

## TIIVISTELMÄRAPORTTI

# Ilmakehän jäätävien kerrosten reaaliaikainen havainnointi maanpinnalta tehtävän kaukokartoituksen avulla

Mika Komppula (Ilmatieteen laitos (IL), mika.komppula@fmi.fi)  
Anne Hirsikko (IL), Ari Leskinen (IL), Karoliina Hämäläinen (IL), Kari Heikkinen (IL),  
Antti Ruuskanen (IL), Jarkko Hirvonen (IL), Sami Niemelä (IL), Sami Romakkaniemi (IL)

### Tiivistelmä

Ilma-aluksen jäätäminen on merkittävä turvallisuusuhka ja sillä on suuri vaikutus lentotoiminnan suunnitteluun sekä toteutukseen. Jotta operatiivinen lentotoiminta olisi turvallisempaa, luotettavampaa ja kustannustehokkaampaa, tulee jäätävien pilvikerrosten paikallinen ja ajallinen vaihtelu tietää tarkemmin, mieluiten ennusteena etukäteen sekä reaaliaikaisena tietona. Uusia ja tarkempia jäätämishavaintoja tarvitaan, jotta jäätämisenusteita voidaan verifioida ja tarkentaa. Tutkimushankkeessa selvitetään maanpinnalta tehtävillä kaukokartoitusmenetelmillä (Lidarit, ceilometrit) ja pilvimittauksilla saatujen hydrometeorien (pilvipisararot, jääkiteet) ominaisuuksien ja lämpötilan käytettävyyttä reaaliaikaisessa ilmakehän jäätävien kerrosten kartoituksessa. Lisäksi selvitetään näiden uusien tekniikoiden hyödyntämistä käytännön operatiivisessa työssä kuten esimerkiksi lentotoiminnan reaaliaikaisessa suunnittelussa. Saatuja mittauksia verrataan Ilmavoimien lentäjien koelentoilla tekemiin havaintoihin sekä jäätämismallin antamiin laskennallisiin arvoihin. Lentäjien palaute on ensiarvoisen tärkeää ja ainutlaatuisia, koska jäätämistä ei voida suoraan mitata pilvessä vaan käytetään kaukokartoitusmenetelmiä. Mittauksista kehitettyjä jäätämistuotteita ja ennustemallin parametreja optimoidaan edelleen vertailutulosten pohjalta.

Kerätyn aineiston avulla on kehitetty automaattinen jäätämistuote ceilometrin profiilidatasta. Tuotteen verifiointityö pidemmän aikasarjan in-situ mittauksia vastaan jatkuu edelleen aineiston kasvaessa. Jäätämismallia on muokattu niin että siitä saadaan pistetiedon sijaan tärkeää profiilitietoa jäätämisestä valittuihin maantieteellisiin pisteisiin. Mallin tuloksia on vertailtu ja edelleen verrataan in-situ ja profiilimittauksiin lyhyemmällä kampanjajaksolla. Tulokset ovat rohkaisevia sekä mallin että mitatusta profiilidatasta kehitetyn jäätämislukittelun osalta. Reaaliaikaisia mittauksia, jäätävyystuotteita sekä malliennuste ajetaan suoraan projektin aikana rakennetulle nettisivulle asiantuntijoiden käyttöön. Sivut ovat päivittäisessä testikäytössä apuna operatiivisessa ennustetyössä sekä lentosuunnittelussa. Saadut tulokset vahvistavat oletuksen kaukokartoitusmenetelmien potentiaalista jäätävien olosuhteiden havainnoinnissa. Ilmatieteen laitoksen ceilometri-verkko tarjoaa kehitetyille tuotteille potentiaalisen laajennusmahdollisuuden koko Suomen kattavaksi ja mahdollisuuden laajempaan operatiiviseen ennustekäyttöön sekä myös siviili-ilmailun hyödynnettäväksi.

