



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

LIDAR-MITTAUSTEN VESI- HÖYRYKALIBROINNIN EVALUOINTI

TEKIJÄ: Sanna Voutilainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Sanna Voutilainen	
Työn nimi Lidar-mittausten vesihöyrykalibroinnin evaluointi	
Päiväys 8.5.2013	Sivumäärä/Liitteet 49/2
Ohjaaja(t) Yliopettaja Merja Tolvanen ja erikoistutkija Mika Komppula	
Toimeksiantaja Ilmatieteen laitos	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Ilmatieteen laitoksen Kuopion Vehmasmäen mittausasemalla on otettu käyttöön uusi lidar-mittalaite vuoden 2012 marraskuussa. Lidar-mittalaitetta käytetään ilmakehän hiukkasten ja molekyylien aiheuttaman valon takaisinsironnan, vaimentumisen ja polarisaation mittaamiseen. Näiden avulla pystytään määrittämään ilmakehässä olevia hiukkasia sekä selvittämään niiden pitoisuuksia ilmakehän eri kerroksissa. Ilmatieteen laitoksella lidar-mittalaitteen avulla tutkitaan mm. ilmakehän vesihöyrypitoisuutta, joka on yksi tärkeimmistä ilmastomuutosta aiheuttavista kasvihuonekaasuista. Tämä vesihöyrypitoisuuden mittausta on kalibroitava jotain tunnettua metodia vastaan. Tavallisesti tämä vesihöyrykalibrointi tehdään käyttämällä lidar-mittalaitteen viereltä lähetettävää radioluotauspalloa. Radioluotauksesta saatavan vesihöyrypitoisuuden aineiston avulla vesihöyrymittaus kalibroidaan siihen tarkoitettulla Labview-ohjelmalla, jossa lidar-mittauksen vesihöyryprofiilille määritetään kalibrointikerroin. Vehmasmäen mittausasemalla ei tällä hetkellä tehdä radioluotauksia. Lähimmät radioluotaukset tehdään Jyväskylän Tikkakosken lentokentän havaintoasemalla. Tämän insinööriyön tarkoituksena oli testata, voidaanko lidar-mittauksen vesihöyrykalibrointi tehdä käyttämällä Vehmasmäen mittausaseman säähavaintomaston kahden mittauspisteen ilman kosteuden tai Jyväskylässä tehtävien radioluotauksen vesihöyrypitoisuuden aineistoja.</p> <p>Työhön valitun tarkastelujakson 16.11.2012–21.2.2013 lidar-mittausten vesihöyrypitoisuuden aineistoille määritettiin kalibrointikertoimet Labview-ohjelmalla. Kalibrointikertoimien määrityksessä kalibrointimetodeina käytettiin Vehmasmäen säähavaintomaston ilman kosteuden aineistoja 223 ja 299 m:n korkeuksilta sekä Jyväskylän radioluotauksen vesihöyrypitoisuuden aineistoa. Kalibrointikertoimet koottiin Excel-taulukkoon, jonne koottiin lisäksi myös Kuopion ja Jyväskylän lämpötilan, ilman kosteuden ja ilmanpaineen maanpintahavaintoarvot sääerojen vaikutusten tarkastelemiseksi radioluotauksia käytettäessä kalibrointimetodina. Kalibrointimetodien käyttökelpoisuutta ja kalibrointikertoimien luotettavuutta tarkasteltiin Excel-taulukkolaskentaohjelman avulla tarkastelemalla kalibrointikertoimia sekä niihin vaikuttavia asioita.</p> <p>Johtopäätöksenä tälle työlle voidaan todeta, että lidar-mittalaitteen vesihöyrykalibrointi on pienellä varauksella mahdollista tehdä käyttämällä näitä kahta kalibrointimetodia. Kalibrointikertoimien tarkastelussa havaittiin, että näillä metodeilla määritettyjen kalibrointikertoimien välillä on yhtäläisyyksiä. Kalibrointikertoimien tarkastelua vaikeutti tarkastelujaksolla mittalaitteeseen tehdyt säädöt. Luotettavan kalibrointikertoimen löytämiseksi olisi kuitenkin tehtävä lisää ja tarkempia tutkimuksia. Tätä insinööriyötä tullaan käyttämään Ilmatieteen laitoksella hyväksi lidar-mittalaitteen vesihöyrykalibroinnin tutkimuksessa.</p>	
Avainsanat Lidar, kalibrointi, kalibrointikerroin, vesihöyry	
Julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Sanna Voutilainen			
Title of Thesis Evaluation of Calibration of Lidar Water Vapour Measurements			
Date	8 May 2013	Pages/Appendices	49/2
Supervisor(s) Mrs Merja Tolvanen, Principal Lecturer and Mr Mika Komppula, Senior Scientist			
Client Organisation Finnish Meteorological Institute			
<p>Abstract</p> <p>This final project was commissioned by the Finnish Meteorological Institute. The Finnish Meteorological Institute brought a new lidar measuring instrument, Portable Raman Lidar Polly^{XT}, into use at the Vehmasmäki measurement station in November 2012. This Polly^{XT} is used for automated profiling of aerosol backscatter, extinction, and depolarization. Particles and particle concentrations can be investigated with these measurements in different levels of the atmosphere. This lidar instrument is also capable of measuring water vapour concentration in the atmosphere. Water vapour is known as one of the most important greenhouse gases causing the climate change. The water vapour measurement must be calibrated with some known method. Usually the lidar water vapour profile is calibrated by using radiosonde water vapour data and determining calibration factor to the lidar water vapour profile. This is done by comparing the lidar water vapour profile with the radiosonde water vapour profile using the Labview program. At the moment there are no radiosoundings available at the Vehmasmäki measurement station. The nearest radiosoundings are performed at the Jyväskylä airport observatory. At the Vehmasmäki measurement station there is a meteorological observation mast which provides amongst other things the humidity as relative humidity at different altitudes. The aim of this project was to test and evaluate the feasibility of two humidity measurement points in the mast and the radiosonde data from Jyväskylä as calibration methods in the calibration of lidar water vapour measurements.</p> <p>The first stage was to find suitable lidar measurement days and periods which were not disturbed by clouds. The data was collected during the period from 16 November 2012 to 21 February 2013. Then the calibration factors were determined by using the humidity data of the mast from the altitudes of 223 and 299 m and the data of radiosoundings in Jyväskylä. The determined calibration factors were collected in an Excel workbook as well as values of temperature, humidity and pressure from the ground meteorological observation data in Kuopio and Jyväskylä to study the effects on differences in weather conditions when using radiosounding data as the calibration method. The feasibility of these methods and the reliability of determined calibration factors were analysed by using the Excel spreadsheet program.</p> <p>As a conclusion of this project it can be mentioned that these calibration methods can be used with reservation in lidar water vapour calibration. In analyzing calibration factors it was noticed that there can be seen similarities between these different methods. The adjustments which were done during the used time period made the inspection of the calibration factors a little difficult. To find a usable and reliable calibration factor, more and more detailed research must be done. The Finnish Meteorological Institute will utilize this final project in their research in calibration of lidar water vapour measurements.</p>			
Keywords Lidar, calibration, calibration factor, water vapour			
Public			

ESIPUHE

Tämä insinööri työ sai alkunsa tammikuussa 2013, kun otin yhteyttä Ilmatieteen laitoksen Kuopion yksikköön ja kysyin aiheet opinnäytetyölleni. Tämä tarjottu aihe vaikutti mielenkiintoiselta ja tartuin heti tilaisuuteen. Tahdon lausua kiitokseni työni ohjaajille Mika Komppulalle ja Merja Tolvaselle työn ohjauksesta ja tuesta.

Kuopiossa 8.5.2013

Sanna Voutilainen

SISÄLTÖ

KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT	7
1 JOHDANTO	9
2 ILMAKEHÄN KOSTEUDEN MITTAAMISESTA	11
3 LIDAR-TEKNIikka	14
3.1 Yleistietoa lidar-tekniikasta	14
3.2 Lidar-mittalaitteen toimintaperiaate.....	14
3.3 Polly ^{XT} Raman lidar	15
3.4 Lidar-mittaukset Ilmatieteen laitoksen toiminnassa	18
4 ILMAN SUHTEELLISEN KOSTEUSPITOISUUDEN MUUNNOS VESIHÖYRYPITOISUUDEKSI	19
5 MITTAUSPISTEET JA MITTAUSAINEISTOT	21
5.1 Vehmasmäen mittausasema	21
5.2 Jyväskylän havaintoasema.....	21
5.3 Savilahden sääasema	21
6 MITTAUSAINEISTOJEN VERTAILU	23
6.1 Lidar-mittausaineistojen valinta.....	23
6.2 Vertailtavan aineiston kokoaminen	25
6.3 Kalibroitikertoimien määrittäminen.....	26
6.3.1 Lidar-mittauksen ja radioluotauksen vesihöyryprofiilien vertailu.....	26
6.3.2 Lidar-mittauksen vesihöyryprofiilin ja maston 223 ja 299 m:n ilman kosteusmittauspisteiden vesihöyrypitoisuuksien vertailu.....	27
7 KALIBROINTIKERTOIMIEN TARKASTELU JA ANALYSOINTI	30
7.1 Polly ^{XT} -laitteen vesihöyrykanavan asetusten muutosten vaikutus kalibroitikertoimeen	30
7.2 Lidar-mittausten datajaksen pituuden vaikutus kalibroitikertoimeen	31
7.3 Lidar-mittauksen vuorokaudenajan vaikutus kalibroinnin luotettavuuteen	33
7.4 Käytettyjen kalibroitimetodien vertailu	34
7.5 Lidar-mittausten vesihöyrykalibroinnin luotettavuus; metodina Jyväskylän radioluotausaineisto ...	40
7.5.1 Sääerojen vaikutus kalibroinnin luotettavuuteen.....	40
7.5.2 Kalibroitikorkeuden vaikutus	42
7.5.3 Mittausaineistojen aikaeron vaikutus	43
7.5.4 Korokoero Jyväskylän havaintoaseman ja Kuopion mittausaseman välillä	44

7.6 Lidar-mittausten vesihöyrykalibroinnin luotettavuus; metodina maston kosteusmittauspisteet.....	44
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	47

LÄHTEET

LIITTEET

1 Mittauspisteiden sijaintikartta

2 Tarkasteluun koottu vertailuaineisto

KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT

Absoluuttinen kosteus

Kostean ilman sisältämä vesihöyryn tiheys eli vesihöyryn massa tietyssä kostean ilman tilavuudessa. Ilmoitetaan esimerkiksi yksikössä g/m^3 . (Puhakka 1996, 39.)

Ilman suhteellinen kosteus

Tietyssä ilman tilavuudessa olevan absoluuttisen kosteuden eli vesihöyryn massan osuus siitä vesihöyryn massasta, joka kyseisessä tilavuudessa ja vallitsevassa ilman lämpötilassa voi enimmillään olla. Engl. Relative humidity, lyhenne RH. Ilman suhteellinen kosteus ilmoitetaan prosenttilukuna (%). (Ilmatieteen laitos. Teematietoa.)

Ilman vesihöyrypitoisuus

Ilman vesihöyrypitoisuus eli vesihöyryn sekoitussuhde tarkoittaa tietyn ilman tilavuuden sisältämän vesihöyryn massan suhdetta saman ilmapaketin sisältämään kuivan ilman massaan. Engl. Mixing ratio. Ilmoitetaan yksikössä g/kg tai kg/kg . (Puhakka 1996, 39.)

Kalibrointi

Kalibrointi tarkoittaa toimenpiteitä, joilla saadaan selville mittalaitteen tai mittausjärjestelmän tietyissä olosuhteissa tietyn mitatun suureen arvon ja vastaavien samoissa olosuhteissa mittanormaaleilla eli standardeilla toteutettujen arvojen välinen yhteys. Kalibroinnilla taataan oikea mittaustarkkuus ja mittausten luotettavuus. Mittalaitteiden kalibrointi on osa laadun tarkkailua. (Järvinen, Eerola, & Kaukonen 2008, 70.)

Kylläisen vesihöyryn paine

Lämpötilasta riippuva veden höyrynpaine kyllästystilassa, jossa vesihöyrymolekyylejä on niin paljon kuin vallitsevassa ilman lämpötilassa voi olla. Kyllästystilassa vesihöyry on tasapainotilassa nesteen eli veden kanssa. Kuvitteellisessa säiliössä olevan veden pinnasta siirtyy nestemolekyylejä veden pinnan yläpuolella olevan tilan höyrymolekyyleiksi. Höyrymolekyylit taas törmäävät päinvastaisesti nestepinnan nestemolekyyleiksi. Tämän prosessin jatkuessa syntyy lopulta tila, missä vesipinnan yläpuolinen ilmatila on vesihöyrymolekyyliden eli vesihöyryn kyllästämä. Tässä tilassa ilmatilan vallitsevan vesihöyryn osapaine tarkoittaa kylläisen vesihöyryn painetta. Käytettyjä yksiköitä Pa, hPa. (Puhakka 1996, 48.)

Lidar

Lidar (LIght Detection And Ranging) on optinen mittaustekniikka, jolla voidaan mitata valitun kohteen etäisyyttä ja pitoisuutta lasersäteen avulla. Mittalaitteen toiminta perustuu lähetetyn lasersäteen takaisinsironneen valon eri aallonpituuksien havainnointiin ja valon määrän mittaamiseen. (Weitkamp 2005, 1–4.)

Radioluotaus

Menetelmä, jota käytetään ilmakehän pystyrakenteen mittauksiin. Radioluotauksessa maan pinnalta lähetetään ilmakehään vedyllä tai heliumilla täytetyn pallon mukana luotain eli radiosondi, johon on kiinnitetty lämpötila-, kosteus- ja painemittarit sekä radiolähetin. Radiolähetin lähettää mittaustiedot säätilasta vastaanottoasemalle. Tuulen suunta ja nopeus saadaan määritettyä seuraamalla luotaspallon liikkeitä ilmakehässä. Luotauksilla saadaan tietoja säätilasta tavallisesti 25–30 km:n korkeuteen saakka. Ilmatieteen laitos tekee radioluotauksia kolmella eri paikkakunnalla Jokioisissa, Jyväskylässä ja Sodankylässä päivittäin tavallisesti kaksi kertaa päivässä. Radioluotauksesta käytetään myös nimitystä sääluotaus. (Ilmatieteen laitos. Teematietoa.)

Valon absorptio

Valon absorptio tarkoittaa valon säteilyenergian imeytymistä aineeseen. Aineen heijastusominaisuuksien mukaisesti osa tulevasta säteilystä ei absorboidukaan, vaan heijastuu aineesta takaisin. (Ilmatieteen laitos. Teematietoa.)

Valon polarisaatio

Valo on aaltoliikkeistä sähkömagneettista säteilyä. Aaltoliike on poikittaista liikettä, jossa värähtely tapahtuu kohtisuorasti etenemissuuntaan nähden. Tavallisesti näitä värähdyksiä tapahtuu yhtä paljon kaikkiin säteilyn kulkusuuntaa vastaan kohtisuoriin suuntiin. Mikäli värähdyksiä ei tapahdu kaikkiin suuntiin tai joku tai osa näistä suunnista puuttuu, valo on polarisoitunutta. (Karttunen, Koistinen, Saltikoff & Manner 2008, 52.)

Valon sironta

Sironta tarkoittaa valon fotonin suunnan muuttumista matkan varrelle osuneen hiukkasen vaikutuksesta. Sironnassa hiukkaseen osuneesta säteilystä osa poistuu muihin suuntiin ja suoraan kohteesta saapuva säteily heikkenee. (Karttunen ym. 2008, 56.)

Valon vaimentuminen

Valon sironnan ja absorption aiheuttama valon intensiteetin heikkeneminen valon säteen osuessa hiukkasiin. Käytetään myös termiä ekstinktio (engl. extinction). Valon vaimenemisen määrä riippuu väliaineen tiheydestä ja matkasta, jonka säteily joutuu kulkemaan. Lisäksi vaimenemiseen vaikuttaa säteilyn aallonpituus ja väliaineen kemiallinen koostumus. (Karttunen ym. 2008, 57.)

Vesihöyryn osapaine

Vesihöyryn osapaineella tarkoitetaan ilman vesihöyryn painetta tarkasteluhetkellä vallitsevassa lämpötilassa (Puhakka 1996, 39).

1 JOHDANTO

Ilmatieteen laitos on ottanut Kuopion Vehmasmäen mittausasemalla vuoden 2012 marraskuussa käyttöön uuden lidar-mittalaitteen. Lidar-mittalaitteita käytetään ilmakehän profilointia käsittelevällä tutkimusalalla mm. ilmakehän turbulenttien prosessien ja meteorologisten ilmiöiden tutkimiseen sekä ilmakehän perusmuuttujien kuten lämpötilan, paineen, kosteuden ja tuulen mittauksiin. Lidar-tekniikkaa on käytetty myös ilmakehän planetaarisen rajakerroksen korkeuden vuorokautisen vaihtelun sekä ilmakehän otsonin ehtymisen tutkimiseen ja kuvaamiseen. (Weitkamp 2005, 1.)

Suurin osa lidar-mittalaitteista on hiukkaslidareita eli niillä tutkitaan hiukkasten pystyjakaumaa ilmakehässä sekä niiden ominaisuuksia. Ilmatieteen laitoksen käyttämä Polly^{XT} lidar-mittalaite on tällainen hiukkaslidar, jolla mitataan ilmakehän hiukkasten ja molekyylien aiheuttamaa valon takaisinsirontaa, vaimentumista ja polarisaatiota. Näiden avulla pystytään määrittämään ilmakehässä olevia hiukkasia sekä selvittämään niiden pitoisuuksia ja ominaisuuksia. Lidar-mittalaitetta käytetään Ilmatieteen laitoksella mm. ilmakehän vesihöyrypitoisuuden mittauksiin. Vesihöyrypitoisuusmittaukset ovat ilmatieteellisen tutkimuksen ajantasaista monitorointia, joka tukee mm. ilmastonmuutoksen tutkimusta. Tämä vesihöyrypitoisuuden mittaus on kalibroitava jotain tiettyä tunnettua metodia vastaan. Tavallisesti kalibrointi tehdään käyttämällä lidar-mittalaitteen viereltä lähetettyä radioluotauspalloa, jonka vesihöyrypitoisuuden mittausaineiston avulla lidar-mittauksen vesihöyryprofiili kalibroidaan Labview-kalibrointiohjelman avulla. Kuopion Vehmasmäen mittausasemaa lähimmät radioluotaukset tehdään Jyväskylän Tikkakosken lentoasemalla, joka on noin 100 km:n etäisyydellä Vehmasmäen mittausasemasta.

Vehmasmäen mittausasemalla on lidar-mittalaitteen lisäksi säähavaintomasto, jossa on mm. ilman kosteuden mittaus eri korkeuksilla. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on testata ja arvioida, voiko lidarin vesihöyrymittauksen kalibroinnin tehdä käyttämällä Vehmasmäessä lidar-mittalaitteen vieressä sijaitsevan säähavaintomaston kosteusmittausten aineistoa tai Jyväskylässä tehtävien radioluotauksen mittausdataa. Mahdollisena ongelmana näiden mittausaineistojen vertailuissa on, että noin 300 m:n korkeuteen ulottuvat tutkimusmaston kosteusmittauspisteet ovat suhteellisen matalalla koko lidar-profiilin kalibrointia ajatellen. Lisäksi Jyväskylän luotauksen suuri etäisyys kalibroitavasta mittalaitteesta tuottaa mahdollisesti ongelmia vertailussa. Suuren etäisyyden takia lidar-mittausten ja luotauksen vesihöyrypitoisuuksien aineistojen vertailu toimii todennäköisesti paremmin ylempänä ilmakehässä kuin aivan maan pinnalla paikallisten sääoloerojen vuoksi.

Työ tehdään vertailemalla Vehmasmäen säähavaintomaston kosteusmittausten aineistoja sekä Jyväskylän radioluotausaineistojen vesihöyrypitoisuutta lidar-mittalaitteen vesihöyrypitoisuuden profiileihin lidar-vesihöyryprofiilin kalibrointiohjelman avulla. Työssä käytettävät mittausaineistot ovat noin kolmen kuukauden ajalta lidar-mittalaitteen käyttöönottopäivästä alkaen. Tarkastelua varten laaditaan Excel-taulukko, jonne kootaan onnistuneiden ja luotettavien lidar-mittausten ajankohdat, Vehmasmäen säähavaintomaston kosteusaineiston vertailussa tarvittava sääaineisto sekä Jyväskylän ja Kuopion sääolosuhteiden vertailussa käytettävät maanpintasääarvot. Vehmasmäen säähavaintomaston ilman suhteellisen kosteuden arvot muunnetaan vesihöyrypitoisuudeksi, jotta ilman kosteuden

arvot ovat vertailtavissa lidar-mittausaineiston kanssa. Mittausaineistojen vertailu tehdään Labview-lidar-mittauksen vesihöyryprofiilin kalibrointiohjelman avulla. Ohjelmalla verrataan lidar-mittauksen vesihöyrypitoisuuden profiilia Jyväskylän radioluotausaineiston vesihöyrypitoisuuden profiiliin, sekä säähavaintomaston kahden eri mittauspisteen vesihöyrypitoisuuden arvoihin. Labview-ohjelmalla lidar-vesihöyryprofiileille saadaan määritettyä kalibrointikertoimet, joihin työn tarkasteluosio pääasiasa perustuu.

Työn tilaaja, Ilmatieteen laitos, on palvelu- ja tutkimuslaitos, joka tuottaa sää-, meri- ja ilmastopalveluita viranomaisille, yrityksille sekä kansalaisten käyttöön. Palvelut pohjautuvat vahvaan ilmakehä- ja meriaiheiseen tutkimukseen ja korkealaatuisiin havaintoihin. (Ilmatieteen laitos. Ilmatieteen laitos.) Ilmatieteen laitoksen Kuopion yksikössä toiminta on suuntautunut lento- ja sotilassääpalveluihin sekä ilmatieteelliseen tutkimustoimintaan. Tutkimustoiminta on keskittynyt erityisesti ilmakehän pienhiukkasiin ja niiden ilmasto- ja terveysvaikutuksiin. (Ilmatieteen laitos. Tutkimustoiminta.)

2 ILMAKEHÄN KOSTEUDEN MITTAAMISESTA

Ilman kosteudelle on olemassa paljon erilaisia suureita eri käyttötarkoituksen mukaan. Ilman suhteellinen kosteus ja ilman vesihöyrypitoisuus ovat näistä tärkeimpiä meteorologiassa käytettäviä kosteuskäsitteitä. (Puhakka 1996, 39–42.) Ilman kosteus on yksi keskeisistä säähavaintoihin ja niiden pohjalta tehtäviin sääennusteisiin tarvittavista suureista. Sähavaintoasemilla ilman kosteutta mitataan suhteellisena kosteutena, joka ilmoitetaan kokonaisprosenttilukuna. Suhteellisesta kosteusarvosta johdetaan muitakin säähavaintoihin ja -ennusteisiin tarvittavia kosteussuureita. (Ilmatieteen laitos. Teematietoa.)

Sääasemilla ilman kosteuden mittaus tapahtuu kapasitiivisella polymeerianturilla. Laitteen toiminta perustuu anturin kapasitanssin muuttumiseen ja muutoksen mittaamiseen anturin kostuessa. Anturissa oleva polymeeri sitoo tai vapauttaa kosteutta sen mukaan kuinka paljon ympäröivässä ilmassa on kosteutta. Vesimäärä, joka on sitoutunut anturin polymeeriin, muuttaa anturin kapasitanssia. Tämän kapasitanssin muutoksen anturin elektroniikka muuntaa ulostulojännitteeksi, josta lasketaan ilman suhteellisen kosteuden lukema sääaseman keskusyksikössä. Sääasemilla kosteusanturi on sijoitettu kahden metrin korkeudelle säteilysuojan sisälle (kuva 1). (Ilmatieteen laitos. Teematietoa.) Kuvassa 2 on Kuopion Vehmasmäen mittausasema ja säähavaintomasto, josta saadaan säähavaintotietoja kahdeksalta eri korkeudelta lähes 300 m:iin saakka.

