

Liisa Savisaari

Infrapuna-anturien soveltuvuus selvitys maanpinnan lämpötilaminimien mittaamiseen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Automaatiotekniikka

Insinöörityö

2.12.2013

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Liisa Savisaari Infrapuna-anturien soveltuvuus selvitys maanpinnan lämpötilaminimien mittaamiseen 61 sivua + 15 liitettä 2.12.2013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Energia-automaatio
Ohjaaja(t)	Suunnittelija Harry Lonka Yliopettaja Kari Vierinen
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Ilmatieteen laitokselle, mikä neljästä vertailuun otetusta infrapuna-anturista soveltuu parhaiten maanpinnan yön minimilämpötilan mittaamiseen. Selvitystyön perimmäinen kysymys oli, onko nykyistä PT100-vastusanturia mahdollista korvata tulevaisuudessa infrapuna-anturilla. Vertailussa mukana olleet anturit oli hankittu jo valmiiksi ennen työn aloittamista, joten niiden ominaisuuksien valintaan ei pystytty vaikuttamaan.</p> <p>Infrapuna-anturin käyttäminen kiinnostaa erityisesti, koska sen ei tarvitse koskettaa mitattavaa kohdetta. Nykyisin ongelmana on, että PT100-vastusanturi hautautuu helposti kesällä heinikkoon tai talvella lumeen, eikä siten mittaa ympäri vuoden luotettavasti. Infrapuna-anturi ei hautaudu tällaisiin eristeisiin toimiviin luonnonesteisiin. Infrapuna-anturin suuria epävarmuustekijöitä meteorologisissa mittausolosuhteissa ovat kuitenkin mitattavan pinnan muuttuva emissioeroin ja muuttuvat ominaisuudet sekä lämpösäteilyn voimakkuuden muuttuminen ajan ja lämpötilan funktiona. Opinnäytetyössä perehdytään laajalajaisesti sääasemien toimintaan sekä erityisesti lämpötilanmittauksiin ja infrapunasäteilyyn.</p> <p>Tutkimuksessa keskityttiin kesäaikaan. Ensiksi antureille määritettiin sopivat käyttöönotto-asetukset, jonka jälkeen ne kaapeloitiin ja kytkettiin tiedonkeruujärjestelmään. Testien, kalibrointien ja viritysten jälkeen ne asennettiin Kumpulan testiasemalle kahden metrin korkeuteen mittaamaan maanpintaa. Mittausdataa kerättiin tutkimukseen 30 vuorokautta. Mittausalustoina käytettiin luonnonnurmea ja keinonurmea. Testiantureina oli yhteensä viisi infrapuna-anturia, joista yhtä infrapuna-anturyyppiä oli siis kaksi kappaletta ja jotka mittasivat lämpötilaa eri mittausalustoilta. Lisäksi vertailuantureina käytettiin neljää PT100-anturia, jotka oli sijoitettu mittaamaan eri korkeuksilta ja eri mittausalustoilta.</p> <p>Mittaustuloksien analysointi tehtiin vertailemalla eri antureiden mittaustuloksia toisiinsa kuvaajia apuna käyttäen. Kaikki vertailussa mukana olleet anturit mittasivat selkeästi samaa asiaa, mutta minkään anturin mittaustarkkuus ja -varmuus ei tämän tutkimuksen perusteella ollut meteorologisille mittauksille vaadittavaa tasoa.</p>	
Avainsanat	maanpintaminimi, infrapuna-anturi, infrapunalämpötilamittaus, automaattinen sääasema, pintalämpötila, ulossäteilevän pinnan lämpötila

Author(s) Title Number of Pages Date	Liisa Savisaari Suitability analysis for infrared sensors measuring minimum ground surface temperatures 61 pages + 15 appendices 2 December 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automation Engineering
Specialisation option	Energy Automation
Instructor(s)	Harry Lonka, Technical Support Engineer Kari Vierinen, Principal Lecturer
<p>The aim of this thesis was to study which of the four infrared sensors included in the research were suitable for measuring minimum surface temperature at night time. This research was made for the Finnish Meteorological Institute. The main research question was if the PT100 resistance thermometer that is used today could be replaced with the new technique in the future. Infrared sensors in this comparison were already ordered before I began the research so I was not able to make any decisions on the sensors' features.</p> <p>Using infrared sensors for temperature measurements is especially beneficial because the sensors are able to measure temperature from a distance and they do not need to contact the target. Nowadays there is a big problem in the measurement reliability if the PT100 resistance thermometer gets buried in the grass or in the snow. Infrared sensors do not have such problems. However, infrared sensors have their own uncertainties in meteorological measurements such as variable emissivity, other changing features of the surface and changes in thermal radiation intensity. This thesis project offered an opportunity to extensively study weather stations in operation, temperature measurements and infrared radiation.</p> <p>The thesis project was conducted in the summer. First, suitable settings for the sensors had to be set. Then, the sensors were wired and connected to the data collection system. After having been tested, calibrated and adjusted, the sensors were installed two meters above the ground in the Kumpula test station to measure the ground surface and artificial grass. The measurement data was collected for 30 days. Reference sensors were four PT100 resistance thermometers, which were placed at different heights and on different surfaces.</p> <p>The measurement results were analyzed by comparing each sensor to each other. The results were plotted in graphs. All sensors clearly measured the same quantity, but there were too many differences in the measurement results. Hence, none of the sensors showed the required level of accuracy and reliability for meteorological usage.</p>	
Keywords	grass minimum, infrared sensor, infrared temperature measurement, automatic weather station, surface temperature, temperature of radiating surface

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Ilmatieteen laitoksen säämittaukset	2
2.1	Ilmatieteen laitoksesta yleisesti	2
2.2	Aws-järjestelmä ja mittaussuureet	3
2.3	Lämpötilasuure	3
2.4	Maanpinnan lämpötilan minimin mittaus	4
3	Infrapunasäteily	9
4	Emissiivisyys	10
4.1	Mitä on emissiivisyys?	10
4.2	Emissiokertoimen määrittäminen	11
4.3	Haasteet emissiokertoimen määrittämisessä	12
5	Anturit	14
5.1	Infrapuna-anturit	14
5.1.1	Infrapuna-anturin toimintaperiaate	14
5.1.2	Heitronics KT15.85 IIP	17
5.1.3	Lumasense Technologies IN 510	18
5.1.4	Micro-epsilon CT-SF22-C3	19
5.1.5	Apogee SI-131	20
5.2	PT100-platinavastusanturi	22
6	Laitteisto ja ohjelmat	23
6.1	Dataloggeri	23
6.2	Sulautettu Linux-tietokone	24
6.3	Muut oheislaitteet	26
7	Kytkenät	26
8	Antureiden kalibrointi ja viritys	27
9	Mekaaninen asennus	30

9.1	Mittausalusta	32
10	Mittausalustojen tutkiminen lämpökameralla	34
11	Mittautulosten analysointi	37
11.1	Infrapuna-anturien vertailu PT100-antureihin	38
11.2	Infrapuna-anturien keskinäinen vertailu	48
11.3	PT100-anturien keskinäinen vertailu	51
11.4	Soveltuvuus maanpintaminimin mittaamiseen	53
12	Päätelmät ja soveltuvuuden arviointi	55
	Lähteet	59
	Liitteet	
	Liite 1. Kuva maanpintaminimi-mittauksesta Vietnamissa	
	Liite 2. Anturivertailutaulukko	
	Liite 3. Infrapuna-anturien käyttöönottomääritykset opinnäytetyössä	
	Liite 4. Heitronics KT15.85 IIP – tekniset tiedot	
	Liite 5. Lumasense IN 510 – tekniset tiedot	
	Liite 6. Micro-epsilon CT-SF22-C3 – tekniset tiedot	
	Liite 7. Apogee SI-131 – tekniset tiedot	
	Liite 8. Näkymä Maws Lizard -ohjelmasta	
	Liite 9. Yhteyden muodostaminen Puttyn ja anturin välille	
	Liite 10. Infrapuna-anturikytkennät	
	Liite 11. Dataloggerin kanavatiedot	
	Liite 12. KytKentäkaavio, tutkimuksessa käytetty mittausjärjestelmä	
	Liite 13. Lämpötilamittauksen virityspöytäkirja	
	Liite 14. Antureiden kuvaajat ennen ja jälkeen kalibroinnin sekä virityksen	
	Liite 15. Kuvia mittausjärjestelyistä	

Lyhenteet

AWS	Automatic Weather Station. Automaattinen säähavainto-asema.
WMO	World Meteorological Organization. Maailman ilmatieteen järjestö.
PT100	Platinavastusanturi.
Dataloggeri	Elektroninen laite, jolla voidaan tallentaa mittausdataa.
QML201	Vaisalan valmistama dataloggeri, jota käytetään automaattisen säähavaintoaseman tiedonkeruualustana.
Milos 500	Vaisalan valmistama sääaseman keskusyksikkö. Datankeruujärjestelmä.
Flir Quickreport 1.2	Ohjelmisto lämpökuvien analysointia ja raportointia varten.
RS-232	Recommended Standard 232. Digitaalinen sarjaliikenne-standardi.
Putty	Pääte-emulaattori, jolla voidaan muodostaa ssh- ja telnet-yhteyksiä.
Baudi	Tiedonsiirtonopeuden suure. Yksi baudi kuvaa elektronisen signaalin muutosnopeutta per sekunti.

1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Ilmatieteen laitokselle neljästä eri infrapuna-anturista paras mahdollinen maanpinnan lämpötilan minimin eli maanpintaminimin mittaamiseen. Selvityksen kohteena olevat neljä anturia oli valittu tutkittaviksi niiden sopivien lämpötilanmittausrajojen ja optisten ominaisuuksien vuoksi. Anturit olivat valmiiksi hankittu ennen työn aloittamista, joten antureiden ja niiden ominaisuuksien valintaan ei voitu vaikuttaa.

Haasteina maanpinnan lämpötilan mittauksessa ovat lumi, jää, heinikko ja muut konkreettiset luonnon tuottamat mittaustuloksia vääristävät eristeinä toimivat esteet, joihin kosketusanturi hautautuu. Nykyään mittaukset tehdään PT100-platinavastusanturilla viisi senttimetriä maanpinnan yläpuolelta, jotta anturi mittaisi maanpäällisen ilmapatjan lämpötilaa läheltä maanpintaa. PT100-anturia pidetään erittäin luotettavana silloin, kun mittaolosuhteet ovat hyvät. On tärkeää suorittaa mittaukset oikein eli ottaa huomioon mittauslaitteen soveltuvuus kohteen mittaamiseen sekä anturien ja laitteiden oikea kalibrointi, viritys, konfigurointi ja asennus. Asennusten suunnittelu ja mekaaninen asennus määräytyvät olosuhteiden mukaan.

Työ aloitettiin perehtymällä antureihin ja niiden ominaisuuksiin. Tämän jälkeen ne kytkettiin dataloggeriin ja sulautettuun Linux-tietokoneeseen, jotka laskevat Maws Lizard- ja Python -ohjelmistoilla tehdyillä ohjelmilla lämpötilat ja tallentavat ne sulautetussa Linux-tietokoneessa sijaitsevalle siirrettävälle SD-muistikortille päivälokitydostoihin. Datankeruu suoritettiin minuutin välein sulautetulle Linux-tietokoneelle määritellyn python-ohjelman avulla samanaikaisesti sekä sulautetun Linux-tietokoneen sarjaportteihin liitetyiltä antureilta että dataloggeriin liitetyiltä analogisilta antureilta. Lämpötilan mittaus suoritettiin kaikilla antureilla kahden sekunnin välein, joista laskettiin joka minuutti minuutin keskiarvo, minimi, maksimi, keskihajonta ja maksimin ja minimin erotus.

Mittaukset testiasemalla aloitettiin, kun määrittelyt, testit, kalibroinnit ja viritykset oli saatu valmiiksi sisätiloissa. Anturit ja mittausorsi asennettiin ulos Kumpulán testiasemalle. Testiasemalla mittausalustoina käytettiin luonnonnurmea sekä keinonurmea. Emissiokertoimeksi asetettiin mustan kappaleen emissiokerroin 1,00, sillä emissiokerroin on mittausalustoilla vaihteleva eikä sitä siten voitu luotettavasti määrittää.

Mittausten päätyttyä tehtiin loppupäätelmät mittaustulosten validiteetista ja reliabiliteetista. Mittaustulosten analysointi tehtiin vertailemalla kaikkien eri antureiden mittaustuloksia keskenään. Kuvaajien tekeminen auttoi havainnollistamaan antureiden käyttäytymistä pidemmällä aikavälillä. Kuvaajissa lämpötila sijoitettiin pystyakselille ja aika vaakakselille.

2 Ilmatieteen laitoksen säämittaukset

2.1 Ilmatieteen laitoksesta yleisesti

Ilmatieteen laitos tuottaa havaintopalveluita ja tutkimustietoa ilmakehästä ja meristä. Ilmatieteen laitoksella on pitkät perinteet säähavaintojen tuottamisesta. Sen toiminta on aloitettu jo vuonna 1838. Se on myös valtakunnallisesti merkittävä sääpalveluja tuottava valtion yritys. Ilmatieteen laitoksella on paljon kansainvälistä toimintaa ja kehitys- ja tutkimushankkeita. Se vie osaamistaan myös ulkomaille. Ilmatieteen laitoksen toiminnan lähtökohtana on ymmärtää, mitä tietoa asiakkaat haluavat ja miten se tehdään kustannustehokkaasti. [1]

Sää ja turvallisuus -tulosalueeseen kuuluva Havaintopalvelut-yksikkö vastaa säähavaintojen tuottamisesta: se ylläpitää, asentaa, huoltaa ja kehittää asemien toimintaa. Se tuottaa jatkuvasti meteorologista havaintotietoa noin 400 merisää-, pintasää- ja erikoisasemalla. Sääasemat voivat olla niin manuaalisia, automaattisia, viestittäviä kuin postittaviakin sääasemia. Lisäksi on muutamia luotaimia sekä säätutkia. Manuaalinen toiminta on vähenemässä, sillä automatisointia lisätään jatkuvasti sen kustannustehokkuuden vuoksi. Automaatiota voidaan käyttää myös miehittämättömissä kohteissa, kuten majakoissa ja asumattomilla seuduilla. Ilmatieteen laitoksen antureita on lähetetty myös Marsiin, jossa laitteiden itsenäinen toiminta on välttämätöntä. Automaattisten säähavaintoasemien valvontaan tarvitaan kuitenkin työntekijöitä huoltojen ja korjausten varalta. [1]

Havaintopalvelut-yksikön havaintotekniikka-ryhmän tehtäviin kuuluvat jatkuva säähavaintoasemien tekninen ylläpito ja kehittäminen. Työnkuvaan kuuluvat erilaisten laitteiden määräaikais- ja vikahuollot. Tällaisia huollettavia laitteita ovat esimerkiksi säätutkat, salamanpaikantimet, magnetometrit, revontulikamerat, ilmanlaatu-, radioaktiivisuus- ja auringonsäteilymittauslaitteet. Lisäksi Havaintopalvelut-yksikön tehtäviin kuu-

luvut päivystystoiminta vikatilanteiden varalta, laadunhallinta, avaruusprojektit sekä asennusmateriaalin suunnittelu, kehittäminen ja valmistus. Keskushuolto vastaa laitehuollosta ja kalibroinnista asianmukaisissa laboratoriotiloissa. [1]

2.2 Aws-järjestelmä ja mittaussuureet

AWS-järjestelmä eli automaattinen säähavaintoasema mittaa yleisimmin seuraavia suureita:

- lämpötilaa (2 metrin korkeudesta)
- lämpötilaa (maanpintaminimiä)
- pilvien korkeutta
- ilman suhteellista kosteutta
- ilmanpainetta
- sademäärää ja sateen intensiteettiä
- lumensyvyyttä
- auringon säteilyä ja paistetta
- tuulen nopeutta ja suuntaa
- vallitsevaa säätä ja näkyvyyttä.

Havaintojen saatavuus Ilmatieteen laitoksella on yli 99 % eli erittäin hyvä. Uusimmissa sääasemissa on tiedon keräämisessä käytössä QML201-dataloggeri. Tällä hetkellä käytetyin tiedonkeruujärjestelmä AWS-asemissa on kuitenkin Milos 500, joita ollaan uusimassa nykyaikaisemmiksi QML201-dataloggereiksi. [1]

2.3 Lämpötilasuure

Lämpötila (tunnus T) on suure, joka kuvastaa kohteen termodynaamista lämpötilaa. Se on eräs tärkeimmistä suureista, jota hyödynnetään monella eri käytännön alueella. Yleisimmin lämpötilan yksikkö on asteikon mukaisesti joko celsiusaste (°C), fahrenheitaste (°F) tai kelvin (K). Celsiusasteikossa veden jäätymispiste on 0 °C ja kiehumispiste on 100 °C. [2]

Kaikki lämpö on suoraan tai välillisesti peräisin auringosta. Ihollamme tunnemme, onko kappale lämmin vai viileä, sillä ihomme lämpöön reagoivat solut havaitsevat kappaleen

ja ihon välisen lämpötilaeron. Lämpötila-anturi mahdollistaa tarkemman havainnoinnin lämpötilasta. [2]

2.4 Maanpinnan lämpötilan minimin mittaaminen

Maanpinnan lämpötilan minimiarvo eli maanpintaminimi tarkoittaa alinta minuuttikeskiarvoista lämpötilaa, joka on mitattu yön aikana. Minimi lasketaan joka aamu UTC-aikaan klo 6 aamulla, ja se lasketaan klo 18–06 välisen UTC-ajan mittausdatasta. Päivällä mitattua lämpötilaa ei siis huomioida. [3, s. 48]

PT100-anturi sijoitetaan viiden senttimetrin korkeuteen telineeseen luonnonnurmen tai keinonurmen päälle. WMO:n suositusten mukaan mittauskorkeus tulee olla 2,5–5,0 cm. Lämpötila mitataan taivasalla nurmikon päältä, kuitenkin koskettamatta nurmikkoon. Kuvassa 1 on esimerkkitapaus mittauksesta keinonurmen päällä. Talvella lumen ja kesällä nurmikon peittäessä anturin tulee anturi ja teline asettaa välittömästi lumen yläpuolelle, jottei lumi eristä anturia ja siten vääristä mittaustulosta. [3, s. 48; 4, s. 222]



Kuva 1. Keinonurmi on aina tasainen ja siisti. Luonnonnurmeen anturi olisi jo hautautunut. Kuva Kumpulan testiasemalta 28.5.2013.

Päivälämpötiloja ei oteta huomioon, koska anturilla ei ole säteilysuojaa ja koska keinonurmen pinnassa lämpötila kohoaa luonnonnurmea paljon suurempiin, epäluotettaviin lukemiin. Keinonurmea voidaan käyttää mittausalustana silloin, kun ollaan kiinnostuneita vain yöajan minimilämpötilasta. Tällöin mittausalustan materiaali ei vaikuta enää niin paljon kuumenemiseen tai lämmönsitomiskykyyn. Keinonurmen etuna on, että sitä ei tarvitse leikata toisin kuin luonnonnurmea. Kuvasta 2 nähdään, miten anturi voi hautautua ruohonkorsien alle.



Kuva 2. Tutkimuksessa mukana olleet kaksi luonnonnurmen päälle sijoitettua PT100-anturia. Toinen on telineessä 5 cm maanpinnasta ja toinen on kiinni maanpinnassa. Anturit ovat hautautumassa ruohonkorsien alle.

Eri maiden ilmatieteen laitoksilla ei ole käytössä täysin yhtenäisiä mittausmenetelmiä. Esimerkiksi Vietnamissa otettu kuva (liite 1) näyttää, miten maanpintaminimin mittauksessa alustana on käytetty erittäin pehmeätä hiekkaa ja sähköisen anturin sijaan maahan kiinni asetettua lasilämpömittaria.

Mittaus suoritetaan tavallisesti viiden sekunnin välein ja minuutin ajalta lasketaan aina keskiarvo näistä viiden sekunnin välein mitatuista arvoista. Tekemässäni testissä kaikkien anturien mittaustulokset kerätään kuitenkin kahden sekunnin välein.

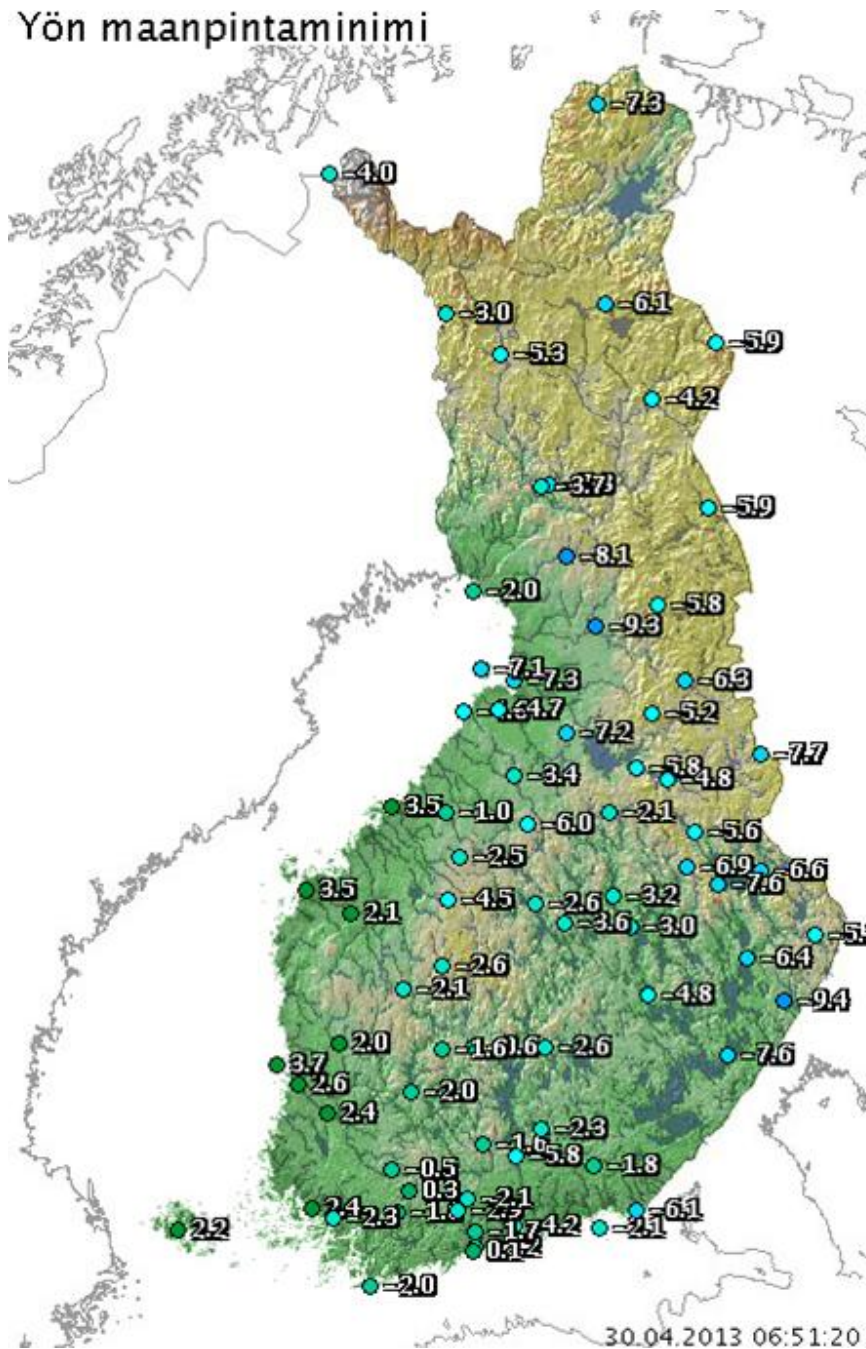
Tärkein tieto maanpintaminimin mittauksessa liittyy siihen, ollaanko lähestymässä hallalukemia tai onko maa roudassa. Asiasta kiinnostuneimpia ovat maanviljelijät, jotka voivat käyttää ennusteita hyväkseen. Tällöin he voivat suojautua hallalta sadetuksilla tai harsoilla. Asiakkaiden kannalta kiinnostavimmat ja tärkeimmät mittaustulokset ovatkin juuri nollan asteen molemmin puolin. [5]

Maanpintaminimillä on muitakin käyttökohteita. Maanpinnan lämpötila vaikuttaa muun muassa sumun, termiikin ja pintainversion ennustamiseen ja geologisiin profiilimittauksiin. Termiikillä tarkoitetaan nousevaa ilmamassaa, joka on ympäröivää ilmaa lämpimämpää. Tätä ilmamassaa nostaa konvektio, jossa noste kuljettaa lämpöä lämpövirtusten mukana. Esimerkiksi purjelentäjiä kiinnostaa, missä on sopivaa konvektiota eli nostetta. Pintainversio tarkoittaa käänteistä lämpötilan pystyjakaumaa, joka syntyy, kun selkeinä öinä maanpinnan pitkäaaltoinen lämpösäteily jäädyttää maanpintaa voimakkaasti. Tämä ulossäteilyn jäädyttämä pinta jäädyttää puolestaan maanpinnan yläpuolella olevan ilmakerroksen. Tämän ilmiön vuoksi ilman lämpötila nousee ylöspäin mentäessä. Jos ilmakehä noudattaisi normaalijakaumaa, lämpötila laskisi ylöspäin mentäessä. [5; 6; 7]

Sumuennusteista ovat kiinnostuneita esimerkiksi maantie- ja lentoliikenne sekä purjelentäjät. Sumun lisäksi pintainversiosta ovat kiinnostuneita esimerkiksi kuumailmapalloilijat tai muut vastaavat lentoalan ammattilaiset, joiden kulkuneuvon nousu ja lasku perustuu pitkälti lämpötilaeroihin ja -virtauksiin. Pintainversion muodostuminen vaikuttaa myös ilman laatuun maanpinnan lähellä sijaitsevassa ilmakerroksessa. Maanpinnan sekä maanpinnan lähellä sijaitsevan ilmakerroksen luotettavasti mitatut lämpötilat parantavat ilmanlaatuennusteiden ja -varoitusten laatua. Geologiassa esimerkiksi alueelliset yön minimikartat antavat kesäisin viitteitä eri maa-/kivilajeista. [5; 6; 7]

Nykyisin käytetty PT100-anturi 5 cm:n korkeudessa ja tutkimukseni infrapuna-anturit mittaavat vähän eri asioita. PT100-anturi mittaa lämpötilan ilmasta läheltä maanpintaa, kun taas infrapuna-anturit mittaavat suoraan maanpinnan kuoren eli ulossäteilevän pinnan keskimääräistä lämpötilaa koko mittauskeilan alueelta. Infrapuna-anturit eivät siis mittaa yksittäisen pisteen lämpötilaa. Lämpötilan mittaaminen ilmasta läheltä maanpintaa on siinä mielessä tärkeämpi mitattava suure, että kasvukauden edistyessä hallanarka kasvusto, kuten esimerkiksi viljapellot ja perunakasvustot, kohoavat yleensä hieman maanpinnan yläpuolelle. Maankuoren säteilylämpötilan avulla saataisiin kuitenkin parempi kokonaiskuva maan pinnan lämpötilasta. [5]

Infrapuna-antureille erityinen sovellusalue voisi olla esimerkiksi vesialueiden pintalämpötila, koska sillä osa-alueella ollaan kiinnostuneita nimenomaan lähinnä veden pintakalvon lämpötilasta ja sen muutoksista. Pintalämpötilan ja säteilevän pinnan lämpötilan määrittäminen ei ole kuitenkaan yksiselitteistä. Esimerkiksi meren pintakalvo voi olla muutaman sentin paksuinen, mutta mittaussyvyys vaihtelee muun muassa käytetyn mittaustaajuuden, veden laadun ja muiden muuttujien funktiona. Myös talvi muodostaa omat haasteensa pintalämpötilan mittaukseen, jolloin mitattava pinta nousee lumipeitteen ylärajalle. Mitattavaan pintaan kohdistuvat muutokset vaikuttavat myös pinnan emissiivisyyteen eli kykyyn absorboida ja lähettää lämpösäteilyä. Tämä on tärkeää ottaa huomioon infrapuna-antureita käytettäessä. [5]



Kuva 3. Maanpinnan lämpötilan minimimittaukset Suomessa 30.4.2013 [1].