### 1. Johdanto

Ilma-aluksen jäätäminen on merkittävä säätilasta johtuva ilmailun uhkatekijä. Sen merkitys korostuu erityisesti silloin, kun lentotoiminta tapahtuu lähellä maanpintaa. Sotilasil-

| 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 | matine@defmin.fi     |
| PL 31                      | 00130 Helsinki              |                   | www.defmin.fi/matine |
| FI-00131 Helsinki          | Finland                     |                   |                      |
| Finland                    |                             |                   |                      |



mailussa jäätämisen on otettava huomioon kaikenlaisella lentokalustolla lennettäessä. Ranger-lentotiedostelujärjestelmän UAV-ilma-alukset (myös meri- ja maavoimissa), Hughes MD500-kevythelikopterit (HH-kalusto) ja Valmet L-70 Vinka -alkeiskoulukoneet ovat erityisen herkkiä jäätämislle. Jäätämisen aiheuttama turvallisuusriski on otettava huomioon myös NH90-kuljetushelikopterikalustolla sekä yhteys-, kuljetus-, ja hävittäjäkalustolla operoitaessa niin, että pyritään välttämään jäätävässä ympäristössä lentämistä. Sama pätee myös siviili-ilmailun puolella. Jäätämisen vaikuttaa lentopalvelun toteutukseen ja voi pahimmillaan estää lentotoiminnan. Tieto jäätävien kerrosten korkeudesta ja sijainnista, sekä oletettavan jäätävyyden voimakkuudesta on oleellista lentojen suunnittelussa. Jo kohtalaiseksi ennustettu jäätämisen voi estää lentotoiminnan kokonaan. Ennuste tarvitaan edellisenä päivänä toiminnan suunnittelua varten, mutta lopulliset lentopäätökset tehdään kuitenkin lentopäivän aamuna, jolloin reaaliaikainen tieto jäätävien kerrosten korkeudesta ja sijainnista olisi erittäin tärkeää. Etenkin Vinka-koulutuksessa perutut, siirretyt ja keskeytetyt koulutuspäivät aiheuttavat suuria kustannuksia ja aikataulpaineita koulutukseen toteuttamiseen.

Ilmiönä jäätämisen on erityisen vaikeasti havaittava. Siihen vaikuttaa olennaisesti mm. pilvien alijäähtyneen veden määrä ja pisarakokojakauma, joihin vaikuttavat lämpötila ja veden määrä ilmakehässä, mutta myös pilven dynamiikka sekä ilmakehän pienhiukkaset. Pienhiukkaset toimivat pilvipisaroiden tiivistymisytiminä ja vaikuttavat muodostuvaan pilvipisarajakaumaan sekä myös aiheuttavat pilvipisaroiden jäätymisen. Lentoaluksen pinta toimii myös jäätymisalustana alijäähtyneelle vedelle ja havaittavaan jäätämiseen vaikuttavat tällöin osaltaan itse lentoaluksen ominaisuudet. Jäätämisen voimakkuus vaihtelee huomattavasti niin ajallisesti kuin paikallisestikin ja lisäksi eri korkeuksilla. Tietoa jäätämisestä tarvitaan siten hyvinkin nopeasti ja mieluiten jo etukäteen, kun lentoja suunnitellaan. Suunnittelussa voidaan hyödyntää sääennustemallin antamiin olosuhteisiin perustuvia jäätämisenennusteita.

