



1. Hankkeen esittely

1.1 Perustiedot hankkeesta

Hankkeen nimi: Tuulituho-haukka

Toteuttajat: Suomen Metsäkeskus, ETForestService, Aalto, Ilmatieteen laitos

1.2 Hankkeen tavoitteet

Hankkeen tavoitteena oli tuottaa operatiivinen tuhokuviokohtainen tuulituhojen seurantapalvelu Metsäkeskuksen ja sen asiakkaiden käyttöön. Asetettu tavoite kuitenkin osoittautui hyvin haastavaksi eritoten koska tarpeeksi voimakkaat myrskyt ovat harvinaisia (koneoppimiseen kerätty aineisto epäedustava), aiheeseen tarvittavan aiheeseen liittyvän suuren perustutkimuksen määrän johdosta sekä satelliittitutka-aineiston ei-triviaalin ja metsäsovelluksiin vaikean luonteen vuoksi (mm. koko Suomi katetaan vasta 6 päivän aikana). Koska operatiivinen menetelmä yksittäisen tuhokuvion riittävään tarkkaan tunnistamiseen vaati enemmän aikaa kuin hankkeeseen on allokoitu, alkuperäisiä tavoitteita muutettiin.

Alkuperäisiä tavoitteita muutettiin siten, että kehitettiin menetelmä ja maanlaajuinen palvelu, joka tuottaa metsätuhoista nopean tilannekuvan ohella arviot tuhoutuneista pinta-aloista sekä karkean arvion tuhoutuneesta puustosta. Tulokset lasketaan kunkin yksittäisen myrskyn alueelle sekä maakuntakohtaisesti. Vaikka toteutettava palvelu ei ole tuhokuviotasolla yhtä tarkka kuin alkuperäinen tavoite oli, sillä kuitenkin päästään entistä lähemmäs mahdollisimman reaaliaikaista tilannekuvaa heti myrskyn jälkeen sekä tilannekuvan vaiheittaista tarkentamisen tarvetta voidaan ennakoida seuraavien päivien osalta.

Hankkeen tavoitteet liittyivät maankäyttösektorin ilmastoimenpidekokonaisuuden tavoitteisiin¹ etenkin lisääntyvien metsäriskien (mm. metsätuhot) seurannan osalta, joka osaltaan tukee hiilinielujen ja -varastojen säilyttämistä.

1.3 Yhteenveto hankkeesta

Hankkeen osapuolet:

Suomen Metsäkeskus (SMK): Aki Hostikka, Yrjö Niskanen, Harri Hytönen, Anne Rakemaa

ETForestService (ETFS): Erkki Tomppo

Aalto: Jaan Praks

Ilmatieteen laitos (IL): Mikko Strahlendorff, Terhikki Manninen, Mikko Laapas, Burak Simsek, Tuomo Smolander, Emmihenna Jääskeläinen, Katriina Veijola, Pinja Venäläinen, Hilppa Gregow, Mika Rantanen, Meri Virman, Matti Kämäräinen, Antti Mäkelä

¹ <https://mmm.fi/maankayttosektorin-ilmastosuunnitelma>



Hankkeen budjetti, kokonaiskustannukset, MMM:n myöntämä rahoitus, hankeosapuolten omarahoitus:

	Hankkeen budjetti (€)	Toteutuneet kokonaiskus- tannukset (€)	Tot. MMM rahoitus (€)	Hankeosa- puolten omarahoitus (€)
IL, 70%	282 857	291 657,83	198 000 (kattaa ETFS alihankinnan)	93 657,83
ETFS	(52 500) sis. IL budjettiin			
SMK, 100%	52 000	42 433,74	42 433,74	-
Aalto, 70%	42 857	42 857	30 000	12 857
YHTEENSÄ	377 714	376 948,57	270 433,74	106 515,83

Hankkeessa kehitettiin menetelmä, joka tuottaa päivittäin myrskytuhon tilannekuvan edellisen vuorokauden tuulihavaintojen perusteella. Tilannekuva muodostettiin simuloimalla toteutuneiden tuulenpuuskien ja metsävaratiedon avulla tuulituhon alue ja laajuus, sekä arvioitu puustotuhon tuhomäärä.

Tuulenpuuskahavainnoista laskettu tuulituhoriski yhdistettiin tutkasatelliittikuvista tulkittuihin puustomuutoshavaintoihin, joka mahdollistaa metsätoimijoiden arvioida missä tuhoja on sattunut ja missä määrin. Tiedot sisältäen laajasti kaukokartoitusaineistoja vietiin saataville hankkeessa toteutetun avoimen ja ilmaisen verkkopalvelun kautta (<https://tuulituhohaukka.out.ocp.fmi.fi/>)

Kehitetyt menetelmät ja palvelu mahdollistavat myrskytilanteen vaikutusten seurannan uudella tavalla, jota ei ole aiemmin ollut käytettävissä. Koska tulokset mahdollistavat metsätuhojen alueellisen seurannan, tuloksia voidaan hyödyntää lakisääteisten metsänkayttöilmoitusten seurannassa.

Metsätoimijoiden ohella palvelu tukee myös muiden toimijoiden tarpeita (mm. pelastustoimi), koska palvelun avulla voidaan tehostaa tilannekuvan saamista myrskyn aiheuttamista vahingoista.

Hankkeessa tehty tutkimus osoittautui haastavaksi, sillä tuulituhoriskin arviointi ja tutkasatelliittikuvien muutosanalyysi ovat laskennallisesti vaativia tehtäviä. Riittävän usein saatavissa olevat Euroopan Avaruusjärjestön Sentinel-1 satelliitin tutkakuvat käyttävät



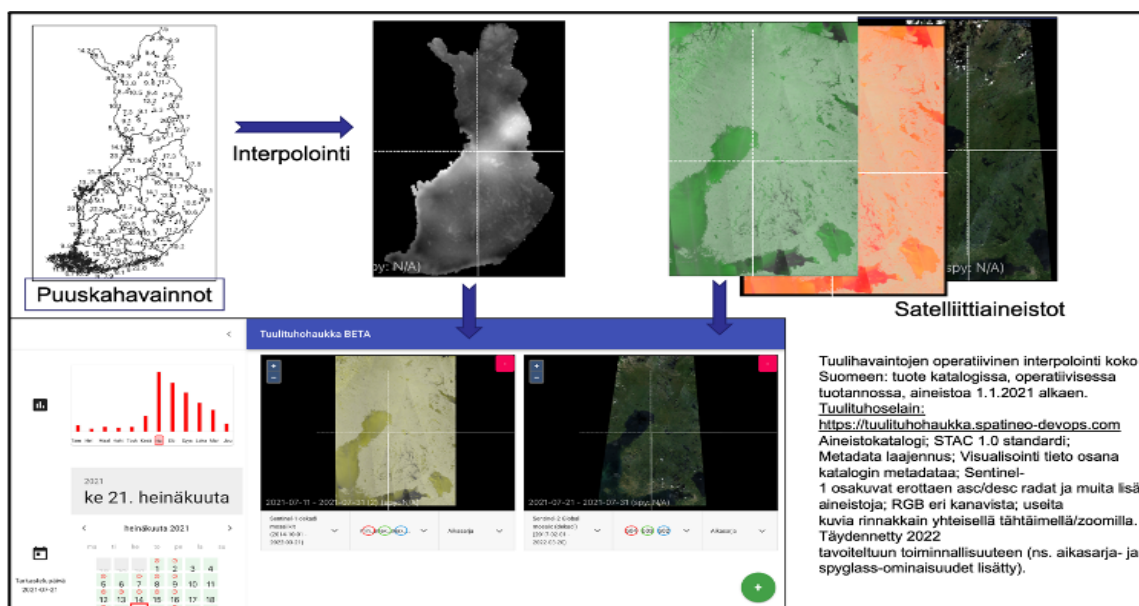
kuvauksessa niin sanottua C-kaistaa, taajuus 5,405 GHz. Taajuus ei ole optimaalinen metsäsovelluksiin, mutta data on tällä hetkellä ainoa mahdollinen lähes reaaliaikaiseen monitorointiin. Lisäksi etenkin kesäisten rajuilmojen aiheuttamien voimakkaiden puuskien havainnointi ja ennustaminen on vaikeaa rajuilmojen pienen koon johdosta suhteessa olemassa olevaan havaintoverkkoon. Hankkeen aikana esiintyi etenkin Pohjois-Pohjanmaalla sekä Kainuussa merkittäviä tuulituhoja aiheuttanut Paula-rajuilma (22.6.2021): tämä rajuilma on ollut keskiössä menetelmien kehittämisen osalta, koska sen aiheuttamat tuhot voitiin kerätä/koostaa melko tarkasti jo hankkeen aikana. On tärkeä huomata, että kyseessä on kuitenkin vain yksi tapaus, jolloin sen tilastollinen edustavuus on pieni.

