Johdantoa

Kevättalvella 2021 selvitettiin, miten talviajan sääolosuhteet vaikuttavat lidarin (RoboSense RS-LiDAR-16) toimintaan. Tutkimuksessa käytetty aineisto kerättiin tammi-, helmi- ja maaliskuussa. Erityisesti tarkoituksena oli selvittää, miten lumisade vaikuttaa testikohteista mitattuun intensiteettiin. Todettiin kuitenkin, että myös muut sääolot kuin lumisade vaikuttavat lidarin toimintaan.

Aineisto sisälsi sääaseman antamia parametreja säätilasta, mutta lumisateen määrästä tai lumihiutaleiden koosta ei ollut mahdollista saada tietoa. Toukokuussa tehtiin mittauksia lumisateesta siten, että lumisade pystyttiin todentamaan ihmisaistein. Näiden mittausten perusteella laadittiin laskennallisia menetelmiä, joilla lumisadetta voitiin arvioida myös talviajan mittauksista.

Tässä raportissa esitellään aluksi tutkimuksessa käytetty aineisto. Sen jälkeen perehdytään lumisateen määrän ja laadun karakterisointiin sekä siihen, miten lumisade vaikuttaa lidarin toimintaan. Lopuksi tarkastellaan myös muiden sääolojen vaikutusta.

Aineisto

Aineistoa kerättiin joulukuusta 2020 loppukevääseen 2021. Aineistosta on tarkemmin analysoitu tammi-, helmi- ja maaliskuun 2021 mittaukset. Dataa kerättiin mittausasemalla automaattisesti aina silloin, kun sää muuttui määrättyjen parametrien mukaisesti. Tammikuusta tallentui 898 mittausta, helmikuusta 989 mittausta ja maaliskuusta 934 mittausta. Yksittäinen mittaus kesti 10 sekuntia, ja tässä ajassa tallennettiin 98 peräkkäistä pyyhkäisymittausta. Tarkasteltavina kohteina mittauksissa olivat eri etäisyyksille (noin 21 m, 22 m, 41 m, 56 m ja 71 m) kiinnitetyt 40 cm x 80 cm kokoiset vanerilevyt.

Lidarin mittausdataa käsiteltiin matriiseina, jotka koostuivat kolmiulotteisen suorakulmaisen koordinaatiston pisteistä ja niitä vastaavista intensiteeteistä. Jokainen mittaus yhdistettiin sääasemalta saatavaan dataan, joka sisältää tiedon mm. ilman lämpötilasta, paineesta ja suhteellisesta kosteudesta.

Automaattisesti kerätyn aineiston lisäksi tarkasteltiin aineistoa, joka mitattiin toukokuussa 2021 esiintyneissä lumipyryissä. Tätä aineistoa käytettiin kahteen tarkoitukseen: (1) pyrittiin selvittämään, miten erilaiset lumisateet näkyvät lidarin pistepilvessä, jonka jälkeen tätä tietoa voitaisiin käyttää siihen, että tammi-maaliskuun mittauksille arvioitaisiin tieto lumisateen voimakkuudesta, (2) selvitettiin, miten todettu lumisade vaikuttaa eri etäisyydellä olevista testikohteista mitattuun intensiteettiin. Toukokuussa lumisateiden aikana ilman lämpötila oli 1 °C ja 9 °C välillä ja ilman suhteellinen kosteus noin 74 % - 81 %. Yhden lumisateen aikana lumihiutaleet olivat huomattavan suuria (halkaisijaltaan noin 1 cm), mutta muiden aikana pieniä (halkaisijaltaan muutamia millimetrejä). Lisäksi analysoitiin vertailun vuoksi yksi mittaus lumisateettomalla säällä ja yksi mittaus kohtalaisessa vesisateessa.

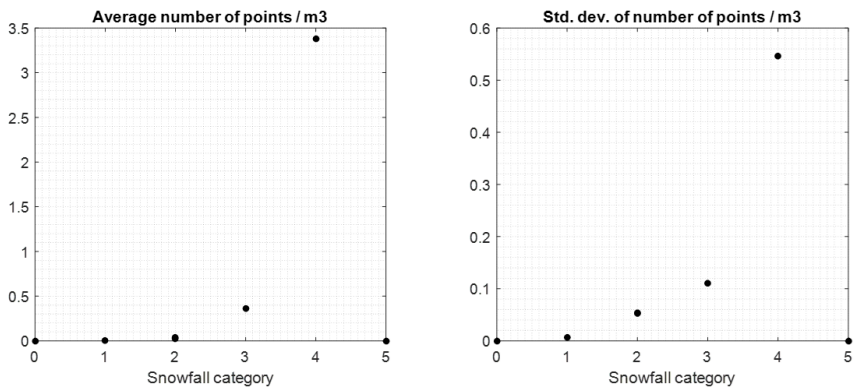
Lumisateen voimakkuuden arviointi

Sääaseman sademittari toimii siten, että lasersäteen avulla mitataan putoavan vesipisaran nopeus, ja nopeuden perusteella lasketaan pisaran koko ja edelleen vastaava sademäärä. Lumihiutaleiden putoamisnopeus riippuu lumihiutaleen muodosta ja koosta [1]. Erilaisissa sääolosuhteissa puolestaan voi muodostua hyvin erilaisia lumihiutaleita [2]. Sääaseman mittaamaan hiutaleen putoamisnopeuteen perustuva sadelukema ei siis sovellu suoraan lumisateen määrän karakterisointiin. Tämän takia tarkasteltiin, miten visuaalisesti havaitut lumisateet näkyvät lidarin pistepilvessä. Analyysin tuloksia käytettiin myöhemmin käänteisesti siten, että tammi-maaliskuussa mitatuille aineistoille arvioitiin vastaava lumisateen voimakkuus.

Toukokuussa havaituille lumisateille kokeiltiin seuraavia menetelmiä: (1) laskettiin havaittujen pisteiden tiheys alueella, jolla ei ollut kiinteitä kohteita (toisin sanoen lumihiutaleiden tiheys); (2) laskettiin yhden mittauksen peräkkäisten pyyhkäisyjen väliset korrelaatiot; (3) eroteltiin pistepilvistä mittauksesta toiseen paikallaan pysyviä ja toisaalta liikkuvia pisteitä.