Yön maanpintaminimi tulee mitata maan pinnasta tai läheltä maan pintaa, jossa tuulen vaikutus on pienimmillään. Maanpintaminimi mitataan juuri ruohonpäiden kohdalta, koska ruohonkorsien väliin jäänyt ilma käyttäytyy osittain eristeenä lämpimämmästä maankuoresta ylöspäin siirtyvälle lämpövirralle. Kuvassa 3 on esitetty maanpintaminimiarvojen mittaustaikapaikat Suomessa. Opinnäytetyöni aikana kävi myös ilmi, että muualla kuin Suomessa on alettu yhä enenevässä määrin mittaamaan maanpintaa inf-

rapuna-antureilla kahden metrin korkeudesta. Kyseinen mittaustapa on kuitenkin vielä pitkälti testiluonteista. Tätä mitattavaa suuretta on kutsuttu termeillä 'radiation minimum' tai 'skin temperature'. Näiden termien suomenkielisenä nimityksenä voisi olla ulossäteilevän pinnan lämpötila tai maankuoren säteilylämpötila. [4, s. 222]

3 Infrapunasäteily

Infrapunasäteilyllä (IR, infrared) tarkoitetaan sähkömagneettista säteilyä eli lämpösäteilyä, jota ei ihmissilmä pysty havaitsemaan. Sen aallonpituus on noin $0,75\ \mu\text{m}$ – $1000\ \mu\text{m}$ eli siis näkyvää valoa suurempi ja mikroaaltoja pienempi. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen ($-273,15\ \text{°C}$), lähettävät lämpö- eli infrapunasäteilyä. Mitä lämpimämpi kappale on, sitä voimakkaampaa ja suuritaajuisempaa on infrapunasäteily. Lämpösäteily eli infrapunasäteily koostuu emittoituneesta eli kappaleen lähettämästä säteilystä, kappaleesta heijastuneesta säteilystä sekä mahdollisesti kappaleen läpäisemästä säteilystä. Esimerkiksi aurinko, kodinkoneet, lamput ja muut lämmönlähteet säteilevät voimakkaasti infrapuna-alueella. Noin $+600$ – $700\ \text{°C}$:ssa säteily alkaa olla jo näkyvää. Tällöin lämpötilaa voidaan arvioida silmämääräisesti hehkuvan kappaleen värin perusteella. Esimerkiksi palavan nuotion tulen eri värit kertovat lämpötilaeroista. Työssä käytetyt anturit käyttävät aallonpituusaluetta 8 – $14\ \mu\text{m}$, joka vastaa pitkäaaltoaletta (LW = long wavelength). [8; 9; 10, s. 532]

Infrapunasäteilymittauksia käytetään erilaisissa sovelluksissa, kuten elektroniikassa, kameroissa, kauko-ohjauksissa, tähtäimissä, lääketieteessä, kadonneiden ihmisten etsimisessä, sotateollisuudessa, rakennusten lämpövuotojen tutkimisessa sekä monissa langattomissa sovelluksissa. Infrapunon käyttö mittauksessa mahdollistaa sen, että mitattavaan kohteeseen ei tarvita kosketusta eikä siihen aiheuteta täten häiriötä. Tätä tekniikkaa kutsutaan pyrometriaksi eli lämpösäteilyn mittaamiseksi. [8; 11]

4 Emissiivisyys

4.1 Mitä on emissiivisyys?

Säteilyenergian ja lämpötilan välillä vallitsee riippuvuus. Tähän riippuvuuteen vaikuttavat säteilevän kohteen pintamateriaali ja pinnan karheus. Kohteen pinnan kykyä säteillä lämpösäteilyä sanotaan emissiivisyydeksi. Emissiivisyyttä kuvaava emissiokerroin kertoo kohteen pinnan ominaisuuksista ja siitä, miten hyvin kohde emittoi eli lähettää lämpösäteilyä. Emissiivisyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat myös infrapuna-anturien oma mittausspektrialue, mitattavan kohteen lämpötila sekä säteilykulma. On siis mahdollista, että emissiokertoimen arvo muuttuu ajan funktiona. [12, s. 49-50]

Pinnan lähettämä säteilyvoimakkuus kasvaa mitä lyhyempiin aallonpituuksiin ja korkeampiin lämpötiloihin mennään. Mitä suurempi säteilyenergia, sitä voimakkaampi mittaussignaali, parempi tarkkuus ja stabiilius. Esimerkiksi pinnat, joilla on alhainen emissiokerroin, pystytään mittaamaan tarkasti vain noin 1–2 μm :n aallonpituudella mittaavilla infrapuna-antureilla. 8–14 μm :n aallonpituudella mittaavilla infrapuna-antureilla ei saada esimerkiksi kiiltäviltä metallipinnoilta riittävän tarkkoja mittaustuloksia, koska kiiltävän metallin emissiokerroin on hyvin alhainen 8–14 μm :n aallonpituusalueella. Pinnan emissiokerroin voi aallonpituuden funktiona muuttua lähes jopa eksponentiaalisesti.

Kappale voi absorboida, heijastaa tai läpäistä säteilyä. Emissiokerroin on siis tärkeä tekijä. Sähkömagneettisen säteilyn voimakkuus eli intensiteetti on suoraan verrannollinen säteilevän kohteen lämpötilaan. Jotta infrapunasäteilyn mittaaminen voidaan suorittaa oikein, on välttämätöntä asettaa kohteen oikea emissiokerroin anturiin. Emissiokerroin on arvo väliltä 0–1, ja se kuvaa mitattavan kohteen säteilyn määrää suhteessa täysin emittoivan mustan kappaleen lähettämään säteilymäärään. Musta kappale absorboi eli imee kaiken tulevan säteilyn itseensä, jolloin sen emissiivisyys on 1 eli 100 %. [13]

Mitä enemmän kappale heijastaa säteilyä, sitä pienempi on sen emissiivisyys. Yleisimmin pinnan (esimerkkeinä puu, lasi, jää, vesi, kumi, teippi, paperi, huopa, karkeapintainen teräs, lyijy ja tiili) emissiokerroin on 0,8–0,97. Vertailuksi esimerkiksi alumiinin emissiokerroin on noin 0,05–0,25 riippuen sen pinnan laadusta, ja kullin emis-

siokerroin on noin 0,02 eli se heijastaa lähes kaiken vastaanottamansa säteilyn. [12, s. 51; 13]

4.2 Emissiokertoimen määrittäminen

Eri kappaleilla ja pinnoilla on erilainen kyky emittoida lämpösäteilyä. Tätä säteilemiskykyä kutsutaan emissiokertoimeksi. Emissiokertoimesta käytetään symbolia ϵ (epsilon).

Emissiokertoimen määrittämiseen voidaan käyttää emissiokerrointaulukkoa, johon on määritetty emissiokertoimet yleisimmille materiaaleille. Kohteen pinta vaikuttaa emissiokertoimeen erittäin paljon. Helpoin tapa emissiokertoimen määrittämiseen on mitata pinnan lämpötilaa pinnassa kiinni olevalla anturilla eli esimerkiksi PT100-anturilla ja asettaa infrapuna-anturin emissiokerroin siihen arvoon, jossa antureiden lukemat ovat samat. Yhdenkin prosenttiyksikön virhe emissiivisyydessä voi aiheuttaa useammankin asteen virheen lämpötilamittauksessa. Jo yhden prosentin virhe emissiivisyydessä aiheuttaa jopa 60 °C:n virheen 3000 °C:n lämpötilassa. Materiaalin emissiokerroin on riippuvainen lämpötilasta ja aallonpituudesta. Silloin emissiosuhde muuttuu lämpötilan mukaan. [12, s. 51, 53]

Ympäristön lämpötila voi vaikuttaa mittaustuloksiin. Mitä alhaisempi pinnan emissiivisyys on, sitä enemmän ympäristö vaikuttaa mittaustulokseen. Jos mitattavan kohteen emissiokerroin on 0,3, infrapuna-anturi vastaanottaa 30 % mitattavasta lämpösäteilystä kohteelta ja ympäristöltä loput 70 %. Tällöin ympäristöstä mitattavan lämpösäteilyn osuus on merkittävän suuri. Alhaisten emissiokertoimien mittauksissa tulee olla tarkkana mittausympäristön lämpötilaan vaikuttavista tekijöistä.

Infrapuna-antureissa ei ole sellaista optiikkaa, jolla voisi muodostaa kuvaa kohteesta eri lämpötila-alueiden mukaan, vaan anturit mittaavat kohdetta keskiarvoisesti. Luotettavissa mittausjärjestelyissä onkin tärkeää, että mittarin keila mittaa ainoastaan kohdetta ja että keila ei osu kohteen lisäksi myös kohteen taustaan, sillä tämä vääristäisi mittaustulosta. [14]

Materiaali	Emissiokerroin (ϵ)
Teräs	0,35
Teräs (oksidoitunut)	0,85
Ruostumaton teräs	0,30
Ruostumaton teräs (vähän oksidoitunut)	0,40
Ruostumaton teräs (oksidoitunut)	0,80
Kupari	0,06
Kupari (oksidoitunut)	0,80
Alumiini	0,13
Alumiini (oksidoitunut)	0,40
Tiili	0,85
Asfaltti	0,85
Iho	0,99
Vesi (syvyys yli 50 mm)	0,95
Puu	0,85

Taulukko 1. Emissiokerrointaulukko [12, s. 51].

Emissiivisyys tarkoittaa siis kappaleen lähettämän säteilyn määrää suhteessa täysin mustan kappaleen lähettämän säteilyn määrään ja täysin mustan kappaleen emissiokerroin on 1. Emissiivisyys pienenee, kun heijastuvuus suurenee. Emissiivisyys voidaan ilmoittaa eri aallonpituusalueille. Useimmiten emissiivisyys ilmoitetaan pitkäaaltoiselle säteilylle. Emissiokertoimeen vaikuttava aallonpituusalue on siis myös tärkeää selvittää. [13]

Emissiokerroin voidaan laskea kaavalla ϵ (emissiokerroin) = $1 - \rho$ (heijastuvuus) - τ (läpäisykyky). Mustan pinnan emittoiman säteilyn intensiteetti on $I = \sigma \cdot T^4$, missä Stefan-Boltzmannin vakio on $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$. Jos kappaleen pinta-ala on A , lämpötila on T ja emissiokerroin ϵ , se säteilee lämpösäteilyä teholla $H = A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$. Stefan-Boltzmannin laissa mustan kappaleen säteilemä teho jaettuna pinta-alalla on suoraan verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin. Jos pinta ei ole täydellisesti emittoiva musta pinta, tulee intensiteetti korjata emissiokertoimella, joka on arvoltaan < 1 .

4.3 Haasteet emissiokertoimen määrittämisessä

Emissiokerroin on helpommin määriteltävissä, jos mitattava pinta on lämmönsitomiskyvyltään yhdenmukainen sekä tasalämpöinen. Tällöin mitattavan kohteen pinta on tasaisesti koko pintansa ja mitattavan kohdealueen leveydeltä saman lämpöinen kaikkialta.

Lisäksi kohteeseen ei kohdistu muutoksia kosteudessa eikä tuulessa tai esiinny merkittäviä lämpötilavaihteluita.

Opinnäytetyössä tutkittiin emissiokertoimen vaikutusta lämpötila-arvoihin. Pienennettäessä testianturin emissiokerrointa arvosta 1 arvoon 0,2 lämpötila nousi noin yhden celsiusasteen sisäilman lämpötilaa mitattaessa. Samalla lämpötila-arvot alkoivat heittelettiä. Näyttö vilkutti kahta lämpötila-arvoa vuorotellen, joista toinen oli 22,0 °C ja toinen 22,6 °C. Emissiokertoimella 1 lämpötila näytti tasaisemmin arvoja 21,2–21,4 °C.

Mitattavia pintoja tutkittiin myös lämpökameralla. Otettaessa kameralla lämpökuvia oli mahdollista jälkikäteenkin muuttaa emissiokerrointa lämpökuviiin Flir:n Quickreport 1.2 -ohjelmalla. Jotta lämpökuvan keskiarvolämpötila olisi täsmännyt kuvan kanssa samaan aikaan mitatun PT100-anturin lämpötila-arvoon, olisi emissiokerrointa pitänyt muuttaa lähes mahdottomiin arvoihin (alle 0,5). Tästä voi päätellä, että luonnonurmessa ja keinonurmessa on useita eri emissiokertoimia näissä mittausolosuhteissa.

Lämpökameralla mitattaessa mittausalustoja oli yöaikaankin lämpötilavaihtelua luonnonurmella noin 6 °C ja keinonurmella 4 °C. Lisäksi luonnonurmelta ja keinonurmelta pystyi havaitsemaan lämpökuvien avulla suuriakin vaihteluita niiden pintamateriaaleissa. Luonnonurmi voi koostua ruohosta, mullasta, eliöistä, muurahaisista, hiekasta, erilaisista kasveista (ruohikko, voikukat, ratamot, apilat). Myös keinonurmen alla olevat rakennusmateriaalit hiekka ja puukehikko vaikuttivat eri tavoin lämpösäteilyn määrään.

Jos emissiokerroin on asetettu liian suureksi, infrapuna-anturi voi näyttää matalampaa lämpötilaa kuin mitä lämpötila oikeasti on. Tutkimuksessa anturien emissiokertoimet on asetettu arvoon 1, sillä emissiokertoimen määrittämisessä luonnonurmelle ja keinonurmelle on useita epävarmuustekijöitä: ulkoilma ja sääolot ovat vaihtelevia, kosteuden muuttuminen ja tuulen vaikutus maan pinnan ja antureiden välillä. Tuulen aiheuttamat turbulenssivirtaukset vaikuttavat säteilyn kulkeutumiseen maasta havait sijalle. Lisäksi kohteen lämpötila (onko -20, 0 vai +20 °C) vaikuttaa emissiivisyyteen. Kohteen pinnan ominaisuudet vaihtuvat kesällä ja talvella (kuiva nurmi, märkä nurmi, lumi, jää, jäähile, lumen eri muodot). Keskiarvoemissiivisyys olisi todennäköisesti lähellä arvoa 0,95, mutta asetimme testauksen ajaksi vakioarvoksi 1, sillä perustelua arvolle 0,95 ei löydy muualta kuin emissiokerrointaulukoista. Tutkimuksessa mukana olleeseen Apogee SI-131 -anturiin ei emissiokerrointa pystynyt edes määrittämään.

5 Anturit

Vertailussa ja mittausjärjestelmässä oli yhteensä yhdeksän anturia eli neljä erilaista infrapuna-anturia ja PT100-antureita seuraavasti:

- Heitronics KT15.85 IIP (luonnonnurmi)
- Lumasense Technologies IN 510 (luonnonnurmi)
- 2 x Micro-epsilon CT-SF22-C3 (luonnonnurmi ja keinonurmi)
- Apogee SI-131 (luonnonnurmi)
- 4 x PT100 (luonnonnurmi 5 cm, keinonurmi 5 cm, luonnonnurmen pinta ja keinonurmen pinta).

Testin anturit on valittu muiden maiden (Yhdysvallat, Kanada ja Saksa) ilmatieteen laitosten yhteyshenkilöiden suositusten perusteella. Ilmatieteen laitos oli tilannut anturit jo valmiiksi ennen tutkimukseni aloittamista.

Infrapuna-anturit olivat hinnaltaan 300–4000 €. Infrapuna-antureista kaksi anturia oli analogisia ja kaksi anturia oli sarjaporttimuotoisia (RS232). Micro-epsilon-antureita oli kaksi kappaletta. Anturivertailutaulukossa (liite 2) on vertailtu antureiden yleisominaisuuksia.

Vertailuantureina käytettiin neljää analogista PT100-anturia, joista kaksi PT100:sta mittasi WMO:n standardien mukaisesti 5 cm:n korkeudelta luonnonnurmelta ja keinonurmelta. Kaksi PT100:sta mittasi suoraan kiinni maanpinnasta luonnonnurmelta ja keinonurmelta.

5.1 Infrapuna-anturit

5.1.1 Infrapuna-anturin toimintaperiaate

Infrapuna-anturit käyttävät lämpötilanmittausmenetelmää, jossa erilaisten pintojen lämpötilaa mitataan koskettamatta mitattavaa aluetta. Anturi muodostuu optiikasta, tunnistimesta ja elektroniikasta. Infrapuna-anturit ovat paljon herkempiä ja nopeampia antureita mittaamaan lämpötilaa kuin kosketusanturit (esimerkiksi PT100). Siksi infrapuna-anturit soveltuvat hyvin kohteisiin, joissa lämpötilavaihtelut ovat suuria ja äkillisiä. Kosketuksettomuus mittauskohteeseen parantaa myös käyttäjän työturvallisuutta. PT100-

anturi sopii hyvin operatiivisen käytön lisäksi tutkimuksen infrapuna-antureiden vertailtavaksi anturiksi, sillä ulkoilman lämpötila ei muutu äkillisesti, vaan melko tasaisesti. Tämän vuoksi ei anturin nopea reagoiminen ulkolämpötilamittauksissa ole niin tärkeä tekijä. [14]

Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus ja voimakkuus riippuvat kohteen lämpötilasta sekä kohteen materiaalista. Infrapuna-anturit mittaavat mitattavan kohteen säteilemää infrapunasäteilyä eli lämpösäteilyä valitulla aallonpituuskaistalla. Infrapuna-alueella lämpösäteily kulkee mittauspään linssille, josta säteet fokusoituvat infrapunatunnistimelle. Tunnistimen tehtävänä on muuttaa saapunut säteily lämpötilaan verrannolliseksi sähköiseksi signaaliksi. Mitä enemmän säteilyä on, sitä voimakkaampi on signaali. Infrapuna-anturin mittaama arvo on anturin mittausalueen lämpötilojen keskiarvo. [14; 15, s. 16; 16, s. 54]

Infrapuna-anturin elektroniikka muokkaa signaalin halutulle lämpötila-alueelle. Ulostulosignaali voi olla joko analoginen tai digitaalinen. Sarjamuotoisissa antureissa signaalimuunnos tehdään jo anturin sisällä. Infrapuna-anturit ovat erittäin nopeita, eli mittausulos päivittyy jatkuvasti toisin kuin hitaammin reagoivalla PT100:lla, jonka vasteaika on suurempi. [14]

Tyypillisesti infrapuna-antureiden mittausalueet ovat suuria, jopa välillä $-50\dots+3000$ °C. Infrapuna-antureita käytetäänkin erityisesti teollisuuden osa-alueilla, kun mitattava lämpötila on korkea tai nopeasti muuttuva, mittausetäisyys on pitkä, mittausympäristö on räjähdysvaarallinen tai kohde on liikkuva. Teollisuudessa ollaan kiinnostuneita siitä, onko lämpötila esimerkiksi jossakin hiilikattilassa 500 °C vai 900 °C. Tällöin on yhden tekevää, jos anturin mittaama arvo eroaa oikeasta lämpötilasta jopa kymmenenkin celsiusastetta. Kosketusanturia ei voi tällöin käyttää, koska anturi voi sulaa tai sen kaapelointia on mahdotonta toteuttaa. [12, s. 49; 16, s. 52]

Infrapuna-anturit sijoitetaan mittaamaan lämpötilaa kahden metrin korkeuteen, jotta ne eivät haudaudu lumeen tai heinikkoon. Mitä korkeammalla anturi on, sitä enemmän tuulen voimakkuus vaikuttaa säteilyn kulkeutumiseen ja vastaanottamiseen. Anturit pystyvät mittaamaan kohteita miltä etäisyydeltä tahansa, mutta kauempaa mitattaessa mittauskeilan koko on isompi. Säteilyn voimakkuus on sitä heikompi, mitä suurempi on mittausetäisyys, mutta vastaavasti säteily tapahtuu suuremmalla alueella, mikä kompensoi säteilylähteen etäisyyden ja voimakkuuden suhdetta. Mitattavan kohteen tulee

olla vähintään yhtä iso kuin mittauskeila-alueen, jottei anturi ota keskiarvoistukseen mukaan taustan lämpötilaa. [10, s. 532; 14; 16, s. 52]

Mittausvirheitä voivat aiheuttaa tuuli, kosteus, auringon säteily, emissiokerroin, pöly, savukaasut, höyry, anturien mittausepätarkkuus, anturin ja kohteen välisestä etäisyydestä johtuva lämpötilaero sekä kalibroinnin ja virityksen epätarkkuus. Maanpinnan minimilämpötilan mittauksessa ollaan kiinnostuneita äärimmäisen tarkkoista mittaustuloksista, jolloin yli 0,1 asteenkin virheet mittauksissa ovat jo merkittäviä.

Pyrometri on korkeille lämpötiloille tarkoitettu termometri eli lämpömittari, joka perustuu pietsokiteen ominaisuuksiin säteilyn lämmittäessä sitä. Termoparin jännite muuttuu lämpösäteilyn vaikutuksesta ja se on suhteellisen hidas anturi, joten datankeruuväliä on hyvä rajoittaa sopivaksi.

Anturien puhdistaminen hämähäkin verkoista, liasta ja pölystä on erittäin tärkeää mittausten luotettavuuden varmistamiseksi. Puhdistamisessa suositellaan käytettäväksi esimerkiksi pumpulipuikkoa, paineilmaa tai vaikeammissa tapauksissa deionisoitua vettä, puhdistusspriitä tai laimennettua happoa kuten etikkaa. Äärimmäisissä tapauksissa voidaan puhdistukseen suositella myös asetonia. Tärkeintä on, että liuotin tekee puhdistustyön. Linssin kovaa käsittelyä ja naarmuttamista tulee välttää. [17; 18]

5.1.2 Heitronics KT15.85 IIP

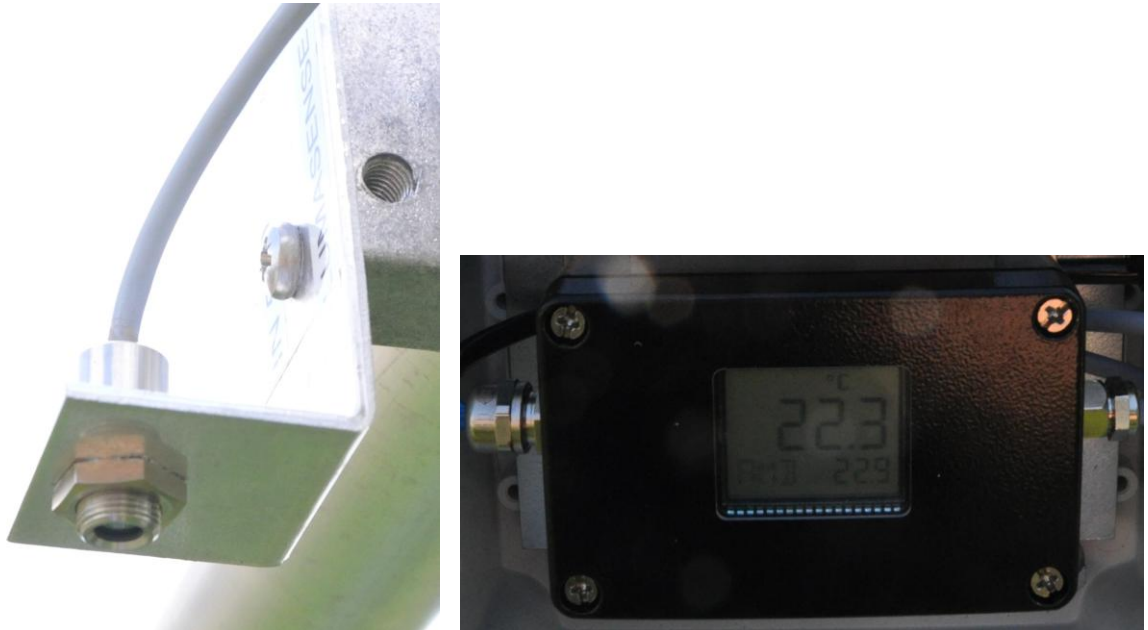


Kuva 4. Heitronics KT15.85 IIP -infrapuna-anturi.

Tutkimuksessa käytetty infrapuna-anturi Heitronics KT15.85 IIP (Infrared Radiation Pyrometer) on yhteydessä mittausjärjestelmään RS-232-sarjaliikenteen avulla. Anturissa on mahdollisuus myös analogiseen tiedonsiirtoon. Kyseinen anturi on tarkoitettu erityisesti meteorologiseen mittaukseen. Tämän korkeita lämpötiloja mittaamaan tarkoitettun kokonaissäteilypyrometrin lämpötilarajat on modifioitu tehtaassa erityispyynnöstä lämpötila-arvoihin $-50...+50$ °C. Siksi anturi soveltuu myös kovilla pakkasilla ulkokäyttöön. Heitronics KT15.85 IIP -anturi pystyy mittaamaan ilman erillistä anturin lämpösuojaaja vain kaikki yli -20 °C:n lämpötilat ja se reagoi erityisen herkästi aallonpituusalueella $9.6-11.5$ μm . Suojausluokka on IP65 eli anturi on täysin pölytiivis ja se kestää vesiruisun joka suunnasta. [19]

Heitronics KT15.85 IIP -anturille tehdyt käyttöönotto-ohjeet ovat liitteessä 3 ja valmistajan ilmoittamat tekniset tiedot ovat liitteessä 4.

5.1.3 Lumasense Technologies IN 510



Kuva 5. Lumasense IN 510 -infrapuna-anturi. Anturin pää kuvassa vasemmalla asennettuna tekemääni kiinnikkeeseen. Anturin elektroniikkaosa kuvassa oikealla.

Lumasense Technologiesin valmistama sarjamuotoinen omalla LCD-näytöllä varustettu IN 510 -infrapuna-anturi on toinen tutkimuksessa käytetty anturi. Sen optinen erottelukyky on 10:1. Tämä tarkoittaa mitattavan kohteen etäisyyden suhdetta mitattavan alueen kokoon nähden. Tällöin kahden metrin etäisyydeltä mitattuna mittausalueen halkaisija on 0,2 metriä. Anturiosa on vapaana signaalijohdon/elektroniikkalaatikon päässä, joten tein sille alumiinista kiinnikkeen, johon sen voi ruuvata kiinni (kuva 5). Pienen anturin pään ansiosta anturi sopii ahtaisiinkin paikkoihin. Suojausluokka on IP65 eli anturi on täysin pölytiivis ja se kestää vesiruisun joka suunnasta. Lumasense IN 510 -anturi pystyy mittaamaan ilman erillistä anturin lämpösuojaaja vain kaikki yli 0 °C:n lämpötilat. [20]

Lumasense IN 510 -anturille tehdyt käyttöönotto-ohjeet ovat liitteessä 3 ja valmistajan ilmoittamat tekniset tiedot ovat liitteessä 5.

5.1.4 Micro-epsilon CT-SF22-C3

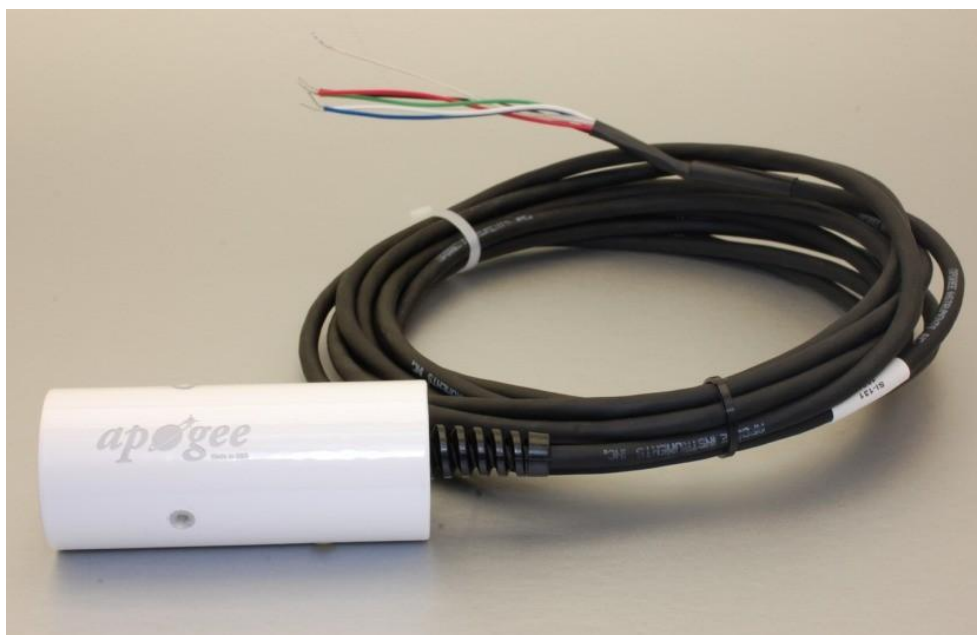


Kuva 6. Micro-epsilon CT-SF22-C3 -infrapuna-anturi [17].

Kolmas tutkimuksessa käytetty anturi on analoginen infrapuna-anturi Micro-epsilon CT-SF22-C3. Anturi on varustettu omalla navigointinäppäimistöllä ja LCD-näytöllä. Anturiosa on vapaana signaalijohdon/elektroniikkalaatikon päässä, joten tein sille alumiinista kiinnikkeen, johon sen voi ruuvata kiinni. Pieni anturinpää mahdollistaa ahtaat paikat. Suojausluokka on IP65 eli anturi on täysin pölytiivis ja se kestää vesiruiskun joka suunnasta. Anturin optinen erottelukyky on 22:1. Tämä tarkoittaa, että kahden metrin etäisyydeltä mitattuna mittausalueen halkaisija on 0,09 metriä. Tehdasasetuksilla anturin lämpötilarajat ovat $-50\dots+975$ °C. Tutkimuksessa anturin mittausalueeksi määriteltiin $-50\dots+50$ °C. Lähtösignaali on 0–5 V. Anturiin on saatavilla yhteys myös sarjamuuntimen avulla. Tämä toiminto ei ollut tutkimuksessa käytössä puuttuvien lisäosien vuoksi. [17]

Micro-epsilon CT-SF22-C3 -anturille tehdyt käyttöönotto-ohjeet ovat liitteessä 3 ja valmistajan ilmoittamat tekniset tiedot ovat liitteessä 6.

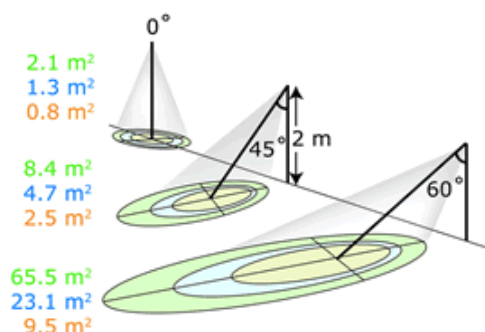
5.1.5 Apogee SI-131



Kuva 7. Apogee SI-131 -infrapuna-anturi [21].

