



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOHANNA ROUHU  
METSÄN LÄMPÖHERÄTTEIDEN MALLINNUS  
Diplomityö

Tarkastajat: TkT Jouko Haapamaa ja  
professori Helge Lemmetyinen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Luonnontieteiden ja ympäristötekniikan  
tiedekuntaneuvoston kokouksessa  
5.12.2012

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknis-luonnontieteellinen koulutusohjelma

**ROUHU, JOHANNA:** Metsän lämpöherätteiden mallinnus

Diplomityö, 64 sivua

Helmikuu 2013

Pääaine: Kemia

Tarkastajat: TkT Jouko Haapamaa ja professori Helge Lemmetyinen

Avainsanat: metsän lämpötilajakauma, taustan lämpöheräte, taustan lämpömalli, infra-puna, lämpökamera

Lämpökameratiedustelulla voidaan havaita taustasta sinne kuulumattomia kohteita niiden poikkeavan lämpötilan vuoksi. Jotta kohteita voidaan kätkeä tällaiselta tiedustelulta, niiden lämpöherätteet on saatava vastaamaan taustan lämpöherätteitä. Tässä työssä tutkittiin metsän lämpöherätteiden mallinnusta.

Työssä on kolme osiota: kirjallisuustutkimusosio, analyysiohjelman kehitysosio sekä kokeellinen osio. Kirjallisuustutkimusosiossa selvitetään sähkömagneettiseen säteilyyn liittyvää teoriaa, lämpösäteilyn vaimeneminen ilmakehässä, lämpökameran toimintaperiaate, lämpökuvausalan tutkimuksia sekä lämpötilajakaumia varten histogrammin optimaalinen luokan leveys. Analyysiohjelman kehitysosiossa selvitetään työn aikana kehitetyn analyysiohjelman toiminta. Ohjelman avulla lämpökamerakuvista saatiin kuvattun taustan lämpötilajakauma, johon sovitettiin kolme Gaussin jakaumaa. Kokeellisessa osiossa kuvataan työn aikana suoritettujen lämpökamerakuvausten mittausasetelma sekä kehitetään lineaarista mallia metsän lämpötilajakauman alimmalle ja ylimmälle lämpötilalle kuvausolosuhteiden funktiona.

Mallien parametreina kokeiltiin aluksi aikaa, ilman hetkellistä lämpötilaa, tai vaan hetkellistä irradianssia sekä hetkellistä sadenopeutta. Mallia kehitettäessä aika jätettiin pois syklisyytensä vuoksi. Havaittiin, että hetkellinen ilman lämpötila oli hyvä selittävä tekijä metsän alimmalle lämpötilalle. Ylimmälle lämpötilalle se ei ollut aivan yhtä hyvä tekijä. Hetkellinen irradianssi ja sadenopeus eivät olleet hyviä selittäviä tekijöitä. Niiden vaihtaminen edellisen puolen tunnin keskiarvoon ei tuottanut muutosta parempaan. Lopuksi todettiin, että malleja voisi parantaa ottamalla mukaan pidemmän historian irradianssista, vaihtamalla sadenopeuden kertyneeseen sadeveden määrään ja lisäämällä mukaan auringon kierron ja korkeuden vaikutukset. Pohdittiin myös, miten malliin voisi ottaa mukaan taustan spatiaalisen vaihtelun helikopterikuvausten avulla.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Science and Engineering

**ROUHU, JOHANNA:** Modelling thermal signatures of forests

Master of Science Thesis, 64 pages

February 2013

Major: Chemistry

Examiners: D. Sc. Jouko Haapamaa and Professor Helge Lemmetyinen

Keywords: temperature distribution of forest, background thermal signature, background thermal model, infrared, thermal camera

By thermal camera searching one can detect objects from the backgrounds that do not belong there. In order to hide these objects their thermal signatures have to be made similar to those of the background. This thesis examines the modelling of thermal signatures of forests.

The thesis has three parts: literature study part, analysis program development part and experimental part. In the literature study part theory related to the electromagnetic radiation, attenuation of infrared radiation in the atmosphere, working of thermal camera, researches in the field of thermography and optimal histogram bin widths are explored. In the analysis program development part the working of the analysis program developed during the thesis is explored. With this program the temperature distribution of the background was obtained from the thermal camera picture and three Gauss distribution were fitted in it. The experimental part explores the thermal camera measuring setups made during the thesis work and developing linear model for the lowest and highest temperatures of temperature distributions of forests as functions of measurement circumstances.

As arguments for the models time, momentary air temperature, momentary sky irradiance and momentary rain speed were first tried. While developing the model time was abandoned because of its cyclic form. It was observed that momentary air temperature was a good explaining factor for the lowest temperature in the forest. For the highest temperature it was not as good a factor. Momentary irradiance and rain speed were not good explaining factors. Changing them to the averages of the previous half-an-hour did not change the situation better. In the end it was stated that the model could be improved by taking into account longer history for the irradiance, by changing rain speed to cumulated precipitation and by adding the effect of the rotation and highness of the Sun. There was also discussion about how one could add the spatial variation to the model with thermal camera measurements from the helicopter.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Ylöjärven Lakialassa Puolustusvoimien Teknillisessä Tutkimuslaitoksessa Asetekniikkaosastolla häivetekniikan tutkimusalalla vuonna 2012. Haluan kiittää ohjaajaani Jouko Haapamaata ja esimiestäni Antti Tuohimaata avustamisesta analyysiohjelman ja mallien kehityksessä, Pasi Salosta lämpökameroiden osalta saamastani asiantuntija-avusta sekä professori Helge Lemmetyistä tieteellisen kirjoittamisen opastamisessa ja työn huolellisesta tarkastamisesta. Kiitokset myös muille henkilöille avustamisesta lämpökamerakuvauksissa ja MatLab-ohjelman käytössä.

8.1.2013

Johanna Rouhu

## SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
2	Lähtökohdat .....	3
	2.1 Lämpökuvaamisen teoria .....	3
	2.2 Lämpökamera.....	5
	2.2.1 Toimintaperiaate .....	5
	2.2.2 ThermoVision® SC6000 -lämpökamerat.....	6
	2.2.3 Lämpökameroiden käyttökohteita .....	7
	2.3 Säteilystä lämpötilaksi ThermaCAM™ Researcher- ohjelmalla.....	8
	2.4 Alan tutkimuksia .....	10
	2.5 Histogrammin luokkien leveys .....	13
3	Lämpökameramittaukset metsästä .....	15
	3.1 Mittausasetelma .....	15
	3.2 Davis- ja Vaisala FD12P - sääasemat .....	19
4	Analyysimenetelmä ja -ohjelma.....	21
	4.1 Lämpökamerakuvan esikäsittely analyysikelpoiseksi.....	21
	4.2 Ohjelman yleinen toimintaperiaate .....	23
	4.3 Näytealueen rajausta lämpökamerakuvasta .....	24
	4.4 Lämpötilajakauman muodostus välittömistä mittaustuloksista .....	26
	4.5 Gauss-sovitusta lämpötilajakaumaan.....	31
	4.6 Muita ohjelman toimintoja.....	35
	4.6.1 Jakauman ja kokonaissovituksen leveys.....	35
	4.6.2 Yhteenveto: mitä ohjelma tallentaa?.....	35
	4.6.3 Epäonnistuneiden sovitusten käsittely .....	36
5	Havainnot metsän lämpötilajakaumista ja analyysistä.....	38
6	Malli jakauman ääriämpötiloille eri olosuhteissa .....	44
	6.1 Haettavan mallin muoto .....	44
	6.2 Malli 1: parametreina hetkelliset arvot .....	45
	6.3 Malli 2: parametreina keskiarvoja.....	50
	6.4 Malli 3: lisää vuorokausia malliin.....	52
	6.4.1 Jakauman rajat .....	52
	6.4.2 Leveyden itseisarvo .....	54
	6.5 Mallin kehitysideoita.....	55
	6.6 Spatiaalisen vaihtelun lisääminen malliin helikopterikuvausten avulla.....	57
7	Yhteenveto ja tärkeimmät jatkotoimenpiteet .....	60
	Lähteet.....	62

## SYMBOLIT JA LYHENTEET

$a$	vaimennuskerroin
$a_i$	lineaarisen mallin kertoimet
$A$	vesihöyrystä aiheutuva vaimennuskerroin
$b$	vaimennuskerroin
$B$	vesihöyrystä aiheutuva vaimennuskerroin
$c$	valonnopeus
$C$	vakio lämpökameran signaalille
$d$	kameran etäisyys kohteesta
$E$	lämmön siirtyminen johtumisen kautta ja lämpövarasto
$F$	lämpökameran kalibraatiovakio lämpötilan laskennassa
$G$	vapaa ja pakotettu lämmön siirtyminen kulkeutumisen avulla
$G_d$	Gaussin jakauma
$h$	Planckin vakio
$H$	lämpökameran korkeus maasta
$k$	Boltzmannin vakio
$K$	lämpökameran kalibraatiovakio lämpötilan laskennassa
$K_d$	K-jakauma
$K_\varphi$	Besselin toinen funktio muokattuna kertaluvulla $\varphi$
$L$	puun latvuston keskimääräinen korkeus
$M$	joukon alkioiden määrä
$N$	histogrammin luokkien määrä
$p$	K-jakauman vakioparametri
$Q$	nettosäteily
$r$	suhteellinen kosteus
$R$	lämpökameran kalibraatiovakio lämpötilan laskennassa
$S$	sadenopeus
$t$	aika
$T$	lämpötila
$u$	binomijakauman parametri
$U$	lämpökameran pikselin sähköinen signaali
$v$	binomijakauman parametri
$V$	latenttilämmön vaihtaminen
$w$	veden ekvivalenttipitoisuus
$W$	teho; irradianssi
$W_d$	Weibullin jakauma
$X$	painokerroin ERIKA-ohjelman läpäisyn laskennassa
$y$	mallinnettava suure
$Z$	skaalausvakio, amplitudi
$\alpha$	absorptivisuus
$\beta$	kuvauskulma horisonttiin nähden

$\beta_d$	beeta-jakauma
$\beta_w$	Weibullin jakauman muotoparametri
$\gamma_n$	erhefunktio Shinomoto-Shimazaki -algoritmissa
$\gamma_w$	Weibullin jakauman lokaatioparametri
$\Delta$	histogrammin luokan leveys
$\varepsilon$	emissiivisyys
$\eta$	Weibullin jakauman skaalaparametri
$\kappa$	tuulen nopeus
$\lambda$	aallonpituus
$\mu$	keskiarvo
$\nu$	variassi
$\rho$	heijastavuus
$\sigma$	Stefan-Boltzmannin vakio
$\tau$	läpäisy
$\varphi$	K-jakauman kertalukuparametri
$\chi_i$	sääparametrit lineaarisessa mallissa
$\omega$	kameran kuvauskulma maahan nähden
LW	pitkäaaltoalue (long wave): 8-12 $\mu\text{m}$
MW	keskiaaltoalue (medium wave): 3-5 $\mu\text{m}$
NIR	lähi-infrapuna-alue (near infrared): 1-3 $\mu\text{m}$
PVTT	Puolustusvoimien teknillinen tutkimuslaitos
QWIP	kvanttikaivodetektor (quantum well infrared photodetector)

# 1 JOHDANTO

Sekä sotilaallisissa että rauhanomaisissa tilanteissa on toisinaan tarve saada erotettua luonnosta sinne kuulumattomat kohteet. Ihmissilmä pystyy tällaisia kohteita erottamaan niiden luonnosta poikkeavan värin tai muodon perusteella. Tällöin jäävät havaitsematta ne kohteet, jotka riittävän kaukaa katsottuna sopeutuvat hyvin luonnon väreihin. Myöskään kätkeytyjä, kuten maahan kaivettuja kohteita, ei pystytä havaitsemaan näköaistin avulla. Ongelmana on siis, että näkyvän valon alueella kohteet sulautuvat taustaan liian hyvin. Vaihtamalla havaintoalue eri alueelle sähkömagneettista spektriä voidaan saada taustan ja kohteen spektrit erilleen. Infrapuna on yksi esimerkki näin hyödynnettävistä spektrialueista. Jokainen kappale lähettää infrapunasaateilyä sen mukaan, missä lämpötilassa kappale on. Tutkimalla tätä säteilyä voidaan erottaa samanväriset kohteet toisistaan, jos ne ovat eri lämpötiloissa.

Sotilaallisissa kriisitilanteissa on tarve saada kätkeytyä kohteita maastossa vihollisen lämpökameratiedusteluilta. Kohteiden kätkeminen tapahtuu siten, että kohteiden infrapunaherätteet saadaan taustaa vastaaviksi esimerkiksi naamioverkoilla. Tätä varten täytyy luonnollisesti olla tieto taustan lämpöherätteestä. Koska kriisitilanteessa ei voida mitata kulloisenkin taustan herätteitä, tarvitaan matemaattinen malli, joka ennustaa taustan lämpöherätteet eri olosuhteissa. Eri olosuhteet aiheutuvat vuorokauden ajan, vuodenajan ja sään vaihtelusta. Kätkemistarve voidaan jakaa kolmeen asteeseen. Ensimmäisessä asteessa tiedustelun voidaan ajatella tapahtuvan kaukaa, jolloin kätkeytyvä kohde oletetaan pistemäiseksi. Kohteen lämpötilan on oltava taustan lämpötilajakauman alueella, jotta se ei erotu taustasta liian matalien tai korkeiden lämpöherätteiden vuoksi. Kun tiedustelu tapahtuu seuraavassa eli toisessa asteessa lähempää, kohteen lämpötilajakauman muodon tulee olla samanlainen kuin taustan, jotta kohde ei erotu. Kohteen ja taustan lämpötilajakaumien samanlaisuus ei vielä riitä kätkemään kohdetta, ellei niiden tekstuuri ole samanlainen, mikä onkin kolmas kätkemisen aste.

Tässä diplomityössä keskitytään kahteen ensimmäiseen asteeseen eli tekstuuria ei tarkastella. Ensimmäisen asteen suojautumista varten oli tarve saada malli jakauman leveydelle. Koska lämpötilajakaumalla ei itsellään ole käyttökelpoisia parametreja, joilla sen muodon saa rekonstruoida, toista astetta varten jakaumiin haluttiin sovittaa tilastollinen jakauma. Tämän sovituksen parametreille haluttiin myös matemaattinen malli. Alalta löytyy tutkimuksia ympäristön keskilämpötilan, keskihajonnan ja vinouman vaihtelusta vuorokauden eri aikoina. On myös tutkittu, kuinka keskilämpötila ja keskihajonta ovat kytköksissä toisiinsa. Näitä tutkimuksia yhdistää se, ettei niissä ole tehty minikäänlaista mallia edellä mainituille asioille. Ne, kuten vallinneet sääolotkin, on vain esitetty kuvaajina ja kommentteina. Lämpötilajakaumien on todettu olevan epäsymmet-



risiä, minkä vuoksi niiden sovituksen tilastollisella jakaumalla on hyvä käyttää muuta kuin Gaussin jakaumaa, esimerkiksi Weibullin tai binomijakaumaa. Kirjallisuudesta löytyy myös matemaattisia malleja, mutta ne koskevat vain jakauman keskilämpötilaa, joka ei ole tärkeimpiä asioita kätkennässä. Diplomityössä oli tavoitteena tehdä MatLabilla analyysiohjelma lämpökamerakuvien lämpötilajakaumien muodostamiseksi ja soveltamiseksi Gaussin jakaumilla. Lisäksi työssä mitattiin metsän latvuston lämpöheränteitä ja pohdittiin niille soveltuvaa matemaattista mallia, koska metsä on tärkein toimintaympäristö sotilaallisille joukoille. Metsästä tarkasteltiin vain latvuston heränteitä, koska sen ajateltiin vastaavan paremmin ilmasta käsin tehtyä lämpökameratiedustelua.

## 2 LÄHTÖKOHDAT

Kohteen emittoima lämpösäteily voidaan kerätä lämpökameroilla ja säteilyn perusteella arvioida kohteen lämpötilaa. Tässä luvussa esitetään lämpösäteilyyn liittyviä fysiikan lakeja, lämpökameroiden toimintaperiaate, työssä käytetyn lämpökameraohjelman toimintaperiaate, lämpösäteilyalan tutkimuksia sekä kohteen lämpötilajakauman muodostamista varten histogrammin optimaalisia luokkien määriä.

### 2.1 Lämpökuvaamisen teoria

Infrapuna on sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on näkyvää valoa pitempää. Infrapunaspektri voidaan jakaa kolmeen alueeseen. Alueiden rajat ovat häilyviä, mutta suunnilleen seuraavia: lähi-infrapuna (near infrared, NIR) 1-3  $\mu\text{m}$ , äärimmäinen infrapuna (12 - 1000  $\mu\text{m}$ ) sekä näiden väliin jäävä lämpösäteilyalue. [1; 2]

Kirchhoff havaitsi, että pinnat emittoivat sähkömagneettista säteilyä yhtä paljon kuin ne absorboivat eli niiden absorptivisuus  $\alpha$  on yhtä suuri kuin emissiivisyys  $\varepsilon$  tietyllä aallonpituudella. Musta kappale on pinta, joka ei heijasta säteilyä vaan absorboi, ja vastaavasti emittoi, kaiken säteilyn. Mustan kappaleen emissiivisyys (ja samalla absorptivisuus) on 1. [3]

Planck johti mustan kappaleen lähettämälle emittanssille  $W$  (säteilyteholle, yksikkönä  $\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}$ ) lain, joka kytkee mustan kappaleen lämpötilan  $T$  ja sen emittoiman säteilyn aallonpituuden  $\lambda$ :

$$W(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^3}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} * 10^{-6}, \quad (2.1)$$

missä Planckin vakio  $h = 6.6 * 10^{-34}$  Js, valonnopeus  $c = 3*10^8$  m/s ja Boltzmannin vakio  $k = 1.4 * 10^{-23}$  J/K. Kappaleen säteilyteho tietyllä aallonpituudella riippuu siis kappaleen lämpötilasta. Jokainen kappale absoluuttisen nollapisteen yläpuolella lähettää infrapunasäteilyä, josta voidaan arvioida kappaleen lämpötilaa Planckin lain avulla. Derivoimalla Planckin laki aallonpituuden suhteen, saadaan emittoidun säteilyn maksimi-intensiteettiä vastaavaksi aallonpituudeksi

$$\lambda_{max} = \frac{2898 \mu\text{m K}}{T}. \quad (2.2)$$

Tämä tunnetaan Wienin siirtymälakina. Laki ennustaa, että kappaleen lämmitessä sen maksimi-intensiteetti siirtyy kohti pienempää aallonpituutta eli infrapuna-alueelta näkyvän valon puolelle. Wienin siirtymälaki selittää yleisen sen havainnon, että kappaleet

kuumetessaan alkavat hehkua punaisina ja lämpötilan edelleen noustessa väri muuttuu oranssiksi tai keltaiseksi, eli pienemmän aallonpituuden suuntaan. Kappaleen kokonai-semittanssi saadaan integroimalla Planckin laki yli kaikkien aallonpituuksien ( $\lambda = 0 \rightarrow \lambda = \infty$ ):

$$W_{TOT}(T) = \sigma T^4. \quad (2.3)$$

Laki tunnetaan nimellä Stefan-Boltzmannin laki ja  $\sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  on Stefan-Boltzmannin vakio.

Useimmat käytännön pinnat eivät ole mustia kappaleita, sillä ne eivät absorboi ja emittoi kaikkea vastaanottamaansa säteilyä, jolloin niiden emissiivisyys on pienempi kuin yksi. Niitä kutsutaan harmaiksi kappaleiksi. Harmaan kappaleen emissiivisyys on sen emittanssin suhde samassa lämpötilassa olevaan ja samaa aallonpituutta emittoivaan mustan kappaleen emittanssiin:

$$\varepsilon = \frac{W_{pinta}}{W_{musta\ kappale}}. \quad (2.4)$$

Harmaalle kappaleelle pitää lisätä emissiivisyyden vaikutus kaavojen 2.1 - 2.3 hyödyntämistä varten:

$$W(\lambda, T) = \varepsilon \frac{2\pi hc^3}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} * 10^{-6}, \quad (2.5)$$

$$\lambda_{max} = \frac{2898 \mu m K}{\varepsilon T}, \quad (2.6)$$

$$W_{TOT}(T) = \varepsilon \sigma T^4. \quad (2.7)$$

Harmaan kappaleen absorptivisuus on kappaleeseen absorboituvan säteilytehon suhde pinnalle saapuvaan säteilytehoon. Täydellisen absorption sijaan osa säteilystä heijastuu kohteesta tai läpäisee kohteen. Heijastavuus  $\rho$  ja läpäisevyys  $\tau$  lasketaan vastaavasti kuin absorptivisuus. Näille kolmelle suurelle pätee kaikilla aallonpituuksilla seuraava yhtälö:

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (2.8)$$

Opaakki pinta ei läpäise säteilyä ( $\tau = 0$ ), jolloin edellinen kaava saa muodon

$$\alpha + \rho = 1. \quad (2.9)$$

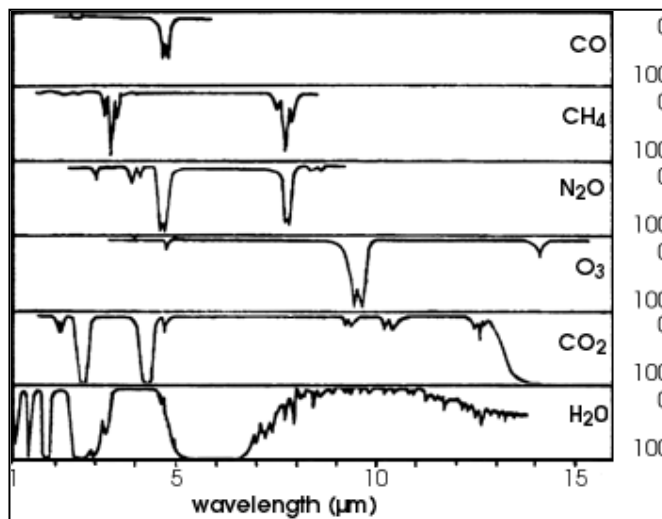
[4] Koska absorptivisuus on yhtä suuri kuin emissiivisyys, pätee opaakille pinnalle

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (2.10)$$

ja heijastamattomalle pinnalle ( $\rho = 0$ )

$$\varepsilon + \tau = 1. \quad (2.11)$$

Kun infrapunasäteily tai muu sähkömagneettinen säteily kulkee ilmakehässä, se vaimenee. Ilmakehän kaasut ja aerosolit (esimerkiksi savu ja sumu) absorboivat ja sirottavat säteilyä. Aerosoleja löytyy vain ilmakehän alaosasta ja niiden osuus infrapunasäteilyn vaimenemisessa riippuu voimakkaasti ilmankosteudesta. Ilmakehä koostuu suurimmaksi osaksi typestä ja hapestä, mutta niillä on hyvin vähäinen merkitys infrapunasäteilyn vaimenemisessa ilmakehässä. Kaasuista suurimmat absorboijat ovat vesihöyry ja hiilidioksidi. Hiilidioksidipitoisuus jakautuu melko tasaisesti ilmakehässä. Vesihöyrypitoisuus on suurimmillaan ilmakehän alemmissa osissa ja se vaihtelee merkittävästi paikallisesti. [5; 6; 7] Kuva 2.1 esittää muutaman kaasun absorptio osalla infrapuna-alueetta.



*Kuva 2.1. Ilmakehän kaasujen absorptio infrapuna-alueella. [8]*

Vesihöyry absorboi voimakkaasti infrapunasäteilyä aallonpituuksilla 5-7  $\mu\text{m}$ . Koska vesihöyryn absorptioalueella ei voida suorittaa lämpökamerakuvauksia, lämpösäteilyalue on jaettu kahteen osaan: keskiaaltoalue (medium wave, MW) 3-5  $\mu\text{m}$  ja pitkäaaltoalue (long wave, LW) 8-12  $\mu\text{m}$ . [1; 9] Kokonaisuudessaan ilmakehä läpäisee infrapunasäteilyä parhaiten alueilla 3.5 - 4.1  $\mu\text{m}$  ja 10.5 - 12.5  $\mu\text{m}$  [5].

