvaa valvontaa Sitoo henkilöstöä Lopputulos on riippuvainen tarkastajasta ja tämän osaamisesta	Korkea kustannus Korkeiden kustannusten (ja hitauden takia) ei mahdollista toteuttaa jatkuvaa valvontaa Sitoo henkilöstöä Ympäristöystävällisyys: helikopterilentojen aiheuttamat päästöt	Aineiston tarkkuuteen liittyvät rajoitteet Ei voi korvata kunto- ja kasvillisuustarkastuksia, koska niihin sisältyy verkon kuntoon liittyviä tarkastuksia, joita ei voi satelliittikuvista tehdä Tarkemmissa aineistoissa kustannukset nousevat merkittävästi Käytettävissä vain kasvukauden aikana, analyysia ei mahdollista tehdä talvella Kasvillisuusriskin määrittäminen pylväsvälille ja raivausten todentaminen eivät osoittautuneet vielä tässä vaiheessa riittävän luotettaviksi operatiiviseen käyttöön

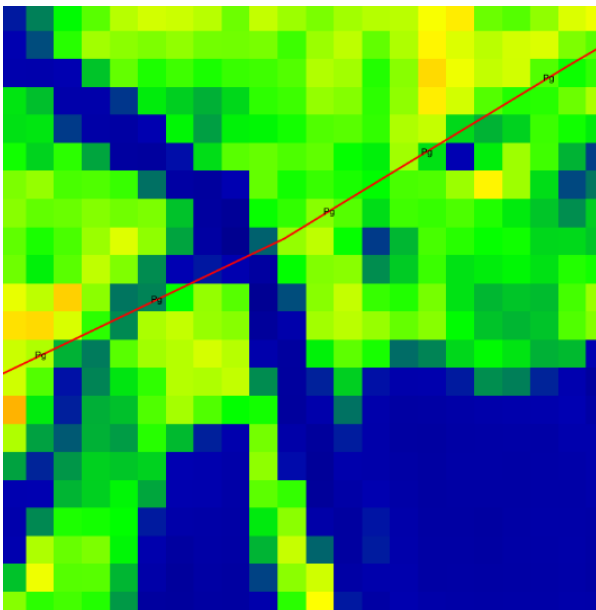
Kasvillisuusriski

Tunnistamalla kohonnut kasvillisuusriski riittävän aikaisessa vaiheessa, on mahdollista estää kasvillisuudesta aiheutuvia vikoja. Lisäksi jos kasvillisuusriskiä kyetään seuraamaan jatkuvasti riittävällä tarkkuudella, on mahdollista siirtyä aikaperusteisesta kasvillisuuden hoidosta tarveperusteisiin raivauksiin. Nykyisellään verkon läheisyydessä olevaa kasvillisuutta raivataan osittain aikaperusteisesti sekä tunnistetun tarpeen mukaan. Raivaustarpeen määrittelyssä hyödynnetään ilmajohtoverkolle tehtäviä säännöllisiä



kunto- ja kasvillisuustarkastuksia, joiden yhtenä tehtävänä on tunnistaa kasvillisuuden hoitoa vaativat alueet.

Hankkeen aikana tutkittiin avoimeen satelliittidataan pohjautuvia ratkaisuja, joiden avulla olisi mahdollista tunnistaa kasvillisuuden hoitotarvetta. Ensisijaisesti hankkeen aikana tutkittiin kasvillisuusindeksiin pohjautuvaa mallia, jossa korkean kasvillisuusindeksin avulla pyrittiin tunnistamaan riskin muodostavia kohteita sekä korkean riskin pylväsvälejä. Pilotoinnin aikana havaittiin, että kasvillisuuden indeksoinnilla kyetään havaitsemaan kasvillisuuden kasvun mukainen trendi, mutta sen hyödyntäminen raivaustarpeen määrittelyssä todettiin haastavaksi. Suurimpina syinä tälle olivat kasvillisuuden suuret alueelliset ja kausittaiset vaihtelut sekä linjakatujen ja satelliittikuvien epätäsmälliset koordinaatit. Lisäksi linjakadut todettiin varsin kapeiksi suhteessa avoimen satelliittiaineiston karkeaan resoluutioon. Vaikka edellä kuvatun kaltainen raivaustarpeen määrittely pylväsvälille ei onnistunut, voidaan kasvillisuuden indeksointia pitää hyvänä työkaluna kuvaamaan kartalta alueita, joilla kasvillisuuden intensiteetti on erityisen korkea. Esimerkki tästä on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Kasvillisuusindeksikartta ja ilmakuva samasta kohteesta (Punainen: korkea, oranssi: kohtalainen ja vihreä: matala kasvillisuusindeksi).



Raivaustarpeiden tunnistamisen osalta satelliittipohjainen analyysi ei siis nykyisellään kykene korvaamaan säännöllisiä verkon kunto- ja kasvillisuustarkastuksia. Kasvillisuuden ohella nykyisten tarkastusten pääpaino on verkon kuntoon liittyvissä kohteissa, joita ei ole mahdollista tarkastaa kaukokartoitusmenetelmin. Tästä syystä satelliittipohjaisen menetelmän avulla ei voida täysin syrjäyttää maastotarkastuksia tai ilmasta tehtäviä verkon komponenttien kuntotarkastuksia myöskään lähitulevaisuudessa.