Neljäs tutkimuksessa käytetty anturi on analoginen infrapuna-anturi Apogee SI-131. Anturi on vedenkestävä ja tarkoitettu ulkokäyttöön. Tämä anturi mittaa kahta eri lämpötilaa: laitteen omaa lämpötilaa eli kahden metrin lämpötilaa sekä kohteen lämpötilaa käyttäen laskukaavassa omaa lämpötilaansa. Kohteen lämpötilan laskenta on siis riippuvainen anturin oman lämpötilan mittauksesta. [18]

Type	Model	Half Angle
Standard	SI-111	22°
Narrow	SI-121	18°
Ultra-Narrow	SI-131	14°



Kuva 8. Apogee SI-131 -anturin puolikulma-ominaisuus on 14°, joten sen mittauskeila on huomattavasti laaja-alaisempi kuin muiden tutkimuksessa käytettävien antureiden. Kahden metrin korkeudessa mittauskeilan säde on 0,5 metriä, jolloin mittauskeilan halkaisija on yksi metri. Tämä voidaan laskea kaavalla $14^\circ = \frac{r}{2}$, josta saadaan säde $r = 0,499$ (m). [22]

Apogee S1-131 -anturissa on NTC-termistori, jonka laskentavastus on 24,9 k Ω ja jonka resistanssi pienenee lämpötilan kasvaessa. Termistori mittaa anturin omaa lämpötilaa mittaamalla vastuksen yli jännitteen. Ulostulo on linearisoitu. Vastuksen lämpötila on suoraan verrannollinen lämpötilaan. [18]

Termistorin resistanssi on $R_t = 24900 \left(\frac{V_{EX}}{V} - 1 \right)$, missä V_{EX} on herätinjännite ja V mitattu jännite. Lämpötila saadaan laskettua resistanssin ja Steinhart-Hartin vakiokertoimien avulla.

$$\text{Lämpötila } T_k = \frac{1}{A+B \cdot \ln(R_T)+C(\ln(R_T))^3}$$

Steinhart-Hartin kertoimet:

$$A = 1.129241 \cdot 10^{-3}$$

$$B = 2.341077 \cdot 10^{-4}$$

$$C = 8.775468 \cdot 10^{-8}$$

Lämpötila T_k on kelvineinä. Lämpötila celsiusasteina saadaan laskemalla:

$$T_c = (T_k - 273,15) \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Kohteen lämpötilan celsiusasteina saa laskettua seuraavasti:

$$T_{\text{kohde}}(^{\circ}\text{C}) = \left(\left((T_c + 273,15)^4 + (mC2 \cdot T_c^2 + mC1 \cdot T_c + mC0) \cdot V_2 + bC2 \cdot T_c^2 + bC1 \cdot T_c + bC0 \right)^{0.25} - 273,15 \right) \text{ } ^\circ\text{C}.$$

V_2 on kohteen mitattu jännite millivolteina. Arvot $mC0$, $mC1$, $mC2$, $bC0$, $bC1$ ja $bC2$ ovat anturin kalibroitikertoimet (CRBasicin mukaisesti), jotka on määritetty tehtaalla. Ne löytyvät anturin mukana tulleesta kalibroitodistuksesta. [23]

Apogee SI-131 -anturin asetuksiin ei tehty käyttöönotossa muutoksia. Ainoastaan data-loggerin tiedonkeruuohjelmaan tuli asettaa oikea laskentakaava sekä anturille ominaiset kalibrointi-arvot.

5.2 PT100-platinavastusanturi

Tutkimuksen infrapuna-antureiden vertailuanturina on Theodor Friedrichs & Co.:n PT100, jota käytetään operatiivisissa mittauksissa monilla sääasemilla. Se on säänkestävä platinavastusanturi. Anturipään osa on suojattu ruostumattomalla teräksellä ja kaapeli silikonipäälysteellä. Anturin tarkkuusluokka on tehtaalta tullessa B 1/3 DIN eli toleranssi on $\pm 0,1$ °C nollassa celsiusasteessa. Jaottomana B-luokka noudattaa käyrää $dt = \pm(0.3 + 0.005 \cdot |t|)$ °C. Tällä luokituksella ei kuitenkaan ole merkitystä tutkimuksessa, sillä anturit kalibroidaan ja viritetään erikseen Ilmatieteen laitoksen laboratoriossa. PT100-anturin tarkkuudeksi luvataan Ilmatieteen laitoksella kalibroinnin jälkeen $\pm 0,05$ °C ja dataloggerin kanavien viritysten jälkeen $\pm 0,1$ °C. Epävarmuuden pieneen kasvuun vaikuttaa dataloggerin stabiilius eri lämpötiloissa, koska kanavien viritys tehdään vain yhdessä lämpötilassa. Lämpötilan muuttuessa voi myös mittausvirhe kasvaa. [24]



Kuva 9. PT100-anturi [24].

PT100 on yleisesti käytetty analoginen vastuslämpötila-anturi, jonka resistanssi on suoraan verrannollinen lämpötilaan. PT tarkoittaa platinaa ja 100 sitä, että platinavastuksen nimellisvastus 0 °C:ssa on mitattuna 100 Ω (ohmia). Ohmi kuvastaa sähkövirtaa vastustavaa ominaisuutta ja sen laskentakaava on R (resistanssi) = U (jännite) \times I (virta). [25]

Platina on jalometalli, ja se soveltuu siten hyvin korkeidenkin lämpötilojen mittaukseen tasaisella käyttäytymisellään. PT100-anturin tuntoelin on ohut kalvo tai platinalanka. Vastuksen muutos on negatiivinen tai positiivinen riippuen lämpötilan muutoksesta. Yhden asteen nousu lämpötilassa suurentaa vastuksen resistanssia noin 0,385 Ω .

PT100 ei ole kuitenkaan täysin lineaarinen eli sen lineaarisuudessa on poikkeamia. Vastuksen lämpötilariippuvuutta kuvaa vastuksen materiaalin lämpötilakerroin. Testissä käytettyjen PT100-anturien mittausalueeksi valmistaja ilmoittaa -50...+80 °C. [12, s. 41; 26; 27, s. 90]

Lämpötila °C	Resistanssi Ω
-50	80,31
0	100,00
50	119,40
100	138,50
150	157,31
200	175,84

Taulukko 2. PT100-anturin resistanssit eri lämpötiloissa [25].

Tarkin ja luotettavin mittaus saadaan 4-johdinmittauksella, jota vertailun PT100-anturit käyttävät. Toinen johdinpari syöttää vakiovirran mittausvastukseen ja toinen johdinpari mittaa vastuksen jännitteen. Tämä eliminoi mittajohtimien resistanssin vaikutuksen mittaustulokseen.

Platinavastusanturit ovat erittäin tarkkoja hyvän stabiiliutensa vuoksi. PT100-anturin tarkkuudeksi luvataan Ilmatieteen laitoksella kalibrointien ja viritysten jälkeen 0,1 °C. Tässä työssä tarkastellaankin toista, infrapunatekniikkaan keskittyvää mittausmuotoa, ja sitä verrataan PT100-anturiin. Tutkimuksessa keskeisenä pääpiirteenä on infrapuna-antureiden mittaustarkkuus, joka tarkoissa meteorologisissa mittauksissa olisi hyvä olla 0,2 °C tai parempi. [3, s. 44; 27, s. 91]

6 Laitteisto ja ohjelmat

6.1 Dataloggeri

Mittauksissa tiedonkeruuseen käytettiin Vaisalan QML201-dataloggeria. Dataloggerin toiminta perustuu jatkuvaan mittaukseen ja mittaustiedon tallentamiseen, jolloin saadaan reaaliaikaisen tiedon lisäksi historiatiedot mittauksista. Näin ollen mittauksissa esiintyvät poikkeamatkin voidaan selvittää helpommin, kun tiedetään, että mikä anturi-

mittauksen tilanne on ollut mihinkin aikaan. Tiedonkeruussa käytetään hyväksi rsync-ohjelmaa, jonka avulla voidaan lisätä aina uusin arvo tiedostoon aikaisempien arvojen jatkeeksi. Rsync on ohjelma, jolla voidaan synkronoida tallennustiedosto ajantasaisesti, jolloin vain uudet bitit ja muutokset siirtyvät tallennusaihioon.

Dataloggeri kerää mittausdatan kaikilta analogisilta antureilta. Analoginen lähtöviestisignaali vastaa täsmälleen sitä arvoa, jonka anturi mittaa. Se siirretään anturilta dataloggerille. Dataloggeri suorittaa saapuneen viestin jälkikäsitteilyn eli muuntaa sen digitaaliseen muotoon Maws Lizard -ohjelmassa määritetyn datankeruuohjelman laskentojen avulla.

Maws Lizard -ohjelmalla määritetään, mitä analogisia antureita tulee millekin dataloggerin kanavalle (channel), mikä on mittaustapa, mittausarvorajat (minimum output value ja maximum output value) ja mitä laskutoimituksia ja missä järjestyksessä dataloggeri suorittaa saapuville tuloarvoille. Dataloggeri hakee anturilta mittausarvon kahden sekunnin välein. Näistä arvoista dataloggeri laskee tasaminuutein minuutin keskiarvon, minuutin minimiarvon, minuutin maksimiarvon ja minuutin hajonnan, jotka tallennetaan päivälokitydostoihin samalla, kun Python-ohjelma hakee ja tallentaa dataloggerilta tiedot sulautetun Linux-tietokoneen SD-muistikortille. Tutkimuksessa käytetystä Maws Lizard -ohjelmasta antaa yleiskuvan liite 8.

6.2 Sulautettu Linux-tietokone

Työssä toisena tiedonkeruulaitteena käytössä oli sulautettu Linux-tietokone. Linux on paljon käytetty käyttöjärjestelmä, ja se on tunnettu erityisesti avoimesta lähdekoodistaan.

Python-ohjelma on käynnissä sulautetussa Linux-tietokoneessa, ja se kerää kahden sekunnin välein sarjamuotoisilta antureilta mittausdataa, josta ohjelma laskee tasaminuutein minuutin keskiarvon, minuutin minimiarvon, minuutin maksimiarvon, minuutin maksimiarvon ja minimiarvon erotuksen ja minuutin hajonnan, jotka tallennetaan päivälokitydostoon. Ohjelma hakee myös dataloggerilta dataloggerin keräämän datan samanaikaisesti sarjamuotoisten anturien datan kanssa ja tallentaa ne omiin päivälokitydostoihinsa sulautetun Linux-tietokoneen SD-muistikortille.

Testin sarjaliikenneanturit käyttävät RS-232-tietoliikenneporttia tiedonsiirtoon, lähettämiseen ja vastaanottamiseen. RS-232 on yksi digitaalisista sarjaliikennestandardeista, jota voi tiedonsiirroltaan verrata morsetukseen eli peräkkäiset eripituiset ja eriarvoiset (0 tai 1) signaalit muodostavat eri arvoja. Anturilla mitattu analoginen suure muunnetaan jo valmiiksi digitaalseksi A/D-muuntimella anturin päässä, ja tämän jälkeen data siirtyy digitaalisena eteenpäin datan keräävälle ja käsittelevälle prosessointilaitteelle. [28; 29]

Tutkimustyössä mittausjärjestelmän sulautetun Linux-tietokoneen sarjaportteihin P2 (QML201C-dataloggeri), P3 (Lumasense IN 510) ja P4 (Heitronics KT15.85 IIP) voitiin muodostaa yhteys Putty-ohjelmalla ja Picocom-terminaali-ohjelmalla joko suoraan aliverkon IP-osoitteen kautta tai langattoman 3G-modeemin IP-osoitteen kautta. Testiasemalle asentamani mittauksien keruu toimi pelkästään 3G-yhteyden välityksellä. Ohjeet Puttyn ja sulautetun Linux-tietokoneen välisen yhteyden muodostamiseen ovat liitteessä 9.

Terminaaliyhteyttä muodostettaessa tuli ottaa huomioon tehdasasetuksien yhteysparametrit, jotta yhteys saatiin toimimaan. Määriteltävät parametrit tiedonsiirtoon ovat tyyppiä 9600 Baud, 8 Data, 1 Stop, No Parity.

Termi ”9600 baud” tarkoittaa, että tiedonsiirto on 9600 bittiä sekunnissa (bps). Pariteetti (parity) voi olla joko parillinen tai pariton. Pariteetin ollessa parillinen (even) koodiviestissä on parillinen määrä 1-bittejä. Pariteetin ollessa pariton (odd) koodiviestissä on pariton määrä 1-bittejä. Pariteettibitti siis tarkistaa, onko lähetetty paketti oikein vai ei. Jos pariteetti ei toteudu jossakin sanassa, tiedetään, että sanomassa on virhe. Stop-bitti lisätään viestin loppuun. Se ilmaisee, että viesti on päättymässä. Termi ”8 data” puolestaan kertoo, että viestinäkymässä käytetään 8 bitin jonoja. [28; 29]

6.3 Muut oheislaitteet

Tutkimuksessa käytettyyn mittausjärjestelmään kuuluvat myös seuraavat laitteet:

- langaton 3G-modeemi
- 15 VDC jännitelähde, joka muuntaa verkkojännitteen antureille sopivaksi
- 30 mA:n vikavirtasuojakytkin
- ylijännitesuoja
- riviliittimet.

Heitronicsin anturi toimii jännitealueella 10,5–30 VDC, Lumasensen anturi jännitealueella 10–30 VDC ja Micro-epsilon-anturit jännitealueella 8–36 VDC. Nämä anturit käyttävät 15 VDC:n jännitesyöttöä. Apogeen anturi saa tarvitsemansa 2,5 V:n jännitesyötön suoraan dataloggerilta.

7 Kytkennät

Analogiset anturit liitettiin QML201-dataloggeriin ja sitä kautta sulautettuun Linux-tietokoneeseen. Sarjamuotoiset anturit liitettiin sulautettuun Linux-tietokoneeseen riviliittimien kautta. Analogisten anturien kytkennät dataloggeriin ovat liitteessä 10. Dataloggerin kytkentäkanavien liitännätiedot ovat liitteessä 11.

Sarjaliikennekytkennöissä 9-pinnisestä kaapeliliitännästä käytetään tiedonsiirtoon kolmea liitintä:

- 2. liitin: RxD = vastaanotettava data (receive data)
- 3. liitin: TxD = lähtevä data (transmit data)
- 5. liitin: GND = maa (ground).

Muilla liittimillä voidaan ottaa käyttöön erilaisia kättelyitä. Kättely eli handshaking keskustelelee laitteen kanssa siitä, milloin dataa voidaan lähettää. Kättelyä ei käytetä näissä mittauksissa. [29]

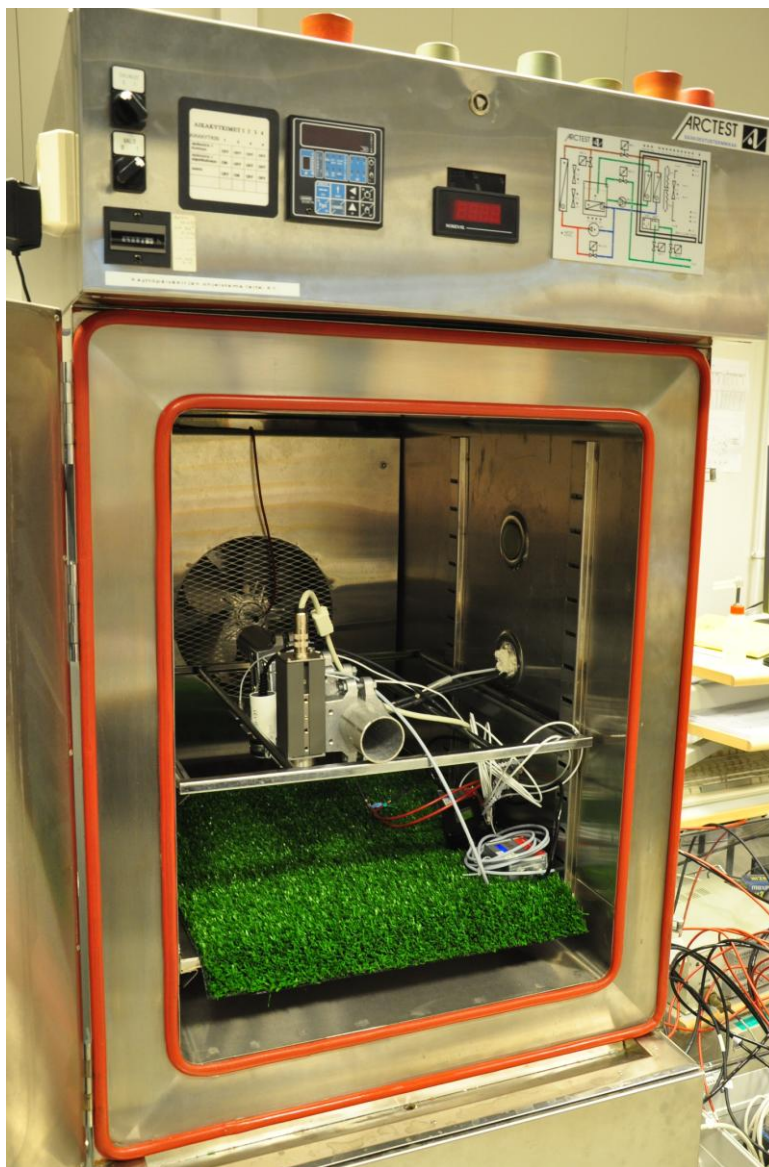
Tutkimuksessa asennetusta mittausjärjestelmästä piirrettiin Visio-ohjelmalla kytkentäkaavio (liite 12), jonka lähteenä käytettiin satamasääsaman kytkentäkaaviota.

8 Antureiden kalibrointi ja viritys

Ilmatieteen laitoksen säämittauksissa säähavaintojen tulee olla tarkkoja - yhdenkin asteen heitto mittauksessa on meteorologisessa mittauksessa epätarkka. Tutkimuksessa keskeisenä pääpiirteenä on infrapuna-antureiden mittaustarkkuus, joka tarkoissa meteorologisissa mittauksissa olisi hyvä olla 0,2 °C tai parempi. Nykyisin käytössä olevien PT100-antureiden mittaustarkkuus on dataloggerin virituksen jälkeen 0,1 °C. Valmistajalta hankitaan tietyn tarkkuusluokan antureita, mutta ne kalibroidaan ja tutkitaan vielä Ilmatieteen laitoksella ennen käyttöön ottoa. Antureille tehdään omat kalibroitidistuksensa, joihin on kirjattu kalibroinnin tulokset ja korjauskertoimet.

Tutkimuksessa dataloggerin PT100-anturille tarkoitetut kanavat kalibroidiin näiden jo Ilmatieteen laitoksella valmiiksi määritettyjen kertoimien avulla kalibroitaisalkua ja terminaalilyhteyttä käyttäen. Kalibroitaisalkusta sai simuloitua eri lämpötila-alueita (-60 °C, -40 °C, -20 °C, 0 °C, +20 °C ja +40 °C) suoraan dataloggerille. Kalibroinnin jälkeen laskettiin dataloggeriin tehtävät korjaukset a ja b, jotka syötettiin terminaaliohjelman kautta dataloggeriin. Liitteenä on pöytäkirja lämpötilamittauksen virityksestä (liite 13).

Tutkimuksessa infrapuna-antureiden kalibroitikertoimien määrittämisessä käytettiin erillistä Ilmatieteen laitoksen laboratoriotiloissa sijaitsevaa kalibroitikaappia. Infrapuna-anturit kalibroidiin neljässä eri kalibroitipisteessä: -20 °C, 0 °C, +20 °C ja +40 °C. Kalibroinnin tarkoituksena on mitata anturin arvoa eri oletuslämpötiloissa ja katsoa, täsmäävätkö arvot. Mittauskohteena oli keinonurmi. Emissiokertoimeksi kaikkiin antureihin asetettiin vakioarvo 1.



Kuva 10. Anturit ja elektronikka tutkimuksessa käytetyssä kalibrointikaapissa Ilmatieteen laitoksella. Mittausjärjestelmään kytkettyjen anturien johdinten läpiviynti on tiivistetty asianmukaisesti.

Kalibrointi kaapissa, mittauspisteet -20, 0, +20 ja +40 °C (emissiokerroin = 1)		
Kalibrointikaapin asetus (°C)	Kaapin PT100-vertailuanturi (°C)	Aika 31.5.2013 (h:mm)
-20	-19.8	9:07
0	0.3	11:08
20	20.3	13:20
40	40.4	15:08

Taulukko 3. Kaappiin asetettu lämpötila-arvo on suuntaa antava. Vertailuanturina kalibroinnissa käytettiin kaapin sisällä ollutta PT100-anturia.

Kalibrointiajon jälkeen tutkittiin kerättyä mittaustietoa eri lämpötiloissa ja näille laskettiin jokaisella anturilla mitatuille jokaiselle lämpötilapisteelle keskiarvolämpötilat, joista piirrettiin lineaarinen suora. Tästä määritettiin laskennallisesti jokaiselle anturille kulmakerroin ja vakio, joiden avulla säädettiin anturit näyttämään lähemmäs vertailuanturiksi valitun PT100_2:n mittaamia arvoja, jonka todettiin korreloivan parhaiten kalibrointi-kaapin PT100:n kanssa ja olevan siten lähimpänä totuusarvoa.

Anturit PT100_3 (luonnonnurmi, pinta) ja PT100_4 (keinonurmi, pinta) eivät olleet mukana kalibroinnissa, sillä ne lisättiin jälkikäteen mukaan mittausjärjestelmään. Kalibroinnin avulla nähtiin, miten anturit käyttäytyvät suhteessa toisiinsa nähden. Esimerkiksi Lumasense IN 510 -anturi lakkasi odotetusti toimimasta kalibroinnin aikana, kun lämpötila laski 0 °C:n alapuolelle (taulukko 4).

Lämpötila (°C)	SF22_1ave	SF22_2ave	SI131_Tave	PT100_2ave	PT100_1ave	IN510-Tavg	KT15-Tavg
-20	-19.816806	-23.979722	-20.507778	-19.782778	-19.779028		-20.268028
0	-0.016667	-3.148333	-0.291667	0.267619	0.299286	-1.38681	-0.114738
20	19.91037	17.597222	19.584259	20.468519	20.626296	19.711944	19.789648
40	40.483462	39.021154	39.926154	40.251923	40.45	40.283923	40.329538

Taulukko 4. Kalibrointitaulukko. Kaikki luvut ovat celsiusasteita.

	SF22_1ave	SF22_2ave	SI131_Tave	PT100_2ave	PT100_1ave	IN510-Tavg	KT15-Tavg
Vakio	0.18878001	3.26124488	0.66588448	0	-0.0611033	1.58381804	0.43639893
Kulmakerroin	0.99728316	0.95489986	0.99562855	1	0.99646947	0.95952076	0.99303579

Korjatut arvot:	SF22_1ave	SF22_2ave	SI131_Tave	PT100_2ave	PT100_1ave	IN510-Tavg	KT15-Tavg
-20	-19.574187	-19.636988	-19.752245	-19.782778	-19.770301		-19.690478
0	0.17215829	0.25490213	0.37549248	0.267619	0.23712603	0.25314506	0.32245999
20	20.0450567	20.0648298	20.1645319	20.468519	20.492371	20.4978375	20.0882277
40	40.5622549	40.5225395	40.4175035	40.251923	40.2460869	40.2370784	40.4850736

Taulukko 5. Antureille lasketut vakiot ja kulmakertoimet sekä niillä lasketut korjatut arvot. Vakiot ja kulmakertoimet ovat yksikkösuureita ja korjatut arvot ovat celsiusasteita.

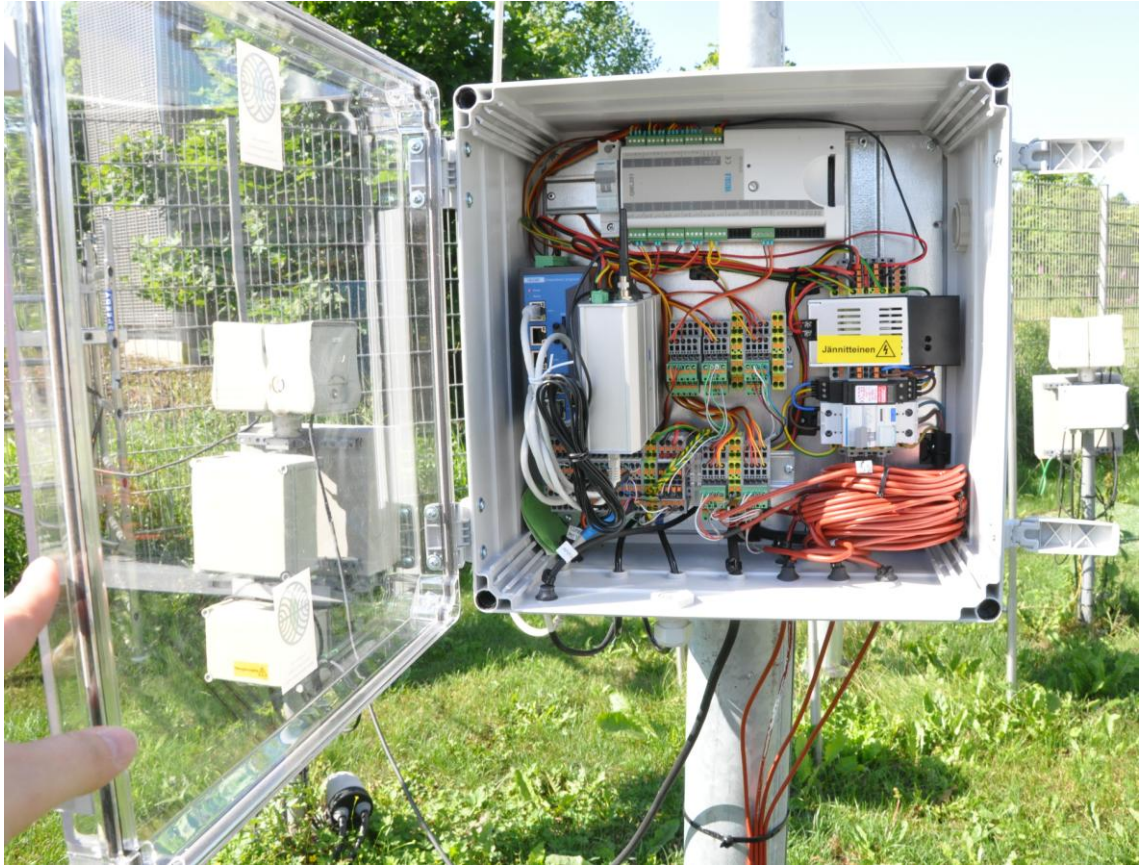
Kalibrointia ja virityksen merkitystä eri lämpötiloissa selventävät kuvaajat A, B, C, D, E, F, G ja H (liite 14). Kuvaajista näkee oletuslämpötiloissa mitattujen korjaamattomien arvojen sekä korjattujen arvojen erot.

9 Mekaaninen asennus

Tutkimuksessa kartoitettiin ulkoa sopiva testialue mittauksia varten. Anturit asennettiin kahden metrin korkeuteen. Jos infrapuna-antureita otetaan käyttöön Pohjois-Suomessa, tulisi mittauskorkeus olla 2,5 metriä suuremman lumimäärän vuoksi. Tarpeeksi suuri mittauskorkeus edesauttaa välttämään lumeen ja heinikkoon hautautumista. Se voi myös johdattaa ukonilmalla salamat mittauskehikkoa pitkin maahan, kuten testin aikana kävi, jolloin Heitronicsin anturi hajosi lopullisesti erittäin todennäköisesti juuri salamaniskun vuoksi. Ukonilman aikana kaikki järjestelmän sulakkeet laukesivat, jolloin koko mittausjärjestelmä pysähtyi. Kaikki anturit oli maadoitettu asianmukaisesti, mutta harvinaisen rankka ukonilma oli yhdelle tutkimuksen anturille liikaa. Se ei kuitenkaan ollut ainoa rikkoutunut laite. Laitteita hajosi aseman muistakin mittausjärjestelmistä.



Kuva 11. Yleiskuva asennetuista mittausjärjestelyistä Kumpulan testiasemalta.



Kuva 12. Yleiskuva kytkennöistä ja koteloinnista Kumpulassa. Ylhäällä on Vaisalan QML201-dataloggeri. Vasemmalla näkyvät sulautettu Linux-tietokone ja Violan 3G-modeemi. Keskellä ja alhaalla ovat riviliittimet, joihin on liitetty sulautettu Linux-tietokone, dataloggeri ja anturit. Lisäksi järjestelmässä on 15 VDC jännitemuuntaja, vikavirtasuojakytkin ja ylijännitesuoja. Kotelon vesitiivisyys, joten siihen lisättiin kaksi verkkomaista ilmareikää, jotteivät elektroniset osat ylikuumene.



Kuva 13. Elektroniikan kotelointi. Micro-epsilonin (kaksi kappaletta ylhäällä) ja Lumasensin (yksi kappale alhaalla) antureiden elektroniikkaosat asennettiin helposti luettaviksi ja säädettäviksi mittausjärjestelmän viereen tiiviiseen koteloon.



Kuva 14. Mittausorsi ja antureita kiinnikkeineen Kumpulan testiasemalla. Anturit on asennettu kahden metrin korkeuteen mittaamaan luonnonnurmen pintaa. Anturit vasemmalta oikealle: Lumasense IN 510, Micro-epsilon CT-SF22-C3, Apogee SI-131 ja Heitronics KT15.85 IIP.

9.1 Mittausalusta

Tutkimuksessa käytettävät alustat ovat luonnonnurmi ja keinonurmi. Mittausalustan emissiokerroin on tärkeitä määrittää ennen mittauksia. Emissiokertoimeksi asetettiin kaikille antureille vakioarvo 1, sillä luonnonurmelle ja keinonurmelle oli mahdotonta määrittää yhtä oikeaa emissiokerrointa. Aihetta käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.3.



Kuva 15. Luonnonnurmialusta. Alustassa on erilaisia elementtejä, kuten nurmikkoa, isoja voikukanlehtiä ja hiekka-alueita. Nämä elementit sitovat ja lähettävät eri tavoin lämpöä, kuten kappaleessa 10 todetaan.



Kuva 16. Keinonurmialusta. Alustan alla on puukehikko ja hiekkaa. Keinonurmialustassa ei ole elävää materiaalia, joten se ei kasva ja olosuhteet pysyvät hieman paremmin stabiilina.