## 2.2 Lämpökamera

### 2.2.1 Toimintaperiaate

Lämpökameroilla tutkitaan lähinnä kohteiden pintalämpötilajakaumia. Infrapunakameroista varsinaisia lämpökameroita ovat MW- ja LW-alueella kuvaavat, sillä vain näillä alueilla kuvataan kohteen itsensä emittoimaa säteilyä. Muilla alueilla toimivat infrapunakamerat lähettävät infrapunasäteilyä kohteeseen, joka vain heijastuu takaisin kameranalle. [10]

Lämpökameran linssi keskittää kameralle tulevan säteilyn. Tavallinen silikaattista valmistettu lasi ei läpäise ja taita kovin hyvin lämpösäteilyä. Tämän vuoksi lämpökameroiden linssit valmistetaan yleensä hiilipinnoitetusta germaniumista. Kerätty säteily kulkeutuu detektorille. Nykyään lämpökameroiden detektorit ovat yleensä puolijohdeista valmistettuja matriisi-ilmaisimia. [11] Puolijohdeessa virta syntyy, kun elektroni siirtyy valenssivyöltä johtavuusvyölle. Tämän aikaansaamiseksi puolijohdeeseen tulevalle fotonilla pitää olla energiaa vähintään valenssi- ja johtavuusvyön energioiden eron verran. Perinteisten puolijohdeiden rinnalle on kehitelty uudentyyppinen puolijohdedetektor, kvanttikaivodetektor eli lyhyemmin QWIP (Quantum Well Infrared Photodetector). QWIP-detektorissa elektronien siirtymät tapahtuvat kvanttikaivojen ansiosta johtavuusvyön sisällä, jolloin siirtymä voi tapahtua myös sellaisen säteilyn tullessa, jonka energia on pienempi kuin valenssi- ja johtavuusvyöiden erotus. Näin ollen QWIP-detektorit havaitsevat pienemmän energian eli pitemmän aallonpituuden omaavia fotoneita [12; 13].

Matriisi-ilmaisimissa jokaiselle kuvapisteelle (pikselille) on oma ilmaisimien. Ilmaisimia on kahdenlaisia. Ensimmäinen detektorityyppi havaitsee suoraan fotoneita. Kun tietyllä aallonpituudella olevat fotonit tulevat detektorille, ne saavat aikaan joko jännite-eron tai resistanssin muutoksen. Suoraan fotoneita havaitsevat detektorit toimivat vain alhaisissa lämpötiloissa, joten niitä jäädytetään noin  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een. Toisenlaisia detektorityyppejä ei tarvitse jäädyttää, koska se ei suoraan havaitse fotoneita. Nämä detektorit absorboivat tulevaa infrapunasäteilyä, jolloin detektorin elementeissä tapahtuu pieniä lämpötilamuutoksia. Nämä lämpötilamuutokset aiheuttavat resistanssin muutoksen. Molemmissa detektorityypeissä sähköisten ilmiöiden muutoksista muodostuu sähköinen signaali, joka välitetään eteenpäin. Signaalinkäsittely-yksikössä impulssi muuntuu digitaaliseksi. Digitaalinen signaali muunnetaan (erillisellä tietokoneohjelmalla) lämpötila-arvoksi. [ 4; 9; 11; 14; 15]

Lämpökamerat havaitsevat lämpötiloja  $-20$ :stä Celsius-asteesta kahteen tuhatteeseen asteeseen. Yleensä niiden tarkkuus on noin  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jäädytettyjen detektorien etuna on parempi resoluutio ja herkkyys, minkä ansiosta nopeampiakin lämpötilan muutoksia pystytään havaitsemaan. [11; 14]

### **2.2.2 ThermoVision® SC6000 -lämpökamerat**

Tässä diplomityössä käytettiin ThermoVision SC6000 -lämpökamerasarjasta MW- ja LW-kameroita (kuva 2.2).



*Kuva 2.2. Vasemmalla MW-lämpökamera ja oikealla LW-lämpökamera FL 100-linssein varustettuina.*

Molemmissa kameroissa on matriisi-ilmaisin, joka on MW-kamerassa indiumantimonididetektorin ja LW-kamerassa QWIP. Indiumantimonididetektorin havaitsee infrapunasäteilyä pääasiassa alueella  $0.9 - 1.7 \mu\text{m}$ , mutta kameraan on sisäänrakennettu kylmäsuodatin, joka saa sen toimimaan normaalilla MW-alueella  $3.0 - 5.0 \mu\text{m}$ . Sensoria jäähdytetään heliumin avulla, jotta sen lämpötilan pysyy 77 Kelvinissä. Pienin mitattavissa oleva lämpötilaero MW-kameralla on 18 mK. LW-kameran QWIP-detektorin toimintaherkkyys on alueella  $8 - 9.2 \mu\text{m}$ . Se pidetään 70 Kelvinissä heliumin avulla. Kummankin kamerasignaalinkäsittelyssä huonoja pikseleitä poistetaan ja tilalle muodostetaan uusia lähimpien pikselien keskiarvosta. [4]

### 2.2.3 Lämpökameroiden käyttökohteita

Lämpökameroita käytetään monissa sovelluksissa. Etuna perinteisiin lämpömittareihin nähden on mittauksen nopeus ja välittömän kontaktin tarpeettomuus tutkittavan kohteen kanssa. Kuvaaminen ei myöskään tuhoa kohteen rakennetta. Kuvaamalla rakennuksia tai laitteita mahdolliset puutteet lämpöeristyksessä voidaan havaita. Teollisuudessa lämpökameroilla voidaan havaita viallinen laitteen osa sen poikkeavan lämpötilan perusteella, minkä jälkeen osa voidaan vaihtaa uuteen ennen kuin laite vaurioituu. Tulipalossa infrapunakameroita hyödynnetään savun läpi näkemiseen. Lämpökuvasta hyödynnetään myös sotilaallisissa tarkoituksissa. [16]

Lääketieteessäkin on keksitty hyviä sovelluskohteita lämpökameroille. Esimerkiksi vaurioitunut kudokseksi voidaan havaita erilaisen lämpötilaprofiilinsa vuoksi. [10] Influenssaa sairastavilla on usein kuumetta, joten esimerkiksi lentokentällä matkustajia voidaan kuvata lämpökameralla, jolloin havaitaan nopeasti sairastaneet matkustajat muita matkustajia lämpimämpinä. Rajoittamalla heidän matkustamistaan estetään influenssan leviämistä matkailun kautta. [17]

### 2.3 Säteilystä lämpötilaksi ThermaCAM™ Researcher-ohjelmalla

Lämpökameran mittaama säteilytehoa ei voida muuntaa suoraan kohteen pintalämpötilaksi, vaan ensin täytyy poistaa kohteen ympäristön lähettämän säteilyn vaikutus. Tässä alaluvussa käsitellään aihetta diplomityössä käytetyn ThermaCAM Researcher -ohjelman toimintaperiaatteen avulla. Ohjelmaa voidaan käyttää sekä lämpökameravideon tallentamiseen että kuvien analysointiin. Ohjelma muuntaa kamerasta tulevan sähköisen signaalin lämpötilaksi jokaisessa pikselissä. Ohjelma ottaa huomioon sen, että kameraan tuleva säteily koostuu seuraavista elementeistä:

1) Kuvattavan kohteen lähettämästä säteily. Olkoon kohteen emittanssi  $\varepsilon W_{kohde}$ , missä  $W_{kohde}$  on kohteen lämpötilassa olevan mustan kappaleen aiheuttama emittanssi. Säteily kulkee ilmakehän läpi, jolloin sen emittanssi kerrotaan ilmakehän läpäisyllä  $\tau$ . Kohteesta kameralle saapuva emittanssi on siis  $\tau\varepsilon W_{kohde}$ .

2) Ympäristön säteily, joka heijastuu kuvattavan kohteen pinnasta. Ympäristöstä tulee kohteen pinnalle säteilyteho  $W_{ymp}$ . Pinnasta heijastuu  $\rho W_{ymp}$  eli kaavan 2.10 mukaan  $(1 - \varepsilon)W_{ymp}$ . Tämäkin teho kulkee ilmakehän läpi, joten kameralle aiheutuu ympäristön heijastuksista emittanssi  $\tau(1 - \varepsilon)W_{ymp}$ .

3) Ilmakehän säteily. Ilmakehän emittanssi on  $\varepsilon W_{atm}$ , joka voidaan kirjoittaa kaavan 2.11 mukaan  $(1 - \tau)W_{atm}$ .

Ohjelma ei ota huomioon esimerkiksi auringon säteilyn siroamista ilmakehässä. Kameralle tulevaksi säteilytehoksi arvioidaan siten

$$W_{kok} = \tau\varepsilon W_{kohde} + \tau(1 - \varepsilon)W_{ymp} + (1 - \tau)W_{atm}. \quad (2.12)$$

Kameran kehittämän signaalin  $U$  oletetaan olevan suoraan verrannollinen mustan kappaleen emittanssiin  $W$ :

$$U = CW, \quad (2.13)$$

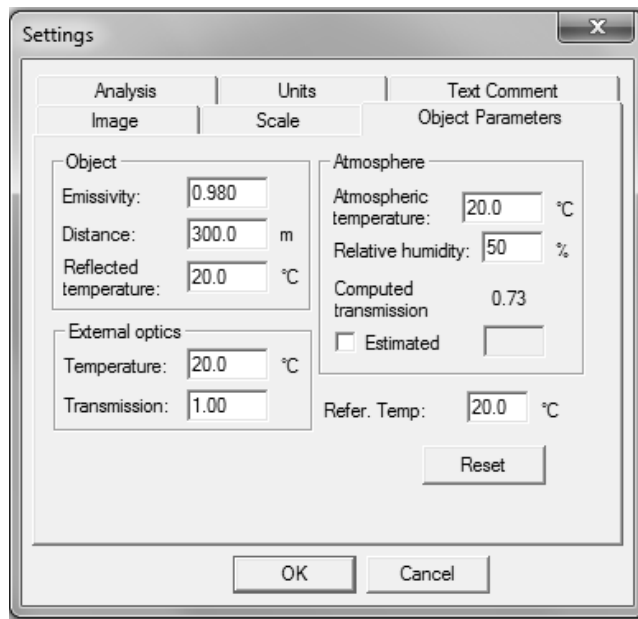
missä  $C$  on vakio. Kertomalla yhtälö 2.12 vakiolla  $C$  saadaan kameran kehittämäksi kokonaissignaaliiksi

$$U_{kok} = \tau\varepsilon U_{kohde} + \tau(1 - \varepsilon)U_{ymp} + (1 - \tau)U_{atm}. \quad (2.14)$$

Tästä saadaan ratkaistua kohteen aiheuttamaksi signaaliksi

$$U_{kohde} = \frac{U_{kok}}{\tau\varepsilon} - \frac{(1-\varepsilon)U_{ymp}}{\varepsilon} - \frac{(1-\tau)U_{atm}}{\tau\varepsilon}. \quad (2.15)$$

$U$  on lämpötilan funktio, joten kohteen aiheuttamasta signaalista ohjelma laskee kohteen lämpötilan. Yhtälön oikean puolen laskemiseksi ohjelma tarvitsee lähtötietoina kohteen emissiivisyyden, etäisyyden kamerasta, ulkoisen optiikan lämpötilan ja läpäisyn, ilmakehän lämpötilan ja läpäisyn sekä lämpötilan, jossa heijastuksia aiheuttanut ympäristö on (kuva 2.3).



**Kuva 2.3.** Lämpökamerakuvan asetukset ThermaCAM Researcher -ohjelmassa.

Käyttäjä joko syöttää itse arvioidun ilmakehän läpäisyn tai käyttää ohjelman laskemaa arvoa, jolloin tarvitaan myös ilmankosteustieto. [4]

Kameran tai kuvankäsittelyohjelman käyttöohje ei kuitenkaan kerro tarkemmin, miten ohjelma laskee annettujen parametrien avulla kohteen lämpötilan tai ilmakehän läpäisyn. Toisenlaisen ThermoVision-kameran käyttöohjeesta [18] löytyy tieto, että kameras kanssa käytettävässä ERIKA-ohjelmassa on samanlainen signaalinkäsittelytapa kuin kaava 2.15. Tässä ohjelmassa läpäisy on empiirinen etäisyyden, ilmankosteuden ja ilmanlämpötilan funktio:

$$\tau = Xe^{-\sqrt{d}(a+b\sqrt{w})} + (1-X)e^{-\sqrt{d}(A+B\sqrt{w})}, \quad (2.16)$$

missä  $X$  on painokerroin,  $d$  kohteen etäisyys kamerasta,  $a$  ja  $A$  vaimennuskertoimia,  $b$  ja  $B$  vesihöyrystä johtuvia vaimennuskertoimia ja  $w$  ekvivalentti veden pitoisuus, jonka ohjelma laskee ilmankosteuden ja -lämpötilan perusteella. ERIKA-ohjelmassa lämpötila lasketaan Planckin lain (kaava 2.1) sijasta sitä muistuttavalla kokeellisella kaavalla



$$U = \frac{R}{\frac{K}{e^T - F}} \quad (2.17)$$

$$\Leftrightarrow T = \frac{K}{\ln\left(\frac{R}{U} + F\right)}, \quad (2.18)$$

missä R, K ja F ovat kalibraatiosta saatavia vakioita. [18] Käytettävän ThermaCAM™ Researcher'in oletettiin toimivan näillä samoilla periaatteilla läpäisyn ja lämpötilan laskennan suhteen.

## 2.4 Alan tutkimuksia

Kuten on jo todettu, kappaleen lähettämää lämpösäteilyä voidaan kerätä optisilla laitteilla ja kerätyn säteilyn perusteella arvioida kappaleen lämpötilaa. Tässä luvussa kerrotaan tarkemmin johdannossa lyhyesti mainituista alan tutkimuksista, joissa tutkittiin maastojen lämpötiloja tai niiden lämpötilajakaumien mallintamista.

Ballard et al. [19] ovat tutkineet ruohopeitteen lämpötilakäyttäytymistä vuorokauden aikana. Mittauksissa kuvattiin samaa ruohoaluetta kahden metrin etäisyydeltä kahdella lämpökameralla, jotka toimivat aallonpituusalueella 8 - 14  $\mu\text{m}$ . Toinen kame-roista kuvasi nadiiriasennossa ja toinen 45 asteen kulmassa. Tuloksissa esitettiin kummallakin kameralla saadut ruohon lämpötilan keskiarvot ja auringon irradianssi kolmen vuorokauden ajalta. Ruohon lämpötilan maksimi- ja minimiarvojen erotus esitettiin yhden vuorokauden ajalta yhdessä auringon irradianssin kanssa. Tutkimuksessa todettiin ruohon lämpötilan vaihtelun suurella aikavälillä korreloivan vahvasti auringon irradianssin kanssa. Päätelmä tehtiin kuvaajien perusteella ilman korrelaatiokertoimen arvon esittämistä. Kulmassa kuvanneen kameran maksimi- ja minimilämpötilojen erotus oli keskimäärin suurempaa kuin nadiirikameran. [19]

Yhdysvaltojen armeijan WES (Waterways Experiment Station) [20] on tutkinut erilaisten maastojen lämpötilakäyttäytymistä. Tutkittavia maastoja olivat mäkinen ja tasainen aavikko, ruohikko, erilaisia puita ja pensaita sekä paljas maa. Osa kohteista oli edellisten yhdistelmiä. Mittauksissa käytettiin MW- ja LW-lämpökameroita. Maastojen vuorokautisen lämpötilakäyttäytymisen tutkimista varten kuvaukset suoritettiin kolmena sateettomana vuorokautena, jotka eivät olleet peräkkäiset. Tuloksissa esitettiin kuvaajina sään osalta ajan funktiona ilman lämpötila, auringon irradianssi, suhteellinen ilman-kosteus, barometrinen paine, tuulen nopeus ja suunta sekä näkyvyys. Kummallakin kameralla mitatuista lämpötilajakaumista esitettiin kuvaajina ajan funktiona kunkin taustan keskilämpötila, keskihajonta, vinous, moodi, mediaani sekä väli, jolla 90 % lämpötiloista oli. Vinous-arvo kuvaa jakauman symmetrisyyttä. Mikäli arvo on negatiivinen, jakauma on kallellaan vasemmalle tai sillä on suuri levenemä vasemmalla. Positiivinen vinouma tarkoittaa jakauman kallistumista oikealle tai suurta levenemää oikealla. MW-kameran mitaamat keskilämpötilat olivat suuremmat kuin LW-kameran. Ensimmäisen vuorokauden osalta esitettiin neljä lämpötilahistogrammia kuuden tunnin välein jokai-

selle taustalle. Histogrammin luokkakoko oli kaikissa tapauksissa 0.1 °C. Aavikko, paljas maa ja ruoho olivat muita taustoja lämpimämpiä päiväsaikaan ja viileämpiä yöaikaan. Puilla ja pensilla oli hyvin samankaltaiset keskilämpötilaprofiilit. Suurin hajonta lämpötiloissa tapahtui mäkisellä aavikolla. Vuorokausimittauksien lisäksi mittauksia tehtiin satunnaisesti puolentoista kuukauden ajan. Näissä mittauksissa tutkittiin maastojen keskiarvoa ja keskihajontaa. Tulokset esitettiin keskihajonta-keskiarvo -koordinaatistossa, jossa yksi piste vastasi yhtä kuvaushetkeä. Vuorokautisen vaihtelun havainnollistamiseksi kuvaushetket luokiteltiin neljään kuuden tunnin jaksoon keskiyöstä lukien. Ensimmäisen ja viimeisen neljänneksen aikana lämpötilojen hajonnat olivat pienimmillään ja keskittyneet samaan kohtaan, mutta viimeisen neljänneksen aikana keskilämpötilat olivat suurempia kuin ensimmäisen aikana. Toisen ja kolmannen neljänneksen aikana keskilämpötilat ja -hajonnat olivat enemmän hajallaan. Keskilämpötilat olivat suurimmillaan kolmannen neljänneksen aikana. Verrattuna LW-dataan MW-data sisälsi suurempia hajontoja lämpötiloissa ensimmäisen ja viimeisen neljänneksen aikana ja vähemmän muina aikoina. [20]

Kuttikkadin ja Chellappan [21] mukaan jakaumiin, joissa on suuri levenemä ja suurempi standardikeskihajonta-keskiarvo -suhde, sopii empiirisistä jakaumista luonnon taustan mallintamiseen erityisesti Weibullin jakauma  $W_d(T)$ :

$$W_d(T) = \frac{\beta_w}{\eta} \left(\frac{T-\gamma_w}{\eta}\right)^{\beta_w-1} e^{-\left(\frac{T-\gamma_w}{\eta}\right)^{\beta_w}}, \quad (2.19)$$

missä  $\beta_w$  on muotoparametri,  $\eta$  skaalaparametri ja  $\gamma_w$  lokaatioparametri [22], sekä  $K$ -jakauma  $K_d(T)$ :

$$K_d(T) = \frac{2}{p\Gamma(\varphi+1)} \left(\frac{T}{2p}\right)^{\varphi+1} K_\varphi\left(\frac{T}{p}\right), \quad (2.20)$$

missä kertaluku  $\varphi > -1$ , vakio  $p > 0$ ,  $T \geq 0$  ja  $K_\varphi$  on muokattu toinen Besselin funktio kertaluvulla  $\varphi$ . [23]

Holbo ja Luvall [24] ovat tutkineet ja sovittaneet tilastollisella jakaumalla eri maastojen lämpötilajakaumia päivä- ja yöaikaan. Näytteitä tutkittavista maastokohteista oli 10 kappaletta. Suurin osa maastoista oli metsiä, joissa kasvoi erityyppisiä puita. Osa metsistä oli harvaa, osa enemmän tai vähemmän hakattua. Muita maastoja oli viljelmä ja louhos. Maastot kuvattiin LW-lämpökameralla, joka toimii alueella 8.4 - 9.2  $\mu\text{m}$ . Maastokohteet kuvattiin kahdesti keskipäivän aikaan ja kahdesti yöllä. Mittausten aikaan ei havaittu pilviä. Viljelmän lämpötilajakauman havaittiin olevan laajempi ja matalampi kuin metsän. Maastojen lämpötilajakaumista esitettiin huipun korkeus, matalin ja korkein lämpötila sekä niiden erotus, lämpötilojen keskiarvo, lämpötilahajontaa kuvaavana lukuna  $3 \cdot$  keskihajonta sekä muototekijänä vinouden ja huipukkuuden, eli jakauman kolmannen ja neljännen momentin, suhde. Tekijät tosin totesivat, että tällä muototekijällä ei saatu aikaan haluttua jakauman muodon kuvaamista. Lämpötilajakaumiin sovitetttiin beeta-jakauma  $\beta_d(T)$ :

$$\beta_d(T) = \Gamma(u, v) [ (T)^u (1 - T)^v ], \quad (2.21)$$

missä  $0 < T < 1$  ja parametrit  $u, v > -1$ . Jakaumat sovitettiin pienimmän neliösumman menetelmällä siten, että jakaumien laajat levenemät jätettiin huomiotta. Sovituksen apuna käytettiin myös näköhavaintoa varmistamaan, että sovitukset sovittelevat mahdollisimman hyvin jakauman huipun ympäristön. Kaikille maastokohteille tehtiin sovitukset ja niistä esitettiin taulukossa sovituksen parametrit  $u$  ja  $v$  sekä sovituksen hyvyyslukuna korrelaatiokerroin. Lisäksi parametreista esitettiin geometrisen keskiarvon  $\sqrt{u * v}$  ja logaritmissuhteen  $\log\left(\frac{u}{v}\right)$  tulo. [24] Raportissa ei kuitenkaan esitetty minkäänlaista matemaattista mallia, jonka avulla taustojen jakaumien momenteja tai sovitusten parametreja voi ennustaa eri olosuhteissa.