Koneälyyn pohjautuvan ratkaisun kehitykseen tarvitaan edustava aineisto, jossa on tarpeeksi erilaisia tapauksia. Tutkasatelliittihavaintoja on saatavilla vasta vuodesta 2015, mutta voimakkaita myrskytapauksia olisi edustavimmin vuodesta 2010 ja aikaisemmin. Erään koneoppimismenetelmän testaus paljasti, että 2015 eteenpäin oleva aineisto ei ole tarpeeksi vaihteleva mallin kehitykseen pikselitasolla. Puuskahavainnoissa on vastaavia haasteita: myrskyjen voimakkaimmat puuskat eivät välttämättä osu havaintoasemille ja siksi siellä missä tuhoja on tapahtunut ei voimakkaita voimakkaita puuskia ole havaittu. Näin ollen näistäkään havainnoista ei suoraan voitu luoda koneoppimismenetelmällä mallia.

Haasteet olivat tiedossa hankkeen suunnittelussa, jonka vuoksi menetelmäkehityksessä haettiin ratkaisua, jolla harvoja puuskahavaintoja voisi levittää muiden tietojen avulla hilaan. Paula-myrskyn tapaustutkimus osoitti kuitenkin, että jos myrskyn voimakkaimpia puuskia ei havaita millään asemalla, mikään menetelmä ei niitä saa esille. Tätä varten tarvittaisiin mittavasti enemmän perustutkimusta ja vaihtoehtoisten havaintoaineistojen hyödyntämistä, johon hankkeessa ei kuitenkaan ollut resursseja.

Hanke onnistui kuitenkin tuottamaan karkean menetelmän, joka tuottaa tuhoarvion voimakkaimpien myrskypäivänä havaittujen puuskien avulla, tuhokuvioarvioita yksinkertaisemmalla satelliittilaskentamenetelmällä sekä käyttöliittymän, jolla monipuolisesti voi tutkia asiaan liittyviä aineistoja.

Hankkeessa tuotetun palvelun tekninen kuvaus on esitetty kuvassa 1 ja hankkeessa käsitellyt satelliittiaineistot taulukossa 1. Kuva 2 on Metsäkeskuksen www.sivuille tuotettu metsänkäyttöilmoitusten visualisointityökalu.



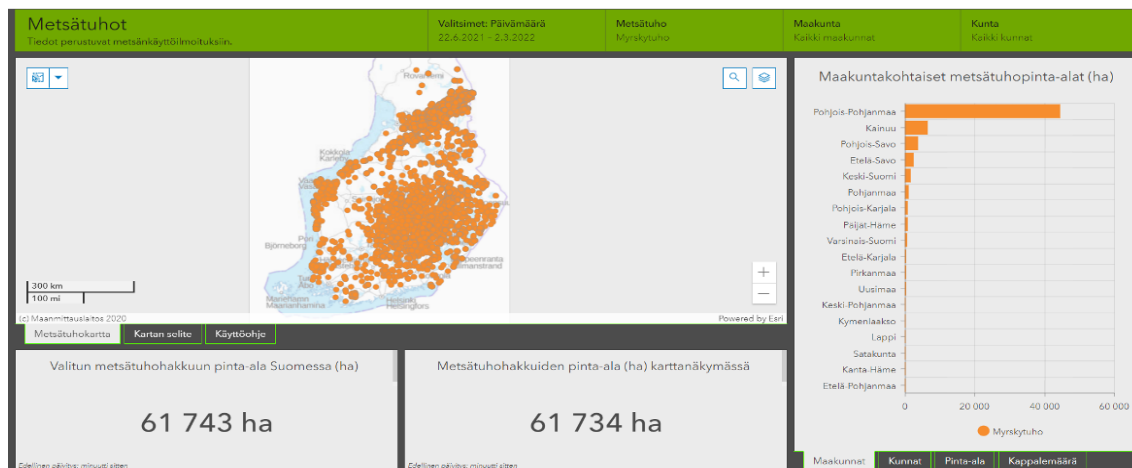
Kuva 1. Toteutus koostuu kahdesta eri havaintolähteestä, puuskahavainnoista sekä satelliittimittauksista. Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemilla mitatut puuskat (pistehavainnot) interpoloidaan koko Suomeen 500m x 500m hilaan (kts. tarkemmin luku 2.1.2) ja laitetaan saataville hankkeen portaaliin. Vastaavasti satelliittihavainnot (useita eri tuotteita) viedään portaaliin.

Taulukko 1. Hankkeessa käsitellyt ja käyttöliittymän kautta käyttöön viedyt aineistot. Taulukon aineistojen lisäksi myös seuraavat neljä katalogia on viety käyttöliittymään: Sentinel-1 osakuvat, Tuulituhoriski, MML 2m DTM sekä Landsat indeksit/vuosikuvat.

Lähde ja tuote	Resoluutio ja aikaikkuna	Alue	Koko
Sentinel-1 takaisinsironta VV ja VH polarisaatioille päivittäin ja dekadi mosaiikit	20m 1.10.2017-31.12.2020 10m 1.6.2021-	Suomi ja ympäristö	42.5 TB 40 TB/v
Sentinel-2 Global mosaic kanavittain pinta-heijastussuhde dekadi/vuosimosaiikkeina	10m vuodet 2017-2020 20m 1.10.2017-	Suomi ja ympäristö	8.8 TB 2 TB/v
Sentinel-2 Indeksimosaiikit kuukausittain huhti-lokakuulta (ndvi, ndbi, ndmi, ndsi, ndti)	10m 10/2016-10/2021	Suomi ja ympäristö	1.4 TB
LUKE Monilähdeinventoinnin 45 metsävarateemaa	16m 2006-2019	Suomi	0.4 TB
LUKE Myrskytuhoriskikartta	16m 2015 tiedoista	Suomi	0.3 TB
SMK Latvuskorkeusmalli	16m 2008-2019 tiedoista	Suomi	0.5 TB



SMK Metsävara hilatieto	16m 2008-2019 tiedoista	Suomi	0.7 TB
Tuhotunnistustuote rasterina ja shape:ina	10m 1.8.2021-	Suomi	1 TB/v
Yhteensä	Staattinen + kertyvä	3,3 TB	52 TB/v



Kuva 2. Metsätuhoikäyttöilmoitukset karttatuotteena Suomen Metsäkeskuksen käyttöliittymässä. <https://metsakeskus.maps.arcgis.com/apps/dashboards/1ac031022db14461b4ec7256423f3c70>

Uusien menetelmien sekä aineistojen lisäksi hanke tuotti kolme tieteellistä käsikirjoitusta, joista 1 on julkaistu ja kaksi lähdyssä arviointiin vuoden 2023 alkupuolella (huom. näiden lisäksi on mahdollista, että myöhemmin tuotetaan muitakin käsikirjoituksia hyödyntäen hankkeen aineistoja).

2. Hankkeen toteutus ja toteutusvaiheen arviointi

2.1 Menetelmät ja aineisto

Seuraavissa luvuissa kuvataan tarkemmin satelliitti- ja puuskahavaintoihin perustuvat menetelmät sekä aineistot.

2.1.1 Sentinel -satelliittipohjaiset menetelmät ja aineistot

Menetelmiä kehitettiin ja testattiin kahdella alueella

- Etelä-Suomen Kiira-rajuilman alue (12.8.2017)
- Pohjois-Pohjanmaan ja Kainuun alueen Paula-rajuilman alue (22.6.2021)

Tutkakuvia käyttävien menetelmien ja testien tietolähteinä käytettiin seuraavia tietolähteitä:

- Moniaikaisia Sentinel-1 SAR datat, useita kymmeniä SAR kuvia



- Monilähteen VMI:n metsävaratiedot, puuston keskiläpimitta, pituus, ikä, tilavuus, kuva-alkion koko 16 x 16 m
- Maanmittauslaitoksen korkeustiedot ja niistä johdettu rinteiden suunta ja kaltevuus
- Metsäkeskuksen metsävaratiedot
- Ilmatieteen laitoksen puuskatiedot
- Sentinel-2 kuvien analyysiin perustuvat paikannetut myrskytuhot

Opetusaineistot

Luokitusten ja estimoinnin opetustietoina käytettiin Metsäkeskuksen tuhojen korjaushakkuutietoja sekä Sentinel-2 kuvien analyysiin perustuvia tuhoarvioita. Optisen alueen Sentinel-2 kuvilla voidaan tuhot paikantaa varsin luotettavasti. Niiden saatavuus edellyttää pilvetöntä säätä ja riittävää valaistusta, joten ne eivät sovi near-on-line -menetelmän tietolähteeksi. Ne soveltuvat menetelmäkehitykseen ja osaksi operatiivista menetelmää, jos SAR datat pystytään sovittamaan samaan skaalaan.

Sentinel-2 kuvilla (kuvaukset 4.6.2021 ja 8.7.2021) estimoitiin tuhon todennäköisyys asteikolla [0,100] Paula rajuilman alueella. Testeissä estimointi osoittautui tarkaksi siten, että arvot [95,100] merkitsevät uudistushakkuuta ja arvot [75,95) poimintahakkuuta edellyttävää tuhoa.