Ongelmana on, että nykyiset jäätämisenennusteet eivät vielä ole Puolustusvoimien (PV) – eivätkä muiden käyttäjien – kannalta riittävän tarkkoja ja ulottuvat vain noin 1–2 vrk pituiselle ajanjaksolle. Pidempiä ja yksityiskohtaisempia jäänkertymisennusteita ei vielä tällä hetkellä ole tarjolla Suomessa. Tähän ovat syynä seuraavat tekijät: I) Vaikka jäätämisenprosessit tunnetaan periaatteessa hyvin, nykyiset jäätämismallit sisältävät oletuksia ja vakioita tekijöistä (esimerkiksi pilvipisaroiden kokojakaumasta), jotka riippuvat olosuhteista, eivätkä näin ollen sovellu päivittäiseen ennustuskäyttöön; II) Vaikka nykyiset säämallit ennustavat tarkasti yleisen sään kehityksen, jäätämisenprosessien kannalta oleelliset tekijät, kuten pilviveden ja -jään suhde ja pisarakokojakauma, tunnetaan huonommin tai niille käytetään oletusarvoja; III) Jäänkertymistä mittaavia laadukkaita havaintoja ei ole ollut saatavilla tai ne ovat rajoittuneet yksittäisiin ja lyhyisiin mittauskampanjoihin, jolloin jäätämisenennusteiden verifiointi on hankalaa. Myöskään reaaliaikaisia havaintoja ei ole saatavilla kuin maanpinnan tasolta/läheltä; IV) Sääennustemallin pystyerotuskyky (korkeusresoluutio) heikkenee maanpinnalta ylöspäin mentäessä, korkeuksissa, joissa jäätämisen on erityisen haitallista lentotoiminnalle.

Tässä tutkimushankkeessa selvitetään maanpinnalta tehtävillä kaukokartoitusmenetelmillä (lidarit, ceilometrit eli pilvenkorkeusmittarit) ja luotauksilla saatujen hydrometeorien (pilvipisarot, jääkiteet) ominaisuuksien ja lämpötilan käytettävyyttä ilmakehän jäätävien kerrosten reaaliaikaisessa kartoituksessa. Kaukokartoitusmenetelmien ja jäätämisenennusteiden verifiointissa ja menetelmäkehityksessä käytetään pilvien mikrofysikaalisten ominaisuuksien (pilven pisarakokojakauma, vesipitoisuus, olomuoto) mittaustietoja. Näiden myötä aiempaa tarkempi jäätämiskerrosten kuvaus – esimerkiksi poikkileikkaustuotteessa –, reaaliaikainen pystyprofiilitieto sekä jäätämisenennusteiden tarkentuminen parantavat lentotoiminnan turvallisuutta, suunnittelua ja tehokasta toteutusta, mikä on nähty myös



käyttäjien puolelta tarpeelliseksi ja hyödylliseksi. Lidarit ja ceilometrit edustavat uutta mittaustekniikkaa, jonka käytännön hyödyntäminen operatiivisessa työssä on vielä Suomessa vielä vähäistä. Tällä tutkimuksella on tarkoitus vahvistaa nimenomaan osaamista, joka mahdollistaa uusien tekniikoiden hyödyntämistä Puolustusvoimien käytännön työssä.

Tutkimushankkeen tuloksena saadaan uutta tietoa jäätävien pilvikerrosten ominaisuuksista sekä selvitetään näiden mittausten/tulosten käyttökelpoisuus operatiivisessa ennustustoiminnassa. Tämän tiedon pohjalta syntyvien nykyistä luotettavampien ja tarkempien jäätämiskuvausten, -tuotteiden ja -ennusteiden avulla Puolustusvoimat voivat toteuttaa operatiivista lentotoimintaa erilaisella kalustollaan turvallisemmalla ja tehokkaammalla tavalla. Tuloksia voidaan vastaavasti hyödyntää myös siviili-ilmailussa (mm. lentokoneiden jäänestoaineiden tarvearvioinnissa), mikä on ympäristöystävällisempää sekä edesauttaa lentotoiminnan kustannustehokkuutta ja yhteiskunnan kokonaisturvallisuuden kehittämistä. Tarkemmat jäätämisenennusteet hyödyttävät myös kotimaista energiateollisuutta, sillä sähkölinjoihin ja tuulivoimalan lapoihin kertynyt jää aiheuttaa sähköntuotannossa häiriöitä, joihin voidaan ennusteen avulla ennalta varautua. Muutkin yhteiskunnan toimijat, kuten nopeasti kehittyvä drone-toiminta, tarvitsee hankkeessa tuotettavaa reaaliaikaisista tiedosta jäätävistä olosuhteista.