Wollenweber [25] on esittänyt fysikaalisen mallin kohteen pinnan (keski)lämpötilalle eri olosuhteissa. Mallissa oletetaan, että kohteen lämmönsiirto on tasapainossa eli nettolämmönsiirto on nolla, jolloin kappaleen pintalämpötila on ratkaistavissa seuraavasta yhtälöstä:

$$Q + E + G + V = 0, \quad (2.22)$$

missä  $E$  on lämmön siirtyminen johtumisen kautta ja lämpövarasto,  $G$  on vapaa ja pakotettu lämmön siirtyminen kulkeutumisen avulla ja  $V$  on latenttilämmön vaihtaminen. Yhtälössä  $Q$  on kappaleen nettosäteily:

$$Q = W_{taivas} + (1 - \rho)W_{aurinko} - \sigma T^4, \quad (2.23)$$

missä  $W$  on irradianssi,  $\rho$  maan heijastavuus ja  $T$  pinnan lämpötila. Raportissa esitetään yksityiskohtaisemmin lämmönsiirtotasapainoyhtälö kahdelle tapaukselle: kasvillisuutta täynnä olevalle pinnalle sekä keinotekoisille pinnoille, kuten teille. Kasvipinnalle oletetaan, että lämpövarasto ja lämmön siirtyminen johtumisella voidaan jättää huomiotta, jolloin  $E = 0$ . Lämpökapasiteetin oletetaan olevan merkityksetön ja jätetään pois, jolloin aikariippuvuus jää pois mallista. Kasvillisuudelle suurin energianvirtaus aiheutuu haihtumisesta. Artikkelissa ei esitetä mallia kokonaan, mutta mallissa ajatellaan jaettavaksi kasvipinta kuuteen kerrokseen. Lämpötilan laskentaa varten tarvitaan esimerkiksi ilman lämpötila, höyryn paine, ilman tiheys, lehden suuruus ja lämpökapasiteetti kussakin kerroksessa. Lisäksi tarvitaan kerrosten välisiä resistansseja. Artikkelin lopussa on esitetty todellinen ja mallinnettu neljän maaston keskilämpötila vuorokauden aikana. Näiden perusteella malli sopii hyvin kokeelliseen dataan. [25] Diplomityössä oli juurikin tarkoitus löytää matemaattinen malli, joka kuvaa sää- ja muiden parametrien avulla jakauman ominaisuuksia. Tätä mallia ei kuitenkaan alettu kehittää pitemmälle, koska tarkoituksena ei ollut keskilämpötilan ennustaminen.

de Vries et al. [26] ovat kehittäneet maaston keskilämpötilan lineaarista mallia sääolosuhteiden funktiona. Mallia varten maastosta otettiin kuvia MW- ja LW-lämpökameroilla noin viiden minuutin välein 48 tunnin ajan helmikuussa ja heinäkuus-

sa. Kuvausten aikana sääparametrit tallennettiin viiden minuutin keskiarvona. Malli keskilämpötilalle  $T$  oli

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^5 a_i \chi_i, \quad (2.24)$$

missä  $\chi_i$  ovat sääparametrit (ilman lämpötila, suhteellinen kosteus, ilman paine, taivaan irradianssi lyhyillä aallonpituuksilla 0.3 - 3  $\mu\text{m}$  ja taivaan irradianssi pitkillä aallonpituuksilla 3 - 50  $\mu\text{m}$ ),  $a_i$  ovat regressiolla saatavat kertoimet ja  $T_0$  on vakio. Kuvaukset suoritettiin selkeässä säässä, minkä vuoksi sademäärää ei otettu mukaan malliin. Helmi-kuussa kuvatun yksittäisen puun rungon lämpötila-dataan sovitettuna tämä malli aiheutti  $\pm 0.4$  °C virheen. Vastaavasti heinäkuussa virhe oli  $\pm 1.3$  °C. Molemmissa tapauksissa suurin virhe syntyi aamulla, kun puun lämpötila kohosi nopeammin kuin lineaarinen malli pystyi ennustamaan. Virheen arveltiin johtuvan siitä, että aurinko paistaa aamulla suoraan puihin eikä tämä ilmiö näy taivaan irradianssin arvossa. Todettiin, että puun lämpötilamallin parametreiksi riittävät suhteellinen kosteus (merkittävin), pitkien aallonpituuksien ja auringon irradianssi sekä ilman paine (vähiten merkittävä). Mallin parantamiseksi ehdotettiin, että malliin tulisi lisätä auringon suunta kuvattaviin pintoihin nähden. Keskilämpötilalle johdettiin myös fysikaalinen yhtälö lähtien liikkeelle samoista lähtökohdista kuin edellisessä kappaleessa Wollenweber yhtälössä (2.22). Tekemällä yksinkertaistavia oletuksia tämä fysikaalinen yhtälö saatiin muotoon

$$T = a_1 W_{aurinko} + a_2 T_{ilma} + a_3 T_{ilma} \kappa^{0.7} + a_4 T_{ilma} \sqrt{r}, \quad (2.25)$$

missä  $\kappa$  on tuulen nopeus ja  $r$  suhteellinen kosteus. Todettiin, että fysikaalinen malli ei ollut sen tarkempi kuin kokeellinen lineaarinen malli. [26]

## 2.5 Histogrammin luokkien leveys

Järjestämällä välittömät mittaustulokset histogrammiksi saadaan karkea arvio mitattavan suureen tiheysfunktion käyttäytymisestä. Ongelmana histogrammin muodostamisessa on luokkien määrän, ja siten luokan leveyden, valinta: liian vähäinen luokkien määrä ei tuo esille hyvin jakauman muotoa, liian suuri luokkien määrä puolestaan tuo liikaa esille pienet poikkeavuudet ja tekee jakauman päämuodon epäselväksi. Optimaalisesta luokkien määrästä tai leveydestä löytyy useita ohjeita. Luokkien sopivana määränä voidaan pitää otoskoon neliöjuurta. Määrä 10 - 25 säilyttää histogrammin informatiivisen arvon. [27] Sturgesin säännön mukaan histogrammin luokkien optimimäärä on  $[1 + \log_2 M]$ , missä  $M$  on data-alkioiden kokonaismäärä [28]. Shinomoto ja Shimazaki [29] ovat kehittäneet aikahistogrammille algoritmin optimaalisen luokan leveyden löytämiseksi. Algoritmissa pyritään minimoimaan keskimääräinen integroitu neliövirhe. Algoritmin toimintaperiaate on seuraava:

1) Histogrammin ”x-akseli” jaetaan luokkiin ( $N$  kpl), joiden leveys on  $\Delta$ . Lasketaan niiden arvojen määrä  $n_i$ , jotka ovat  $i$ :nessä luokassa.

2) Lasketaan alkioden määrän keskiarvo  $\mu$  ja varianssi  $\nu$  yhdessä luokassa:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad (2.24)$$

ja

$$\nu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (n_i - \mu)^2. \quad (2.25)$$

3) Lasketaan erhefunktio  $\gamma_n(\Delta)$ :

$$\gamma_n(\Delta) = \frac{2\mu - \nu}{(n\Delta)^2}, \quad (2.26)$$

missä  $n$  on arvojen kokonaismäärä.

4) Toistetaan kohdat 1 - 3 vaihtelemalla luokan leveyttä siten, että erhefunktio  $\gamma_n(\Delta)$  minimoituu. Näin saatu  $\Delta$  on optimaalinen luokan leveys kyseisille mittaustuloksille.

[29]

## 3 LÄMPÖKAMERAMITTAUKSET METSÄS- TÄ

Tässä työssä haluttiin rakentaa mallia metsän lämpöherätteille. Jotta saataisiin selville vuorokauden ajan, vuoden ajan ja sään vaikutus metsän lämpöherätteisiin, mitattiin metsää kokonaisten vuorokausien ajan Ylöjärvellä Lakialassa Puolustusvoimien teknillisen tutkimuslaitoksen (PVT) alueella. Tässä luvussa kuvataan mittausasetelma sekä käytettyjen sääasemien peruspiirteet.

### 3.1 Mittausasetelma

Kuvauksissa käytettiin ThermoVision SC 6000-kamerasarjasta MW- ja LW-lämpökameroita. Kamerat sijoitettiin 40 m korkeaan torniin, jotta herätteet vastaisivat paremmin korkealla lentävän koneen mittaamia herätteitä. Kamerat kiinnitettiin jalustaan kuvaamaan samaa kohtaa auki olevista ikkunoista. Kamerat tarkennettiin metsän reunaan. Kameroissa käytettiin FL-100 -linssijä ilman suodattimia. Kameroiden kuva johdettiin ethernet-kaapelia pitkin tietokoneelle ThermaCAM™ Researcher -ohjelmaan, joka tallensi kuvat minuutin välein. Mittauksissa käytettiin Davis- ja Vaisalan FD12P Weather sensor -sääasemia säädatan tallentamiseksi tietokoneelle. Davis-sääaseman sademittarin todettiin olevan rikki. Sääasemat sijoitettiin siten, etteivät ne olleet aivan rakennusten tai puiden läheisyydessä. Davis-asema oli kuvassa 3.1 näkyvän järven rannassa ja Vaisalan asema kauempana rannasta.

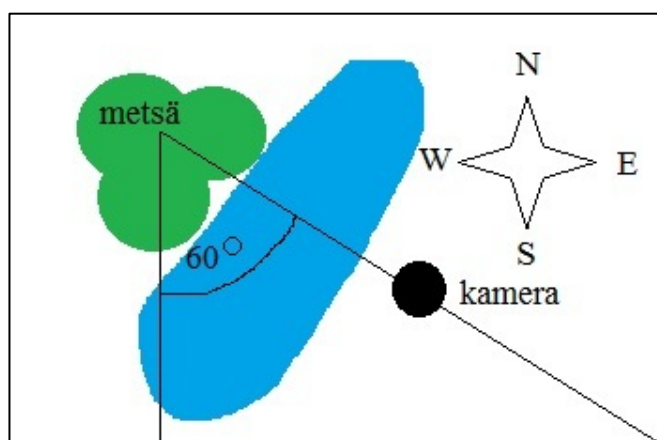
Kuvauksia tehtiin tornista kahteen suuntaan. Ensimmäistä suuntaa kuvattiin molemmilla kameroilla. Kuvattavan metsän etäisyys tornista oli laseretäisyysmittarilla mitattuna 288 m. Kameroiden sijainti oli noin 60° etelästä itään. Kuva 3.1 esittää tämän suunnan mittausasetelman, kuva 3.2 näkymän tornista ja kuva 3.3 havainnollistaa ilmansuunnat kuvauspaikalla.



**Kuva 3.1.** Kamerat kuvasivat tornista järven takana näkyvää metsää. Kuvausikkunat eivät näy.

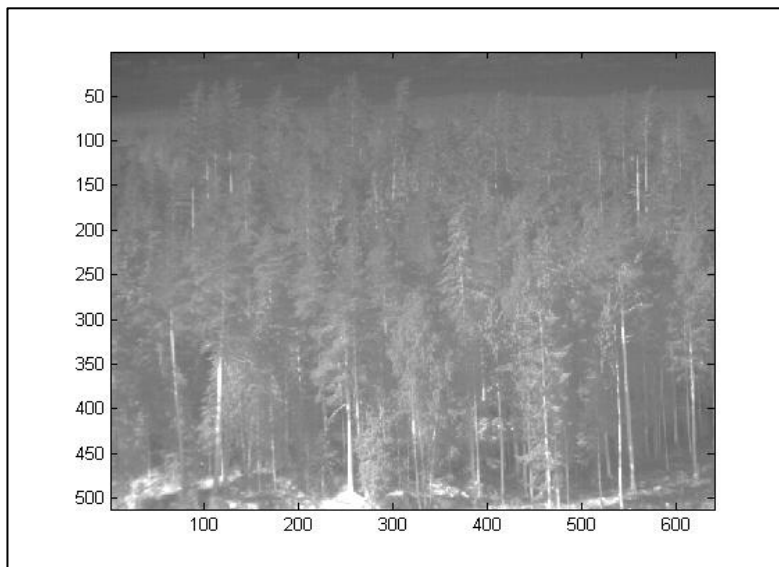


**Kuva 3.2.** Metsä tornista kuvattuna. Kameroiden kuvaama metsäalue merkitty oranssilla soikiolla, tarkemmin kuvassa 3.4.



**Kuva 3.3.** Kamera sijaitsi suunnilleen kaakossa kuvaamaansa metsään nähden.

Koska tornin ikkunat olivat kapeat, kamerat eivät mahtuneet kuvaamaan samasta ikkunasta. Ne kuvasivat vierekkäisistä ikkunoista, joten niiden havaitsema alue oli hieman erilainen. Koska kamerat olivat vain kolmen metrin päässä toisistaan ja etäisyys kuvattavasta alueesta oli lähes 300 m, niiden voitiin käytännössä olettaa kuvaavan täsmälleen samaa näkymää. Kuva 3.4 esittää MW-kameran näkemän metsäalueen. Lämpökamerakuvat olivat kooltaan 512 \* 640 pikseliä.



**Kuva 3.4.** MW-lämpökameran kuvaama metsäalue.

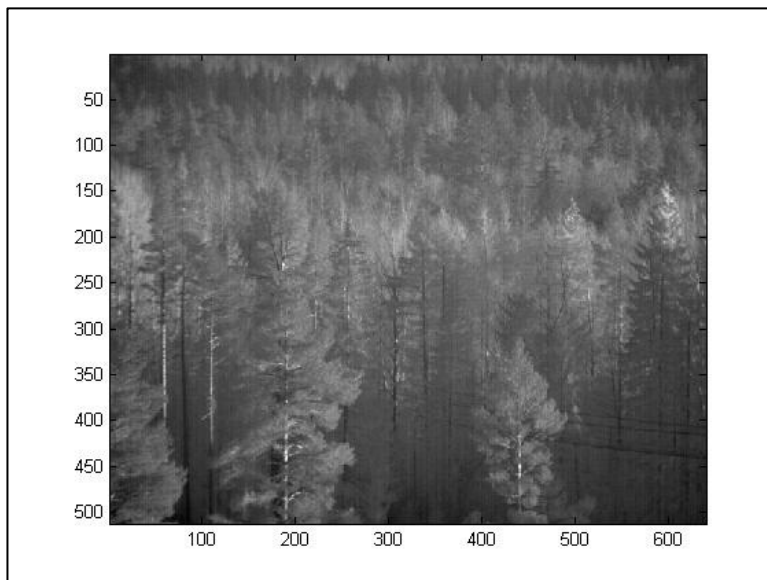
Yhdellä mittauskerralla kuvattiin samaa kohtaa usean peräkkäisen vuorokauden ajan eri sääolosuhteiden vaikutuksen tutkimiseksi. Mittaukset käynnistettiin ja lopetettiin noin puolen päivä aikaan täysien vuorokausien saamiseksi. Onnistunutta kuvamateriaalia saatiin muutaman päivän ajalta: 4 - 10.9 (paitsi 6-7.9) ja 25 - 29.9.

Toinen kuvaussuunta tornista oli täysin vastakkainen ensimmäiselle suunnalle. Tähän suuntaan kuvattiin vain MW-kameralla. Kuva 3.5 esittää näkymän tornista ja kuva 3.6 MW-kameran kuvaaman metsäalueen. Kameran etäisyys metsästä oli laserettäisyysmittarilla mitattuna 305 m ja kamera sijaitsi metsään nähden noin 60° pohjoisesta länteen.





**Kuva 3.5.** Vastakkaiseen suuntaan kuvattu metsänäkymä tornista. Kameran kuvaama alue merkitty oranssilla soikiolla, tarkemmin kuvassa 3.6.



**Kuva 3.6.** MW-kameran kuvaama vastakkaisen suunnan alue.

Metsä kuvattiin 25 - 27.10, mutta 27.10 klo 6.30 tapahtuneen sähkökatkoksen vuoksi ei saatu täyttä kahta vuorokautta.

### 3.2 Davis- ja Vaisala FD12P - sääasemat

Vaisalan FD 12P -sääasema (kuva 3.7) kerää tietoa näkyvyydestä (m), vesi- ja lumisateen voimakkuudesta (mm/h), kertyneestä sademäärästä (mm) sekä ilman lämpötilasta (°C). Lisäksi asema kuvaa hetkellistä säätyyppiä sääkoodien avulla. Laitteen ilmoittamat säätyypit ovat esimerkiksi ”sumu, joka ei ole tihentynyt viimeisen tunnin aikana”, ”kohtuullinen sade” tai ”kevyitä lumikuuroja”.



**Kuva 3.7.** Vaisalan FD 12 P -sääasema.

Näkyvyysmittari koostuu kahdesta putkesta. Toinen putki on lähetin, joka emittoi NIR-pulsseja. Toinen putki puolestaan on vastaanotin, joka kerää ilman hiukkasista sironnutta NIR-säteilyä. Kumpikin putki on suunnattu 16.5° alaspäin, jolloin vastaanotin kerää kulmassa 33° sironneen säteilyn. Lisäksi näkyvyysmittarissa on ylimääräinen valolähtetin, jonka avulla tarkkaillaan linssien likaantumista. Sadepisarot aiheuttavat nopeita muutoksia näkyvyysmittarin signaalissa. Näiden muutosten amplitudit ovat verrannollisia pisaroiden suuruuteen. Tällä tavalla ei kuitenkaan voida arvioida luotettavasti sademäärää. Tämän vuoksi sääasemassa on sademittari. Sademittarin anturissa vesi saa aikaan kapasitanssin muutoksen. Tämä muutos välittyy eteenpäin sähköisenä signaalina, ja signaalin suuruus on verrannollinen veden määrään anturilla. Anturia lämmitetään, jotta se pysyisi kuivana, kun esimerkiksi sumu tai sulanut lumi lankeaa sille. Anturi on suojattu tuulilasilla, jotta tuuli ei vaikuttaisi mittaustuloksiin. Vesi- ja lumisade erotetaan toisistaan yhdistämällä sade- ja näkyvyysmittarin tulokset. Jos sademittarin mukaan vesipisaralla ja lumihiuksilla on sama tilavuus, lumihiuksien optinen tilavuus on noin kymmenkertainen verrattuna veteen. Tätä yhden kertaluokan eroa käytetään vesi- ja lumisateen erottamisessa toisistaan. Vesi- ja lumisateen erottamisessa hyödynnetään

myös lämpötilaa: oletusarvoisesti sade tulkitaan yli +8 °C:ssa vedeksi ja alle -5 °C:ssa lumeksi. Näiden lämpötilojen välissä sateen tyyppiä ei ole määritelty. [30]

Davis-sääasemiin (kuva 3.8) asennetaan eri komponentteja sen mukaan, mitä sääilmiötä halutaan mitata.



*Kuva 3.8. Davis-sääasema.*

Tässä työssä käytetty sääasema mittasi ilman lämpötilan (°C), ilmankosteuden (%), kastepisteen (°C), tuulen nopeuden (m/s) ja suunnan (ilmansuuntana), taivaan irradianssin ( $W/m^2$ ) ja UV-indeksin. Säädatan tallennusohjelma tallensi vielä sääaseman vastaanotin mittaaman ilman lämpötilan, ilman kosteuden sekä paineen (mmHg). Vastaanotin oli sisätilassa, mutta ilmanpaineen oletettiin olevan sama ulkona ja sisällä.

Koska sääasemia ei saatu kameran ja metsän puoliväliin, eivät mitatut sääparametrit olleet välttämättä juuri oikeat. Sääasemat olivat kuitenkin hyvin lähellä kameraa, joten niiden mittaamien parametrien oletettiin olevan riittävän hyvät kuvaamaan kuvaushetkien säätä. Ensimmäisen suunnan kuvauksissa näkyvyyden luotettavuus tosin kärsi, sillä kameran ja metsän välisen järven vuoksi kuvatulla alueella esiintyi toisinaan sumua. Mikäli tämä sumu oli vahvasti asettunut järven ylle eikä juuri levinnyt, ei Vaisalan näkyvyysmittari voinut havaita sitä kunnolla. Paremman tiedon puutteessa näkyvyydet kuitenkin oletettiin samoiksi. Vastakkaiseen suuntaan kuvatun metsän ja kameran välissä ei ollut järveä, minkä vuoksi Vaisalan sääaseman näkyvyyden oletettiin vastaavan paremmin kameran kuvausalueen näkyvyyttä.

## 4 ANALYYSIMENETELMÄ JA -OHJELMA

Matemaattisen mallin rakentamista varten tarvittiin paljon mittaustuloksia. Tulosten analysoinnin nopeuttamiseksi koodattiin MatLabilla ohjelma, joka työstää lämpökamerakuvista automaattisesti lämpötilajakaumia. Jotta lämpökamerakuvien lämpötila-arvot vastaisivat todellisia lämpötiloja, niihin piti lisätä tiedot ympäröivistä olosuhteista. Tässä luvussa kerrotaan lämpökamerakuvien esikäsittelystä sekä ohjelman toteuttamisesta. Diplomityössä analysoitiin ainoastaan vuorokausikuvia, mutta diplomityön jälkeen jatkuva työtä varten ohjelmasta tehtiin sellainen, että sillä voi analysoida vuorokausikuvien lisäksi helikopterista suoritettuja lämpökamerakuvauksia.

### 4.1 Lämpökamerakuvan esikäsittely analyysikelpoiseksi

Lämpökameravideiosta poimittiin analyysiä varten pysäytyskuvia ThermaCAM researcherilla. Kun pysäytyskuva talletettiin MAT-formaattiin, kuva tallentui matriisina, jonka alkiot ovat kuvan pikselien lämpötila-arvoja. Kuvan asetuksissa (kuva 2.3) korjattiin tiedot kyseiselle kuvalle. Metsän emissiivisyysarvosta ei ollut tarkkaa tietoa. Emissiivisyysarvona kaikille kuville käytettiin arvoa 0.980. Tämä on PVTT:n käyttämä vakioarvo lämpökamerakuvauksille, ja sitä ovat käyttäneet myös Ballard et al. [19] mitatesaan ruohon lämpötilaa kaukoinfrapuna-alueella. Etäisyysarvona käytettiin laseretäisyysmittarilla mitattuja arvoja. Koska metsien lähellä ei ollut suuria lämmönlähteitä eikä ulkoista optiikkaa käytetty, näiden lämpötilana käytettiin ilman lämpötilaa. Ulkoisen optiikan puuttuessa sen transmissio oli luonnollisesti yksi. Referenssilämpötila jätettiin tyhjäksi (se ei vaikuta kuvan lämpötila-arvoihin).

Kuten todettu (alaluku 2.3) ThermaCAM Researcher -ohjelman oletettiin laskevan ilmakehän läpäisyn ilman lämpötilan ja kosteuden sekä kohteen etäisyyden perusteella. Etäisyyttä ja ilmankosteutta hyödynnetään ohjelmassa vain läpäisyn laskemisessa. Annetun kaavan perusteella ei voitu arvioida, soveltuuko ohjelman käyttämä ilmakehän läpäisymalli myös Suomen ilmakehään. PVTT on kehittänyt vaimennuslaskurin, joka toimii MatLab-funktiona, ja sen toiminta pohjautuu Modtran-ohjelmaan. Laskuri tarvitsi käyttäjältä tiedon ilman lämpötilasta ( $^{\circ}\text{C}$ ), ilmankosteudesta (%), ilmanpaineesta (mbar) ja näkyvyydestä (km). Näiden tietojen pohjalta laskettiin kaasujen ja aerosolien aiheuttama säteilyn vaimeneminen eli ilmakehän läpäisy käyttäjän syöttämällä matkalla ja aallonpituusalueella. Aallonpituusalue syötettiin vektorimuodossa. Laskuri laski läpäisyn jokaisessa vektorin aallonpituusalkiossa ja palautti läpäisyarvona näiden keskiarvon. Lisäksi tarvittiin tieto siitä, onko kyseessä manner- vai meri-ilmastot. Syötettyjen sääparametrien perusteella laskuri interpoloi tilanteeseen sopivan läpäisyn laskurin sisäisistä taulukoista. Tästä laskurista oli tehty myös versio, johon on tehty lisäyksiä

PVTT:n Lakialassa suorittamien läpäisymittausten perusteella [31]. Koska kyseiset läpäisymittaukset on tehty juuri samassa paikassa, missä lämpökamerakuvaukset suoritettiin, sen voitiin olettaa antavan oikeat läpäisyarvot. Tätä versiota olisi haluttu käyttää, mutta koska vaimennuslaskuri toimii Excel-pohjalla, siihen piti käsin syöttää sääparametrit jokaiselle kuvalle erikseen. Tämä oli hidasta ja virhealtista, kun käsiteltäviä kuvia on paljon. MatLab-funktiolle sen sijaan voitiin tehdä ohjelma, jonka avulla voitiin syöttää sääparametrit taulukkona tai vektoreina. Siksi hylättiin Excel-vaimennuslaskurin käyttömahdollisuus.

MatLab-laskurin hyväksymä minimipaine oli 980 mbar. Lämpökamerakuvausten aikana paine laski välillä alle tämän rajan. Laskurin toimintaa varten nämä painearvot korvattiin arvolla 980 mbar. Laskuri hyväksyi vain yli yhden kilometrin näkyvyyden. Paikoitellen lämpökameramittauksissa näkyvyys oli tämän alle, jolloin se muutettiin arvoon 1 km. Koska Ylöjärvi ei sijaitse aivan rannikolla, manner-ilmastomallin oletettiin sopivan paremmin tilanteeseen. Käytännön kannalta olisi ollut kuitenkin vielä helpompaa ja nopeampaa, jos ThermaCAMin läpäisyarvoja oltaisiin voitu käyttää, sillä sitä varten tarvittiin vain ilman lämpötila ja -kosteus. Kokeiltiin, eroavatko läpäisyarvot merkittävästi toisistaan MW-alueella. Etäisyytenä käytettiin arvoa 300 m. Aallonpituusalueina käytettiin MW-kameran aluetta 3 - 5  $\mu\text{m}$  0.1  $\mu\text{m}$  välein. Sää tiedot valittiin kolmelta kuvausajanhetkeltä. Kyseiset sää tiedot ja niiden perusteella lasketut läpäisy on esitetty taulukoissa 4.1 ja 4.2.