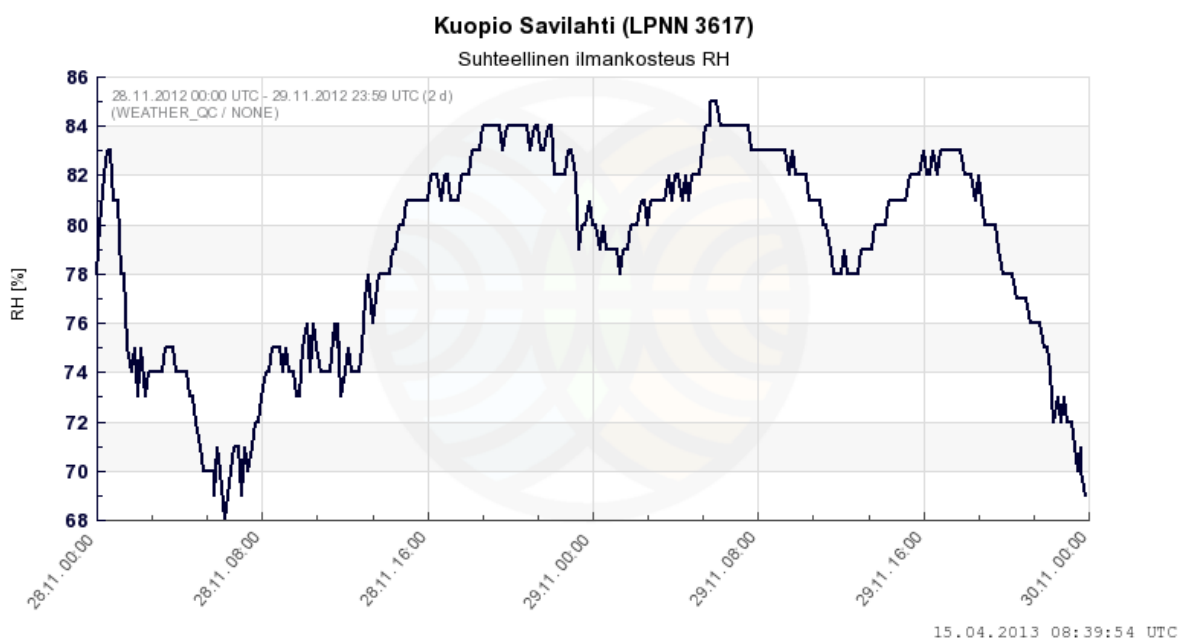


Kuva 1 Ilmatieteen laitoksen Kuopion Savilahden sääasema. Ilman kosteuden mittaus toinen oikealta. Kosteusmittausanturi on lämpötila-anturin kanssa kahden metrin korkeudella säteilysuojassa, joka suojaa antureita auringon säteilyltä ja sateelta. (Valokuva Sanna Voutilainen)



Kuva 2 Kuopion Vehmasmäen mittausasema. Vehmasmäen mittausaseman mastosta saadaan säähavaintotietoja eri korkeuksilta lähes 300 m:iin saakka. (Valokuva Mika Komppula)

Säähavaintojen kosteustietoja julkaistaan hetkellishavaintona kokonaisprosenttilukuna sekä viimeimmän kahden vuorokauden havainnot käyränä. Kuvassa 3 on esimerkkinä kahden vuorokauden ilmakesteyskäyrä Kuopion Savilahden säähavaintoasemalta.



Kuva 3 Esimerkki kahden vuorokauden ilman kosteustuloksista Kuopion Savilahden säähavainnoista (Ilmatieteen laitos. Ilmastotietokanta)

Kaikissa ilman kosteutta kuvaavissa suureissa otetaan huomioon vain ilman sisältämä todellinen vesihöyry eikä muita veden olomuotoja kuten pisaroita ja jääkiteitä tai sumuja ja pilviä. Ilman kosteutta kuvataan usein vesihöyrypitoisuutena. Ilmakehän alaosien kaasujen seossuhteet pysyvät likimain vakioina, mutta vesihöyryn määrä ilmakehässä vaihtelee suuresti. Näin ollen ilmaa voidaankin tarkastella kuivan ilman ja vesihöyryn seoksena. Vesihöyry on merkittävässä roolissa koko maailmakehäjärjestelmän hydrologisessa kierrossa. Vesi kiertää maapallolla ja ilmakehässä muuttaen olomuotoaan kaasusta (vesihöyry) nesteeksi (vesi) ja kiinteäksi aineeksi (jää) ja päinvastoin. Ylätroposfäärissä ja stratosfäärissä olevalla vesihöyryllä on tärkeä merkitys ilmastoon ja ilmaston muuttamiseen. Näissä ilmakehän kerroksissa oleva vesihöyry vaikuttaa auringon säteilyn kulkuun maan pinnalta ja ilmakehän kemiallisiin reaktioihin. Vesihöyry onkin tärkein ilmastonmuutosta voimistavista kasvihuonekaasuista. Kasvihuoneilmion aiheuttama alailmakehän lämmön nousu on kokonaisuudessaan noin 33 °C. Tästä lämmön noususta noin 21 °C aiheutuu vesihöyrystä. (Karttunen ym. 2008, 45–46; 97–99.)

Ilmakehän vesihöyrypitoisuuden mittaus ja tutkiminen edistävät ilmastonmuutoksen tutkimusta. Vesihöyrypitoisuutta mitataan ilmakehästä tavallisesti kahdesti päivässä tehtävillä radioluotauksilla. Luotauspalloon kiinnitetyillä antureilla voidaan mitata ilmakehän kosteus eri korkeuksilta jopa 30 km:iin saakka, mutta vain kertaluonteisena mittauksena. (Ilmatieteen laitos. Teematietoa.) Laseriin perustuva optinen lidar-tekniikka on ainoa käytettävissä oleva menetelmä, jolla pystytään mittaamaan ilmakehän vesihöyrypitoisuutta jatkuvatoimisesti ilmakehän eri korkeuksilta. Lidar-mittauksilla vesihöyrypitoisuus saadaan ilmakehän eri kerroksista suurella vertikaalisella sekä ajallisella tarkkuudella (Weitkamp 2005, 214). Kuvassa 4 on Ilmatieteen laitoksen Sodankylän radioluotauskontti, josta radioluotauspallo lähetetään ilmakehään automaattisesti tavallisesti kaksi kertaa päivässä.



Kuva 4 Sodankylän radioluotauskontti, josta radioluotauspallo lähetetään automaattisesti kaksi kertaa päivässä. (Valokuva Mika Komppula)

3 LIDAR-TEKNIikka

3.1 Yleistietoa lidar-tekniikasta

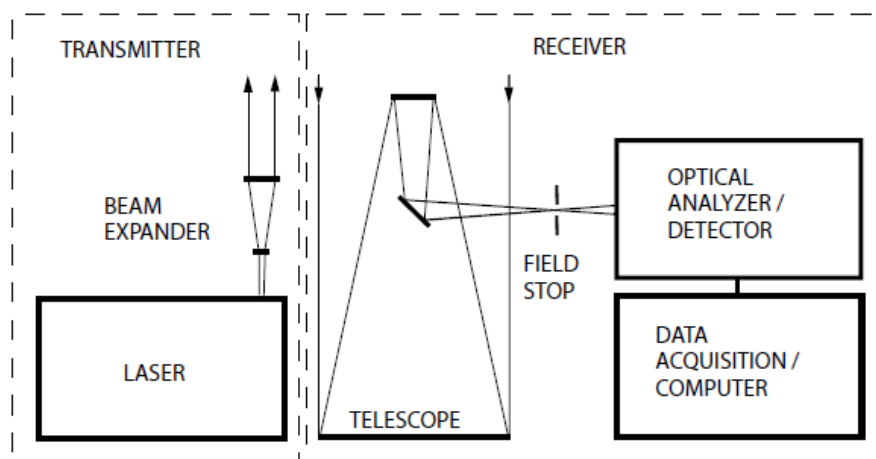
Kaukokartoitustekniikoiden kehitys on mahdollistanut nykyaikaisen ilmakehätutkimuksen. 1930-luvulla alkunsa saanut ja nykypäivänä jo pitkälle kehittynyt lidar-tekniikka (LIght Detection And Ranging) on edistänyt ilmakehän ominaisuuksien tutkimusta viime vuosikymmenten aikana. Lidar-tekniikka on mahdollistanut ilmakehän perusmuuttujien kuten lämpötilan, paineen, kosteuden, ja tuulen sekä erittäin pienten kaasupitoisuuksien, aerosolien ja pilvien mittaamisen ja tutkimisen. Lidar-tekniikalla toimivilla laitteilla on laaja ajallinen sekä korkeudellinen mittaustarkkuus. Eräillä lidar-tekniikoilla mittauksissa pystytään ulottumaan maan pinnalta jopa yli 100 km:n korkeuteen, muutamien kuutiometrien mittaustilavuuksista ja sekuntien aikajaksoista maailmanlaajuisiin ja useamman vuoden mittaisiin kokonaisuuksiin. Tämä tekniikan ominaisuuksien monipuolisuus ja ulottuvuus tekevät lidar-mittalaitteista monikäyttöisiä. Lidar-tekniikkaa käytetään mm. ilmakehän turbulენტtien prosessien ja meteorologisten ilmiöiden tutkimiseen, planetaarisen rajakerroksen korkeuden vuorokautisen vaihtelun selvittämiseen sekä ilmakehän vesihöyrypitoisuuksien ja otsonin ehtymisen kuvaamiseen. Lidar-tekniikalla voidaan mitata ja tarkkailla ilman päästötasoja ja erittäin pieniä kaasupitoisuuksia. Lidar-tekniikkaa käytetään myös aerosolien tutkimuksessa ja näin ollen se lisää tietämystä aerosolien ilmastollisista vaikutuksista. Lidar-mittauksia voidaan tehdä niin maasta kuin ilmastakin käsin. (Weitkamp 2005, 1–2.)

3.2 Lidar-mittalaitteen toimintaperiaate

Lidar-mittalaite on optinen mittausjärjestelmä, jonka toiminta perustuu lasersäteen lähettämiseen ja takaisinsironneen valon havaitsemiseen. Maasta tai vaihtoehtoisesti ilmasta lähetetty lasersäde matkaa ilmakehässä ja osuttuaan ilmakehän hiukkasiin ja molekyyliin osa lasersäteestä siroaa takaisin. Takaisinsironnan lisäksi lähetetyn lasersäteestä valo vaimentuu. Ilmakehän hiukkaset ja molekyylit absorboivat valoa ja lisäksi osa valosta taittuu hiukkasista eri suuntiin ja näin valon intensiteetti vaimenee.

Kuvassa 5 on esitetty lidar-järjestelmän perusrakenne. Järjestelmä koostuu lähettimestä (transmitter) ja vastaanottimesta (receiver). Lähettimen laser lähettää ilmakehään lyhyitä valopulsseja eri aallonpituuksilla. Käytettävät valon aallonpituudet riippuvat järjestelmästä ja vaihtelevat eri lidar-tekniikoissa noin 250 nm:stä 11 µm:iin. Lasersäde johdetaan lähettimessä säteiden levityslaitteen (beam expander) kautta, mikä pienentää säteiden hajaantumista ennen sen ilmakehään lähettämistä. Vastaanottimessa on teleskooppi, joka kerää ilmakehästä takaisinsironneen valon detektoreille. Vastaanottimen teleskoopin jälkeen on optinen analysaattori- ja tunnistinlaitteisto, joka järjestelmästä riippuen havaitsee kerätyn takaisinsironneen valon tietyt aallonpituudet tai polarisaation tasot. Analysaattori muuntaa vastaanotetun optisen signaalin elektroniseksi signaaliksi, joka lähetetään edelleen datan käsittely-yksikköön ja tietokoneelle. Tietokoneelle tallennettavan elektronisen signaalin intensiteetti riippuu valoa sirottavista kappaleista ja niiden määrästä. Ajasta, joka on kulunut laser-

pulssin lähettämisestä takaisinsironneen valon optisen signaalin havaitsemiseen, saadaan selville sirottavan kohteen etäisyys. (Weitkamp 2005, 3–6.)



Kuva 5 Lidar-mittalaitteen toimintaperiaate (Weitkamp 2005, 3. With kind permission of Springer Science+Business Media)

3.3 Polly^{XT} Raman lidar

Ilmatieteen laitoksen käytössä oleva lidar-mittalaite on nimeltään Polly^{XT}-lidar (POrtabLe Lidar sYstem, eXTended). Laite on kehitetty Saksassa yhteistyössä Leibniz Institute for Tropospheric Research -tutkimuslaitoksen kanssa. Polly^{XT}-laite toimii Raman-tekniikalla. (Althausen, Engelmann, Baars, Heese, Ansmann, Müller & Komppula 2009, 2366–2367.) Raman-tekniikkaan perustuvilla laitteilla pystytään määrittämään ilmakehän vesihöyrypitoisuus tarvittavalla vertikaalisella sekä ajallisella tarkkuudella. Raman-lidar -tekniikan toiminta perustuu valon epäelastisen Raman-sironnan mittaukseen, jossa ilman molekyyleistä ja hiukkasista elastisesti sironneet valon aallonpituudet suodatetaan pois. (Weitkamp 2005, 214; 255.)

Polly^{XT} on Raman-tekniikkaan perustuva laite, joka mittaa sekä valon elastista että epäelastista sirontaa. Laite on seitsenkanavainen Raman-lidar eli se mittaa jatkuvatoimisesti valon takaisinsirontaa kolmella eri vastaanottimen takaisinsirontakanavalla aallonpituuksilla 355, 532 ja 1 064 nm. Valon vaimentumista mitataan Raman-sironnan aallonpituuksilla 387 ja 607 nm. Aallonpituudella 532 nm mitataan hiukkasten polarisaatiota, jonka perusteella voidaan arvioida hiukkasten muotoa ja sitä kautta määrittää ilmakehässä olevia hiukkasia. (Althausen ym. 2009, 2366–2367.) Vesihöyrypitoisuuden mittauskanava on lisätty Polly^{XT}-laitteeseen sen valmistumisen jälkeen. Vesihöyrypitoisuuden mittausta tapahtuu aallonpituudella 407 nm. (Engelmann, Althausen, Heese, Baars & Komppula 2012, 1.)

Polly^{XT}-laite lähettää ilmakehään lyhyitä laserpulsseja samanaikaisesti kolmella eri valon aallonpituudella 355, 532 ja 1 064 nm. Vastaanottimen neulansilmää (field stop) vaihtamalla on mahdollista säätää ja rajata mittausalaa suuruutta mittaolosuhteiden mukaan (kuva 5). Vastaanottimessa on valon määrän laskemiseksi valonmonistinputket, jotka muuttavat havaitun takaisinsironneen valon optisen signaalin elektroniseksi signaaliksi. Muunnettu elektroninen signaali ohjataan datan käsittely-

yksikköön ja tallennetaan tietokoneelle. (Althausen ym. 2009, 2370–2371, Weitkamp 2005, 255–256.)

Nimensä mukaisesti Polly^{XT}-laite voidaan siirtää helposti paikasta toiseen pyörien avulla. Laitteen kotelo on varustettu ilmastoinnilla ja lämmityksellä. Polly^{XT}-laitetta voidaan kauko-ohjata internetyhteyden välityksellä, mikä vähentää tarkastuskäyntien määrää mittausasemalla. (Althausen ym. 2009, 2366–2369.) Kuvassa 6 Polly^{XT}-laite on kotelon ovien ollessa suljettuina mittausvalmiina ja kuvassa 7 kotelon ovien ollessa avoinna. Laitteen kotelon päällä on ulkolämpötilan ja sateen mittausanturit.

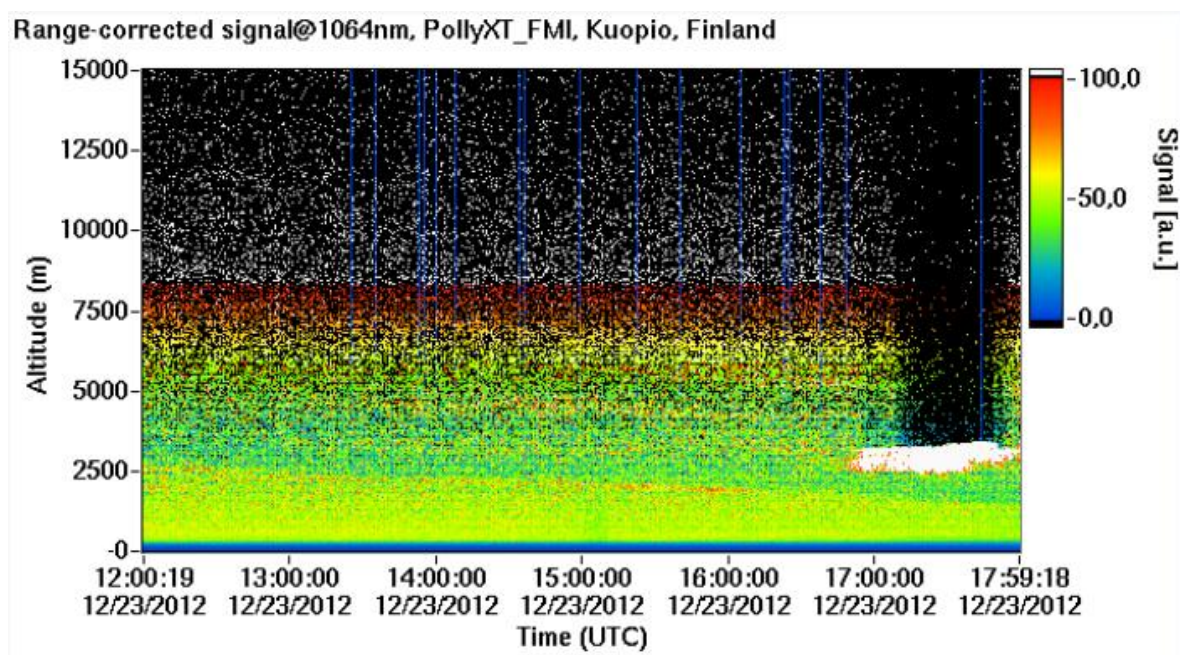


Kuva 6 Polly^{XT}-laite. Pyörien avulla laitteen siirtäminen onnistuu kahden henkilön voimin. (Valokuva Mika Komppula)



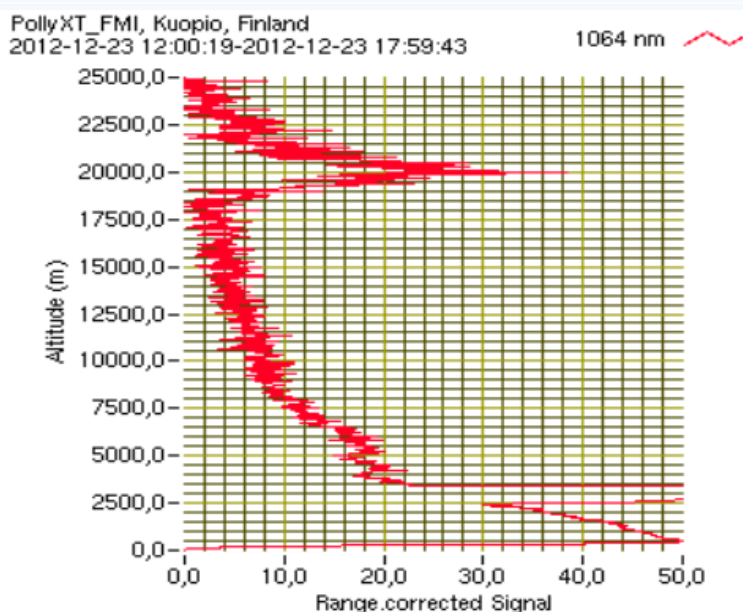
Kuva 7 Polly^{XT}-laite kotelon ovien ollessa avattuna. Vasemmanpuoleisessa osassa on lähetinlaitteisto ja alaosassa tietokone. Oikealla vastaanotinlaitteisto ja katkoton tehonlähde sekä alimpana elektroniikkayksikkö. (Valokuva Mika Komppula)

Ilmatieteen laitoksen Kuopion lidar-mittausainestot ovat julkisesti tarkasteltavissa Leibniz Institute for Tropospheric Research -tutkimuslaitoksen verkkosivuilla (<http://polly.tropos.de/lidar/>). Jatkuva-toimisten lidar-mittausten aineistot on esitetty kuuden tunnin mittausjaksoina. Kuvassa 8 on yhden kuuden tunnin mittausjakson takaisinsironneen valon signaalin voimakkuuden kuvaaja takaisinsiron-takanavan aallonpituudella 1 064 nm. Kuvaajassa x-akselilla on esitetty mittausaika UTC-aikana ja y-akselilla korkeus metreinä. Signaalin voimakkuus määräytyy takaisinsirottavista kappaleista ja niiden määrästä. Ajasta, joka kuluu laserpulssin lähettämisestä takaisinsironneen valon havaitsemiseen, saadaan valoa takaisinsirottavan kohteen etäisyys. Näissä Leibniz Institute for Tropospheric Research -tutkimuslaitoksen verkkosivuilla julkaistuissa kuvaajissa signaalin voimakkuudelle ei ole asetettu mitään erityistä yksikköä. Lyhenne a.u. tulee sanoista arbitrary units, mikä tarkoittaa, että asteikko on mielivaltainen. Kuvaajan asteikolla matala takaisinsironneen valon intensiteetin signaali on kuvattu kylmillä väreillä ja korkea intensiteetti lämpimillä väreillä. Valkoinen väri kuvastaa erittäin voimakasta takaisinsirontaa, mikä johtuu usein pilvistä. Musta ja voimakkaan sininen väri ilmaisevat signaalin puuttumista. (Leibniz Institute for Tropospheric Research.)



Kuva 8 Esimerkki Polly^{XT}-aineiston signaalin voimakkuuden kuvaajasta (Kuvakaappaus Leibniz Institute for Tropospheric Research tutkimuslaitoksen www-sivuilta)

Signaalin voimakkuus on esitetty korkeuden funktiona kuvassa 9. Kuvaajassa on kuvan 8 esittämän mittausjakson signaalin voimakkuus koko kuuden tunnin mittausjakson keskiarvona aallonpituudella 1 064 nm. Tässä signaalin keskiarvokäyrässä näkyy signaalin voimakkuuden kuvaajan (kuva 8) pilvi noin 2 500 m:n korkeudella signaalin voimakkuuden muutoksena. Ylempänä ilmakehässä noin 18–25 km:n korkeudella näkyvä signaalin voimakkuuden muutos johtuu harvinaisista helmiäispilvistä, joita on havaittu Vehmasmäen yllä joulukuussa 2012.