Hälytys avohakkuusta

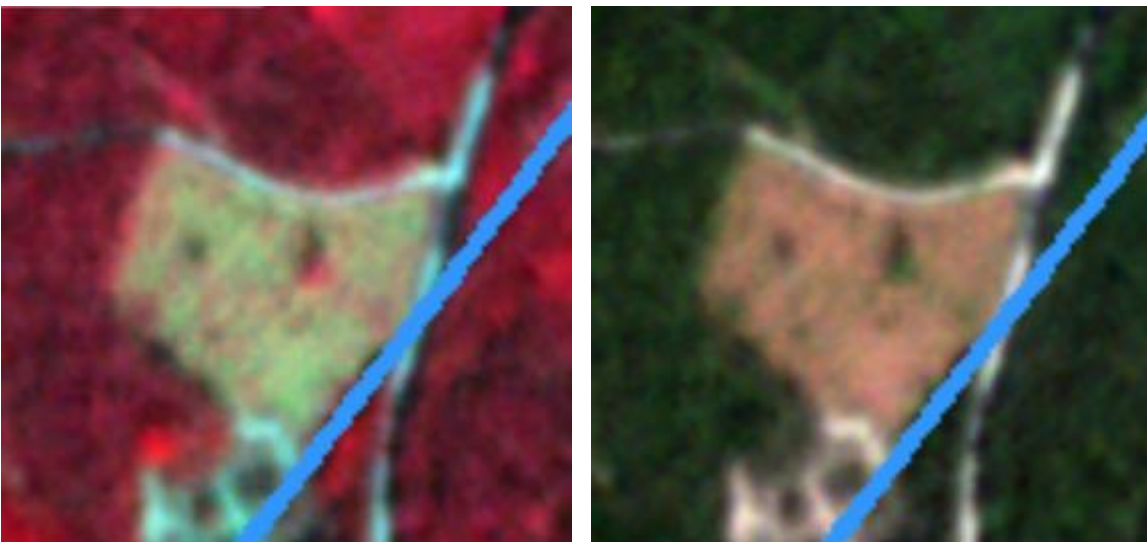
Avohakkuut, joissa hakkuualueen ja linjan väliin jätetään yksittäisiä puita, muodostavat riskin linjan päälle kaatuvista puista. Tällaisten tapausten tunnistaminen riittävän aikaisessa vaiheessa mahdollistaa tilanteeseen puuttumisen ennen vahinkojen syntymistä. Nykyisellään verkkoyhtiöillä ei ole käytössään jatkuvaa ja säännöllistä menetelmää uusien avohakkuiden tunnistamiseen. Osa uusista hakkuista ilmoitetaan metsänomistajan toimesta, mutta monissa tilanteissa verkkoyhtiöillä ei ole tietoa kaikista verkon lähellä tapahtuvista avohakkuista. Tähän tarpeeseen on kuitenkin mahdollista hyödyntää satelliittipohjaista analyysia, joka tarjoaa menetelmän jatkuvaan avohakkuiden tunnistamiseen.



Kuva 25. Avohakkuiden tunnistaminen. Tekoälyn tunnistama muuttunut alue peruskartalla, avoimen satelliittiaineiston kuvat ennen ja jälkeen havaitun muutoksen.



Avohakkuiden tunnistaminen on mahdollista toteuttaa avoimeen satelliittiaineistoon pohjautuen, jolloin sen avulla on mahdollista seurata muutoksia kasvukauden aikana jopa viikoittain. Satelliittipohjainen avohakkuiden tunnistaminen perustuu muutostulkinta-algoritmiin, joka tunnistaa kasvillisuudessa tapahtuvia muutoksia ja avohakkuiden osalta puiden poistumista. Riittävän lähellä verkkoa olevista hakkuista on mahdollista muodostaa hälytykset, jolloin tieto niistä saadaan välittömästi tunnistamisen jälkeen. Tunnistetuista hakkuista on mahdollista esittää, satelliittikuvista muodostetut ennen ja jälkeen kuvat, joista tunnistettu muutos on mahdollista nähdä. Lisäksi satelliittikuvien infrapunakanavan avulla kuvista on mahdollista tarkastella, onko johtokadun viereen jäänyt riskin muodostavaa kasvillisuutta, mikä on esitetty myös kuvassa 26.



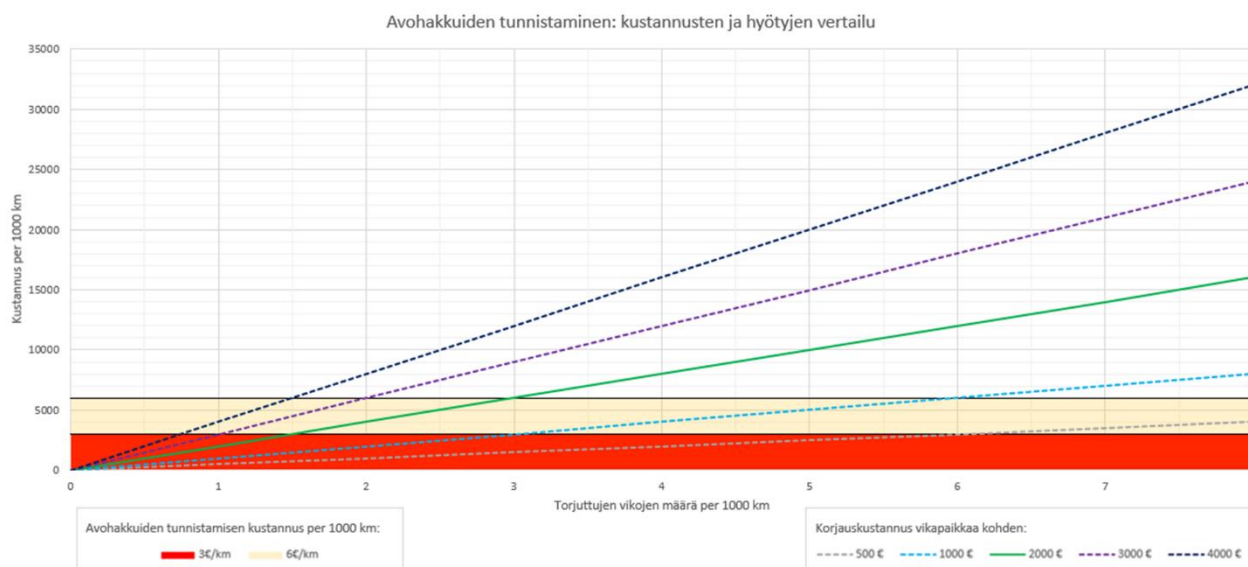
Kuva 26. Infrapunakanava helpottaa linjan viereen jääneen kasvillisuuden havaitsemista. Mitä punaisempi väri, sitä enemmän lehtivihreää.