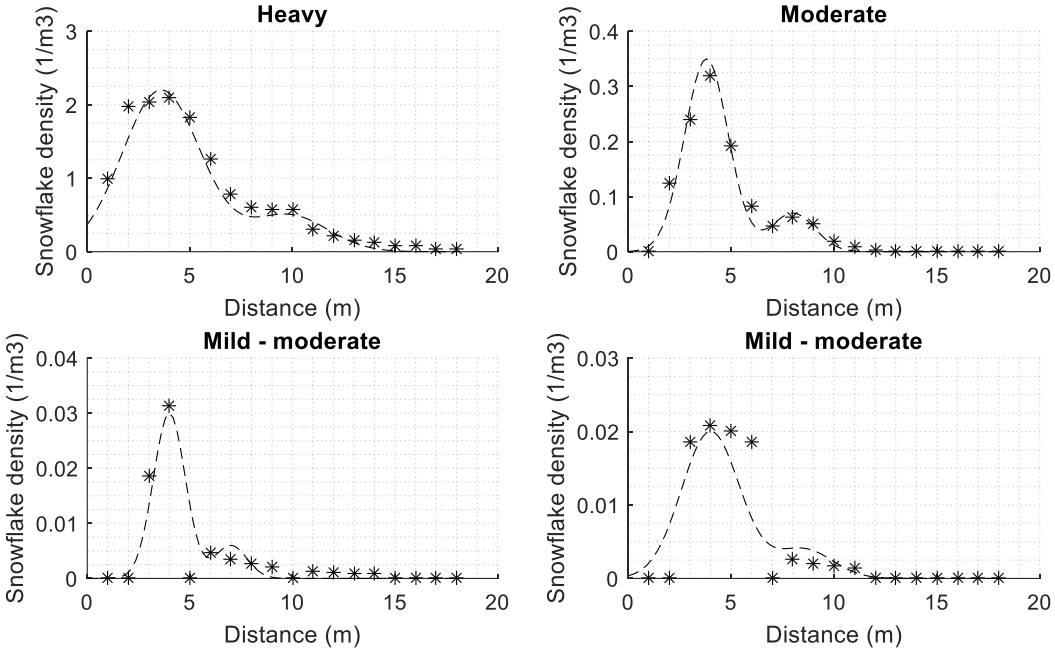
Menetelmää (1) tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin, ja se valittiin myös menetelmäksi, jolla lumisadetta karakterisoitiin tammi-maaliskuun mittauksista. Myös menetelmää (2) käyttäen pystyttiin erottelemaan lumisateeton sää, kohtalainen lumisade ja voimakas lumisade. Menetelmä on kuitenkin laskennallisesti melko raskas. Analyysin yhteydessä myös varmistui, että sääaseman antama sadelukema ei korreloi havaitun lumisateen voimakkuuden kanssa.

Tarkastelualueeksi valittiin vaakasuunnassa 8 m ja pystysuunnassa 1 m kokoinen alue, jolta havaittujen pisteiden määrä laskettiin 1 m – 5 m etäisyydeltä detektorista. Pisteet laskettiin mittauksen jokaisesta 98 pyyhkäisystä. Pisteiden intensiteetit olivat melko matalia ja keskenään samansuuruisia, joten voidaan luotettavasti sanoa, että mittaus kohdistui nimenomaan lumihiutaleisiin. Pisteiden määrälle laskettiin keskiarvo ja keskihajonta. Kuvasta 1 todetaan, että suurten hiutaleiden havaitsemistiheys on merkittävästi suurempi kuin pienten. Luonnollisesti lasersäteen on todennäköisempää osua suureen hiutaleeseen kuin pieneen. Suurten ja pienten hiutaleiden tiheyden suhteesta (noin 3.4/0.4) voidaan hiutalekoon suhteeksi laskea noin 2.9, joka vastaa kohtuullisesti visuaalisia havaintoja. Kohtalaisia lumisateita ei voida luotettavasti erotella toisistaan, mutta erittäin voimakas lumipyry ja toisaalta myös lumisateen puuttuminen erottuvat selkeästi.



Kuva 1: Tarkastelualueella havaittujen hiutaleiden tiheyden keskiarvo ja keskihajonta. Lumisadekategoriat ovat subjektiivisesti valittuja lukuja (0 = ei lumisadetta, 5 = vesisade, muiden lukujen osalta: mitä suurempi luku, sitä kovempi lumipyry ja sitä suuremmat hiutaleet).

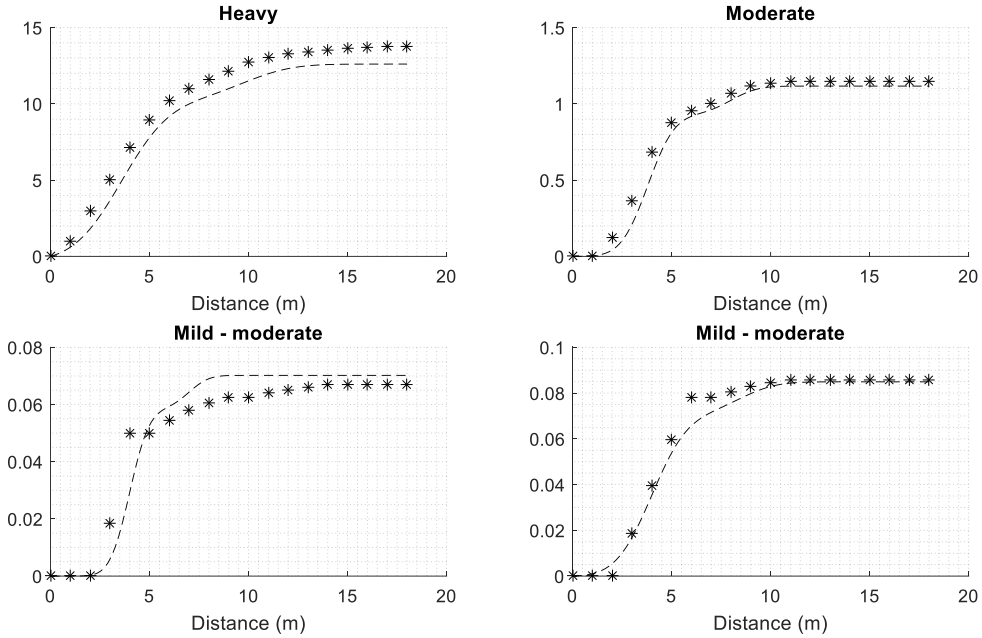
Toukokuun aineistosta tarkasteltiin myös sitä, minkä verran lumihiutaleita havaitaan eri etäisyyksiltä. Tarkastelualueeksi valittiin vaakasuunnassa kulma -10° ... 10° ja pystysuunnassa kulma -5°... 5° detektorilta mitattuna, ja tältä alueelta laskettiin havaitut lumihiutaleet eri etäisyyksillä 0 m ja 20 m välillä (kauempana hiutaleita ei havaittu ollenkaan). Tulokset on esitetty kuvassa 2. Mittaustuloksiin sovitetut mallit (katkoviivat) ovat summia kahdesta eksponenttifunktiosta. Lumisateen määrän ja laadun yhteys funktion parametreihin (maksimiarvot ja leveydet) ei ole vielä selvillä.



Kuva 2: Havaittujen lumihiutaleiden tiheys erilaisissa lumipyryissä.