Analyysi

Sentinel-1 datojen esikäsittelyssä johdettiin takaisinsirontakertoimet VH ja VV polarisaatioille. Käytettiin sekä Ilmatieteen laitoksen palvelimen dataa että omaa esikäsittelyä. Kuvanalkion kooksi valittiin 10 m x 10 m ja koordinaattijärjestelmäksi ETRS-TM35FIN. Laskettiin ja testattiin kuvanalkiokohtaisia piirteitä, sirontakertoimia, reunan säilyttäviä suodatusmenetelmillä keskiarvoistettuja kertoimia ja segmentointimenetelmiä ja segmenttikohtaisia kertoimien tunnuslukuja. Suodatus poistaa SAR kuville tyypillistä häilyntää (speckle). Segmentointimenetelmien avulla on tarkoitus identifioida muuttuneet kuvanalkioryhmät.

Menetelmiksi on kehitetty ja testattu sekä ohjaamattomia että ohjattuja luokitus- ja estimointimenetelmiä, esimerkiksi

- Tarkennettu k:n lähimmän naapurin menetelmä (ik-NN), missä piirteiden painot optimoidaan geneettisen algoritmin avulla. Menetelmä tuottaa sekä rasterimuotoiset tiedot että alueittaiset tuhoestimaatit, pinta-alat ja tilavuudet puolajiryhmittäin (Tomppo et al. 2021²)
- Tukivektoriluokitus (SVM)
- Moniluokkainen logistinen regressio (MLR)
- Random forest -luokitus (RF), lumituhojen tapauksessa

² Tomppo, E., Ronoud, G., Antropov, O., Hytönen, H., & Praks, J. (2021). Detection of forest windstorm damages with multitemporal sar data—A case study: Finland. *Remote Sensing*, 13(3), 383.



- Alustavasti STATSAR -menetelmä, joka käyttää k-means klusterointia ja tilastollisten tunnuslukujen ei-lokaalia suodatusta (Manninen et al. 2022³).

Tutkakuvien analyysissä on olennaista analyysiyksiköiden valinta sekä myös käytettävien piirteiden eli muuttujien valinta. Esimerkkejä testatuista analyysiyksiköistä olivat

- Metsikkökuviot
- SMK hakkuuilmotuskuviot
- Kuvanalkioryhmät
- Segmentointimenetelmillä erotetut yksiköt

Piirteinä testattiin

- Takaisinsironnasta johdetut piirteet
- Sirontakertoimien keskiarvot, hajonnat, suhteet ym. muunnokset

Taulukko 2: Kuvanalkioryhmätason tuhoennusteen luotettavuus SVM menetelmällä validointiaineistossa Paula-myrskyn alueella käyttäen Metsäkeskuksen hakkuutietoja, vaihtoehtoisesti kahta tai kolmea Sentinel-1 kuvaa (20.6.2021 ja 26.06.2021 tai lisäksi 02.07.2021), korkeustietoja sekä vaihtoehtoisesti ilman puuskatietoja ja puuskatiedoilla, Paula-myrskyn alue 22.6.2021.

Data	Kokonais tarkkuus	Käyttäjän tarkkuus			Tuottajan tarkkuus		
		Ei tuhoa	Vakava	Lievä	Ei tuhoa	Vakava	Lievä
2 S1, ei puuska	0.55	0.61	0.51	0.58	0.30	0.81	0.54
2 S1, puuska	0.71	0.73	0.73	0.64	0.80	0.78	0.50
3 S1, ei puuska	0.63	0.52	0.69	0.59	0.59	0.77	0.40
3 S1, puuska	0.66	0.82	0.65	0.55	0.64	0.74	0.57

Taulukko 3: Kuvanalkiotason tuhoennusteen luotettavuus Paula-myrskyn alueella ik-NN -menetelmällä käyttäen LOO -validointia vaihtoehtoisesti ilman geneettiseen algoritmiin (GA) perustuvaa optimointia ja GA optimoinnilla. Syöttötiedot: 5 Sentinel-1 kuvaa, 2.6.2021, 8.6.2021, 14.6.2021, 20.6.2021 ja 26.6.2021, monilähteen VMI:n tiedot puuston keskiläpimitta, pituus, ikä ja tilavuus sekä maaston korkeus, rinteiden suunta ja korkeus. Vastemuuttuja on tuhon todennäköisyys asteikolla [0,100]. Opetusaineistona on Sentinel-2 tuhoennusteet.

³ Manninen, T., E. Jääskeläinen and E. Tomppo, 2022: "Nonlocal Multiscale Single Image Statistics From Sentinel-1 SAR Data for High Resolution Bitemporal Forest Wind Damage Detection," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, pp. 1-5, 2022, Art no. 2504705, doi: 10.1109/LGRS.2022.3169473.



	Ilman GA optimointia	GA optimoinnilla
RMSE	14.135	7.930
Harha	-0.297	-0.207

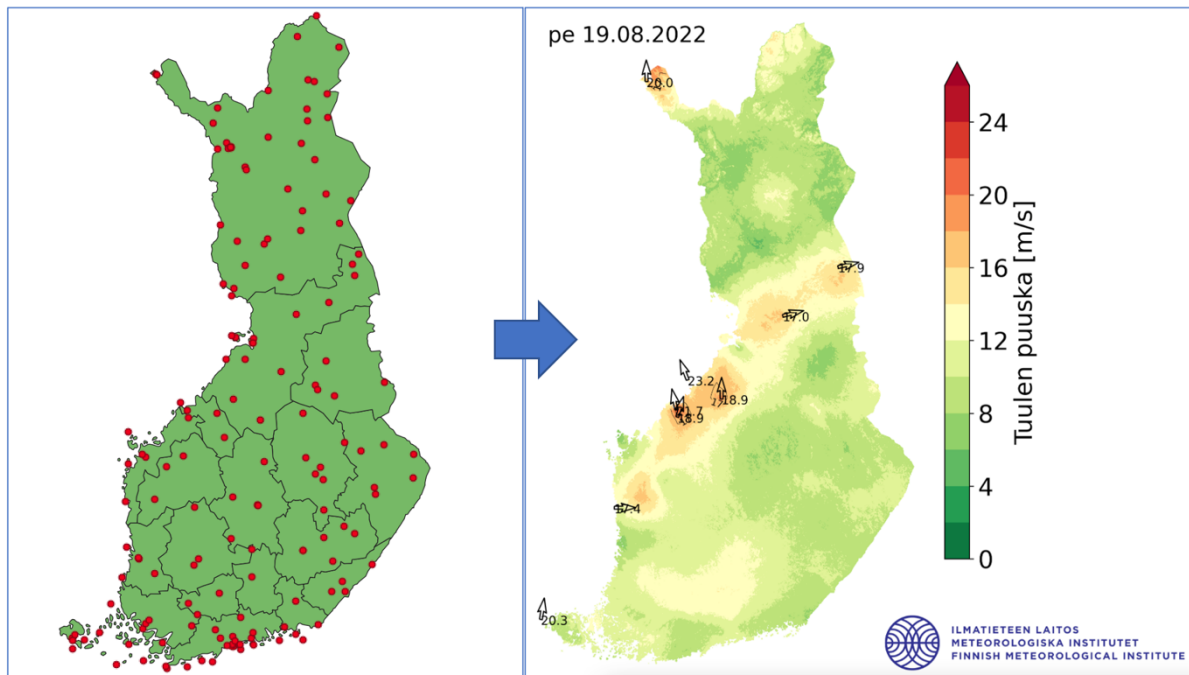
Tutkituista menetelmistä valittiin tarkennettu k:n lähimmän naapurin menetelmä (ik-NN) implementoitavaksi Ilmatieteen laitoksen palvelimelle. Algoritmin koodit modifioitiin siten, että Sentinel-1 tiedostojen ja muiden rasterimuotoisten tiedostojen maantieteellinen peittoala ja kuvanalkion koko voivat olla erilaisia, mikä vähentää tarvittavaa esikäsittelyä nopeassa analyysissä ja nopeuttaa tuloslaskentaa. Luvussa 3.1 on esimerkkejä menetelmällä lasketuista tuloksista kahdella tuhoalueella.

2.1.2 Tuulenpuuskatietoihin perustuva tilannekuva

Myrskytuhojen tilannekuva lasketaan Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemilla havaittujen tuulenpuuskatietojen perusteella. Tuulenpuuskamittaukset ovat säähavaintoasemilla jatkuvia, mutta tässä työssä havainnoista käytetään vuorokauden maksimituulenpuuskaa.

Kriging-interpolointi

Puuskainterpoloinnissa käytettiin nk. kriging-interpolointia, tarkemmin sanottuna menetelmää nimeltä 'Kriging with external drift'. Siinä interpoloinnin lähtötietona käytettyjen sääasemakohtaisten havaintojen alueellista vaihtelua havaintopaikkojen välissä selitetään joukolla apumuuttujia. Tässä tapauksessa ne olivat koordinaatit x ja y, korkeus, havaintopisteen merellisyys/järvisyys ja alustan rosoisuutta (metsä, pelto, vesistö jne.) kuvaava rosoisuusparametri. Käytetyt puuskatuulen havainnot ovat Ilmatieteen laitoksen virallisilla sääasemilla havaittuja vuorokauden maksimipuuskia, joita on saatavilla noin 150 asemalta ympäri Suomea (kuva 3 vasen). Tuotettu puuskatuulikartta on resoluutioltaan 500 x 500 metriä (kuva 3 oikea).