Kuva 9 Esimerkkikuva Polly^{XT}-laitteen mittaussignaalin voimakkuuden keskiarvokäyrästä (Kuvakaappaus Leibniz Institute for Tropospheric Research tutkimuslaitoksen www-sivuilta)

3.4 Lidar-mittaukset Ilmatieteen laitoksen toiminnassa

Lidar-mittalaite on otettu Ilmatieteen laitoksen käyttöön ilmatieteellisen tutkimuksen ajantasaista monitorointia varten. Polly^{XT}-mittalaitetta käytetään Ilmatieteen laitoksen tutkimustoiminnassa ilmakehän hiukkasten ja molekyylien aiheuttaman valon sironnan ja vaimentumisen sekä valon polarisoinnin mittauksiin. Näiden avulla selvitetään ja tutkitaan erilaisia ilmakehässä olevia hiukkasia sekä niiden pitoisuuksia. Vesihöyry on tärkeä kasviuonekaasu ja sen pitoisuuksien mittaaminen ja tutkiminen ilmakehässä edistävät ilmastonmuutoksen tutkimusta. Tässä ilmatieteellisen tutkimuksen alueella lidar-tekniikka on ainoa käytettävissä oleva tekniikka, jolla pystytään mittaamaan ilmakehän vesihöyrypitoisuutta jatkuvatoimisesti ilmakehän eri korkeuksilta. Ilmatieteen laitoksen Polly^{XT}-laitetta käytetään ilmakehän vesihöyrypitoisuusmittausten lisäksi myös planetaarisen rajakerroksen korkeuden määrittämiseen sekä pilviseulontaan.

4 ILMAN SUHTEELLISEN KOSTEUSPITOISUUDEN MUUNNOS VESIHÖYRYPITOISUUDEKSI

Kuten edellä luvussa 3 mainittiin, ilman kosteudelle on olemassa paljon erilaisia mittayksiköitä ja ilman suhteellinen kosteus ja ilman vesihöyrypitoisuus ovat näistä tärkeimpiä meteorologiassa käytettäviä kosteuskäsitteitä. (Puhakka 1996, 39–42.) Ilmatieteen laitoksen Vehmasmäen mittausaseman säähavaintomastossa ilman kosteutta mitataan ilman suhteellisenä kosteutena. Ilman suhteellinen kosteusarvo on muunnettava vesihöyrypitoisuudeksi, jotta sitä voidaan verrata lidar-mittausaineiston vesihöyrypitoisuuden arvoon. Ilman suhteellisen kosteuden RH (%) arvot saadaan muunnettua vesihöyrypitoisuuden X (g/kg) arvoiksi seuraavalla kaavalla:

$$X = B * \frac{P_w}{(P_{tot} - P_w)} \quad (1)$$

missä X = ilman vesihöyrypitoisuus, g/kg
 B = kaasuvakio; ilmalle 621,9907 g/kg
 P_w = vesihöyryn osapaine, hPa
 P_{tot} = vallitseva ilmanpaine, hPa

Vesihöyryn osapaine P_w saadaan johdettua ilman suhteellisen kosteuden kaavasta:

$$RH = \frac{P_w}{P_{ws}} * 100 \rightarrow P_w = P_{ws} * \frac{RH}{100} \quad (2)$$

missä RH = ilman suhteellinen kosteus (%)
 P_{ws} = kylläisen vesihöyryn paine (hPa)

Tässä yhteydessä vesihöyrypitoisuuden laskemiseksi käytettävät ilman lämpötilat eivät laske alle -20 °C:seen ja näin ollen voidaan käyttää kylläisen vesihöyryn paineen P_{ws} laskemiseksi seuraavaa kaavaa:

$$P_{ws} = A * 10^{\left(\frac{m * T}{T + T_n}\right)} \quad (3)$$

missä T = ilman lämpötila (°C)

A, m ja T_n arvot ovat vakioita, joiden arvot lämpötilavälillä -20–50 °C ovat

$$\begin{aligned} A &= 6,1162 \\ m &= 7,5892 \\ T_n &= 240,71 \text{ (Vaisala Oyj 2013)} \end{aligned}$$

Kylläisen vesihöyryn paineen kaava (kaava 3) on approksimaatio. Virhemarginaali tällä käytetyllä lämpötila-alueella on 0,09 %.

Nämä edellä olevat kaavat yhdistämällä vesihöyrypitoisuuden kaavaan saadaan:

$$X = B * \frac{A * 10^{\left(\frac{m * T}{T + T_n}\right)} * \frac{RH}{100}}{\left(P_{tot} - A * 10^{\left(\frac{m * T}{T + T_n}\right)} * \frac{RH}{100}\right)} = 621,9907 \frac{\text{g}}{\text{kg}} * \frac{6,1162 * 10^{\left(\frac{7,5892 * T}{T + 240,71}\right)} * \frac{RH}{100}}{\left(P_{tot} - 6,1162 * 10^{\left(\frac{7,5892 * T}{T + 240,71}\right)} * \frac{RH}{100}\right)} \quad (4)$$

Kaavaan 4 syötetään säähavaintoaineistoista suhteellinen kosteus RH (%), lämpötila T (°C) ja ilmanpaineen P_{tot} (hPa) arvot. Kaavalla 4 saatujen vesihöyrypitoisuuden X (g/kg) arvojen avulla lidarmittausten vesihöyryprofileille määritetään kalibroitikertoimet Vehmasmäen maston 223 ja 299 m:n kosteusmittauspisteitä käyttäen.

5 MITTAUSPISTEET JA MITTAUSAINEISTOT

Opinnäytetyössä testattiin Vehmasmäen säähavaintomaston ilman kosteuden mittausaineiston sekä Jyväskylän radioluotausaineiston käyttökelpoisuutta lidar-mittauksen vesihöyryprofiilin kalibroinnissa vertailemalla näitä mittausaineistoja toisiinsa. Testausosiossa käytetyt mittausaineistot on kerätty ajalta 16.11.2012–21.2.2013. Mittausaineistot on koottu kokonaisuudessaan kolmelta eri Ilmatieteen laitoksen havaintoasemalta, jotka ovat Kuopion Vehmasmäen mittausasema, Kuopion Savilahden sääasema sekä Jyväskylän lentokentän havaintoasema. Kaikki tarkasteluun kerätyt sääaineistot ovat hetkellishavaintoja, joita saadaan jatkuvasti kymmenen minuutin välein. Kaikki mittausaineistot on esitetty UTC-ajassa. Mittauspisteiden sijainti on esitetty liitteessä 1.

5.1 Vehmasmäen mittausasema

Vehmasmäen mittausasemalta kootut mittausaineistot ovat lidar-mittalaitteen aineisto sekä säähavaintomaston mittauspisteistä ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvot. Mastossa on säähavaintojen mittauspisteet korkeuksilla 2, 26, 66, 114, 168, 223, 274 ja 299 m. Ilman kosteuden mittaus on korkeuksilla 26, 223 ja 299 m. Maston korkeuden 26 m aineistosta käytetään ilmankosteuden ja lämpötilojen arvoja Jyväskylän ja Kuopion maanpintasääarvojen ja paikallisten sääolosuhteiden vertailuun. Lidar-mittausaineiston vesihöyrypitoisuuden arvoon verrataan maston 223 ja 299 m:n korkeuksilta saatavia ilman kosteuden arvoja. Ilman kosteuden arvot on muunnettu suhteellisesta kosteudesta vesihöyrypitoisuuden arvoksi luvussa 5 esitetyllä kaavalla 4 lämpötilan ja ilmanpaineen arvojen avulla. Vehmasmäen säähavaintomastossa ei ole ilmanpaineen mittausta, joten ilmanpaineen arvoina on käytetty Kuopion Savilahden säähavaintoaseman arvoja. Savilahden ilmanpaineen arvoja käytetään myös Kuopion ja Jyväskylän maanpintasääarvojen vertailussa. Vehmasmäen havaintoasema sijaitsee 190 m:n korkeudella merenpinnasta.

5.2 Jyväskylän havaintoasema

Ilmatieteen laitoksen Jyväskylän radioluotaukset tehdään Tikkakosken lentokentän havaintoasemalla. Luotauksia tehdään kahdesti päivässä klo 6 ja klo 18. Lidar-mittausaineistoon verrattava radioluotauksista saatava ilman kosteuden aineisto on ilmoitettu vesihöyrypitoisuutena, joten aineistot ovat suoraan verrattavissa toisiinsa Labview-ohjelmalla. Luotausaineistojen lisäksi tarkastelussa käytetään havaintoaseman sääaineiston ilman suhteellisen kosteuden, lämpötilan ja ilmanpaineen maanpintasääarvoja, joita verrataan Vehmasmäen maston korkeuden 26 m vastaaviin sääarvoihin. Jyväskylän havaintoasema sijaitsee 139 m:n korkeudella merenpinnasta.

5.3 Savilahden sääasema

Vehmasmäen maston säähavaintoaineistosta ei ole saatavilla ilmanpaineen arvoja, joita tarvitaan ilman suhteellisen kosteuden muunnoksessa vesihöyrypitoisuudeksi (ks. luku 4). Muunnoksessa käytetään Ilmatieteen laitoksen Kuopion Savilahden säähavaintoaseman ilmanpaineen arvoja. Savilahden säähavaintoaineiston ilmanpaineen arvoja käytetään myös Kuopion ja Jyväskylän välisten sää-

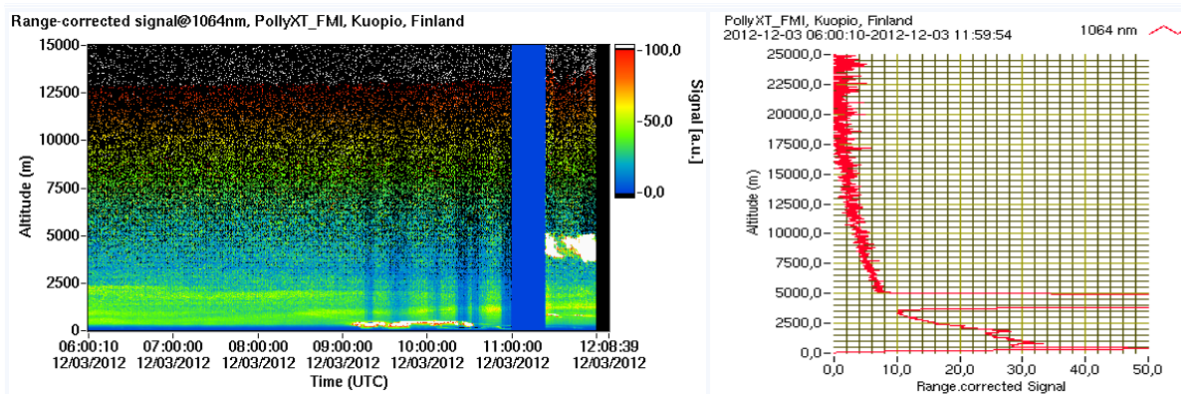
olosuhteiden erojen tarkasteluun. Savilahden mittausasema sijaitsee noin 20 km:n päässä Vehmasmäen mittausasemasta ja sen korkeus on 87 m merenpinnasta.

6 MITTAUSAINEISTOJEN VERTAILU

6.1 Lidar-mittausaineistojen valinta

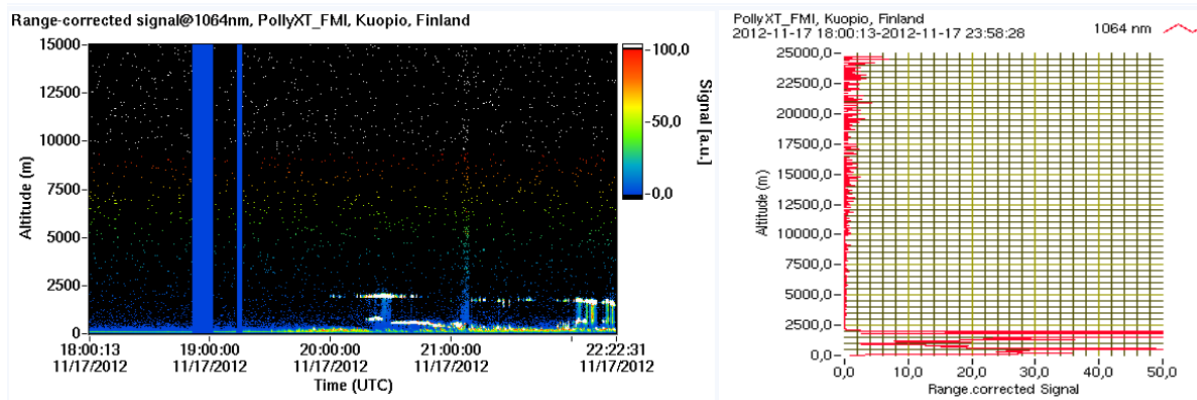
Työ alkoi vertailussa ja tarkastelussa käytettävien lidar-mittausaineistojen valinnalla. Työssä käytettävät mittausjaksot valittiin noin kolmen kuukauden ajanjaksolta lidar-mittalaitteen käyttöönottopäivästä alkaen ajalta 16.11.2012–21.2.2013. Lidar-mittausaineistot on esitetty Leibniz Institute for Tropospheric Research -tutkimuslaitoksen verkkosivuilla mittalaitteen keräämän takaisinsironneen valon intensiteetin voimakkuuden profiileina kuuden tunnin aikajaksoina. Aineistot valittiin tarkastelemalla lidar-mittausaineistojen signaalin voimakkuuden profiileja ja tarkasteluun valittiin kaikki onnistuneet keskeytyksittä toteutuneet mittaukset, joiden profiileissa ei ole näkyvissä pilviä lähellä maan pintaa. Pilvet ovat tiivistynyttä vesihöyryä ja ne vaikuttavat siten vesihöyrypitoisuuden arvoon. Lidar-mittalaitteen lähettämän lasersäteen osuessa pilvipisaroihin säteen valosta suurin osa siroaa takaisin. Takaisinsironneen valon signaali jää vaimeaksi tai signaalia ei ole havaittavissa lainkaan ylempänä ilmakehässä, mistä seuraa, että vesihöyrypitoisuuden profiili jää kovin matalaksi eikä sitä ole järkevää käyttää tarkastelussa. Lidar-mittausaineiston vertailu radioluotausaineistoon toimii todennäköisesti paremmin ylempänä ilmakehässä, jossa Jyväskylän ja Kuopion paikalliset sääolosuhteiden vaihtelut eivät vaikuta merkittävästi vesihöyrypitoisuuksien arvoihin. Ylempänä ilmakehässä olosuhteet tasaantuvat, jolloin paikallisilla sääolosuhteiden muutoksilla ei ole niin merkittävää vaikutusta vesihöyrypitoisuuden arvoon. Lisäksi lidar-mittauksen ja radioluotauksen vesihöyrypitoisuuden mittausaineistojen vertailu tehdään mahdollisimman alhaalta. Näistä syistä profiileissa ylempänä ilmakehässä näkyvät pilvet eivät haittaa aineistojen vertailua.

Mittausaineistojen vertailussa käytettävien lidar-mittausaineistojen valinta tapahtui tarkastelemalla mittausaineistojen takaisinsironnan voimakkuuden profiileja silmämääräisesti. Kuvissa 10 ja 11 on esimerkkejä tarkastelluista kuvaajista. Kuvassa 10 on esimerkki yhdestä kuuden tunnin mittausjaksosta, jonka alkuosa on valittu tarkasteluun. Mittausaineisto on käytettävissä vertailussa, kun valitaan kokonaisesta kuuden tunnin mittausaineistosta pilvetön osuus klo 6:sta klo 9:ään. Kuvaajan sinisen palkin kohdalta mittausdata ei ole käyttökelpoinen. Sininen palkki kuvaajassa kertoo signaalin puuttumisesta, mikä johtuu sateesta tai mittauskatkosta.



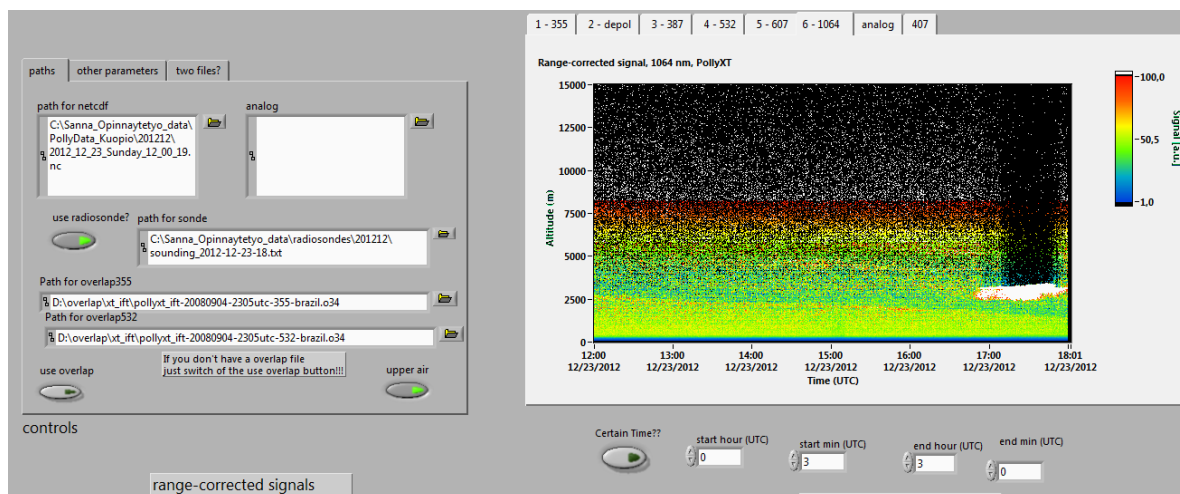
Kuva 10 Esimerkkikuvaaja vertailussa käytetystä lidar-mittausaineistosta. (Kuvakaappaus Leibniz Institute for Tropospheric Research tutkimuslaitoksen www-sivuilta)

Kuvan 11 tilanteessa lidar-mittausaineiston profiilissa on näkyvillä paljon pilviä lähellä maan pintaa. Mittausjakson signaali on ylempänä ilmakehässä erittäin heikko tai sitä ei ole lainkaan. Matalalla olevat pilvet estävät lasersäteen läpipääsyn ja pilvipisarat sirottavat valoa voimakkaasti takaisin maan pinnalle. Heikon signaalin voimakkuuden ylempänä ilmakehässä näkee myös oikeanpuoleisesta kuvaajasta, jossa signaalin voimakkuus on esitetty korkeuden funktiona. Tällainen mittausaineisto ei ole sopiva käytettäväksi vertailussa.



Kuva 11 Esimerkkikuvaaja vertailuun sopimattomasta aineistosta. (Kuvakaappaus Leibniz Institute for Tropospheric Research tutkimuslaitoksen [www-sivuilta](http://www.sivuilta))

Lidar-mittausjaksojen valinnassa käytettiin apuna Labview-ohjelmaa. Kuvassa 12 on ohjelman näkymä mittausaineiston tarkasteluvaiheessa. Labview-ohjelmalla on mahdollista valita kokonaisista kuuden tunnin mittausjaksoista lyhyempiä jaksoja *certain time* -toiminnolla. Tarkasteluun sopivat mittausjaksot määritettiin muuttamalla ohjelmalla mittausjakson pituutta asettamalla haluttu alkamis- ja loppumisaika tarkasteltavalle mittausjaksolle. Näin tarkasteluun valittiin kaikki pilvettömät ja katkottomat mittausjaksot. Mittausjaksojen valinnassa käytettiin takaisinsirontakanavan aallonpituutta 1 064 nm. Tarkasteltaviksi mittausjaksoiksi aineistosta valittiin kaikki kestoltaan kaksi tuntia tai pidemmät onnistuneet mittaukset. Valitut lidar-mittauspäivät ja -jaksot listattiin Excel-taulukkoon. Tarkasteluun saatiin yhteensä 47 lidar-mittausjaksoa, joiden pituus vaihtelee kahdesta kuuteen tuntiin. Jokaiselta tarkasteluun valitulta yli kahden tunnin lidar-mittausjaksolta valittiin myös kahden tunnin otokset, joille määritettiin myös kalibrointikertoimet erikseen. Tällä testattiin mittausjakson pituuden vaikutusta kalibroinnin luotettavuuteen.



Kuva 12 Lidar-mittausaineiston tarkastelunäkymä Labview-ohjelmassa. (Kuvakaappaus Labview-ohjelmasta)

6.2 Vertailtavan aineiston kokoaminen

Vehmassmäen maston ilman suhteellisten kosteusarvojen muunnokseen vesihöyrypitoisuudeksi tarvittavat arvot koottiin samaan Excel-taulukkoon, jonne oli listattu vertailussa käytettävät lidar-mittausten aineistot. Vehmassmäen maston 223 ja 299 m mittauspisteiden aineistoista kerättiin lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden arvot. Ilman kosteusarvon muunnokseen tarvittavat ilmanpaineen arvot kerättiin Savilahden sääaseman havaintoaineistosta. Nämä sääarvot määritettiin aina kyseisen lidar-mittausjakson keskiarvona. Maston pisteille määritettiin siis vesihöyrypitoisuus näistä sääarvoista lidar-mittausten keskiarvostuksen mukaisesti tarkasteluun valituille kokonaisille mittausjaksoille sekä yli kahden tunnin mittausjaksoilta valituille kahden tunnin otoksille. Excel-taulukkoon syötettiin vesihöyrypitoisuuden kaava (ks. luku 5, kaava 4), jolla saatiin muunnettua ilman suhteellisen kosteuden arvot vesihöyrypitoisuudeksi. Vesihöyrypitoisuuden arvot on määritetty maston kosteusmittauspisteille lidar-vesihöyryprofiilin ja radioluotausaineiston mukaisesti yksikössä g/kg.

Jyväskylän radioluotausten aineistot on julkisesti saatavilla Wyomingin yliopiston verkkosivuilla (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Radioluotausten aineistot ladattiin sivustolta ja tallennettiin Labview-ohjelman käyttämään TXT-tiedostomuotoon.

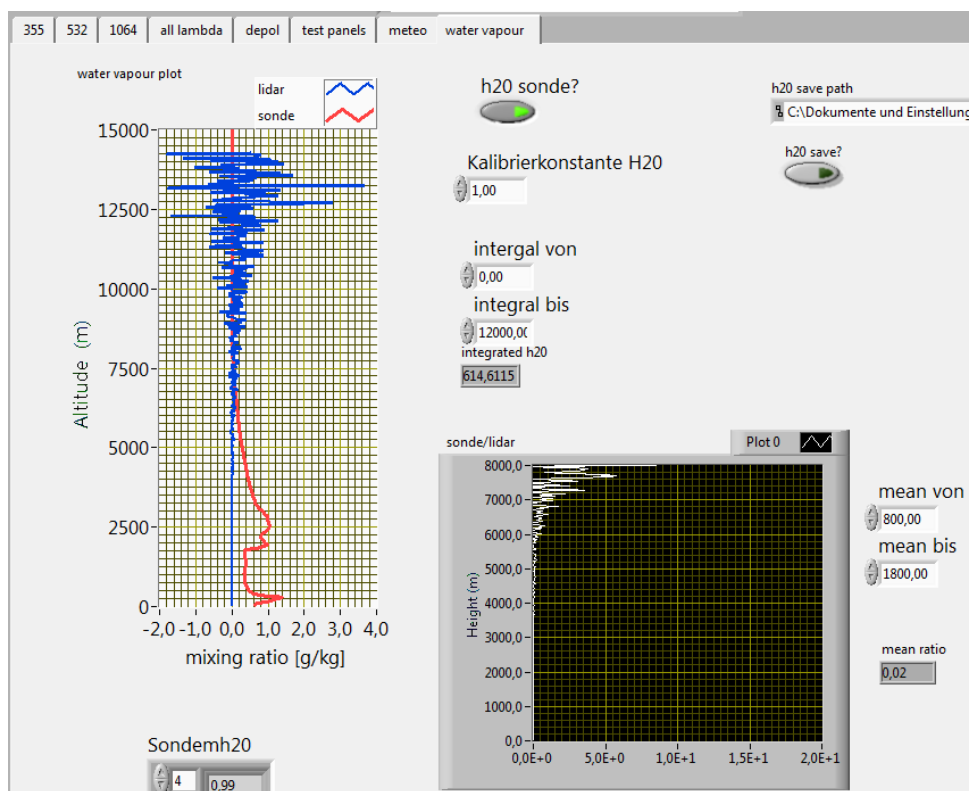
Sääarvojen vertailuun Jyväskylän ja Kuopion välillä kerättiin ilman lämpötilan, kosteuden ja ilmanpaineen arvot kummankin paikkakunnan säähavaintoaineistoista. Jyväskylän maanpintasääarvot määritettiin luotauspallon laukaisuhetkeltä ja Kuopion maanpintasääarvot lidar-mittaushetkeltä. Lidar-mittaushetkeksi määritettiin jokaisen kahden tunnin mittausjakson puoliväli. Liitteessä 2 on ote tarkastelua ja mittausaineistojen vertailua varten laaditusta Excel-taulukosta, josta näkyy tarkasteluun koottu aineisto taulukoituna.