10 Mittausalustojen tutkiminen lämpökameralla

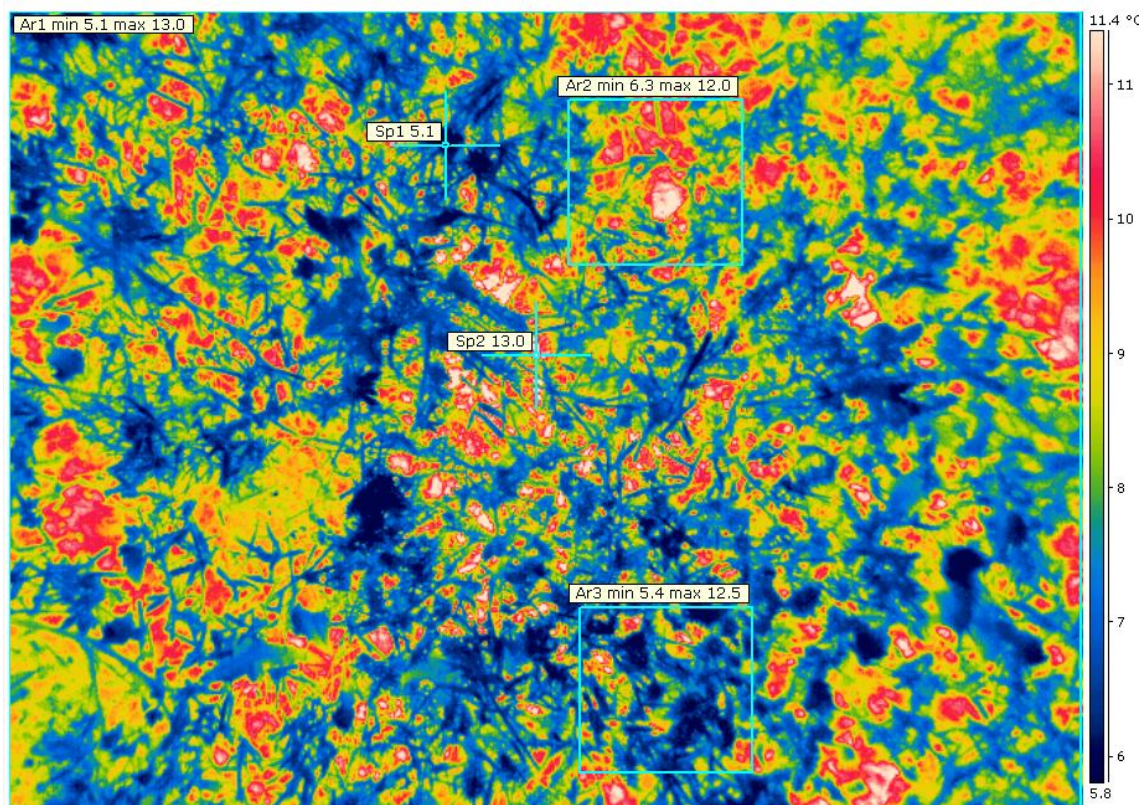
Vertailun vuoksi kuvattiin Infradex-yrityksen lainaamalla Flir P660 -lämpökameralla päivä- ja yöaikaan luonnonurmesta ja keinonurmesta lämpökuvia, jotta saatiin selvitettyä, millaisia lämpötilavaihteluita on tutkimuksessa käytetyillä pinnoilla. Tutkimuksessa käytetty lämpökamera oli erittäin tarkka, resoluutioltaan 640 x 480 pikseliä. Lämpökuvia otettiin Kumpulan testiasemalla luonnonurmesta ja keinonurmesta. Infrapuna-anturit mittaavat kuvattuja alueita.

Testissä käytetyt infrapuna-anturit mittaavat mittauskeilansa keskiarvoa. Lämpökameralla saadaan piirrettyä lämpökuva yksittäisten mittauspisteiden avulla. Ensin alustoja kuvattiin päivällä, kun aurinko paistoi. Tällöin lämpötilavaihtelut saattoivat olla yli kymmenenkin astetta. Kiinnostavin tieto tutkimuksen kannalta saatiin kuitenkin mittaamalla alustoja yöaikaan, jolloin nähtiin, miten pinta käyttäytyy juuri maanpintaminimiaikaan, jolloin aurinko ei säteile voimakkaasti ja maa on jäähtyneimmillään. Lämpökameramittauksia tehtiin lämpökameralla Kumpulan testiasemalla yöllä 19.06.2013 noin klo 01.40–02.30.

Yöllä kuvaushetkellä taivas oli selkeä. Edellisenä iltana oli ollut hieman sateista ja kostea. Ilman lämpötila oli 11,0 °C ja suhteellinen kosteus 74 %. Lämpökameraan tuli määrittää seuraavat parametrit ennen kuvien ottamista: 'ilman lämpötila', 'heijastuva lämpötila', 'emissiokerroin' ja 'suhteellinen kosteus'. Nämä arvot otettiin kuvaushetkellä Ilmatieteen laitoksen Helsingin Kumpulan aseman tiedoista 18.6.2013 klo 01.30. Kumpulan operatiiviset mittaukset ovat samalla aidatulla alueella kuin tutkimuksen mittaukset. Emissiokertoimen arvo 0,95 asetettiin kameraan oletuksena, joka on lähellä todellista emissiokerrointa tai monen eri elementin emissiokertoimien keskiarvoa.

Otetuista lämpökuvista huomaa yöaikaankin huomattavia lämpötilavaihteluita sekä luonnonurmella että keinonurmella. Luonnonurmella ero maanpintaminimiaikaan on 4–6 °C. Lämpökameran avulla näkee hyvin esimerkiksi keinonurmipalan alle asennettävien puukehikon ja hiekan välisen eron, joka on noin 3–4 °C. Tästä voi päätellä, että mittaustarkkuus ei ole enää se, mihin tulee panostaa, vaan myös mittausolosuhteet.

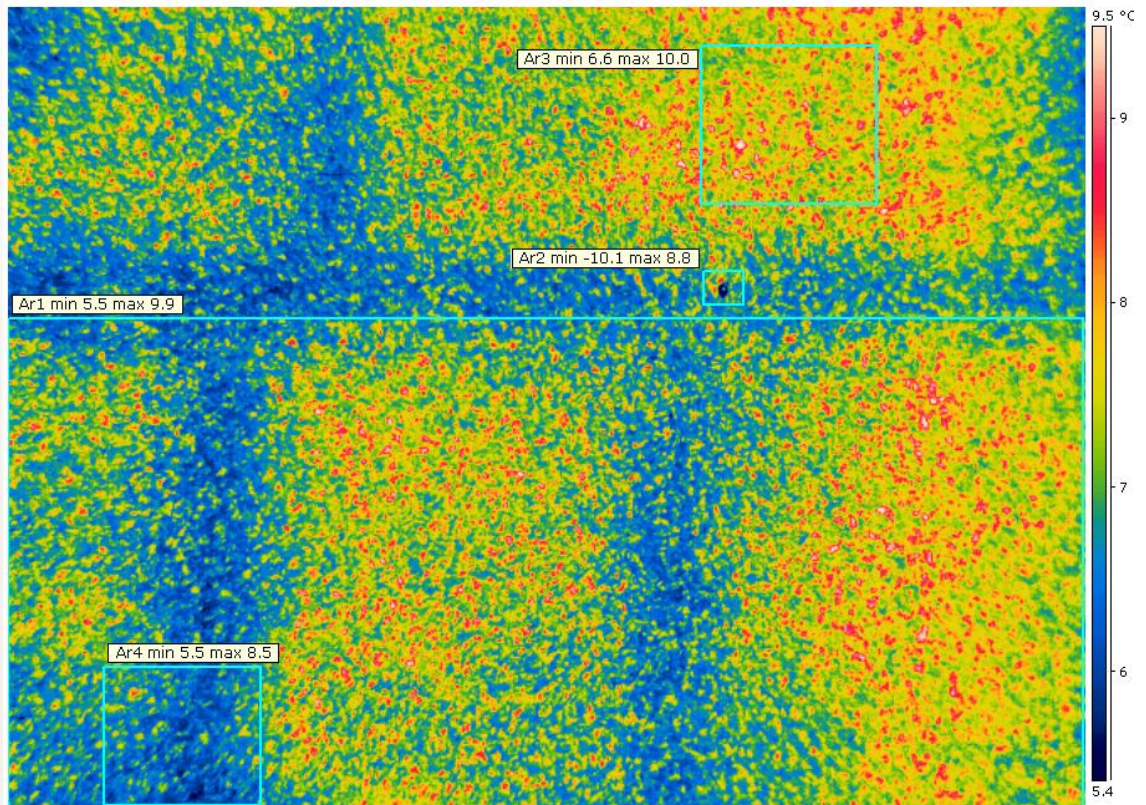
Lämpökuvien käsittelyssä käytin Flir Quickreport 1.2 -ohjelmaa. Kuvankäsittelyohjelman avulla oli mahdollista jälkikäteenkin muuttaa asetettuja parametreja, kuten emissiokerrointa ja vallitsevan ilman lämpötilaa kuvaushetkellä.



Otsikko	Min.	Maks.	Keskiarvo
Ar1	5.1 °C	13.0 °C	8.1 °C
Ar2	6.3 °C	12.0 °C	8.7 °C
Ar3	5.4 °C	12.5 °C	7.4 °C
Sp1	5.1 °C		
Sp2	13.0 °C		

Kuva 17. Lämpökuvaa luonnonurmialustasta 19.6.2013 klo 02.16. Kuvanottohetkellä PT100-anturi on mitannut luonnonnurmen päältä 5 cm:n korkeudesta 6,5 °C ja kiinni luonnonnurmen pinnassa 7,2 °C. Taivas oli kuvaushetkellä selkeä. Luonnonurmen pinnalla on havaittavissa lähes 8 °C:n vaihtelu yöaikaan silti, vaikka ilma ja maa ovat ehtineet eniten jäähtyä. Tämä lämpötilavaihtelu on erittäin suurta. Kuvasta näkee erilaisia alueita (Ar1, Ar2 ja Ar3), niiden minimiarvon, maksimiarvon sekä keskiarvon. Lisäksi on merkitty pisteellä Sp1 koko kuvan pienin arvo 5,1 °C ja pisteellä Sp2 koko kuvan suurin arvo 13,0 °C.

Tällaisia 5–8 °C:n heittelyjä noin neliömetrin alueella ei paljain silmin pysty ottamaan huomioon valittaessa mittauspaikkaa. Siksi on lähes mahdotonta valita ja määritellä parasta mittauskohdetta ulkona vallitsevissa muuttuvissa olosuhteissa. Infrapuna-anturit mittaavat eri kohtia mittausalustasta, jolloin paikan valinta voi vaikuttaa jo merkittävästi mittau tulokseen.



Otsikko	Min.	Maks.	Keskiarvo
Ar1	5.5 °C	9.9 °C	7.2 °C
Ar2	-10.1 °C	8.8 °C	6.7 °C
Ar3	6.6 °C	10.0 °C	7.7 °C
Ar4	5.5 °C	8.5 °C	6.5 °C

Kuva 18. Lämpökuva keinoonurmialustasta 19.6.2013 klo 01.47. Kuvanottohetkellä PT100-anturi on mitannut keinoonurmen päältä 5 cm:n korkeudesta 8,6 °C ja kiinni keinoonurmen pinnassa 7,5 °C. PT100-anturit ovat keinoonurmella hiekkaosuuden päällä. Kuvasta näkee hyvin puukehikon ja hiekan eron keinoonurmen alla. Puu on mahdollisesti kosteampaa, ja hiekka varaa enemmän lämpöä itseensä. Lämpötilaerot keinoonurmella ovat noin 4 °C. Poikkeaman kuvassa tuo Ar2-alueella oleva kiinnitysruuvi. Lämpökamera havaitsee sen -10,1-asteisena, mikä johtunee osittain emissiokertoimesta, sillä metalli absorboi (=sitoo itseensä) ja emittoi (=lähettää) säteilyä eri tavalla.

Emissiokerroin voitaisiin määrittää materiaalille säätämällä infrapunamittarin emissiokerrointa niin kauan, että lämpötila on sama vertailuanturin eli PT100-anturin kanssa. Lämpökuvia tarkastellessa huomaa, miten suuria lämpötilavaihteluita mittausalustassa esiintyy, joten tätä määrittäytapaa käyttämällä alustoilla on useita eri emissiokerroimia.

Tutkimuksessa keskityttiin vain kesäaikaan. Talvella mittausalusta tulee peittymään lumesta, jolloin ei enää oteta huomioon luonnonnurmen eikä keinoonurmen lämpöominaisuuksia. Lumen ja jään eri muodoilla voi olla myös eri emissiokertoimia. Keinote-

koista alustaa voisi kehittää entisestään materiaalitutkimuksen avulla. Olisi mielenkiintoista selvittää, miten keinonurmialustassa käytetyn hiekan vaihtaminen multa tai muuhun maa-ainekseen vaikuttaisi mittaustuloksiin. Mittausalustan valinnasta heräsiikin tärkeitä kysymyksiä, joita tulisi mielestäni tutkia. Lämpökuvia otettiin myös hiekasta ja asfaltista, joilla oli yöaikaan mitattavissa noin 4–6 °C:n lämpötilavaihteluita pienelläkin alueella. Olisikin mielenkiintoista tutkia, onko olemassa jokin materiaali, joka käyttäytyy tasalämpöisesti vaikeissakin sääolosuhteissa. Esimerkiksi elektroniikan testimittauksissa lämpötila-alueella -50...+140 °C elektroniikkatuotteen pinta maalataan tumman harmaalla peitemaalilla, jotta joka kohdassa on sama emissiivisyysvakio.

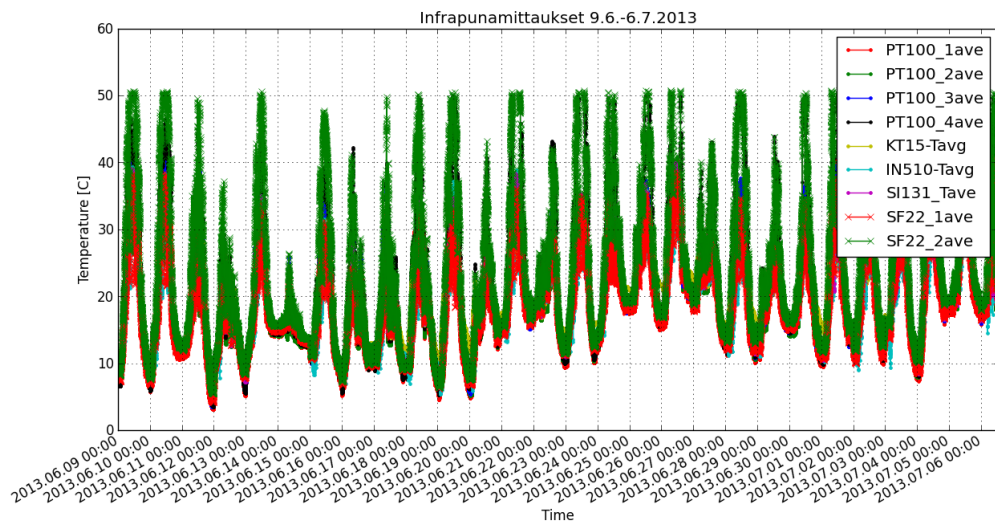
11 Mittaustulosten analysointi

Tutkimustyössä mittausaikaväli oli neljä viikkoa. Kerätystä mittausdatasta piirrettiin kuvaajat Python-ohjelmaa apuna käyttäen. Kuvaajia piirrettiin neljän viikon ajalta, viikon ajalta, kahden yön ajalta sekä kahdelta ensimmäiseltä yöltä erikseen pelkästään minimiajalta, jolloin kuvaajista tuli tarkempia ja havainnollisempia. Kuvaajat piirrettiin viriteillä eli korjatuilla arvoilla (taulukko 5).

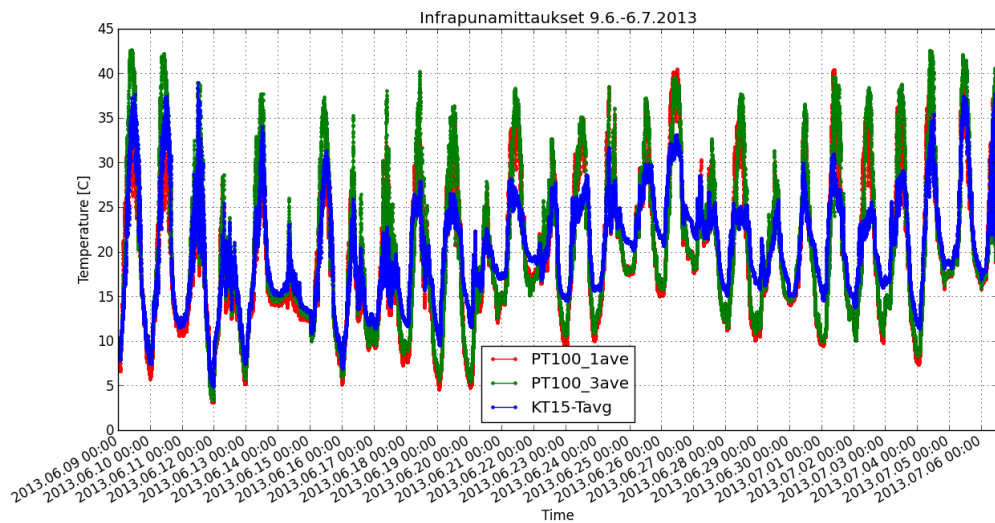
Kuvaajissa vertaillaan jokaista infrapuna-anturia niihin kahteen PT100:seen, jotka mittaavat samaa alustaa infrapuna-anturin kanssa. Lisäksi vertaillaan kaikkia infrapuna-antureita keskenään sekä kaikkia PT100-antureita keskenään. Myös maanpinta-minimiarvojen yhtäläisyyttä tarkasteltiin.

Mittausdataa käsiteltäessä tuli ottaa huomioon, että kaikki ajat ovat UTC-ajassa eli tämän tutkimustyön tekohetkellä kolme tuntia Suomen aikaa jäljessä.

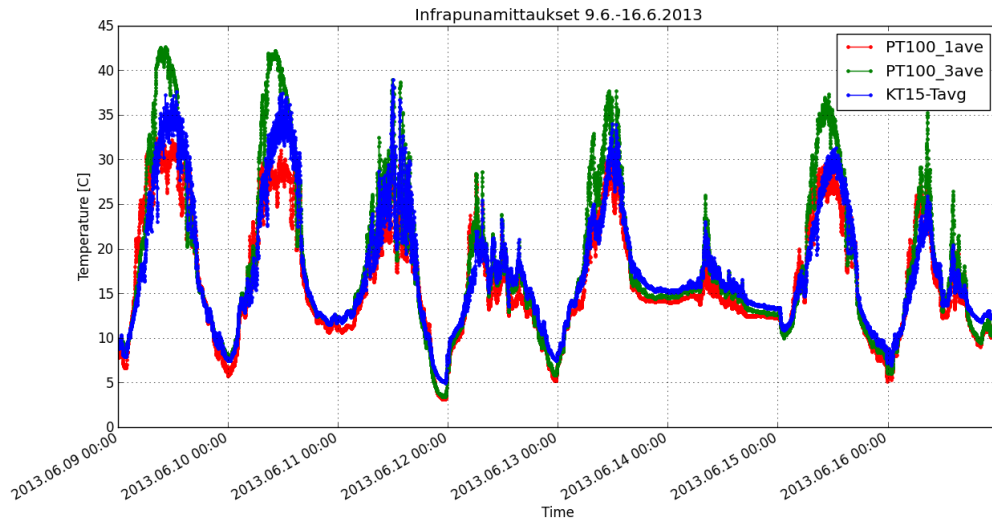
11.1 Infrapuna-anturien vertailu PT100-antureihin



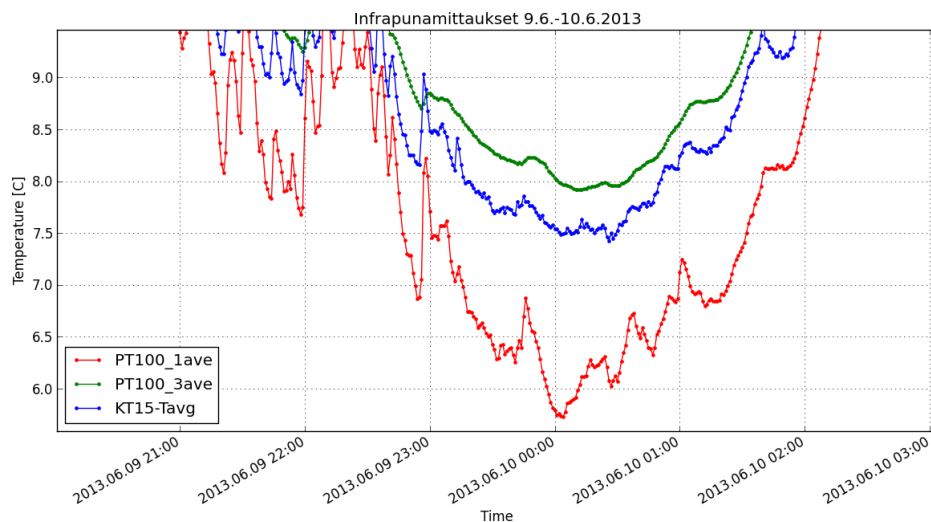
Kuvaaja 1. Kaikki tutkimuksessa käytetyt anturit aikavälillä 9.6.–6.7.2013. Kuvaaja on piirretty minuutin keskiarvoista. Kuvaajasta voi todeta, että kaikki anturit mittaavat samaa ilmiötä.



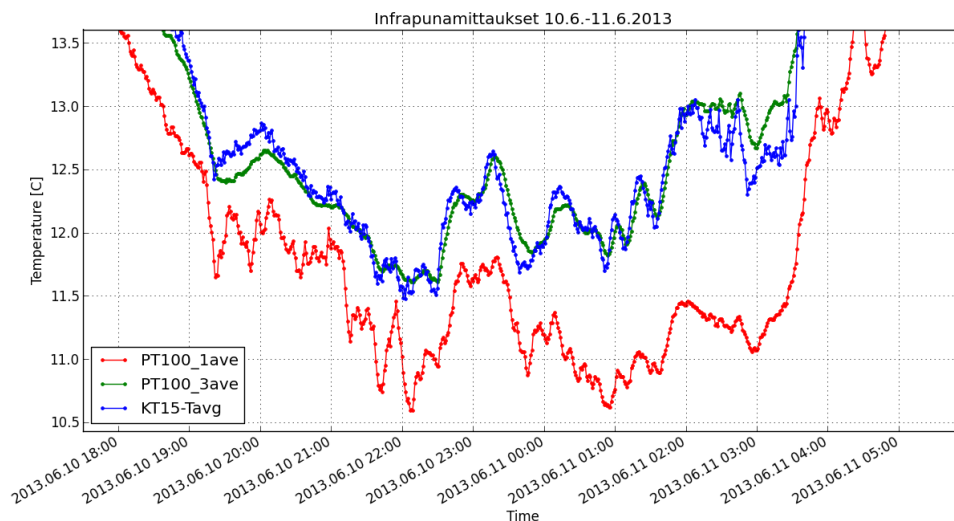
Kuvaaja 2. Luonnonnurmelta mittaava Heitronics KT15 ja luonnonnurmen PT100-anturit aikavälillä 9.6.–6.7.2013. PT100_1 mittaa 5 cm:n korkeudelta maanpinnasta ja PT100_3 mittaa kiinni maanpinnassa. Ensimmäisen viikon Heitronics KT15 näyttää mittaavan PT100-antureiden kanssa samansuuntaisia minimiarvoja, mutta sen jälkeen arvot ovat usein korkeampia kuin PT100-antureilla minimaiaikaan. Harhailun syyksi valmistaja ilmoitti anturin sisälle päässeen veden, sillä anturi vaatii lisäsuojakotelon. Anturi hajosi kuitenkin lopullisesti vasta ukonilman aikana.



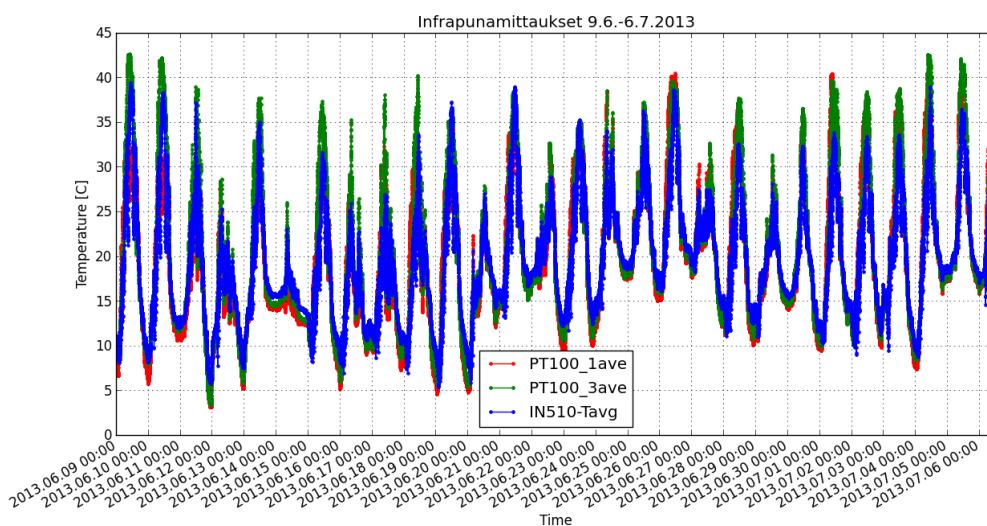
Kuvaaja 3. Luonnonnurmelta mittaava Heitronics KT15 ja luonnonnurmen PT100-anturit aikavälillä 9.6.–16.6.2013.



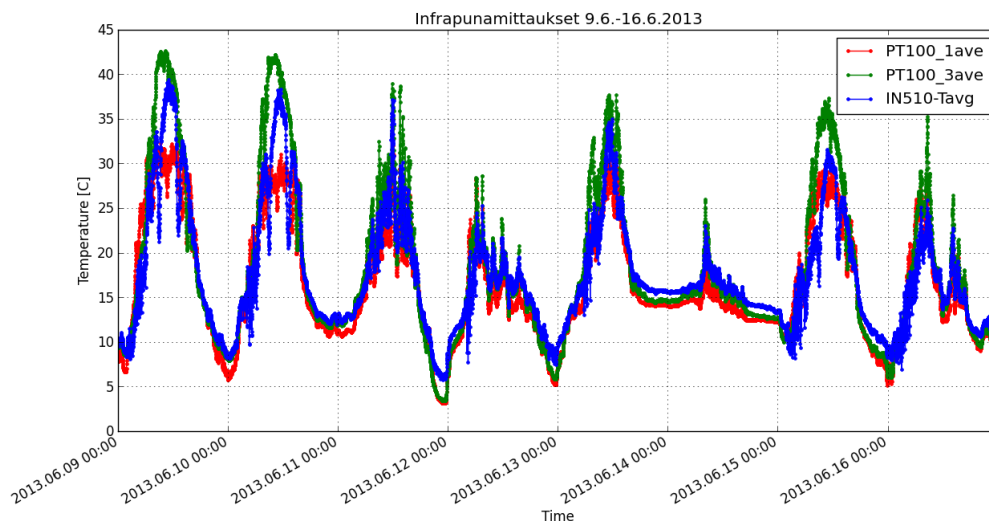
Kuvaaja 4. Luonnonnurmelta mittaava Heitronics KT15 ja luonnonnurmen PT100-anturit yöllä 9.6.–10.6.2013 minimaikaan. Maan pinnassa kiinni oleva PT100_3 on lähempänä Heitronicsin KT15-anturia. Ne mittaavat samaa kohdetta, kun taas PT100_1 mittaa ilmapatjan lämpötilaa 5 cm:n korkeudessa. Ensimmäisenä yönä Heitronics KT15:n ja PT100_3:n mittaustuloksissa on noin puolen celsiusasteen ero (kuvaaja 4) ja toisena yönä eroa on huomattavasti vähemmän, keskimäärin 0,0–0,2 °C. (kuvaaja 5). PT100_1 on minimaikaan mitannut 5 cm:n korkeudesta jopa 2 °C matalampia lämpötiloja kuin PT100_3 maanpinnasta. PT100_3 näyttää käyttäytyvän myös tasaisemmin mahdollisesti tasaisempien ilmavirtausten vuoksi.



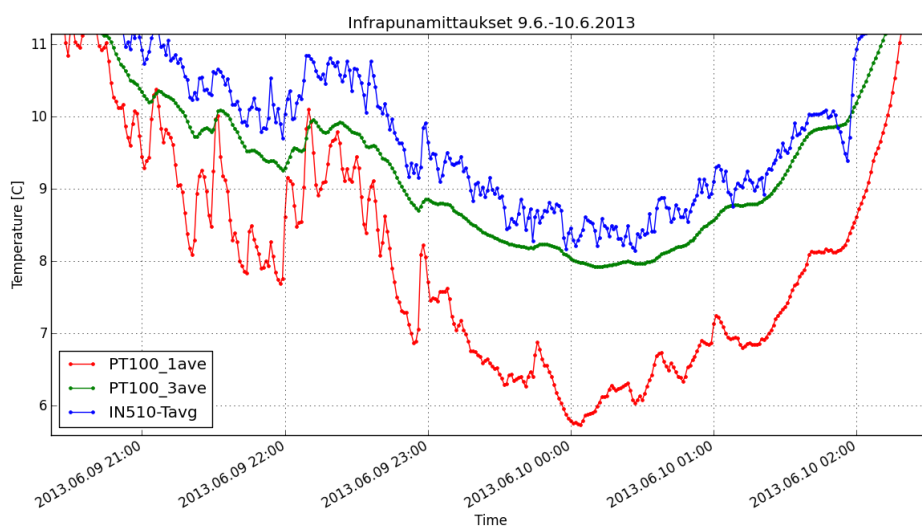
Kuvaaja 5. Luonnonnurmelta mittaava Heitronics KT15 ja luonnonnurmen PT100-anturit yöllä 10.6.–11.6.2013 minimaiaikaan. Yöltä on havaittavissa kaksi kylmempää ajanjaksoa, joiden välissä on lämpötila noussut hetkellisesti. Lämpötilaerot ovat pysyneet samansuuruisina.



