

## TIIVISTELMÄRAPORTTI

# SÄTEILYN VAIMENEMISEN JA NÄKYVYYDEN MÄÄRITTÄMINEN ILMAKEHÄSSÄ

Mika Komppula (Ilmatieteen laitos (IL), [mika.komppula@fmi.fi](mailto:mika.komppula@fmi.fi)), Ari Leskinen (IL), Tero Mielonen (IL), Xiaoxia Shang (IL), Jarkko Hirvonen (IL), Anne Hirsikko (IL)

### Tiivistelmä

Säteilynkulkumallit sisältävät vakioituja oletuksia hiukkasten määrästä ja ominaisuuksista. Ilmakehän pienhiukkasten vaikutus kuitenkin vaihtelee suuresti paikallisesti sekä ajallisesti. Oletukset saattavat aiheuttaa tilanteita, joissa vaimenemista aliarvioidaan voimakkaasti, mikä voi johtaa laitteiden suorituskyvyn yliarviointiin.

Näkyvyys on oleellinen suure monilla aloilla, sillä se voi rajoittaa toimintaa tai jopa estää sen kokonaan. Näkyvyyttä havainnoidaan tällä hetkellä vain maanpinnan tuntumassa. Reaaliaikainen vaimennus- ja näkyvyystiето eri korkeuksilta parantaisi huomattavasti kokonaiskuvaa eri laitteiden suorituskyvyn arvioinnissa ja toiminnan suunnittelussa.

Tässä tutkimushankkeessa selvitettiin pilvenkorkeusmittareilla (ceilometreillä) tehtävien profiilihavaintojen soveltuvuutta reaaliaikaisen tiedon tuottamiseen säteilyn vaimenemisesta sekä näkyvyydestä eri korkeuksilla alailmakehässä, mukaan lukien viistonäkyvyys. Menetelmien verifiointissa käytettiin Ilmatieteen laitoksen PollyXT-tutkimuslidarilla, Halo Doppler -lidarilla ja maanpinnalla tehdyistä näkyvyysmittauksista saatavaa aineistoa. Lidarit ja ceilometrit edustavat uudempaa mittaustekniikkaa, jonka käytännön hyödyntäminen operatiivisessa työssä Suomessa on vielä vähäistä. Tutkimuksen tavoitteena oli tilannekuvan parantamisen lisäksi vahvistaa uusien mittaus- ja havaintoaineistojen hyödyntämistä käytännön työssä. Hankkeessa kehitetyillä menetelmillä on suuri laajentamispotentiaali, sillä ilmakehän profiilihavaintoja kerääviä ceilometrejä on käytössä maailmanlaajuisesti ja Suomessakin on tällä hetkellä noin 35 profiloivaa ceilometriä ([ceilometer.fmi.fi](http://ceilometer.fmi.fi)) lentokentillä sekä niiden läheisyyteen kohdenne- tuilla sääasemilla.

Tutkimushankkeen tuloksena saatiin uutta tietoa hiukkasten aiheuttamasta säteilynkulun vaimenemisesta sekä sen vaikutuksesta näkyvyyteen. Reaaliaikainen tieto voidaan tuottaa halutuille korkeuksille useasta eri mittauspaikasta Ilmatieteen laitoksen ceilometri-verkoston avulla. Vaimennustiedon avulla pystytään rakentamaan parempi tilannekuva erilaisten säteilyä hyödyntävien laitteiden toimintakyvystä (IR-kamerat ja -tutkat, pimeänäkösovellukset, etäisyysmittaus, lämpöhakuisuus, elektro-optiset sovellukset yms.) sekä käyttämään näitä laitteita optimaalisesti. Uuden tiedon pohjalta on edelleen mahdollista tarkentaa säteilynkulun ennustelaskelmia. Reaaliaikainen näkyvyystiето lentopinnoilla ja viistoon eri korkeuksilta lentokenttien läheisyydessä parantaisi lähestymisturvallisuutta sekä auttaisi toiminnan suunnittelua. Hankkeen tulosten avulla Puolustusvoimien ajantasainen tilannekuva säteilyn vaimenemisen tai näkyvyyden vaikutuksesta toimintojen suorituskykyyn laajenee, luotettavuus paranee ja toiminnan suunnittelu helpottuu. Lisäksi Puolustusvoimat voivat toteuttaa eri puolustushaaroissa (maa-, meri- ja ilmavoimat) operatiivista toimintaa parantuneen olosuhdetiedon avulla suorituskykyisemmin, turvallisemmin ja tehokkaammin. Tuloksia voidaan vastaavasti hyödyntää myös mm. siviili-ilmailussa, mikä edesauttaa lentotoiminnan kustannustehokkuutta ja parantaa yhteiskunnan kokonaisturvallisuutta sekä viranomaisten yhteistyötä. Hankkeen tulokset ja kehitetyt tuotteet parantavat (lento)toimintaa ja suorituskykyä vaativissa ympäristöissä ja olosuhteissa sekä edesauttavat tilannetietoisuuden hallintaa ja päätöksen tekoa.