Avohakkuiden tunnistamisen osalta satelliittipohjaista analyysia voidaan pitää luotettavana. Hankkeen aikana pilottikäyttäjät pääsivät testaamaan ominaisuutta, ja avohakkuiden luokittelussa päästiin vähintään 80 % osumatarkkuuteen. Operatiivisessa käytössä tarkkuuden voidaan olettaa olevan vielä tätäkin parempi, sillä jo pilotoinnin aikana luotettavuus parani selkeästi, kun algoritmia kehitettiin ja optimoitiin saadun palautteen perusteella.



Avohakkuiden tunnistaminen perustuu avoimen satelliittiaineiston tulkintaan. Menetelmän vuosittainen kustannus on verkon pituudesta ja sen rakenteesta riippuen noin 3–6 €/km. Käytännössä tällä kustannustasolla kyetään toteuttamaan jatkuva jopa viikoittain toistuva analyysi kasvukauden ajalta.

Menetelmällä saavutettavien hyötyjen arvioimiseksi selvitimme osana tutkimusta toteutetun kyselyn avulla kasvillisuuden aiheuttamien viankorjausten kustannuksia. KJ-ilmajohtoverkon viankorjauskustannukseksi arvioitiin kyselyn vastauksissa 500–5000 €. Jos keskimääräiseksi viankorjauskustannukseksi arvioidaan 2000 €, niin 3–6 €/km kustannuksella menetelmän tulisi tunnistaa ja estää avohakkuista johtuvia vikoja 1000 verkkokilometriä kohden vähintään 1,5–3 kappaletta maksaakseen itsensä takaisin. Laskelmaa on havainnollistettu kuvassa 27. Tämä laskelma on suuntaa antava, eikä se ota huomioon esimerkiksi KAH-arvoja (Keskeytyksestä Aiheutunut Haitta). Laskelman tarkoituksena on auttaa verkon omistajia arvioimaan ja hahmottamaan menetelmän tuomia hyötyjä erityyppisissä verkoissa.



Kuva 27. Avohakkuiden tunnistamiseen liittyvien kustannusten ja hyötyjen vertailu.

Vertailun vuoksi Energiategollisuuden vuoden 2019 keskeytystilaston mukaan ilmajohdoissa tapahtuu vuodessa keskimäärin 110 luonnonilmiöiden aiheuttamaa vikaa 1000 km kohden. Jos näistä voidaan estää 10 poistamalla avohakkuun reunapuut ennen voimakasta tuulta, on mahdollisuus säästää vuodessa 10–20 €/km suorita



korjauskustannuksia. Oletuksena edellisessä on 1000–2000 € säästö per vika kaadettaessa puut etukäteen verrattuna viankorjauksen kustannuksiin. Myöskään tämä laskelma ei huomioi KAH-arvoja, koska ne vaihtelevat kohteesta riippuen hyvin paljon. Laskelmaa on avattu taulukon 11 esimerkissä.

Taulukko 11. Laskelma avohakkuiden tunnistamisen avulla saavutettavista hyödyistä.

Esimerkki avohakkuiden tunnistaminen

Lähtötiedot

Ilmajohdoverkon vikatiheys (luonnon ilmiöt)	110 kpl/1000km		
Jos näistä onnistutaan torjumaan 10 vikaa	10 kpl/1000km	=>	0,01 kpl/km
Viankorjauskustannus (ilman KAH)	650-5000 €	~	1000-2000 €

Laskelma hyödyistä

Suora hyöty korjauskustannuksissa (viankorjaus 1000 €)	0,01 kpl/1000km * 1000 €	=	10 €/km
Suora hyöty korjauskustannuksissa (viankorjaus 2000 €)	0,01 kpl/1000km * 2000 €	=	20 €/km

Vertailuna avohakkuiden tunnistamisen kustannus **3-6 €/km**

Raivauksen vaikutus

Kolmas tarkastelukohde oli raivauksen vaikutuksen todentaminen, jolla tarkoitetaan tehtyjen raivausten varmistamista. Nykyisellään verkkoyhtiöillä ei ole käytössään systemaattista tapaa todentaa tehtyjä raivauksia, sillä sen toteuttaminen vaatisi käytännössä paikan päällä käymistä tai näköyhteyttä johtokadulle esimerkiksi helikopterista. Tällaisten tarkastusten laajamittainen toteuttaminen pelkästään raivausten varmistamisen osalta ei ole kustannuksellisesti tai muutenkaan järkevää. Tästä syystä kaukokartoitukseen pohjautuvista menetelmistä on toivottu ratkaisua tähän tarpeeseen.

Hankkeen aikana raivausten varmistamista pilotoitiin avoimeen satelliittiaineistoon pohjautuen. Tavoitteena oli kyetä tunnistamaan tehdyt kasvillisuuden hoitotoimenpiteet kasvillisuusindeksin muutoksesta. Joissain tapauksissa toimenpiteen aiheuttama muutos tunnistettiin onnistuneesti, mutta monin paikoin luotettava raivausten varmentaminen osoittautui haastavaksi. Merkittävimpänä syynä olivat pieneksi jääneet muutokset kasvillisuusindeksissä suhteessa käytetyn aineiston resoluutioon, minkä



seurauksena raivattuja kohteita ei kyetty todentamaan aineistosta riittävällä varmuudella. Lisäksi haastetta tulkintaa toivat aineistoon ja verkon sijaintietoihin liittyvät georeferointiongelmät.