6.3 Kalibroitikertoimien määrittäminen

Mittausaineistojen vertailu tehtiin Labview-lidar-mittauksen vesihöyryprofiilin kalibrointi -ohjelmalla. Ohjelmalla tarkasteltiin radioluotausten ja lidar-mittauksen vesihöyryprofiilien vastaavuutta sekä Vehmassmäen säähavaintomaston 223 ja 299 m mittauspisteiden vesihöyrypitoisuuksien arvoja lidar-profiilin vesihöyrypitoisuuden arvoon maston pisteitä vastaavilta korkeuksilta. Vertailussa määritettiin jokaiselle lidar-profiilille kalibroitikerroin, joka kirjattiin Excel-taulukkoon. Kalibroitikerroimen avulla lidar-mittauksen vesihöyrypitoisuusprofiili saadaan kalibroituksi ja näyttämään todellista ilmakehän vesihöyrypitoisuuden arvoa. Kalibroitikerroimet määritettiin kokonaisluku -tarkkuudella.

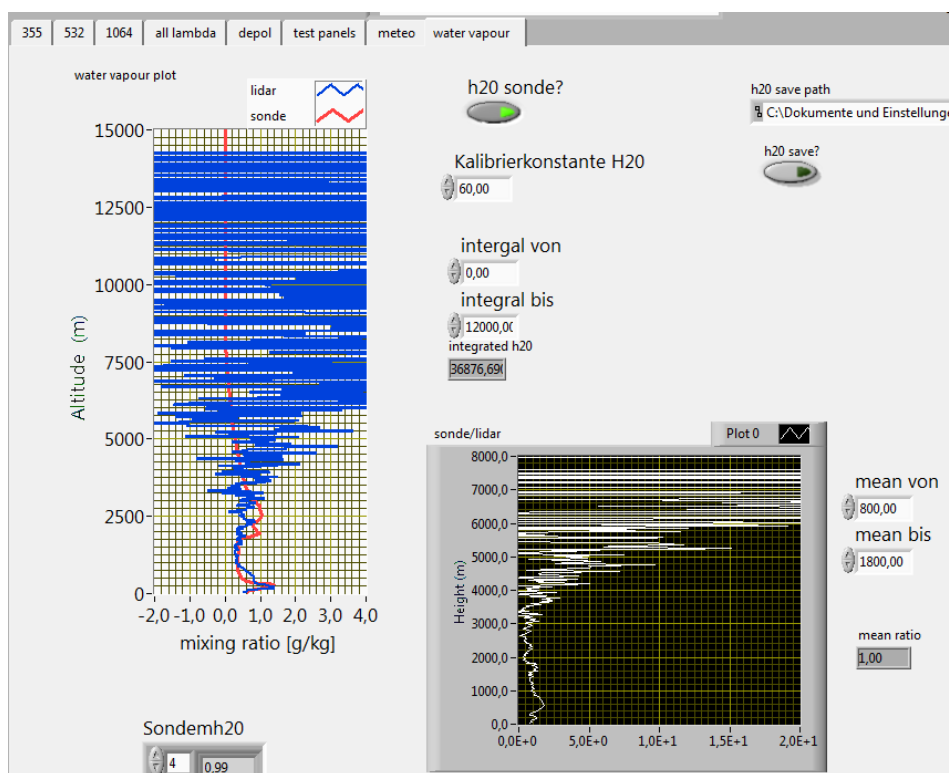
6.3.1 Lidar-mittauksen ja radioluotausten vesihöyryprofiilien vertailu

Labview-ohjelman vesihöyrypitoisuuksien profiilinäkymään valittiin lidar-mittauksen ja luotauksen vertailtavat aineistot. Tarkasteluun valitun lidar-mittausjakson vesihöyrypitoisuuden keskiarvoprofiili määrättiin näkyväksi asettamalla mittauksen alkamis- ja loppumisaika ohjelman toiminnolla. Vertailtavaksi luotausaineistoksi valittiin aina ajallisesti lähin radioluotausten aineisto. Kuvassa 13 on Labview-ohjelman näkymä, johon on ladattu vertailtavat lidar-mittauksen sekä luotauksen aineistot. Kuvassa vesihöyrypitoisuus on esitetty korkeuden funktiona. Sininen käyrä kuvastaa lidar-mittauksen vesihöyryprofiilia ja punainen Jyväskylän radioluotausten vesihöyryprofiilia. Lidar-mittauksen vesihöyryprofiilissa suuremmilla korkeuksilla näkyvä mittauskohina aiheutuu auringonvalon taustasäteilystä. Kalibroitikerrointa muuttamalla profiilit alkavat muistuttaa toisiaan.



Kuva 13 Lidar-mittauksen ja radioluotausten vesihöyryprofiilien vertailu. (Kuva-kaappaus Labview-ohjelmasta)

Lidar-mittausaineiston vertailu luotaukseen tehtiin aina mahdollisimman alhaalta, jolloin auringonvalon aiheuttama taustasäteily on vähäisempää. Kalibroitikerrointa muuttamalla ja eri kertoimen suuruuksia kokeilemalla saatiin profiileille etsittyä tarkasteltava korkeusväli, jolle lidar-profiilin kalibroitikerroin määritetään. Korkeusväliksi etsittiin jokaiselle lidar-profiilille noin 1 000 m väli, jossa vesihöyrypitoisuus vastaa luotauksen antamaa vesihöyrypitoisuutta. Valittu tarkasteluväli zoomattiin lähempään näkymään ja silmämääräisen tarkastelun lisäksi kalibroitikerroimen suuruus tarkistettiin syöttämällä ohjelmaan tarkasteluvälin alku- ja loppupiste, mistä saatiin selville oliko kalibroitikerroimen määrittäminen tehty oikein. Kuvassa 14 on näkymä tilanteesta kalibroitikerroimen määrittämisen jälkeen. Näillä kyseisillä vertailtavilla lidar-mittauksen ja luotauksen aineistoilla lidar-mittauksen vesihöyrypitoisuuden profiilille kalibroitikerroimen suuruudeksi määritettiin 60. Kalibroitikerroimen oikeellisuus tarkistettiin korkeudelta 800–1 800 m. *Mean rasion* ollessa 1, on kalibroitikerroin määritetty oikein. Näin kalibroitikerroimet määritettiin kaikille vertailuun valituille lidar-mittausjaksoille sekä yli kahden tunnin mittausjaksoilta valituille kahden tunnin keskiarvostuksille.

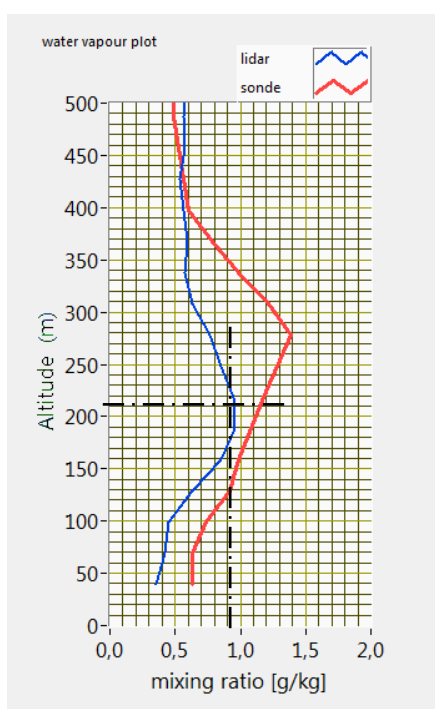


Kuva 14 Lidar-mittauksen ja radioluotauksen aineistot kalibroitikerroimen määrittämisen jälkeen (kuvakaappaus Labview-ohjelmasta)

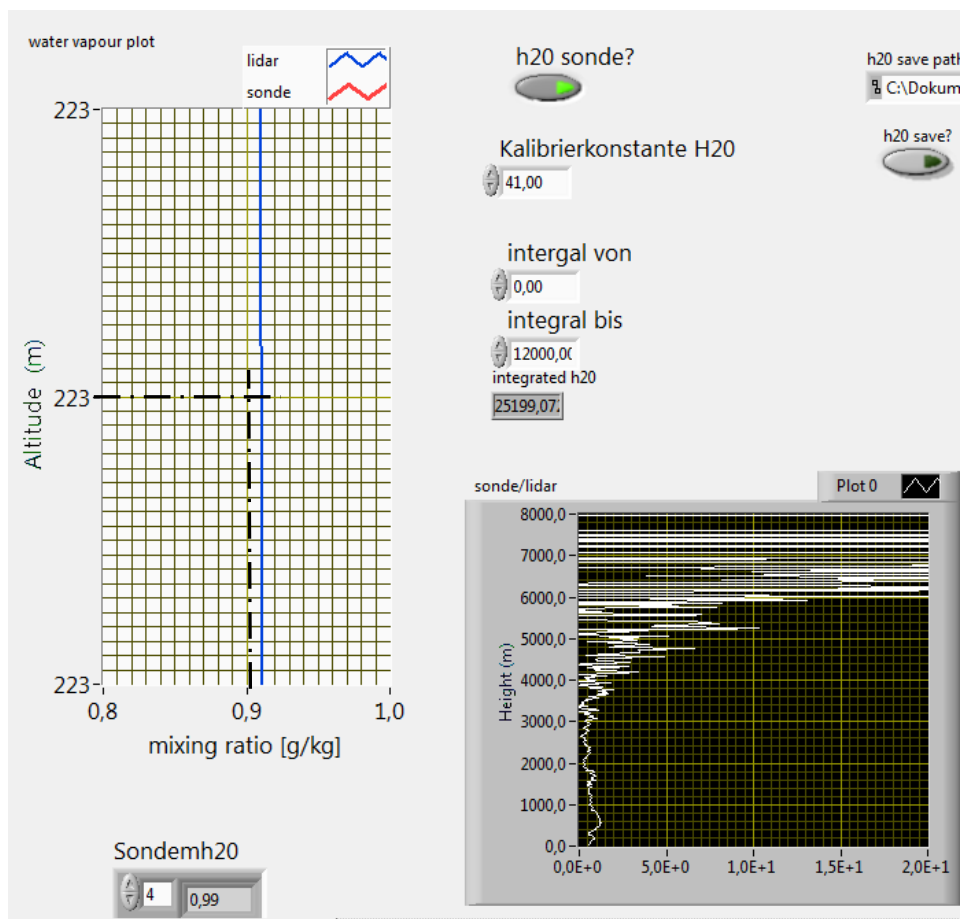
6.3.2 Lidar-mittauksen vesihöyryprofiilin ja maston 223 ja 299 m:n ilman kosteusmittauspisteiden vesihöyrypitoisuuksien vertailu

Lidar-mittausaineiston vesihöyryprofiileja verrattiin myös maston kahden eri korkeuden kosteusmittausaineistoon. Vertailut maston mittauspisteiden korkeudet olivat 223 ja 299 m, joiden ilman suhteellisen kosteuden arvot muunnettiin vesihöyrypitoisuuden arvoiksi ennen vertailua. Maston kosteusmittauspisteen korkeus ja vesihöyrypitoisuuden arvo etsittiin Labview-ohjelman vesihöyrypitoisuuden asteikolta. Kalibroitikerrointa muuttamalla etsittiin se kohta, jolloin lidar-profiilin vesihöyrypitoisuus vastaa maston pisteen vesihöyrypitoisuuden arvoa parhaiten.

Kuvissa 15 ja 16 on esimerkit lidar-profiilin ja maston 223 m:n kosteusmittauspisteen aineistojen vertailusta. Kyseessä olevalla tarkasteluun valitun lidar-mittausjakson keskiarvostuksella maston pisteessä 223 m ilman suhteellinen kosteus on 46 %, lämpötila $-8,6$ °C ja ilmanpaine 1 022,6 hPa. Vesihöyrypitoisuuden kaavaa (kaava 4) käyttäen tästä ilman suhteellisen kosteuden arvosta maston pisteelle 223 m saadaan vesihöyrypitoisuudeksi 0,9 g/kg. Asteikolta etsitään vesihöyrypitoisuuden piste (0,9;223). Kalibrointikerrointa muuttamalla lidar-profiilin vesihöyrypitoisuuden arvo saadaan vastaamaan maston kosteusmittauspisteen vesihöyrypitoisuuden arvoa. Kalibrointikertoimen arvoksi valitaan se kokonaisluku, millä lidar-profiilin vesihöyrypitoisuuden arvo on lähimpänä maston vesihöyrypitoisuuden arvoa. Tässä kyseessä olevassa vertailussa kalibrointikertoimeksi lidar-profiilille saatiin 41.



Kuva 15 Maston 223 m:n ilmakeuhemittauspisteen ja lidar-profiilin vesihöyrypitoisuuksien vertailu (kuva-kaappaus Labview-ohjelmasta)



Kuva 16 Maston 223 m:n ilman kosteusmittauspisteen ja lidar-profilin vesihöyrypitoisuuksien vertailu. (kuvakaappaus Labview-ohjelmasta)

7 KALIBROINTIKERTOIMIEN TARKASTELU JA ANALYSOINTI

Mittausaineistojen vertailusta saatiin kooste lidar-profiilien kalibrointikertoimista Excel-taulukkoon. Kaikille tarkastelujaksolta 16.11.2012–21.2.2013 valittujen lidar-mittausjaksojen vesihöyrypitoisuuden profiileille saatiin määritettyä kalibrointikertoimet, kun kalibrointimetodina käytettiin maston ilman kosteuden mittauspisteitä. Käytettäessä radioluotausten aineistoja kalibrointimetodina ei jokaiselle tarkasteluun valitulle lidar-mittausjaksolle saatu kalibrointikerrointa määritettyä johtuen yksittäisten lidar-mittausten ja radioluotauksen vesihöyryprofiilien poikkeavuudesta. Kalibrointikertoimet määritettiin valituille lidar-mittausjaksoille sekä yli kahden tunnin mittausjaksoilta valituille kahden tunnin otoksille. Kalibrointikertoimia määritettiin siis yhteensä kuusi aina yhtä tarkasteluun valittua lidar-mittausjaksoa kohden. Kalibrointikertoimia ja kertoimiin vaikuttavia asioita tarkasteltiin käyttäen apuna Excel-taulukkolaskentaohjelmaa.

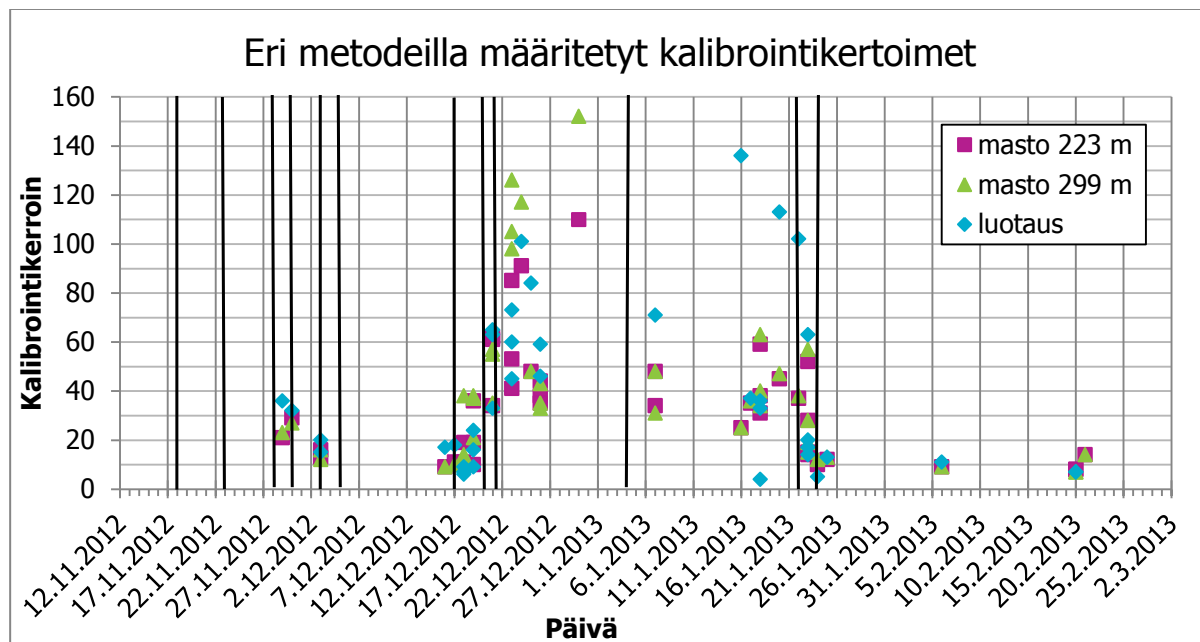
Tarkastelun edetessä havaittiin, että kalibrointikertoimen luotettavuuteen vaikuttaa joukko eri tekijöitä etenkin kun kalibrointimetodina käytetään radioluotausten aineistoa. Pelkästään lidar-mittalaitteen vesihöyrypitoisuuden profiiliin vaikuttavat sääolosuhteet ja pilvisuus sekä vuorokaudenaika. Seuraavana on tarkasteltu eri tekijöiden vaikutusta kalibrointikertoimiin ja niiden luotettavuuteen käytettäessä näitä metodeja. Tämän lisäksi eri metodeilla saatuja kalibrointikertoimia vertaillaan toisiinsa. Jatkon tarkastelussa maston kosteusmittauspisteistä puhutaan eri metodeina, sillä kalibrointikertoimet määritettiin tarkastelua varten kummallekin maston pisteelle erikseen.

7.1 Polly^{XT}-laitteen vesihöyrykanavan asetusten muutosten vaikutus kalibrointikertoimeen

Kalibrointikertoimien suuruudessa esiintyy suurta hajontaa, kuten on havaittavissa kertoimien aikasarjakuvaajasta (kuvio 1). Polly^{XT}-laitteen vesihöyrymittauksen kanavaan on tehty erilaisia säätöjä laitteen käyttöönoton jälkeen. Tässä työssä käytetyn tarkastelujakson aikana asetuksia on säädetty yhteensä 12 kertaa. Kuviossa 1 on lidar-mittalaitteen kokonaisille mittausjaksoille eri metodeilla määritetyt kalibrointikertoimet aikasarjana, johon on merkitty myös pystyviivoin päivät, jolloin laitetta on säädetty. Kuvioista huomataan, että kalibrointikertoimissa hajonnan suuruus sekä kertoimien suuruusluokka muuttuu lähes jokaisen tehdyn säädön jälkeen. Kertoimien suuruusluokka vaihtelee koko tarkastelujaksolla luotauksella alle kymmenestä noin 135:een, maston 223 m kosteusmittauspistettä käytettäessä alle kymmenestä 110:een ja maston 299 m kosteusmittauspistettä käytettäessä alle kymmenestä yli 150:een. Väleillä 21.12.2012–4.1.2013 ja 4.1.–22.1.2013, jolloin laitteen asetuksiin ei ole tehty muutoksia, esiintyy suurta hajontaa sekä maston pisteiden että radioluotauksen kalibrointikertoimissa. Välillä 21.12.2012–4.1.2013 suurin hajonta ilmenee maston pisteelle 299 m määritetyissä kertoimissa, kun taas välillä 4.1.–22.1.2013 suurin hajonta on luotaukselle määritetyissä kertoimissa.

Laitteeseen tehdyt asetusten muutokset on merkittävin syy kalibrointikertoimien suuruuden muutoksiin. Nämä laitteen säädöt ja niiden suuri määrä tarkastelujakson pituuteen nähden tekivät kalibrointikertoimien tarkastelusta haasteellista. Viimeisen 24.1.2013 tehdyn säädön jälkeen kalibrointikertoimet ovat samaa suuruusluokkaa kaikilla kalibrointimodeilla. Merkittävää hajontaa kertoimissa ei

esiinny eivätkä kertoimet poikkeaa toisistaan juurikaan eri metodien välillä. Tarkastelujakson loppuosan kalibroitukertoimia voidaan siis pitää tämän tarkastelujakson luotettavimpina. Niinpä jatkoon tarkasteluissa on otettu tarkemmin huomioon tämä jakso 24.1.–21.2.2013 koko tarkastelujakson lopusta.



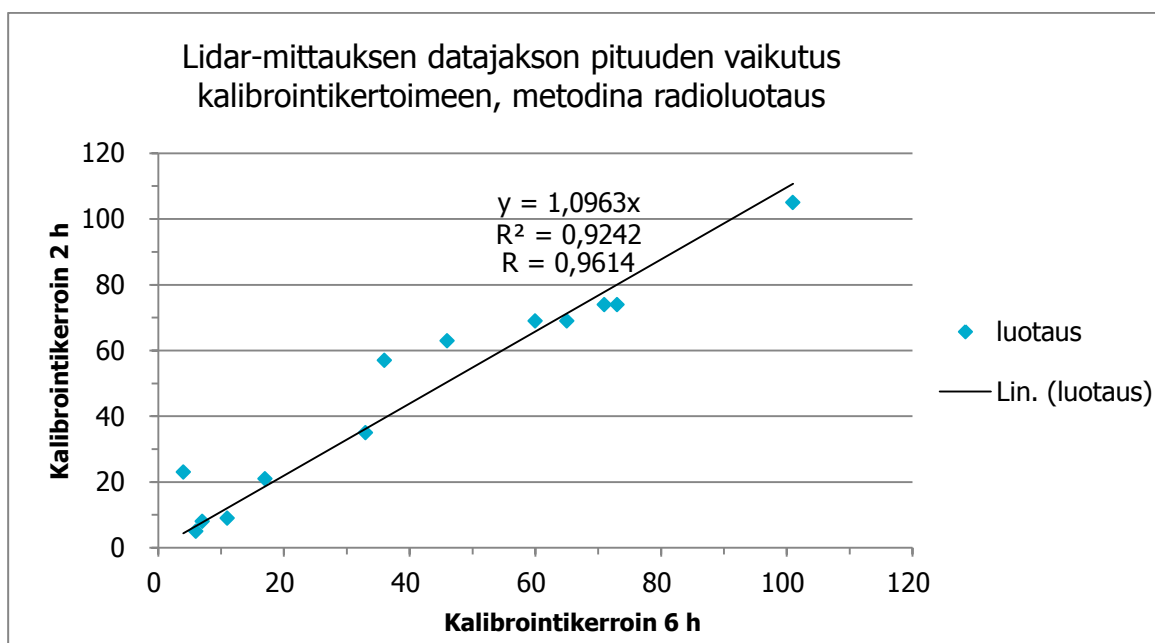
Kuvio 1 Kalibroitukertoimet aikasarjana kaikilla kolmella kalibroitimetodilla

7.2 Lidar-mittausten datajakson pituuden vaikutus kalibroitukertoimeen

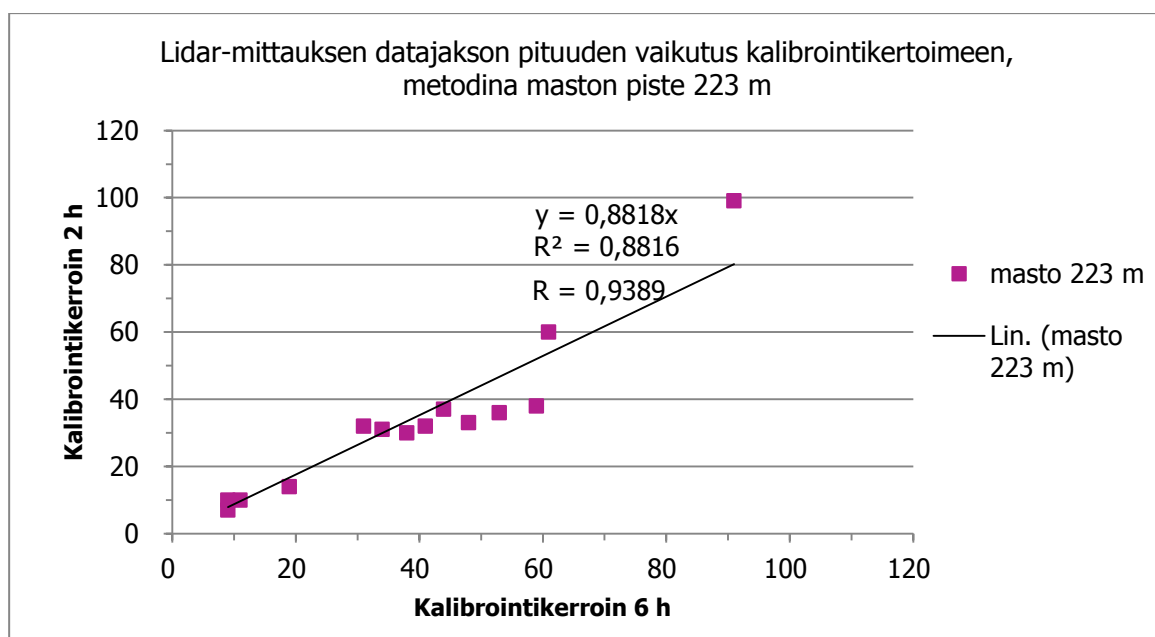
Lidar-mittausten datajakson pituuden vaikutusta kalibroitukertoimiin tarkasteltiin valitsemalla jokaiselta vertailuun valitulta mittausjaksolta myös lyhyempi kahden tunnin otos. Koko tarkastelujakson 16.11.2012–21.2.2013 kaikista olemassa olevista kuuden tunnin lidar-mittausjaksoista ei ollut mahdollista saada tarkasteluun kahta tuntia pidempiä mittausjaksoja johtuen sekä pilvisyydestä että mitalaitteen toiminnan katkoksista ja signaalin häiriöistä. Tällöin kalibroitukerroin määritettiin ainoastaan kyseisen lidar-mittauksen kahden tunnin jaksolle. Hyvälaatuisia ja käyttökelpoisia kokonaisia kuuden tunnin mittausjaksoja oli saatavilla 14 koko tarkastelujaksolta.