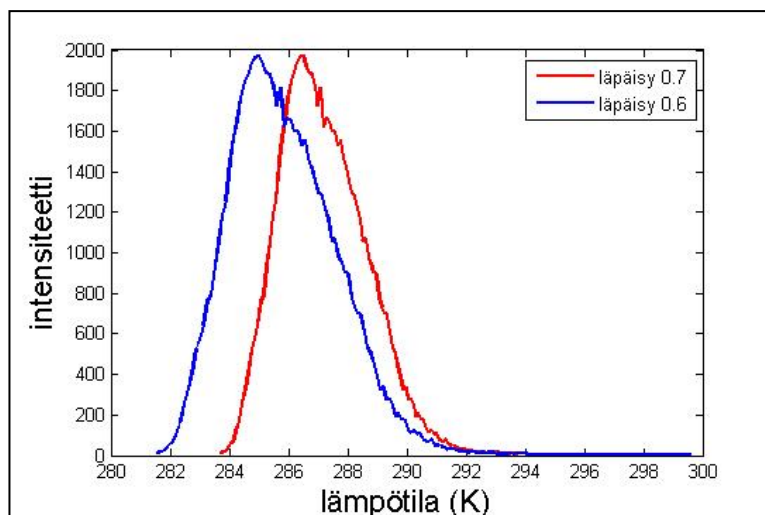
**Taulukko 4.1.** *ThermaCAM Researcher -ohjelman laskemat läpäisy MW-alueella eri sääolosuhteissa.*

ilman lämpötila ( °C)	1.7	-2.7	-6.2
ilmankosteus (%)	71	91	91
läpäisy	0.69	0.69	0.71

**Taulukko 4.2.** *MatLab-laskurin laskemat läpäisy MW-alueella eri sääolosuhteissa.*

ilman lämpötila ( °C)	1.7	-2.7	-6.2
ilmankosteus (%)	71	91	91
näkyvyys (km)	49.884	22.789	50
ilman paine (mbar)	971.8	964.3	969.3
läpäisy	0.81	0.81	0.82

ThermaCAMin laskema läpäisyarvo poikkesi MW-alueella laskurin arvosta noin 0.1 yksikköä. Tehtiin koe, jolla selvitettiin kahden läpäisyarvon avulla, vaikuttaako tällainen läpäisy arvojen ero merkittävästi lämpötilajakauman muotoon. Kokeessa käytettiin samaa lämpökamerakuvaa muuten samoilla asetuksilla, mutta läpäisyarvona käytettiin ensimmäisessä tapauksessa 0.6 ja toisessa 0.7. Kuva 4.1 esittää läpäisy vaikutuksen jakauman muotoon eräässä MW-kameran kuvassa. (Jakauma muodostettiin alaluvun 4.4 lopussa kuvatulla tavalla.)



*Kuva 4.1. Lämpäisyn muutoksen vaikutus lämpötilajakaumaan.*

Jo 0.1 yksikön muutos läpäisyyssä aiheutti noin kahden asteen muutoksen jakauman leveydessä. Koska läpäisy vaikutti näin voimakkaasti jakauman muotoon, ei ollut samantekevää, käytetäänkö laskurin vai ThermaCAMin läpäisyn arvoa. Koska jo MW-alueella läpäisyt erosivat toisistaan liikaa, ei tarkasteltu LW-alueen läpäisyarvoja. Päätettiin käyttää laskurin arvoa, koska sen arveltiin ottavan paremmin huomioon kuvausolosuhteet: näkyvyys pitää sisällään myös sateen vaikutuksen, mitä ilmankosteus ei välttämättä tee. Lisäksi laskuri otti huomioon manner-ilmastomaisen kuvauspaikan.

## 4.2 Ohjelman yleinen toimintaperiaate

Lämpökamerakuvien analyysiohjelma tarkoitettiin ajettavaksi yhdessä kansiossa kerrallaan. MAT-tiedostot käsiteltiin järjestyksessä yksitellen. Käynnistyttyään ohjelma tarkisti ensiksi, onko käsiteltävässä kansiossa MAT-tiedostoja, sillä lämpökamerakuvat olivat kaikki tässä formaatissa. Mikäli niitä ei ollut yhtään, ohjelma ilmoitti tämän ja ohjelma päättyi. Mikäli kansioista löytyi MAT-tiedostoja, ohjelma tarkisti, olivatko ne kaikki lämpökamerakuvia. Lämpökamerakuvatiedostot sisälsivät 512 \* 640 -kokoisen matriisin, jossa oli lämpökamerakuvan pikselien lämpötila-arvot. Tämä matriisi oli samanniminen kuin tiedosto ilman ".mat"-päätettä. Ohjelma tarkisti, löytyykö kansion jokaisesta tiedostosta tiedoston nimeä vastaava matriisi ja onko se oikeaa kokoa. Mikäli löytyi yksikin tiedosto, joka ei täyttänyt näitä kahta ehtoa, ohjelma neuvoi käyttäjää poistamaan ylimääräiset MAT-tiedostot ja lopetti toimintansa. Ohjelma oltaisiin voitu toteuttaa niinkin, että kansion ylimääräiset tiedostot ohitetaan ajon aikana, mutta ohjelman teon aikana ajateltiin olevan käytännöllisintä, että yksi kansio sisältää vain lämpökamerakuvia, jolloin ylimääräiset tiedostot tulkitaan vahingossa kansioon joutuneiksi. Mikäli kaikki tiedostot olivat sallitunlaisia lämpökamerakuvia, ohjelma kysyi käyttäjältä, ovatko kansion kuvat vuorokausi- vai helikopterikuvia. Sallitut vastaukset olivat "vuorokausi" ja "helikopteri". Aina, kun ohjelma pyysi käyttäjää tekemään tai kirjoittamaan jotain, käyttäjän teko tarkistettiin. Mikäli käyttäjä toimi ohjeiden vastaisesti,

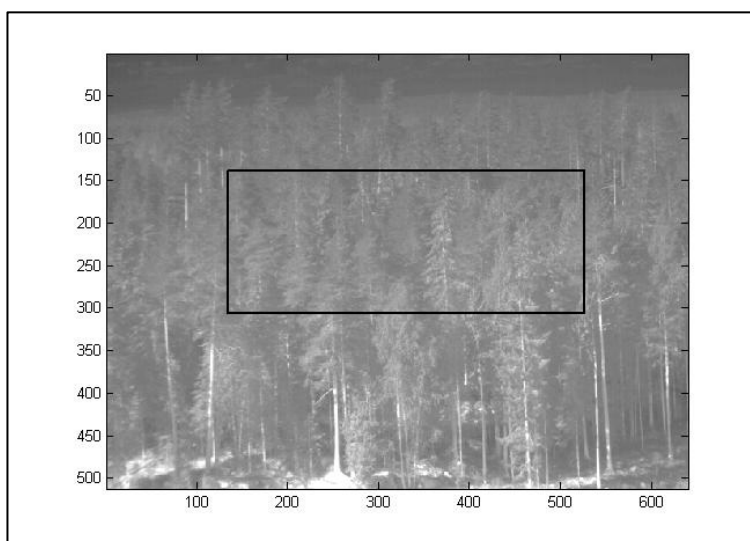
ohjelma pyysi käyttäjää yrittämään uudelleen, kunnes toiminta oli sallittu. Vuorokausikuvien tapauksessa kaikkien kansiossa olevien kuvien oletettiin olevan samalta kuvauskerralta.

Kun ohjelma käsittelee kuvia, se tulosti käsiteltävän tiedoston nimen, jotta ohjelman mahdollisen kaatumisen tapahtuessa pystyttäisiin paikallistamaan virheen sijainti. Ohjelma teki tiedoston sisältämästä kuvamatriisista näytealueesta lämpötilavektorin (näytealueen rajausta alaluku 4.3). Tämän vektorin pohjalta muodostettiin lämpötilajakauma näytealueesta (alaluku 4.4). Jakaumista tarvittiin ylin ja alin lämpötila matemaattisille malleille varten. Arvioitiin, että yksi tuhannesta pikselistä voi olla virheellinen. Koska nämä virheelliset pikselit voisivat vääristää jakauman leveyttä, haluttiin leveyden arvoon ottaa mukaan 99.9 % jakauman keskellä olevista lämpötila-arvoista. Ohjelma teki Gauss-sovitukset lämpötilajakaumiin (alaluku 4.5) ja tallensi jakaumasta erinäisiä tietoja (alaluku 4.6.2). Kuten alaluvussa 2.4 mainittiin, luonnon jakaumat ovat epäsymmetrisiä, joten niihin olisi syytä sovittaa muu kuin symmetrinen Gaussin jakauma. Sovitukseksi olisi haluttu käyttää Weibullin jakaumaa, mutta jatkotyön kannalta päätettiin käyttää Gaussin jakaumaa, koska useat ohjelmistot tukevat jo valmiiksi sen käsittelyä, toisin kuin Weibull-jakaumaa.

Koska analyysistä saatuja arvoja haluttiin tarkastella myös MatLabin ulkopuolella, kuten Excelissä, ne tallennettiin ASCII-tiedostoon. Ohjelma piirsi kuvan jakaumasta ja sen sovituksesta, ja kuvat tallennettiin automaattisesti samalla nimellä kuin alkuperäinen tiedosto. Jokaisen kuvan käsittelyn jälkeen auki olevat ikkunat suljettiin, jotta kuvien käsittely olisi nopeampaa.

### 4.3 Näytealueen rajausta lämpökamerakuvasta

Lämpökamerakuvat sisältävät muutakin kuin pelkkää tutkittavaa taustakohdetta, kuten kuva 3.4 osoitti. Siksi niistä piti rajata näytealue, kuten kuvassa 4.2.



*Kuva 4.2. Lämpökamerakuvasta rajattiin tutkittavaksi alueeksi puiden latvustoa.*

Ohjelmassa näytealueenrajaus määriteltiin suorakulmiomaiseksi kahden vektorin avulla: toisessa on alueen x-koordinaatit, toisessa y-koordinaatit. Vuorokausikuvauksissa näytealue pysyy samana, helikopterikuvissa se vaihtuu. Siten vuorokausikuvissa voitiin rajata alue kansion ensimmäisestä kuvasta ja käyttää samaa aluetta koko kansion tiedostojen eli samalta kuvauskerralta saatujen kuvien käsittelyssä. Samaa näytealuetta ei voinut käyttää eri kuvauskerroista saaduista kuvista, koska kameroita oli saatettu siirtää kuvauskertojen välillä, joten niiden kuvaamat alueet eivät olleet täsmälleen samat.

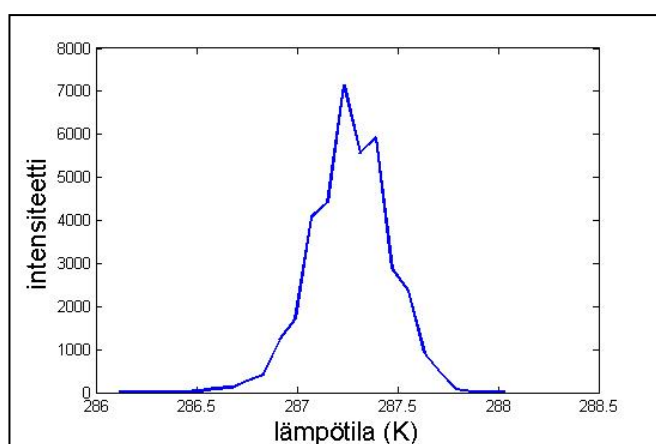
Mikäli käsiteltävän kansion kuvatiedostot olivat vuorokausikuvia, ohjelma tarkisti, oliko kansion ensimmäisessä tiedostossa jo aluerajaus. Jo valmiina oleva aluerajaus tarkoitti sitä, että tiedostosta löytyi vektorit ”x\_alue” ja ”y\_alue”. Mikäli nämä vektorit löytyvät tiedostosta, käyttäjältä kysyttiin, haluaako hän käyttää niitä. Mikäli aluerajausta ei ollut valmiina tai käyttäjä ei halunnut käyttää sitä, ohjelma kysyi, haluaako käyttäjä rajata alueen manuaalisesti kuvasta vai syöttää alueen koordinaatit. Manuaalisen rajauksen tapauksessa avattiin kansion ensimmäisen tiedoston kuvamatriisi FIG-kuvana. Ohjelma ilmoitti, että käyttäjä voi nyt esimerkiksi muuttaa kuvan lämpötila-asteikkoa tai suurentaa kuvaa. Lisäksi ilmoitettiin, että käyttäjä voi asettaa suorakaiteen kuvaan helpottamaan aluerajausta. Käyttäjää pyydettiin kirjoittamaan ”valmis”, kun hän on tehnyt tarvittavat toimenpiteet kuvalle. Ennen tätä käyttäjän syötteet tulkittiin normaaleiksi MatLab-komennoiksi. Kun käyttäjän oli ilmoittanut olevansa valmis, häntä pyydettiin klikkaamaan näytealueen eli (todellisen tai kuvitteellisen) suorakulmion vasenta ylänurkkaa, sitten oikeaa alanurkkaa. Näin saatiin selville ensin alueen x- ja y-koordinaattien alkupisteet ja sitten loppupisteet. Näistä ohjelma teki tarvittavat x\_alue- ja y\_alue-vektorit. Koordinaattien syöttötapauksessa käyttäjää pyydettiin syöttämään vektorina näytealuesuorakulmion x- ja y-koordinaattien ensimmäiset ja viimeiset pisteet. Koordinaattien syöttömahdollisuus lisättiin vuorokausikuviin siksi, että eri kansiossa saattaa olla jo saman kuvauskerran kuvia, jolloin käsiteltävien kuvien halutut näytealuekoordinaatit ovat tiedossa. Sama näytealue saadaan käsiteltäviin kuviin kätevimmin syöttämällä suoraan koordinaatit manuaalisen rajauksen sijasta. Lopuksi (uudet) näytealuerajausvektorit tallennettiin joka tiedostoon.

Helikopterikuvakansion tapauksessa käsiteltävästä kuvasta tarkistettiin myös, oliko siinä jo valmiina aluerajaus. Mikäli oli, ohjelma kysyi, käytetäänkö sitä. Jos ei käytetty, käyttäjä rajasi alueen samoin kuin edellisessä kappaleessa kuvattiin vuorokausikuvan näytealueen manuaalista rajausta. Uusi rajaus tallennettiin käsiteltävään tiedostoon. Ennen kuin ensimmäistäkään helikopterikuvaa alettiin käsitellä, ohjelma tarkisti, oliko jokaisessa kansion tiedostossa jo aluerajaus. Jos rajaus löytyi joka tiedostosta, kysyttiin käyttäjältä, haluaako hän käyttää niitä. Tämä toiminto lisättiin helikopterikuviin sen takia, että jos rajaukset ovat jo valmiina, ohjelma pystyy käsittelemään kuvat itsekseen. Käyttäjän ei tällöin tarvinnut olla ohjelman ajon aikana tiekoneen ääressä vastailemassa joka tiedoston käsittelyn kohdalla, että käytetään jo valmiina olevaa näytealuerajausta. Mikäli käyttäjä ei halunnut käyttää kaikissa kuvissa valmiina olevia rajauksia, kysyttiin joka tiedoston kohdalla, käytetäänkö tässä kuvassa valmista rajausta.



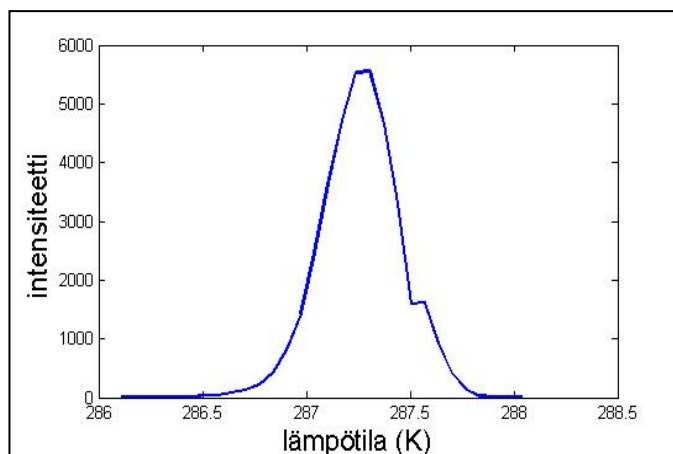
#### 4.4 Lämpötilajakauman muodostus välittömistä mittaus-tuloksista

Näytealueen lämpötilavektorista haluttiin tehdä lämpötilajakauma. Jakauman muodostamisessa päätettiin hyödyntää histogrammia. Alaluvussa 2.5 esiteltiin useita tapoja muodostaa suurelle parhaiten sopiva histogrammi. Haluttiin tutkia, minkälaisia histogrammeja saadaan eri tavoilla. Aluksi käytettiin yksinkertaisinta sääntöä: sopiva luokkien määrä on 10 - 25. Lämpötilajakaumaa muodostettaessa histogrammin olisi hyvä olla mahdollisimman monimuotoinen, joten aluksi luokkien määränä kokeiltiin arvoa 25. MatLabin hist-funktiolla jaettiin näytealuevektori 25 vakiolevyiseen luokkaan ja otettiin talteen luokkien intensiteetit yhteen vektoriin sekä luokkien keskimmäiset lämpötila-arvot toiseen vektoriin. Näin saatiin lämpötilajakauman kuvaajan koordinaatit lämpötila-intensiteetti -koordinaatistossa. Jakauman kuvaajan muodostamiseksi pisteet yhdistettiin toisiinsa suorilla viivoilla. Työn nopeuttamiseksi käytettiin PVTT:n aiemmin kuvaamien Utin helikopterilämpökuvia sen tutkimiseen, miltä jakaumat näyttävät tällaisella luokkamäärällä. Koska tässä vaiheessa todelliset lämpötila-arvot eivät vielä olleet tärkeitä, työn nopeuttamiseksi käytettiin ThermaCAMin laskemaa läpäisyä. Ilmanlämpötilana ja -kosteutena käytettiin kaupungin sääasemasta ([www.freemeteo.com](http://www.freemeteo.com)) saatuja tietoja kuvaushetkelle. Etäisyytenä käytettiin 300 m. Kuva 4.3 esittää erään havumetsän lämpötilajakauman luokkien määrällä 25.

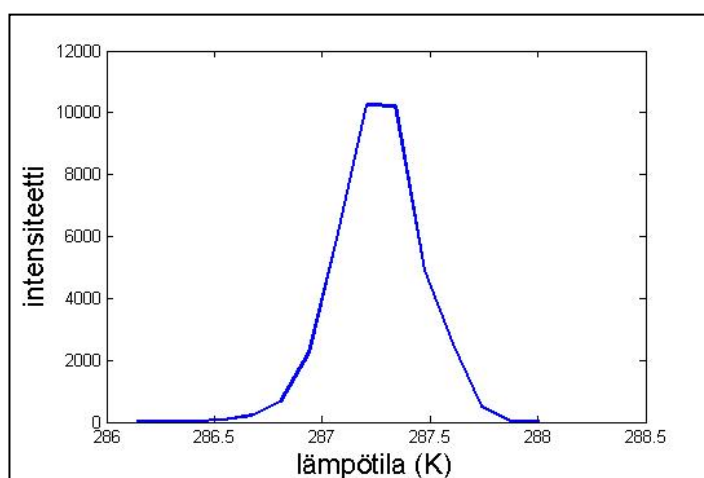


*Kuva 4.3. Havumetsän lämpötilajakauma luokkamäärällä 25.*

Kun luokkavälin määrää vaihdeltiin, havaittiin useassa tapauksessa jakaumiin välillä ilmestyvän tai niistä katoavan piikkejä, joita edellisessä kuvassa näkyy. Esimerkkinä tästä ovat kuvat 4.4 ja 4.5, joissa on edellinen lämpötilajakauma luokkamäärillä 15 ja 30.



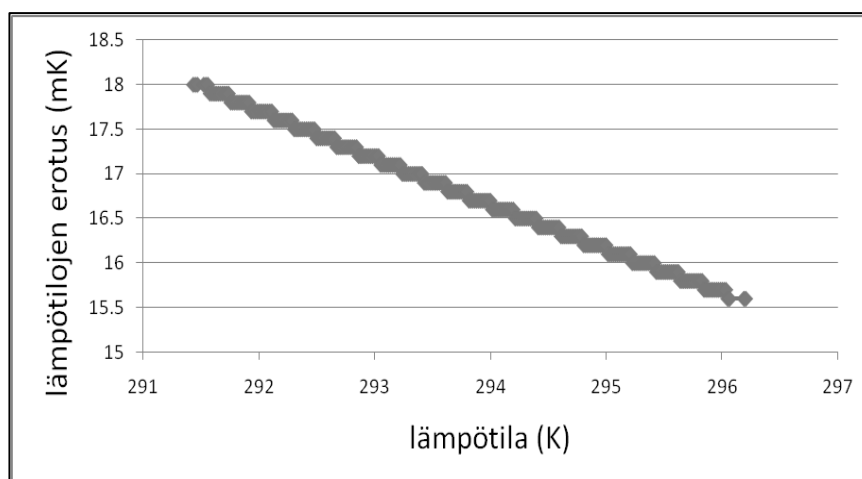
**Kuva 4.4.** Kuvan 4.3 lämpötilajakauma luokkamäärällä 30.



**Kuva 4.5.** Kuvan 4.3 lämpötilajakauma luokkamäärällä 15.

Tämän odottamattoman käyttäytymisen arveltiin johtuvan siitä, että luokkamäärää muuttaessa toisiin luokkiin tulee suhteessa enemmän eri lämpötila-alkioita kuin toisiin. Joissain kuvissa yksittäisten piikkien intensiteetit olivat jopa kaksinkertaiset verrattuna muuhun jakaumaan. Nämä piikit kuitenkin saattoivat hävitä, kun luokkien määrää muutettiin yhdellä. Kameran valmistaja oli ilmoittanut kameran erotuskyvyksi 18 mK. Tästä oli päätelty, että datan luonnollinen luokkaleveys olisi 18 mK, mutta edellä kuvattu ilmiö aiheutti epäilyn siitä, ettei datan luokkaleveys olekaan vakio. Asia selvitettiin järjestämällä näytealueen lämpötilat suuruusjärjestykseen sort-funktiolla ja sitten laskeamalla vierekkäisten lämpötilojen erotukset. Havaittiin, että erotus ei ollut vakio eli datan luokkaleveys vaihteli.

Tarkastelemalla useita kuvia havaittiin, että suurin osa nollasta eroavista erotuksista oli välillä 15 - 25 mK. Pieni osa oli edellisten lukujen monikertoja. Tämä tarkoitti sitä, että välillä kahden vierekkäisen lämpötilan välissä oli puuttuva lämpötila-arvo. Erotuksilla ilmeni jonkinlaista lämpötilariippuvuutta, sillä jokaisessa tapauksessa ne pienenivät lämpötilan kasvaessa, kuten kuva 4.6 osoittaa.



**Kuva 4.6.** Vierekkäisten lämpötila-alkioiden erotus pienenee lämpötilan kasvaessa. Lämpötila-asteikko on tehty käyttäen vierekkäisistä alkioista suurempaa.

Eri lämpökamerakuvissa samassa lämpötilassa oli eri suuret erotukset vierekkäisten lämpötilojen välillä. Ei siis voitu löytää yleispätevää kaavaa, jota erotukset noudattavat. Ilmiö voi johtua siitä, ettei kameran detektori havaitse lämpötiloja tasavälein. Toinen selitys on, että joko kamera tai ohjelma muuttaa alkuperäisten pikselien arvoja hieman, jotta kuva saataisiin terävämmäksi tai havainnollistamaan paremmin näkyviä lämpötila-eroja.