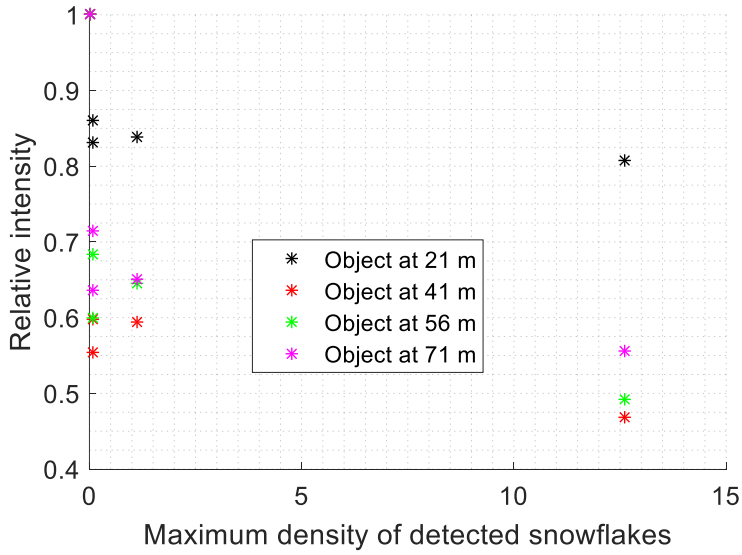
Lidarin toimintaan lumisateessa vaikuttaa merkittävästi se, kuinka monta lumihiutaletta säde kohtaa edetessään mitattavalle kohteelle ja takaisin detektorille. Säde voi läpäistä lumihiutaleen, mutta jokainen läpäisy pienentää intensiteettiä, joka säteellä on sen saapuessa detektorille. Tämän tarkastelemiseksi toukokuun lumisateista laskettiin eri etäisyyksillä mitattu kumulatiivinen lumihiutaleiden määrä samalta alueelta, jota tutkittiin edellä.

Seuraavassa kuvassa on erilaisissa lumisateissa todettu lumihiutaleiden kertymä eri etäisyyksillä. Mittauksiin sovitetut funktiot ovat kuvan 2 eksponenttifunktioiden integraaleja. Todetaan, että eksponenttimalli toimii hyvin myös kertymän mallintamisessa. Suurista lumihiutaleista koostuvassa pyryssä säteen kohtaamien hiutaleiden määrä esimerkiksi 10 metrin matkalla voi olla noin satakertainen verrattuna kohtuullisempiin lumisateisiin. Lisäksi suurten hiutaleiden kertymäfunktio saavuttaa maksiminsa kauempana kuin pienistä hiutaleista muodostuvassa pyryssä.



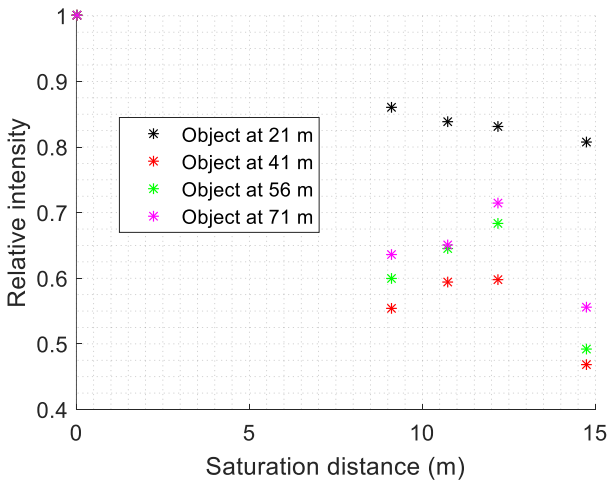
Kuva 3: Lumihiutaleiden kertymä eri etäisyyksillä.

Seuraavaksi tarkasteltiin, miten erilaiset lumisateet vaikuttavat eri etäisyyksillä olevista testikohteista mitattuun intensiteettiin. Jos lumisadetta kuvaavaksi lukuarvoksi valitaan se, kuinka suuri on havaitun hiutaletiheyden maksimiarvo, on muita kuin hyvin voimakkaita, suurista hiutaleista koostuvia, lumipyryjä vaikeaa erotella toisistaan. Alla olevassa kuvassa on verrattu eri etäisyydeltä vanerilevyistä mitattuja intensiteettejä vastaaviin lumisateettomassa säässä mitattuihin intensiteetteihin. Oikean reunan pisteet vastaavat suurista lumihiutaleista mitattua aineistoa.



Kuva 4: Testikohteista mitattu intensiteetti verrattuna lumisateettoman sään kohteisiin, kun lumisadetta kuvaillaan hiutaleiden havaintotiheyden maksimiarvolla.

Seuraavassa kuvassa lumisadetta kuvaavaksi lukuarvoksi on valittu se etäisyys, jolla hiutalekertymään sovitettu malli saavuttaa 99 % maksimiarvostaan. Tällä asteikossa kohtuullisemmatkin lumisateet voidaan erottaa toisistaan. Lähellä olevilla kohteilla (mustat tähdet) lumisateen vaikutus intensiteettiin vaikuttaa lineaariselta. Sen sijaan kauempana olevista kohteista tarvitaan vielä lisää aineistoa.

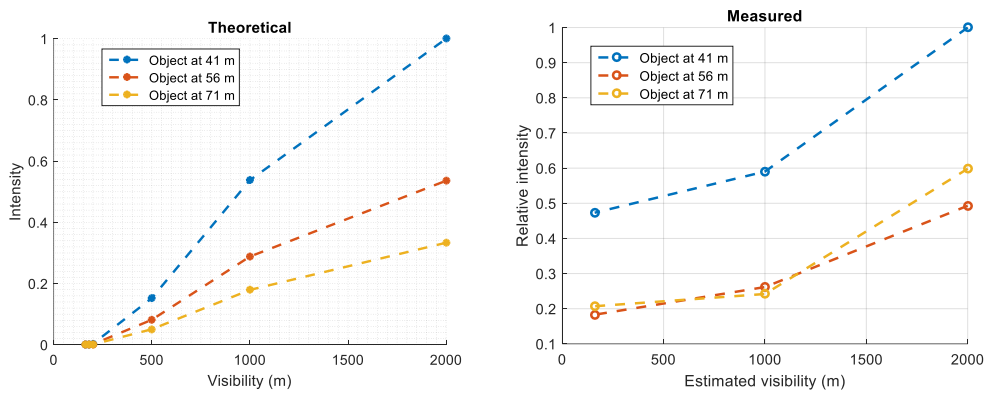


Kuva 5: Testikohteista mitattu intensiteetti verrattuna lumisateettoman sään kohteisiin, kun lumisadetta sillä etäisyydellä, jolla hiutaleiden havaintotiheys saavuttaa 99 % maksimiarvostaan.