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimushankkeessa selvitetään uudentyyppisten havaintojen soveltumista ilmakehän jäätävien kerrosten reaaliaikaiseen kartoittamiseen sekä soveltuvuutta jäätämisenennusteiden verifiointiin. Uutta maanpinnalta tehtävää kaukokartoitukseen perustuvaa mittaustekniikkaa edustavat lidarit ja ceilometrit (pilvenkorkeusmittarit), joiden käytännön hyödyntäminen operatiivisessa ennustetyössä on Suomessa vielä vähäistä. Uusia tekniikoita tukevat perinteisemmät mittaustekniikat, joihin kuuluvat luotauksilla ja muilla mittausmenetelmillä saadut hydrometeorien (pilvipisararat, jääkiteet) ominaisuudet ja lämpötila. Tällä tutkimuksella selvitetään menetelmien käyttökelpoisuutta ja vahvistetaan osaamista, joka tukee uusien tekniikoiden hyödyntämistä käytännön operatiivisessa työssä kuten esimerkiksi lentotoiminnan reaaliaikaisessa suunnittelussa. Kaukokartoitusmenetelmien ohella jäätämisenennusteiden verifiointissa käytetään pistemittausten tuottamaa tietoa mm. jäätävien pilvien pisarakokojakaumasta. Lentoharjoitusten yhteydessä tehdään tehostettuja jäätämishavainnoja, joita verrataan kaukokartoituslaitteilla saatuihin mittaus tuloksiin.

Tutkimushankkeen tuloksena saadaan uutta tietoa jäätävien kerrosten ominaisuuksista sekä mittausten/tulosten käyttökelpoisuudesta operatiivisessa ennustustoiminnassa ja hyödyntämisestä lentotoiminnassa. Tämän tiedon pohjalta syntyvät nykyistä luotettavimmat ja tarkemmat jäätämishavainnot ja -ennusteet edesauttavat lentotoiminnan kustannustehokkuutta ja turvallisuutta. Tarkemmat jäätämisenennusteet hyödyttävät myös kotimaista energiateollisuutta, sillä sähkölinjoihin ja tuulivoimalan lapoihin kertynyt jää aiheuttaa sähköntuotannossa häiriöitä, joihin luotettavien jäätämisenennusteiden avulla voitaisiin ennalta varautua.

## 3. Aineisto ja menetelmät

Tutkimus suoritetaan keräämällä ilmakehän pilvistä havainnoja kaukokartoitusmenetelmillä (lidarit, ceilometrit), luotauksilla ja suorilla pilvimittauksilla pilven sisällä. Selvitetään, voidaanko kaukokartoitushavainnoista määrittää, ja millä tarkkuudella, jäätämistä, pilven alijäähtyneen veden määrä ja pisarakokojakauma. Verrataan havainnoista saatuja



arvoja jäätämismallin antamiin laskennallisiin arvoihin ja optimoidaan mallin parametreja vertailutulosten pohjalta. Verrataan mittaustuloksia Ilmavoimien lentäjien koe- ja koulutuslennoilla tekemiin jäätämishavaintoihin. Tutkimuksessa käytetään Ilmatieteen laitoksen jo keräämää aineistoa sekä hankkeen aikana kerättävää uutta mittaustulostietoa.