Kuva 3. Vasen: Ilmatieteen laitoksen puuskia mittaavat havaintoasemat. Oikea: Kriking-interpoloitu puuskatuulikartta 500m x 500m resoluutiolla.

Puuskahavaintoihin perustuva tilannekuva

Edellä kuvattu kriging-interpolointi laskettiin jokaiselle vuorokauden päivälle vuosille 2010-2021. Tämä 12 vuoden ajanjakso valittiin edustamaan tuulenpuuskan normaaliajanjaksoa, eli ns. klimatologiaa. Perinteistä 1991-2020 ajanjaksoa ei voitu käyttää, sillä tuulenpuuskien yhtäjaksoiset mittaukset alkoivat vasta myöhemmin 2000-luvulla. 12-vuotisesta tuulenpuuska-aineistosta laskettiin jokaiselle maa-alueen hilapisteelle kolme raja-arvoa (keltainen, oranssi ja punainen, taulukko 4) ennalta määritettyjä prosenttipisteitä käyttäen. Kullekin hilapisteelle oli jakaumassa näin 4380 arvoa (365 päivää x 12 vuotta) josta raja-arvot laskettiin. Prosenttipisteet määriteltiin siten, että keltainen raja-arvo edusti noin 2-3 kertaa vuodessa esiintyvää tuulenpuuskaa, oranssi noin kerran 3 vuodessa esiintyvää tuulenpuuskaa ja punainen noin kerran 10 vuodessa esiintyvää tuulenpuuskaa. Prosenttipisteiden numeroarvoiksi määriteltiin 99 % (keltainen), 99,9 % (oranssi) ja 99,97 % (punainen).

Prosenttipisteisiin perustuvat raja-arvot ottavat paremmin huomioon tuulen ilmastollisen vaihtelun ko. sijainnissa kuin jokaisessa hilapisteessä olevat kiinteät raja-arvot. Esimerkiksi punainen (kerran 10 vuodessa toistuva) raja-arvo Muonioon on 44,7 m/s, mutta Myrskylään vain 20,7 m/s. Korkeampi arvo Muoniossa selittyy tuntureilla, joissa mitataan talviaikaan suuria tuulennopeuksia. Esimerkiksi 25 m/s tuulenpuuska ei aiheuta Muoniossa juurikaan tuhoa, mutta Myrskylässä vastaava tuulennopeus olisi tuhoisaa.

Taulukko 4. 12 vuoden (2010-2021) tuulenpuuska-aineistosta lasketut raja-arvot tilannekuvatuotteelle.



Raja-arvo	Kuvaus	Esiintyvyys	Prosenttipiste
Keltainen	Pienialaiset tuulituhot mahdollisia	2-3 krt vuodessa	99 %
Oranssi	Tuulituhot todennäköisiä	kerran 3 vuodessa	99,9 %
Punainen	Laajat tuulituhot erittäin todennäköisiä	kerran 10 vuodessa	99,97 %

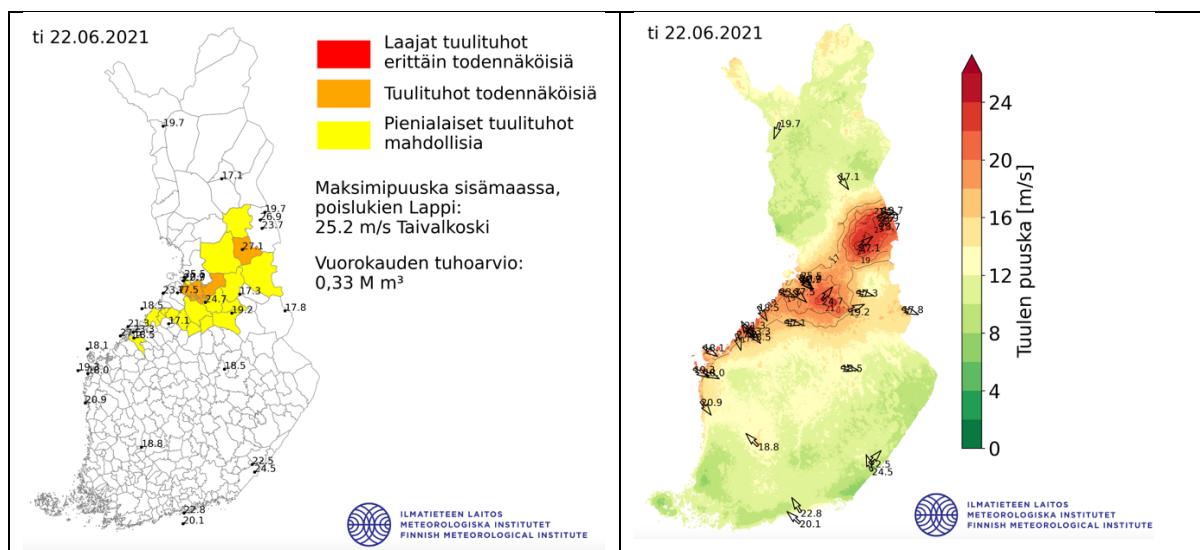
Varsinaisessa tilannekuvatuotteessa lasketaan edellisen päivän kriging-interpoloituun tuulenpuuska-aineistoon perustuva tuulennopeuskartta, jonka jälkeen havaittuja tuulenpuuskia verrataan aiemmin laskettuihin raja-arvoihin. Jos jossain sijainnissa havaittu tuulennopeus ylittää jonkin ennalta määrityistä raja-arvoista, kyseinen kunta väritetään tuotteessa raja-arvoa vastaavalla värillä. Esimerkkitapaus Paulan päivältä (22.6.2021) on esitetty kuvassa 4. Kunnat, joissa tuulennopeus ylittää ennalta määritetyt prosenttipisteisiin perustuvat raja-arvot ovat väritetty raja-arvoa vastaavalla värillä. Tässä tapauksessa korkein havaittu tuulennopeus oli 25,2 m/s, ja se havaittiin Taivalkoskella. Taivalkoskella ennalta lasketut varoitusraja-arvot olivat 20,1 m/s (keltainen), 24,9 m/s (oranssi) ja 26,2 m/s (punainen). Näin ollen Taivalkosken kunta väritettiin tilannekuvatuotteeseen oranssilla värillä. Muissa kunnissa laskenta tehtiin samalla tavalla.

Tilannekuvatuote pitää sisällään myös arvion vuorokauden puustotuhomäärästä. Arvio perustuu kaavaan, joka on esitetty Valta et al. (2019)⁴ tutkimuksessa. Paulan päivältä arvio on 0,33 miljoonaa kuutiometriä. Arvion laskennassa otetaan huomioon vain sisämaan kunnat poislukien Lappi, sillä tunturiasemilla havaitut korkeat tuulilukemat vääristäisivät tuhoarviota liikaa. Paulan päivältä arvio on jonkin verran toteutuneita tuhoja alempi, sillä Valta et al. (2019) mukaan tuhoarvio on kehitetty talvikauden laaja-alaisille myrskyille. Tällöin tuulenpuuskat ovat tyypillisesti kesän rajuilmoja laaja-alaisempia ja havaittu maksimipuuska kuvaa paremmin vallitsevia olosuhteita.

Puuskahavaintoihin perustuva tilannearviotuote on automaattisesti laskettu, ja saatavilla aina myrskyjä/tuulitilannetta seuraavana päivänä. Sen avulla voidaan huomio kiinnittää alueisiin, joissa havaittu tuulennopeus on ollut selvästi alueen pitkän ajan tuuli-ilmastoa korkeampi. Tilannearviotuote on saatavilla osoitteesta

https://pta.data.lit.fmi.fi/met/wdmap/winddamage_map_2021-06-22.png (päivämäärää vaihtamalla voi siirtyä haluamansa päivän kohdalle).