Teoreettisesti lumihiutaleiden vaikutus lidarin signaalin tehoon [3] on muotoa

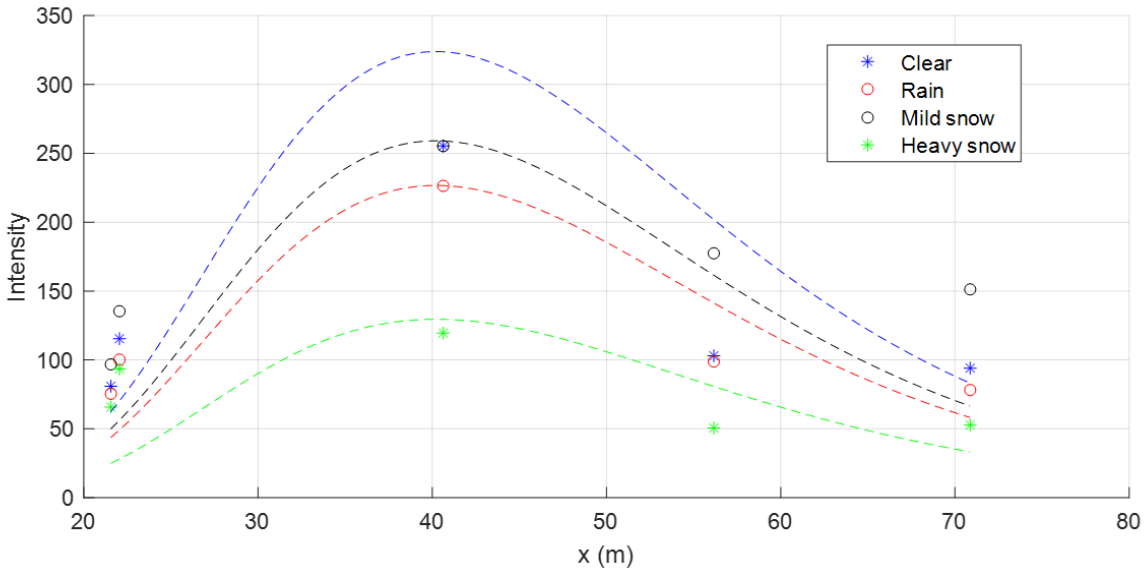
$$P(z_T) = P_0 \frac{\rho_T}{\pi} \frac{A}{z_T^2} e^{-2 \cdot OD}$$

missä OD (optical density) kuvaa lumipyryn laatua, ja muut vakiot liittyvät mittausjärjestelyihin. Optinen tiheys on laskettavissa näkyvyyden perusteella, mutta näkyvyyttä ei ollut mahdollista mitata käytetyllä laitteistolla. Näkyvyyttä kuitenkin käytetään yleisesti lumisateen voimakkuuden kuvaamiseen [4]. Seuraavassa kuvassa vasemmalla on esitetty, kuinka erilaiset lumisateet vaikuttavat teoreettisesti havaittuun intensiteettiin eri etäisyyksillä. Oikealla on vastaavat mittaustulokset toukokuun lumisateista, mutta koska näkyvyyttä ei ollut mahdollista mitata, on näkyvyyden arvoina käytetty karkeita arvioita.



Kuva 6: Teoreettinen ja havaittu vaikutus lidarin tehoon, kun lumisateen määrää kuvaillaan näkyvyysarvolla (visibility). Kokeellisissa havainnoissa näkyvyydet ovat arvioita.

Toukokuussa mitatusta aineistosta saatiin myös karkeasti muodostettua matemaattinen malli, joka huomioi intensiteetin yhteyden mittauskohteen etäisyyteen ja säähän. Kuvassa 7 on esitetty eri etäisyyksillä olevista testikohteista mitatut intensiteetit eri säätiloissa ja niihin sovitetut käyrät. Etäisyyden vaikutus näyttäisi noudattavan log-normaalijakauman funktiota, jonka parametrit luultavasti riippuvat käytetystä laitteistosta. Sään kuvaamisen mallissa on käytetty vain kerrointa, joka on välillä 0.4 (kova lumipyry) ja 1 (ei lumisadetta). Mallissa on huomioitu se, että osa intensiteeteistä (41 m, clear ja mild snow) ylitti detektorin maksimiarvon. Mittauskohteen kulmalla detektoriin nähden on myös teoreettisesti pieni vaikutus, mutta se jätettiin tästä tarkastelusta pois.



Kuva 7: Mittaustuloksiin sovitettu matemaattinen malli, joka kuvaa lumisateen voimakkuuden ja testikohteen etäisyyden yhteisvaikutusta mitattuun intensiteettiin.

Automaattisesti kerätty aineisto

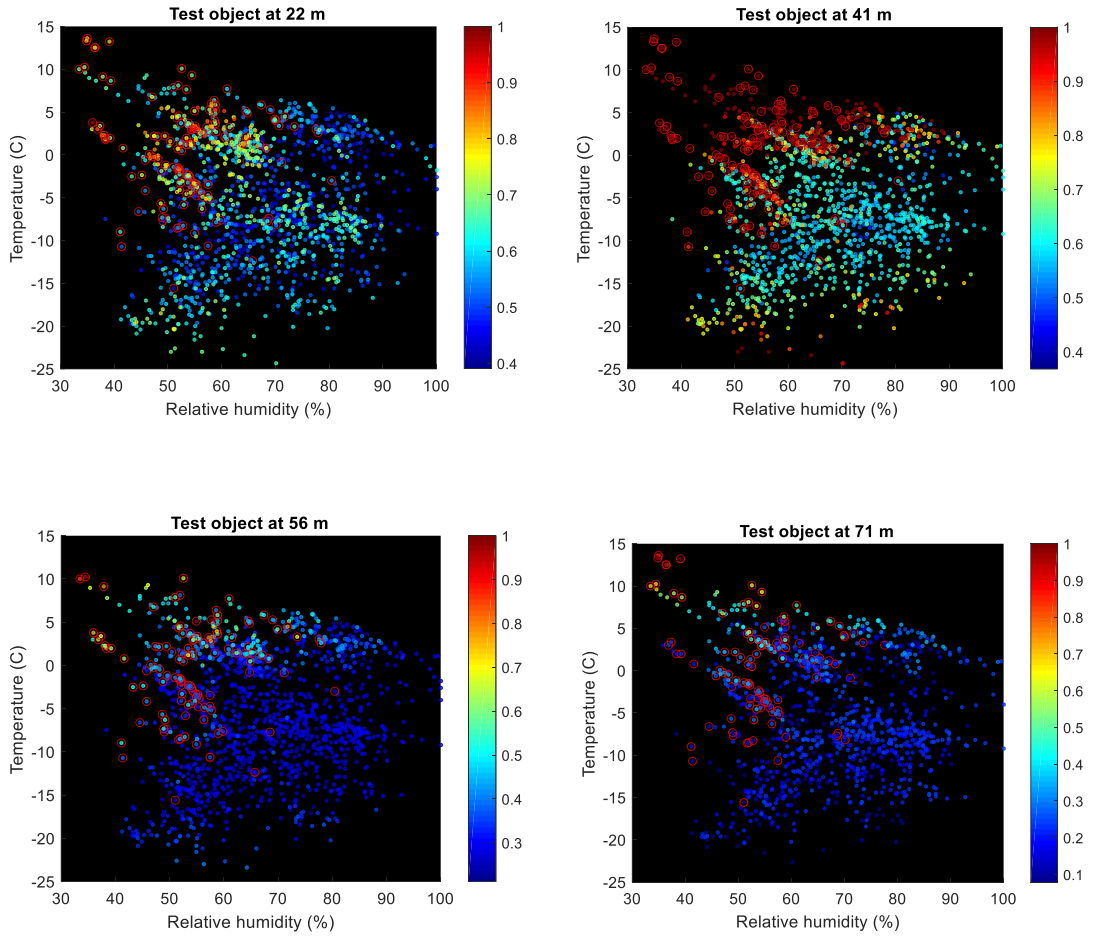
Seuraavaksi tarkastellaan sään vaikutusta tammi-maalikuussa mitattuun aineistoon. Testikohteina toimivat viisi vanerilevyä sijaitsivat noin 21 m – 72 metrin etäisyydellä detektorista. Pistepilviin kuului enimmillään 17 pistettä lähimpänä olevista kohteista, ja vähimmillään neljä pistettä kauimmaisesta kohteesta.