Kasvillisuuden indeksoinnin ohella myös muutostulkintaa hyödyntämällä on mahdollista tunnistaa kasvillisuudessa tapahtuvia muutoksia. Vielä nykyisellään se ei kuitenkaan sovellu hyödynnettäväksi raivausten varmentamiseen, sillä esimerkiksi aluskasvillisuuden raivauksen tai oksinnan aiheuttamat muutokset kasvillisuuteen ovat niin pieniä optisen aineiston tarkkuuteen nähden, että muutoksia ei kyetä tunnistamaan koneluennallisesti riittävällä varmuudella.

7.2 Infrastruktuuririskien hallinta (Hälytys ulkopuolisesta verkkoa uhkaavasta toiminnasta)

Infrastruktuuririskien tunnistamisella on mahdollista tunnistaa verkkoa uhkaavia riskitekijöitä riittävän aikaisessa vaiheessa, jotta niihin ehditään puuttua ennen vahingon syntymistä. Nykyisellään tällaisten riskikohteiden tunnistaminen perustuu epäsäännöllisiin muun toiminnan ohessa tehtäviin havaintoihin sekä sidosryhmiltä tuleviin satunnaisiin ilmoituksiin. Tämän takia satelliittidatan tarjoamista mahdollisuuksista on toivottu ratkaisua, joka mahdollistaisi verkosto-omaisuuden säännöllisen valvonnan. Taulukossa 12 on esitetty vertailu nykyisten tunnistamistapojen sekä satelliittipohjaisen analyysin välillä.



Taulukko 12. Infrastruktuuririskien hallinta.

	Nykyiset tavat kerätä tietoa	Satelliittipohjainen analyysi – infrastruktuuririskien hallinta
Miten tietoja riskikohteista kerätään	Verkon kunnossapitotöiden yhteydessä havaitut riskikohteet. Kunto- ja kasvillisuustarkastukset ainoa systemaattinen tapa, jossa iso osa verkosta käydään läpi, jolloin kierron aikana voidaan havaita mahdollisia riskikohteita Asiakkailta tai urakoitsijoilta tulevat ilmoitukset	Muutostulkinta-algoritmi tunnistaa maanpinnalla tapahtuvia muutoksia esim. kasvillisuudessa, maanpinnassa, rakennuksissa ja esineissä
Kuinka usein toistetaan	Ilmoitukset ja havainnot satunnaisia Kunto- ja kasvillisuustarkastukset ainoa säännöllinen, mutta tarkastusten painopiste muualla. Tarkastusväli yleisimmin 6 vuotta.	Vaatii vähintään HR-tasoista satelliittiaineistoa, jolloin muutostulkinta voidaan tehdä kohtuullisilla kustannuksilla vuosittain koko verkolle Koko verkon lisäksi muutostulkintaa voidaan tehdä valikoidulle pienemmälle alueelle useammin
Kustannus	Ei aiheuta ylimääräisiä kustannuksia	HR-tasoisella aineistolla kustannus noin 6–15 €/km luokkaa Aineiston tarkkuuden ja tarkastelukertojen määrän ohella kustannus on riippuvainen tarkasteltavan verkon sijainnista sekä rakenteesta
Minkälaisia riskejä saadaan kiinni	Tunnistettavat riskikohteet pääosin vastaavia kuin satelliittimenetelmällä tunnistettavat	Mahdollista tunnistaa esim. kaivuut, rakentaminen, rakennukset/rakennelmat, varastointi (puupinot jne.) ja kasvillisuudessa tapahtuvia muutokset
Hyödyt	Valvonta ei aiheuta nykyisellään ylimääräistä työtä tai kustannuksia (pl. ilmoitusten tarkastus)	Systemaattinen tapa kerätä tietoa verkon läheisyydessä tapahtuvista muutoksista erittäin laajalta alueelta Mahdollisten riskikohteiden tunnistaminen entistä aikaisemmin.



	Nykyiset tavat kerätä tietoa	Satelliittipohjainen analyysi – infrastruktuuririskien hallinta
		Mahdollista estää ulkopuolisesta toiminnasta aiheutuvia vikoja Automaattinen tekoälypohjainen tulkinta, ei tarvetta sitoa henkilöstöä tarkastuksiin Muutostulkintaan kerättyä ajantasaista satelliittikuvaa mahdollista käyttää myös muihin tarkoituksiin
Heikkoudet	Ei säännöllistä tai systemaattista tapaa havaita riskikohteita Riskitilanteet voivat olla pitkään huomaamatta ja samalla vahingot kasvavat Ulkopuolisilta tulevat ilmoitukset pitää usein käydä toteamassa/tarkistamassa paikan päällä	Tuo uusia kustannuksia nykyiseen verrattuna Mahdolliset virrehavainnot Tekoälyn tunnistamat muutokset käytävä läpi. Joissain tapauksissa voi vaatia käyntiä paikan päällä Käytettävissä vain kasvukauden aikana, analyysia ei mahdollista tehdä talvella

Infrastruktuuririskien hallinnassa satelliittipohjainen analyysi perustuu muutostulkinta-algoritmiin, joka tunnistaa aikasarjakuvista automaattisesti verkon läheisyydessä tapahtuvia muutoksia. Muutostulkinnan avulla on mahdollista tunnistaa muun muassa kaivutöitä, rakentamista, uusi rakennuksia, varastointia ja avohakkuita. Kuvissa muutoksen kokeneen alueen ohella menetelmä kykenee tunnistamaan muutoksen tyyppin, eli esimerkiksi onko kyseessä rakennus, tie vai kaivuu. Tekoälyn avulla tunnistettavien kohteiden koko on suurelta osin riippuvainen käytetyn satelliittiaineiston tarkkuudesta. Pilotoinnin aikana muutostulkintaa toteutettiin sekä HR- että VHR-tasoisella aineistolla, joista molemmilla onnistuttiin tunnistamaan muutoksia varsin luotettavasti.