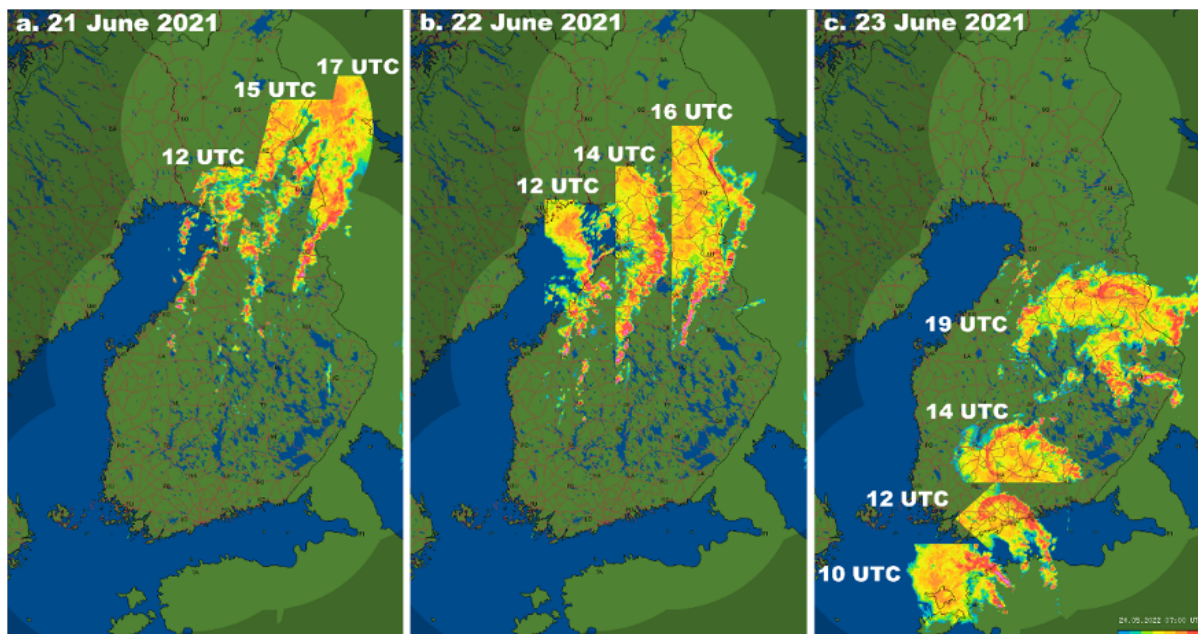
⁴ Valta, H., Lehtonen, I., Laurila, T. K., Venäläinen, A., Laapas, M., and Gregow, H.: Communicating the amount of windstorm induced forest damage by the maximum wind gust speed in Finland, Adv. Sci. Res., 16, 31–37, <https://doi.org/10.5194/asr-16-31-2019>, 2019.



Kuva 4. Esimerkkikuvat puuskahavaintoihin perustuvasta tilannekuvatuotteesta. Mustat lukemat kartalla ovat säähavaintoasemilla havaittuja vuorokauden maksimituulenpuuskaa. Vasen: kunnittain indikoidut tuhoalueet. Oikea: puuskaisoviivoin indikoidut alueet sekä sääasemilla havaitut voimakkaat puuskat (voimakkuus ja suunta).

Kesäkuussa 2021 tuhoa aiheuttaneiden rajuilmojen tapaustutkimus

Hankkeessa tutkittiin tarkemmin Suomessa 21.-23.6.2021 vaikuttaneita voimakkaita rajuilmoja, eli Ahtia, Paulaa ja Aatua (kuva 5). Näistä erityisesti Paula-rajuilma kaatoi runsaasti metsää Pohjois-Pohjanmaalla ja Kainuussa 22.6., mutta pienempiä metsätuhoja esiintyi kyseisellä alueella myös Ahti-rajuilman yhteydessä 21.6. sekä Etelä- ja Itä-Suomessa Aatu-rajuilman yhteydessä 23.6. On tärkeää ymmärtää minkälaiset meteorologiset tekijät johtivat näin laajaa tuhoa aiheuttavien rajuilmojen kehittymiseen. Meteorologisia tekijöitä tutkittiin hyödyntämällä suurta määrää erilaisia meteorologisia aineistoja, kuten pintasäähavaintoja, tutkakuvia, radioluotauksia, salamahavaintoja sekä ilmakehän uusanalyysyä 21-23.6.2021.



Kuva 5. Säättutkan havaintoja 21.-23.6.2021 rajuilmojen esiintymisestä. Kuvissa näkyy eri UTC-kellonaikoina säättutkan havaitsemat voimakkaat sadealueet. Suomen kesäaika on UTC+3 tuntia.

Meteorologisen analyysin mukaan laajan skaalan sääjärjestelmät johtivat tilanteeseen, jossa Suomeen virtasi etelästä ennätyslämmintä ja kosteaa ilmaa 21-23.6.2021. Tämä johti yhdessä ylätroposfäärin suihkuvirtauksen aiheuttaman pakotteen ja suotuisan lämpötilan pystyrakenteen kanssa voimakkaiden rajuilmojen kehittymiselle suotuisiin olosuhteisiin Suomessa Lapin pohjoisosia lukuun ottamatta. Tarkempi analyysi paljasti alatrikoposfäärin lämpötilarakenteen olleen suotuisa voimakkaiden laskuvirtausten muodostumiselle niillä alueilla, joissa suuria metsätuhoja esiintyi, mutta analyysiä hankaloitti havaintoaineiston puutteellisuus etenkin harvaan asutuilla alueilla kuten metsissä.

Tutkimuksesta on tekeillä tieteellinen käsikirjoitus. Meteorologinen analyysi ja käsikirjoitus ovat hienosäätöä vaille valmiita. Käsikirjoitus lähetetään vertaisarvioituun tieteelliseen lehteen vuoden 2023 alussa.



2.2 Aikataulut ja resurssit (sis. toteutuksen organisaatio ja yhteistyökumppanit)

Taulukossa 5 esitetään hankkeen työvaiheet, aikataulut sekä toteuttajat/osallistujat.

Taulukko 5. Hankkeen työvaiheet aikatauluineen sekä toteuttajineen.

Työvaihe	2021												2022												Roolit
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII				
Tuhoriskimallin luonti ja aineistojen keruu	x	x	x	x	x	x	x	x															IL, ETFS, SMK, Aalto		
Tuhon tunnistaminen satelliittien avulla	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		ETFS, Aalto		
Tuulituhoanalyysointipalvelu			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		IL (mkl. alihankinta a Spatinee)		
Puuskatuhoennuste: Paula-case.											x												IL		
Satelliittituhoennusteen implementointi operatiiviseksi.											x	x											ETFS, IL		
Puuskatuhoennuste: laajennus tapaustutkimuksen ulkopuolelle.												x	x	x									IL, SMK		
Operatiivinen tuhoennustepalvelu													x	x	x	x	x	x	x	x			IL, ETFS, SMK		
Menetelmien ja tulosten arviointi																x	x	x	x	x			IL, ETFS, SMK, Aalto		
Koordinointi	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			SMK, IL		

Harmaa: Päivitetyt tutkimussuunnitelman mukainen työ.

2.3 Kustannukset ja rahoitus

Hankkeen tutkimussuunnitelman päivityksen yhteydessä tehtiin myös päivitys hankkeen budjettiin, joka on esitetty Taulukossa 6. Lisäksi alla on kuvattuna muutokset verrattuna alkuperäiseen suunnitelmaan. Merkittävin muutos liittyi ETFS:n roolin vaihtumiseen IL:n alihankkijaksi rahoittajan ohjeistuksen mukaisesti: muutoksen myötä hankkeen kokonaisbudjetti kasvoi rahoittajan osuuden kuitenkin pysyessä alkuperäisenä (280 000€).



- 1) ETFS:n alkuperäinen budjettiosuus poistuu, ja kyseinen 35000€ rahoitus siirtyy IL:lle.
- 2) SMK:n rahoitus pieneni 75000 eurosta 52000 euroon. Tämä erotus 23000€ siirtyi IL:n budjettiin.
- 3) Hankkeen kokonaiskustannukset nousivat, koska SMK:n rahoitusosuus oli 100%, mutta IL:n 70%.
- 4) IL:n rahoitus kasvoi 58000 euroa, kokonaisbudjetti kasvaa 82 857 euroa. Tästä 52500 € käytettiin alihankintaan (lisäksi 24% arvonlisävero, josta 70% kirjattiin MMM:n arvonlisäveromomentille: tämä ei vähentänyt/kasvattanut rahoitusosuutta).
- 5) IL:n työkuukaudet kasvoivat 0,5 htkk alkuperäisestä suunnitelmasta.
- 6) MMM:n rahoitus pysyi alkuperäisenä (280000€).

Taulukko 6. Hankkeen kustannukset ja rahoitus.

	MMM rahoitus (€)	Lopullinen kokonaisbudjetti (€)	Alkup. kokonaisbudjetti (€)
IL, 70%	198 000 (sis. ETFS-alihankintaa 52500€)	282 857	200 000
ETFS (70%)	(52500€; sisältyy IL:n budjettiin)	-	-
SMK, 100%	52 000	52 000	75 000
Aalto, 70%	30 000	42 857	42 857
	280 000	377 714	367 857

2.4 Raportointi, julkaisut ja seuranta

Hankkeen resursseista ehdottomasti suurin osa kului aineistojen keruuseen, analysointiin sekä menetelmien testaamiseen ja kehittämiseen. Hankkeessa ehdittiin myös tuottaa seuraavia julkaisuja ja käsikirjoituksia:

Manninen, T., E. Jääskeläinen and E. Tomppo, 2022: "Nonlocal Multiscale Single Image Statistics From Sentinel-1 SAR Data for High Resolution Bitemporal Forest Wind Damage Detection," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, pp. 1-5, 2022, Art no. 2504705, doi: 10.1109/LGRS.2022.3169473.