Mittaukset ilman lumisadetta

Tammi-maaliskuussa kerätystä aineistosta valittiin ensin vain ne mittaukset, joissa ei satanut lunta. Aineiston karsinta tehtiin laskemalla lidarin havaitsemat pisteet toukokuun aineistosta tutkitusta testitilavuudesta, ja valitsemalla vain ne mittaukset, jossa pisteitä (lumihiutaleita) ei ollut yhtään. Intensiteeteissä oli huomattavia eroja, joiden yhteyttä sääolosuhteisiin pyrittiin selvittämään.

Seuraavassa kuvassa on esitetty eri etäisyyksillä olevista testikohteista mitatut intensiteetit lämpötilan ja ilmankosteuden mukaan eriteltyinä. Intensiteettiä on verrattu suurimpaan kullakin etäisyydellä mitattuun intensiteetin arvoon. Lisäksi kuviin on punaisella rengastuksella merkitty kirkkaissa

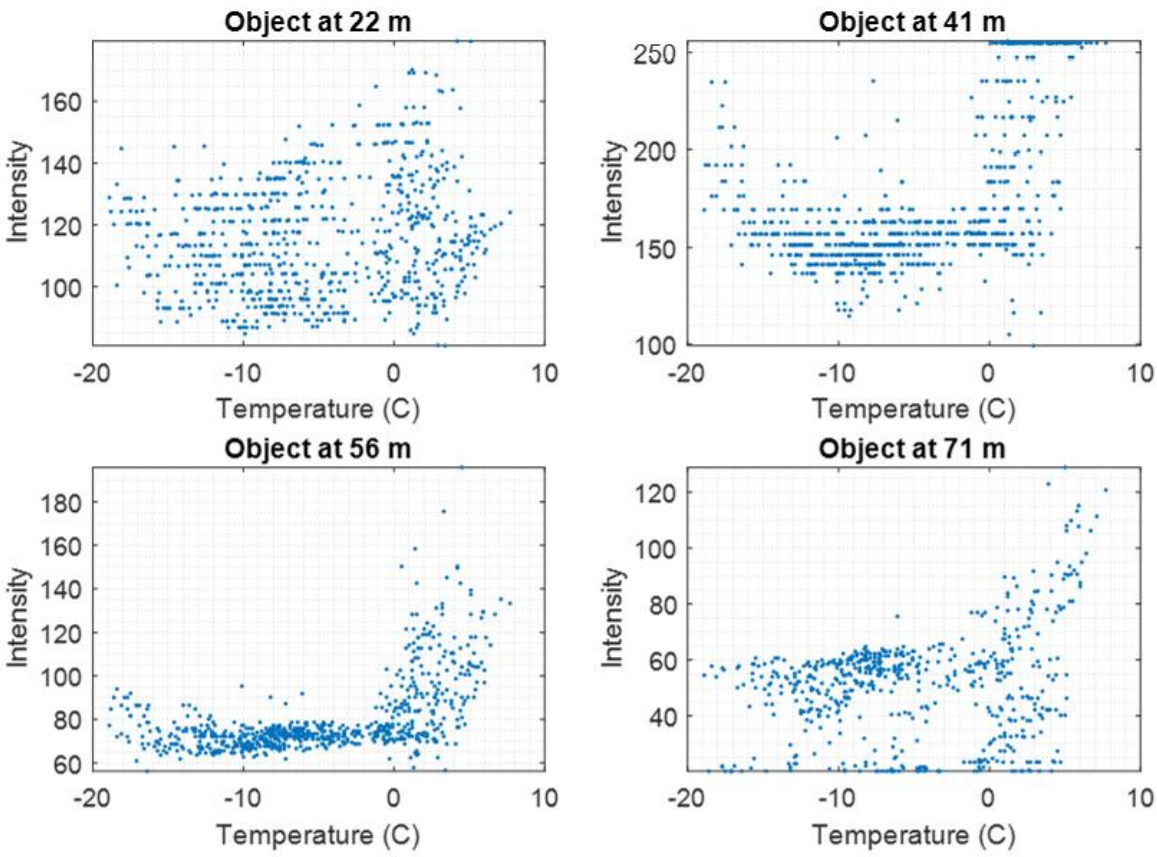
olosuhteissa tehdyt mittaukset. Valon määrän yhteyttä tuloksiin ei kuitenkaan ole vielä analysoitu tarkemmin.



Kuva 8: Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaikutus eri etäisyydellä olevista testikohteista mitattuun intensiteettiin.

Kuvien perusteella voidaan todeta, että ilman lämpötila vaikuttaa intensiteettiin. Tätä tarkastellaan tarkemmin seuraavassa kuvassa, johon on kerätty mittauskohteiden intensiteetit sellaisista olosuhteissa, joissa suhteellinen kosteus oli 60 % ja 80 % välillä. Yleisesti voidaan todeta, että alle nollan asteen lämpötiloissa intensiteetit ovat yleisesti pienempiä kuin yli nollan asteen lämpötiloissa.

Kovan pakkasen vaikutuksen suhteen on mahdollista, että lämpötila vaikuttaa lidarin toimintaan myös laserin aallonpituuden muutoksen kautta. Lämpötilalla tiedetään olevan vaikutusta laserin aallonpituuteen. Toisaalta erilaisten pintojen heijastavuus riippuu valon aallonpituudesta. Lämpötilan vaikutusta aallonpituuteen on tarkasteltu lähinnä laserin lämpenemisen kannalta ja on todettu, että 10 asteen nousu lämpötilassa kasvattaa aallonpituutta noin kahdella nanometrillä [5]. Vastaavasti aallonpituus pienenee kylmässä. Puupintojen heijastavuuden on todettu pienenevän merkittävästi, kun aallonpituus pienenee [6]. Tutkimus [6] kuitenkin käsittelee muita aallonpituuksia kuin tässä tutkimuksessa käytetyn valon aallonpituutta 905 nm. Myös metallipintojen heijastavuus riippuu voimakkaasti aallonpituudesta [7]. Metallipintojen heijastavuus on kuitenkin niin korkea, että kohteet voidaan joka tapauksessa havaita.



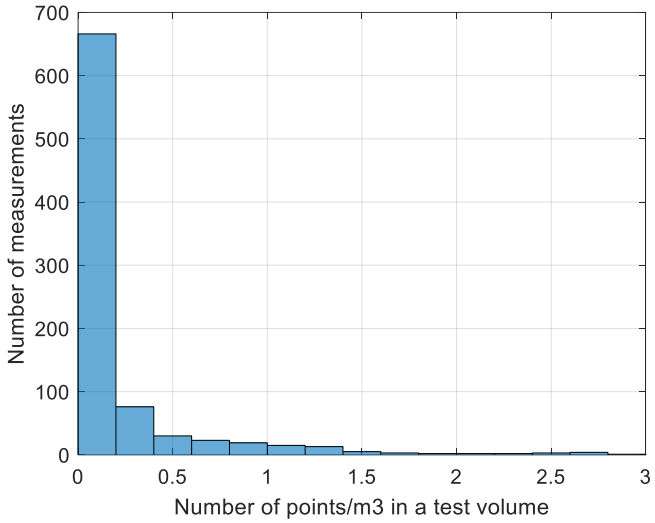
Kuva 9: Lämpötilan vaikutus eri etäisyydellä olevista testikohteista mitattuun intensiteettiin.