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihde 295 160 01	<a href="mailto:matine@defmin.fi">matine@defmin.fi</a>
PL 31	00130 Helsinki		<a href="http://www.defmin.fi/matine">www.defmin.fi/matine</a>
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

## 1. Johdanto

Säteilynkulun mallintaminen ja mittaaminen ilmakehässä on moniulotteinen haaste. Yksi suurimmista epävarmuustekijöistä on ilmakehän pienhiukkasten vaikutus, jonka merkitys vaihtelee suuresti paikallisesti sekä ajallisesti. Jatkuvatoiminen vaimenemisen mittaaminen halutussa paikassa ja korkeudella on tähän asti ollut haastavaa. Tästä johtuen yleisesti tyydytään mallilaskelmiin (esimerkiksi amerikkalaisen MODTRAN-ohjelmiston avulla), jotka sisältävät vakioituja oletuksia hiukkasten määrästä ja ominaisuuksista. Oletukset saattavat aiheuttaa tilanteita, joissa vaimenemista aliarvioidaan voimakkaasti, mikä johtaa säteilyä hyödyntävien laitteiden (IR-kamerat, etäisyysmittaus, muut elektro-optiset laitteet) suorituskyvyn yliarviointiin kyseisissä olosuhteissa. Tätä tapahtuu erityisesti silloin, kun hiukkaspitoisuudet ovat suuria mm. metsäpalojen, tulivuorenpurkausten tai muiden vastaavien erityistilanteiden yhteydessä. Lisäksi korkea ilman suhteellinen kosteus voi aiheuttaa haasteita hiukkasten kasvaessa tai jopa synnyttäessään utua tai sumua. Reaaliaikainen vaimennustieto eri korkeuksilta alailmakehässä (noin 0-10 km) ympäri Suomen parantaisi huomattavasti kokonaiskuvaa eri laitteiden suorituskyvyn arvioinnissa ja toiminnan suunnittelussa.

Näkyvyys on oleellinen suure monilla käytännön aloilla, sillä se voi rajoittaa toimintaa tai jopa estää sen kokonaan. Siitä huolimatta näkyvyyttä havainnoidaan tällä hetkellä vain maanpinnan tuntumassa pistemäisin mittauksin. Esim. ilmailutoimijoilla on kuitenkin suuri tarve vaakasuuntaiselle näkyvyydelle lentopinnoilla sekä viistonäkyvyydelle esim. lentokenttää lähestyttäessä. Lentokoneiden laskeutumisen yhteydessä halutulta korkeudelta saatava viistonäkyvyys lisäisi huomattavasti tietoa toimintaympäristöstä, jolloin myös lentoturvallisuus oletettavasti parantuisi verrattuna lentokentän pinnalta saatavaan paikalliseen näkyvyytietoon.

Tässä tutkimushankkeessa selvitettiin pilvenkorkeusmittareilla (ceilometreillä) tehtävien profiilihavaintojen soveltuvuutta reaaliaikaisen tiedon tuottamiseen säteilyn vaimenemisesta sekä näkyvyydestä eri korkeuksilla alailmakehässä, mukaan lukien viistonäkyvyys. Näiden uusien mittaustekniikoiden hyödyntäminen, analyysimenetelmien kehittyminen ja niiden tuomat parannukset vaimenemisennusteisiin vastaavat yhteiskunnan parempaan varautumiseen sekä edesauttavat koneiden/laitteiden (tiedustelu ja lentokalusto ym.) tehokkaampaa ja luotettavampaa käyttöä. Saadut tulokset ja kehitetyt tuotteet parantavat (lento)toimintaa ja suorituskykyä vaativissa ympäristöissä ja olosuhteissa sekä edesauttavat tilannetietoisuuden hallintaa ja päätöksen tekoa.