#### Kaukokartoitusmittaukset

Ilmakehän profiilihavainnot pilvistä tehdään lidareilla ja ceilometreillä, joiden pääsääntöinen sijoituspaikka on Kuopiosta noin 20 km päässä sijaitsevalla Vehmasmäen mittausasemalla (PollyXT ja Vaisala CL51) ja Kuopiossa sijaitsevalla Savilahden mittausasemalla (Vaisala CT25K). Harjoituslentojen aikana hyödynnetään erityisesti Tikkakosken ceilometriä (Vaisala CT25K). Lidarit ja ceilometrit toimivat tutka-periaatteella, käyttäen valon aallonpituuksia. Käytännössä taivaalle lähetetään valopulssi, jonka osuessa kohteeseen (esim. hiukkanen tai pisara) osa valosta siroaa takaisin ja se havainnoidaan detektorein. Valon matkaan käyttämä aika kertoo sirottavan kohteen etäisyyden. Ceilometrit on kehitetty pilven alapinnan korkeuden määrittämiseen eikä pystyprofiilista saatavaa tietoa tavallisesti ole hyödynnetty operatiivisesti. Tähän tarvitaan takaisinsirontakertoimen profiilidataa, jota saadaan nykyisin noin kymmenestä ceilometristä tutkimuskäyttöä varten. Hankkeen aikana Tikkakosken ceilometriä on muokattu niin, että saadaan tuotettua myös reaaliaikainen profiilitieto. Jos ceilometriä käytetään jätämistutkimuksissa käyttökelpoiseksi, Ilmatieteen laitoksen ceilometri-verkosto (noin 100 kpl) saa suuren lisäarvon ja potentiaali reaaliaikaisessa havainnoissa sekä jäätävyyssennusteiden kehitykselle on suuri.

Lidarien/ceilometriä etuna esim. perinteisiin luotauksiin verrattuna on hyvä aika- ja korkeusresoluutio. Lidarit mittaavat jatkuvatoimisesti hyvällä aikaresoluutiolla verrattuna luotauksiin joita normaalisti tehdään vain kahdesti vuorokaudessa. Lidareilla voidaan mitata maan pinnalta yli kymmenen kilometrin korkeuteen 7,5–30 metrin korkeusresoluutiolla, laitteesta riippuen. Mittausten verifiointissa hyödynnetään mastoissa suoritettavia jäätämismittauksia. Kampanjavaiheessa ilmavoimien harjoitus- ja koulutuslennoilta saatava jäätävyystieto on tärkeässä roolissa datan verifiointissa.

#### Pilvien mikrofysikaalisten ominaisuuksien mittaukset

Pilvipisaroiden ja aerosolihiukkasten ominaisuuksia mitataan Kuopion Puijon tornin mittausasemalla, jossa aerosolihiukkasten ja pilvipisaroiden vuorovaikutusta on tutkittu jatkuvatoimisesti vuodesta 2006 lähtien. Puijon mittausasemalla pilviä esiintyy noin 15 % ajasta, josta kolmasosa jäätävissä olosuhteissa. Puijon tornin korkeudella (306 m merenpinnan yläpuolella) ei esiinny puhtaita jääkidepilviä, vaan pilvet ovat joko vesipisaroista koostuvia tai ns. sekafaasipilviä, joissa on sekä nestepisaroita että jääkiteitä.

Pilvipisaroiden kokojakauma mitataan pilvipisaralaskurilla, joka luokittelee ja laskee kooltaan 3–50 µm kokoiset pisarat niistä sironneen valon perusteella. Kokojakaumasta saadaan määritettyä myös pilvessä olevan veden kokonaismäärä. Aerosolihiukkasista mitataan niiden kokojakauma pilvessä ja pilven ulkopuolella, jolloin voidaan määrittää pilvipisaroiksi aktivoituneiden aerosolihiukkasten osuus.

Jäätäviä olosuhteita havainnoidaan Puijon tornissa olevilla meteorologisilla mittalaitteilla (lämpötila, kosteus, vallitseva sää, näkyvyys) ja kolmella erilaisella jäätävyyssanturilla. Antureiden avulla voidaan määrittää kertyvän jään määrä ja sen riippuvuus vallitsevista olosuhteista. Jätämistä mitataan jätämisantureilla (Goodrich 0872F1) myös Vehmasmäen mittausaseman 318 metrisessä mastossa kahdella eri korkeudella, jolloin saadaan tietoa jäätävyyden pystyprofiilista vertailuaineistoksi kaukokartoitushavainnoille.