Mittaukset lumisateessa

Seuraavaksi tarkastellaan lumisateen vaikutusta testikohteista mitattuun intensiteettiin. Automaattinen lumisateen karakterisointi ei ollut tammi-maaliskuun mittauksissa mahdollista, vaan niissä esiintyvän lumisateen määrä ja laatu arvioitiin jälkikäteen toukokuussa havaittujen lumisateiden tehtyjen johtopäätösten perusteella.

Lumisateita esiintyi tammi-maaliskuussa hyvin vaihtelevissa lämpötiloissa ja suhteellisissa kosteuksissa. Edellä todettiin, että ilman lumisadettakin nämä sääolosuhteet vaikuttavat merkittävästi havaittuihin intensiteetteihin. Tämän takia lumisateita tarkasteltiin erikseen kategorioissa, joissa oli lumisateen voimakkuutta lukuun ottamatta keskenään samanlaiset sääolot.

Tammi-maaliskuun aineistoista 36 %:ssa (876 mittausta) havaittiin pisteitä, jotka viittaavat lumisateeseen. Näistä 12:ssa mittauksessa pisteiden määrä oli poikkeuksellisen suuri. Näissä erittäin voimakkaissa lumisateissa lämpötila vaihteli 0.3 °C välillä -19.8 °C, mutta useimmissa tapauksissa oli noin -16 °C. Ilman suhteellinen kosteus oli vähintään 88 %. Lämpötilan ja kastepisteen erotus, joka on yhteydessä vesi- tai lumisateen todennäköisyyteen, oli kaikissa näissä tapauksissa alle 3 °C. Tällaisissa olosuhteissa syntyvät lumihiutaleet ovat tyypillisesti suurikokoisia [2]. Kuvassa 10 on esitetty lumisateiden jakauma havaitun hiutaletiheyden mukaan. Suurimmassa osassa lumisateita havaittujen hiutaleiden tiheys oli hyvin pieni, mikä viittaa vähäiseen lumisateeseen tai pieniin lumihiutaleisiin tai molempiin.

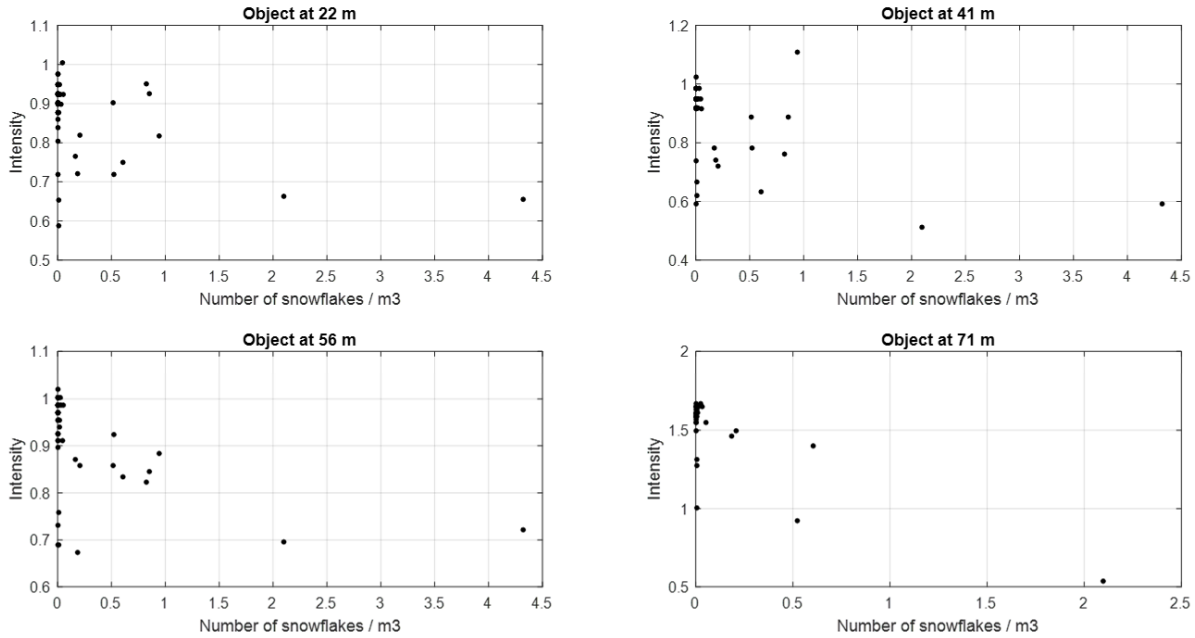


Kuva 10: Havaittujen hiutaleiden tiheyden jakauma tammi-maaliskuun aineistosta.

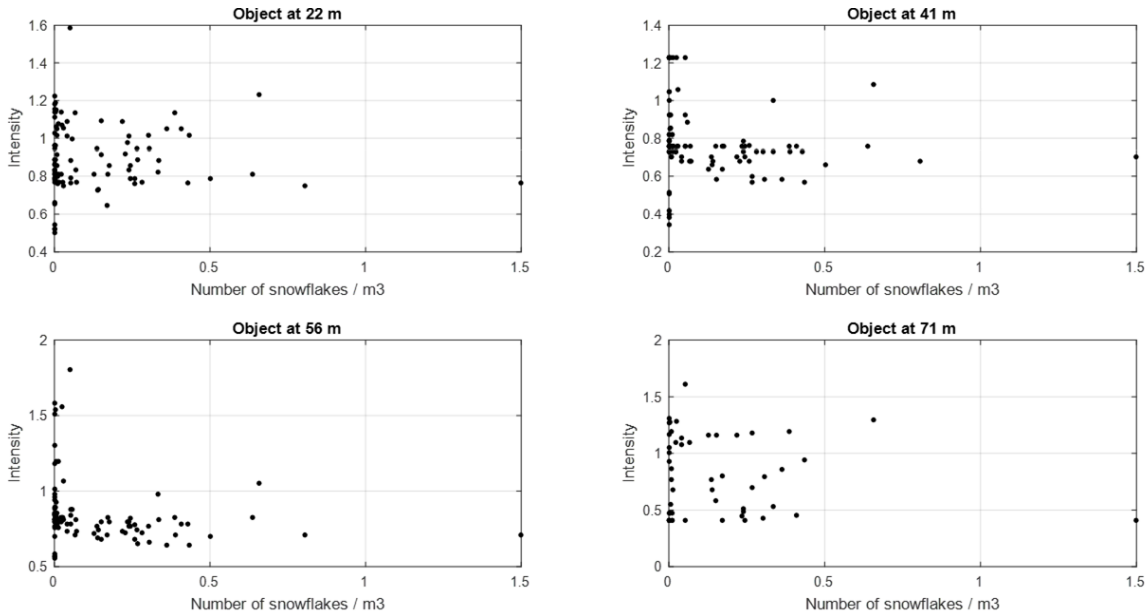
Lumisateen vaikutusta tarkasteltiin erikseen erilaisissa olosuhteissa: ”kuiva ja kylmä”, ”kuiva ja lämmin”, ”kylmä ja kostea”, ”lämmin ja kostea”, joiden tarkemmat kuvaukset ovat seuraavassa taulukossa. Kaikissa näissä sääkategorioissa intensiteettejä verrattiin niiden intensiteettien keskiarvoon, jotka mitattiin samanlaisissa sääoloissa, mutta ilman lumisadetta.