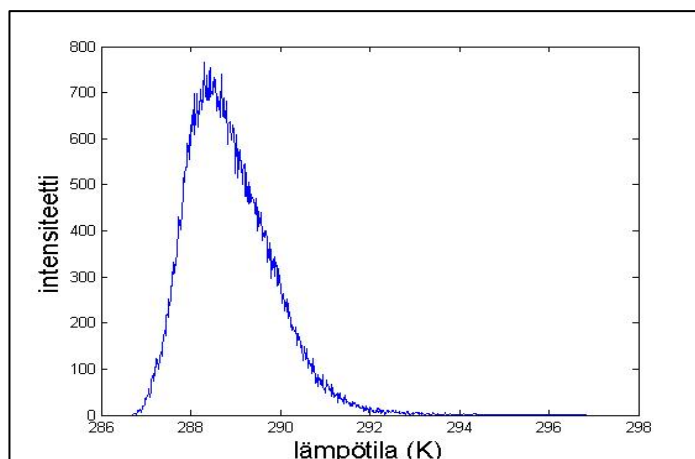
Kun datan luokan leveys ei ole vakio, tulisi käyttää histogrammia, jonka luokan leveys vaihtelee. Kaikki alaluvussa 2.5 esitetyt luokkien määrän tai leveyden optimiarvot johtavat histogrammiin, jonka luokan leveys on vakio. Siksi näitä vaihtoehtoja ei edes kokeiltu. Tavoitteena histogrammin muodostuksessa oli saada jokaiseen luokkaan yhtä monta eri lämpötila-arvoa. Kaavan puuttuminen erotusten ja lämpötilojen välillä tarkoitti sitä, että histogrammeja ei voitu muodostaa käyttämällä samoja, vaihtelevia luokkaleveyksiä eri kuviin. Päätettiin kokeilla sellaista histogrammin muodostustapaa, jossa yhteen luokkaan otetaan vain yksi lämpötila-arvo. Eri lämpötilat saatiin selville MatLabin `unique`-käskyllä:

```
T = unique( kuvavektori );
```

Lämpötiloja vastaavat intensiteetit saatiin `hist`-käskyllä:

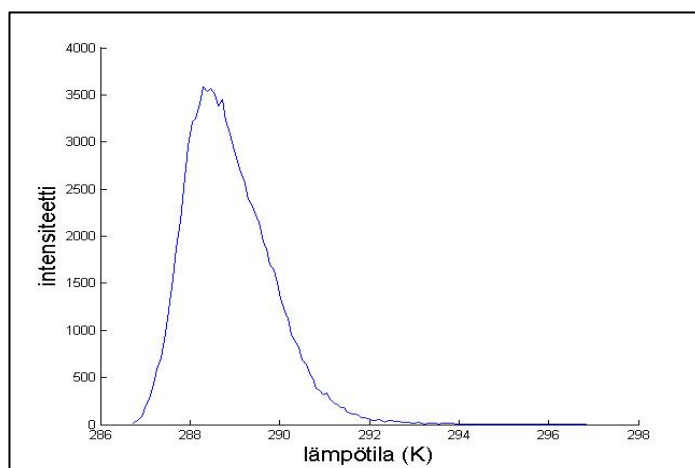
```
intensiteetit = hist( kuvavektori, T );
```

Nämä kaksi vektoria sisälsivät lämpötilajakauman pisteiden lämpötila- ja intensiteetti-koordinaatit. Yhdistämällä pisteet suorilla viivoilla saatiin jakauma, joka oli kuitenkin varsin kohinaista (kuva 4.7).



**Kuva 4.7.** Alkuperäisen datan pohjalta tehty lämpötilajakauma on kohinaista.

Kohina haluttiin poistaa, sillä se johtui lämpökameran pikselien lämpötila-arvojen kvantittumisesta. Arveltiin myös, että kohinan poisto voi helpottaa sovituksen tekoa. Kohinan poistamiseksi yhdistettiin viisi peräkkäistä pistettä (kuva 4.8). Tällöin histogrammin jokaisessa luokassa oli viiden eri lämpötila-arvon alkioita. Pisteiden intensiteetit summattiin uuden luokan intensiteetiksi, ja vastaavaksi uudeksi lämpötila-arvoksi määrättiin pisteiden mediaani. Mikäli pisteiden yhteismäärä ei ollut viidellä jaollinen, ylimääräisten pisteiden intensiteetit summattiin, ja tässäkin tapauksessa uuden pisteen lämpötila-arvoksi määrättiin pisteiden mediaani. (Jatkossa näin saadusta jakaumasta käytetään nimitystä ”yhdistetty jakauma” ja yhdistämistä edeltävästä jakaumasta nimitystä ”alkuperäinen jakauma”).

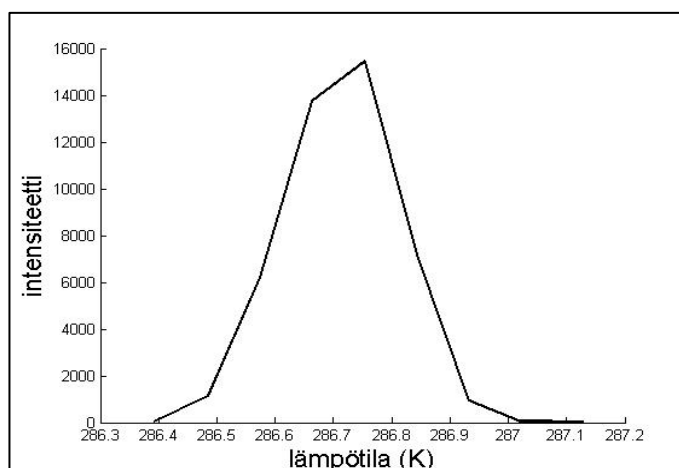


**Kuva 4.8.** Alkuperäisen jakauman viisi vierekkäistä pistettä on yhdistetty, mikä vähentää kohinaa.

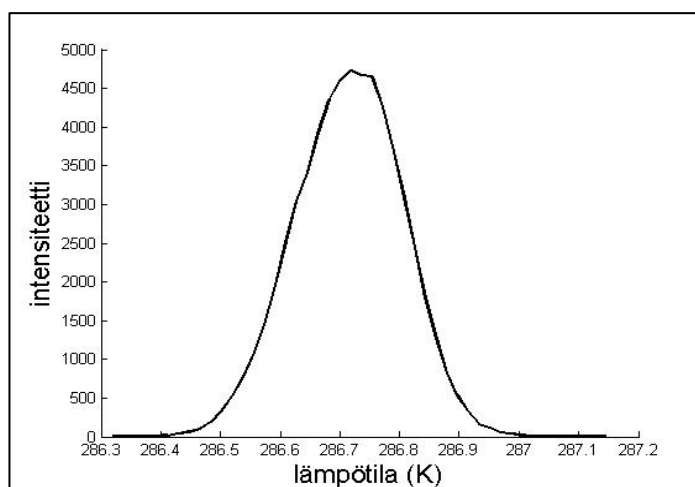
Koska jakauman lopussa summattavia pisteitä on vähemmän kuin muualla, viimeisen uuden pisteen intensiteetti oli toki suhteessa pienempi, mutta jakauman ääripisteiden intensiteetit olivat muutenkin todella pieniä verrattuna keskellä oleviin, joten tässä ei tehty suurta virhettä. Toinen ongelma aiheutui siitä, että datasta puuttui joitain lämpötila-arvoja, kuten aiemmin todettiin. Kun siis yhdistettiin viisi pistettä, niiden välissä saat-

toikin olla yksi piste, jota ei ollut mukana datassa, eikä unique-käskey huomioinut sitä millään tavalla. Tällöin yhdistettiin todellisuudessa kuusi pistettä, minkä vuoksi joidenkin pisteiden paikka lämpötila-akselilla vääristyi. Puuttuvat lämpötilat tulisi ottaa huomioon jakaumassa siten, että lisätään puuttuvat lämpötila-arvot T-vektoriin ja määrätään niiden intensiteetiksi nolla. Arvoja näytti puuttuvan lähinnä aivan jakaumien alussa ja lopussa, joissa intensiteetit ovat alhaiset. Näissä paikoissa jokunen väärällä paikalla oleva piste ei vielä vaikuta kovin paljon jakauman kokonaisuuteen, mikä huomataankin vertaamalla kuvia 4.7 ja 4.8. Päätettiin käyttää jakaumia tällaisenaan, lisäämättä puuttuvia lämpötila-arvoja. Sovituksen kannalta matalat, intensiteetiltään lähes nollat hännät, eivät olleet merkityksellisiä.

Kun jokaisessa lämpötilajakaumassa viisi pistettä yhdistettiin, uuteen jakaumaan jäi toisinaan vain noin kymmenen pistettä. Näin tapahtui varsinkin yöllä ja sateen aikana. Kun jakaumassa oli näin vähän pisteitä, sen muoto oli liiankin yksinkertainen, kuten kuva 4.9 osoittaa. Kuvassa 4.10 on sama jakauma ilman pisteiden yhdistelyä, jolloin jakauma on piirretty 49 pisteen avulla.



**Kuva 4.9.** Jakauma piirretty kymmenen pisteen avulla, mikä tuottaa karkean muotoisen jakauman.



**Kuva 4.10.** Kuvan 4.9 jakauma piirrettynä 49 pisteen avulla, jolloin jakauma on siilempi.

Koska jakauman sileyden arveltiin voivan vaikuttaa Gauss-sovituksen parametreihin, tehtiin ohjelmasta versio, jossa viisi peräkkäistä pistettä yhdistetään, mikäli uuteen jakaumaan tulee ainakin 20 pistettä. Tämä oli se ohjelmaversio, jota pääsääntöisesti käytettiin. Siltä varalta, että tulevaisuudessa halutaan yhdistää muu määrä kuin viisi pistettä, tehtiin ohjelmaan vakionmuuttuja YHTEEN, joka kertoo yhdistettävien pisteiden määrä. Muuttujan arvo voidaan myöhemmin muuttaa ohjelmakoodissa viidestä muuksi.

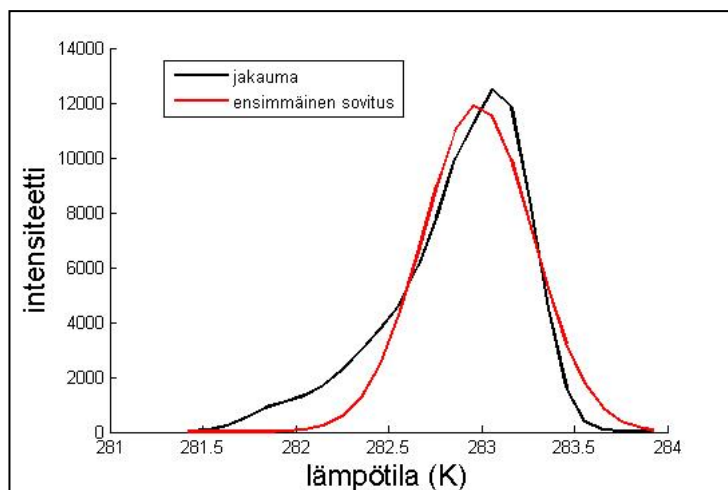
## 4.5 Gauss-sovitus lämpötilajakaumaan

Lämpötilajakaumiin haluttiin sovittaa normittamaton Gaussin jakauma  $G_d$ :

$$G_d(T) = Z e^{-\frac{(T-\mu)^2}{2v}}, \quad (4.1)$$

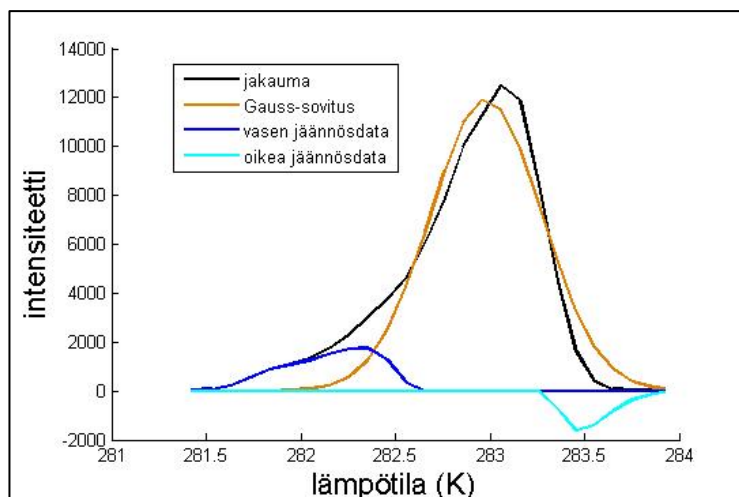
missä  $Z$  on skaalausvakio eli amplitudi. Sovitukset haluttiin tehdä pienimmän neliösumman menetelmällä. Optimaalisten sovituspäarametrien löytämisessä hyödynnettiin MatLabin `fminsearch`-funktiota. Optimointialgoritmia varten tehtiin funktio, joka laskee annettujen parametrien perusteella Gauss-sovituksen intensiteetit annetulla lämpötila-alueella, ja laskee sitten sovituksen virheen pienimmän neliösumman menetelmällä. Funktio `fminsearch` palautti ne sovituspäarametrit, jotka tuottivat pienimmän virheen. Algoritmia varten tarvittiin alkuarvoiksi jonkinlaiset estimaatit sovituksen parametreista. Algoritmin kunnollista toimimista varten oli hyvä, jos alkuarvot olivat lähellä lopullisia parametreja. Gaussin parametreille pystyttiin arvioimaan sopivat estimaatit visuaalisesti lämpötilajakaumakuvia tarkastelemalla: keskiarvon muuttuminen johtaa jakauman siirtymiseen lämpötila-asteikolla ja keskihajonnan muuttuminen muuttaa jakauman leveyttä. Päädyttiin käyttämään keskiarvon estimaattina lämpötilajakauman huipun lämpötilaa ja skaalausvakiota estimaattina huipun intensiteettiä. Sopivaa hajontaestimaattia etsittäessä havaittiin, että `fminsearch` löytää optimipäarametrit paremmin liian pienillä kuin liian suurilla estimaateilla. Kokeilemalla todettiin, että sovitus onnistui, kun hajontaestimaattina käytettiin jakauman leveyden yhdeksännesosaa. Sopivien parametrien löydyttyä laskettiin sovituksen intensiteetit annetulla lämpötila-asteikolla.

Kuten kuva 4.1 osoitti, metsän lämpötilajakauma on epäsymmetrinen ja siinä saattaa olla käyrän levenemisiä molemmiin puolin. Tällöin ei ollut syytä olettaa, että yksi symmetrinen Gauss-sovitus riittää mallintamaan jakaumaa, kuten kuva 4.11 osoittaaakin.



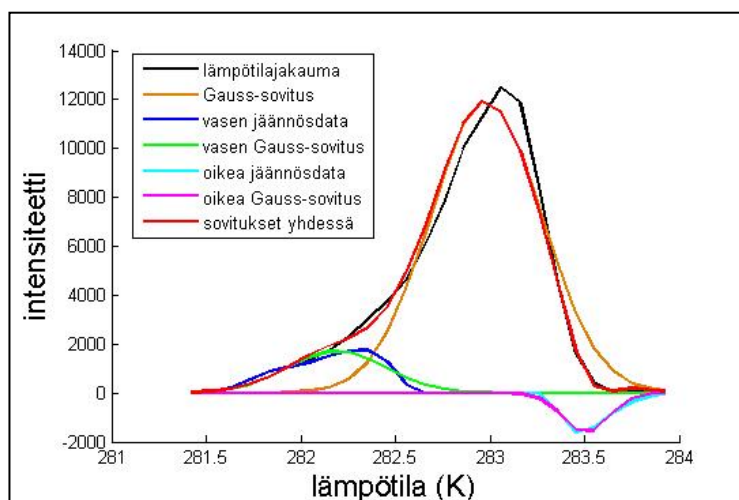
**Kuva 4.11.** Yksi Gauss-sovitus ei mallinna hyvin epäsymmetristä jakaumaa.

Vasemmassa laidassa sovitus madalsi jakaumaa ja oikeassa laidassa korotti. Päätettiin käyttää kolmea Gauss-sovitusta: yksi keskelle jakaumaa ja kaksi jakauman laiduille. Lopuksi jakaumat yhdistettäisiin. Ensimmäinen sovitus sovitettiin pienimmän neliösumman menetelmällä koko jakaumaan, kuten edellä esitettiin. Laskettiin jakauman ja ensimmäisen sovituksen intensiteettien välinen erotus. Tästä jäännösdatasta haluttiin muodostaa kaksi uutta jakaumaa: toinen kuvaamaan alkuperäisen jakauman vasenta laitaa, toinen oikeaa. Vasen laita haluttiin muodostaa siten, että jäännösdatan intensiteetit nollataan tietyn lämpötila-arvon jälkeen. Vastaavasti oikeaa laitaa varten intensiteetit haluttiin nollata tiettyä lämpötila-arvoa edeltävin osin. Jakauman keskiosan sovitus ei ollut tässä työssä tärkeää, sillä kohteiden lämpötilojen tulee kätkentää varten olla ylipäänsä taustan lämpötilajakauman alueella, jotteivät kohteet erotu liian kylminä tai kuumina. Siksi jakauman leveämisen vaikutukset ovat tärkeitä. Päätettiin käyttää vasemman laidan datana niitä jäännösdatan alkioita, jotka edeltävät jakauman ja ensimmäisen sovituksen ensimmäistä leikkauspistettä. Vastaavasti oikean laidan jäännösdatana käytettiin jakauman ja sovituksen viimeisen leikkauspisteen jälkeistä osaa. Kuvassa 4.11 ensimmäinen sovitus on ennen ensimmäistä leikkauskohtaa vasemmalla pienempi kuin jakauma. Kun tällä alueella jakauman intensiteeteistä vähennetään sovituksen intensiteetit, jäännösdata on positiivinen. Oikeassa laidassa viimeisen leikkauskohdan jälkeen sovitus on suurempi kuin jakauma, jolloin jäännösdatan intensiteetit ovat negatiivisia. Kuva 4.12 havainnollistaa tilanteen.



**Kuva 4.12.** Jakauman laidan jäännösdata on positiivista tai negatiivista riippuen siitä, onko Gauss-sovitus jakaumaa suurempi vai pienempi jakauman laidassa.

Molempien laitasovitusten optimaalisten parametrien etsinnässä annettiin alkuarvot laitatulosten perusteella samalla tavalla kuin ensimmäisessä sovituksessa sillä erotuksella, että negatiivisten intensiteettien tapauksessa huippu oli intensiteetiltään pienin kohta datassa (eli suurin negatiivinen). Optimaalisten parametrien löydyttyä laskettiin intensiteetit sovituksille. Lopuksi kaikkien kolmen sovituksen intensiteetit laskettiin yhteen. Kuva 4.13 esittää kuvan 4.11 jakaumaan tehtyä kolmea Gauss-sovitusta sekä kokonaissovitusta.

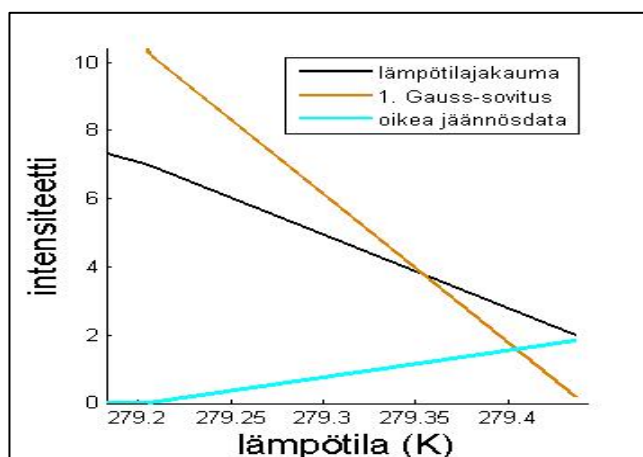


**Kuva 4.13.** Kolmen Gauss-sovituksen summa mallintaa hyvin jakauman muotoa.

Kokonaissovitus ”korottaa” ensimmäistä sovitusta vasemman laidan osalta ja ”madaltaa” oikean laidan osalta, jolloin sovitus on lähempänä jakauman muotoa. Ohjelma laski kummankin laidan osalta neliösumman jakauman ja kokonaissovituksen väliltä. Laitojen virheenä tallennettiin tämä neliösumma jaettuna laitadatan nolasta eroavien alkioiden määrällä.

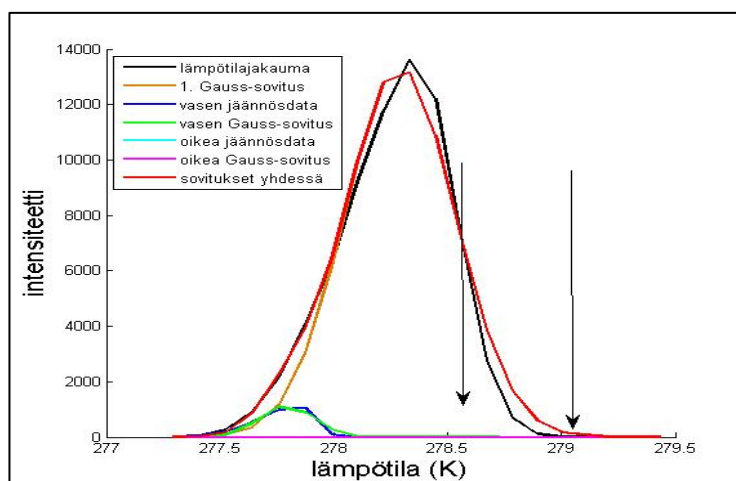


Varsinkin yökuivissa tapahtui toisinaan niin, että oikeassa laidassa jakauma ja ensimmäinen sovitus leikkasivat viimeisen vasta kun intensiteetit olivat todella matalat, kuten kuvassa 4.14.



**Kuva 4.14.** Oikean laidan intensiteetit voivat ovat todella pienet. Tässä tapauksessa lämpötilajakauman huipun intensiteetti on yli 13000, joten jäännösdata on merkityksetömän pieni eikä sen sovittaminen ole tarpeellista.

Vaikka lämpötilajakaumien laidat olivat tärkeitä, ei kuitenkaan ollut tarkoituksenmukaista saada sovittettua jakauman latoja niiltä osin, kuin intensiteetti on kuvaajissa lähes nolla. Tärkeämpää olisi saada jäännösdataksi kuvan 4.14 tapauksessa kuvaan 4.15 merkitty alue, jolloin oikean laidan sovitus lieventäisi ensimmäisen sovituksen ylimenevän osan.



**Kuva 4.15.** Jäännösdata olisi tarkoituksenmukaisinta saada nuolin merkityltä alueelta.

Kaikkia edellä kuvattuja tapauksia yhdisti se, että ensimmäinen sovitus menee vain vähän yli jakaumasta oikeassa laidassa. Kuvassa 4.15 kokonaissovitus on selvästi alle puoli astetta leveämpi kuin todellinen jakauma. Näin pieni virhe voidaan hyväksyä, joten jäännösdatan muodostamistapaa hyväksyttiin tällaisenaan.

## 4.6 Muita ohjelman toimintoja

### 4.6.1 Jakauman ja kokonaissovituksen leveys

Sekä yhdistetystä jakaumasta että kokonaissovituksesta haluttiin tietää jakauman leveyden määrittystä varten, millä välillä 99,9 % kuvaajan pinta-alasta oli (katso alaluku 4.2: virheellisten pikselien osuus yksi tuhannesta). Tämä tarkoitti sitä, että sekä kuvaajan vasemmasta että oikeasta laidasta jätettiin pois 0,05 % alasta ja selvitettiin, mikä tämän jälkeen on ylin ja alin lämpötila (jatkossa: näiden erotusta nimitetään tässä työssä ”99,9 % -leveydeksi” tai pelkäksi ”leveydeksi” ja ylintä ja alinta lämpötilaa vastaavia pisteitä kutsutaan ”jakauman ylä- ja alarajoiksi”). Koska kuvaaja koostui diskreeteistä pisteistä, jotka oli yhdistetty toisiinsa suoralla viivalla, kahden vierekkäisen pisteen välinen pinta-ala oli puolisuunnikas. Koko kuvaajan pinta-ala saatiin laskemalla yhteen kaikki nämä puolisuunnikkaat. Halutessa saada 0,05 % kuvaajan vasemman laidan pinta-alasta, laskettiin puolisuunnikkaita yhteen vasemmalta, kunnes niiden ala oli 0,05 % koko kuvaajan pinta-alasta.

Edellä kuvatulla tavalla ei kuitenkaan saatu täsmälleen 0,05 % pinta-alasta, koska puolisuunnikkailla oli äärellinen pinta-ala. Työn kannalta oli parempi saada vähemmän kuin 99,9 % pinta-alasta sen sijaan, että pinta-alaa tulisi enemmän. Tällöin jakauman alaraja oli se piste, jonka mukaan ottaminen vasemman laidan pinta-ala -laskuihin aiheutti 0,05 % -rajan ylittymisen. Vastaava päti oikeassa laidassa jakauman ylärajalle. Lopuksi laskettiin, kuinka suuri pinta-ala -osuus näiden arvojen välille jäi eli mikä oli saatu pinta-alan kattavuus.