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimushankkeessa selvitettiin pilvenkorkeusmittareilla tehtävien profiilihavaintojen soveltuvuutta reaaliaikaisen tiedon tuottamiseen säteilyn vaimenemisesta sekä näkyvyydestä eri korkeuksilla alailmakehässä. Tutkimustulosten pohjalta on mahdollista tilannekuvan parantamisen lisäksi vahvistaa uusien mittaus- ja havaintoaineistojen hyödyntämistä käytännön työssä. Hankkeen päätuotteena on verkkosivut, jonne tuotetaan reaaliaikaista tietoa operatiiviseen käyttöön säteilyn vaimenemisesta, näkyvyydestä sekä lentopinnoilla että haluttuun viistokulmaan.

Tutkimus suoritettiin hyödyntämällä kaukokartoitusmenetelmiä (lidarit ja pilvenkorkeusmittarit eli ceilometrit) sekä meteorologisia mittauksia. Tutkimustavoitteisiin edettiin seuraavin askelin: Työpaketti 1. Selvitetään, voidaanko ceilometri-havaintojen avulla määrittää, ja millä tarkkuudella, ilmakehän hiukkasten aiheuttama säteilyn vaimeneminen. Sen jälkeen yhdistimme ceilometriä, Halo- ja PollyXT-lidarien havaintoaineistot, jolloin voitiin tuottaa vaimenemistieto usealle eri aallonpituuskaistalle. Työpaketti 2. Selvitetään ceilometriä soveltuvuutta näkyvyyden määrittämiseen, ensin maan pinnalla, sitten halutulla korkeudella (lentopinnalla) ja lopuksi viistonäkyvyyden laskemiseen. Ceilometriä tulok-

sia vertailtiin PollyXT- ja Halo-lidarien havaintoihin sekä maan pinnalla tehtyihin näkyvyyshavaintoihin. Tutkimuksessa hyödynnettiin Ilmatieteen laitoksen jo keräämää aineistoa sekä hankkeen aikana kerättyä uutta mittaustulosta.

### 3. Aineisto ja menetelmät

Hankkeessa pyrittiin selvittämään Ilmatieteen laitoksen ceilometri-verkoston potentiaalia tuottaa tietoa säteilyn vaimenemisesta (Työpaketti 1) ja näkyvyydestä (Työpaketti 2).

#### *Hyödynnettävät mittaukset*

Hankkeen pääasiallisena tutkimusasemana toimi Kuopiosta noin 20 km päässä sijaitseva Vehmasmäen mittausasema. Asemalla sijaitsevat kaikki tutkimuksessa käytettävät laitetypit, joilta on saatavissa yhdenaikaisia havaintoja noin neljän vuoden ajalta: 1) Referenssilaitteena käytettiin PollyXT-tutkimuslidaria, jolla pystytään tuottamaan takaisinsironta- ja vaimennusprofiilit usealla eri aallonpituudella hyvällä aika- ja korkeusresoluutiolla (30s, 7.5m). 2) Halo Doppler -lidarilla pystytään mittaamaan haluttuun kulmaan maanpinnan suhteen, jolloin sitä voidaan hyödyntää erityisesti viistonäkyvyyden määrittämisessä ja verifiointissa. 3) Vaisala CL 51 ceilometri, joka tuottaa profiilimittauksia. 4) Lisäksi hyödynsimme Vaisala FD12P anturin näkyvyyksmittausta, josta saatiin referenssiarvo maanpinnan tasolla.

Ilmatieteen laitoksen ceilometriverkosto on koko Suomen kattava ja laitteiden profiilimittaukset tuottavat reaaliaikaista tietoa ilmakehän hiukkasista ja pilvistä. Verkostoa hyödyntämällä voidaan parantaa ajantasaista tilannekuvaa ilmakehän olosuhteista, tässä tapauksessa säteilyn vaimenemisen ja näkyvyyden osalta. Hankkeessa kehitettiin verkkosivut, jonne tuotetaan reaaliaikaisesti tietoa operatiiviseen käyttöön säteilyn vaimenemisesta, näkyvyydestä sekä lentopinnoilla että haluttuun viistokulmaan. Vaikka tässä hankkeessa keskityttiin pienhiukkasiin, voidaan samoja menetelmiä käyttää osin myös sumu- ja pilvitiiloissa.