Seuraavissa kuvaajissa on esitetty kokonaisille kuuden tunnin mittausjaksoille ja samojen mittausjaksojen kahden tunnin otoksille määritetyt kalibroitukertoimet kaikille käytetyille metodeille korrelaatiokuvaajina (Kuviot 2-4). Kuvaajissa kuuden tunnin lidar-mittausjaksoille määritetyt kalibroitukertoimet ovat x-akselilla ja kahden tunnin jaksolle määritetyt kertoimet y-akselilla. Mikäli lidar-mittausjakson pituus ei vaikuta lainkaan kalibroitukertoimeen, vastaaville kahden ja kuuden tunnin mittausjaksoille määritetyt kertoimet korreloivat keskenään. Tällöin korrelaatiopisteet asettuvat kuvaajassa 1:1 suoralle, jolloin korrelaatiokerroin $R=1$. Korrelaatiokerroin saadaan Excel-taulukkolaskentaohjelmalla määritetyn korrelaatiopistesarjan lineaarisen trendisuoran selityskertoimesta R^2 . Kuvioiden 2–4 kuvaajien perusteella näyttää siltä, että tällä tarkasteluaineistolla lidar-mittausaineiston kahden ja kuuden tunnin mittausjaksoille määritetyt kalibroitukertoimet korreloivat hyvin keskenään kaikilla käytetyillä kalibroitimetodeilla. Luotausta sekä maston pistettä 299 m käyt-

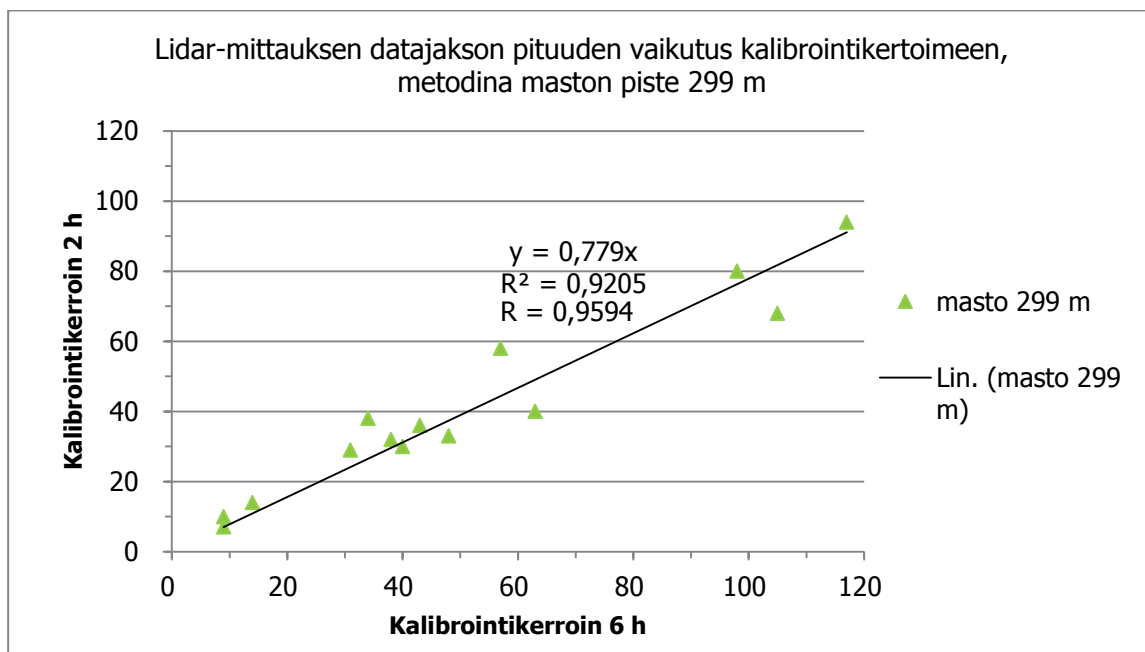
tämällä määritetyillä kalibroitukertoimilla korrelaatiopisteille määritetyn lineaarisen suoran korrelaatiokerroin R on noin 0,96 ja maston pistettä 223 m käyttäen määritetyillä kalibroitukertoimilla suoran korrelaatiokerroin on noin 0,94. Mittausjakson pituudella ei siis näyttäisi olevan merkittävää vaikutusta kalibroitukertoimeen, sillä kertoimet ovat vastaavanlaisia saman lidar-mittausaineiston kahden ja kuuden tunnin mittausjaksoilla kaikilla kalibroitimetodeilla. Tämän havainnon perusteella jatkon tarkasteluissa käytetään kahden tunnin keskiarvostuksella määritettyjä kalibroitukertoimia standardiarvoina.



Kuvio 2 Lidar-mittauksen datajakson pituuden vaikutus kalibroitukertoimeen; kalibroitimetodina radioluotausaineisto



Kuvio 3 Lidar-mittauksen datajakson pituuden vaikutus kalibroitukertoimeen; kalibroitimetodina maston piste 223 m

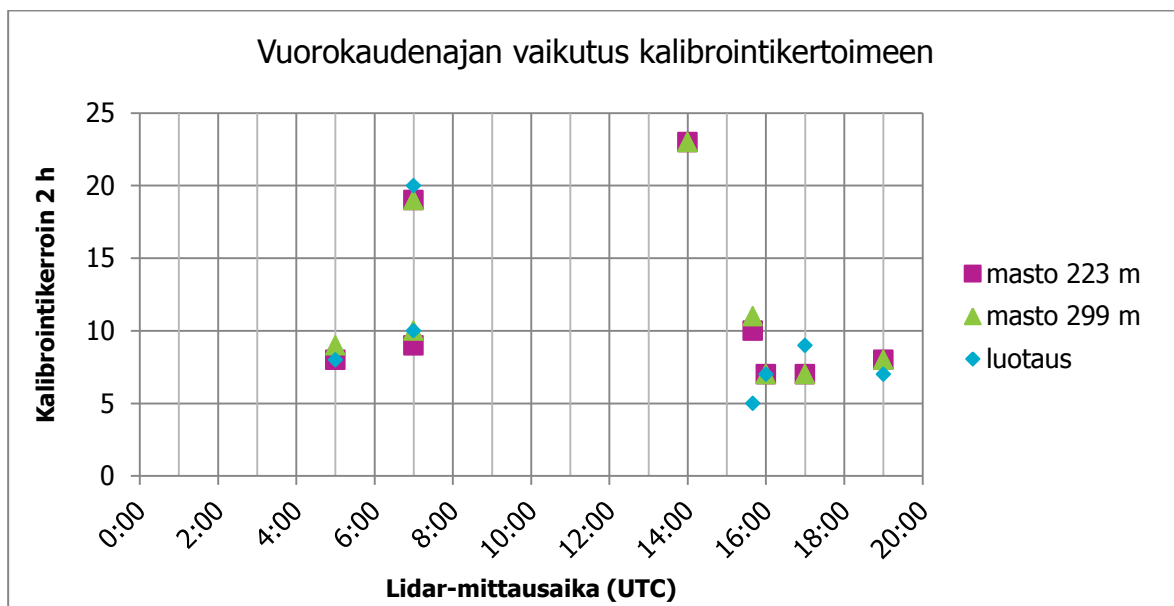


Kuvio 4 Lidar-mittauksen datajakson pituuden vaikutus kalibroitikertoimeen; kalibroitimetodina maston piste 299 m

7.3 Lidar-mittauksen vuorokaudenajan vaikutus kalibroinnin luotettavuuteen

Lidar-mittauksen vuorokaudenajan vaikutusta ei ollut kannattavaa tarkastella koko tarkastelussa käytetyllä aineistolla mittalaitteen säädöistä aiheutuvan kalibroitikertoimien hajonnan takia. Vuorokaudenajan vaikutusta kalibroitikertoimiin testattiin asettamalla tarkastelujakson lopusta lidar-mittausaineiston kahden tunnin keskiarvostuksella määritetyt kalibroitikertoimet aikasarjakuvaajaan (kuvio 5), jossa lidar-mittausajaksi on määritetty kahden tunnin mittausjakson puoliväli. Kuvaajasta huomataan, että valtaosassa näistä kertoimista suuruusluokka säilyy eri päivien lidar-mittausjaksoilla riippumatta vuorokauden ajasta.

Vuorokaudenaika vaikuttaa kalibroinnin luotettavuuteen, kun kalibrointi tehdään radioluotauksen aineistoa käyttämällä. Jyväskylän radioluotaukset tehdään päivittäin klo 6 ja klo 18. Kalibrointi voidaan tehdä sitä luotettavammin mitä lähempänä lidar-mittaus on luotuspallon laukaisuhetkeä. Maston pisteitä käytettäessä kalibroitimetodina vuorokaudenajalla ei yksinään ole merkitystä kalibroinnin luotettavuuden kannalta, sillä maston kosteusmittaukset ovat jatkuvatoimisia ja mittausaineistoa kerätään hetkellishavaintoina kymmenen minuutin välein. On kuitenkin huomioitava, että lidar-mittalaitteen vesihöyrymittauksen toimintaperiaatteen takia luotettavimmat mittaustulokset vesihöyrypitoisuudesta saadaan, kun mittaukset tehdään pimeässä tai hämärässä, jolloin auringonvalosta aiheutuva taustasäteily ei aiheuta epävarmuutta mittaustuloksiin. Kalibrointi olisi siis luotettavinta tehdä pimeän aikaan.



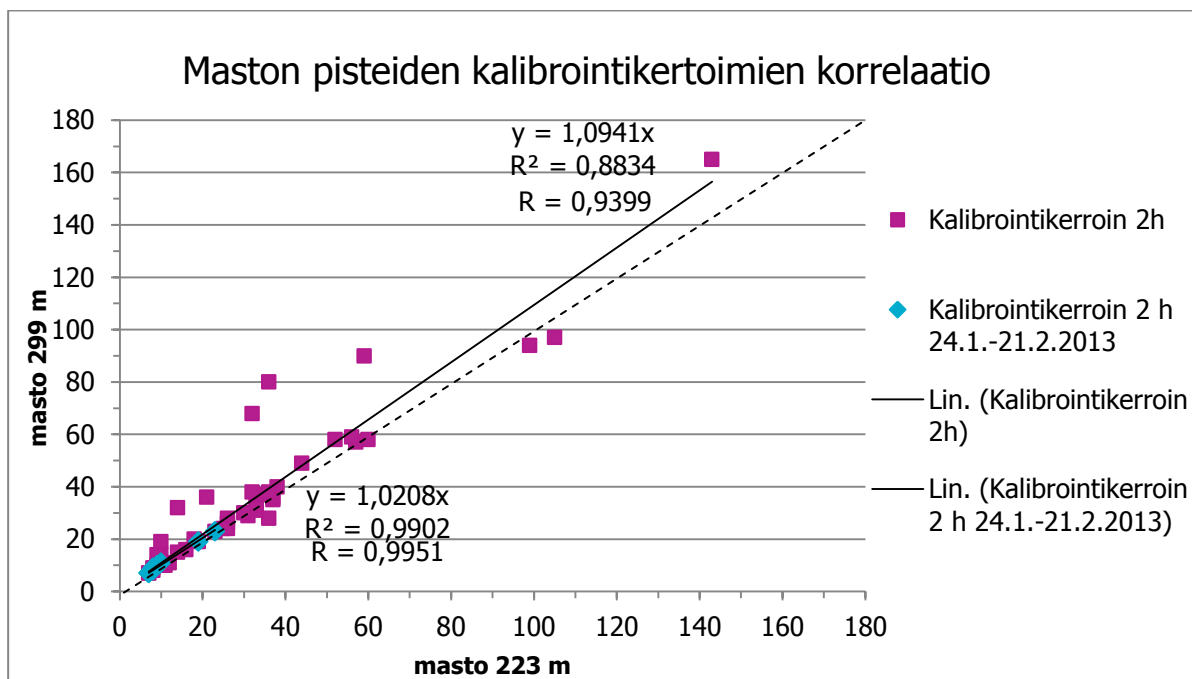
Kuvio 5 Lidar-mittauksen vuorokaudenajan vaikutus kalibrintikertoimeen

7.4 Käytettyjen kalibrintimetodien vertailu

Kalibrintimetodien vaikutusta kalibrintikertoimiin ja metodien välisiä vastaavuuksia tarkasteltiin vertailemalla eri metodeilla määritettyjä kalibrintikertoimia keskenään. Kalibrintikertoimien vastavuus eri metodien välillä kertoo, että lidar-mittausten vesihöyryprofiilin pitoisuudet vastaavat Vehmasmäen maston kosteusmittauspisteiden ja Jyväskylän radioluotausaineiston vesihöyrypitoisuuksia. Mikäli näillä kaikilla metodeilla samalle lidar-mittausaineistolle saadut kalibrintikertoimet vastaavat toisiaan, voidaan kalibrintikerrointa pitää käyttökelpoisena lidar-vesihöyrymittauksen kalibroinnissa.

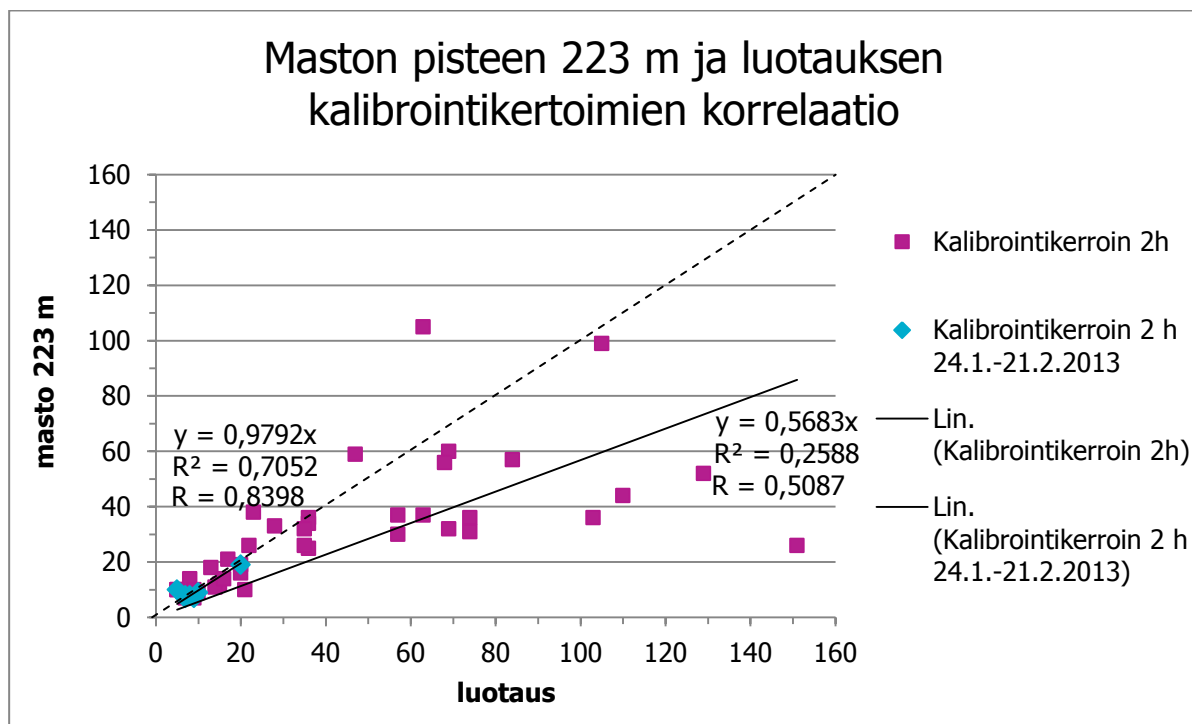
Eri metodeilla saatuja kalibrintikertoimia vertailtiin ja metodien vastaavuutta testattiin asettamalla kaikkia kolmea eri metodia käyttämällä saadut kalibrintikertoimet korrelaatiokuvaajiin (kuviot 6-8). Kuvaajiin on käytetty lidar-mittausten kahden tunnin keskiarvostuksella määritettyjä kalibrintikertoimia. Kuvaajiin on merkitty koko tarkastelujakson kalibrintikertoimet sekä kalibrintikertoimet tarkastelujakson lopusta 24.1.2013 alkaen omana sarjanaan. Mikäli eri metodeilla määritetyt kalibrintikertoimet korreloivat keskenään ja korrelaatiopisteet asettuvat 1:1 suoralle, jolloin korrelaatiopisteille määritetyn lineaarisen trendisuoran korrelaatiokerroin $R=1$, vertailussa olevat metodit vastaavat toisiaan hyvin. Kuvioiden 6–8 kuvaajiin on lisätty pistesarjojen lineaariset trendiviivat sekä piirretty 1:1 suorat katkoviivoin.

Kuviossa 6 on vertailtu maston pisteiden 223 ja 299 m kalibrintikertoimia toisiinsa. Kuvaajasta nähdään, että maston pisteille määritetyt kalibrintikertoimet korreloivat keskenään hyvin. Korrelaatiokerroin koko tarkastelujakson kalibrintikertoimien korrelaatiopisteille määritetyllä lineaarisella suoralla on noin 0,94. Lisäksi kaikki pisteet tarkastelujakson lopusta 24.1.2013 alkaen korreloivat erittäin hyvin. Tässä korrelaatiopisteille määritetyn lineaarisen suoran korrelaatiokerroin on noin 1,0.

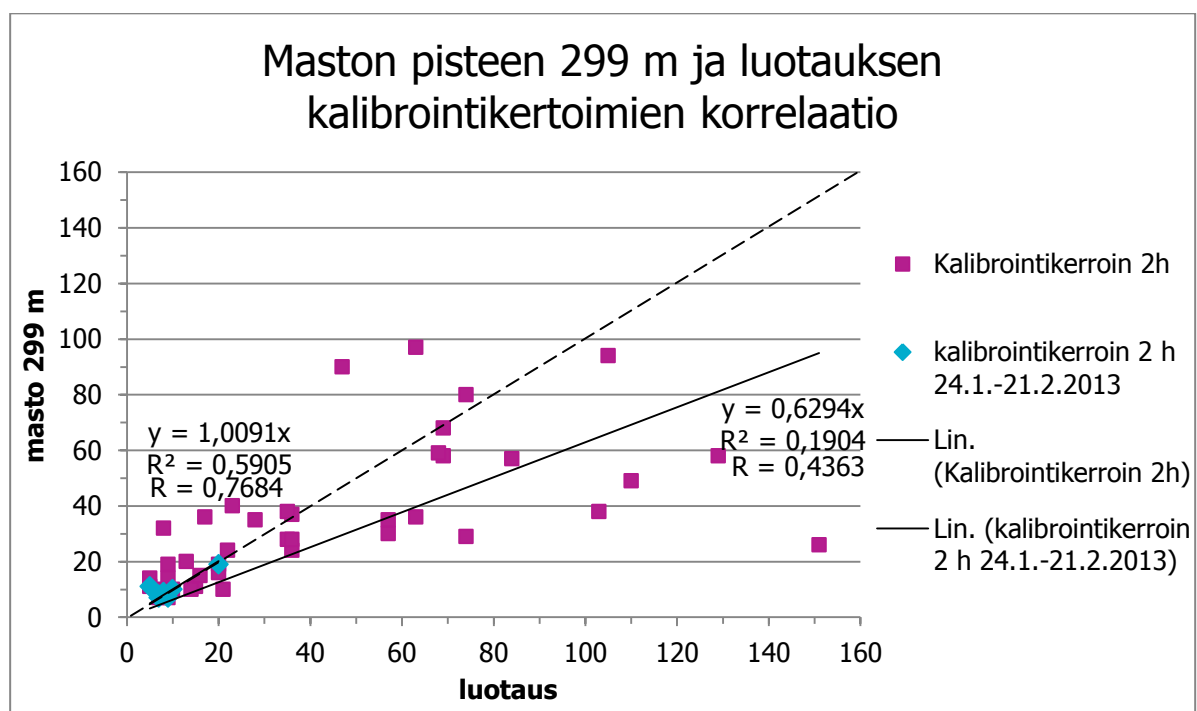


Kuvio 6 Kalibroitimetodien vertailu; metodina maston kosteusmittauspisteet

Kuvioiden 7 ja 8 kuvaajissa on vertailtu maston kosteusmittauspisteitä ja luotausta kalibroitimethodina käyttäen määritettyjä kalibroitikertoimia. Kuvaajista huomataan, että merkittävä osa korrelaatiopisteistä asettuu 1:1 suoralle tai sen läheisyyteen pienemmillä kalibroitikertoimilla. Hajontaa alkaa esiintyä kummassakin tapauksessa, kun kertoimien suuruus on yli 40. Korrelaatiokerroin koko tarkastelujakson aineiston korrelaatiopisteille määritetyllä lineaarisella suoralla on maston pisteen 223 m ja luotauksen välillä noin 0,51 ja maston pistettä 299 m ja luotausta verrattaessa noin 0,44. Metodien välinen korrelaatio näkyy paremmin tarkastelujakson lopun kalibroitikertoimilla, jolloin korrelaatiokerroin R on maston pistettä 223 m ja luotausta verrattaessa noin 0,84 ja maston pistettä 299 m ja luotausta verrattaessa noin 0,77.