HR-tasoisella aineistolla päästiin kokonaisuudessaan noin 75 % osumatarkkuuteen. Erityisen hyvin tällä onnistuttiin tunnistamaan ihmisten tekemiä suuria muutoksia, joista esimerkiksi uudet rakennukset ja esineet kyettiin tunnistamaan 86–100 % prosentin varmuudella. VHR-tasoisella aineistolla päästiin vielä tätäkin parempiin tuloksiin. Kokonaisuudessa oikein tunnistettiin 81 % kaikista kohteista. VHR-aineistolla kyettiin tunnistamaan ihmisen tekemät suuret muutokset erittäin luotettavasti ja esimerkiksi rakennusten ja uusien teiden osalta päästiin 100 % osumatarkkuuteen.



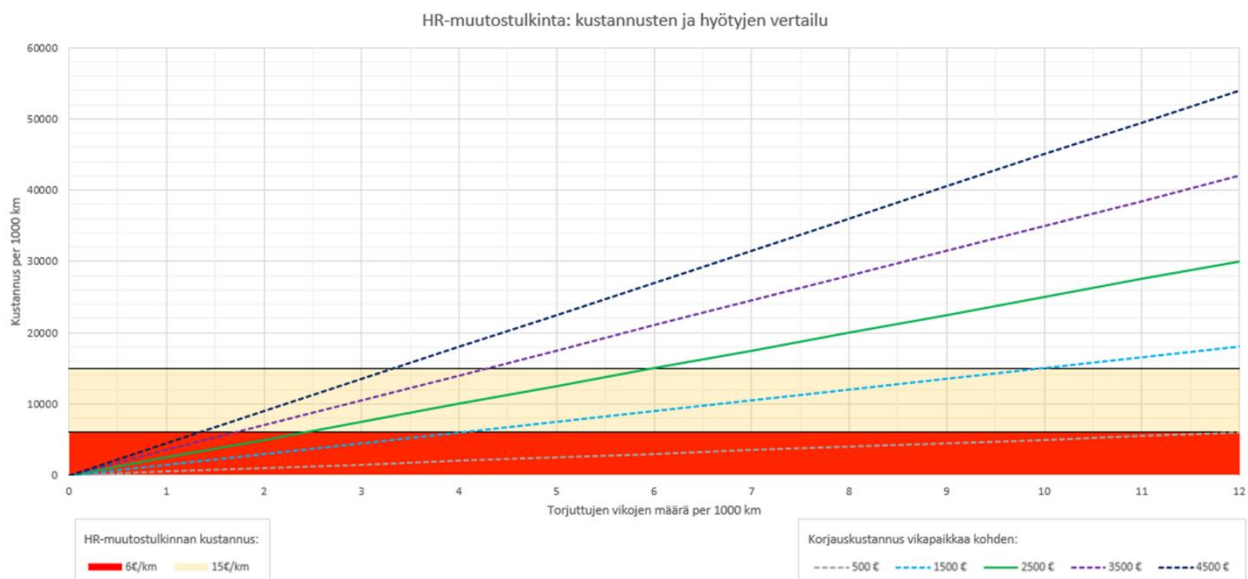
Kuva 28. Esimerkki muutostulkinnasta, jossa tunnistettu uusi rakennustyömaa. Vasemmalla muutoksen alue on esitetty kartalla. Oikealla satelliittikuvat paikasta ennen ja jälkeen muutoksen.

Muutostulkinta perustuu kaupalliseen satelliittiaineistoon, jolloin merkittävän osan palvelun kustannuksista muodostavat aineiston hankintakustannukset. Kustannus on voimakkaasti riippuvainen käytetyn aineiston tarkkuudesta sekä tarkastusten toteutuksen frekvenssistä. Käytännössä 1–4 kertaa vuodesta toteutetun analyysin kustannus HR-tasoisella aineistolla on verkon sijainnista ja rakenteesta riippuen noin 6–15 €/km. VHR-tasoisesta aineistosta tai useampia tarkastuskierroksia toteutettaessa kilometrikustannus nousee tätä korkeammaksi.

Menetelmällä saavutettavien hyötyjen arvioimiseksi selvitimme osana tutkimusta toteutetun kyselyn avulla viankorjausten kustannuksia. Kyselyn pohjalta keskijännitemaakaapelin korjauskustannukset vaihtelevat 650–5000 € välillä ja keskijänniteilmajohdon 500–5000 € välillä. Keskimääräiseksi viankorjauskustannukseksi



arvioitiin keskijännitteisessä maakaapeli- ja ilmajohtoverkossa noin 2500 €. Käytännössä tämä tarkoittaisi, että 6–15 €/km kustannuksella menetelmän tulisi tunnistaa ja estää vian aiheuttavia riskikohteita 1000 verkkokilometriä kohden vähintään 2,4–6 kappaletta maksaakseen itsensä takaisin. Laskelmaa on havainnollistettu kuvassa 29. Tämä laskelma on suuntaa antava, eikä se ota huomioon esimerkiksi KAH-arvoja. Laskelman tarkoituksena on auttaa verkon omistajia arvioimaan ja hahmottamaan menetelmän tuomia hyötyjä erityyppisissä verkoissa.



Kuva 29. Muutostulkintaan liittyvien kustannusten ja hyötyjen vertailu.

Vertailun vuoksi Energiateollisuuden vuoden 2019 keskeytystilaston mukaan ilmajohdoissa tapahtuu vuodessa keskimäärin 13,4 muista syistä johtuvaa vikaa 1000 km kohden. Jos näitä vikoja voidaan torjua 20–50 % estämällä ulkopuolinen toiminta ennen vauriota verkolle, on mahdollisuus säästää vuodessa 5,4–13,4 €/km suoria korjauskustannuksia. Oletuksena edellisessä on 2000 € säästö per estetty tapahtuma verrattuna viankorjauksen kustannuksiin. Myöskään tämä laskelma ei huomioi KAH-arvoja, koska ne vaihtelevat kohteen mukaan hyvin paljon. Laskelmaa on avattu taulukon 13 ensimmäisessä esimerkissä.