#### *Työpaketti 1: Hiukkasten aiheuttaman säteilynkulun vaimenemisen määrittäminen*

Edistyneempien Raman-sirontaa hyödyntävien tutkimuslidarien avulla voidaan suoraan määrittää hiukkasten aiheuttama vaimeneminen ilmakehässä. Hiukkasten määrä vaihtelee suuresti ajallisesti ja paikallisesti, myös ilman suhteellisen kosteuden vaikutuksesta, joten jatkuva ja reaaliaikainen monitorointi on välttämätöntä parhaan tilannekuvan luomiseksi. Tällaista PollyXT-tutkimuslidarin tuottamaa aineistoa käytettiin tutkittavien ceilometri-aineistojen ja algoritmien verifiointissa.

Ceilometrit sekä Halo Doppler -lidarit tuottavat profiilitietoa hiukkasten aiheuttamasta takaisinsironnasta ( $\beta$ ). Takaisinsironnalla on kokeellisesti tunnettu hiukkastyypistä riippuva suhde (lidarsuhde,  $S$ ) hiukkasten aiheuttamaan vaimennukseen ( $\alpha$ ). Tämä suhde ( $S=\alpha/\beta$ ) voidaan määrittää Raman-lidarin avulla, ja eri hiukkastyypeillä se vaihtelee välillä 20-100. Suomessa yleisten hiukkastyypien osalta lidarsuhde on noin 45-55. Edellä esitetyn kaavan avulla voidaan määrittää vaimeneminen ( $\alpha=\beta\times S$ ) kun tunnetaan  $\beta$  ja  $S$ . Ceilometrien ja Halon tapauksessa puuttuva  $S$  määritettiin PollyXT-lidarin avulla, ensin valituille vertailupäiville ja loppukäyttöön laskettiin tilastollisia arvoja Suomen olosuhteisiin tavanomaisille hiukkasolosuhteille sekä erikoistapauksiin (esim. tuhkut, metsäpalot). Ceilometreista ja Halo-lidarista laskettua vaimennusta verifioitiin vertaamalla tuloksia PollyXT-lidarin mittauksiin. Saatuja tuloksia voidaan laajentaa koko profiililejua tuottavan ceilometriverkoston käyttöön, jolloin saataisiin maanlaajuinen reaaliaikainen kattavuus.

Seuraavassa vaiheessa kokosimme yhteen kaikilta hyödynnetyiltä laitteilta saatava vaimennustieto eri aallonpituuskaistoilta. Vaimennus saatiin mitattua suoraan 355 ja 532 nm aallonpituuksilla (PollyXT), ja lidarsuhdetta hyödyntämällä se voitiin laskea 910 (cei-

lometri, 1064 (PollyXT) ja 1565 nm (Halo) aallonpituuksilla. Vaimenemista eri aallonpituuksilla verrattiin keskenään ja niistä muodostuvalle spektrille määritettiin vuodenaikojen vaihtelut havainnollistava aikasarja kerätystä mittaustuloksesta. Vaimennusaineistoa voidaan edelleen hyödyntää vaimennuksen mallilaskelmien validoinnissa.