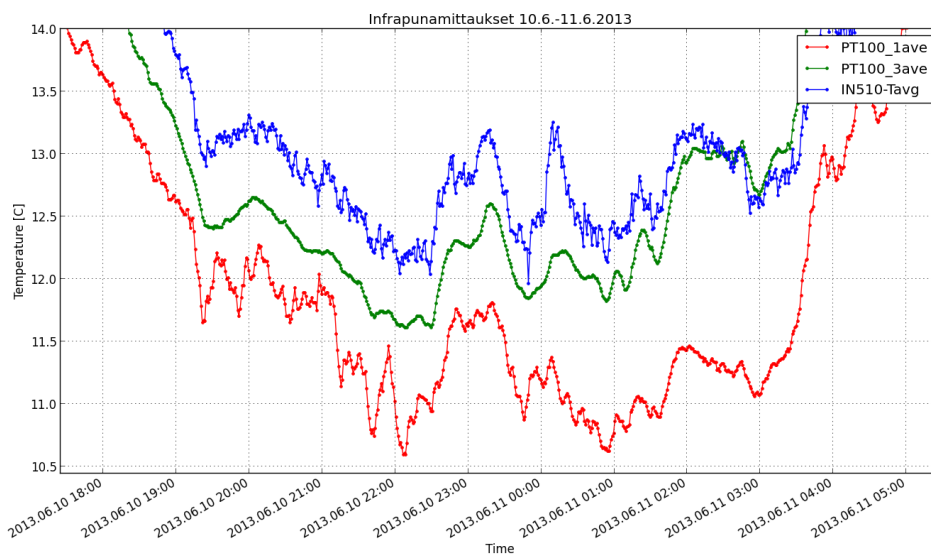
Kuvaaja 6. Luonnonnurmelta mittaava Lumasense IN 510 ja luonnonnurmen PT100-anturit aikavälillä 9.6.–6.7.2013.



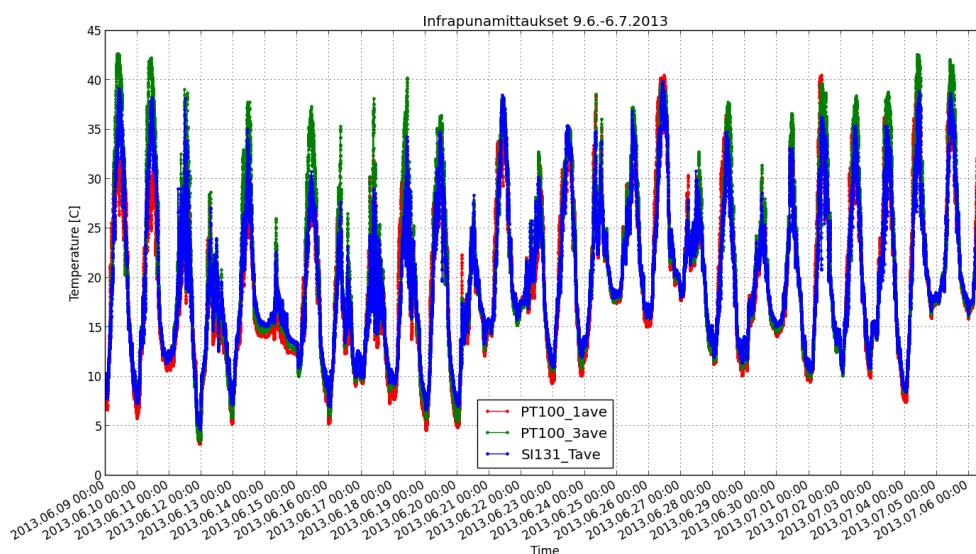
Kuvaaja 7. Luonnonnurmelta mittaava Lumasense IN 510 ja luonnonnurmen PT100-anturit aikavälillä 9.6.–16.6.2013.



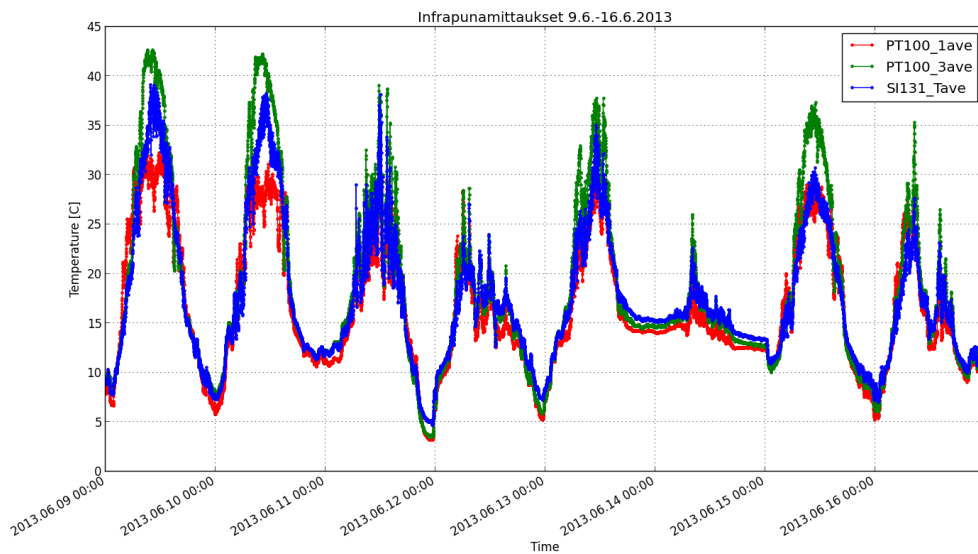
Kuvaaja 8. Luonnonnurmelta mittaava Lumasense IN 510 ja luonnonnurmen PT100-anturit yöllä 9.6.–10.6.2013 minimiaikaan. Maan pinnassa kiinni oleva PT100_3 on lähempänä Lumasense IN 510 -anturin mittaamia arvoja. Eroa on noin 0,1–0,3 °C, kun taas 5 cm:n korkeudesta mittaavaan PT100_1:seen eroa on parin celsiusasteen verran.



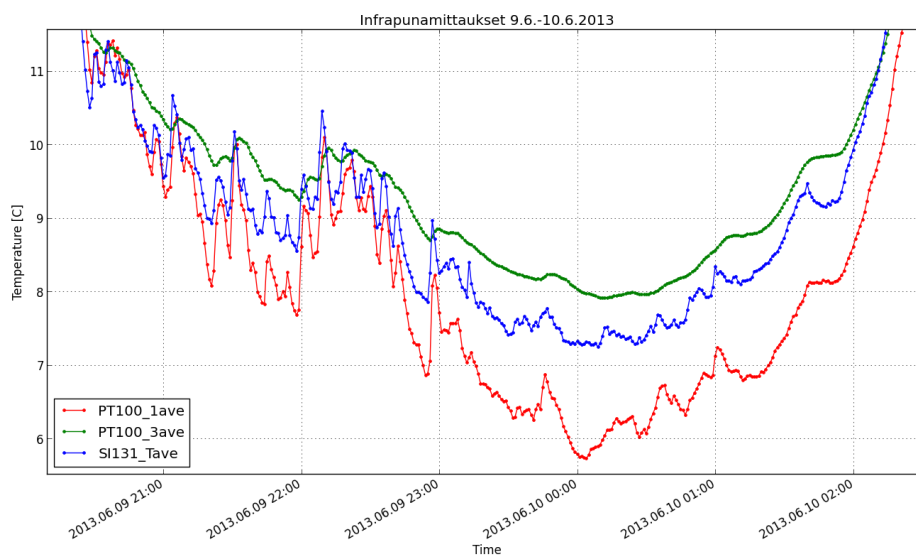
Kuvaaja 9. Luonnonnurmelta mittaava Lumasense IN 510 ja luonnonnurmen PT100-anturit yöllä 10.6.–11.6.2013 minimaiaikaan. Lumasense IN 510 -anturin ero PT100_3:seen on minimaiaikaan noin 0,3 °C ja PT100_1:seen noin 1,4 °C. Yöltä on havaittavissa kaksi kylmempää ajanjaksoa, joiden välissä on lämpötila noussut hetkellisesti. Lumasense IN 510 -anturin minimilämpötila on mitattu noin klo 23.45 UTC, jolloin mittaustuloksessa on havaittavissa suurempi piikki. PT100-anturit puolestaan ovat mitanneet minimilämpötilan noin klo 22.10–22.35 UTC välisenä aikana.



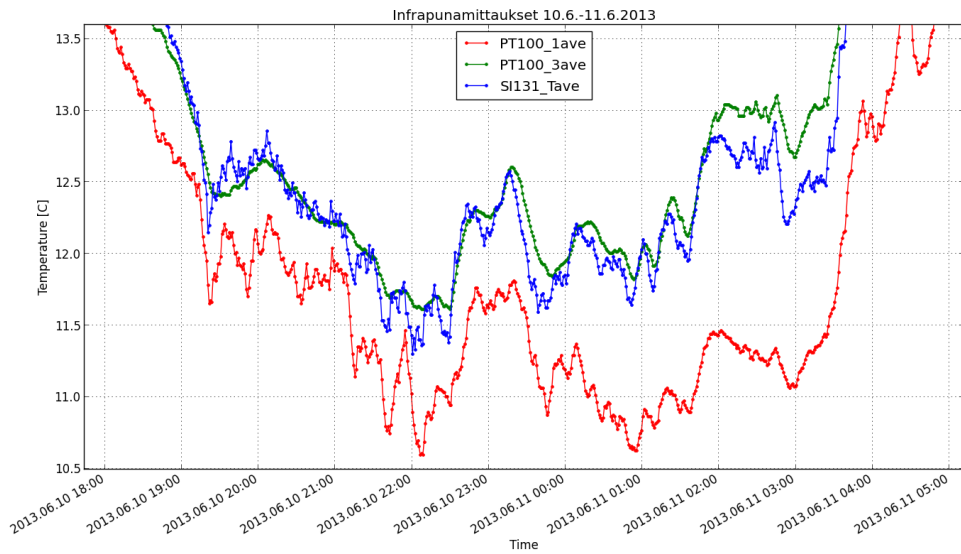
Kuvaaja 10. Luonnonnurmelta mittaava Apogee SI-131 ja luonnonnurmen PT100-anturit aikavälillä 9.6.–6.7.2013.



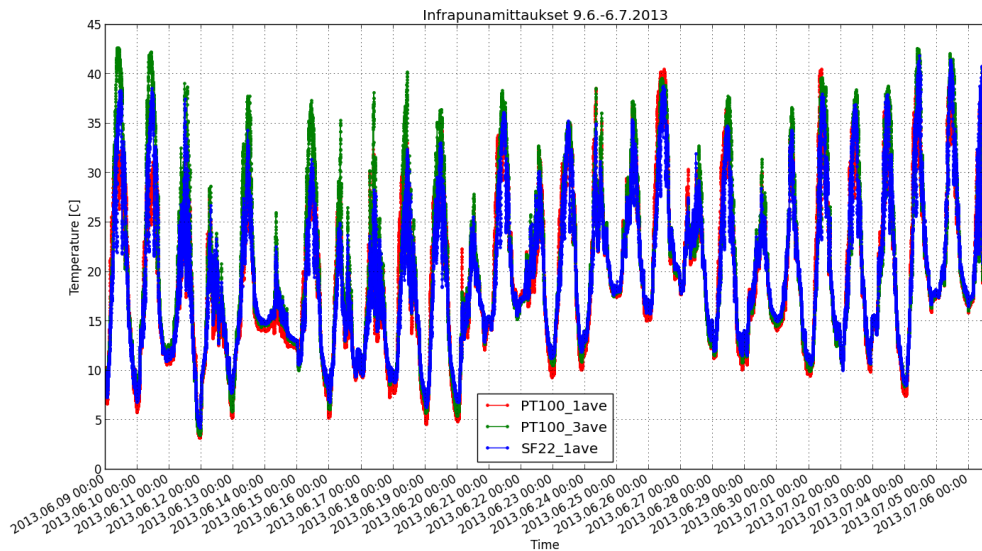
Kuvaaja 11. Luonnonnurmelta mittaava Apogee SI-131 ja luonnonnurmen PT100-anturit aikavälillä 9.6.–16.6.2013.



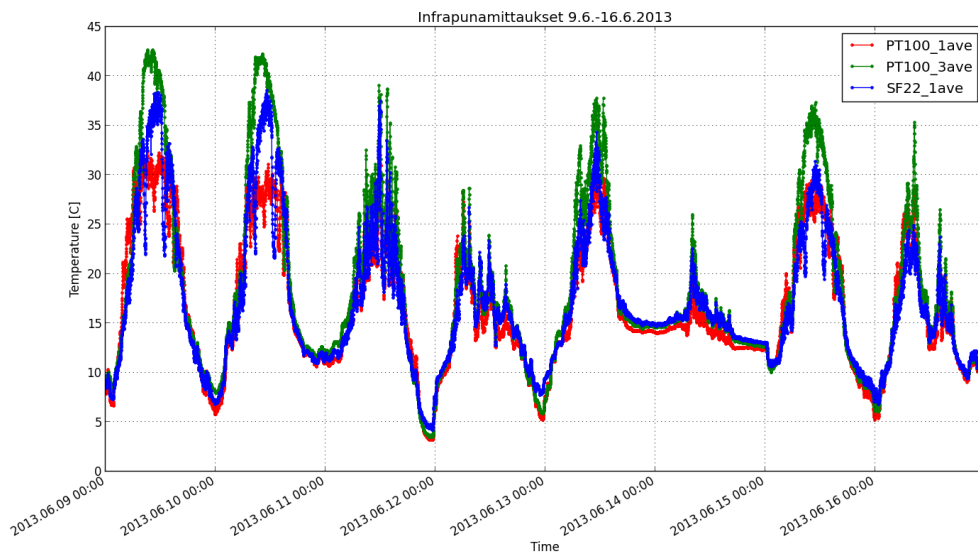
Kuvaaja 12. Luonnonnurmelta mittaava Apogee SI-131 ja luonnonnurmen PT100-anturit yöllä 9.6.–10.6.2013 minimaikaan. Apogee SI-131 -anturin ero PT100_3:seen on minimaikaan noin 0,7 °C ja PT100_1:seen noin 1,5 °C. Toisena yönä eroa on huomattavasti vähemmän, keskimäärin 0,0–0,3 °C. (kuvaaja 13).



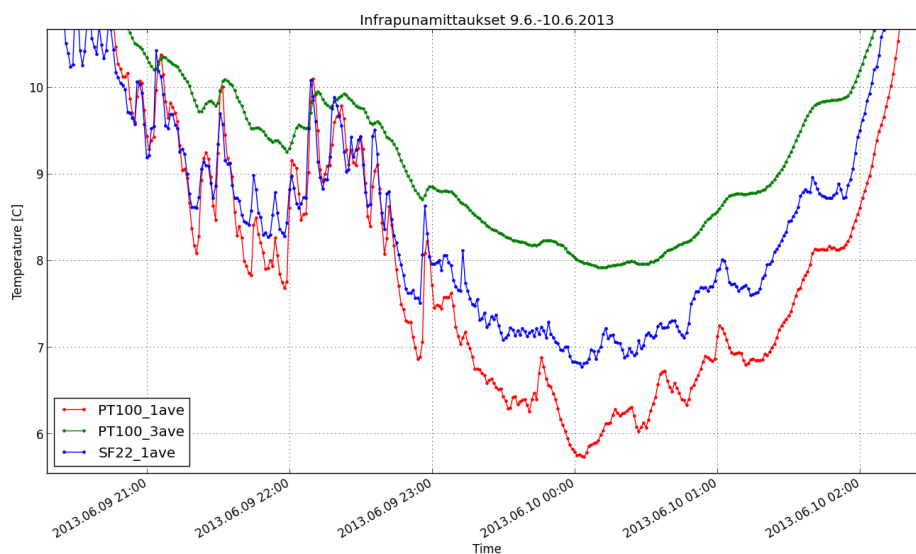
Kuvaaja 13. Luonnonnurmelta mittaava Apogee SI-131 ja luonnonnurmen PT100-anturit yöllä 10.6.–11.6.2013 minimaiaikaan. Apogee SI-131 -anturi mittaa PT100_3:n kanssa huomattavasti samankaltaisempia lämpötilalukemia kuin PT100_1:n kanssa. Minimaiaikaan noin klo 22.15 UTC on havaittavissa kuitenkin 0,2–0,3 °C:n heittäilyjä, joihin PT100_3 ei hitautensa vuoksi reagoi samalla tavalla.



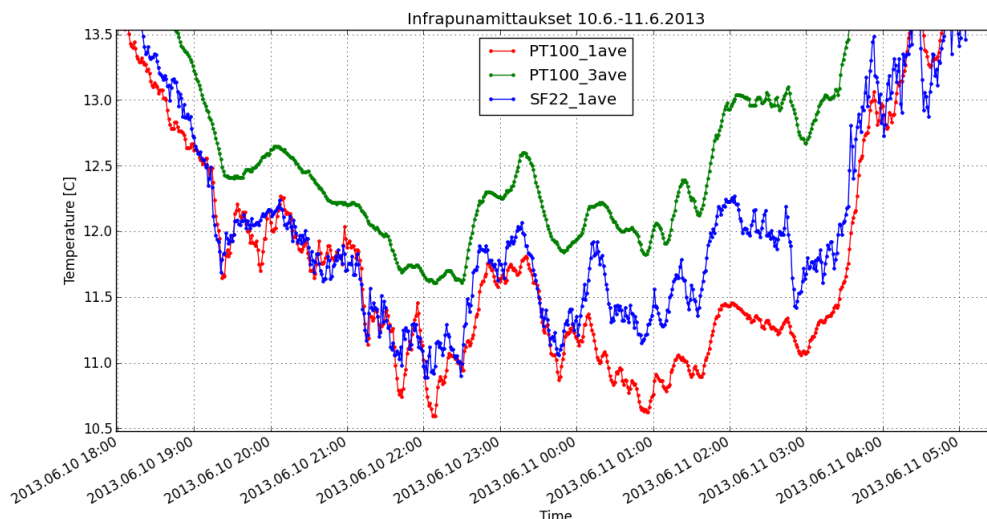
Kuvaaja 14. Luonnonnurmelta mittaava Micro-epsilon CT-SF22-C3 (SF22_1) ja luonnonnurmen PT100-anturit aikavälillä 9.6.–6.7.2013.



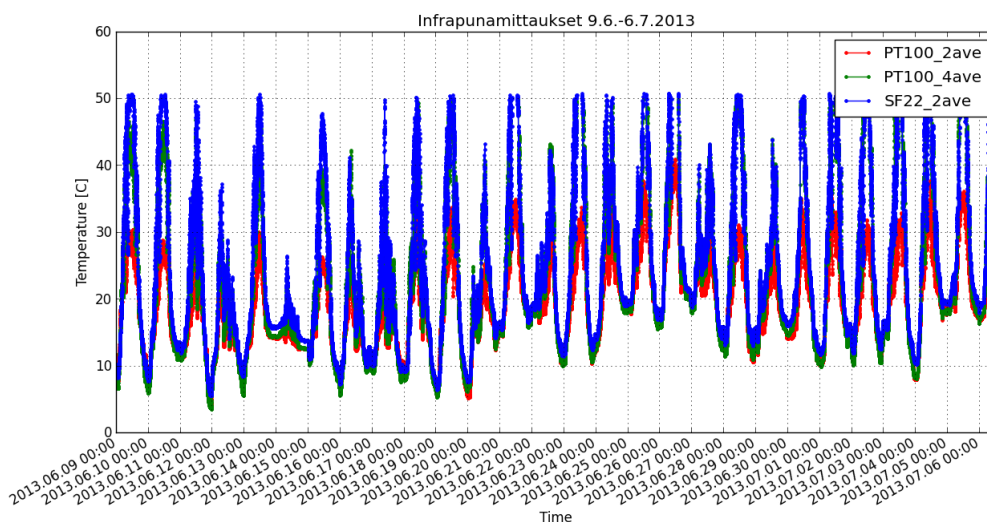
Kuvaaja 15. Luonnonnurmelta mittaava Micro-epsilon CT-SF22-C3 (SF22_1) ja luonnonnurmen PT100-anturit aikavälillä 9.6.–16.6.2013.



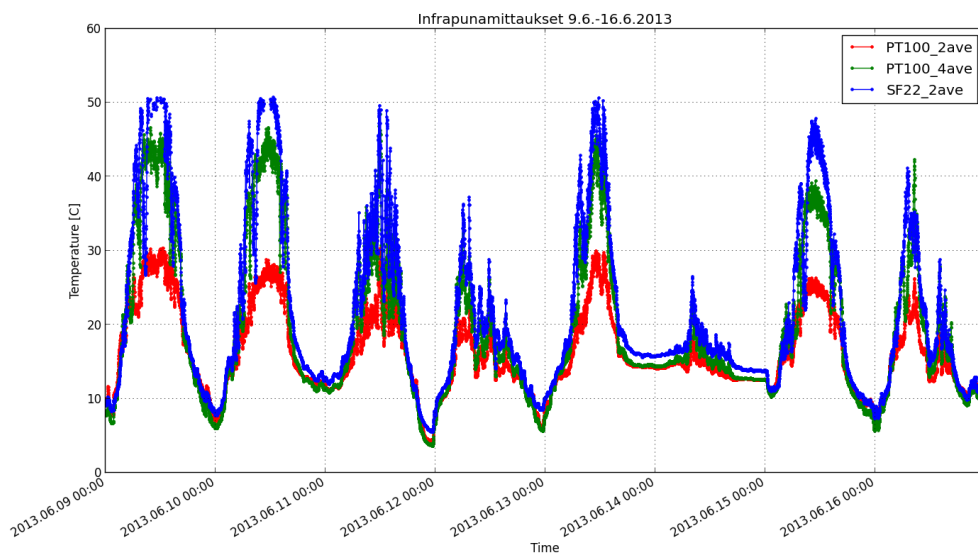
Kuvaaja 16. Luonnonnurmelta mittaava Micro-epsilon CT-SF22-C3 (SF22_1) ja luonnonnurmen PT100-anturit yöllä 9.6.–10.6.2013 minimaikaan. SF22_1:n ja PT100_3:n ero on minimaikaan noin 1,2 °C. SF22_1:n ja PT100_1:n ero on minimaikaan noin 1,1 °C. SF22_1 on hieman yhdenmukaisempi 5 cm:n korkeudesta mittaavan PT100_1:n kanssa, mutta mittauseroavaisuudet ovat silti suuria varsinkin minimaikaan noin klo 00.05 UTC.



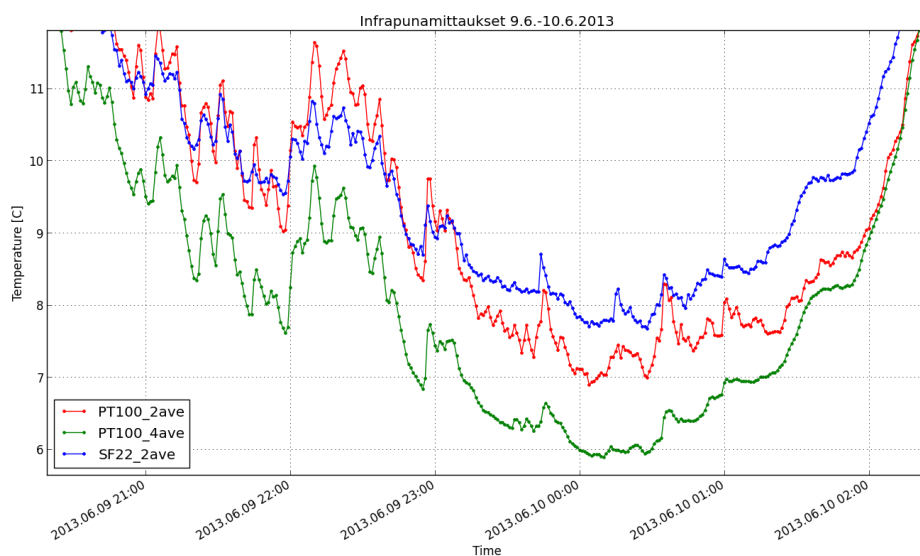
Kuvaaja 17. Luonnonnurmelta mittaava Micro-epsilon CT-SF22-C3 (SF22_1) ja luonnonnurmen PT100-anturit yöllä 10.6.–11.6.2013 minimaiakaan. SF22_1:n mittausarvot ovat lähempänä 5 cm:n korkeudesta mittaavan PT100_1:n mittausarvoja. Eroa on noin 0,0–0,3 °C klo 00.00 UTC asti, mutta sitten erot suurenevat yli puoleenkin asteeseen. SF22_1:n ja maanpinnassa kiinni olevan PT100_3:n välillä on minimaiakaan 0,3–0,6 °C:n eroavaisuuksia.



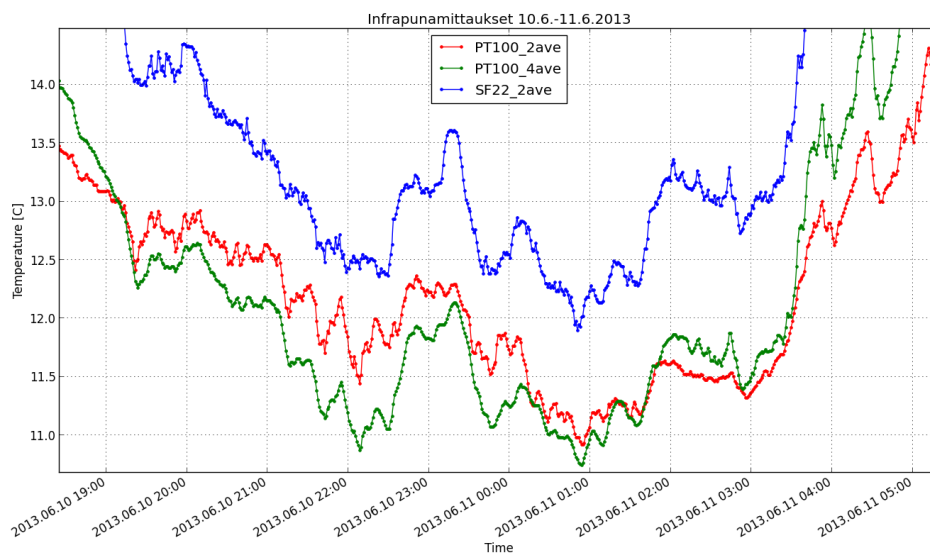
Kuvaaja 18. Keinonurmelta mittaava Micro-epsilon CT-SF22-C3 (SF22_2) ja keinonurmen PT100-anturit aikavälillä 9.6.–6.7.2013. PT100_2 mittaa 5 cm:n korkeudelta maanpinnasta ja PT100_4 mittaa kiinni maanpinnassa.



Kuvaaja 19. Keinonurmelta mittaava Micro-epsilon CT-SF22-C3 (SF22_2) ja keinonurmen PT100-anturit aikavälillä 9.6.–16.6.2013.

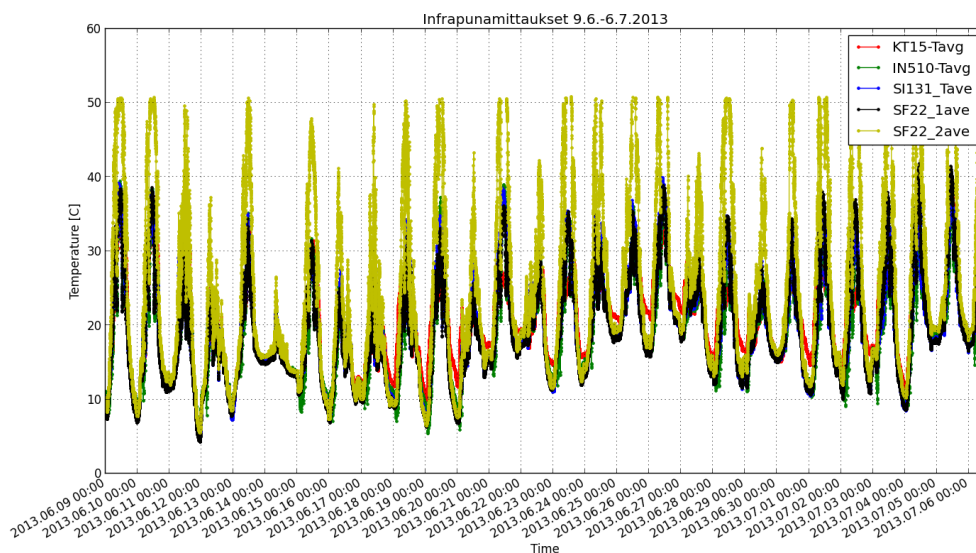


Kuvaaja 20. Keinonurmelta mittaava Micro-epsilon CT-SF22-C3 (SF22_2) ja keinonurmen PT100-anturit yöllä 9.6.–10.6.2013 minimaikaan. SF22_2:n mittausarvot ovat lähempänä 5 cm:n korkeudesta mittaavan PT100_2:n mittausarvoja. Ero minimaikaan on noin 0,8 °C. SF22_2:n ja maanpinnassa kiinni olevan PT100_4:n välillä on minimaikaan jopa 1,8 °C:n ero.

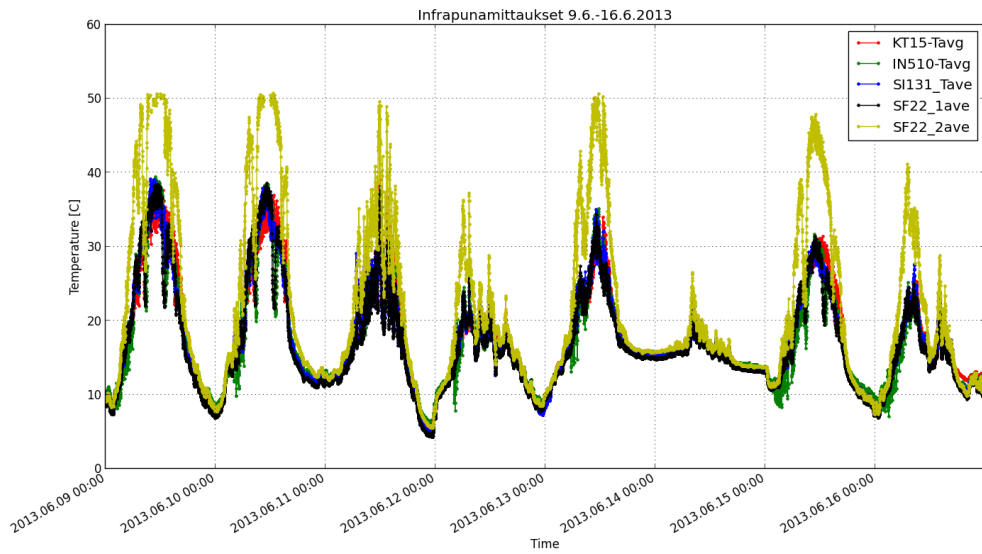


Kuvaaja 21. Keinonurmelta mittaava Micro-epsilon CT-SF22-C3 (SF22_2) ja keinonurmen PT100-anturit yöllä 10.6.–11.6.2013 minimaikaan. Yön aikana on ollut kaksi kylmempää ajanjaksoa: klo 22.15 UTC ja klo 00.45 UTC. Näiden ajankohtien välissä on ilma lämmennyt ja sitten taas laskenut. SF22_2 mittaa minimaikaan 1,0 °C suurempaa lämpötilalukemaa kuin PT100_2 (keinonurmi, 5 cm) ja 1,2 °C suurempaa lämpötilalukemaa kuin PT100_4 (keinonurmi, pinta).