Vastaavasti Energiateollisuuden vuoden 2019 keskeytystilaston mukaan maakaapeleissa tapahtuu vuodessa keskimäärin 5,2 muista syistä johtuvaa vikaa 1000 km kohden. Jos näitä vikoja voidaan torjua 20–50 % estämällä ulkopuolinen toiminta ennen vauriota verkolle, on mahdollisuus säästää vuodessa 2,6–6,5 €/km suoria korjauskustannuksia. Oletuksena edellisessä on 2500 € säästö per estetty tapahtuma verrattuna viankorjauksen kustannuksiin. Myöskään nämä vaihtoehtoiset laskelmat eivät huomioi KAH-arvoja. Laskelmaa on avattu taulukon 13 toisessa esimerkissä.

Taulukko 13. Laskelma muutostulkinnan avulla saavutettavista hyödyistä.

Esimerkki 1. Muutostulkinta ilmajohto

Lähtötiedot

Ilmajohtoverkon vikatiheys (muut syyt)	13,4 kpl/1000km	=>	0,0134 kpl/km
Jos näistä onnistutaan torjumaan 20%	20% * 0,0134 kpl/km	=	0,00268 kpl/km
Jos näistä onnistutaan torjumaan 50%	50% * 0,0134 kpl/km	=	0,0067 kpl/km
Viankorjauskustannus (ilman KAH)	500-5000 €	~	2 000 €

Laskelma hyödyistä

Suora hyöty korjauskustannuksissa (20% torjuttu)	0,00268 kpl/km * 2000 €	=	5,36 €/km
Suora hyöty korjauskustannuksissa (50% torjuttu)	0,0067 kpl/km * 2000 €	=	13,4 €/km

Vertailuna HR-muutostulkinnan
kustannus **6-15 €/km**

Esimerkki 2. Muutostulkinta maakaapeli

Lähtötiedot

Maakaapeliverkon vikatiheys (muut syyt)	5,2 kpl/1000km	=>	0,0052 kpl/km
Jos näistä onnistutaan torjumaan 20%	20% * 0,0052 kpl/km	=	0,00104 kpl/km
Jos näistä onnistutaan torjumaan 50%	50% * 0,0052 kpl/km	=	0,0026 kpl/km
Viankorjauskustannus (ilman KAH)	650-5000 €	~	2 500 €

Laskelma hyödyistä

Suora hyöty korjauskustannuksissa (20% torjuttu)	0,00104 kpl/km * 2500 €	=	2,6 €/km
Suora hyöty korjauskustannuksissa (50% torjuttu)	0,0026 kpl/km * 2500 €	=	6,5 €/km

Vertailuna HR-muutostulkinnan
kustannus **6-15 €/km**

7.3 Suurhäiriötilanteen hallinta (Tilanne myrskyssä/myrskyn jälkeen)

Suurhäiriötilanteen hallinnassa tärkeää on mahdollisimman nopea tilannekuvan määrittäminen sekä vikapaikkojen tunnistaminen. Tällä hetkellä tilannekuvan määrittämiseen käytetään suurelta osin helikoptereita sekä pienemmillä alueilla maasta käsin tehtävää vikapaikkojen kartoitusta. Näihin molempiin menetelmiin liittyy kuitenkin rajoitteita esimerkiksi käyttöolosuhteiden, rajallisen kapasiteetin ja nopeuden osalta. Tästä syystä satelliittiaineistoon ja erityisesti SAR-tutka-aineiston hyödyntämiseen



liittyvistä mahdollisuuksista on toivottu ratkaisua näihin tarpeisiin. Taulukossa 14 on esitetty vertailu nykyisten ja SAR-tutkadataan pohjautuvan menetelmien välillä.

Taulukko 14. Tilannekuvan muodostamiseen käytettävien menetelmien vertailu.

	Maasta käsin tehtävät tarkastukset	Helikopteri	Satelliittipohjainen analyysi
Toteutustapa	Vikapaikat ja vianaiheuttajat tunnistetaan paikan päällä	Vikapaikat ja vianaiheuttajat tunnistetaan ilmasta	Optiseen satelliittiaineistoon ja SAR-tutkadataan perustuva analyysi, jossa vikapaikat ja vianaiheuttajat tunnistetaan satelliittiaineistosta
Kustannus	10–50 €/km	10–50 €/km	Menetelmä vaatii vielä lisäkehitystä sekä tarkempaa testausta, joten kustannusten arvioiminen vielä tässä vaiheessa ei ole mahdollista
Nopeus	1–2 km/h (Jalkaisin maastossa) 10–15 km/h (Mönkijällä tai vastaavalla maastossa) 30–50 km/h (Autolla, kun ilmajohdot tienvarressa)	50–100 km/h	Prosessien automatisoiminen vaatii vielä lisätyötä, jotta nopeutta kyetään arvioimaan tarkemmin
Vasteaika	0–12 h	1–48 h	SAR-tutka-aineistoa voidaan tilata halutulta alueelta etukäteen, kun myrskyn ajankohta on selvillä. Saatavuus on vielä nykyisellään rajallista, joten tarkkaa vasteaikaa ei voida määrittää