Kuvio 7 Kalibroitimetodien vertailu; metodina maston piste 223 m ja radioluotausaineisto



Kuvio 8 Kalibroitimetodien vertailu; metodina maston piste 299 m ja radioluotausaineisto

Kalibroitikertoimien suuruudet vaihtelevat koko tarkastelujaksolla maston pisteellä 223 m välillä 7–143, maston pisteellä 299 m välillä 7–165 ja radioluotausaineistoa käytettäessä välillä 5–151. Tarkastelujakson lopun kalibroitikertoimien suuruus molemmilla maston kosteusmittauspisteillä ovat välillä 7–23 ja luotauksella 5–20.

Kalibrintimetodien vastaavuutta tarkasteltiin laskemalla metodien väliset kalibrintikertoimien erot. Maston kosteusmittauspisteitä vertaillessa kalibrintikertoimien ero vaihtelee koko tarkastelujaksolla välillä 0–44. Luotauksen ja maston pisteiden kalibrintikertoimien suuruutta verrattaessa ero vaihtelee välillä 0–125. Metodien välisiä kalibrintikertoimien reaaliarvoeroja ja metodien vastaavuutta on esitetty taulukoissa 1 ja 2. Keskimääräinen ero koko tarkastelujakson kalibrintikertoimien suuruudessa maston pisteiden välillä on 5,4. Luotauksen ja maston pisteen 223 m kalibrintikertoimien välillä keskimääräinen ero on 17,2 ja maston pisteellä 299 m ja luotauksella keskimääräinen ero on 17,5 (taulukko 1). Tarkasteluvälin loppujaksolla 24.1.–21.2.2013, jolloin mittalaitteeseen tehdyt säädöt eivät vaikuta kalibrintikertoimien suuruuteen tai hajontaan, tämä kalibrintikertoimien suuruuksien ero maston pisteillä on 0–1 ja keskiarvo eroilla on 0,4. Luotauksen ja maston pisteen 223 m kalibrintikertoimien suuruuksien erot vaihtelevat välillä 0-5 ja erojen keskiarvo on 1,4. Luotauksen ja maston pisteen 299 m välillä tämä kertoimien ero on 0–6 ja keskiarvo on 1,6 (taulukko 2).

Kalibrintikertoimien reaaliarvojen eroille asetettiin luokkarajat, joiden avulla tarkasteltiin kalibrintimetodien vastaavuutta ja metodien välistä luotettavuutta metodien vertailukuvaajien 6–8 tilanteissa. Mitä pienempi metodien välinen kalibrintikertoimien ero on, sitä lähempänä korrelaatiopiste on kuvaajan 1:1 suoraa ja sitä paremmin metodit vastaavat toisiaan ja sitä luotettavampi kalibrintikertoimien ero on. Kalibrintikertoimien eron ollessa ≤ 2 metodit vastaavat toisiaan hyvin. Taulukoihin 1 ja 2 on merkitty kuvioiden 6–8 kuvaajien korrelaatiopisteiden lukumäärä eri kalibrintikertoimien eroilla ja näiden pisteiden osuudet kaikista korrelaatiopisteistä. Taulukosta 1 nähdään, että koko tarkastelujaksolla maston pisteiden välillä korrelaatiopisteistä 63,8 % on 1:1 suoralla tai sen välittömässä läheisyydessä. Maston pistettä 223 m ja luotausta verratessa tämä korrelaatiopisteiden osuus on 25,6 % ja maston pisteen 299 m ja luotauksen välillä tämä vastaava pisteiden osuus on 23,3 %. Kalibrintikertoimien erolla 3–5, jolloin korrelaatiopisteet ovat vielä lähellä kuvaajan 1:1 suoraa, maston pisteiden vertailussa korrelaatiopisteiden osuus on 12,8 %, maston pisteen 223 m ja luotauksen vertailussa 25,6 % ja luotauksen ja maston pisteen 299 m vertailussa näiden pisteiden osuus on 14,0 %.

Taulukosta 2, jonka laskennassa on käytetty kalibrintikertoimia tarkastelujakson lopusta, nähdään, että metodit vastaavat erittäin hyvin toisiaan, kun mittalaitteeseen tehdyt säädöt eivät aiheuta hajontaa kalibrintikertoimissa. Tällä tarkastelujakson lopulla maston kosteusmittauspisteitä kalibrintimetodina käyttäen määritettyjen kalibrintikertoimien korrelaatiopisteistä kaikki ovat kalibrintikertoimien pienimmän eron ≤ 2 alueella. Myös maston kumpaakin mittauspistettä ja luotausta verratessa valtaosa eli 85,7 % korrelaatiopisteistä on tällä alueella.

Taulukko 1 Kalibrointikertoimien reaaliarvoerot eri metodien välillä koko tarkastelujaksolla

	Kalibrointi- kertoimien ero	Masto 223 m vs. 299 m	Masto 223 m vs. luotaus	Masto 299 m vs. luotaus
Erojen keskiarvo		5,4	17,2	17,5
Korrelaatiopisteiden lukumäärä	≤ 2	30	11	10
	3-5	6	11	6
	6-15	6	9	13
	≥ 16	5	12	14
	yht.	47	43	43
Korrelaatiopisteiden osuus kaikista pisteistä (%)	≤ 2	63,8	25,6	23,3
	3-5	12,8	25,6	14,0
	6-15	12,8	20,9	30,2
	≥ 16	10,6	27,9	32,6
	yht.	100	100	100

Taulukko 2 Kalibrointikertoimien reaaliarvoerot eri metodien välillä jaksolla 24.1.–21.2.2013

	Kalibrointi- kertoimien ero	Masto 223 m vs. 299 m	Masto 223 m vs. luotaus	Masto 299 m vs. luotaus
Erojen keskiarvo		0,4	1,4	1,6
Korrelaatiopisteiden lukumäärä	≤ 2	8	6	6
	3-5	0	1	0
	6-15	0	0	1
	≥ 16	0	0	0
	yht.	8	7	7
Korrelaatiopisteiden osuus kaikista pisteistä (%)	≤ 2	100,0	85,7	85,7
	3-5	0,0	14,3	0,0
	6-15	0,0	0,0	14,3
	≥ 16	0,0	0,0	0,0
	yht.	100	100	100

Kalibrointikerroin on käytännössä kerroin, jolla lidar-mittauksesta saatavaa vesihöyrypitoisuuden profiilia kerrotaan. Metodivertailussa kalibrointikertoimien reaaliarvoerojen tarkastelu ei ota huomioon kalibrointikertoimien suuruutta. Suhteellinen kalibrointikertoimien välinen ero kertoo paremmin kalibrointimetodien välistä vastaavuutta kuin kalibrointikertoimien reaaliarvojen ero. Tämän vuoksi vertailua tehtiin myös laskemalla kalibrointikertoimille suhteelliset erot eri metodien välillä. Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty kuvioiden 6–8 kuvaajien korrelaatiopisteiden kalibrointikertoimien erot prosenttiosuuksin. Näissä prosenttiosuudet on laskettu vertaamalla kalibrointikertoimien eron suuruutta maston pisteiden kalibrointikertoimien suuruuteen. Tilanteissa, joissa on verrattu maston kosteusmittauspisteitä ja maston pistettä 299 m ja luotausta toisiinsa, on kalibrointikertoimien eroja verrattu maston pisteelle 299 m määritettyihin kalibrointikertoimien arvoihin. Tilanteessa, jossa vertailussa on maston pisteen 223 m ja luotauksen aineiston kalibrointikertoimet, on kalibrointikertoimien erojen suuruuden vertailuarvona käytetty maston pisteen 223 m kalibrointikertoimia.

Myös taulukoista 3 ja 4 huomataan, että maston pisteille määritetyt kalibrointikertoimet vastaavat toisiaan parhaiten. Koko tarkastelujaksolla maston pisteillä kalibrointikertoimien eron keskiarvo on 12,4 %. Maston pistettä 223 m ja luotausta verrattaessa kertoimien eron keskiarvo on 54,5 % ja maston pistettä 299 m verrattaessa luotaukseen keskimääräinen ero on 54,1 %. Metodien välistä kalibrointikertoimien eroa tässä tarkastelussa esiintyvillä kertoimien suuruuksilla voidaan pitää vielä luotettavalla tasolla, kun kertoimien välinen ero on ≤ 20 %. Maston pisteitä verrattaessa toisiinsa 80,9 % korrelaatiopisteistä on tällä alueella. Maston pistettä 223 m ja luotausta vertaillaessa 37,2 % korrelaatiopisteistä on tällä alueella ja maston pisteen 299 m ja luotauksen välillä tällä alueella korrelaatiopisteistä on 34,9 %.

Taulukko 3 Kalibrointikertoimien erot metodien välillä koko tarkastelujaksolla

	Masto 223 m vs. 299 m	Masto 223 m vs. luotaus	Masto 299 m vs. luotaus
Korrelaatiopisteiden lkm	47	43	43
Kalibrointikertoimien eron keskiarvo (%)	12,4	54,5	54,1
Pisteet, joilla ero ≤ 50 %	44	32	29
Pisteet, joilla ero ≤ 20 %	38	16	15
Pisteet, joilla ero ≤ 10 %	33	9	9
Pisteiden osuus, joilla ero ≤ 50 % (%)	93,6	74,4	67,4
Pisteiden osuus, joilla ero ≤ 20 % (%)	80,9	37,2	34,9
Pisteiden osuus, joilla ero ≤ 10 % (%)	70,2	20,9	20,9

Taulukkoon 4 on koottu tarkastelujakson lopun kalibrointikertoimien ja -metodien väliset erot taulukkoa 3 vastaavalla tavalla. Kaikilla metodivertailuilla korrelaatiopisteiden osuus on suurempi 50, 20 ja 10 %:n kalibrointikertoimien eroilla kuin koko tarkastelujaksolla, jossa mittalaitteen säädöt vaikuttaa merkittävästi kertoimien hajontaan. Maston pisteiden vertailussa kaikilla korrelaatiopisteillä kalibrointikertoimien välinen suhteellinen ero on ≤ 20 %. Maston kosteusmittauspisteitä käyttämällä saatuja kalibrointikertoimia vertaillaessa luotausaineistoa käyttämällä määritettyihin kalibrointikertoimiin korrelaatiopisteistä 71,4 % on korkeintaan 20 %:n kalibrointikertoimien erolla, kun koko tarkastelua-aineistossa tämä osuus on 34,9 %.

Taulukko 4 Kalibrointikertoimien erot metodien välillä 24.1.–21.2.2013

	Masto 223 m vs. 299 m	Masto 223 m vs. luotaus	Masto 299 m vs. luotaus
Korrelaatiopisteiden lkm	8	7	7
Kalibrointikertoimien eron keskiarvo (%)	3,8	15,3	16,0
Pisteet, joilla ero 50 % tai alle	8	7	6
Pisteet, joilla ero 20 % tai alle	8	5	5
Pisteet, joilla ero 10 % tai alle	7	3	3
Pisteiden osuus, joilla ero ≤ 50 % (%)	100,0	100,0	85,7
Pisteiden osuus, joilla ero ≤ 20 % (%)	100,0	71,4	71,4
Pisteiden osuus, joilla ero ≤ 10 % (%)	87,5	42,9	42,9

Tämän tarkasteluaineiston perusteella näiden kolmen kalibrintimetodin välillä kalibrintikertoimissa on havaittavissa yhtäläisyyksiä. Vaikka Jyväskylän radioluotaukset ovat noin 100 km:n etäisyydellä Vehmasmäen mittausasemasta ja lidar-mittalaitteesta, on kalibrintikertoimissa kuitenkin havaittavissa yhtäläisyyksiä maston kosteusmittauspisteiden ja radioluotausaineiston välillä. Tarkastelujakson lopussa, jossa mittalaitteen säädöt eivät aiheuta hajontaa kalibrintikertoimissa kalibrintiker-toimet ja -menetelmät vastaavat toisiaan paremmin kuin koko tarkastelujaksolla. Kalibrintikertoimet on määritetty jokaiselle metodille kokonaislukuna, mikä voi myös aiheuttaa pientä hajontaa kertoimissa ja eroja metodien välillä. Näitä kolmea kalibrintimetodia voidaan pienellä varauksella pitää käyttökelpoisina metodeina lidar-mittalaitteen vesihöyrykalibroinnissa etenkin kun huomioidaan kaikki kalibroinnin luotettavuuteen ja kalibrintikertoimeen vaikuttavat seikat. Näin ollen voi olla mahdollista löytää luotettava kalibrintikerroin näille metodeille.

7.5 Lidar-mittausten vesihöyrykalibroinnin luotettavuus; metodina Jyväskylän radioluotausaineisto

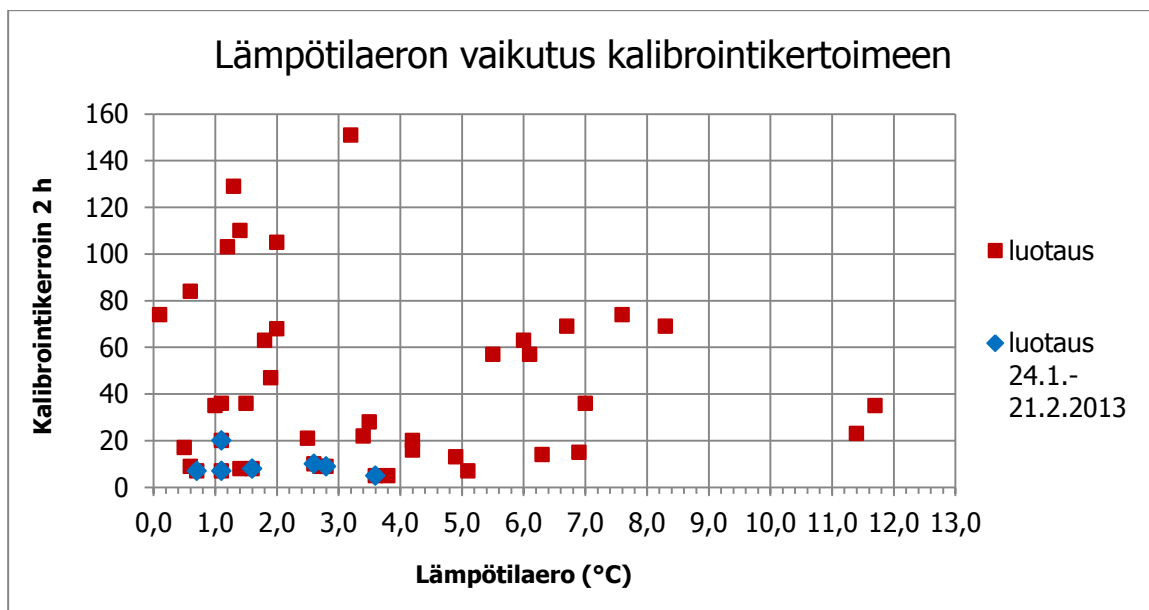
Radioluotauksen aineistoon kalibroidessa kalibrintikertoimeen ja sen luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat luotauksen 100 km:n etäisyys ja sen tuoma paikallisten maanpintasääoloerojen vaihtelu Jyväskylän ja Kuopion välillä. Myös tarkasteltava korkeus vaikuttaa kalibrintikertoimeen, mikä on taas kytköksissä maanpintasääoloihin ja niiden eroavaisuuteen. Lisäksi lidar-mittauksen ajankohdalla on vaikutusta siihen, kuinka luotettavasti kalibrointi voidaan tehdä. Jyväskylän radioluotaukset tehdään kahdesti päivässä aamulla klo 6 ja iltapäivällä klo 18. Mitä lähempänä tehtyä radioluotausaineistoa lidar-mittauksen aineisto on, sitä luotettavammin kalibrointi onnistuu.

7.5.1 Sääerojen vaikutus kalibroinnin luotettavuuteen

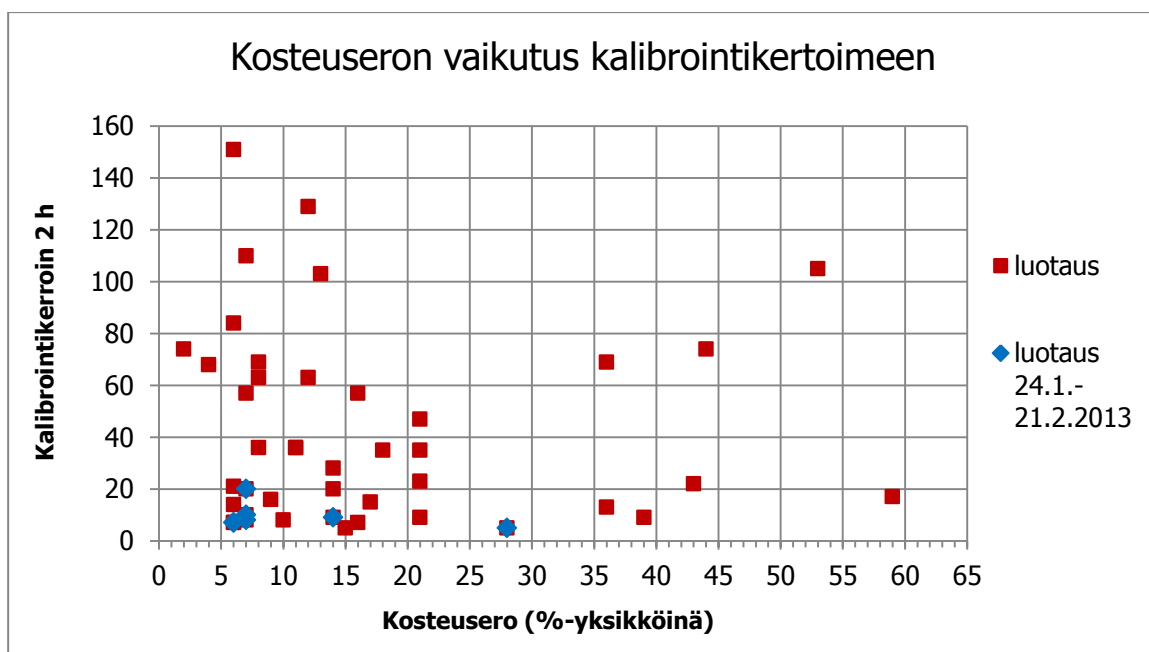
Paikalliset sääoloerot Kuopion ja Jyväskylän välillä on merkittävin seikka, joka tuo epävarmuutta kalibrointiin käytettäessä radioluotausaineistoa kalibrintimetodin. Tämän työssä käytetyn koko tarkasteluaineiston perusteella on vaikeaa luotettavasti sanoa sääoloerojen vaikutusta kalibrintikertoimeen, sillä hajontaa ja epäluotettavuutta kalibrintikertoimiin aiheutuu myös tarkastelujakson aikana Polly^{XT}-mittalaitteeseen tehdyistä vesihöyrykanavan säädöistä ja asetusten muutoksista. Mittausaineistojen vertailussa havaittiin, että kalibrintikertoimien suuruuteen tulee enemmän hajontaa sääoloerojen eroavaisuuksien kasvaessa matalammilla korkeuksilla. Mitä suuremmat sääoloerot Kuopion ja Jyväskylän välillä on, sitä epäluotettavammin kerroin muuttuu. Sääparametrien erot ovat suurimpia maanpinnan lähellä. Korkeammalla sääparametrien erot ovat pienemmät ja niiden vaikutus pienenee ylöspäin mentäessä. Tässä tarkastelussa kalibrintikertoimet on määritetty aina mahdollisimman alhaalta, mutta sellaiselta korkeudelta, jossa radioluotauksen ja lidar-profiilin vesihöyrypitoisuudet vastaavat toisiaan parhaiten.

Maanpintasääoloerojen vaikutusta kalibrintikertoimeen tarkasteltiin korrelaatiokuvaajilla, joihin asetettiin keskeisimpien säähavaintoparametrien erot Jyväskylän ja Kuopion välillä sekä kalibrintikertoimet. Seuraavissa kuvaajissa on ilman lämpötila-, kosteus- sekä painearvojen erot x-akselilla ja y-akselilla luotausaineistoa vastaan määritetyt kalibrintikertoimet (kuviot 9–11). Kuva-

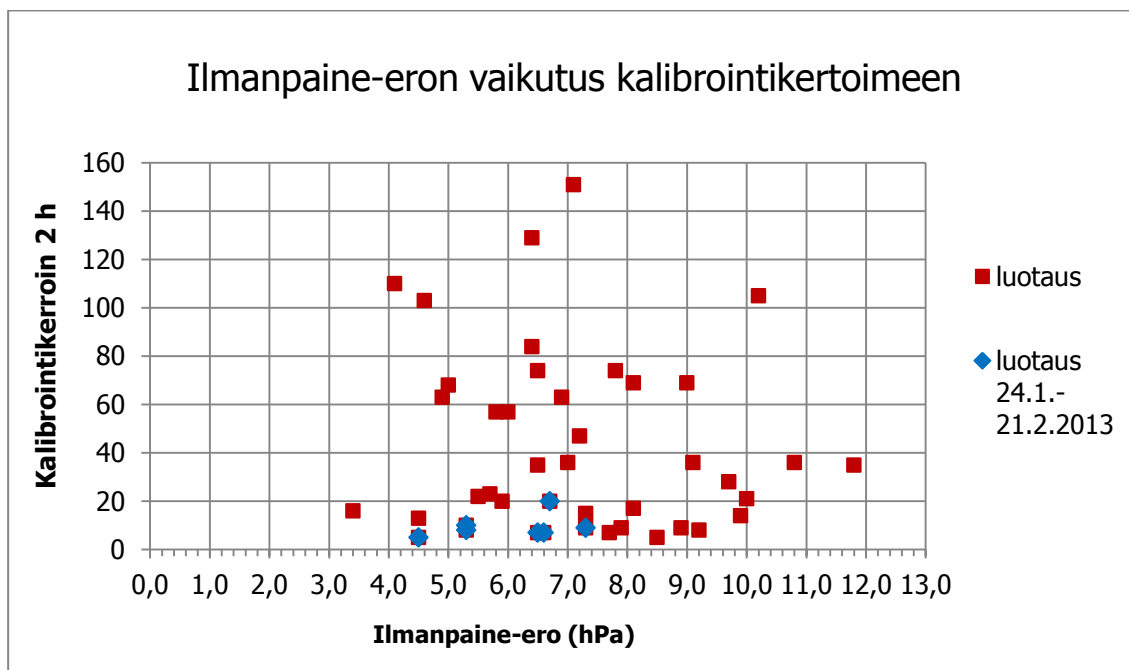
jiin on merkitty korrelaatiopisteet sekä koko tarkastelujaksolta että tarkastelujakson lopusta 24.1.2013 alkaen omana sarjanaan. Koko tarkastelujaksolla lämpötilaero vaihtelee välillä 0,1–11,7 °C (kuvio 9), ilman suhteellinen kosteusero välillä 2–59 %-yksikköä (kuvio 10) ja ilmanpaine-ero välillä 3,4–11,8 hPa (kuvio 11). Tarkastelujakson hyvän loppujakson 24.1.–21.2.2013 kalibrointikertoimilla, jossa mittalaitteen säädöt eivät vaikuta kalibrointikertoimen suuruuteen, lämpötilaero Kuopion ja Jyväskylän välillä on välillä 0,7–3,6 °C, kosteusero 6–28 %-yksikköä ja ilmanpaine-ero 4,5–7,3 hPa. Sääarvojen erot ovat siis keskimäärin pienempiä tarkastelujakson lopussa, jolloin kalibrointikertoimet ovat luotettavimpia tällä tarkasteluaineistolla.