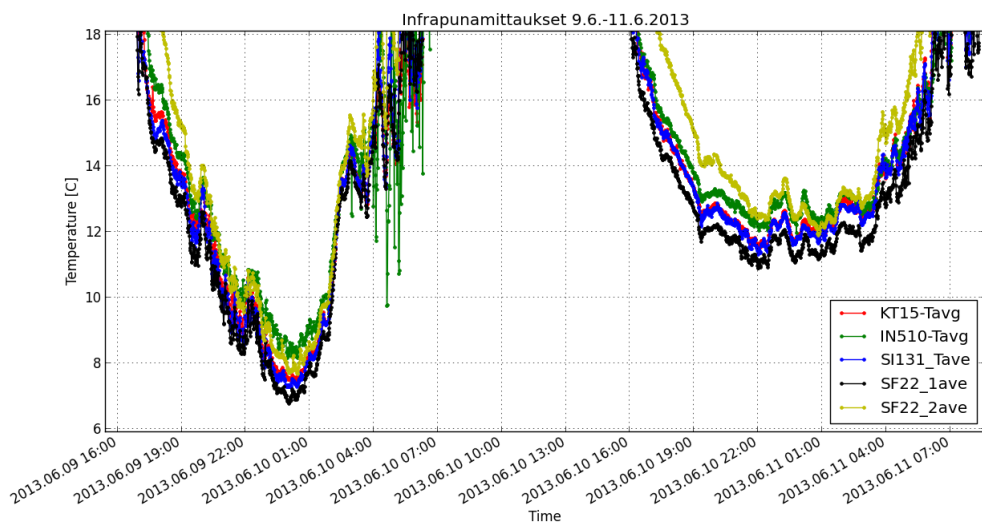
11.2 Infrapuna-anturien keskinäinen vertailu



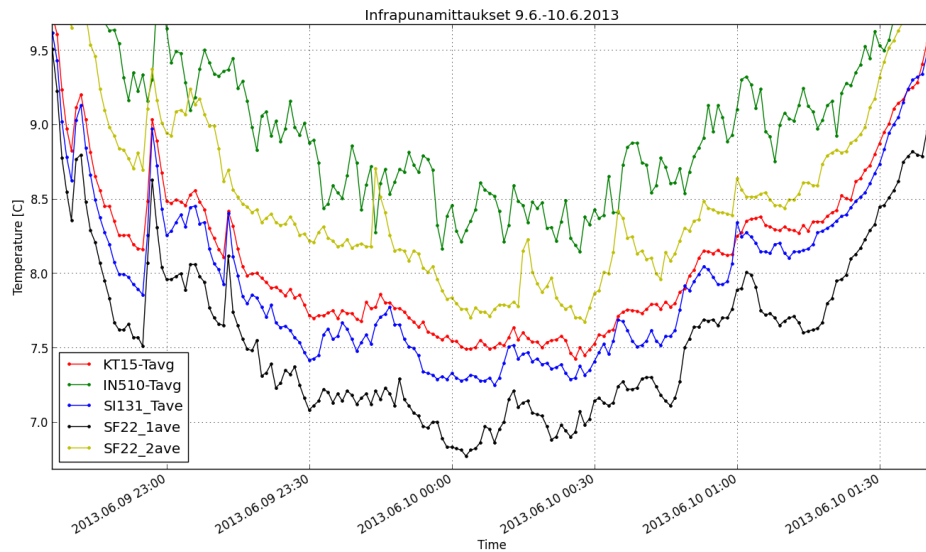
Kuvaaja 22. Kaikki infrapuna-anturit aikavälillä 9.6.–6.7.2013.



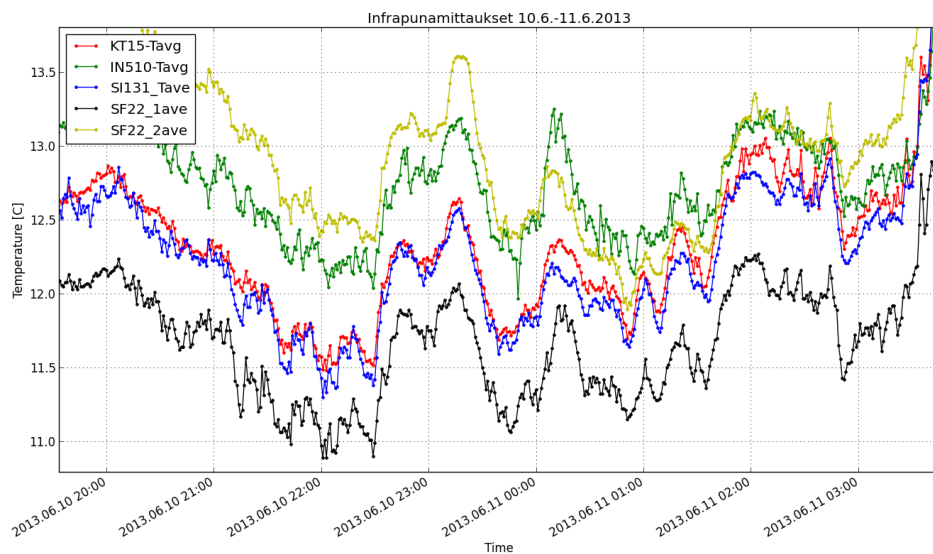
Kuvaaja 23. Kaikki infrapuna-anturit aikavälillä 9.6.–16.6.2013.



Kuvaaja 24. Kaikki infrapuna-anturit kahden yön ajalta 9.6.–11.6.2013.

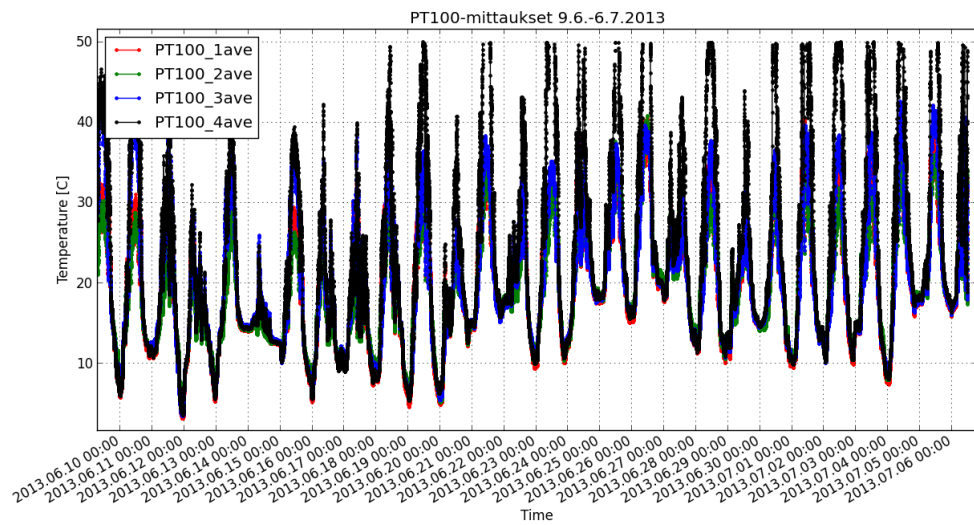


Kuvaaja 25. Kaikki infrapuna-anturit yöllä 9.6.–10.6.2013 minimiaikaan. Anturit mittaavat minimiaikaan noin 6,7–8,2 °C:n minimiarvoja, joten eroavaisuus on suurimmillaan 1,5 °C kahden anturin välillä. Minimilämpötiloja ei ole mitattu kaikilla antureilla täysin samaan aikaan.

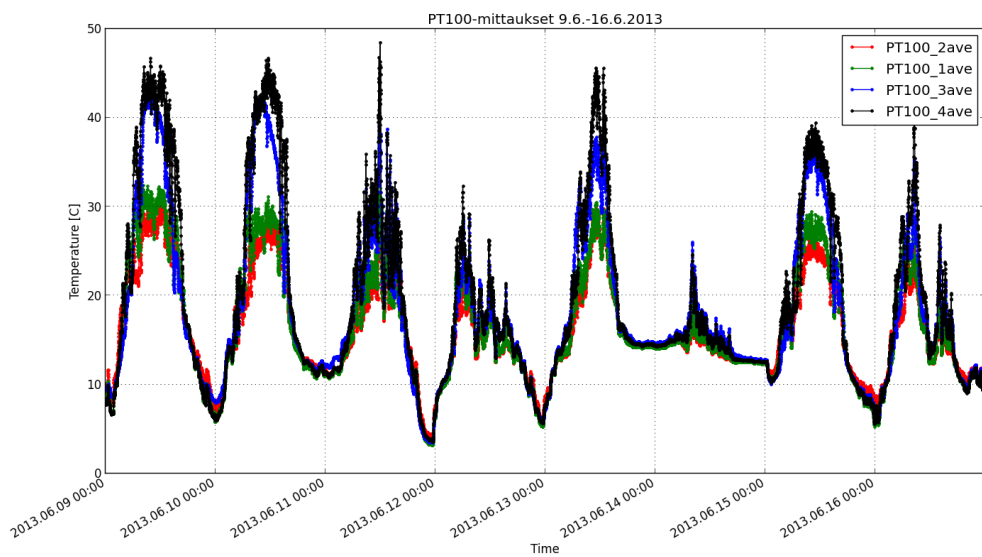


Kuvaaja 26. Kaikki infrapuna-anturit yöllä 10.6.–11.6.2013 minimiaikaan. Anturit mittaavat minimiaikaan noin 10,8–11,9 °C:n minimiarvoja, joten eroavaisuus on suurimmillaan 1,1 °C kahden anturin välillä. Minimilämpötiloja ei ole mitattu kaikilla antureilla samaan aikaan. SF22_1, Heitronics KT15 ja Apogee SI-131 ovat mitanneet minimilämpötilan samoihin aikoihin, noin klo 22.30 UTC. Lumasense IN 510 on puolestaan mitannut minimilämpötilan noin klo 23.50 UTC ja keino-urmelta mittaava SF22_2 noin klo 00.50 UTC. Erot ovat siis huomattavia.

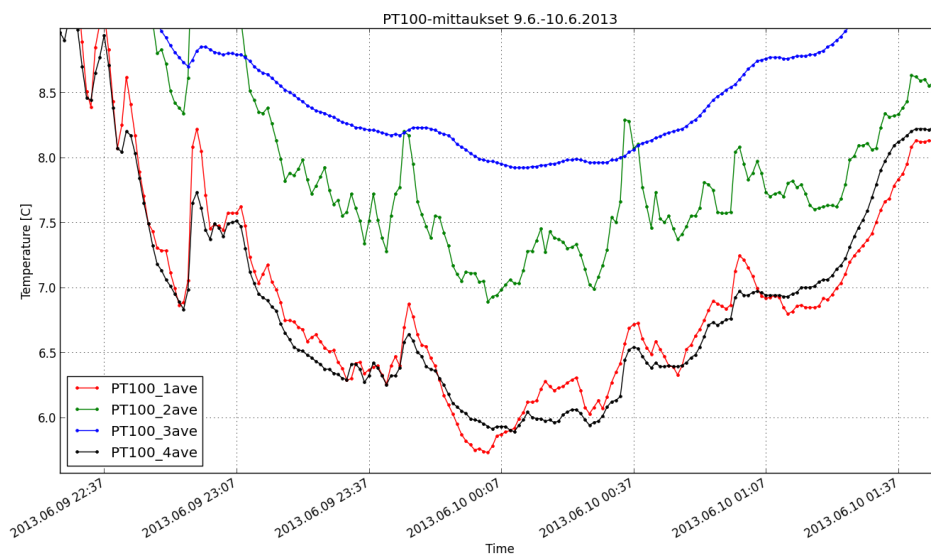
11.3 PT100-anturien keskinäinen vertailu



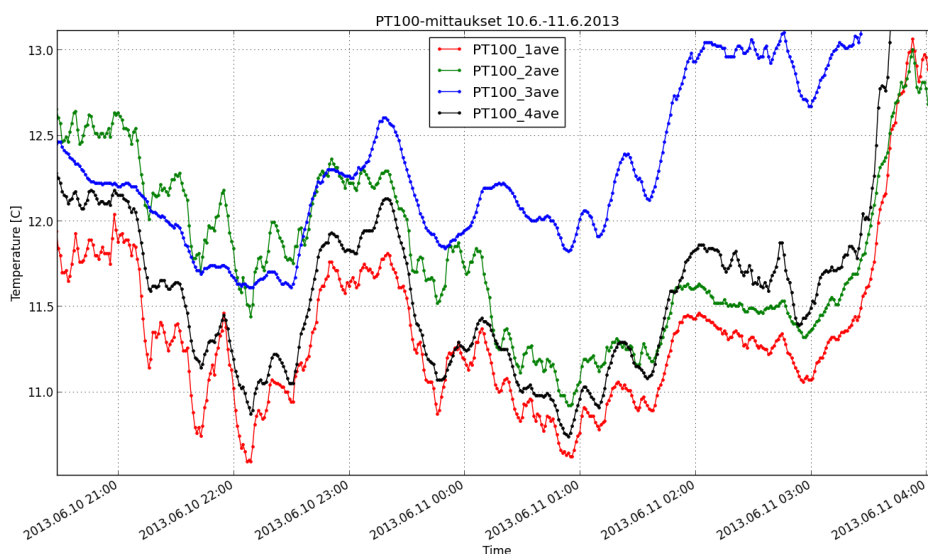
Kuvaaja 27. Kaikki PT100-anturit aikavälillä 9.6.–6.7.2013.



Kuvaaja 28. Kaikki PT100-anturit aikavälillä 9.6.–16.6.2013.

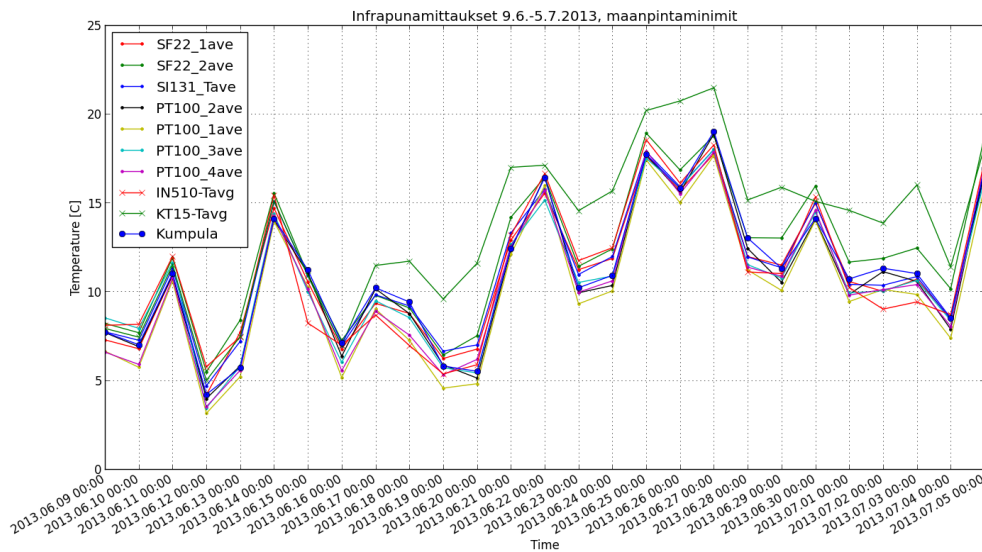


Kuvaaja 29. Kaikki PT100-anturit yöllä 9.6.–10.6.2013 minimaikaan. PT100_1 (luonnonnurmi, 5 cm) ja PT100_4 (keinonurmi, pinta) ovat lähellä toisiaan. Sen sijaan PT100_2 (keinonurmi, 5 cm) ja PT100_3 (luonnonnurmi, pinta) mittaavat huomattavasti lämpimämpiä lukemia.

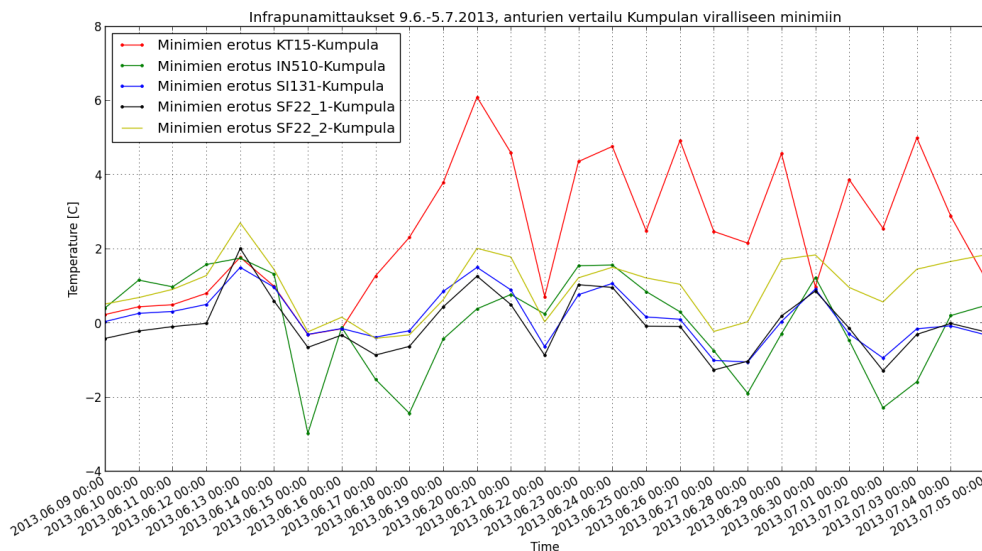


Kuvaaja 30. Kaikki PT100-anturit yöllä 10.6.–11.6.2013 minimaikaan. Kuvaajiin on otettu kaksi ensimmäistä yötä, mutta anturit eivät käyttyy yhdenmukaisesti joka yö. Esimerkiksi lämpimämpänä yönä PT100_2 (keinonurmi, 5 cm) näyttää lämpimämpiä lukemia, keskimäärin 0,9 °C enemmän kuin muut PT100-anturit. Tässä kuvaajassa PT100_3 (luonnonnurmi, pinta) alkaa puolen yön jälkeen mittaamaan suurempia lämpötiloja kuin muut PT100-anturit.

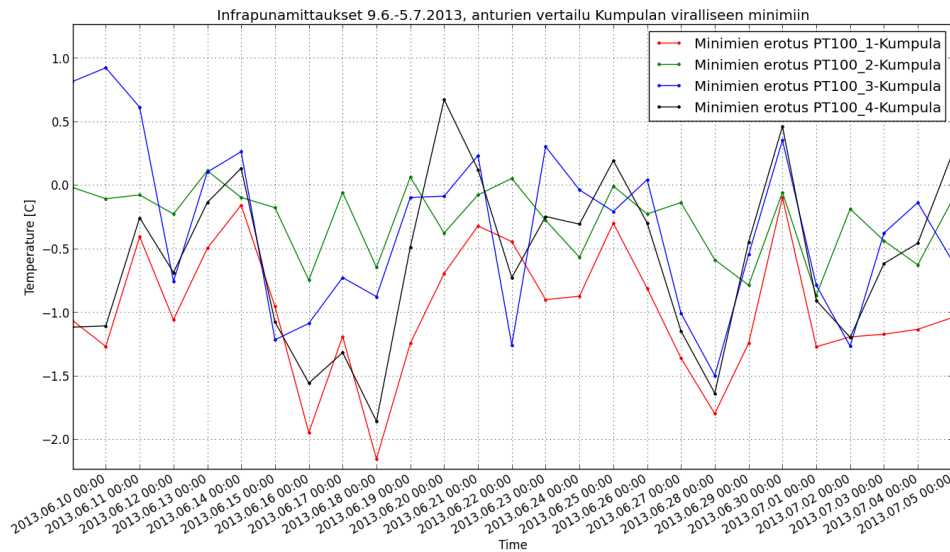
11.4 Soveltuvuus maanpintaminimin mittaamiseen



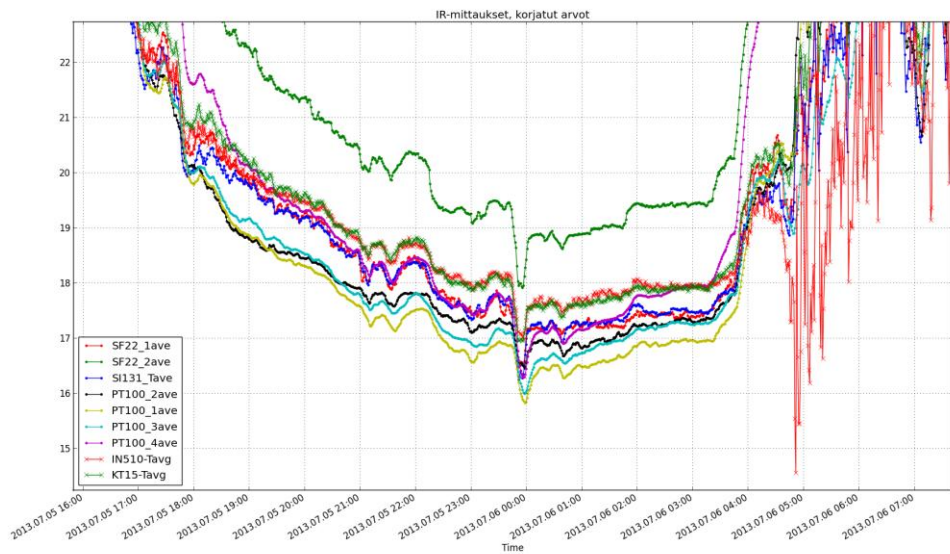
Kuvaaja 31. Kaikkien anturien mittaamat yön alimmat lämpötilat aikavälillä 9.6.–5.7.2013. Kuvaaja ei kerro, mihin aikaan jokaisen anturin minimiarvo on mitattu. Kuvaaja 34 osoittaa, että pelkkä yön minimiarvon hakeminen ei kerro koko totuutta. Infrapuna-anturin mittausvirhe voi muokata varsinaista minimiarvoa. Minimit on voitu mitata eri aikoina. Heitronics KT15 -anturi on kuvaajassa selvästi poikkeavampi kuin muut anturit. Harhailun syyksi valmistaja ilmoitti anturin sisälle päässeen veden, sillä anturi vaatii lisäsuojakotelon. Anturi hajosi kuitenkin lopullisesti vasta ukonilman aikana. Sinisellä viivalla ja pallolla kuvasta erottuu Helsingin Kumpulan virallinen maanpintaminimi.



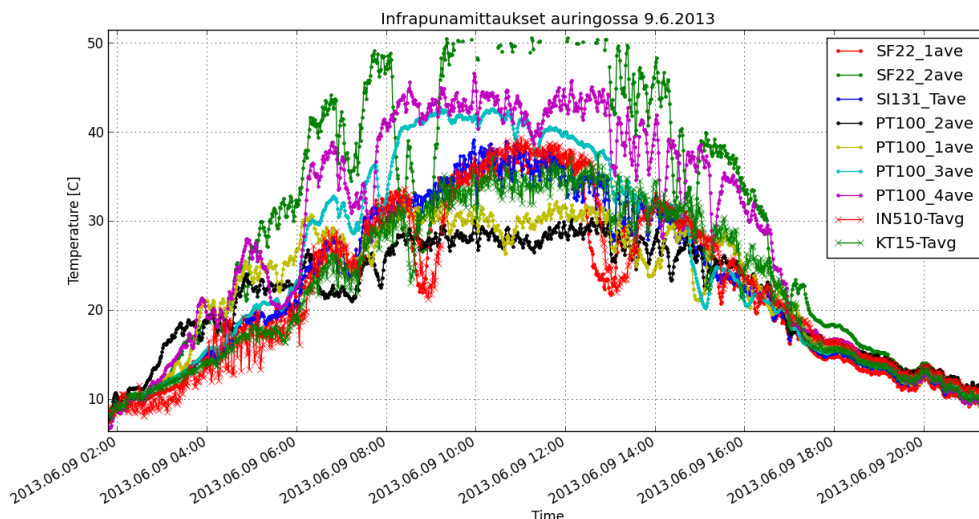
Kuvaaja 32. Infrapuna-antureiden maanpintaminimin ja Kumpulan virallisen maanpintaminimin erotukset aikavälillä 9.6.–5.7.2013. Lähimpänä Kumpulan virallisia minimilukemia ovat luonnonturmelta mittaavat anturit Apogee SI-131 ja Microepsilon CT-SF22-C3 (SF22_1).



Kuvaaja 33. PT100-anturien maanpintaminimin ja Kumpulan virallisen maanpintaminimin erotukset aikavälillä 9.6.–5.7.2013. Lähimpänä Kumpulan virallista maanpintaminimiä on PT100_2, joka on Kumpulan virallisen mittauksen kaltaisesti sijoitettu mittaamaan 5 cm:n korkeudesta keinonurmen päältä. Eroa on silti joinakin öinä jopa 0,7–0,8 °C.



Kuvaaja 34. Kaikki anturit yöllä 5.7.–6.7.2013. Eri antureiden mittaustulokset korreloivat nopeis-akin lämpötilan muutoksissa erittäin hyvin toisiinsa nähden ajallisesti. Erot mittauservoissa ovatkin absoluuttitasoissa. Anturit mittaavat hieman eri kohteita, mutta ulkoiset muutokset anturit havaitsevat samanaikaisesti. Poikkeavuutena Lumasense IN 510 -anturi on mitannut alhaisimman lämpötilan noin viisi tuntia myöhemmin kuin muut, kun se on alkanut heittelehtimään todennäköisimmin auringonsäteiden vaikutuksesta. Tämä vääristää merkittävästi maanpintaminimitulosta, jossa haetaan vain yön pienin arvo. Mittaukset heittelehtivät Lumasense IN 510 -anturilla useampanakin yönä.



Kuvaaja 35. Kaikki anturit päivällä 9.6.2013. Sama kuvaajassa esiintyvä ilmiö toistui joka päivä. Mittaukset heittelevät suuresti päivisin, eivätkä siten ole luotettavia. Maanpintaminimi laskeutankin yöajalta 18–06 UTC-aikaa, joten päiväarvoilla ei sinänsä ole muutenkaan merkitystä. Keinonurmenpinnasta mittaava PT100_4 sekä keinonurmelta mittaava SF22_2 mittasivat aurinkoisina päivinä huomattavasti korkeampia lämpötiloja kuin muut anturit. SF22_2:n mittausarvot kohoavat välillä yli 50 °C:n lukemiin, jolloin mittaustulosta ei oteta huomioon, koska mittausrajat on asetettu -50 ja +50 °C:n välille. Yhtenä syynä korkeampiin lämpötilalukemiin on keinonurmen parempi lämmönsitomiskyky. Luonnonnurmen pinnasta mittaavan PT100_3:n mittausarvot kohoivat myös huomattaviin lukemiin.

12 Päätelmät ja soveltuvuuden arviointi

Emissiokertoimen määrittäminen tuotti tutkimuksen aikana paljon päänvaivaa. Sen merkitys jäi siten vajavaiseksi. Emissiokerroin asetettiin kaikille antureille vakioarvoon 1, sillä mittausalustoilla oli useita eri emissiokertoimia (kappale 10) eikä siten voitu perustella minkään tietyn emissioarvon käyttämistä. Se saattaa jonkin verran vaikuttaa mittaustuloksiin.

Jo alussa oli eri antureiden välillä eroja sisätilojen testimittauksissa. Kaksi samanlaista Micro-epsilon CT-SF22-C3 -infrapuna-anturia poikkesivat tehdasasetuksilla toisistaan 2 °C noin +20 °C:n lämpötilassa ja esimerkiksi -20 °C:n lämpötilassa jo 3 °C. Tällöin korjauskertoimilla (kulmakertoimella ja vakiolla) oli suuri merkitys mittausten virittämisessä.

Kysyin kahden samanlaisen anturin välisestä eroavaisuudesta maahantuojalta, joka välitti viestin eteenpäin valmistajalle. Valmistajan lähettämän viestin mukaan heidän

laitteissaan ei ole mitään vikaa. Näitä antureita ei ole tarkoitettu mihinkään erityisen tarkkoihin mittauksiin, vaan niitä varten on valmistajan mukaan olemassa kalliimman hintaluokan, noin 5–10 kertaa kalliimpia antureita. Valmistaja kehotti asettamaan toiseen anturiin 2 °C:n offsetin. Tämä herätti hämmästyksiä, sillä näin toimien anturit näyttävät kyllä samaa, mutta mahdollisesti edelleen väärää ja epätarkkaa arvoa. Tämä valmistajan lähettämä viesti jo kertoi, että Micro-epsilonin anturia ei ole tarkoitettu tarkkoihin lämpötilamittauksiin, eikä se ole siten edes lähtökohdiltaan erityisen luotettava. Lisäksi anturien teknisissä tiedoissa luvataan anturille 1 °C:n tarkkuus, mutta toisen anturin antama arvo oli 2 °C pienempi kuin PT100-vertailuanturin, joten vaatimukset eivät toteudu.

Infrapuna-antureita verrattiin samalla alustalla olleisiin PT100-antureihin, joista toinen mittasi kiinni maanpinnassa ja toinen 5 cm:n korkeudelta maanpinnasta. Heitronics KT15, Apogee SI-131 ja Lumasense IN 510 olivat lähempänä PT100_3:n arvoja, jotka mitattiin maanpinnasta. Kummatkin Micro-epsilonin anturit sekä luonnonnurmella että keinonurmella olivat lähempänä 5 cm:n korkeudesta mittaavaa PT100-anturia (PT100_1 ja PT100_2).