	Maasta käsin tehtävät tarkastukset	Helikopteri	Satelliittipohjainen analyysi
Vahvuudet	Mahdollisuus tehdä samalla korjaustoimenpiteitä Havaintojen luotettavuus	Maasta käsin tehtäviin tarkastuksiin verrattuna nopea menetelmä Havaintojen luotettavuus	SAR-aineisto mahdollistaa analyysin myös huonolla näkyvyydellä (esim. sade, pilvisyys, sumu) ja sellaisissa olosuhteissa, joissa lentäminen tai maastossa liikkuminen ei ole mahdollista Turvallisuus: henkilöstöä ei tarvitse lähettää vaarallisiin olosuhteisiin
Heikkoudet	Hidas liikkuminen, ei sovi laajojen alueiden nopeaan kartoittamiseen Teille kaatuneet puut yms. myrskytuhot voivat estää/hidastaa liikkumista	Heikko näkyvyys estää/vaikeuttaa havaintojen tekemistä Varalliset lento-olosuhteet, kuten voimakas tuuli ja jäätävät olosuhteet, estävät käytön Konekapasiteetin rajallisuus	Uusi teknologia, joka vaatii vielä jatkokehittämistä ennen laajamittaisempaa operatiivista käyttöä SAR-tutka-aineiston ajoittain rajallinen saatavuus (saatavuuden voidaan olettaa parantuvan tulevaisuudessa)

Hankkeen aikana on tutkittu SAR-aineiston hyödyntämismahdollisuuksia sekä toimivuutta myrskytuhojen kartoittamisessa. Pilotoinnin aikana havaittiin, että uuteen teknologiaan liittyy haasteita niin aineiston saatavuuteen, laatuun kuin sen prosessointiin liittyen. Käytännössä tämä tarkoittaa, että menetelmän parissa on tehtävä vielä lisää kehitys- ja tutkimustyötä ennen kuin se on valmis operatiiviseen käyttöön. Myös aineiston hankintaan ja prosessointiin liittyvät kustannukset osoittautuivat vielä nykyisellään niin korkeiksi, että kustannuksiltaan kohtuullisen palvelun tuottaminen vaatii vielä markkinoiden ja teknologian kypsymistä. Edellä mainittujen syiden takia SAR-tutka-aineistoon pohjautuvasta menetelmästä ei vielä nykyisellään ole haastamaan tällä hetkellä käytössä olevia menetelmiä. Tutka-aineiston hyödyntäminen voidaan kuitenkin



tulevaisuudessa nähdä potentiaalisena menetelmänä myrskytuhojen kartoituksessa, mistä osoituksena toimivat hankeen aikana saadut alustavat tulokset.



8 JOHTOPÄÄTÖKSET

8.1 Satelliittidatan hyödyntäminen verkosto-omaisuuden hallinnassa nykyhetkellä

Tutkimuksen tulokseksi voidaan todeta, että laajemman jatkoprojektin ja tämän tutkimusprojektin tuloksena löydettiin kaksi menetelmää, jotka tarjoavat nykymuodossaan arvokasta lisätietoa verkosto-omaisuuden hallintaan. Nämä menetelmät ovat avoimeen optiseen satelliittiaineistoon perustuva avohakkuiden tunnistaminen ja tarkempiin optisiin aineistoihin perustuva infrastruktuuririskien tunnistaminen. Lisäksi hankkeen aikana tutkittiin kasvillisuuden hallinnan osalta kasvillisuusindeksiin pohjautuvia kasvillisuusriskien arviointia ja raivausten vaikutuksen todentamista, joiden luotettava toteuttaminen osoittautui nykyisellään haastavaksi. Samoin SAR-tutkadatan hyödyntäminen myrskytuhojen kartoituksessa vaatii vielä jatkokehitystä.

Avoimeen satelliittiaineistoon perustuva avohakkuiden tunnistaminen

Satelliittiaineistoihin perustuva avohakkuiden tunnistaminen on täysin uudenlainen menetelmä, jonka avulla on mahdollistaa tunnistaa ilmajohtojen läheisyydessä tapahtuvia avohakkuita. Järjestelmä hälyttää hakkuuaukean ja linjakadun väliin jääneistä reuna- tai kiilapuista, jotka muodostavat kohonneen riskin puiden kaatumiselle linjan päälle. Menetelmä ei kilpaile nykyisten kasvillisuuden hallintamenetelmien kanssa, vaan tarjoaa verkon haltijalle sellaista tietoa, jota aikaisemmin ei ole ollut saatavilla.

Avohakkuiden tunnistaminen on mahdollista tehdä avoimesta satelliittiaineistosta, joten se mahdollistaa laajojen ja kaukaisten alueiden jatkuvan seurannan. Aineiston hyvän saatavuuden ansiosta tulkintaa on mahdollista toteuttaa kasvukauden aikana jopa viikoittain. Hankkeen aikana toteutetun koekäytön aikana menetelmän todettiin tunnistavan avohakkuut erittäin luotettavasti jopa yli 80 % tarkkuudella. Käytännössä tällaista palvelua on mahdollista tarjota verkonhaltijalle arviolta 3–6 €/km kustannuksella. Vertaamalla menetelmän kustannuksia viankorjausten kustannuksiin,



tulisi menetelmän estää KJ- ilmajohtoverkossa 1,5–3 kaatuneiden reunapuiden aiheuttamaa vikaa 1000 verkkokilometriä kohden maksaakseen itsensä takaisin.

Tarkempiin satelliittiaineistoihin perustuva infrastruktuuririskien tunnistaminen

Menetelmä tunnistaa optisten satelliittikuvien aikasarjoista verkon läheisyydessä tapahtuvia muutoksia esimerkiksi kasvillisuudessa, maanpinnassa, rakennuksissa tai muissa kohteissa. Menetelmä sopii siis käytettäväksi niin urbaanissa ympäristössä kuin myös metsäisillä alueilla. Käytännössä tämä auttaa tunnistamaan ulkopuolisille henkilöille sekä verkosto-omaisuudelle riskin muodostavia kohteita ennen vahinkojen syntymistä. Riskien tunnistaminen ei kilpaile nykyisten menetelmien kanssa, vaan kyseessä on täysin uudenlainen palvelu, joka mahdollistaa ennakkoon määritellyn verkkoalueen systemaattisen riskikohteiden tunnistamisen. Aikaisemmin vastaavien kohteiden tunnistaminen on perustunut satunnaisiin ilmoituksiin ja havaintoihin.