### 4.6.2 Yhteenveto: mitä ohjelma tallentaa?

Jokaiseen käsiteltyyn tiedostoon talletettiin:

- ❖ näytealueen rajauksen x- ja y-koordinaatit (vektoreita)
- ❖ näytealueen lämpötilat (vektori)
- ❖ yhdistetyn jakauman intensiteetit ja niitä vastaavat lämpötilat (vektori)
- ❖ yhdistetyn jakauman pisteiden määrä (skalaari)
- ❖ alkuperäisen jakauman keski-, minimi- ja maksimiarvo (skalaareita)
- ❖ jakauman 99.9 % -leveys, ylä- ja alarajat sekä saatu todellinen kattavuus (skalaareita)
- ❖ kaikkien kolmen sovituksen intensiteetit (vektoreita) ja kolme parametria: keskiarvo, keskihajonta ja amplitudi (skalaareita)
- ❖ häntäsovituksille nollauspiste ja virhe (skalaareita)
- ❖ yhteissovituksen intensiteetit (vektori) ja
- ❖ yhteissovituksen 99.9 % -leveys, ylä- ja alarajat sekä saatu todellinen kattavuus (skalaareita)

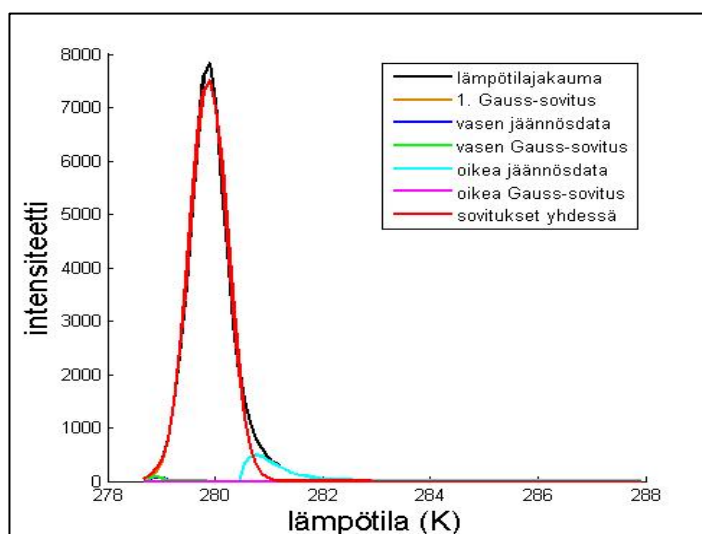
ASCII-tulostiedostoon kirjoitettiin yhdelle riville yhden tiedoston tuloksia. Omiin sarakkeisiinsa kirjoitettiin:

- ❖ tiedoston nimi
- ❖ vuorokausikuville kellonaika (oletusarvoisesti saadaan tiedoston nimestä)
- ❖ jakauman pisteiden määrä
- ❖ jakauman keski-, minimi- ja maksimiarvo
- ❖ jakauman 99.9 % -leveys, ylä- ja alaraja sekä saatu todellinen kattavuus
- ❖ kaikkien kolmen sovituksen parametrit
- ❖ häntäsovitusten virhe ja
- ❖ yhteissovituksen 99,9 % -leveys, ylä- ja alarajat sekä saatu todellinen kattavuus

Jokaisesta tiedostosta tallennettiin FIG-kuva, johon oli piirretty eri värein yhdistetty jakauma, ensimmäinen sovitus, vasen jäännösdata ja sen sovitus, oikea jäännösdata ja sen sovitus, sekä yhteissovitus. Ohjelma tulosti kuvaan automaattisesti akselien nimet sekä tiedon siitä, mitä mikin käyrä esittää. Kuva tallennettiin samalla nimellä kuin tiedosto.

### 4.6.3 Epäonnistuneiden sovitusien käsittely

Funktio `fminsearch` ilmaisee loogisena paluuarvona, onnistuiko sovituksen optimointi vai alkoiko sovitus divergoida väärään suuntaan. Toiveena oli, että ohjelma tunnistaa paluuarvosta epäonnistuneen sovituksen ja kyseisen sovituksen kohdalla pyytää käyttäjää kokeilemaan muita alkuarvoja, kunnes sovitus onnistuu. Etsittäessä sopivia alkuarvoja havaittiin, että tämä paluuarvo ei toiminut tarkoituksen mukaisella tavalla. Tarkasteltaessa ohjelman piirtämiä kuvaajia todettiin, että välillä paluuarvon mukaan sovitus onnistui, vaikka kuvasta nähtiin, että näin ei käynyt. Välillä taas sovitus oli paluuarvon mukaan epäonnistunut, vaikka se kuvan perusteella silmämääräisesti arvioituna onnistui riittävän hyvin. Esimerkki molemmista tapauksista on kuva 4.16, jossa paluuarvon mukaan ensimmäinen sovitus ei olisi onnistunut ja oikea laitasovitus olisi onnistunut.

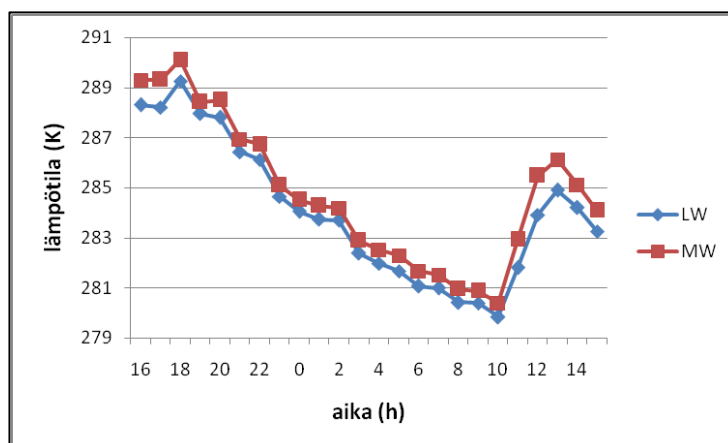


**Kuva 4.16.** Funktion `fminsearch` paluuarvon mukaan ensimmäinen sovitus (kuvassa jää kokonaissovituksen punaisen käyrän alle) ei ole onnistunut ja oikean laidan sovitus on onnistunut, vaikka se näkyy pelkkänä viivana kuvan alareunassa.

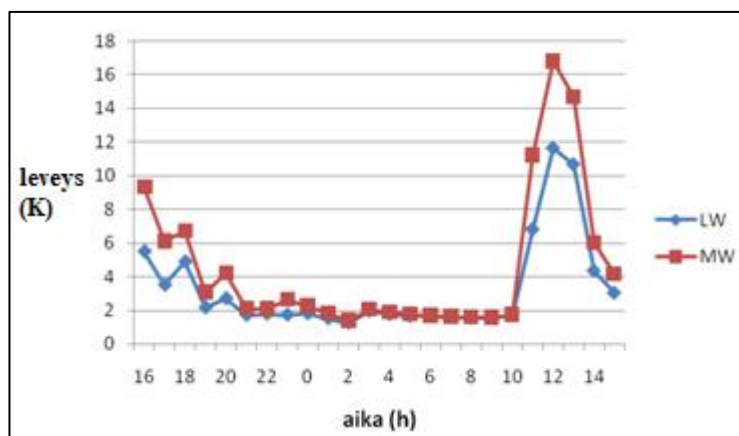
Ensimmäisen sovituksen kohdalla paluarvo lähes aina onnistui kuvaamaan sovituksen onnistumista. Laitasovitusten kohdalla oli enemmän ongelmia. Koska aiemmin kuvatulla alkuarvomenettelyllä sovitukset onnistuivat silmämääräisesti arvioituna lähes aina (virhe alle 1 %), ei alettu pohtia uusia keinoja tunnistaa automaattisesti epäonnistunut häntäsovitus. Päätettiin, että yhden kansion käsittelyn jälkeen ohjelma kehottaa käyttäjää katsomaan ohjelman tallentamat kuvat sovituksista. Mikäli jokin sovitus ei olisi onnistunut, se yritettäisiin saada toimimaan muuttamalla alkuarvoja suoraan ohjelmakoodiin. Vaihtoehtoisesti kyseinen tiedosto voitaisiin jättää pois tuloksista. Kansioissa oli diplomityön aikana niin vähän tiedostoja, että kuvat voitiin hyvin käydä läpi käsin. Mikäli tiedostoja olisi satoja, pitäisi ohjelmaan kehittää automaattinen virheentunnistus.

## 5 HAVAINTOJA METSÄN LÄMPÖTILAJAKAUMISTA JA ANALYYSISTÄ

Edellisessä luvussa kuvattu lämpökamerakuvien analyysiohjelma sopii lähtökohtaisesti kaikkiin maastoihin. Kuten jo aiemmin mainittu, tässä diplomityössä kaikki lämpökamerakuvat olivat metsästä. Kuvista rajattiin näytealueiksi puiden latvustoa, sama kohta mahdollisimman tarkkaan ja samalta etäisyydeltä. Tässä luvussa esitetään havaintoja mitatuista metsän lämpötilajakaumista, aluksi ensimmäisestä suunnasta kuvatusta metsästä (katso luvun 3 mittausasetelmasuunnat). MW- ja LW-kameroiden kuvaamia lämpöherätteitä tulee tarkastella erikseen, sillä MW- ja LW-kuville lasketut lämpötilat olivat hieman erilaiset. Tämä huomataan esimerkiksi erona lämpötilajakaumien keskiarvossa (kuva 5.1) ja jakauman leveydessä (kuva 5.2).



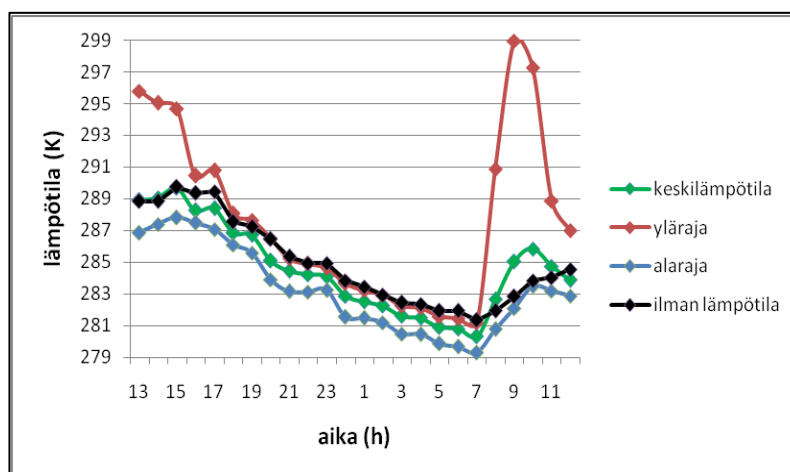
*Kuva 5.1. Metsän keskilämpötila vuorokautena 5 - 6.9.2012 eri kameroiden mukaan.*



*Kuva 5.2. Metsän lämpötilajakauman leveys vuorokautena 5 - 6.9.2012 eri kameroiden mukaan.*

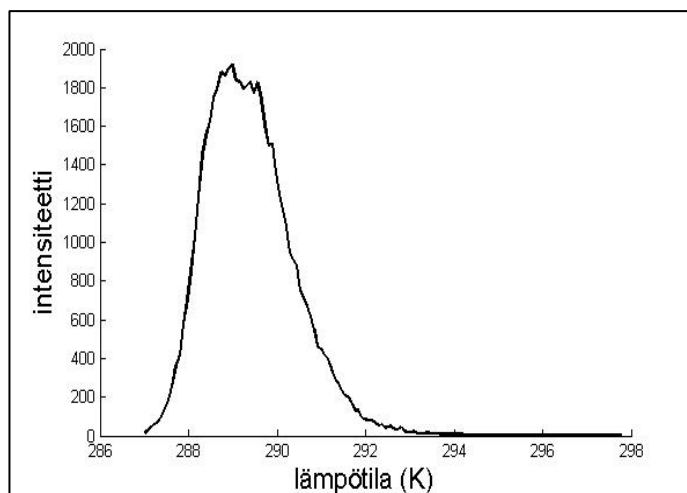
Maasto siis näyttää eri lämpöiseltä riippuen siitä, kummalla kameralla sitä on kuvattu. MW-kuvat näyttävät lämpimämmiltä, minkä havaitsi myös WES [20]. Osittain tämä voi johtua siitä, että auringon heijastukset ovat mahdollisia MW-alueella [13]. Tämän takia tulee tehdä eri mallit MW- ja LW-kuville tai vaihtoehtoisesti löytää riippuvuus näiden lämpötilojen välille. Tässä luvussa tarkastellaan vain MW-kameran kuvaamia lämpöherätteitä, joille seuraavassa luvussa etsitään mallia. Resurssien puutteen vuoksi LW-herätteitä ei analysoitu.

Tutkittiin, miten metsän lämpötilajakauma muuttuu yhden vuorokauden aikana (kuva 5.3).

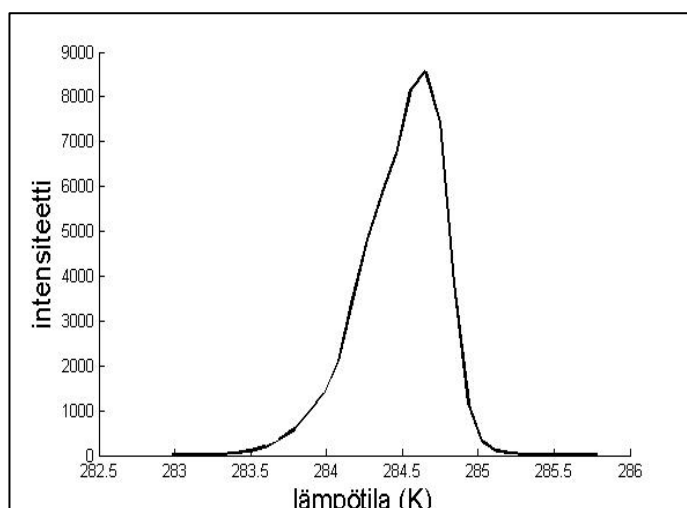


**Kuva 5.3.** Metsän keskilämpötila sekä jakauman ääriämpötilat sateettomalle vuorokaudelle 5 - 6.9.2012.

Koska metsän todellista emissiivisyysarvoa ei ollut tiedossa, eivät kuvassa esitetyt metsän lämpötila-arvot ole välttämättä todellisia. Siksi ei voitu sanoa varmasti, että yöaikaan metsän lämpötila-arvot eivät ylitä ilman lämpötilaa, vaikka kuvan perusteella tältä näyttikin. Kuvasta voidaan tarkastella ilman ja metsän lämpötilavaihteluita vuorokauden aikana. Vaihtelut näyttävät suunnilleen yhdenmukaisilta. Kaikille syyskuun vuorokausille oli tyypillistä keskilämpötilan nousu ennen kello yhdeksää. Tällöin metsän keskilämpötila kohoaa jyrkemmin kuin ilman lämpötila. Tämä on ristiriidassa Wollenweberin [26] oletuksen kanssa siitä, että metsän lämpökapasiteetti on merkityksetön. Lämmön nousun syyn arveltiin johtuvan auringosta. Koska metsää kuvattiin idästä, auringon nousussa aamulla se paistoi (lähes) kamerasuunnasta kuvattavalle alueelle. Tällöin pinta saattoi kuumeta nopeasti. Samaan tulokseen ovat päätyneet myös de Vreis et al. [26]. Auringon kierron jatkuessa kuvausalue alkoi tulla varjoisammaksi, mikä selittää kello kymmenen jälkeisen lämpötilan laskun. Illalla metsä alkoi jäähtyä auringon laskiessa. Jakauman yläraja on aamulla ja päivällä kauempana metsän keskilämpötilasta kuin alaraja. Esimerkkeinä päivän ja illan lämpötilajakaumista ovat kuvat 5.4 ja 5.5.

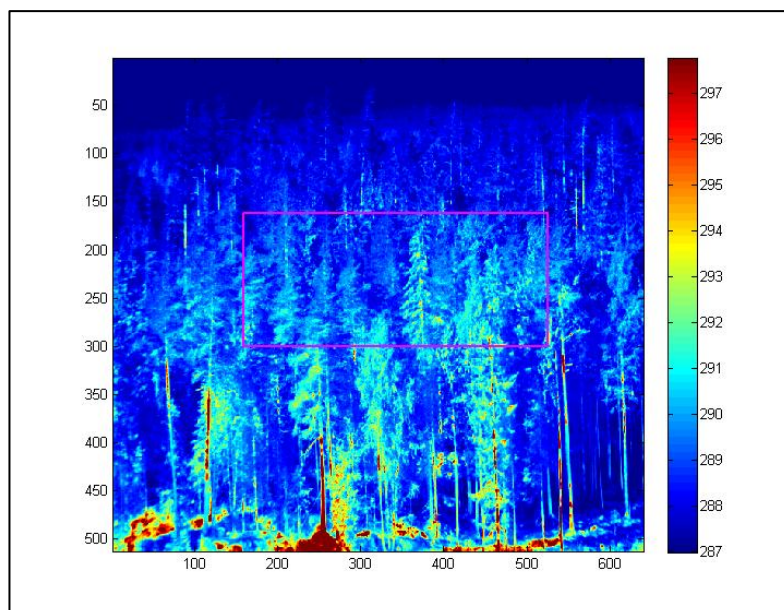


**Kuva 5.4.** Metsän lämpötilajakauma 5.9.2012 klo 13.



**Kuva 5.5.** Metsän lämpötilajakauma 5.9.2012 klo 21.

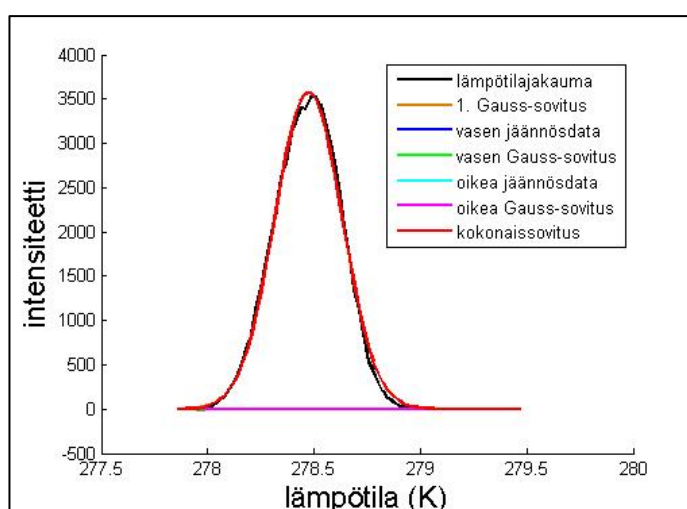
Aamulla ja päivällä jakaumien levenemiset ovat korkeampien lämpötilojen puolella, illalla ja yöllä matalampien. Saman ilmiön olivat havainneet Holbo ja Luvall [24]. Aamun levenemiset saattoivat olla useita asteita ja ne olivat selvästi leveämpiä kuin illan ja yön levenemiset. Tarkasteltaessa päiväsaajan lämpökamerakuvaa havaittiin korkeiden lämpötilojen johtuvan puiden rungoista (kuva 5.6).



**Kuva 5.6.** Puiden rungot kuvautuvat selvästi lehvästöä lämpimämpiä 5.9.2012 klo 13. Liila suorakaide kuvaa ohjelmassa rajattua näytealuetta.

Edellinen kuva oli MW-kamerasta saatu. Kuten jo aiemmin todettu, syyn runkojen korkeammille lämpötiloille arveltiin olevan auringon säteiden heijastukset rungoista. Tutkittiin, onko kyse tästä ilmiöstä. Koska myös LW-kuvissa esiintyi kuvan 5.4 kaltaisia levenemisiä lämpötilajakaumissa, niiden täytyi johtua muustakin kuin runkojen suorista heijastuksista. Todettiin, että ilmeisesti kyseessä on todellinen lämpötilaero: puiden tasiset rungot lämpiävät nopeammin ja ylempiin lämpötiloihin kuin lehvästö.

Tarkasteltaessa öisiä lämpötilajakaumia havaittiin, että märän metsän lämpötilajakauma on hyvin gaussmainen. Tällöin jo ensimmäinen Gauss-sovitus pystyy hyvin mallintamaan koko jakaumaa, kuten kuva 5.7 osoittaa.

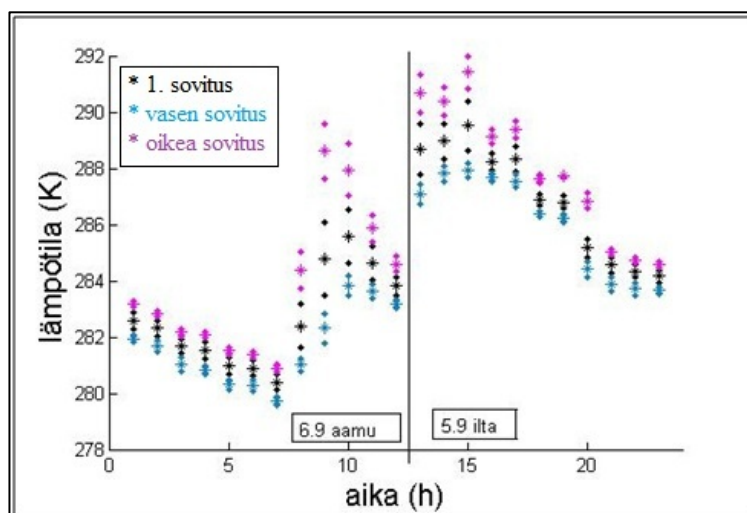


**Kuva 5.7.** Märän metsän lämpötilajakauma yöllä 8.9 klo 2. Sade oli loppunut edellisenä iltana klo 20.



Kuvauskerroilla oli useampi sateinen päivä peräkkäin. Tällöin jakaumat olivat päiväsai-  
kaankin edellisen kaltaisia.

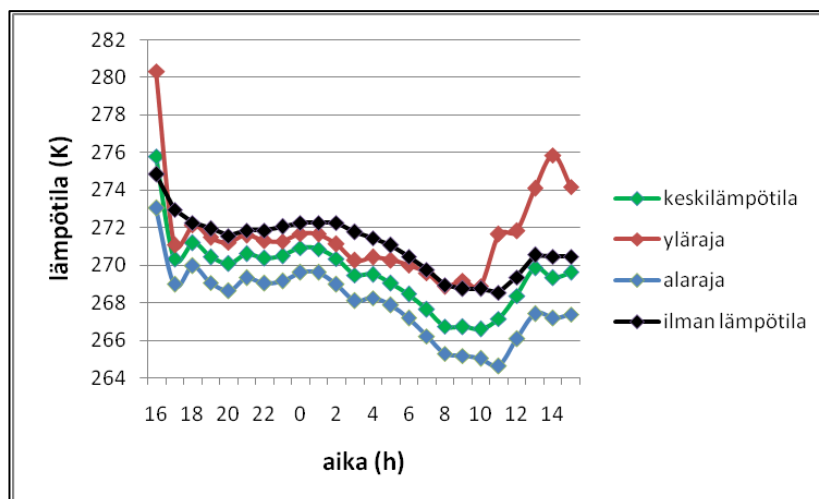
Tutkittiin, miten Gauss-sovitukset käyttäytyvät vuorokauden aikana. Esimerkki  
tästä on kuva 5.8, jota varten sovitukset tehtiin sillä ohjelmaversiolla, jossa jakauman  
viisi peräkkäistä pistettä yhdistettiin myös silloin, kun uuteen jakaumaan jäi vain vähän  
pisteitä.



**Kuva 5.8.** Kolmen Gauss-sovituksen parametrit yhden vuorokauden aikana. Tähdellä on merkitty kunkin sovituksen keskiarvo ja pisteellä keskiarvo  $\pm$  keskihajonta. (Sovitusten amplitudien kuvaaminen vuorokauden aikana ei onnistunut piirrosteknisistä syistä.)

Yöaikaan parametrit olivat lähellä toisiaan ja päiväsaikaan ne erosivat enemmän. Yöllä jakaumat olivat kapeampia eli metsä oli tasalämpöisempi. Tämän arveltiin johtuvan siitä, että yöllä metsässä ei ole lämmittävää tekijää, jolloin lämpötilavaihtelut ovat pienempiä. Lämpötilajakaumien leveyksiä ei kuitenkaan voida täysin suoraan päätellä kuvasta, sillä amplitudit eivät näy kuvassa millään tavalla. Mikäli hännän sovitus olisi hyvin matala, se voi tarkoittaa kapeaa pääjakaumaa, vaikka hännän keskiarvo olisi kaukana ensimmäisen sovituksen keskiarvosta.

Kaikki edellä kuvatut herätteet oli saatu ensimmäisestä mittaussuunnasta. Tutkittaessa vastakkaisen mittaussuunnan lämpöherätteitä havaittiin mittaussuunnan vaikutus herätteisiin, kuten kuva 5.9 havainnollistaa.