Tomppo, E., 2022: "Forest Wind Damage Detection and uncertainty assessment for small areas". Manuscript under preparation.

Virman, M, Rantanen M., Laurila T., Gregow H., Mäkelä A, 2022: "Severe thunderstorms and their impacts in Finland on 21-23 June 2021". Manuscript under finalization.

2.5 Toteutusvaiheen arviointi

Hanketta alun perin suunniteltaessa vaikutti siltä, että työ olisi pääosiltaan varsin suoraviivaista ilman merkittävää perustutkimuksellista työtä. Hankkeen puolivälissä kuitenkin osoittautui, että 1) voimakkaiden puuskien havainnointi sääasemilla, 2) puuskien aiheuttamien (mahdollisten) tuhojen luotettava havainnointi satelliiteilla, ja 3) käytettävissä olevat tutka-aineistot sisältävät huomattavan määrän haasteita ja tulokset epävarmuuksia, joiden ratkaiseminen vaatisi syventävää perustutkimusta. Lisäksi erilaisten myrskyjen riittävän laajaa ja edustavaa aineistoa ei tutkasatelliittihavaintojen aikakaudelta ole vielä kertynyt, eikä puuskahavaintoverkosto ole tarpeeksi tiheä havaitsemaan aina voimakkaimman esiintyneen puuskan. Nämä kaikki seikat yhdistettynä hankkeen lyhyeen kestoon aiheuttivat tutkimussuunnitelman päivittämisen tarpeen: tämä päivitys puolestaan johti siihen, että muokatut tavoitteet saavutettiin. Ajatuksia mahdollisiin jatkotutkimuksiin on esitetty luvussa 3.3.

Metsätuhojen validointi osoittautui niin ikään haastavaksi. Metsänkäyttöilmoitukset sinänsä mahdollistavat metsätuhotietojen keruun, mutta ne eivät ole optimaalisia operatiivisten metsätuhotuotteiden validoinnissa. Tämä johtuu siitä, että metsänkäyttöilmoitusten aikatieto on usein hyvin epämääräinen: ne voivat saapua esim. useita kuukausia tuhon jälkeen. Jos aikatieto ei ole täsmällinen, ei tuhoja voi suoraviivaisesti yhdistää meteorologisiin havaintoihin eli juuri tiettyyn myrskytilanteeseen. Tämä haaste on keskeinen menetelmien validoinnin osalta ja siten linkittyy vahvasti tuotteiden laadun minimivaatimuksiin. Esimerkiksi viranomaisloppukäyttäjän tapauksessa (kuten tässä hankkeessa) tuotteiden tulee olla riittävän luotettavia päätöksentekoa ajatellen: luotettavuus ja laatu puolestaan vaatii validointia, joka on vaikeaa ilman riittävän suurta määrää metsätuhotapauksia, jotka voidaan varmuudella yhdistää tuhot aiheuttaneeseen ilmiöön.

Tulevaisuudessa vastaavien hankesuunnitelmien osalta olisi järkevää kartoittaa täsmällisemmin mahdolliset sudenkuopat eri työosioiden osalta esimerkiksi seuraavien kysymysten valossa:

- 1) Onko työvaiheelle olemassa valmis rutiini, jota voidaan hyödyntää? Jos ei, mikä on arvioitu työmäärä ja aikataulu?
- 2) Onko työvaiheelle olemassa sopiva(t) asiantuntija(t)? Voiko ilmetä tarve uuden aihepiirin asiantuntemukselle: jos voi, onko ko. henkilö(i)llä mahdollisuus osallistua työhön hankkeen aikaraameissa?



3. Tulokset ja niiden arviointi

3.1 Tulosten esittely

Alla on Sentinel-1 kuvien analyysiin perustuvat esimerkkitulokset kahdella testialueella, kuntakohtaiset tuhoennusteet, pinta-alat ja tilavuudet sekä karttamuotoiset paikannetut tuhot.

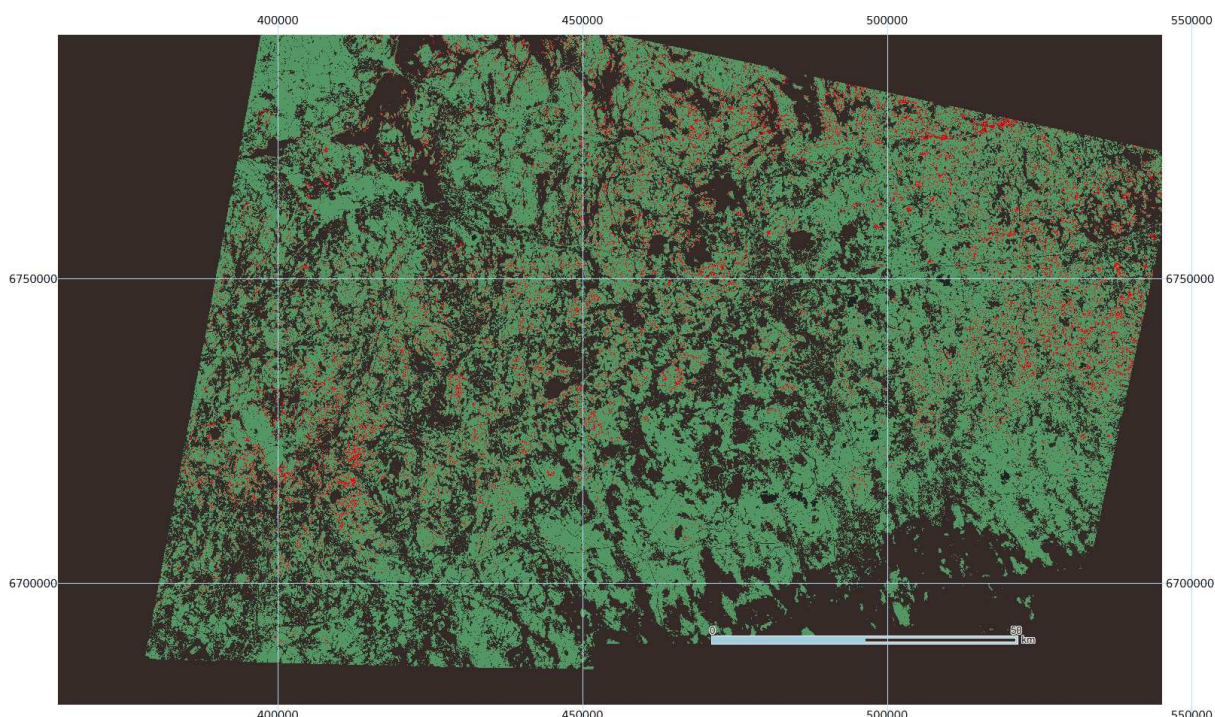
Taulukko 7: Kuntakohtaiset metsäalat, tuhoalat ja tuhoaluiden puuston tilavuudet puulajeittain Kiira myrskyn alueella, 12.8.2017. Laskennassa on käytetty viittä Sentinel-1 kuvaa, neljää ennen tuhoa (26.7.2017, 2.8.2017, 7.8.2017 ja 8.8.2017) ja yhtä tuhon jälkeen (14.8.2017), monilähteisen VMI:n metsävaratietoja, korkeustietoja sekä Ilmatieteen laitoksen puuskatietoja. Kunnan ala sisältää vain Sentinel-1 kuvien peittämän alueen kunnasta. Tuhoalan virhearvion suuruuteen vaikuttaa sekä koko metsäala että tuhon ala.