### Säteilynkulkumallinnus

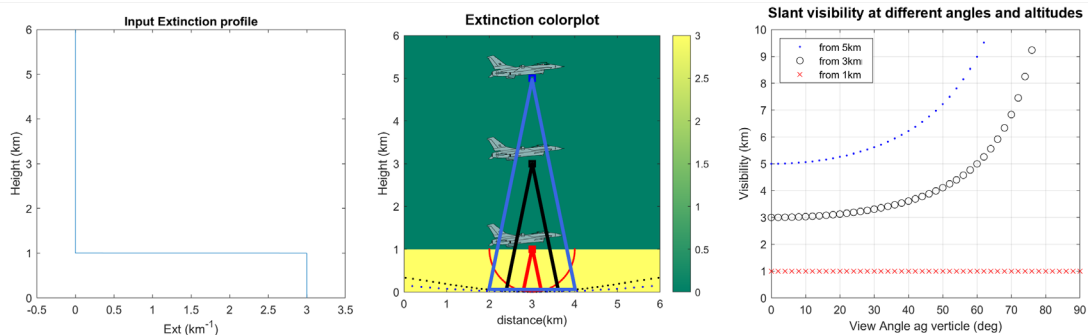
Koska ceilometri-havaintoja on saatavilla vain yhdellä aallonpituudella, hyödynsimme säteilynkulkumallinnusta (libRadtran) arvioidaksemme miten suuria epävarmuuksia pienhiukkasten vaihtelevat ominaisuudet tuovat vaimennusarvioihin. Ilmatieteen laitoksella on useiden vuosien ajalta in situ -havaintoja pienhiukkasten määrästä, kokojakaumista ja optisista ominaisuuksista sekä lidar-mittauksia ilmakehän suhteellisesta kosteudesta eri korkeuksilta. Näiden havaintojen pohjalta pystyimme arvioimaan hiukkasten keskimääräiset ominaisuudet ja vaihtelun eri vuodenaikoina. Laskimme sitten säteilynkulkumallilla miten suuren epävarmuuden ominaisuuksien vaihtelu voi aiheuttaa säteilyn vaimennusarvioihin. Suomelle tyypillisten pienhiukkasten lidarsuhde ei vaihtele paljon, joten siitä ei aiheudu suurta epävarmuutta tuloksiin. Poikkeuksen aiheuttaa hetkellisistä metsäpaloista syntyvä savu, joka on paljon absorboivampaa kuin tyypilliset pienhiukkaset. Mallilaskelmien pohjalta tuotettiin myös vaimennusarvioita sellaisille aallonpituuksille, joilta ei ole havaintoja.

Varmistaaksemme, että säteilynkulkumallin tuottamat vaimennusarvot vastasivat havaittuja, vertasimme sen tuloksia PollyXT-lidarin havaintoihin. Tässä tarkastelussa mallintamisen lähtötietoina käytettiin PollyXT:llä mitattuja suhteellisen kosteuden profiileja sekä sen havainnoista määritettyjä hiukkasten kokojakaumia.

### Työpaketti 2: Näkyvyys, näkyvyys lentopinnoilla ja viistonäkyvyys

Arvioimme näkyvyyttä lidar-mittauksista saatavasta valon vaimenemisesta käyttämällä Koschmiederin lakia. Seuraavaksi vertasimme lidarista maanpinnan läheisyydestä saatua näkyvyyttietoa maanpinnalla tehtyihin näkyvyysmittauksiin usean vuoden ajan kerätyn aineiston avulla.

Lidarista saatava näkyvyyttietoa voidaan tuottaa reaaliaikaisesti halutulle lentopinnalle (korkeus tai korkeusväli) käyttäen sopivia ajallisia tai korkeussuuntaisia keskiarvoistuksia, ja myös viistonäkyvyys voidaan määrittää. Viistonäkyvyys vaihtelee tilanteen, havaintokorkeuden ja -kulman mukaan. Kuvassa 1 on esitetty esimerkinomaisesti viistonäkyvyyden määrittämistä eri kulmiin vaimennusprofiilin avulla.



**Kuva 1.** Esimerkki vaimennusprofiilin (vasemmalla) avulla eri lentokorkeuksille (keskellä) laskeutua viistonäkyvyyksistä eri kulmiin (oikealla). Oikeanpuoleisessa kuvassa nolla astetta tarkoittaa näkyvyyttä suoraan alaspäin.

Lopuksi testasimme ceilometriä hyödynnettävyyttä PollyXT-lidarin mittausten avulla, vertaamalla määritettyjä näkyvyysarvoja eri korkeuksilla. Tämän vertailun perusteella

viistonäkyvyyshavainnot olisivat potentiaalisesti mahdollisia kaikilla lentokentillä olemassa olevilla ceilometreilla, mikä mahdollistaa maanlaajuisen reaaliaikaisen kattavuuden. Tällä menetelmällä voidaan laskea esimerkiksi miltä etäisyydeltä lentäjä näkee kiitotien, kun kone käyttää 3 asteen liukukulmaa. Tai toisaalta miltä etäisyydeltä lentokone on lennonjohdon näköpiirissä ko. tilanteessa.