Kaikki vertailussa mukana olleet anturit mittasivat selkeästi samaa asiaa, mutta minikään anturin mittaustarkkuus ja -varmuus ei tämän tutkimuksen perusteella ollut meteorologisille mittauksille vaadittavaa tasoa.

Kahden yön maanpintaminimimittausten perusteella minimiarvojen erot Heitronics KT15:n ja PT100_3:n välillä olivat noin 0,1 ja 0,5 °C. Viikon mittausten jälkeen Heitronics KT15:n mittaussarvot alkoivat heittelehtiä. Heittelehtimisen syyksi valmistaja ilmoitti anturin sisälle päässeeseen veteen, sillä anturi vaatii lisäsuojakotelon. Heitronics KT15 -anturi hajosi lopullisesti ukonilman johdosta 6.7.2013. Viimeisin havainto anturista tehtiin klo 12.19 UTC.

Lumasense IN 510:n ja PT100_3:n välillä minimiarvojen erot olivat kahtena yönä noin 0,2 ja 0,3 °C. Lumasense IN 510 ei ollut kuitenkaan aina luotettava, sillä se saattoi mitata minimiarvonsa eri aikaan kuin muut anturit (kuvaaja 34). Tämä ilmiö toistui useampana yönä, mahdollisesti auringonsäteiden vaikutuksesta.

Apogee SI-131:n ja PT100_3:n välillä minimiarvojen erot olivat kahtena yönä noin 0,7 ja 0,3 °C. Se oli Micro-epsilon SF22_1:n kanssa lähimpänä Kumpulan minimiarvoja (kuvaaja 32).

Micro-epsilon SF22_1:n ja PT100_1:n välillä minimiarvojen erot olivat kahtena yönä noin 1,1 ja 0,3 °C.

Micro-epsilon SF22_2:n ja PT100_2:n välillä minimiarvojen erot olivat kahtena yönä noin 0,8 ja 1,0 °C.

Nykyisin käytettyä 5 cm:n korkeudelta mittaavaa PT100-vastusanturia ei voida korvata näillä infrapuna-antureilla mittausepätkätkkuuksien vuoksi. Tämän tutkimuksen perusteella parhaiten minimimittauksiin sopii Apogee SI-131, mutta sitäkään en suosittele ottamaan operatiiviseen käyttöön, varsinkaan ilman lisätutkimuksia. Heitronics KT15 ja Lumasense IN 510 mittasivat kahtena ensimmäisenä yönä jopa Apogeeta tarkemmin minimilämpötilat, mutta niissä alkoi myöhemmin ilmetä muita ongelmia, jotka ilmenevät mittaustuloskuvaajista (kappale 11).

Tulokset saattaisivat poiketa toisistaan, jos tutkittaisiin kaikkia mittausvälin yötilanteita tarkemmin. Heitronics KT15 -anturin tulokset mittausjakson alkupuolella vaikuttivat vähintään yhtä luotettavilta kuin muidenkin antureiden. Anturi alkoi näyttää noin viikon jälkeen muista selvästi poikkeavia arvoja ja hajosi lopullisesti ukonilman aikana. Valmistaja ilmoitti harhailun syyksi, että anturin sisälle oli ilmeisesti päässyt vettä ja että anturi vaatii lisäsuojakotelon. KT15.85 IIP -malli oli kuitenkin tarkoitettu erityisesti meteorologiseen käyttöön. Sen IP-luokitus oli IP65, mikä tarkoittaa, että se on pölytiivis ja kestää vesiruisun joka suunnasta. Lisäsuojan tarpeesta ei ollut mainittu manuaalissa eikä anturia hankittaessa (meteorologiseen käyttöön), mikä jäi vähän vaivaamaan.

Infrapunatekniikkaa ja erilaisia infrapuna-antureita eri ominaisuuksilla tulisi mielestäni tutkia lisää. Eri aallonpituuksilta mittaavat infrapuna-anturit voivat antaa erilaisia tuloksia. Tässä vertailussa mukana olleet infrapuna-anturit käyttivät mittauksissa 8–14 µm:n aallonpituusalueita. On olemassa antureita, jotka mittaavat useammalla aallonpituus-
taajuudella. Tällöin kompensoimalla vähennetään kohteen emissiokertoimen vaihtelun vaikutusta mittaustulokseen. Lämpökameralla saa parhaimman kuvan mittauskohde-
joka kohdasta. Tällaista sovellusta voisi keskiarvoistamalla harkita ulossäteilevän pin-
nan lämpötilan mittauksissa.

Mittausalustoja tutkiessani lämpökameralla oli havaittavissa sekä luonnonurmella että keinonurmella suuria lämpötilavaihteluita yöaikaankin eli silloin kun maanpintaminimi mitataan. Luonnonurmella ero oli tällöin 4–6 °C. Keinonurmella erot olivat 3–4 °C, joka oli keinonurmen alle asetettujen puukehikon ja hiekan välinen lämpötilaero. Puun kohdalla alusta oli viilein ja hiekan kohdalla lämpimin. Tällainen keinonurmialusta on monin paikoin käytössä nykyään. Mittausolosuhteilla on suurempi merkitys mittaustuloksiin kuin mittaustarkkuudella. Tutkimustyön aikana heräsikin monia kysymyksiä, kuten voisiko luonnonnurmen sekä keinonurmen, hiekan ja puun korvata jollain toisella materiaalilla ja olisiko siitä siltikään apua ulkoilmamittauksissa. Mittaustuloksiin saattoivat vaikuttaa myös mittauskeilan leveys sekä mittauskohdan sijainti. Tässä olisi myös lisätutkimuksen aihe.

Lähteet

- 1 Havaintosivut. Ilmatieteen laitos. Luettu 30.4.2013.
- 2 Lämpötila. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Lämpötila>>. Luettu 3.6.2013.
- 3 Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. 2008. Verkkodokumentti. World Meteorological Organization. <http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf>. 7. painos. Luettu 3.6.2013.
- 4 Burt, Stephen. 2012. The Weather Observer's Handbook. New York: Cambridge University Press.
- 5 Pirkko Pyökkö ja Markku Seppänen. Ilmatieteen laitos. Haastattelu. 27.6.2013 ja 23.8.2013.
- 6 Inversio (meteorologia). Verkkodokumentti. Wikipedia. <[http://fi.wikipedia.org/wiki/Inversio_\(meteorologia\)](http://fi.wikipedia.org/wiki/Inversio_(meteorologia))>. Luettu 20.8.2013.
- 7 Konvektio. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Konvektio>>. Luettu 20.8.2013.
- 8 Infrapunasäteily. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Infrapunas%C3%A4teily>>. Luettu 3.6.2013.
- 9 Lämpösäteily ja infrapuna. Verkkosivu. Infradex Oy. <<http://www.infradex.com/teoria.html>>. Luettu 3.6.2013.
- 10 Wilson, J. S. 2005. Sensor Technology Handbook. Burlington: Elsevier.
- 11 Infrared. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared>>. Luettu 3.6.2013.
- 12 Weckström, Thua. 2005. Lämpötilan mittaust. Verkkodokumentti. Mittatekniikan keskus. <http://www.mikes.fi/documents/upload/j4_05_www.pdf>. 2. painos. Luettu 3.6.2013.
- 13 Emissiivisyys. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Emissiivisyys>>. Luettu 3.6.2013.

- 14 Ackland, Karen. 1998. Selecting the right infrared temperature sensor. Verkkodokumentti. InTech. <<http://www.isa.org/isaolp/journals/pdf/intech/980648.pdf>>. Luettu 4.6.2013.
- 15 Cimini, D., Marzano, F. & Visconti, G. 2010. Integrated Ground-Based Observing Systems: Applications for Climate, Meteorology, and Civil Protection. Berlin: Springer.
- 16 Pihkala, Juhani. 1997. Prosessisuureiden mittaustekniikka. Helsinki: Edita opetushallitus. 4. painos.
- 17 Operation manual thermoMETER CT / CTF / CTH / CTM-1 / CTM-2 / CTM-3. Manuaali. Micro-epsilon. Luettu 25.4.2013.
- 18 Infrared Radiometer SI-100 Series. Manuaali. Apogee. Luettu 25.4.2013.
- 19 Infrared Radiation Pyrometer KT15 II, Operating Instructions. 2003. Manuaali. Heitronics Infrarot Messtechnik GmbH. Luettu 25.4.2013.
- 20 Series IN 500 Impac Pyrometers, Operation Manual. 2011. Manuaali. LumaSense Technologies. Luettu 25.4.2013.
- 21 SI-131: Ultra-Narrow Field of View Infrared Radiometer Sensor. Verkkodokumentti. Apogee. <<http://www.apogeeinstruments.co.uk/ultra-narrow-field-of-view-infrared-radiometer-sensor-si-131/>>. Luettu 4.6.2013.
- 22 Field of View. Verkkodokumentti. Apogee. <<http://www.apogeeinstruments.co.uk/field-of-view/>>. Luettu 4.6.2013.
- 23 How to take IRR Temperature Measurements without a Datalogger. Verkkodokumentti. Apogee. <<http://www.apogeeinstruments.co.uk/how-to-take-irr-temperature-measurements-without-a-datalogger/>>. Luettu 4.6.2013.
- 24 Temperature sensor for measurement of soil resp. water temperature. Verkkodokumentti. Theodor Friedrichs & Co. <<http://www.th-friedrichs.de/en/products/temperature/temperature-sensors/temperature-sensor-for-measurement-of-soil-resp-water-temperature/>>. Luettu 4.6.2013.
- 25 Vastuslämpötila-anturi. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Vastusl%C3%A4mp%C3%B6tila-anturi>>. Luettu 3.6.2013.
- 26 Mittaustekniikan perusteet / luento 10. Verkkodokumentti. Helsingin yliopisto. <http://electronics.physics.helsinki.fi/wp-content/uploads/2011/02/Luento10_2007_anturit.pdf>. Luettu 3.6.2013.

- 27 Aumala, Olli. 2001. Mittaustekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto, Oy Yliopistokustannus. 10. korjattu painos.
- 28 How RS232 works. Verkkodokumentti. Best Microcontroller Projects. <<http://www.best-microcontroller-projects.com/how-rs232-works.html>>. Luettu 30.4.2013.
- 29 Sarjaliikenne ja sarjaportti. Verkkodokumentti. Hutasu.net. <<http://www.hutasu.net/ele/sarjaliikenne.html>>. Luettu 30.4.2013.
- 30 User's Guide for Vaisala HydroMet™ Data Collection Platform Volume 1. 2010. Käyttäjän opas. Vaisala. Luettu 30.4.2013.

Kuva maanpintaminimi-mittauksesta Vietnamissa



Kuva: Jaakko Nuottokari.

Anturivertailutaulukko

Laatija: Liisa Savisaari

ANTURIVALMISTAJA	Heitronics	Lumasense Technologies	Micro-epsilon	Apogee	Theodor Friedrichs & Co.
ANTURITYYPPI	KT15.85 IIP	IN510	CT-SF22-C3	SI-131	PT100
LYHENNE TESTISSÄ	KT15	IN510	SF22_1 ja SF22_2	SI-131	PT100_1, PT100_2, PT100_3 ja PT100_4
MITTAUSTAPA	Infrapuna, RS-232	Infrapuna, RS-232	Infrapuna, analoginen, differentiaalinen jännitemittaus	Infrapuna, analoginen, termistori	Platinavastus, analoginen, 4-johdinmittaus
LÄHTÖVIESTI	RS-232	RS-232	0...+5 VDC	0...+2,5 mVDC	72,3...119,4 Ω
ASETETTU MITTAUSALUE (°C)	-50...+50	-40...+60	-50...+50	-100...+100	-70...+50
Käyttölämpötila-alue (°C)	-20...+60	0...+65	-20...+180	-55...+80	-50...+80
Tarkkuus (°C)	± 0,5 + 0,7 % anturin kotelon ja kohteen lämpötilan erosta	T = 0...700 °C: 0,8 % TAI 1 °C T = 0...-20 °C: 2 °C T = -20...-40 °C: 3 °C	± 1	± 0,3	± 0,1
Mittauskeilan leveys kahdesta metristä (cm)	n. 10	n. 22	n. 10	n. 98	-
Hinta (€ / kpl)	3955	665 (sis. ALV 24 %)	315	555	~65-70

Infrapuna-anturien käyttöönottomääritykset opinnäytetyössä

Laatija: Liisa Savisaari

Heitronics KT15.85 IIP

Määritykset käyttöönotossa (Puttylla terminaaliyhteys + picocom-yhteys):

- Kättely (handsake) pois käskyllä COM OFF + [enter].
- Parityn vaihto even-tilasta none-tilaan. Tähän on kaksi tapaa.
 - a) picocomin kautta, komento: C-y
 - b) kysy ensin: COM ? Sitten anna käsky: COM xxx x x N + [enter], johon x-arvojen paikalle tulee kyselyssä ilmoitetut lukemat. N-kirjaimen kohdalle ovat vaihtoehdot N (none), E (even) ja O (odd).
- Emissiokerroin asetettu arvoon 1, muutettu käskyllä EMI x.xxx + [enter], johon x-arvon paikalle haluttu lukuarvo.
- Lämpötilan kysely: TEMP + [enter].
- Lisää komentoja löytyy Description of Commands -vihosta.

Lumasense Technologies IN 510

Määritykset käyttöönotossa

- Emissiokerroin 1, asetettu digitaalinäytöstä. Navigointinäppäimet kannen alla.
- Lämpötilan kysely: AAms + [enter], jossa AA on osoite (esim. "00").
- Lisää kyselykomentoja anturin manuaalissa.

Micro-epsilon CT-SF22-C3

Määritykset käyttöönotossa

- Lähtösignaali 0-5 V.
- Emissiokerroin 1, arvot muutettu digitaalinäytöstä.

Apogee SI-131

Määritykset käyttöönotossa

- Ei toimenpiteitä asetuksiin.

Heitronics KT15.85 IIP – tekniset tiedot

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Accuracy (provided that the emissivity has been correctly set, after a warm-up period of 15 min.):	± 0.5 °C plus 0.7 % of the temperature difference between the housing containing the measuring instruments and the object to be measured or: value of temperature resolution. The higher value shall prevail.
Long-time stability:	better than 0.1 ‰ of the absolute measuring temperature in Kelvin/month
Target diameter (95 %):	The target diameter depends on the lens and the detector used in each individual case. When short-focus lenses are used, the distance within which the minimum measuring field can be found varies by $\pm 4\%$.
Radiation detector:	HEITRONICS pyroelectric detector
Permissible ambient temperature:	- 20 ... + 60 °C For higher ambient temperatures, cooling and protecting jackets are available. → <i>OPTIONS AND ACCESSORIES</i> and → <i>TECHNICAL INFORMATION TDI/W001a</i> (below)
Storage temperature:	- 20 ... + 70 °C
Weight:	approx. 0.55 kg

Analog output: possible signal outputs (variable by programming)
0 ... 20 mA, 4 ... 20 mA
0 ... 1 V, 0 ... 10 V

Lower temperature value (T.low): minimum temp. value for analog signal
Upper temperature value (T.end): maximum temp. value for analog output

Minimum temperature difference: depends on final temperature (T.end)
The following values will result:

Final temperature	Minimum temperature difference
≤ 150 °C	50 °C
≤ 200 °C	100 °C
≤ 1000 °C	200 °C
> 1000 °C	400 °C

Load of analog output: current output: load ≤ 550 Ohm
voltage output: load ≥ 10 kOhm

Resolution of analog output: 12 bit

Digital interface V24 (RS232C): 9.6 ... 115.2 kBaud

Response time (90 %): variable by programming
KT15 IIP: 0,005; 0,01; 0,03; 0,1; 0,3; 1; 3; 10; 30;
60; 120; 240; 360, 480 und 600 s

Operating voltages: alternating voltage 24 V ± 10 %, 48 ... 400 Hz
direct voltage 22 ... 30 V
Current consumption: ≤ 150 mA RMS

Type of protection: IP65

Protection against oscillation: DIN 40046 Bl. 8; test: Fc
vibration strength: A B1 E
frequency range: 10 to 55 Hz
amplitude: +/- 0.2 mm
duration of test/position: 30 min

Connector type: miniature circular connector, Franz Binder GmbH,
type 99-5630-15-12, series 423, 12 pin and
type 99-5626-15-07, series 423, 7 pin

Options:

Thermal switch: switching temperature: > 70 °C
load: voltage: ≤ 48 V, current: ≤ 0.5 A


alternative:
Analog input: 0 ... 10 V

alternative:
Digital input: floating contact or 0 ... 30 V (low 1 V, high 4 V)

Lumasense IN 510 – tekniset tiedot

Technical Data

Temperature range:	-40 ... 700°C (-40 ... 1292°F)
Sub range:	Factory setting: 0 ... 500°C; user adjustable (minimum span: 51°C)
Data handling:	Digital
Spectral range:	8 ... 14 μm (for measurement of non-metallic or coated metallic objects)
Sensor head:	Optics 10:1: with lens; optics 2:1: without lens
IR detector:	Thermopile
Power supply:	10 ... 30 V DC ripple < 0.5 V power consumption: max. 60 mA
Analog output:	Linear current (0/4 ... 20 mA), voltage (0 ... 5 V) or thermocouple (type „J“ or „K“)
Additional output:	10 mV/°C or 10 mV/°F for temperature of sensor head
Load:	Max. 700 Ω / 24 V power supply (for current output) (500 Ω /20 V)
Output impedance:	100 Ohm (for thermocouple or voltage output)
Relay contact:	Isolated relay contact; 50 V DC; 0.2 A
Hysteresis:	Negative hysteresis, 2 - 20°C adjustable (without current or value exceeded = open contact)
Digital interface:	Switchable: RS232 or addressable RS485 (half duplex) baud rate 1200 up to 19200 Bd, resolution 0.1°C
Isolation:	Non isolated analog outputs and power supply (relay contact isolated)
Emissivity (EMI):	10 ... 120% adjustable in steps of 0.1%
Max. / Min. value storage:	Clear time OFF; 0.1 s; 0.25 s; 0.5 s; 1 s; 5 s; 25 s; extern; auto
Response time t_{90} :	180 ms; switchable: 0.5; 1; 2; 5; 10 or 30 s
Temperature display (only IN 510, IN 520 and IN 530):	LCD, 4 digit, 3 values per second, permanent display illumination
Exceeding of measuring range:	Display 8888
Fall below measuring range:	Display: 1°C below sub range
Resolution:	1/10°C (1/10°F from -40 to 999.9°F; 1°F from 1000 to 1292°F)

Uncertainty **) Dependent on object temperature T and ambient temperature T_{amb} . (EMI = 1, t_{90} = 1 s):	T = 0...700°C: 0.8% or 1°C *) T = 0...-20°C: 2°C T = -20...-40°C: 3°C T_k of uncertainty: 0.03%/°C or 0.05°C/°C at 25°C ambient temperature T_{amb} . *) *) Whichever value is greater. The instrument must be at a constant ambient temperature for a minimum of 15 minutes  A correct temperature measurement is impossible if the temperature of the object is more than 85°C below the sensor head temperature (temperature reading is too high, no error message)
***) With thermocouple output minimum 2.5°C	
Repeatability:	0.5% of measured value °C or 0.5°C whichever value is greater, ambient temperature is constant
Noise Equivalent Temperature Difference (NETD):	with t_{90} = 180 ms: 0.1°C (σ = 1) (measured temperature = 23°C and emissivity = 1)
Ambient temperature converter:	0 ... 65°C
Storage temperature converter:	-20 ... 70°C
Ambient temperature of sensor head:	IN 510-N and IN 510: 0 ... 85°C IN 520-N and IN 520: 0 ... 180°C with cooling / purging unit: 0 ... 200°C IN 530-N and IN 530: 0 ... 180°C (short-time 210°C) with cooling / purging unit: 0 ... 200°C
Storage temperature of sensor head:	-20 ... 85°C (IN 510-N, IN 510) -20 ... 180°C (IN 520-N, IN 520) -20 ... 180°C (IN 530-N, IN 530)
Relative humidity:	10 ... 95%, non condensing
Protection class:	IP65 (converter, sensor head 10:1, 180°C-sensor head 2:1) IP20 (85°C-sensor head 2:1)
Weight:	320 g
Dimensions:	Converter: 98 mm x 64 mm x 34 mm (L x B x H) Sensor head: 28 x 14 mm (L x Ø), thread M12 x 1, L=10.8 mm
Housing:	Aluminum (converter), stainless steel (sensor head)
Operating position:	Any
CE Approval / EMV tests:	According to EU directives about electromagnetic immunity

Micro-epsilon CT-SF22-C3 – tekniset tiedot

Model		CT-SF02-C3	CT-SF15-C3	CT-SF22-C3
Optical resolution		2:1	15:1	22:1
Temperature range ¹		-50°C to 600°C	-50°C to 600°C	-50°C to 975°C
Spectral range		8 to 14µm		
System accuracy ²		± 1% or ± 1°C		
Repeatability ²		± 0.5% or ± 0.5°C		
Temperature resolution		± 0.1°C		
Response time		150ms (95%)		
Emissivity/gain ¹		0.100 to 1.100		
Transmissivity/gain ¹		0.100 to 1.100		
Signal processing ¹		peak hold, valley hold, average; extended hold function with threshold and hysteresis		
Certificate of calibration		optional		
Outputs/analogue	channel 1 channel 2 optional	0/4 to 20mA, 0 to 5/10V, thermocouple J, K sensor temperature (-20 to 180°C as 0 to 5V or 0 to 10V), alarm output relay: 2 x 60VDC/ 42VACeff; 0.4A; optically isolated		
Outputs/digital	optional	USB, RS232, RS485, CAN, Profibus DP, Ethernet		
Output impedances	current output voltage output	mA max. 500Ω (with 8 to 36VDC) mV min. 100kΩ load impedance thermocouple 20Ω		
Inputs		programmable functional inputs for external emissivity adjustment, ambient temperature compensation, trigger (reset of hold functions)		
Cable length		1m , 3m (standard), 8m, 15m		
Power supply		8 to 36VDC; max. 100mA		
Environmental rating		IP 65 (NEMA-4)		
Ambient temperature	sensor controller	-20°C to 130°C		-20°C to 180°C
Storage temperature	sensor controller	-40°C to 130°C		-40°C to 180°C
Relative humidity		10 - 95%, non condensing		
Vibration	sensor	IEC 68-2-6: 3 G, 11 to 200Hz, any axis		
Shock	sensor	IEC 68-2-27: 50 G, 11ms, any axis		
Weight		sensor: 40g; controller: 420g		

Apogee SI-131 – tekniset tiedot

Specifications

Field of View

- SI-131: 14° half angle

Output Target Temp

Difference from sensor body

- SI-131: 20 μ V per C

Output Sensor Body Temp

- 0 - 2500 mV

Accuracy -10 to 65 C

Where target temp within 20 C from sensor body temp

- ± 0.2 C absolute accuracy
 - SI-131: ± 0.3 C
- ± 0.1 C uniformity
- ± 0.05 C repeatability

Accuracy -40 to 70 C

Where target temp greater than 20 C from sensor body temp

- ± 0.5 C absolute accuracy
 - SI-131: ± 0.6 C
- ± 0.3 C uniformity
- ± 0.1 C repeatability

Optics

- Germanium lens

Dimensions

- 6 cm long by 2.3 cm diameter

Mass

- 190 g

Response Time

- < 1 second to changes in target temperature

Input Power

- 2.5 V excitation

Wavelength Range

- 8 - 14 μ m (corresponds to atmospheric window)

Operating Environment

- -55 to 80 C
- 0 to 100% non-condensing relative humidity
- Water resistant
- Designed for continuous outdoor use

Datalogger Channels

- 1 differential (detector) and 1 single-ended (thermistor)

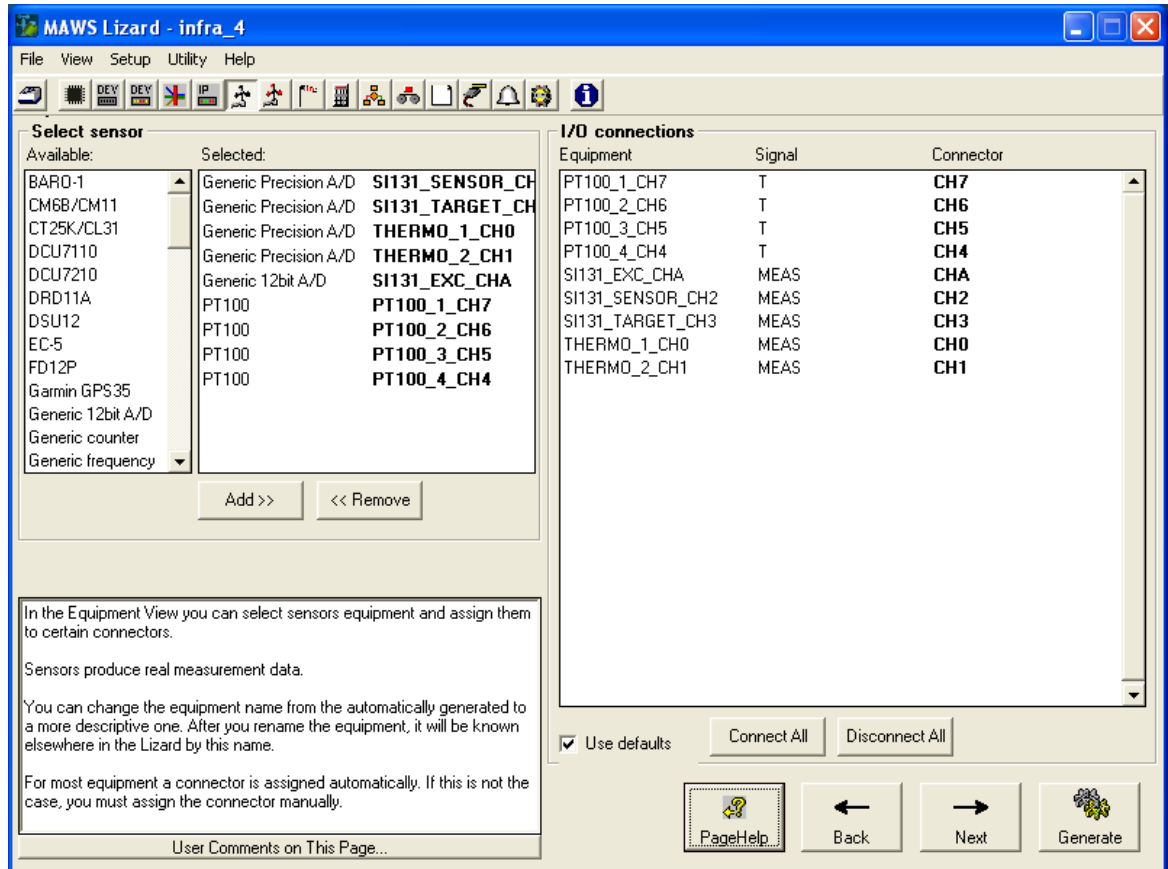
Cable

- 5 meters twisted, shielded 4-conductor wire
- Santoprene jacket
- Additional cable is available in multiples of 5 meters

Warranty

- 1 year against defects in materials and workmanship

Näkymä Maws Lizard -ohjelmasta

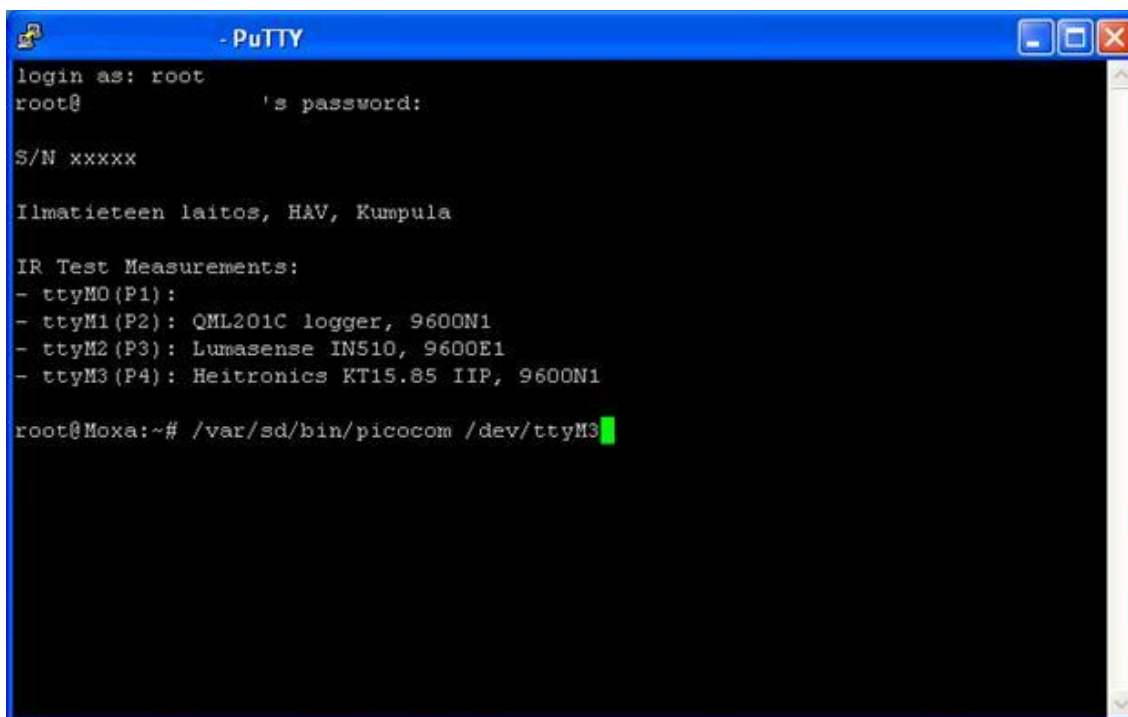


Yhteyden muodostaminen Puttyn ja anturin välille

Laatija: Liisa Savisaari

Vaiheet Puttyn ja anturin välisen yhteyden muodostamiseen ovat:

1. Avataan ensin Putty.
2. Otetaan yhteys osoitteeseen A.B.C.D / x 3G:n kautta tai sitten suoraan aliverkon osoitteeseen A.B.C.D / x ethernetin kautta.
3. Annetaan käyttäjätunnus ja salasana.
4. Otetaan yhteys esimerkiksi Linux PC:n porttiin 4 eli Heitronicsin anturiin picocomin avulla syöttämällä komentoriville `/var/sd/bin/picocom /dev/ttyM3 [Enter]`.
5. Nyt laitteelle voidaan syöttää laitekohtaisia komentoja.



```
- PuTTY
login as: root
root@      's password:

S/N xxxxxx

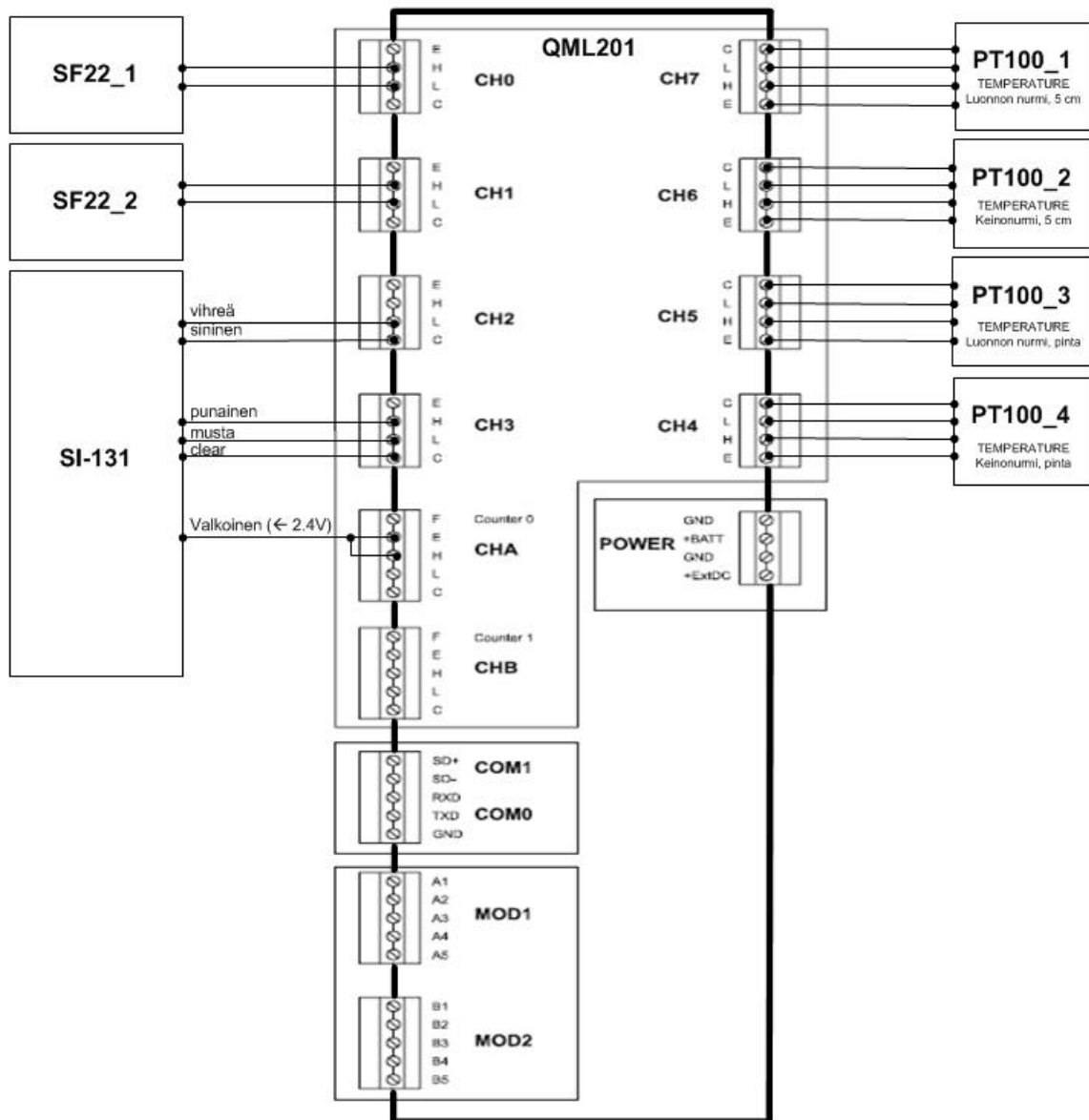
Ilmatieteen laitos, H&V, Kumpula

IR Test Measurements:
- ttyM0 (P1):
- ttyM1 (P2): QML201C logger, 9600N1
- ttyM2 (P3): Lumasense IN510, 9600E1
- ttyM3 (P4): Heitronics KT15.85 IIP, 9600N1

root@Moxa:~# /var/sd/bin/picocom /dev/ttyM3
```

IP-osoitteet on poistettu ohjeista vallitsevan tutkimuskäytännön mukaisesti.

INFRAPUNA-ANTURI KYTKENNÄT



Analogia-antureiden kytkennät Vaisalan QML201-dataloggeriin.
Kuvan pohjan lähde: Vaisala HydroMet™ Data Collection Platform Volume 1
-manuaali. [30]

Dataloggerin kanavatiedot

Table 4 Analog Measurement Channels

Channels	Pin Name	Description
CH0, CH1, CH2, CH3 24-bit ADC	E	12 V/25 mA voltage excitation ON/OFF, voltage can be measured. OR: 100 μ A/1mA current excitation.
	H	Analog input (High)
	L	Analog input (Low)
	C	The pin has been connected to ground (GND) via a 10 Ω resistor so that the current can be measured.
CH4, CH5, CH6, CH7 24-bit ADC	E	100 μ A/1 mA current excitation
	H	Analog input (High)
	L	Analog input (Low)
	C	Common return and reference level for voltage measurements via the channel's own E-, H-, and L-pins. The pin has been connected directly to ground.
CHA, CHB Suitable for fast-changing input signals 12-bit ADC	F	Frequency input
	E	0 ... 12 V/20 mA adjustable excitation voltage, can be measured.
	H	Fast analog input (High)
	L	Fast analog input (Low)
	C	Common return (Analog ground)

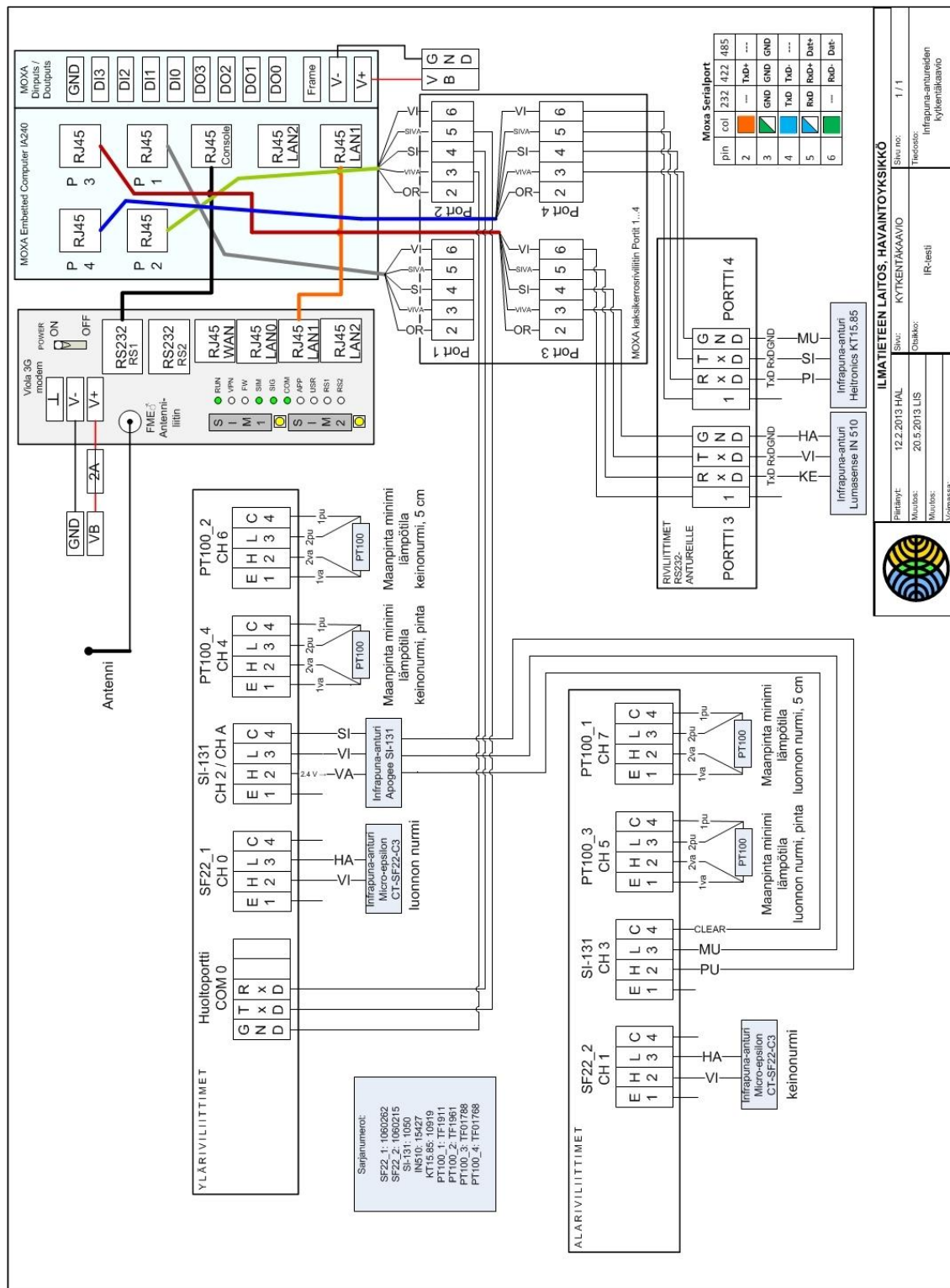
Table 5 Power Channels

Pin Name	Description
GND	Ground
SDI-12	SDI-12
GND	Ground
+ExtDC	8 ... 30 VDC

Kanavatietojen lähde: Vaisala HydroMet™ Data Collection Platform Volume 1 -manuaali. [30]

Kytentäkaavio, tutkimuksessa käytetty mittausjärjestelmä

Laatija: Liisa Savisaari



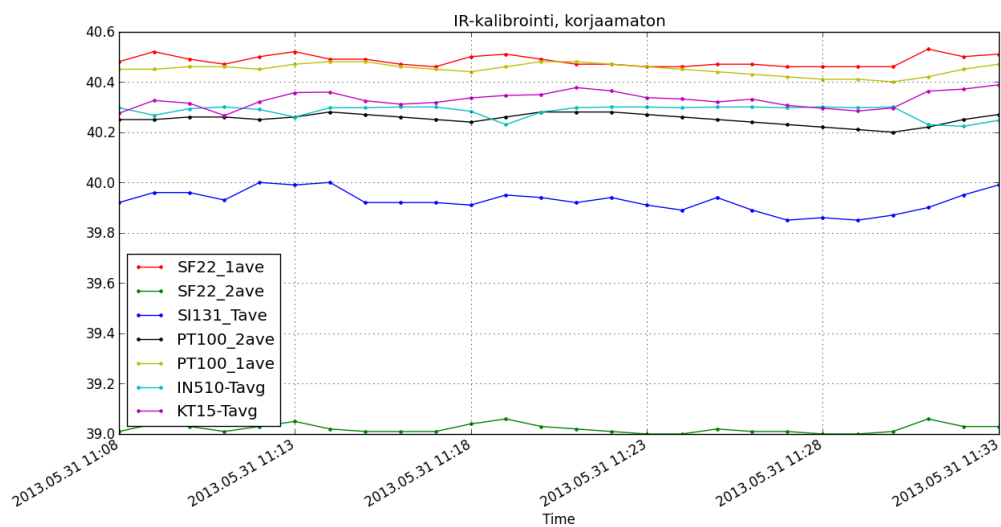
Kytentäkaavion lähde: Satamasääsaman kytkentäkaavio

Lämpötilamittauksen virityspöytäkirja

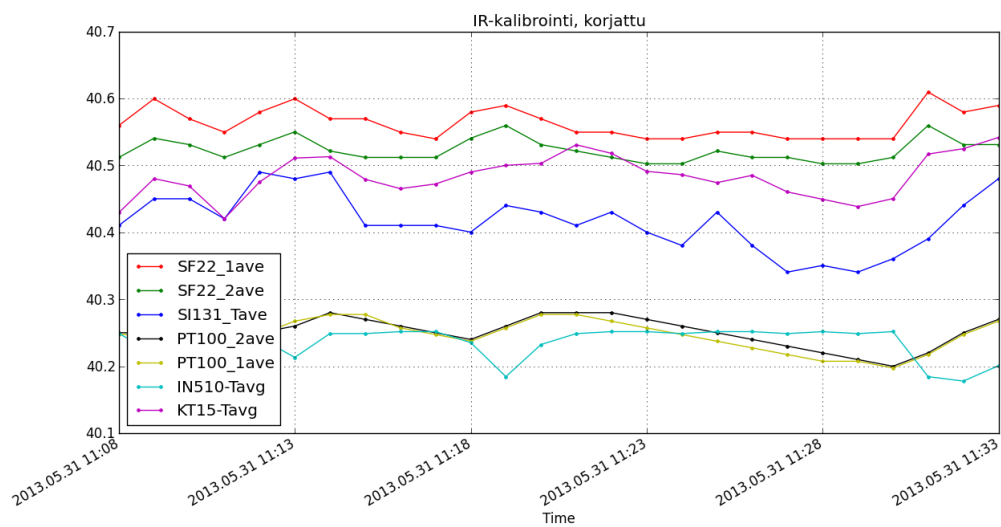
NAWS; LÄMPÖTILAMITTAUKSEN VIRITYS																	
Mittauskanava:	TA1 / CH7																
RES-	4																
	RES-arvo	Mitattu läm-															
	asteina (C):	pötila (C):															
- 60 C:	-60.00	-60.01															
- 40 C:	-40.00	-40.00															
- 20 C:	-19.98	-19.99															
0 C:	0.01	0.01															
+ 20 C:	20.01	20.01															
+ 40 C:	40.01	40.01															
Pt100-anturikorjaukset:																	
a:	1.122	(ohmia)															
b:	0.98986	(kerroin)															
Pt100-anturi:	0																
Syötä korjaus NAWS:ille antamalla komento "ADCAL7 [b] [a]"																	
TARKISTAMINEN: RES-kalibraattorin lämpötila-arvot anturikorjauksilla																	
- 60 C:	-59.12	-59.12															
- 40 C:	-39.32																
- 20 C:	-19.50																
0 C:	0.29	0.29															
+ 20 C:	20.08																
+ 40 C:	39.88	39.88															
RES-kalibraattorista korjausten kanssa mitattujen arvojen tulisi olla taulukon mukaisia vähintään +/- 0,07 C rajoissa. Maksimipoikkeama on likimain sama kuin yllä laskettu poikkeama "d".																	
<input checked="" type="checkbox"/> POISTA VANHAT KORJAUKSET Anna komento "ADCAL7 1 0" ELEKTRONIikka-KORJAUKSET: <table border="1"> <tr> <td>a:</td> <td>0.00</td> <td>(astetta C)</td> </tr> <tr> <td>b:</td> <td>0.9999</td> <td>(kerroin)</td> </tr> <tr> <td>d:</td> <td>0.01</td> <td>(C)</td> </tr> </table> "d" ilmoittaa maksimipoikkeaman asteina. Arvo ei saa olla suurempi kuin 0,05 C. NAWS KORJAUKSET: <table border="1"> <tr> <td>a:</td> <td>0.28</td> <td>(astetta C)</td> </tr> <tr> <td>b:</td> <td>0.9898</td> <td>(kerroin)</td> </tr> </table> b = kerroin a = summatermi			a:	0.00	(astetta C)	b:	0.9999	(kerroin)	d:	0.01	(C)	a:	0.28	(astetta C)	b:	0.9898	(kerroin)
a:	0.00	(astetta C)															
b:	0.9999	(kerroin)															
d:	0.01	(C)															
a:	0.28	(astetta C)															
b:	0.9898	(kerroin)															

Lähde: NAWS; HUOLTORAPORTTI & KORJAUSLASKENTA -excel-tiedosto.

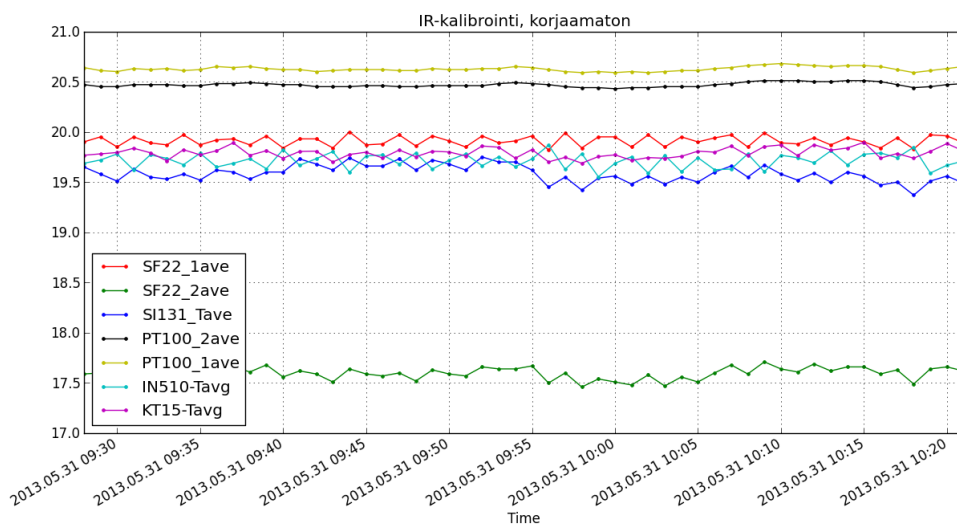
Antureiden kuvaajat ennen ja jälkeen kalibroinnin sekä virityksen



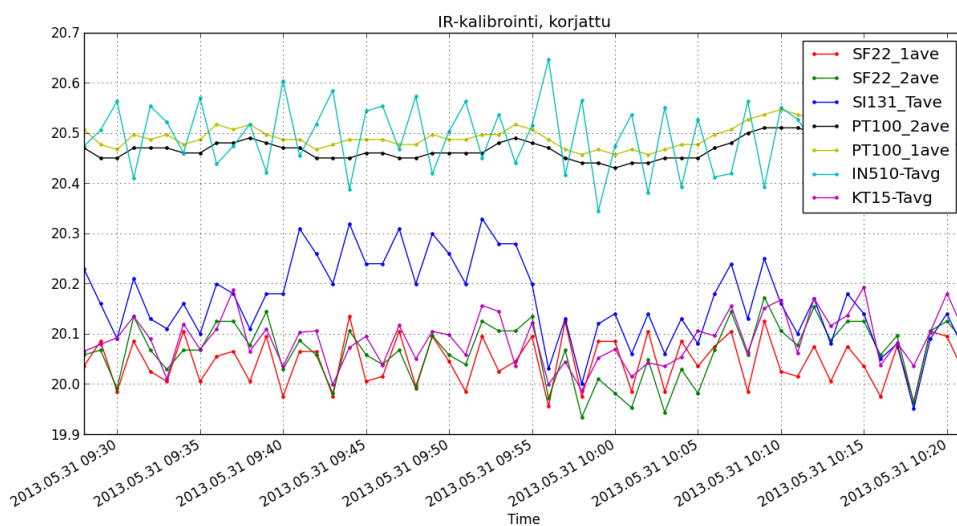
Kuvaaja A. Korjaamattomat arvot +40 °C:ssa.



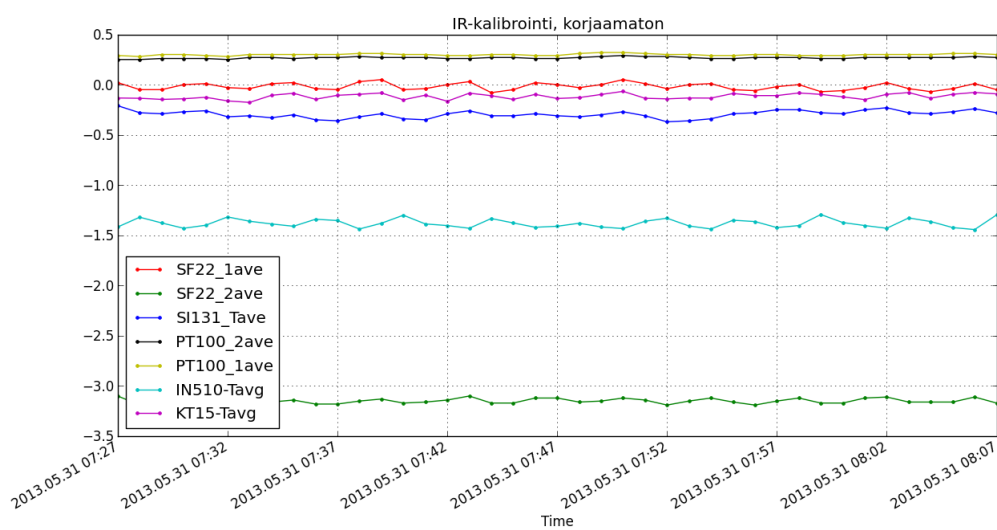
Kuvaaja B. Korjatut arvot +40 °C:ssa. Kaapin PT100-vertailuanturin arvo on +40,4 °C.
Kuvaajissa on eri skaalaukset.



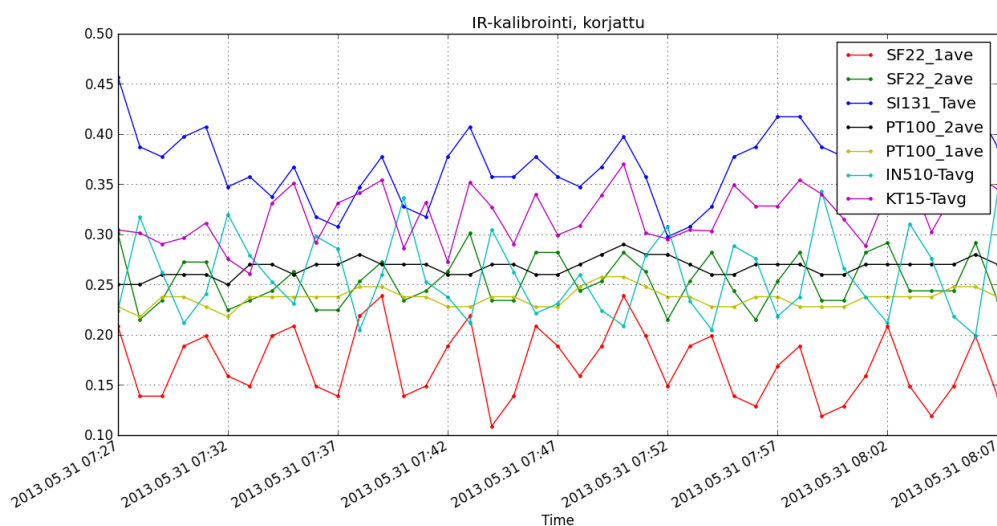
Kuvaaja C. Korjaamattomat arvot +20 °C:ssa.



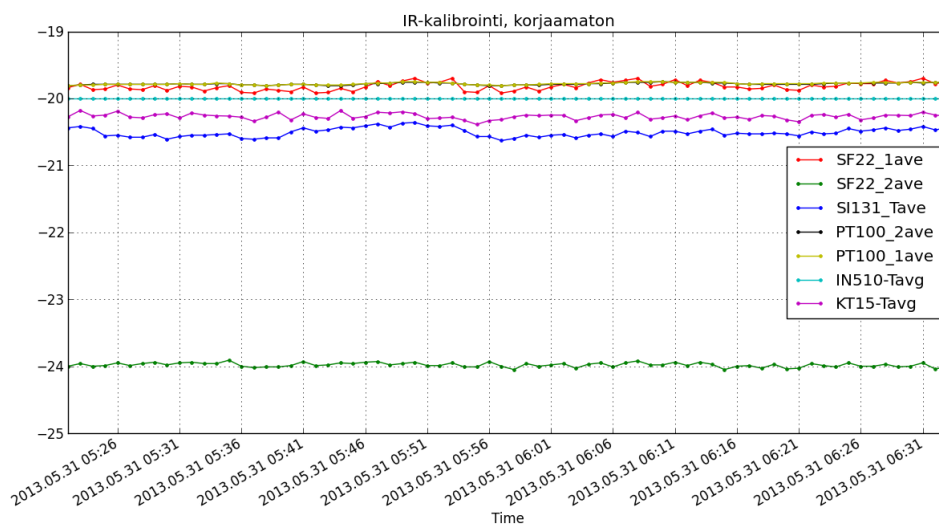
Kuvaaja D. Korjatut arvot +20 °C:ssa. Kaapin PT100-vertailunturin arvo on +20,3 °C.



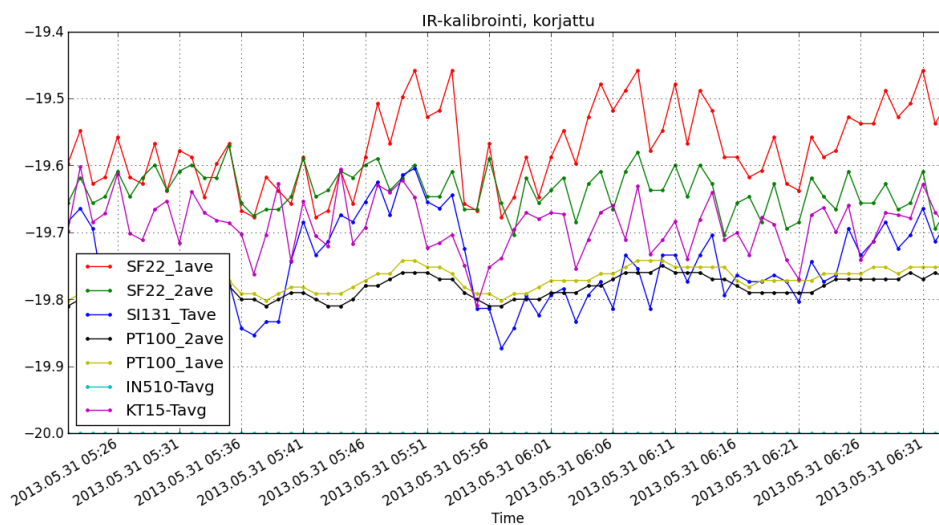
Kuvaaja E. Korjaamattomat arvot 0 °C:ssa.



Kuvaaja F. Korjatut arvot 0 °C:ssa. Kaapin PT100-vertailuanturin arvo on +0,3 °C.



Kuvaaja G. Korjaamattomat arvot -20 °C:ssa. Vaaleansinisellä käyrällä merkitty anturi Lumasense IN510 lakkasi mittaamasta odotetusti, kun lämpötila laski alle 0 °C:n. Kyseistä käyrrä ei tule ottaa siis huomioon.

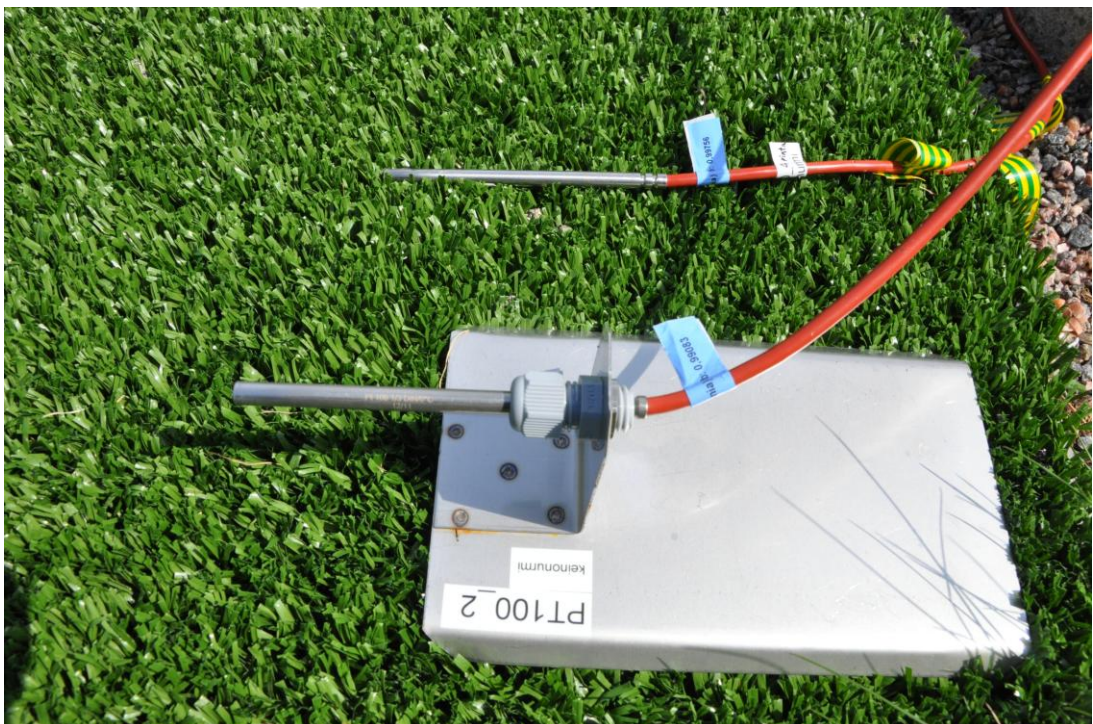


Kuvaaja H. Korjatut arvot -20 °C:ssa. Kaapin PT100-vertailuanturin arvo on -19,8 °C.

Kuvia mittausjärjestelyistä



Kuva 1. PT100-anturit luonnonurmella.



Kuva 2. PT100-anturit keinonurmella.



Kuva 3. Mittausorsi ja antureita.



Kuva 4. Keinonurmialustan pohja. Keinonurmen asennusvaiheisiin kuuluivat nurmikon lapiointi, puukehikon valmistus, hiekan asettaminen, kahden juuriestekangaskerroksen asettaminen sekä keinonurmimaton ruuvaaminen.