Category	Humid & warm Kuva 11	Dry & warm Kuva 12	Humid & cold Kuva 13	Dry & cold Kuva 14
Rel. humidity (%)	≥ 90	≤ 75	≥ 90	≤ 75
Temperature (°C)	≥ -5	≥ -5	≤ -10	≤ -10

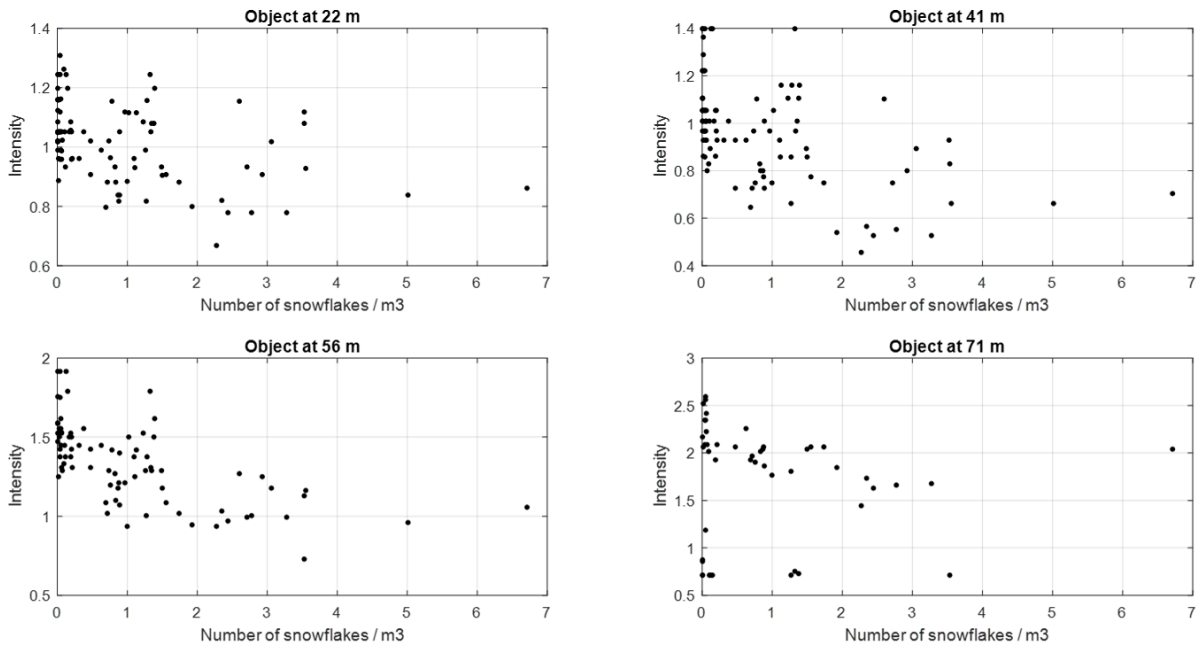
Kuvista 11-14 voidaan todeta, että voimakas lumisade vaikuttaa mitattuihin intensiteetteihin. Kun suhteellinen kosteus on korkea, intensiteetti pienenee selvästi lumihiutaleiden tiheyden kasvaessa. Matalassa suhteellisessa kosteudessa taas vaihtelua intensiteetissä on pienilläkin hiutaletiheyksillä erittäin paljon, eikä tällöin suuria hiutaletiheyksiä esiintynyt juurikaan.



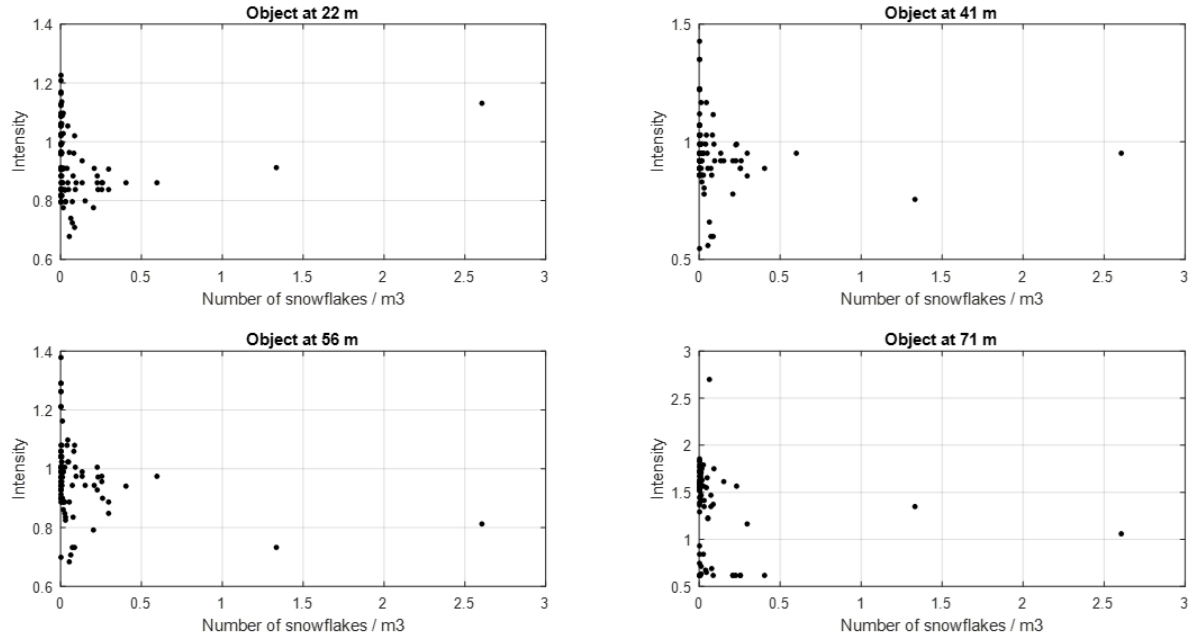
Kuva 11: Intensiteetit eri etäisyyksillä olevista testikohteissa erilaisissa lumisateissa verrattuna vastaavassa lumisateettomassa säässä (suht. kosteus vähintään 90 %, lämpötila vähintään -5 °C) mitattujen intensiteettien keskiarvoon.



Kuva 12: Intensiteetit eri etäisyyksillä olevista testikohteissa erilaisissa lumisateissa verrattuna vastaavassa lumisateettomassa säässä (suht. kosteus vähintään 90 %, lämpötila enintään -10 °C) mitattujen intensiteettien keskiarvoon.