Kuvio 9 Lämpötilaeron vaikutus kalibrointikertoimen luotettavuuteen



Kuvio 10 Kosteuseron vaikutus kalibrointikertoimen luotettavuuteen



Kuvio 11 Ilmanpaine-eron vaikutus kalibroitikertoimen luotettavuuteen

Kalibroitikertoimen luotettavuutta ei voida arvioida yksittäisen säähavaintoparametrin perusteella, vaan siihen vaikuttaa säätila kokonaisuudessaan. Kalibroitaessa lidar-mittauksen vesihöyryprofiili Jyväskylän radioluotausaineistoon, on säätilaa tarkasteltava sekä Jyväskylässä että Kuopiossa. Taulukossa 2 on Kuopion ja Jyväskylän väliset maanpintasäähavaintoarvojen erot, jotka esiintyvät tämän tarkasteluaineiston luotettavimmilla kalibroitikertoimilla. Kuopion Vehmasmäen mittausaseman maanpintasääarvot on poimittava aina lidar-mittaushetkeltä ja Jyväskylän maanpintasääarvot radioluotauksen laukaisuhetkeltä. Tämä takaa sen, että säähavaintoarvot kuvastavat molempien mittausaineistojen ajankohdan säätilaa.

Taulukko 5 Tarkastelun maanpintasääarvojen max. erot Jyväskylän ja Kuopion välillä tarkastelun luotettavimmilla kalibroitikertoimilla

	Maanpintasääarvoero Kuopio–Jyväskylä
Lämpötila (°C)	3,6
Suhteellinen kosteus (%-yks.)	28
Ilmanpaine (hPa)	7,3

7.5.2 Kalibroitikorkeuden vaikutus

Vuorokaudenaika, jolloin lidar-mittaus on tapahtunut, vaikuttaa mittausjakson keskiarvona esitettyyn lidar-mittauksen vesihöyrypitoisuuden profiiliin siten, että päiväsaikaan auringonvalon aiheuttama taustasäteily aiheuttaa vesihöyrypitoisuuden kuvaajaan mittauskohinaa. Havaitun takaisinsironneen valon signaalin voimakkuuden suuruus alkaa vaihdella suuremmilla korkeuksilla ja aiheuttaa mittauskohinaa vesihöyrypitoisuuden profiiliin. Tästä syystä kalibrointi on luotettavinta tehdä sellaiselta korkeudelta, jossa suurta mittauskohinaa ei ole.

Tarkastelussa kalibrintikertoimia määritettäessä Labview-ohjelmalla havaittiin, että kalibrintiker-
toimiin tulee enemmän hajontaa matalammilla korkeuksilla, mikä kertoo kalibrintikertoimen ja ka-
libroinnin epävarmuudesta kalibroitaessa liian lähellä maan pintaa. Tämä johtuu radioluotausten
suuresta etäisyydestä. Tarkastelujakson loppupään kalibrintikertoimet on määritetty korkeuksille,
jotka ovat keskimäärin korkeudelta 800–1 800 m eli suhteellisen matalalta verrattuna koko tarkaste-
lujaksoon. Koko aineistolla tarkasteluvälien korkeus, joille kalibrintikerroin on varmistettu, ovat kes-
kimäärin korkeudelta 1 700–2 500 m. Tarkastelujakson lopussa myös erot säätilassa Jyväskylän ja
Kuopion välillä ovat olleet pienempiä verrattaessa koko tarkastelujaksoon. Kalibrointi voidaan siis
tehdä sitä matalammalta korkeudelta, mitä paremmin sääolosuhteet vastaavat toisiaan. Tällä tarkas-
teluaineistolla Jyväskylän ja Kuopion sääoloissa on aina hieman eroavaisuuksia, mikä aiheuttaa ra-
dioluotauksen ja lidar-mittausaineiston vesihöyryprofiileihin poikkeavuutta lähellä maan pintaa. Luo-
tettavimmin kalibrointi tehdään sellaiselta korkeudelta, jossa paikalliset sääolosuhteet eivät aiheuta
poikkeavuutta lidar-mittauksen ja radioluotauksen vesihöyrypitoisuuden profiileissa.

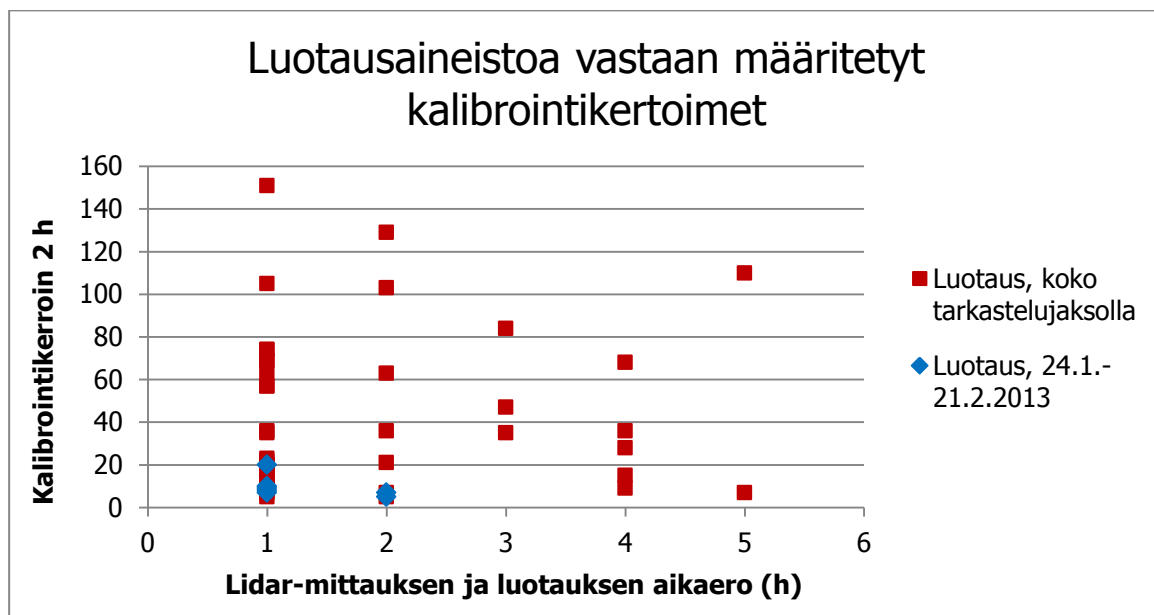
7.5.3 Mittausaineistojen aikaeron vaikutus

Lidar-mittalaite kalibroidaan tavallisesti lähettämällä radioluotauspallo mittalaitteen viereltä. Radio-
luotausaineiston perusteella lidar-mittalaitteen vesihöyryprofiilille määritetään kalibrintikerroin Lab-
view-ohjelmalla käyttäen saman mittauspaikan ja saman ajankohdan lidar-mittauksen ja radioluota-
uksen aineistoja. Lidar-mittauksen ajankohta ja siitä aiheutuva aikaero lidar-mittauksen ja radioluota-
uksen välillä vaikuttaa kalibroinnin ja kalibrintikertoimen luotettavuuteen. Kalibrointi voidaan teh-
dä sitä luotettavimmin mitä lähempää ajallisesti kalibrointiin käytettävä radioluotauksen aineisto on
lidar-mittauksesta. Tässä tarkastelussa verrattavaksi radioluotausaineistoksi, johon lidar-mittalaite
kalibroidiin Labview-ohjelmalla, valittiin jokaisen lidar-mittausaineiston kohdalla ajallisesti lähin radio-
luotauksen aineisto. Lidar-mittauksen ajankohdaksi määritettiin aina kahden tunnin mittausjakson
puoliväli.

Kuvion 12 kuvaajassa on näkyvillä kaikki määritetyt kalibrintikertoimet sekä aikaerot lidar-
mittauksen ja luotauksen välillä. Aikaerot luotausaineistojen ja lidar-mittausaineistojen välillä vaihte-
lee yhdestä viiteen tuntiin. Koko tarkastelujakson kalibrintikertoimissa esiintyy hajontaa myös yh-
den tunnin aikaerolla, mikä selittyy myös tässä lidar-mittalaitteeseen tehdyillä asetusten säädöillä.
Tarkastelujakson lopun kalibrintikertoimien aikaero lidar-mittauksen ja luotauksen välillä on yhdes-
tä kahteen tuntia. Luotettavan kalibroinnin takaamiseksi kannattaa siis käyttää mahdollisimman lä-
hellä radioluotauksen ajankohtaa olevia lidar-mittausaineistoja.

Aiemmin sääoloja tarkastellessa mainittiin, että kalibrointi kannattaa tehdä silloin, kun sääolot Kuo-
piossa ja Jyväskylässä vastaavat toisiaan mahdollisimman hyvin. Säärintaman edetessä on mahdol-
lista, että rintama liikkuu Kuopiosta Jyväskylään tai päinvastoin, jolloin samat sääolosuhteet vallitse-
vat Kuopiossa ja Jyväskylässä eri vuorokauden aikana. Tällöin mittausajankohdat lidar-
mittausaineistolla ja luotauksella voivat poiketa toisistaan useita tunteja. Radioluotaukset tehdään
Jyväskylässä päivittäin klo 6 ja klo 18. Pelkkää mittausten aikaeroa tarkastellessa kalibrointi kannat-
taa tehdä lidar-mittausaineistoilla, jotka ovat väliiltä 04:00–08:00 ja 16:00–20:00, kun kalibroinnissa

käytetään kahden tunnin lidar-mittausjaksoa ja mittausajankohta on kahden tunnin mittausjakson puoliväli.



Kuvio 12 Määritetyt kalibrointikertoimet ajallisesti lähimmillä radioluotauksen aineistoilla

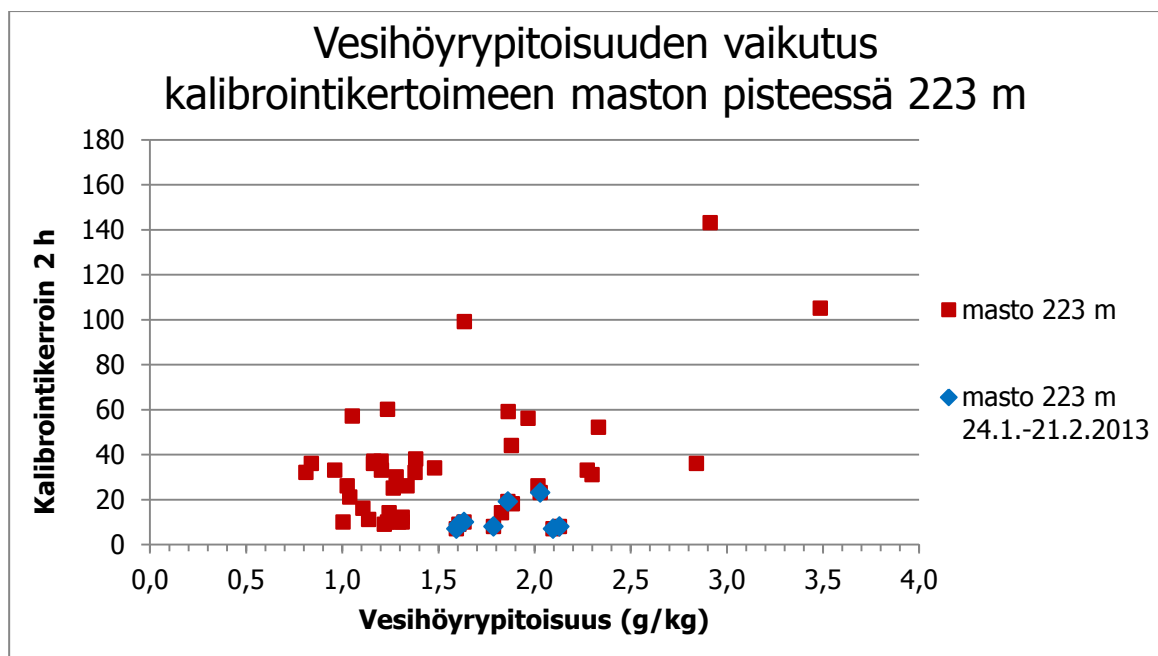
7.5.4 Korkoero Jyväskylän havaintoaseman ja Kuopion mittausaseman välillä

Jyväskylän havaintoasema ja Kuopion Vehmasmäen mittausasema ovat noin 100 km:n etäisyydellä toisistaan. Tämän välimatkan lisäksi näillä asemilla on myös korkeuseroa. Jyväskylän havaintoasema sijaitsee 139 m:n korkeudella merenpinnan tasosta ja Kuopion Vehmasmäen mittausaseman korko on 190 m merenpinnan tasosta. Korkeuseroa asemien välillä on 51 m. Tämä korkeusero on hyvin pieni ilmakehän kerroksia ja niissä tapahtuvia vesihöyrypitoisuuksien muutoksia ajatellen. Tämän perusteella tällä korkeuserolla ei oleteta olevan merkittävää vaikutusta lidar-mittalaitteen vesihöyrykalibroinnin luotettavuuteen käytettäessä radioluotausaineistoja kalibrointimetodina.

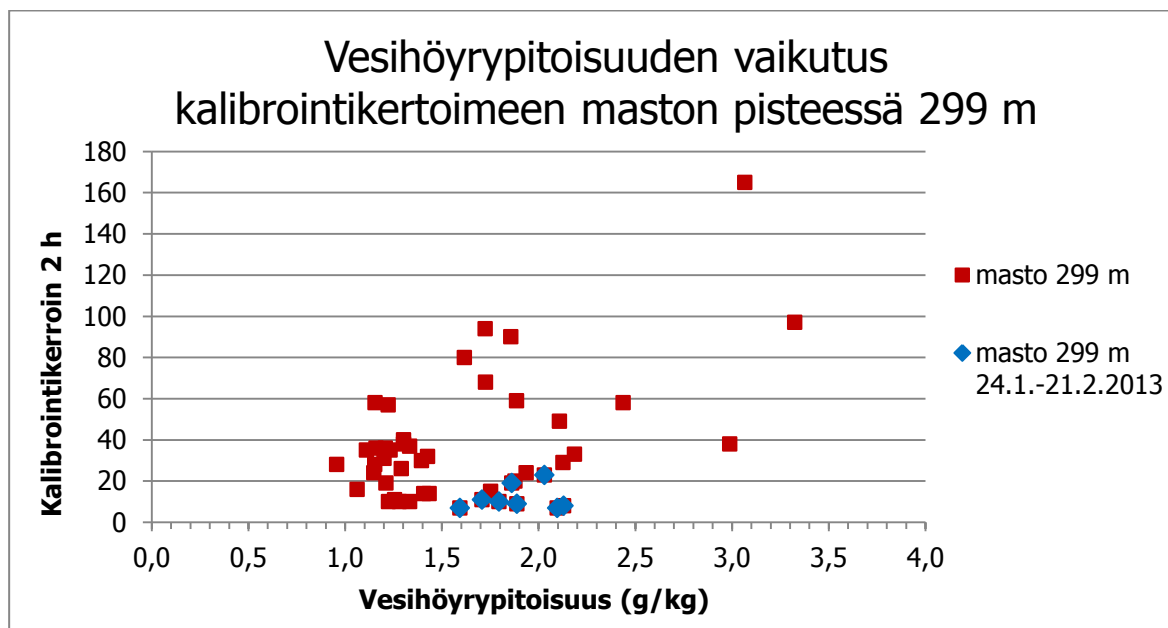
7.6 Lidar-mittausten vesihöyrykalibroinnin luotettavuus; metodina maston kosteusmittauspisteet

Maston ilman kosteuden mittauspisteitä käytettäessä kalibrointimetodina kalibroinnin luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä on vähemmän kuin radioluotauksen tarkasteltaessa. Mahdollisena kalibroinnin luotettavuuteen vaikuttavana tekijänä on lidar-mittalaitteen vesihöyrypitoisuuden ja maston mittauspisteiden suhteellisen ilmankosteuden mittaustarkkuuksien ero. Lisäksi mahdollista virhettä maston vesihöyrypitoisuuden arvoihin aiheuttaa ilmankosteussuureen muunnoskaava. Vesihöyrypitoisuuden kaavassa (kaava 4) kylläisen vesihöyryn paineen kaava on approksimaatio, jossa virhemarginaali on 0,09 %. Tässä ilman suhteellisen kosteuden muunnoksessa vesihöyrypitoisuudeksi mahdollista virhettä voi aiheuttaa myös se, että muunnoksessa on käytetty Savilahden säähavaintoaseman maanpintahavaintojen ilmanpaineen arvoja, joita ei ole saatavilla Vehmasmäen mittausasemalta.

Kuopion Vehmasmäen mittausaseman maston HMP35-kosteusanturit ovat Vaisala Oyj:n valmistamia laitteita. Kosteusantureita ei kalibroida mastoasemalla erikseen, vaan Ilmatieteen laitos vaihtaa uudet kalibroidut anturit vioittuneiden tilalle. Säähavaintoaineistosta saatava ilman suhteellisen kosteuden aineisto koostuu 10 min välein kerätyistä hetkellishavainnoista, jotka ovat päivittäin tarkkailussa. Mittalaitteen ja anturin kuntoa seurataan mittausdataa tarkkailemalla. Mastossa olevat mittalaitteet on uusittu vuonna 2009. Vaisalan ilmoittama kosteusantureiden suhteellisen kosteuden mittausalue on 0...100 %. Kosteusantureiden mittaustarkkuus on ± 2 % RH mittausalueella 0...90 % RH ja ± 3 % RH mittausalueella 90...100 %. Suuremmilla kosteuspitoisuuksilla anturin mittaustarkkuus siis huononee, mikä voi aiheuttaa epäluotettavuutta kalibrointikertoimissa. Tällöin suuremmilla vesihöyrypitoisuuksilla maston pisteiden ja lidar-mittalaitteen vesihöyrypitoisuudet saattavat poiketa toisistaan, jolloin kalibrointikerroin muuttuu ja hajonta kertoimissa kasvaa. Kuvioiden 13 ja 14 kuvaajiin on asetettu maston kosteusmittauspisteille lasketut vesihöyrypitoisuudet x-akselille ja tarkasteluun valituille lidar-profiileille määritetyt kalibrointikertoimet y-akselille. Tarkastelujakson lopun kalibrointikertoimet, jossa mittalaitteeseen tehdyt säädöt eivät vaikuta kalibrointikertoimen muutokseen, on lisätty kuvaajiin omana sarjanaan. Tarkastelujakson lopun pisteistä on havaittavissa, että kalibrointikerroin muuttuu ja pientä hajontaa kertoimissa esiintyy suuremmilla kosteuspitoisuuksilla. Tämän lyhyen tarkastelun loppujakson perusteella on kuitenkin vaikeaa luotettavasti sanoa mittaustarkkuuksien eron vaikutusta. Mahdollisesti mittaustarkkuuksien eron vaikutus näkyisi paremmin vielä suuremmilla vesihöyrypitoisuuksilla, joita tässä tarkastelussa ei esiinny. Tämä vesihöyrypitoisuuksien mittaustarkkuuksien eron vaikutus voidaan varmentaa laajemmalla data-aineistolla, jossa lidar-mittalaitteeseen ei ole tehty säätöjä tarkastelujakson aikana.



Kuvio 13 Vesihöyrypitoisuuden vaikutus kalibrointikertoimen luotettavuuteen maston pisteessä 223 m



Kuvio 14 Vesihöyrypitoisuuden vaikutus kalibrintikertoimen luotettavuuteen maston pisteessä 299 m

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli testata, voidaanko Ilmatieteen laitoksella käyttöön otetun lidar-mittalaitteen vesihöyrypitoisuuden mittausta kalibroida käyttäen kalibrintimetodina Vehmasmäen mittausaseman säähavaintomaston kahta ilman kosteusmittauspistettä korkeuksilta 223 ja 299 m tai Jyväskylässä tehtävien radioluotausten vesihöyrypitoisuuden aineistoja. Tämän tarkastelussa käytetty aineiston perusteella lidar-vesihöyrypitoisuusmittaus on pienellä varauksella mahdollista kalibroida käyttämällä näitä metodeja.

Työssä tarkastelusta teki haasteellista mittalaitteeseen tehdyt säädöt, joilla on suurin vaikutus määritettyjen kalibrintikertoimien suuruuteen ja luotettavuuteen. Kalibrintimetodien käyttökelpoisuutta pystyttiin kuitenkin arvioimaan ja vertailemaan metodeja keskenään näistä lidar-mittalaitteeseen tehdyistä asetusten säädöistä huolimatta. Parhaiten kalibrintikertoimien vertailussa toisiaan vastasivat maston kosteusmittauspisteet, mutta yhtäläisyyksiä kalibrintikertoimissa löytyy myös maston kosteusmittauspisteiden ja luotausaineiston väliltä. Suurella todennäköisyydellä kalibrintikerroin on luotettava käytettäväksi, mikäli maston kosteusmittauspisteille ja luotausaineistolle määritetty kerroin on sama. Luotettavimman metodin ja luotettavan kalibrintikertoimen määrittämiseksi olisi kuitenkin tehtävä enemmän tutkimuksia ja laajemmalla mittausaineistolla niin, ettei lidar-mittalaitetta säädettäisi tarkastelujakson aikana.