### Havainnot Ilmavoimien harjoituslennoilta

Tärkeitä ja ainutkertaisia lisähavaintoja saadaan Ilmavoimien lentoharjoitusten yhteydessä tehtävästä tehostetusta jäätämishavainnoinnista kampanjajaksoina, jolloin verrataan Ilmatieteen laitoksen laitteilla saatuja mittaustuloksia lentäjien havaintoihin. Lentojen aikana lentäjä arvioi subjektiivisesti jäätämisolosuhteita ja jään kertymistä.

### Jäätämismalli ja verifiointi

Projektin pääasiallinen tarkoitus on selvittää, reaaliaikaisten havaintojen käytettävyys jäätävien olosuhteiden arvioinnissa. Havaintodataa ja -tuotteita voidaan kuitenkin hyödyntää myös jäätämismallin kehityksessä. Tässä työssä käytettävä jäätämismalli pohjaa ISO STANDARD:ssa 12494 kuvattuun fysiikkaan, jossa jään kertymänopeus määritetään vapaasti pyörivän vertailusylinterin pinnalle. Malli kykenee lämpötilasta riippuen joko kasvattamaan tai sulattamaan kertynyttä jäämassaa. Jään kertymään vaikuttavat sääsuureiden lisäksi kolme kerrointa, jotka kuvaavat vesipisaroiden käyttäytymistä ja tartunta ominaisuuksia. Säämallisuureiden tuottamiseen käytetään Ilmatieteen laitoksen operatiivisessa käytössä olevaa HARMONIE-mallia, jonka uuden tyyppinen pilvimikrofysiikkamenetelmä kykenee jakamaan ilmakehän vesisisällön viiteen eri suureeseen (sade, lumi, lumirae, pilvivesi ja pilvijää). Näistä olennaisimmat suureet jäätämisen kannalta ovat pilvivesi ja sade. Jäätämisenusteiden verifiointiin tullaan hyödyntämään projektin tuottamia uusia jäätämishavaintoja.

## 4. Tulokset ja pohdinta

Projektin aikana on koottu yhteen ja vertailtu olemassa oleva jäätämiseen liittyvä aineisto jäätävyyssantureilta, pilvipisaralaskurilta sekä ceilometreiltä. Lisäksi jäätämismallilla on tuotettu vertailuaineisto vastaavalle ajankohdalle. Aineiston avulla on kehitetty toimiva versio Ceilometrini profiilidatasta tuotetusta automaattisesta jäätämistuotteesta. Tuotteen verifiointityö pidemmän aikasarjan in-situ mittauksia vastaan jatkuu edelleen mittauspisteiden lisääntyessä ja mittausaineiston kasvaessa. Jäätämismallia on muokattu niin että siitä saadaan pistetiedon sijaan tärkeä profiilitieto jäätämisestä valittuihin maantieteellisiin kohteisiin. Mallin tuloksia on vertailtu ja edelleen verrataan in-situ ja profiilimittauksiin lyhyemmällä kampanjajaksolla. Tulokset ovat rohkaisevia sekä mallin että mitatusta profiilidatasta kehitetyn jäätämisluokittelun osalta ja vertailua jatketaan pidemmällä aikasarjalla. Projektin myötä uusia mittauksia on järjestetty Tikkakoskelle (ceilometrini profiilidata).

Reaaliaikaisia mittauksia, jäätävyystuotteita sekä malliennuste ajetaan suoraan projektin aikana rakennetulle julkiselle nettisivulle asiantuntijoiden käyttöön. Sivuja on kehitetty yhdessä operatiivisten meteorologien kanssa ja Ilmavoimien lentäjien palautteen perusteella. Sivut ovat päivittäisessä testikäytössä apuna operatiivisessa ennustamisessa sekä lentosuunnittelussa.

Ilmavoimien kanssa on Tikkakoskella järjestetty palautekampanja lentojen aikaisista jäätämishavainnoista, joiden avulla voimme edelleen kehittää omia algoritmejamme. Tätä toimintaa on tarkoitus jatkaa jaksoittain myös läpi talven 2018–2019. Lentäjien palaute on ensiarvoisen tärkeää ja ainutlaatuista koska jäätämistä ei voida suoraan mitata pilvessä vaan käytetään kaukokartoitus- ja data-analyysimenetelmiä.