Riskikohteiden tunnistaminen toteutetaan hyödyntämällä HR- tai VHR-tasoista optista satelliittiaineistoa. Koska kyseessä ovat kaupallisten toimijoiden tarjoamat aineistot, on tulkinnan kustannus riippuvainen aineiston tarkkuudesta sekä siitä, kuinka usein ja kuinka suurelle alueelle analyysi halutaan tehdä. Kustannusten rajaamiseksi tulkinta voidaan kohdistaa koko verkon sijasta pienemmälle kriittiseksi koetulle alueelle. Hankkeen aikana saatujen tulosten valossa muutosten tunnistaminen onnistuu luotettavasti sekä HR- että VHR-tasoisella aineistolla jopa lähes 80 % varmuudella. HR-tasoista aineistoa käytettäessä tällaista palvelua on mahdollista tarjota verkonhaltijalle arviolta 6–15 €/km kustannuksella. Vertaamalla muutostulkinnan kustannuksia viankorjausten kustannuksiin, tulisi menetelmän estää KJ-ilmajohto- tai maakaapeliverkossa 2,4–6 riskikohteiden aiheuttamaa vikaa 1000 verkkokilometriä kohden maksaakseen itsensä takaisin.

SAR-tutkadataan perustuva tilannekuvan määrittäminen

Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta, että SAR-tutkadataan perustuva myrskytuhojen kartoitus ei vielä nykyisellään ole valmis hyödynnettäväksi operatiivisessa toiminnassa.



Hankkeen aikana saatiin rohkaisevia tuloksia menetelmän kyvykkyydestä tunnistaa myrskytuhoille ominaisia muutoksia. Saatuihin tuloksiin liittyy kuitenkin jonkin verran epävarmuutta ja tulkinnanvaraisuutta, minkä takia menetelmän luotettavuus ei ole vielä nykyisellään riittävällä tasolla operatiivista käyttöä silmällä pitäen. Tulkinnan luotettavuuden ohella myös tutka-aineiston saatavuuteen, laatuun sekä kustannuksiin liittyy nykyisellään rajoittavia tekijöitä, jotka omalta osaltaan jarruttavat SAR-tutkadatan pohjautuvia menetelmien käyttöä.

8.2 Satelliittidatan hyödyntäminen verkosto-omaisuuden hallinnassa tulevaisuudessa

Satelliittien tuottaman datan saatavuus ja laatu ovat parantuneet merkittävästi viime vuosien aikana. Saman aikaisesti myös aineiston tulkintaan ja käsittelyyn liittyvät menetelmät ovat ottaneet merkittäviä harppauksia. Toimialan kehityksen osalta näköpiirissä ei ole merkittäviä esteitä, vaan saman suuntaisen kehityksen voidaan odottaa jatkuvan myös tulevina vuosina. Käytännössä tämä kehitys tulee näkymään jo nyt toimiviksi todettujen menetelmien luotettavuuden ja kustannustehokkuuden parantumisenä, minkä lisäksi niiden rinnalle voidaan odottaa kehittyvän uusia ratkaisuja eri käyttötarkoituksiin. Mahdollisista uusista ratkaisuista käytännön esimerkkinä voidaan pitää SAR-tutkadatan hyödyntämistä myrskytuhojen tunnistamisessa.

Nykyisten ratkaisujen voidaan odottaa kehittyvän jo lähitulevaisuudessa. Tässä tutkimuksessa esitetyt menetelmät ovat tekoälypohjaisia, joissa luotettavuus paranee sille annetun palautteen mukaan. Tästä osoituksena toimii tämän hankkeen aikana saadut tulokset, joissa muutostulkinnan tulokset paranivat selvästi kahden havaintokierroksen välillä. Lisäksi aihealueeseen liittyvä jatkuva tutkimus ja tuotekehitys tulevat parantamaan satelliittiaineiston käsittelyyn liittyviä menetelmiä ja toimintatapoja. Käytännössä tämä tulee tarkoittamaan, että tulevaisuudessa samasta aineistosta kyetään ulosmittaamaan vielä nykyistä enemmän informaatiota. Esimerkiksi optisen avoimen datan kohdalla näyttäisi, että aineistosta on mahdollista avohakkuiden lisäksi tunnistaa myös muita havaintoja, kuten alkavia rakennuskohteita. Algoritmien ja



menetelmien parantumisen lisäksi positiivista kehitystä voidaan odottaa myös käytössä olevan optisen satelliittiaineiston saatavuuden ja kustannusten osalta. Käytännössä tämä avaa mahdollisuuden toteuttaa aikasarjoihin perustuvaa muutostulkintaa nykyistä useammin sekä entistä laajemmilla alueilla. Lisäksi kustannusten laskeminen avaa mahdollisuuden nykyistä tarkempien aineistojen käyttöön, mikä mahdollistaa nykyistä pienempien kohteiden havaitsemisen.

Kuten tutkimuksen tuloksena todettiin, SAR-tutkadatan hyödyntäminen myrskytuhojen kartoittamisessa ei osoittautunut vielä riittävän kypsäksi menetelmäksi operatiivisessa toiminnassa hyödynnettäväksi. Menetelmään liittyy kuitenkin kiistatonta potentiaalia, joka voidaan odottaa lunastettavan jossain vaiheessa tulevaisuudessa. Tämä vaatii kuitenkin lisää tutkimus- ja kehitystyötä datan tulkinta-algoritmien ja esikäsittelymenetelmien kehittämiseksi. Samaan aikaan vetoapua voidaan odottaa saatavan aineiston laadun sekä saatavuuden parantumisesta. Kehityksen voidaan odottaa tapahtuvan jo lähitulevaisuudessa, sillä kyseessä on suhteellisen uusi menetelmä, jolle on ilmennyt runsaasti kysyntää myös muissa käyttötarkoituksissa.