**Kuva 5.9.** Vastakkaisesta suunnasta kuvatun metsän lämpötiloja 25 - 26.10.2012. Vuorokauden aikana satoi klo 22 - 05.

Leveyden huippuarvo ilmestyi aamupäivän sijasta vasta iltapäivällä. Tämä oli odotettavissa, sillä aurinko alkoi paistaa kuvausalueelle vasta myöhemmin.

## 6 MALLI JAKAUMAN ÄÄRILÄMPÖTILOILLE ERI OLOSUHTEISSA

Tässä luvussa kerrotaan matemaattisen mallin kehittamisestä. Tärkeintä oli saada malli jakauman leveydelle, joten muihin, kuten keskilämpötilan tai sovitusten, malleihin ei keskitytty. Jakauman leveyden itseisarvon lisäksi tarvittiin tieto leveyden sijoittumisesta lämpötila-asteikolle, joten kehitettiin mallit jakauman ala- ja ylärajoille. Resurssien puutteen vuoksi kehitettiin mallia vain MW-kameran kuvaamille lämpöherätteille ensimmäisestä mittaussuunnasta.

### 6.1 Haettavan mallin muoto

WES'in [20] tutkimuksen mukaan maaston keskilämpötilalla ja keskihajonnalla (joka kuvaa jollain tasolla myös jakauman leveyttä) ei ole selvää yhteyttä, joten ei yritetty tehdä leveydelle sellaista mallia, jossa yhtenä parametrina olisi maaston jakauman keskilämpötila. Päätettiin kokeilla yksinkertaisinta matemaattista mallia: lineaarista monimuuttujamallia, jonka parametrien kertoimet saadaan regressioanalyysillä. Tätä ovat käyttäneet myös de Vries et al. [26]. Lisäksi lineaarinen malli oli ainoa monimuuttujamalli, johon oli valmiita työkaluja MatLabissa. Malliyhtälön parametreiksi haluttiin kuvausolosuhteita kuvaavat, ennustettavissa olevat suureet, mutta ei käytetty samoja kuin de Vries et al. käyttivät. Olosuhteet pitivät sisällään sään, vuorokauden ja vuodenajan muutokset. Näistä olosuhteista piti löytää eniten vaikuttavat parametrit malliin. Säätila jaettiin karkeasti neljään tyyppiin: aurinkoinen, puolipilvinen, pilvinen ja sateinen. Sateisuus ilmeni sadenopeudesta. Pilvisyyden arveltiin näkyvän riittävästi irradianssissa: mitä enemmän pilviä on, sitä pienemmän oletettiin irradianssin olevan. Tuulen nopeuden ja suunnan ajateltiin olevan merkityksetön vähätuulisessa sisämaassa. Vuodenajan muutoksina ajateltiin ilman lämpötilaa ja irradianssia: kesällä ilman lämpötila ja irradianssi on suurempi kuin talvella. Vuorokauden muutoksina ajateltiin ajan lisäksi ilman lämpötilaa ja irradianssia: aamulla kumpikin nousee päivää kohti ja illalla laskee.

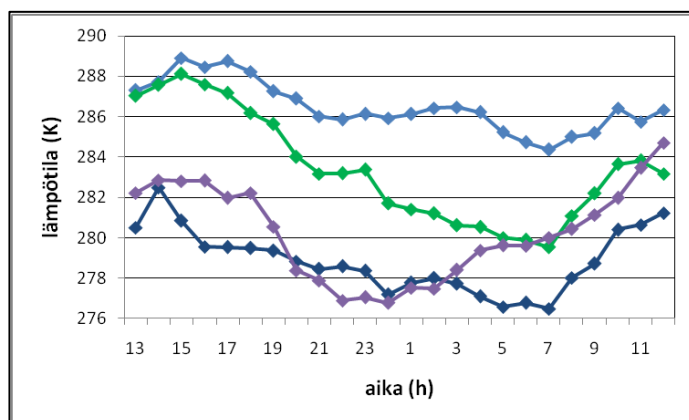
Syötteenä lineaarista regressiota varten annettiin kuvausolosuhteet matriisina ja tarkasteltava suure vektorina. Siten malli suurelle  $y$  tietyssä hetkenä on seuraavanlainen:

$$y(t, T, W, S) = a_1 t + a_2 T + a_3 W + a_4 S, \quad (6.1)$$

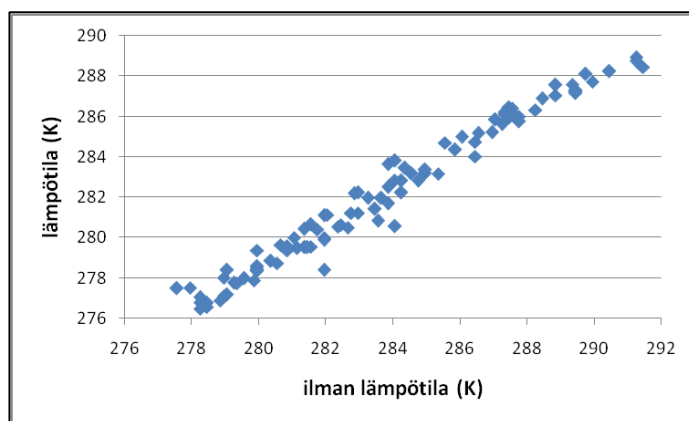
missä  $t$  on aika (h),  $T$  on ilman lämpötila (K),  $W$  irradianssi ( $W/m^2$ ),  $S$  sadenopeus (mm/h) ja  $a_1$ - $a_4$  regressioanalyysillä saatavat kertoimet. Ilman lämpötilat muutettiin Celsius-asteista Kelvineiksi, koska analyysiohjelmalla saatavat lämpötilat olivat Kelvineitä. Hyväksyttäväksi virheeksi jakauman ala- ja ylärajoille oletettiin yksi aste eli arveltiin, tosin tarkemmin tutkimatta, että taustasta yhden asteen verran poikkeavat lämpötila-arvot eivät erotu.

## 6.2 Malli 1: parametreina hetkelliset arvot

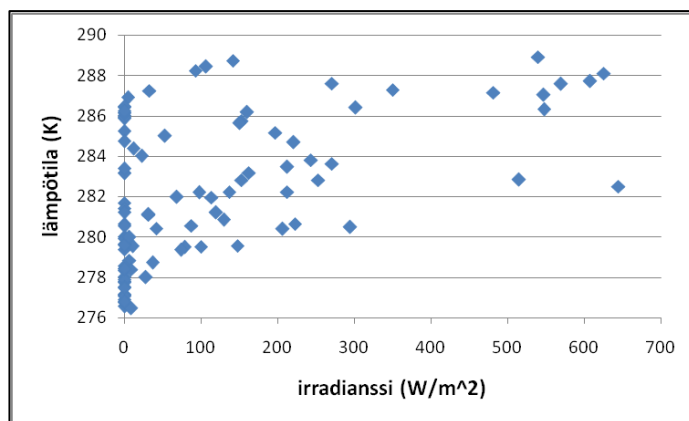
Koska ei ollut tietoa siitä, miten nopeasti metsän lämpötila reagoi esimerkiksi irradianssin tai sateen muutoksiin, käytettiin mallin parametreina aluksi hetkellisiä ilman lämpötilan, irradianssin ja sateen arvoja. Mallit tehtiin aluksi neljän vuorokauden lämpökamerakuvien pohjalta: 4 - 5.9, 5 - 6.9, 7 - 8.9 ja 9 - 10.9. Käytettävät kuvat olivat peräisin samalta kuvauskerralta ja ne poimittiin videolta tunnin välein tasatunnein. Koska koikeiltava malli oli lineaarinen, tulisi jakauman ala- ja ylärajan riippua lineaarisesti mallin parametreista parhaan tuloksen saamiseksi. Kuvissa 6.1 – 6.8 on esitetty graafisesti näiden rajojen riippuvuudet parametreista. Rajojen ja parametrien lineaariset korrelaatiokertoimet sekä regressioanalyysillä saadut kertoimet on esitetty taulukoissa 6.1 ja 6.2.



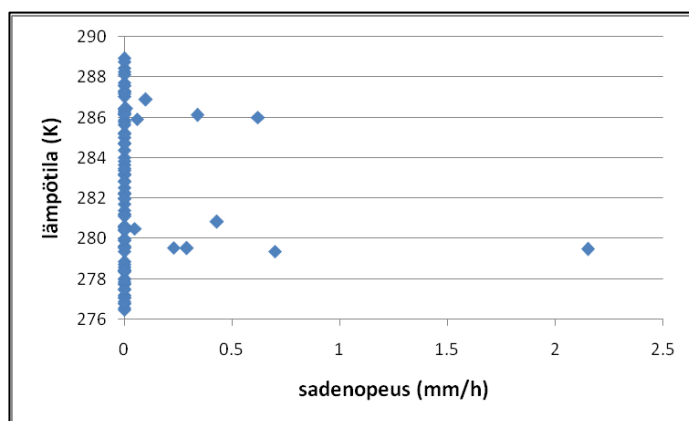
*Kuva 6.1. Jakauman alaraja eri vuorokauden aikoina.*



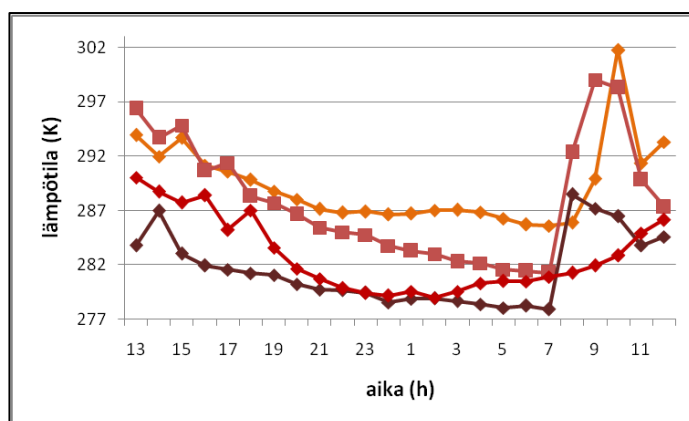
*Kuva 6.2. Jakauman alaraja hetkellisen ilman lämpötilan funktiona.*



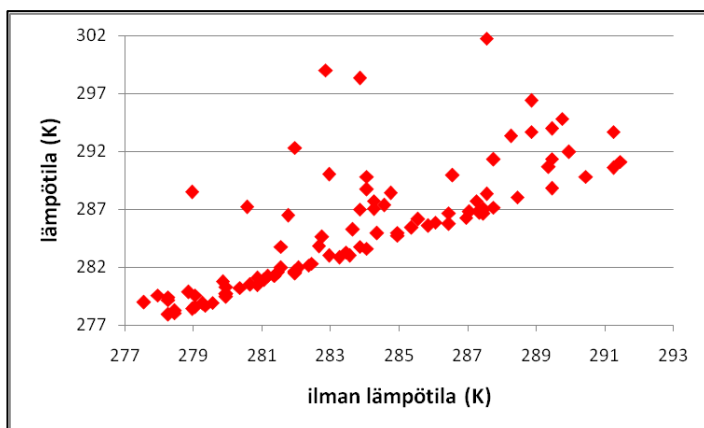
*Kuva 6.3. Jakauman alaraja hetkellisen irradianssin funktiona.*



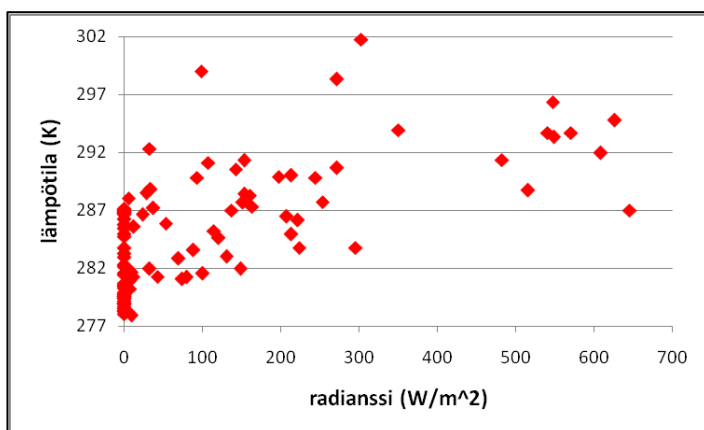
*Kuva 6.4. Jakauman alaraja hetkellisen sadenopeuden funktiona.*



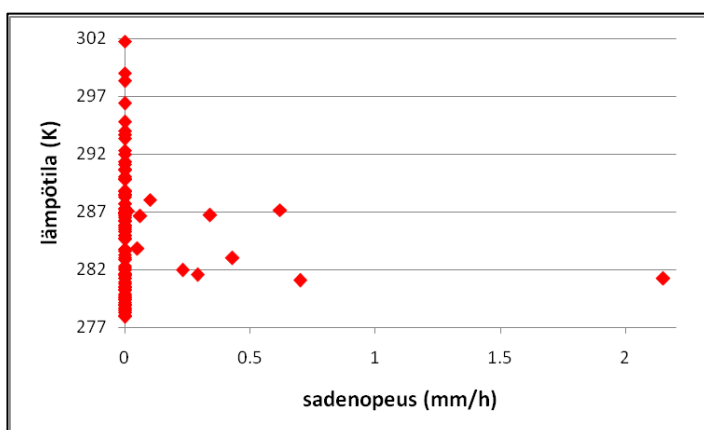
*Kuva 6.5. Jakauman yläraja eri vuorokauden aikoina.*



**Kuva 6.6.** Jakauman yläraja hetkellisen ilman lämpötilan funktiona.



**Kuva 6.7.** Jakauman yläraja hetkellisen irradianssin funktiona.



**Kuva 6.8.** Jakauman yläraja hetkellisen sadenopeuden funktiona.

**Taulukko 6.1.** Mallin 1 mukaiset jakauman alarajan parametrien kertoimet ja lineaariset korrelaatiokertoimet.

	$t$	$T$	$W$	$S$
parametrin kerroin yhtälössä	-0.02834	0.9956	$9.460 * 10^{-5}$	-0.01454
korrelaatiokerroin alarajalämpötilan kanssa	0.2342	0.9864	0.4971	-0.06825

**Taulukko 6.2.** Mallin 1 mukaiset jakauman ylärajan parametrien kertoimet ja lineaariset korrelaatiokertoimet.

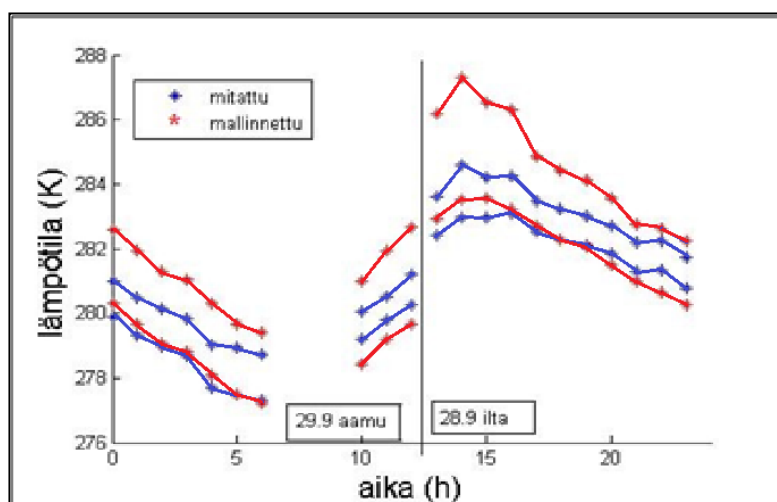
	$t$	$T$	$W$	$S$
parametrin kerroin yhtälössä	-0.04019	1.004	$9.155 * 10^{-3}$	-0.9197
korrelaatiokerroin ylärajalämpötilojen kanssa	0.2027	0.7658	0.6409	-0.1084

Parametrien kertoimista havaitaan, että ilman lämpötilalla on merkittävin vaikutus ennustettavan rajalämpötilan arvoon. Korrelaatiokertoimet havainnollistavat sen, mitä kuvistakin huomataan: ala- ja yläraja eivät riipu lineaarisesti ajasta. Ajan positiivinen korrelaatiokerroin ilmaisee, että mallin mukaan metsän lämpötila nousee vuorokauden aikana. Aamulla lämpötila nousee ja illalla laskee, joten ajan kannalta olisi parempi koikeilla polynomi- tai sinimuotoista mallia. Eri vuorokausina samoina kellonaikoina lämpötilat voivat erota suurestikin. Tämäkin on odotettavissa, sillä metsän lämpötila riippuu myös siitä, onko edellisenä päivänä aurinko lämmittänyt metsää suurella teholla tai onko sade pitänyt metsän kylmänä. Alaraja korreloi merkittävästi ilman lämpötilan kanssa. Tämä oli odotettavissa, sillä aurinko lämmittää maata ja metsää, jotka puolestaan saavat aikaan ilman lämpiämisen. Toisaalta taas tuulien mukana kulkeutunut lämmin ilma voi lämmittää viileämpää metsää. Ylärajan kohdalla korrelaatio ei ollut yhtä suurta. Tämä johtunee puiden runkojen erilaisesta lämpenemisestä verrattuna lehvästöön (katso luku 5). Hetkellinen irradianssi ei korreloinut voimakkaasti kumpaankaan lämpötilaan. Metsä on niin hidas reagoimaan lämpötilan muutoksiin, etteivät pilviverhon hetkelliset muutokset juuri vaikuta sen lämpötilaan. Positiiviset korrelaatiokertoimet ilman lämpötilalle ja irradianssille olivat loogisia: mitä lämpimämpi ilma on tai mitä suurempi irradianssi eli auringon säteilyteho, sitä korkeampi metsän lämpötila on. Sadenopeus korreloi lähes olemattoman vähän, mutta toisaalta käytettyjen neljän vuorokauden aikana satoi niin vähän, ettei sadetta saatu mallinnettua kunnolla. Negatiivinen korrelaatiokerroin sateelle oli myös helppo ymmärtää: kastuessaan metsä jäähtyy. Taulukossa 6.3 tarkastellaan mallin sisäistä virhettä. Sisäisellä virheellä tarkoitetaan mallin rakentamisessa käytetyn datan mitatun ja mallinnetun lämpötilan erotusta. Sekä mallin sisäisenä virheenä että mallin varsinaisessa käytössä virheenä hyväksyttiin aiemmin mainitut alle yhden asteen poikkeamat.

**Taulukko 6.3.** Mallin 1 sisäinen virhe.

	alaraja	yläraja
virheiden keskiarvo	1.4 mK	5.7 mK
virheiden keskihajonta	0.58 K	3.0 K
suurin virheen itseisarvo	1.7 K	15 K
mallinnetuista lämpötiloista virherajan sisällä	93 %	39 %

Alarajamalli oli hyvin lähellä sallittua virherajaa, mutta ylärajamalli ei ollut. Molempien mallien tulisi olla virherajojen sisällä ennen kuin niillä yritetään ennustaa toisten vuorokausien käyttäytymistä. Kokeeksi malleilla kuitenkin ennustettiin jakaumien rajat testi-vuorokauteen 28 - 29.9, mitä havainnollistaa kuva 6.9. Vuorokaudesta jätettiin pois kuvat klo 7, 8 ja 9, koska niissä oli sumua niin paljon, ettei metsä erottunut sen takaa juurikaan. Mitatun ja mallinnetun lämpötilan välistä virhettä tarkastellaan taulukossa 6.4. Virheenä tarkasteltiin mitattujen ja mallinnettujen lämpötilojen erotuksia.

**Kuva 6.9.** Mitatut ja mallin 1 ennustamat yhden vuorokauden jakaumien ala- ja ylärajat.**Taulukko 6.4.** Testivuorokauden jakauman rajojen mallinnuksen hyvyyden tarkastelua.

	alaraja	yläraja
virheiden keskiarvo	0.025 K	-1.3 K
virheiden keskihajonta	0.43 K	0.65 K
suurin virheen itseisarvo	0.75 K	2.7 K
mallinnetuista lämpötiloista virherajan sisällä	100 %	33 %

Vaikka alarajamalli itsessään ei ollut täydellinen, se onnistui ennustamaan kaikki lämpötilat sallitun virherajan sisälle. Ylärajamallilla lasketuista lämpötiloista vain kolmasosa oli riittävän hyviä. Koska keskimäärin alaraja oli oikein mallinnettu ja yläraja 1.3 K



liian suuri, tämä tarkoitti, että mallit yhdessä antoivat jakauman leveydeksi 1.3 K liian suuren arvon.

### 6.3 Malli 2: parametreina keskiarvoja

Edellä todettiin, että kokeiltu malli 1 ei ollut virherajojen puitteissa riittävän hyvä ennustamaan jakauman leveyttä. Mallia lähdettiin parantamaan siten, että aika jätettiin pois, koska oli todettu, ettei se sovi mukaan lineaariseen malliin syklisyytensä vuoksi. Lisäksi ajan korrelaatiokerroin oli pieni (0.2), joten aika ei ollut merkittävä ensimmäisessä mallissa. Todettiin myös, etteivät hetkelliset irradianssin tai sadenopeuden arvot olleet hyvä parametreja. Hetkellisen arvon sijasta haluttiin käyttää edellisten ajanhetkien keskiarvoa. Koska ei ollut tietoa siitä, miten pitkältä aikaväliltä keskiarvo kannattaa ottaa, kokeiltiin keskiarvoa edelliseltä puolelta tunnilta sekä irradianssiin että sadenopeuteen. Ilman lämpötilana käytettiin edelleen hetkellistä arvoa, sillä ilman lämpötila muuttui hitaasti verrattuna irradianssiin tai sadenopeuteen. Näin tehtiin uusi malliyhtälö, joka oli muotoa

$$y(T, W, S) = a_1 T + a_2 \tilde{W} + a_3 \tilde{S}, \quad (6.2)$$

missä  $\tilde{W}$  ja  $\tilde{S}$  ovat edellisen puolen tunnin keskiarvoja irradianssista ja sadenopeudesta. Tehtiin leveyden ala- ja ylärajojen mallit. Malliyhtälön parametrien kertoimet ja korrelaatiot mallinnettavien suureiden kanssa on esitetty taulukoissa 6.5 ja 6.6.

**Taulukko 6.5.** Mallin 2 jakauman alarajan parametrien kertoimet ja lineaariset korrelaatiokertoimet.

	$T$	$\tilde{W}$	$\tilde{S}$
parametrin kerroin yhtälössä	0.9947	$-6.792 * 10^{-4}$	-0.05998
korrelaatiokerroin mitattujen lämpötilojen kanssa	0.9864	0.5235	-0.08816

**Taulukko 6.6.** Mallin 2 jakauman ylärajan parametrien kertoimet ja lineaariset korrelaatiokertoimet.

	$T$	$\tilde{W}$	$\tilde{S}$
parametrin kerroin yhtälössä	1.002	$9.236 * 10^{-3}$	-2.086
korrelaatiokerroin mitattujen lämpötilojen kanssa	0.7658	0.6648	-0.1732

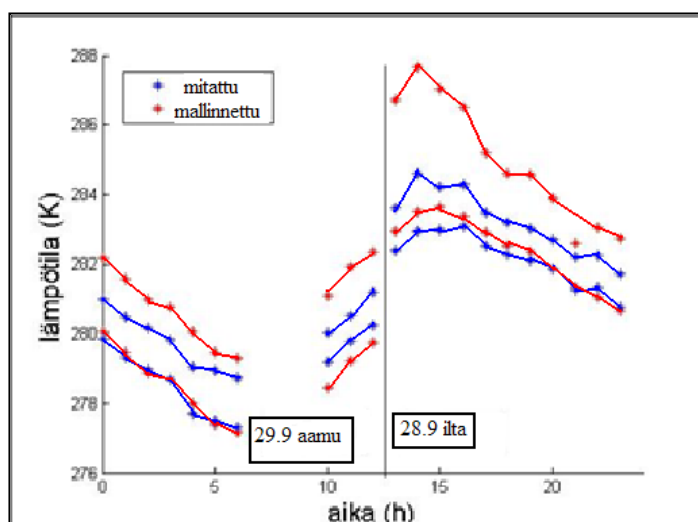
Parametrien kertoimista havaitaan, että ilman lämpötilalla on edelleen merkittävin osuus ennustettavan rajalämpötilan arvosta. Hetkellisen irradianssin ja sadenopeuden vaihtaminen edeltävän puolen tunnin keskiarvoon ei korrelaatiokertoimien mukaan saanut aikaan näkyvää parannusta malleille. Parametrien korrelaatiot olivat molemmissa tapauksissa käytännössä samat. Sateen korrelaatio tosin melkein kaksinkertaistui, mutta sillä

ei ollut suurta merkitystä, koska korrelaatiokerroin oli edelleen hyvin pieni. Taulukossa 6.7 tarkastellaan mallin sisäistä virhettä.