Saadut tulokset vahvistavat oletuksen kaukokartoitusmenetelmien suuresta potentiaalista jäätävien olosuhteiden havainnoinnissa. Kehitetyt tuotteet toimivat varovaisiin odotuksiin nähden erittäin hyvin, toki kehitystarvetta vielä on ja työ jatkuu edelleen. Koko maan

kattava ceilometriverkko tarjoaa kehitetyille datatuotteille potentiaalisen laajennusmahdollisuuden koko Suomen kattavaksi, miksei yli rajojenkin. Jo nyt saatu palaute hyödyistä ennuste ja lentotoiminnassa on ollut hyvää, ja laajennusmahdollisuuksien myötä hyödyt kasvavat edelleen. Projektissa kehitetyt tuotteita kohtaan on osoitettu kiinnostusta myös kansainvälisiltä tahoilta.

## 5. Loppupäätelmät

Projekti on edennyt aikataulussaan ja kiinnostus sekä palaute meteorologien ja mukana olevien Ilmavoimien lentäjien puolelta ovat olleet erittäin rohkaisevia. Tutkimuksen hyödyt ovat jo nyt selvästi näkyvissä. Ceilometrin profiilidatasta kehitetty jäätämistuote on Ilmatieteen laitoksen meteorologien sekä Tikkakoskella Ilmavoimien käytettävissä reaaliajassa. Jäätävyystuotteita ja ennustetta kehitetään edelleen ja niitä pyritään tuottamaan useampaan paikkaan. Tuotteita kehitetään edelleen vertaamalla lisää mittausaineistoja eri paikoista. E erityisen tärkeässä roolissa on lentäjiltä saatujen arvokkaiden lennolla havaittujen jäätämistapausten hyödyntäminen ja vertaaminen kehitettyihin tuotteisiin. Yksi tärkeä kehityksen alla oleva parannus on jäätävien sateiden havainnointi. Toistaiseksi hankkeessa on keskitytty pilvijäätämiseen, mutta myös jäätävä sade on haitallista ilmailulle. Tähän aiheeseen on lisätty panostusta, ja tällä hetkellä jäätäviä sateitakin voidaan havaita ja määrittää jo kohtuullisella tarkkuudella.

Kasvavaa käyttäjäpotentiaalia löytyy operatiivisesta ennustekäytöstä sekä ilmavoimien lisäksi PV:n eri sektoreilta, kuten UAV- ja helikopteritoiminnasta. Jatkossa myös siviililmailun on mahdollista hyötyä parantuneista ennusteista ja reaaliaikaisista jäätämismittauksista sekä -tuotteista. Projektin tulokset ja tuotteet ovat herättäneet myös kansainvälistä kiinnostusta mikä takaa tuotosten laajamittaisen käytön ja leviämisen.

Projektissa aloitettu työ jatkuu hankkeen päättymisen jälkeenkin. Analyysiketjuun tullaan lisäämään uusia ceilometrejä sitä mukaa kuin profiilidataa on käytettävissä. Sateen olomuodon luokittelun kehittämiseen panostetaan edelleen. Pilvipisaroiden jakaumamittaukset liitetään entistä tiukemmin mukaan analyyseihin. Tulevan talven arvokkaat lentäjähavainnot hyödynnetään täysimääräisesti jäätämistuotteiden parantamisessa.

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

Hankkeen artikkelijulkaisut ovat työn alla, lähiaikoina valmistumassa artikkeli:

Hirsikko A., Hämäläinen K., Komppula M., Leskinen A. and O'Connor E.J., Real-time monitoring of icing conditions in vertical profile of the atmosphere with an operational ceilometer network, in preparation.

- Ceilometreille kehitetyn menetelmän kuvaus ja testaus.

Tutkimusaiheeseen liittyviä kokousjulkaisuja on listattu alla.