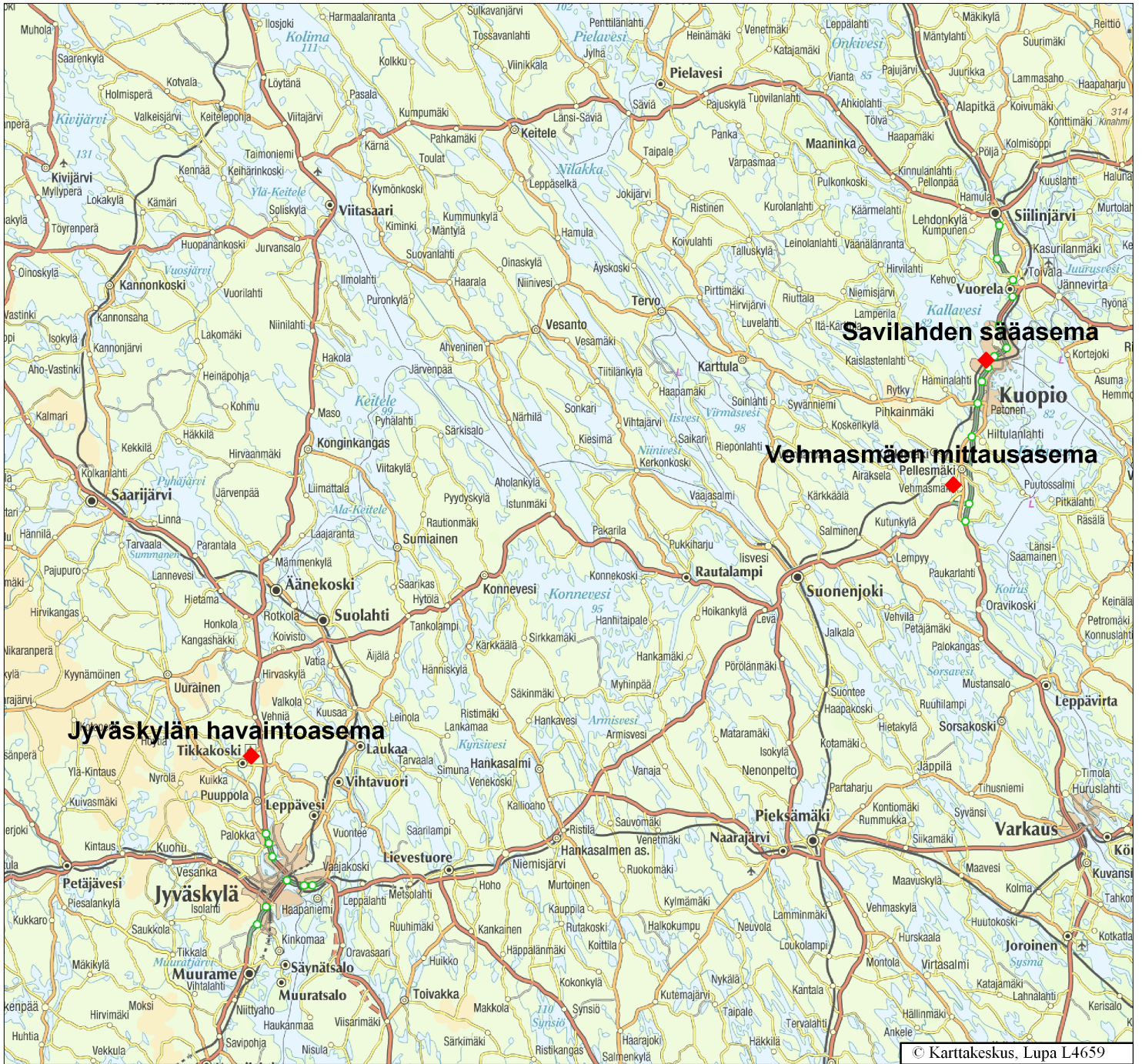
Keskeisimpinä huomioina tuloksista voidaan sanoa, että kalibrointi pitää ja kannattaa tehdä aina jokaisen lidar-mittalaitteeseen tehdyn säädön jälkeen, jolloin kalibrintikertoimen suuruusluokka voi muuttua huomattavasti. Tämän tarkastelun perusteella lidar-mittauksen datajakson pituudella ei ole vaikutusta kalibrintikertoimeen, mutta kalibroinnissa kannattaa ja olisi hyvä kuitenkin käyttää aina kahden tunnin datajaksoa standardina. Kalibroinnin luotettavuutta ajatellen kalibrointi olisi hyvä tehdä aina pimeään aikaan, jolloin lidar-mittauksista saadaan luotettavimmat mittaustulokset. Radioluotausaineistoa käytettäessä kalibrointi tehdään luotettavimmin, kun kalibrintiajankohta valitaan mahdollisimman läheltä luotauspallon laukaisuhetkeä. Radioluotaukseen kalibroidessa kalibrintikorkeus riippuu sääoloeroista Jyväskylän ja Kuopion välillä. Tässä tarkastelussa käytetyllä aineistolla kalibrointi on tehty keskimäärin 1 660 m:n yläpuolelta ja vertailuväli, jolle kalibrintikerroin on varmistettu on noin 1 000 m. Pienimmillä sääarvojen eroilla kalibrointi on voitu tehdä jo noin 100 m:n yläpuolelta. Taulukon 5 maanpintasääerojen arvoja voidaan käyttää raja-arvoina sääparametrien eroille Jyväskylän ja Kuopion välillä kalibrointiin käytettävän hyvän säätilan arvioimiseksi. Näitä raja-arvoja voidaan tarkentaa, kun jatkotutkimuksien tarkastelussa käytettävää dataa on enemmän. Jyväskylän ja Kuopion maanpintasäähavaintojen vertailussa luotettavuutta lisäisi, jos Vehmasmäen mittausasemalta olisi saatavilla kaikki vertailtavat säähavaintoparametrit ja samalta korkeudelta kuin Jyväskylän havaintoasemalla. Tällöin säähavainnot vastaisivat paremmin todellista Vehmasmäen mittausaseman maanpintasäätilaa. Lisäksi kalibroinnin luotettavuutta lisäisi, jos Vehmasmäen mittausasemalta tai säähavaintomastosta olisi saatavilla ilmanpaineen arvot käytettäväksi suhteellisen kosteuden muunnoksessa vesihöyrypitoisuudeksi.

Luotettavan kalibroitikertoimen löytämiseksi lidar-mittalaitteella olisi tehtävä enemmän mittauksia siten, että laitetta ei säädettäisi tarkastelujakson aikana. Tällöin mahdollisia kalibroitikertoimen luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä olisi helpompi tarkastella ja arvioida niiden vaikutusta. Varminta kalibrointi sekä näiden käytettyjen metodien verifiointi olisi tehdä luotaamalla lidar-mittalaitteen viereltä. Vehmasmäen mittausasemalla tehtävien kalibroitiluotausten pohjalta voitaisiin tutkia metodien luotettavuutta vertailemalla maston kosteusmittauspisteille ja Jyväskylän radioluotausaineistoille määritettyjä kalibroitikertoimia kalibroitiluotausten kertoimiin.

Tämä opinnäytetyö oli Ilmatieteen laitoksen Kuopion yksikössä ensimmäinen testaus, jonka perusteella arvioitiin näiden kahden kalibroitimetodin käyttökelpoisuutta lidar-mittausten vesihöyrykalibroinnissa. Tätä opinnäytetyötä tullaan käyttämään Ilmatieteen laitoksella hyväksi lidar-mittausten vesihöyrykalibroinnin tutkimuksessa parhaimman ja luotettavimman kalibroitimetodin löytämiseksi.

LÄHTEET

- Althausen, D., Engelmann, R., Baars, H., Heese, B., Ansmann, A., Müller, D. & Komppula, M. 2009. *Portable Raman Lidar Polly^{XT} for Automated Profiling of Aerosol Backscatter, Extinction, and Depolarization*. [verkkojulkaisu] Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. Boston: American Meteorological Society. [viitattu 7.3.2013] Saatavissa: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2009JTECHA1304.1>
- Engelmann, R., Althausen, D., Heese, B., Baars, H., Komppula, M. 2012. *Recent Upgrades of The Multiwavelength Polarization Raman Lidar Polly^{XT}*. Proceedings of the International Laser Radar Conference, Porto Heli, Greece.
- Ilmatieteen laitoksen ilmastotietokanta [viitattu 15.4.2013]
- Ilmatieteen laitos. Ilmatieteen laitos [viitattu 19.2.2013] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/>
- Ilmatieteen laitos. Teematietoa. Ilmakehä-ABC [viitattu 19.2.2013] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/>
- Ilmatieteen laitos. Teematietoa. Tekniikka ja menetelmät. Säähavainnot [viitattu 3.4.2013] Saatavissa: <http://www.ilmatieteenlaitos.fi/>
- Ilmatieteen laitos. Tutkimustoiminta. Kuopion yksikkö [viitattu 19.2.2013] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/>
- Järvinen, J., Eerola, S. & Kaukonen, M. 2008. *Metrologiasta lyhyesti*. 4. painos. [verkkojulkaisu]. Mitätetekniikan keskus. Espoo. [viitattu 19.2.2013] Saatavissa: http://www.mikes.fi/documents/upload/metrologiasta_lyhyesti_nettiin.pdf
- Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E. & Manner, O. 2008. *Ilmakehä, sää ja ilmasto*. Helsinki: Tähtitieteellinen yhdistys Ursa ry.
- Leibniz Institute for Tropospheric Research. Worldwide observations with the portable Raman lidar systems. Kuopio. PollyXT_FMI. Help [viitattu 26.2.2013] Saatavissa: <http://polly.tropos.de/lidar/>
- Puhakka, T. 1996. *Dynamiikka I. Ilmakehän termodynamiikka*. Helsinki: Helsingin yliopisto, meteorologian laitos.
- Vaisala Oyj. 2013. *Humidity conversion formulas. Calculation formulas for humidity*. [verkkojulkaisu]. Helsinki. [viitattu 19.2.2013] Saatavissa: http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/Humidity_Conversion_Formulas_B210973EN-E.pdf
- Vaisala Oyj. *Humidity, dewpoint, carbon dioxide, barometers, meteorology*. Laittekuvasto [verkkojulkaisu] [viitattu 15.4.2013] Saatavissa: http://www.iprocessmart.com/vaisala_pdf/catalog%2099.pdf
- Weitekamp, C. 2005. *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Singapore: Springer.

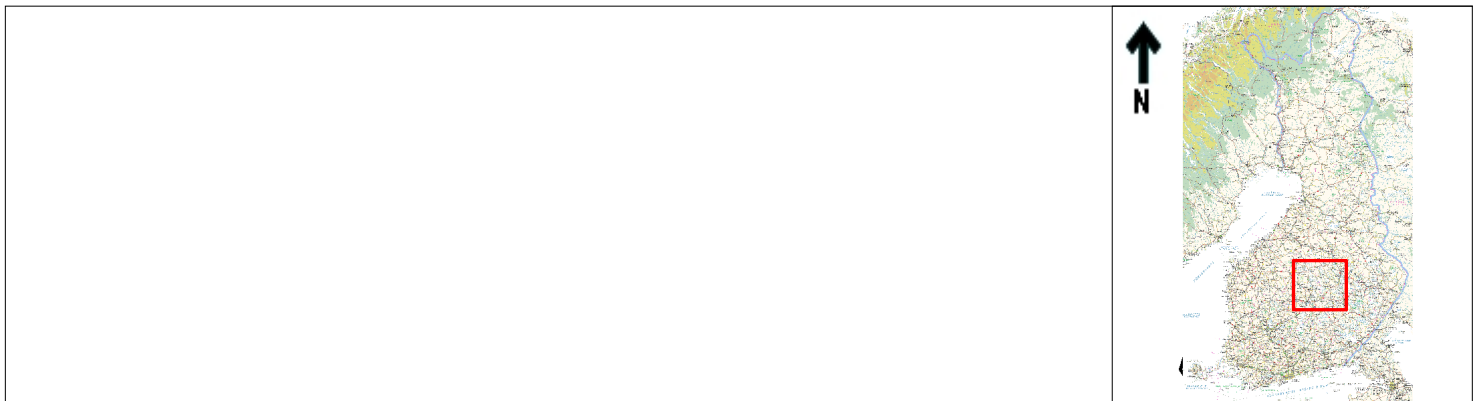


Mittakaava 1:800000



Koordinaattijärjestelmä: KJY-yrk

Nurkkapisteen koordinaatit: 6879521:3397418 - 7025921:3552618



Mittausaineistot marraskuu 2012-helmikuu 2013		Maanpintäsäärvot luotauspallon laukaisuhetkellä				Maanpintäsäärvot lidar-mittaushetkellä				Maanpintäsäärvot lidar-mittaushetkellä																		
Lidar-mittauksen aikaväli/alkamisaika (UTC)	Lidar-mittauksen aikaväli/alkamisaika (UTC)	Tarkasteiltava 2h aikaväli (UTC)	Luotauspallon laukaisu-aika (UTC)	Lidar-mittauksen keskiarvostus (h)	Lämpötila (°C)	Kosteus (%)	Ilmanpaine (hPa)	Lämpötila (°C)	Kosteus (%)	Ilmanpaine (hPa)	Lämpötila (°C)	Kosteus (%)	Ilmanpaine (hPa)	Lämpötila (°C)	Kosteus (%)	Ilmanpaine (hPa)	Lämpötila (°C)	Kosteus (%)	Ilmanpaine (hPa)	Lämpötila (°C)	Kosteus (%)	Ilmanpaine (hPa)	Lämpötila (°C)	Kosteus (%)	Ilmanpaine (hPa)	Lämpötila (°C)	Kosteus (%)	Ilmanpaine (hPa)
19.11.2012	15:10-17:10	15:10-17:10	18:00	2	2,2	84	993,3	0,4	96	998,2	93	-0,3	998,2	92	-0,8	998,2	92	-0,8	998,2	92	-0,8	998,2	92	-0,8	998,2	92	-0,8	998,2
29.11.2012	20:00	21:00-23:00	18:00	4	-9,3	84	999,1	-10,4	95	1009,9	86	-12,3	1009,9	82	-12,9	1009,8	82	-12,9	1009,8	82	-12,9	1009,8	82	-12,9	1009,8	82	-12,9	1009,8
30.11.2012	0:59	02:00-04:00	6:00	5	-8,6	57	997,6	-9,6	75	1009,4	67	-11,8	1009,4	66	-12,5	1009,3	65	-12,3	1009,3	65	-12,3	1009,3	65	-12,3	1009,3	65	-12,3	1009,4
3.12.2012	6:00-9:00	06:00-08:00	6:00	3	-23,4	79	992,4	-19,2	93	998,3	92	-14,9	998,3	89	-15,0	998,7	89	-15,0	998,7	89	-15,0	998,7	89	-15,0	998,5	89	-15,0	998,5
3.12.2012	12:00-15:00	13:00-15:00	18:00	3	-24,9	77	991,2	-18,0	94	998,5	93	-13,2	998,5	90	-13,2	998,4	90	-13,2	998,4	90	-13,2	998,4	90	-13,2	998,4	90	-13,2	998,4
4.12.2012	12:00-14:00	12:00-14:00	18:00	2	-22,1	80	982,5	-17,0	96	990,2	93	-13,8	990,2	93	-13,8	990,2	93	-13,8	990,2	93	-13,8	990,2	93	-13,8	990,2	93	-13,8	990,2
16.12.2012	0:00	03:00-05:00	6:00	6	-9,4	89	1006,8	-11,9	95	1016,8	95	-13,3	1016,8	95	-13,3	1017,2	95	-13,3	1017,2	95	-13,3	1017,2	95	-13,3	1016,9	95	-13,3	1016,9
17.12.2012	18:00-20:45	18:00-20:00	18:00	3	-8,0	89	1007,8	-14,3	95	1017,7	94	-14,5	1017,7	94	-14,5	1018,1	91	-13,1	1018,1	91	-13,1	1018,1	91	-13,1	1017,8	91	-13,1	1017,8
18.12.2012	6:00	06:00-08:00	6:00	6	-14,0	86	1010,3	-15,4	96	1019,5	95	-12,8	1019,5	94	-13,5	1020,2	92	-11,5	1020,2	91	-11,4	1020,2	91	-11,4	1019,5	91	-11,4	1019,5
18.12.2012	12:00	16:00-18:00	18:00	6	-17,1	85	1014,0	-13,3	70	1022,5	95	-12,7	1022,5	95	-12,7	1021,9	94	-11,6	1021,9	94	-11,6	1021,9	94	-11,6	1022,5	94	-11,6	1022,5
18.12.2012	18:00-22:00	18:00-20:00	18:00	4	-17,1	85	1014,0	-14,4	64	1022,9	94	-13,8	1022,9	94	-13,8	1023,4	93	-12,5	1023,4	93	-11,8	1023,4	93	-11,8	1023,0	93	-11,8	1023,0
19.12.2012	00:05-3:05	01:05-03:05	6:00	3	-16,6	85	1016,8	-16,0	46	1024,7	93	-15,7	1024,7	93	-15,7	1024,5	92	-13,0	1024,5	92	-13,5	1024,6	92	-13,5	1024,6	92	-13,5	1024,6
19.12.2012	9:00-12:00	09:00-11:00	6:00	3	-16,6	85	1016,8	-20,1	71	1026,5	90	-15,4	1026,5	90	-15,4	1026,4	88	-12,7	1026,4	88	-12,7	1026,4	88	-12,7	1026,5	88	-12,7	1026,5
19.12.2012	14:00-18:00	16:00-18:00	18:00	4	-18,6	83	1018,5	-19,1	24	1026,6	91	-15,9	1026,6	91	-15,9	1026,7	89	-12,9	1026,7	89	-13,1	1026,7	89	-13,1	1026,6	89	-13,1	1026,6
21.12.2012	12:00	16:00-18:00	18:00	6	-15,0	86	1020,5	-21,7	94	1028,6	92	-13,2	1028,6	92	-13,2	1028,6	87	-13,0	1028,6	86	-13,2	1028,6	86	-13,2	1028,8	86	-13,2	1028,8
21.12.2012	12:00-15:00		18:00	3	-15,0	86	1020,5	-21,3	94	1028,3	92	-13,4	1028,3	92	-13,4	1028,4	87	-12,8	1028,4	87	-12,8	1028,4	87	-12,8	1028,4	87	-12,8	1028,4
21.12.2012	18:00-22:00	18:00-20:00	18:00	4	-15,0	86	1020,5	-22,0	94	1029,6	87	-14,3	1029,6	87	-14,3	1029,8	86	-14,0	1029,8	86	-13,2	1029,8	86	-13,2	1029,6	86	-13,2	1029,6
23.12.2012	8:05	08:05-10:05	6:00	4	-20,7	81	1018,7	-18,8	60	1025,9	92	-8,0	1025,9	92	-8,0	1025,5	90	-7,6	1025,5	89	-7,7	1025,5	89	-7,7	1026,0	89	-7,7	1026,0
23.12.2012	12:00	16:00-18:00	18:00	6	-27,1	75	1012,3	-18,8	39	1021,3	46	-8,6	1021,3	46	-8,6	1022,6	90	-8,1	1022,6	89	-8,7	1022,6	89	-8,7	1021,3	89	-8,7	1021,3
23.12.2012	18:00	18:00-20:00	18:00	6	-27,1	75	1012,3	-19,5	31	1020,1	56	-10,1	1020,1	56	-10,1	1018,1	48	-9,6	1018,1	48	-9,4	1018,1	48	-9,4	1020,0	48	-9,4	1020,0
24.12.2012	0:00	04:00-06:00	6:00	6	-16,3	85	998,7	-18,3	32	1008,9	82	-9,5	1008,9	82	-9,5	1011,4	89	-9,1	1011,4	90	-9,0	1011,4	90	-9,0	1008,9	90	-9,0	1008,9
25.12.2012	20:00-24:00	20:00-22:00	18:00	4	-14,5	87	975,7	-15,1	93	982,1	92	-15,1	982,1	92	-15,1	982,1	92	-13,8	982,1	92	-13,9	982,1	92	-13,9	982,2	92	-13,9	982,2
26.12.2012	2:00	04:00-06:00	6:00	4	-21,7	79	978,4	-16,2	86	984,2	93	-14,6	984,2	93	-14,6	983,7	91	-14,9	983,7	91	-14,9	983,7	91	-14,9	984,2	91	-14,9	984,2
26.12.2012	6:00	06:00-08:00	6:00	6	-21,7	79	978,4	-15,7	87	985,3	93	-14,1	985,3	93	-14,1	987,0	92	-14,3	987,0	92	-14,5	987,0	92	-14,5	985,4	92	-14,5	985,4
26.12.2012	12:00	13:00-15:00	18:00	3							90	-13,8		91	-14,0	989,0	91	-14,0	989,0	91	-13,9	989,0	91	-13,9	989,1	91	-13,9	989,1
30.12.2012	0:00-04:00	00:00-02:00	6:00	4							94	-4,0		94	-2,8	1002,6	96	-2,4	1002,6	96	-2,4	1002,6	96	-2,4	1003,5	96	-2,4	1003,5
7.1.2013	0:00	04:00-06:00	6:00	6	-14,0	88	1008,0	-13,9	86	1014,5	99	-5,9	1014,5	99	-5,9	1014,8	94	-6,5	1014,8	94	-6,8	1014,8	94	-6,8	1014,5	94	-6,8	1014,5
7.1.2013	6:00	06:00-08:00	6:00	6							97	-5,8		94	-5,8	1014,4	94	-5,8	1014,4	93	-6,3	1014,4	93	-6,3	1014,6	93	-6,3	1014,6
16.1.2013	15:00	16:00-18:00	18:00	3	-11,9	89	1005,2	-15,1	95	1012,3	94	-12,6	1012,3	94	-12,6	1012,1	93	-12,8	1012,1	93	-13,0	1012,1	93	-13,0	1012,3	93	-13,0	1012,3

Lidar-mittauspäivä	Lidar-mittauksen aikaväli/alkamisaika (UTC)	Tarkasteltava 2h aikaväli (UTC)	Luotauspallon laukaisu-aika (UTC)	Lidar-mittauksen keskiarvostus (h)	Maanpintasaarvot luotauspallon laukaisuhetkellä				Maanpintasaarvot lidar-mittaushetkellä				Lämpötila masto 299 m 2h ka (°C)	Kosteus masto 299 m 2h ka (%)	Ilmanpaine Savilah-ti P_ST 2h ka			
					Lämpötila Jkl (°C)	Kosteus Jkl (%)	Ilmanpaine Jkl (hPa)	Ilmanpaine Savilah-ti P_ST (hPa)	Lämpötila masto 26 m (°C)	Kosteus masto 26 m (%)	Ilmanpaine Savilah-ti P_ST (hPa)	Ilmanpaine Savilah-ti P_ST 2h ka						
17.1.2013	19:00	19:00-21:00	18:00	5	-18,6	84	1010,4	-17,1	95	1017,4	95	-11,7	95	-11,5	92	-12,4	1017,0	1017,3
18.1.2013	0:05	04:00-06:00	6:00	6	-28,7	74	1007,3	-17,0	95	1013,8	95	-12,2	94	-12,3	91	-12,6	1014,8	1013,9
18.1.2013	6:00	06:00-08:00	6:00	6	-28,7	74	1007,3	-17,3	95	1013,0	95	-12,4	95	-12,4	92	-12,6	1012,1	1013,1
18.1.2013	12:00	16:00-18:00	18:00	6	-23,7	79	1000,7	-17,6	95	1006,7	90	-12,2	80	-11,3	91	-11,7	1008,1	1006,7
19.1.2013	19:00	19:00-21:00	18:00	2	-5,0	95	985,6	-6,3	83	992,0			100	-6,7				992,0
20.1.2013	0:05-02:50	0:05-02:05	6:00	3	-11,1	90	988,8	-9,7	83	992,9	98	-9,3	98	-9,2	96	-7,9	992,9	992,9
22.1.2013	0:05-05:05	03:00-05:00	6:00	5	-9,9	89	990,3	-8,7	76	994,9	98	-4,3	98	-3,8	97	-3,2	995,5	995,0
23.1.2013	1:00	04:00-06:00	6:00	5	-8,8	91	989,8	-12,2	48	995,3	97	-8,1	96	-8,0	96	-8,1	995,3	995,2
23.1.2013	08:30-12:00	09:00-11:00	6:00	3,5	-8,8	91	989,8	-10,8	87	994,8	97	-8,6	98	-8,6	97	-9,1	994,7	994,8
23.1.2013	13:00	16:00-18:00	18:00	5	-17,1	87	989,0	-12,2	51	993,5	97	-9,4	96	-8,9	96	-9,1	993,8	993,4
23.1.2013	18:00	18:00-20:00	18:00	5	-17,1	87	989,0	-12,9	78	992,4	96	-10,1	96	-9,3	95	-9,7	991,7	992,4
24.1.2013	12:00-16:40	14:40-16:40	18:00	4,5	-9,6	91	994,8	-13,2	63	999,3	95	-11,2	95	-10,5	95	-10,6	998,7	999,2
25.1.2013	4:00	04:00-06:00	6:00	2	-9,9	90	994,0	-11,5	97	999,3			96	-9,5				999,3
25.1.2013	06:00-09:30	06:00-08:00	6:00	4	-9,9	90	994,0	-12,5	97	999,3	95	-10,8	95	-10,7	95	-9,7	999,2	999,3
6.2.2013	12:00	16:00-18:00	18:00	6	-8,4	83	987,4	-11,2	97	994,7	96	-10,9	96	-11,0	96	-11,0	994,0	994,8
20.2.2013	6:00	06:00-08:00	6:00	2	-9,2	91	1011,5	-10,3	98	1018,2			98	-9,0				1018,2
20.2.2013	15:00	15:00-17:00	18:00	3	-9,1	93	1012,4	-8,4	99	1019,0	99	-7,4	99	-7,6	99	-7,4	1018,9	1018,9
20.2.2013	18:00	18:00-20:00	18:00	3	-9,1	93	1012,4	-8,0	99	1018,9	99	-7,4	99	-7,4	99	-7,4	1018,8	1018,8
21.2.2013	13:00	13:00-15:00	18:00	3							98	-8,0	98	-8,0	98	-8,0	1009,4	1009,7