Kuntano	Kunta	Metsäala	Tuho-	Tuholan	Tuhoalueen puuston tilavuudet, m ³				
		ha	ala, ha	virhe, ha	Mänty	Kuusi	Koivut	Muut	Yhteensä
16	Asikkala	29500	700	865	44700	60400	17900	3700	126600
18	Askola	12500	600	13	29100	34700	11500	4100	79400
75	Hamina	45900	1300	1225	62800	64800	21000	6100	154700
86	Hausjärvi	13800	400	156	29900	29600	9800	2000	71200
92	Vantaa	4500	0	40	600	500	200	100	1400
98	Hollola	43500	1100	1248	76800	100600	29800	5300	212500
106	Hyvinkää	7800	300	37	20100	20900	6400	2100	49400
109	Hämeenlinna	15500	100	807	10300	12400	4000	500	27300
111	Heinola-1997	21000	700	368	49700	55100	17700	3800	126200
142	Iitti	41600	1600	120	103500	108100	34500	10400	256400
165	Janakkala	0	0	1	100	100	0	0	200
186	Järvenpää	1300	100	2	3100	3700	1300	500	8500
245	Kerava	1200	0	4	700	800	300	100	2000
285	Kotka	17600	200	593	6700	9200	2500	900	19400
286	Kouvola	167800	5400	274	320100	341800	106500	32100	800400
316	Kärkölä	14900	500	113	34100	34600	11900	2300	82900
398	Lahti	30000	1000	466	62800	74500	22200	4800	164300
405	Lappeenranta	1200	0	4	2400	3200	900	200	6700
407	Lapinjärvi	20900	600	352	25700	23300	8700	2500	60100
416	Lemi	5400	200	15	13100	10800	3300	1200	28400
434	Lovisa	55100	500	2278	18100	19900	6900	2300	47100
441	Luumäki	55600	1900	105	125500	138500	37900	11300	313200
489	Miehikkälä	21600	1200	60	50500	45500	16500	4100	116500
504	Myrskylä	13200	700	22	34700	34500	11500	3400	84100
505	Mäntsälä	37200	1500	70	71900	125900	30900	11400	240100
507	Mäntyharju	100	0	0	200	200	100	0	600
543	Nurmijärvi	3800	200	5	8700	9900	3000	1400	22900
560	Orimattila	46700	1800	70	106700	110700	36900	11800	265900
611	Pornainen	8900	400	10	18000	22800	7600	2800	51300
616	Pukkila	7600	300	9	17600	21400	7300	2400	48700
624	Pyhtää	23700	0	1198	500	600	200	100	1400
638	Porvoo	30600	200	777	9100	12000	4300	1900	27300
739	Savitaipale	11300	500	62	35100	37900	11400	2600	87000
753	Sipoo	13900	300	84	12400	15200	5300	2200	35100
858	Tuusula	11100	300	23	15500	17700	6000	2300	41500
935	Virolahti	18100	100	492	4500	2800	1600	400	9300
	Yhteensä	854500	24800	1449	1425100	1604700	497900	142900	3669800

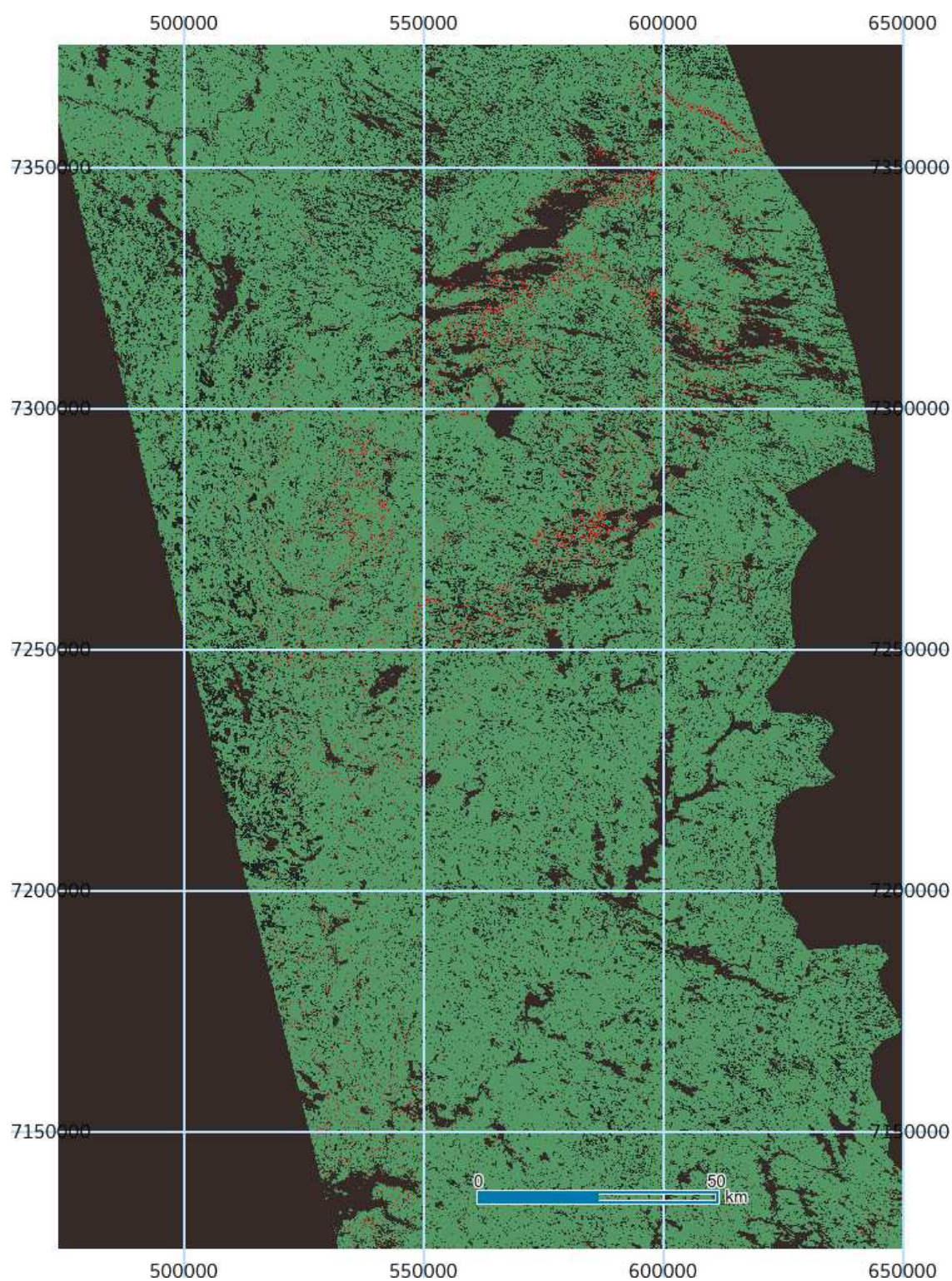


Taulukko 8: Kuntakohtaiset metsäalat, tuhoalat ja tuhoaluiden puuston tilavuudet puulajeittain Paula myrskyn alueella, 22.06.2021. Laskennassa on käytetty viittä Sentinel-1 kuvaa, neljää ennen tuhoa (2.6.2021, 8.6.2021, 14.6.2021 ja 20.6.2021) ja yhtä tuhon jälkeen (26.6.2021), monilähteisen VML:n metsävaratietoja, korkeustietoja sekä Ilmatieteen laitoksen puuskatietoja. Kunnan ala sisältää vain Sentinel-1 kuvien peittämän alueen kunnasta. Tuhoalan virhearvion suuruuteen vaikuttaa sekä koko metsäala että tuhon ala.

Kuntano	Kunta	Metsäala ha	Tuho- ala, ha	Tuhoalan virhe, ha	Tuhoalueen puuston tilavuudet, m ³				
					Mänty	Kuusi	Koivut	Muut	Yhteensä
105	Hyrnsalmi	128700	600	3994	26500	13000	6500	700	46800
205	Kajaani	12700	200	285	15800	11400	4600	300	32100
290	Kuhmo	161500	900	4788	59300	22900	17900	700	101100
305	Kuusamo	434300	15700	6183	1159200	421200	115300	11800	1707800
320	Kemijärvi	56000	400	222	18700	14200	6300	300	39700
578	Paltamo	55600	1000	779	67500	33800	15600	900	117900
614	Posio	259000	5900	525	429600	150900	44200	3400	628200
615	Pudasjärvi	284900	6700	3635	449500	145100	60100	4400	659200
620	Puolanka	202600	3500	835	216700	70900	36900	3300	327900
683	Ranua	132600	300	979	19000	7100	4900	300	31300
697	Ristijärvi	76400	400	1453	28000	12500	7800	400	48800
698	Rovaniemi	71600	400	4335	22400	10000	6100	200	38700
732	Salla	16900	100	35	6000	3200	1100	100	10400
765	Sotkamo	28700	100	1711	10800	2500	4400	0	17800
777	Suomussalmi	471900	4400	1366	219400	126200	48400	4800	398800
832	Taivalkoski	213000	8900	568	656100	249000	65300	6700	977000
889	Utajärvi	8200	200	135	8600	1600	1900	100	12100
	Yhteensä	2614600	49900	3211	3413000	1295300	447300	38400	5195500



Kuva 6: Esimerkki Kiira alueen tuhokartasta 22.06.2021. Tuotettu ik-NN menetelmällä käyttäen taulukon 3 tietoja. Tuhoalueet on merkitty punertavalla värillä.