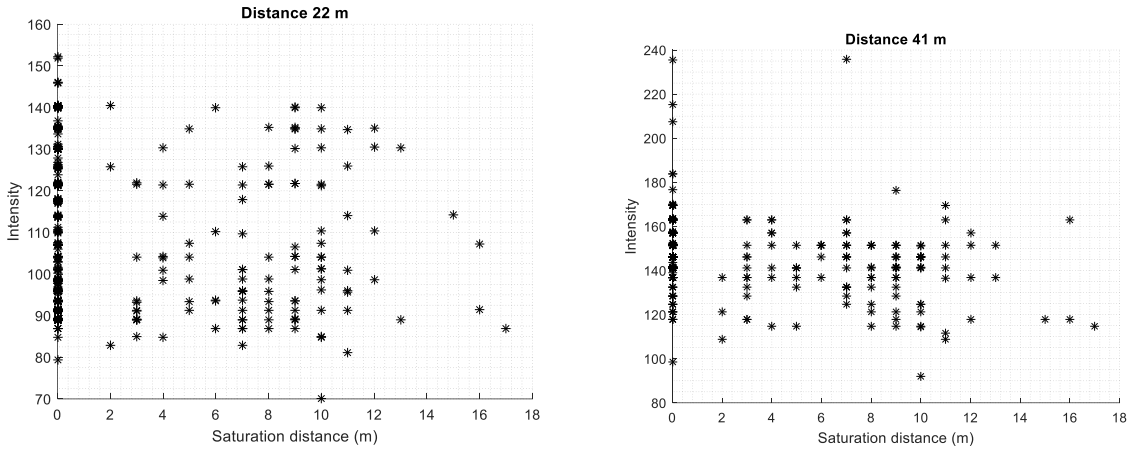


Kuva 13: Intensiteetit eri etäisyyksillä olevista testikohteissa erilaisissa lumisateissa verrattuna vastaavassa lumisateettomassa säässä (suht. kosteus enintään 75 %, lämpötila vähintään -5 °C) mitattujen intensiteettien keskiarvoon.



Kuva 14: Intensiteetit eri etäisyyksillä olevista testikohteissa erilaisissa lumisateissa verrattuna vastaavassa lumisateettomassa säässä (suht. kosteus enintään 75 %, lämpötila enintään -10 °C) mitattujen intensiteettien keskiarvoon.

Lidarin toimintaa tarkasteltiin myös käyttämällä lumisateen voimakkuutta kuvaavana lukuarvona sitä etäisyyttä, jolla havaittujen lumihiutaleiden tiheys saavuttaa maksiminsa. Erilaisissa lumisateissa mitattuja intensiteettejä verrattiin lumisateettomien olosuhteiden intensiteetteihin. Koska mittaustuloksissa on erittäin paljon vaihtelua johtuen luultavasti lämpötilasta ja kosteudesta, piti olosuhteita jälleen rajata. Olosuhteiksi valittiin lämpötila -10 °C ja 0 °C välillä ja suhteellinen kosteus 70 % ja 80 % välillä. Kuvasta 15 nähdään, että vielä näilläkin rajauksilla intensiteetti sekä olosuhteissa, joissa oletettavasti ei satanut lunta, että lumisateessa, saa arvoja hyvin suurella hajonnalla.



Kuva 15: Esimerkkejä tammi-maaliskuun mittauksista. Otsikko ”Distance” tarkoittaa testikohteen etäisyyttä. ”Saturation distance” on lukuarvo, joka kuvaa sitä millä etäisyydellä havaittujen lumihiutaleiden määrä ei enää kasva. Pystyakselilla olevat pisteet (saturation distance = 0 m) vastaavat mittauksia, joissa ei satanut lunta.

Johtopäätökset ja jatkotutkimukset

Lidarien toimintaa arktisissa olosuhteissa on tutkittu [8]. Tiedetään, että tielle kasautuva ja edellä ajavasta ajoneuvosta lentävä puuterilumi heikentää sekä subjektiivista näkyvyyttä että sensorien toimintaa. Märkä lumi, tiesuola tai muu lika voivat peittää sensorien linssejä. Lisäksi matalissa lämpötiloissa sensorien mekaaninen toiminta voi heikentyä ja laserien aallonpituus voi muuttua. Lämpötilan vaikutus havaittiin tässäkin tutkimuksessa.

Aineistoa analysoitiin paljon, mutta mittausten aikaisen lumisateen määrää tai laatua ei voitu täysin luotettavasti määrittää sääasemasta saatujen tietojen perusteella. Lumisateen määritteleminen pelkästään yhdellä parametrilla ei ehkä muutenkaan ole riittävää, sillä sekä lumihiutaleiden tiheys että koko voivat vaihdella huomattavasti. Tulevan talven mittauksissa lumisateen karakteroisoinnissa hyödynnetään ihmisen tekemiä havaintoja ja mahdollisesti tarkoitukseen soveltuvia kamerakuvia. Tässä dokumentissa esitellyissä mittauksissa käytössä oli ainoastaan eteenpäin maisemaa kuvaava kamera, jossa lumisade ei erottunut ollenkaan. Lumisateen määrittelyssä voidaan myös käyttää hyväksi tietoa siitä, että yleensä samankaltaisissa lämpötiloissa ja kosteuksissa muodostuu samantyyppisiä lumihiutaleita.

Lähteet

1. Masaaki Ishizaka, Measurement of falling velocity of rimed snowflakes, Journal of the Japanese Society of Snow and Ice, 1995, Volume 57, Issue 3, Pages 229-238.
2. Magono, Choji; Lee, Chung Woo, Meteorological Classification of Natural Snow Crystals, Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7, Geophysics, 2(4), 321-335.
3. Gilles Roy, Xiaoying Cao, Robert Bernier, and Grégoire Tremblay, "Physical model of snow precipitation interaction with a 3D lidar scanner," Appl. Opt. 59, 7660-7669 (2020).
4. Rasmussen, R. M., Vivekanandan, J., Cole, J., Myers, B., and Masters, C., “The Estimation of Snowfall Rate Using Visibility.”, Journal of Applied Meteorology, vol. 38, no. 10, pp. 1542–1563, 1999.
5. Nursidik Yulianto, Bambang Widiyatmoko, Purnomo Sidi Priambodo, Temperature Effect towards DFB Laser Wavelength on Microwave Generation Based on Two Optical Wave Mixing, International Journal of Optoelectronic Engineering, Vol. 5 No. 2, 2015, pp. 21-27. doi: 10.5923/j.ijoe.20150502.01.
6. Lebow, P., Brunner, C., Maristany, A., & Butler, D.A. (1996). CLASSIFICATION OF WOOD SURFACE FEATURES BY SPECTRAL REFLECTANCE. Wood and Fiber Science, 28, 74-90.
7. Ghany, K. & Elgazzar, Haytham & Newishy, M.. (2006). Using a Nd:YAG laser and six axes robot to cut zinc-coated steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 28. 1111-1117. 10.1007/s00170-004-2468-x.
8. Kutila, M., Pyykönen, P., Jokela, M., Gruber, T., Bijelic, M., & Ritter, W. (2020). Benchmarking Automotive LiDAR Performance in Arctic Conditions. In 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2020 [9294367] IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers. https://doi.org/10.1109/ITSC45102.2020.9294367