#### 4. Tulokset ja pohdinta

Hankkeen aikana koottiin yhteen ja muokattiin noin neljän vuoden data-aineisto käsittäen maan pinnalta mitatut ilmakehän hiukkasten kokojakaumat, hiukkasten aiheuttama absorptio ja sironta sekä näkyvyys muiden sääparametrien ohella. Pystysuuntaista profillidataa kerättiin PollyXT-tutkimuslidarista (sironta, vaimennus, polarisaatio, ilmakehän kosteus), Halo-lidarista (sironta) sekä ceilometristä (sironta).

Säteilynkulkumallilaskelmissa (LibRadTran) hyödynnettiin hiukkasten kokojakaumia sekä ilmakehän kosteuden profiileja. Lisäksi mallinnusta varten laskettiin ja muunneltiin hiukkasten taitekerrointa (eri aallonpituuksilla) sekä kosteuden aiheuttamaa kasvukerrointa. Myös erilaisia hiukkasten koostumuksen syöttötietoja testattiin. Mitatut sironnat ja vaimennukset sijoittuivat aallonpituusalueelle 355–1565 nm, mutta mallinnuksen avulla voitiin arvioida vaimennuksia laajemmalla aallonpituusalueella, tässä työssä välillä 120 nm – 12 µm.

Muuntelemalla mallin syöttötietoja havaittiin, että tulokseen vaikuttavat eniten hiukkasten kokojakauman muutokset ja ilmakehän kosteus (hiukkasten kasvukerroin). Myös hiukkasten koon vaikutuksella havaittiin olevan selvä aallonpituusriippuvuus. Suuremmat hiukkaset vaikuttavat enemmän pidemmällä aallonpituuksilla, esim. yli 1 µm kokoiset hiukkaset aiheuttavat pääosan vaimennuksesta ja näkyvyyden alenemasta 1 µm suuremmilla aallonpituuksilla. Mallinnettaessa vaimennusprofiileja, oletettiin mittaustiedon puuttuessa hiukkasten kokojakauman ja muiden ominaisuuksien olevan samat läpi koko rajakerroksen laskennassa käytettyyn 3 km korkeuteen saakka. Tämä aiheuttaa osaltaan epävarmuutta profiilimallinnuksiin.

Vuodenajoittain vertailut mitatut ja mallinnetut vaimennusprofiilit olivat samansuuntaisia, mutta eroja havaittiin. Tätä tutkittiin edelleen yksittäisien case-tapausten avulla, ja vaikuttaisi siltä, että hiukkasten ominaisuuksien vaihtelu ilmakehässä aiheuttaa suurimmat haasteet mallinnukselle. Mallinnettujen näkyvyysarvojen osalta vertailutulokset olivat myös osin lupaavia, huomioiden edellä mainitut haasteet.

Ceilometrien avulla määritetyt vaimennus- ja näkyvyysarvot vastasivat melko hyvin maanpinnalla mitattuja arvoja ja menetelmää voidaan pitää onnistuneena. Hankkeen lopuksi näkyvyystietoa (maan pinta, lentopinta ja viistonäkyvydet) pystyttiin tuottamaan reaaliajassa verkkosivulle operatiiviseen testikäyttöön. Palautetta kerätään käyttäjiltä edelleen ja tuotetta parannetaan käyttäjäkokemusten pohjalta.

#### 5. Loppupäätelmät

Hankkeen aikana saatiin selvettyä ceilometrien sopivuus (ja rajoitteet) tuottaa tietoa näkyvyydestä eri korkeuksilla ja viistoon kulmaan. Edelleen vaimennustietoa pystyttiin tuottamaan usealle aallonpituudelle eri mittauksia yhdistelemällä sekä säteilynkulkumallinnusta hyödyntämällä. Näkyvyystieto pystyttiin tuottamaan reaaliajassa operatiiviseen käyttöön. Lyhyesti tiivistettynä hankkeessa päästiin lähelle toivottua lopputulosta.

Hankkeen päättymisen jälkeen lopputuotteen käyttäjäkokemuksia kerätään edelleen ja tuotetta kehitetään eteenpäin. Tällä hetkellä näkyvyystuotteen testiversio on käytettävissä vain yhdestä mittauspaikasta, mutta tulevaisuudessa mittauspaikkoja pyritään lisää-



---

mään.

Mallinnusten epävarmuuksia ja tarkkuutta olisi mahdollista edelleen tutkia ja parantaa tarkempien ja kattavampien mittausten avulla.

## 6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Hankkeen tuloksista on tarkoitus kirjoittaa tieteellinen artikkeli vuoden 2023 aikana.