Hirsikko A, Brus D, O'Connor E, Filioglou M, Komppula M, Romakkaniemi S: Super-cooled liquid water topped sub-arctic clouds and precipitation - investigation based on combination of ground-based in-situ and remote-sensing observations, Geophysical Research Abstracts, Vol. 19, EGU2017-1872, 2017.  
<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-1872.pdf>.

- Työssä tutkittiin alijäähtyneitä vesikerroksia pistemäisten ja profiilimittausten avulla





---

Pallaksen mittauskampanjan (Pallas Cloud Experiment 2015) havaintojen perusteella.

Hirsikko A, Komppula M, Leskinen A, Hämäläinen K, Niemelä S, O'Connor E: Freezing condition monitoring and FMI's icing forecast model evaluation with observations from ceilometer network in Finland, EMS Annual meeting abstract, Vol. 14, EMS2017-132, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EMS2017/EMS2017-132.pdf>, 2017.

- Esiteltiin uusi ceilometri-pohjainen jäätävyyssmonitorointiin tarkoitettu tuote ja tarkasteltiin tuotteen paikkansa pitävyyttä.

Hirsikko A., M. Komppula, A. Leskinen, K. Hämäläinen, S. Niemelä and E.J. O'Connor: Towards monitoring of icing conditions with operational ceilometer network and evaluation of icing forecast model. Proceedings of 'the Center of Excellence in Atmospheric Sciences (CoE ATM) -From Molecular and Biological Processes to the Global Climate' Annual Meeting 2017, Editors: Päivi Haapanala, Anna Lintunen, Joonas Enroth, and Markku Kulmala (2017), p. 251-254. <http://www.atm.helsinki.fi/FAAR/reportseries/rs-202.pdf>

- Esiteltiin uusi ceilometri-pohjainen jäätävyyssmonitorointiin tarkoitettu tuote ja tarkasteltiin tuotteen paikkansa pitävyyttä. Tarkateltiin myös jäätävyyssmallin tuloksia.

Komppula M., A. Leskinen, A. Ruuskanen and S. Romakkaniemi, Measurements of cloud droplet size and concentration related to icing, Winterwind 2018 Book of Abstracts, Abstract #34, p.36. [http://winterwind.se/wp-content/uploads/2017/11/Winterwind2018\\_BoA\\_171101.pdf](http://winterwind.se/wp-content/uploads/2017/11/Winterwind2018_BoA_171101.pdf)

- Tarkasteltiin pilvipisaroiden ja jäätämisen välistä yhteyttä pitkäaikaismittauksia hyödyntäen.

Hirsikko A., K Hämäläinen, A. Leskinen, M. Komppula, and E.J. O'Connor, Detection of atmospheric icing conditions in the vertical profile with a ceilometer - validation of the method, EGU 2018.

- Jäätämisen ja jäätävän sateen ceilometri-menetelmän verifiointia jäätämismittausten avulla.

Hirsikko A., K. Hämäläinen, A. Leskinen, A. Ruuskanen, A. Laitinen and M. Komppula, Monitoring and forecasting presence and influence of atmospheric super-cooled liquid water containing clouds in the vertical profile – final results of the project. Proceedings of YOPP, Helsinki, 14-16 January 2019.

- Esiteltiin projektia yleisesti ja ceilometriä potentiaalia havaita alijäähtyneet vesikerrokset.

Hirsikko A., K. Hämäläinen, A. Ruuskanen, A. Leskinen, M. Komppula, and E. O'Connor, Advances in Ceilometer Data Processing - Detecting Atmospheric Icing in the Vertical Profile, Proceedings of AMS 2019, Phoenix, USA 6-10 January 2019.

- Ceilometrihavaintojen esittelyä jäätämisen, sumujen ja sateen havaitsemisen osalta.

Ruuskanen A., A. Leskinen, S. Romakkaniemi and M. Komppula, The effect of atmospheric aerosol particles on cloud icing rate, Winterwind 2019.

- Aerosolihiukkasten vaikutus pilvipisaroiden ominaisuuksiin ja tätä kautta jäätämisen voimakkuuteen.