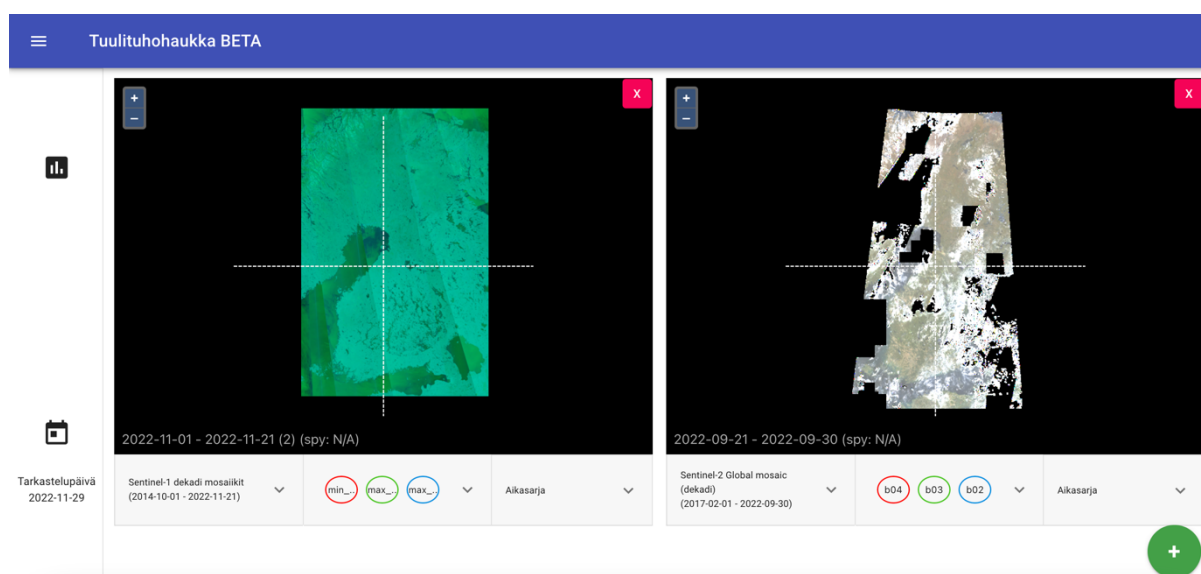
Kuva 7: Esimerkki Paula alueen tuhokartasta 22.06.2021. Tuotettu ik-NN menetelmällä käyttäen taulukon 4 tietoja. Tuhoalueet on merkitty punertavalla värillä.



3.2 Tulosten vieminen käytäntöön

Hankkeen tulokset vietiin käyttöön hankkeessa kehitetyn rajapinnan/selaimen kautta (kuva 8, <https://tuulituhohaukka.out.ocp.fmi.fi/>.) Erilaisten satelliittituotteiden lisäksi selaimesta voi hakea interpoloidut puuskahavainnot sekä puuskatuhotuotteet.

Hankkeessa tehty työ on tuottanut uuden maanlaajuisen palvelun, joka mahdollistaa metsätuhojen nopean tilannekuvan seurannan sekä tätä tarkentavan muutamien päivien viiveellä saatavan tuhopinta-alojen arvion mukaan lukien karkean arvion tuhoutuneesta puustosta. Tulokset lasketaan vähintään kunkin yksittäisen myrskyn alueelle, maakunta- ja mahdollisesti kuntakohtaisesti. Vaikka toteutettava palvelu ei ole tuhokuviotasolla yhtä tarkka kuin alkuperäinen tavoite oli, sillä kuitenkin päästään entistä lähemmäs mahdollisimman reaaliaikaista tilannekuvaa heti myrskyn jälkeen sekä tilannekuvan vaiheittaista tarkentamista seuraavien päivien kuluessa.



Kuva 8. Kuvakaappaus hankkeen käyttöliittymästä.

3.3 Tulosten merkitys ja jatkotoimenpiteet

Säähavaintoihin ja menetelmiin liittyvät jatkotoimenpiteet

Tehty työ on tuottanut mm. uutta ymmärrystä voimakkaiden puuskien sekä näiden aiheuttamien tuhojen havainnoinnista, uusia menetelmiä tuhojen tunnistamiseen ja arviointiin eri aineistoista, mutta myös haastavia tutkimuskysymyksiä, joiden ratkaiseminen ei mahtunut tähän hankkeeseen (vaan vaatisi ns. akateemista perustutkimusta). Erittäin haastavaksi (mutta ei mahdottomaksi) on osoittautunut kesäisten rajuilmojen aiheuttamien pienialaisten, mutta erittäin voimakkaiden puuskien havainnointi. Pienen kokonsa johdosta ne voivat helposti kulkea säähavaintoasemien ohi, jolloin puuskien suurimmat arvot voivat jäädä



havaitsematta ja sitä myöten tuhoarviot jäävät aliarvioiksi. Toinen keskeinen haaste on liittynyt satelliittihavainnoista pääteltyjen tuhoalueiden tulkintaan: tämä on osoittautunut huomattavasti haastavammaksi kuin oletettiin, koska tilastollisesti riittävän erilaisia myrskytapauksia ei 2015 alkaneessa aineistossa ole tarpeeksi. Näin ollen kehittyneimpiä saatavilla olevia koneoppimismenetelmiä ei voitu hyödyntää.

Hankkeen aikana tunnistettiin seuraavat kehityskohteet:

- Säättukahavainnot voimakkaiden puuska-alueiden indikoinnissa. Säättuka on erinomainen havaintoväline sadealueiden tunnistamiseen ja sateen voimakkuuden sekä luonteen havaitsemiseen. Lisäksi peräkkäisistä säättukahavainnoista voidaan määrittää sadealueen liikenopeus. Vaikka säättuka ei mittaa voimakkaita puuskia itsessään, sen havainnoista voidaan kuitenkin päätellä alueet, joissa voimakkaita puuskia voi esiintyä. Näin ollen säättukan havainnot yhdistettynä sääasemien havaintoihin tuottaisi mahdollisesti täydellisemmän kuvan voimakkaiden puuskien alueellisesta ja ajallisesta esiintymisestä.
- Salamanpaikantimen havainnot. Kuten säättukan osalta, eli salamahavainnoilla voitaisiin tarkentaa voimakkaiden puuskien ajallista ja alueellista esiintymistä.
- Muiden sääasemien tuulihavainnot. Ilmatieteen laitoksen operatiivisten puuskahavaintojen lisäksi Suomesta löytyy muita tuulta mittaavia sääasemia. Näitä ovat esimerkiksi tiesääasemat. Vaikka tiesääasemat eivät edusta mm. sijoittelultaan optimaalista mittaustaikaa, niiden havainnot voisivat olla arvokkaita puuskien havaitsemisessa.
- Sääennustemallien puuskaennusteet. Säämallit ennustavat puuskien esiintymistä ja voimakkuutta. Kuten säättukan ja salamanpaikantimen osalta, myös puuskaennusteita voisi mahdollisesti hyödyntää puuskien alueellisessa esiintymisessä. Ennustedata olisi kuitenkin ensi tarkasteltava suhteessa havaintoihin, eli kuinka luotettavia ennusteet ovat eri ennuste aika-askelilla.

Satelliittiaineistoanalyysin jatkotoimet

Ilmatieteen laitoksen palvelimelle implementoitu menetelmä käyttää opetusaineistoa. Se edellyttää Sentinel-1 kuvien 'harmonisointia' ja esimerkkejä tuhokohteista. Mahdollisessa jatkossa tavoitteena on menetelmä, jossa ei tarvita opetusaineistoa eli niin sanottu ohjaamaton tulkinta. Se edellyttää Sentinel-1 analyysien jatkokehitystä. Kyseistä kehitystä tehtiin jo alustavasti hankkeen tässä vaiheessa.

Sekä ohjatun että ohjaamattoman Sentinel-1 kuvien analyysin perustuvia menetelmiä pyritään kehittämään siten, että tulokset tarkentuvat yksittäisen tuhokuvion alueella. Työssä kehitetään uusia menetelmiä sekä käytetään nykyistä tehokkaammin maasto-, puusto- ja myrsky tietoja. Lisätietojen avulla pyritään erottelamaan maaston tai puuston perusteella tuhoille alttiit kohteet, jotka yhdistetään Sentinel-1 analyysiin.

Nykyinen menetelmä tuottaa puuston tilavuudet tuhoalueilla. Koko puusto ei välttämättä ole kaatunut tai muuten tuhoutunut myrskyn vaikutuksesta. Jatkossa tutkitaan mahdollisuutta arvioida erikseen kaatunut puusto. Se on kuitenkin vaativaa nykyisellä C-kaistan tutkatiedolla.



Uudet tutkasatelliitit parantavat tuhojen havainnointimahdollisuuksia jatkossa. Euroopan avaruusjärjestö korvaa toimintakyvyn menettäneen Sentinel-1 B satelliitin kahdella uudella C-kaistan satelliitiilla, Sentinel-1 C ja Sentinel-1 D vuosien 2023–2024 aikana. Nämä satelliitit lisäävät datan saantimahdollisuuksia jatkossa. Kehitteillä oleva Biomass-satelliitti ja sen täyspolarimetrinen P-kaistan tutka sopivat metsäsovelluksiin nykyisiä tutkasatelliitteja paremmin. Suunniteltu laukaisuaika on vuosi 2024.

Tulevaisuudessa saamme enemmän erilaisia myrskyhavaintoja nykyisillä satelliiteilla, tai menetelmäkehitykseen kehittyneimmillä koneoppimismenetelmillä voisi tehdä Suomea laajemmalta alueelta. Tässä haasteena on saada muista maista toteutuneita tuhotietoja. Esimerkiksi hanke, joka tutkisi koko Euroopasta tilanteita, joissa myrsky on aiheuttanut metsätuhoja, olisi todennäköisemmin menestykäs koneoppimisen osalta (esimerkiksi nk. extreme gradient boosting -menetelmä) arvioimaan korkealla resoluutiolla metsätuhoja.