**Taulukko 6.7.** Mallin 2 sisäinen virhe.

	alaraja	yläraja
virheiden keskiarvo	1.2 mK	6.8 mK
virheiden keskihajonta	0.60 K	3.0 K
suurin virheen itseisarvo	2.1 K	14 K
mallinnetuista lämpötiloista virherajan sisällä	92 %	53 %

Alarajamalliin parametrien muutokset eivät juuri vaikuttaneet, mutta ne paransivat hie-man ylärajamallia. Mallilla ennustettiin jakaumien leveys samaan testivuorokauteen 28 - 29.9, jota havainnollistaa kuva 6.10. Taulukossa 6.8 tarkastellaan testivuorokauden mallinnuksen virhettä.



**Kuva 6.10.** Mallin 2 ennustamat ja mitatut yhden vuorokauden jakaumien ala- ja ylärajat.

**Taulukko 6.8.** Testivuorokauden jakauman ala- ja ylärajojen mallinnuksen hyvyyden tarkastelua.

	alaraja	yläraja
virheiden keskiarvo	-0.052 K	-1.4 K
virheiden keskihajonta	0.37 K	0.79 K
suurin virheen itseisarvo	0.74 K	3.1 K
mallinnetuista lämpötiloista virherajan sisällä	100 %	29 %

Mallien muuttaminen ei saanut aikaan testivuorokauden jakaumien rajojen ennustamisen tarkentumista.

## 6.4 Malli 3: lisää vuorokausia malliin

Jotta etenkin sateen merkitys tulisi paremmin ilmi, lisättiin malliin vuorokausia. Lisätävät vuorokaudet olivat 25 - 28.9, jotka olivat läheltä testivuorokautta, ja niissä oli sama näytealue. Lisäksi mukaan otettiin vuorokausi 8 - 9.9, joka oli jäänyt käyttämättä edellisessä mallissa. Uusista vuorokausista poimittiin myös kuvat tunnin välein tasatunnein. Muutama kuva jouduttiin jättämään pois analyysistä muun muassa sumun sekä näkyvyyden ja sadetietojen puuttumien vuoksi. Malli 3 rakennettiin siis kahdeksan vuorokauden pohjalta käyttäen yhtälöä 6.2. Sateen merkityksen tutkimisen lisäksi toisena syynä vuorokausien lisäämisessä, varsinkin testivuorokauden läheisyydessä, oli se, että mikäli mallin kehityksessä oltaisiin oikeilla jäljillä, havaittaisiin mallin tulosten paranevan. Mikäli tulokset huononisivat, pitäisi mallia muuttaa selkeästi eri suuntaan.

### 6.4.1 Jakauman rajat

Jakauman ala- ja ylärajojen mallien parametrien kertoimet ja lineaariset korrelaatiokerroimet on esitetty taulukoissa 6.9 ja 6.10.

**Taulukko 6.9.** Mallin 3 jakauman alarajan parametrien kertoimet ja lineaariset korrelaatiokerroimet.

	$T$	$\tilde{W}$	$\tilde{S}$
parametrin kerroin yhtälössä	0.9949	$-4.570 * 10^{-4}$	0.04669
korrelaatiokerroin mitattujen lämpötilojen kanssa	0.9876	0.4421	0.06775

**Taulukko 6.10.** Mallin 3 jakauman ylärajan parametrien kertoimet ja lineaariset korrelaatiokerroimet.

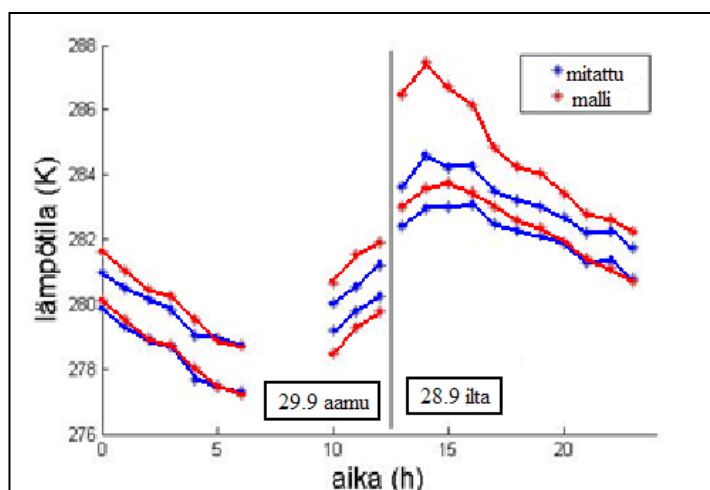
	$T$	$\tilde{W}$	$\tilde{S}$
parametrin kerroin yhtälössä	1.003	0.01116	-0.3660
korrelaatiokerroin mitattujen lämpötilojen kanssa	0.7312	0.6019	-0.02497

Parametrien kertoimista havaitaan, että ilman lämpötilalla on edelleen merkittävin osuus ennustettavan rajalämpötilan arvosta. Korrelaatiokerroimien mukaan malli ei parantunut, vaikka mukaan otettiin testivuorokautta lähinnä olevia vuorokausia. Alarajan ja ilman lämpötilan välinen korrelaatio säilyi käytännössä samana, mutta muilla korrelaatio hieman pieneni. Tällä ei tosin ollut juuri merkitystä mallin hyvydessä, sillä korrelaatiot olivat alun perinkin heikkoja. Taulukossa 6.11 tarkastellaan mallien sisäisiä virheitä.

**Taulukko 6.11.** Mallin 3 sisäinen virhe.

	alaraja	yläraja
virheiden keskiarvo	0.42 mK	4.4 mK
virheiden keskihajonta	0.52 K	3.0 K
suurin virheen itseisarvo	2.1 K	19 K
mallinnetuista lämpötiloista virherajan sisällä	95 %	63 %

Alarajamallin hyvyys ei juuri muuttunut, mutta ylärajamallista tuli hieman parempi. Mallia testattiin jälleen samaan testivuorokauteen 28 - 29.9. Kuva 6.11 esittää vuorokauden mitatut ja mallinnetut jakauman ala- ja ylärajat. Taulukossa 6.12 tarkastellaan testivuorokauden mallinnuksen virhettä.

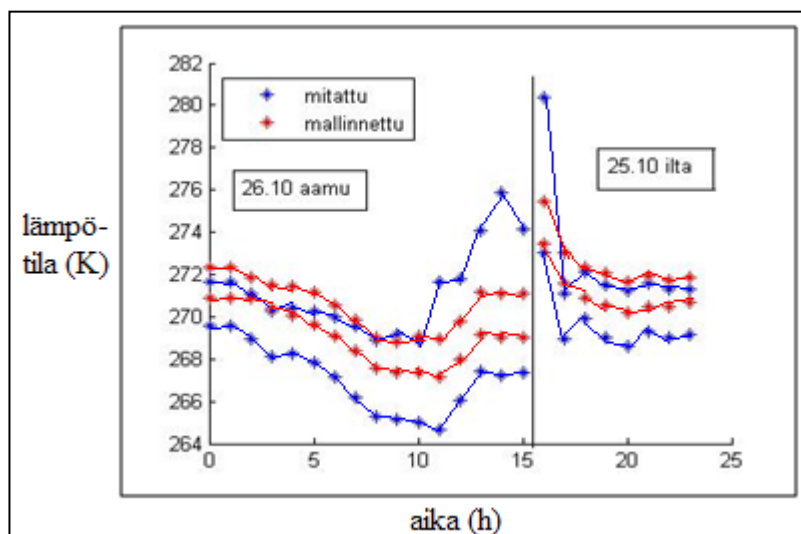
**Kuva 6.11.** Mallin 3 ennustamat ja mitatut yhden vuorokauden jakaumien ala- ja ylärajat.**Taulukko 6.12.** Testivuorokauden jakauman ala- ja ylärajojen mallinnuksen hyvyden tarkastelua.

	alaraja	yläraja
virheiden keskiarvo	-0.11 K	-0.97 K
virheiden keskihajonta	0.38 K	0.86 K
suurin virheen itseisarvo	0.75 K	2.9 K
mallinnetuista lämpötiloista virherajan sisällä	100 %	67 %

Alarajamalli ei jälleen muuttunut juurikaan vaan oli edelleen hyväksyttävällä tasolla. Ylärajamalli sen sijaan kaksinkertaisti onnistuneiden ennustusten määrän.

Mallia 3 kokeiltiin myös vastakkaiseen suuntaan kuvattuun dataan (katso luvusta kolme jälkimmäinen mittausasetelmasuunta). Sen oletettiin sopivan huonosti juuri siksi, että aurinko paistaa kuvausalueelle eri aikaan, mutta haluttiin saada jonkinlainen käsitys siitä, miten huonosti malli 3 sopii eri kuvaussuunnasta kerättyyn dataan. Mallilla

3 ennustettiin siis vuorokauden 25 - 26.10 jakauman rajat. Mitatut ja mallinnetut rajat on esitetty kuvassa 6.12 ja virhetarkastelu taulukossa 6.13.



**Kuva 6.12.** Mallin 3 ennustamat ja mitatut vastakkaisesta suunnasta kuvatun vuorokauden jakaumien ala- ja ylärajat.

**Taulukko 6.13.** Vastakkaisen suunnan testivuorokauden jakaumien ala- ja ylärajojen mallinnuksen hyvyyden tarkastelua.

	alaraja	yläraja
virheiden keskiarvo	-1.8 K	0.42 K
virheiden keskihajonta	0.53	1.9 K
suurin virheen itseisarvo	2.6 K	4.9 K
mallinnetuista lämpötiloista virherajan sisällä	8.3 %	63 %

Tässä tapauksessa alaraja saatiinkin ylärajaa selvästi huonommin mallinnettua. Ilmiö johtuu luultavasti juuri siitä, että malli 3 rakennettiin toisesta suunnasta saadun datan avulla, jolloin sen käyttö ei onnistu. Mallia voi siis hyödyntää vain ensimmäiseen suuntaan kuvatun metsän lämpötilakäyttäytymisen ennustamiseen.

#### 6.4.2 Leveyden itseisarvo

Tekemällä malleja jakauman rajoille oli päästy vähän enemmän selville niihin vaikuttavista tekijöistä. Seuraavaksi tutkittiin, mitkä sääparametrit vaikuttavat eniten jakauman leveyden itseisarvoon. Käyttämällä mallin 3 ideaa ja yhtälömuotoa saatiin leveyden itseisarvon parametrien taulukossa 6.14 esitetyt kertoimet yhtälössä ja niiden lineaariset korrelaatiokertoimet.

**Taulukko 6.14.** Mallin 3 jakaumien leveyden itseisarvon parametrien kertoimet ja lineaariset korrelaatiokertoimet.

	$T$	$\tilde{W}$	$\tilde{S}$
parametrin kerroin yhtälössä	$5.433 \cdot 10^{-3}$	0.01162	-0.4127
korrelaatiokerroin mitattujen lämpötilojen kanssa	0.1082	0.4697	-0.1078

Toisin kuin jakauman ääriarajojen tapauksessa, leveyden itseisarvo korreloi enemmän irradianssin kuin lämpötilan kanssa. Lämpötilan kerroin ei ollut suurin, joten se ei ollut enää mallinnettavan suureen arvon suurin tekijä. Taulukossa 6.15 tarkastellaan mallin sisäistä virhettä. Sallittu virhe leveyden itseisarvolle katsottiin olevan 1 K.

**Taulukko 6.15.** Mallin 3 leveyden itseisarvon sisäinen virhe.

virheiden keskiarvo	4.0 mK
virheiden keskihajonta	2.8 K
suurin virheen itseisarvo	18 K
mallinnetuista lämpötiloista virherajan sisällä	62 %

Yli puolet mallinnetuista arvoista oli hyväksyttäviä. Selvitettiin, kuinka suuri osuus keskimäärin eri parametreilla on mallin ennustaman leveyden arvossa. Tätä varten aluksi laskettiin parametrien keskiarvot mallia varten käytetyistä kahdeksasta vuorokaudesta. Nämä keskiarvot kerrottiin omalla malliyhtälön kertoimellaan ja jaettiin keskimääräisellä leveydellä. Tulokset tästä on esitetty taulukossa 6.16.

**Taulukko 6.16.** Parametrien osuus jakauman leveyden arvossa. Leveyden keskiarvo oli 2.428 K.

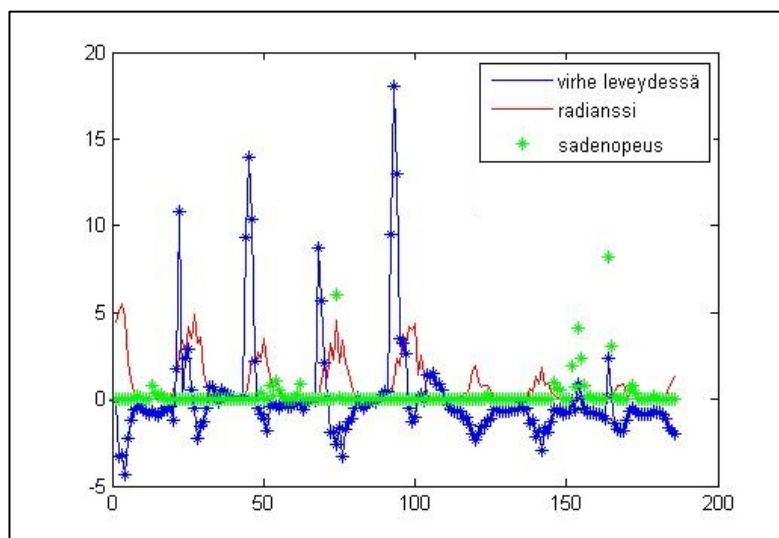
	$T$	$\tilde{W}$	$\tilde{S}$
parametrin keskiarvo	282.7 K	83.74 W/m <sup>2</sup>	0.2058 mm/h
absoluuttinen osuus	1.536 K	0.9731 K	-0.08492 K
suhteellinen osuus	63 %	40 %	(-)3.5 %

Leveyden itseisarvoon, toisin kuin leveyden rajoihin, vaikuttaa ilman lämpötilan lisäksi merkittävästi irradianssi. Tämä oli odotettavissa: päiväsaikaan auringon paistaessa metsä on lämpimämpi, mikä tarkoittaa suurempaa lämpötilavarianssin mahdollisuutta metsässä. Yöaikaan lämmittävää tekijää ei ollut, joten pinnat alkoivat jäähtyä saman lämpöiseksi. Sateen osuus jäi mallissa lähes merkityksettömäksi.

## 6.5 Mallin kehitysideoita

Edellä selviteltiin, auttaako ajan jättäminen pois malliyhtälön parametrien joukosta tai hetkellisen irradianssin ja sadenopeuden vaihtaminen edellisen puolen tunnin keskiarvoksi. Kumpikaan näistä ei tuonut merkittävää muutosta. Kuva 6.13 on mallin 3 levey-

den itseisarvon virhe. Kuvan alkuosassa on syyskuun alun virheitä ja loppuosassa syyskuun lopun virheitä.



**Kuva 6.13.** Mallin 3 leveyden itseisarvon sisäinen virhe. Virheen yksikkö on Kelvin, irradianssin  $10^2 \text{ W/m}^2$  ja sadenopeuden mm/h.

Kuten kuvasta havaitaan, mallissa oli kahdeksan todella suurta, jopa yli kymmenen asteen virhettä. Koska virheet olivat positiivisia, mallinnetut lämpötilat olivat liian pieniä. Kyseisinä ajankohtina eli aamupäivinä jakaumien leveyden itseisarvot olivat suuria, 10 - 15 K. Näinä ajanhetkinä aurinko paistoi lähes kameran kuvaussuunnan mukaisesti, mikä aiheutti lehvästön ja erityisesti runkojen nopean lämpenemisen, kuten luvussa 5 todettiin. Malli ennusti leveydeksi vain noin 2 K, mikä tarkoitti, että lineaarinen malli ei pysynyt mukana näin jyrkissä lämpötilojen muutoksissa. Saman ilmiön havaitsivat myös de Vries et al. [26]. Edellä mainitut virheet tapahtuivat syyskuun alussa. Syyskuun lopussa jakaumien leveydet olivat pieniä aamupäivälläkin. Syyksi runkojen lämpiämisen puuttumiseen arveltiin, että syyskuun lopussa metsä oli ollut märkää, taivas oli paksussa pilvessä tai aurinko oli paistanut matalalta. Kuten edellisestä kuvasta havaitaan, sekä syyskuun alussa että lopussa satoi. Edellisen puolen tunnin sadenopeuksien keskiarvoissa ei juuri näy eroa. Tämä aiheutti epäilyksen, että sadenopeuden sijasta tulisi tarkastella selittävänä tekijänä kertynyttä sademäärää. Mallia varten tulisi siis selvittää, miten pitkältä ajanjaksolta kertynyt sademäärä on hyvä malliyhtälön parametri. Samoin voi harkita irradianssin eli tehon sijasta varastoitunutta energiaa. Käytetäänpä sitten tehoa tai energiaa, myös tässä tapauksessa tulee selvittää, miten pitkä historia parametrisuurelle tarvitaan, jotta se toimii selittävänä tekijänä mallinnettavalle suurelle.

Toisaalta, ongelman perimmäinen syy voi olla siinä, että malli ei ota huomioon auringon kiertoa. Auringon kierto voidaan havaita kellonajasta: tunnin muutos tarkoittaa  $360^\circ / 24 = 15^\circ$  muutosta kulmassa. Talviaikaan aurinko paistaa puolen päivän aikoihin suoraan etelästä. Oletettavasti jakauman leveyden maksimi vuorokauden aikana riippuu siitä, missä vaiheessa aurinko alkaa tehokkaasti lämmittää kuvattavaa aluetta, kuten luvussa 5 jo todettiin. Jakauman leveyden voidaan ajatella olevan suurimmillaan eteläs-

tä kuvattuna keskipäivän aikaan tai sen jälkeen, jolloin irradianssikin on suurimmillaan. Mikäli kuvataan jostain muusta suunnasta kuin etelästä, jakauman leveyden maksimi saavutetaan ajanhetkenä, jolloin ilman lämpötila ja irradianssi eivät ole vielä suurimmillaan. Tämä saattoi olla osittain syynä siihen, miksi vastakkaisesta suunnasta kuvatun datan ennustaminen ei onnistunut kovin hyvin. Tämä ongelmatilanne voidaan ratkaista ottamalla malliin mukaan uusi tekijä, joka kertoo auringon ja kuvaussuunnan välisen kulman. Ilmiön tutkimista varten tulee tehdä vuorokausikuvauksia samasta metsäalueesta eri suunnista. Aina ei kuitenkaan ole mahdollista kuvata juuri samaa metsäaluetta useammasta suunnasta. Tämä ongelma voidaan ratkaista olettamalla, että lähellä toisiinsa olevat metsät ovat samaa metsää, jolloin voidaan kuvata samasta paikasta eri suuntiin. Malliin voi olla hyödyllistä lisätä myös tieto auringon korkeudesta sekä auringon irradianssista, mallissa jo käytetyn koko taivaan irradianssin sijasta.

## 6.6 Spatiaalisen vaihtelun lisääminen malliin helikopterikuvausten avulla

Edellä on keskitytty lämpökameran vuorokausikuvauksiin. Kuvaamalla yhtä metsää ei voida tehdä yleistyksiä kaikkien metsien lämpötilakäyttäytymisestä. Metsät voidaan jaotella esimerkiksi lehtimetsiin, havumetsiin ja sekametsiin ja tästä edelleen metsän tiheyden mukaan esimerkiksi kolmeen luokkaan, mikä on tavallista sotilaallisissa tarkoituksissa. Näin saadaan yhdeksän eri metsätyyppiä. Kuitenkin yhden metsätyypin sisällä voi esiintyä vaihtelua esimerkiksi riippuen puulajeista tai puiden pituudesta tai paksuudesta tai muusta tekijästä, jota ei ole osattu ottaa huomioon. Nämä erot ovat spatiaalisia. Niiden sisällyttämiseksi malliin tarvitaan useita vuorokausikuvauksia eri metsistä, jotka ovat kaukana toisistaan. Tämä voi olla hidasta ja hankalaa. Eräs tapa nopeuttaa datan keruuta on kuvata metsiä helikopterista lämpökameroilla. Näin saadaan kerättyä nopeasti tietoa spatiaalisesta vaihtelusta. Näitäkin kuvauksia varten täytyy saada talteen samat sääparametrit kuin vuorokausikuvauksissa. Helikopterikuvauksien ongelmana tosin on, että esimerkiksi ilman lämpötila tai varsinkin näkyvyys voivat olla erilaiset maan pinnalla kuin helikopterin ja maaston väliin jäävässä ilmakehässä. Koska sääasemia ei saada helikopterin kyytiin, eikä ainakaan puoliväliin helikopteria ja maata, mikä olisi ihan teellistä, täytyy helikopterikuvauksissa olettaa, että sääparametrit maan pinnalla vastaavat riittävän hyvin parametreja hieman korkeammalla ilmakehässä. Tällöin lennot on hyvä suorittaa mahdollisimman suppealla alueella sääasemien läheisyydessä.

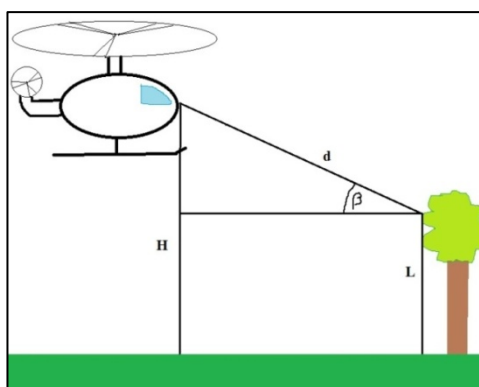
Kun kohdetta katsotaan eri pystykulmista, lämpötilojen varianssi vaihtelee, kuten Ballard et al. [19] ovat todenneet. Tämä johtuu luonnollisesti siitä, että aurinko aiheuttaa erilaisia valo-varjo -kontrasteja eri suunnista, jolloin lämpötilaeroja syntyy eri määriin. Osittain ilmiössä voi olla mukana erilaiset heijastukset pinnasta katsottaessa eri kulmista. Osittain syy voi myös johtua emissiivisyyden eroista kohteen eri osissa. Jotta tämä ilmiö ei sotke jakauman leveyden mallintamista, tulee taustanäytteitä kuvata samassa kulmassa. Kuten kuvat 3.4 ja 3.6 osoittivat, tornikuvausten pystykulma on lähes nolla. Helikopterit eivät voi välttämättä lentää yhtä matalalla, joten niistä saatetaan saa-



da kuvamateriaalia eri pystykulmassa. Jos kulma ei ole ihanteellinen nolla, tulisi kehittää malli, jolla yhdestä kulmasta kuvattu materiaali saadaan vastaamaan toisesta kulmasta kuvattua. Mallia varten tulisi kuvata useita taustoja eri kulmista ja näiden avulla päätellä kulman muutoksen vaikutus. Tällaista mallia ei välttämättä ole mahdollista rakentaa. Voidaan vaihtoehtoisesti tutkia, miten paljon kulman todellinen suuruus saa muuttua, jotta sen voidaan vielä katsoa olevan vakio. Jos kulmaa ei saada nolaksi tai riittävän lähelle sitä, ei kerättyä dataa välttämättä kannata yrittää saada mukaan edellisessä luvussa kuvattuihin malleihin, vaan sille voisi tehdä oman mallin. Joka tapauksessa kulman helikopterista tulee olla sama koko kuvauksen ajan ja myös muilla kuvauskerroilla. Seuraavaksi pohditaan konkreettisia tapoja mitata pystysuora kuvauskulma helikopterilennolta.

Eräs tapa mitata kuvauskulma on kuvan 6.14 kaltainen. Tässä tavassa mitataan helikopterin (eli kameran) korkeus  $H$  maasta, etäisyys kuvattavaan kohteeseen  $d$  sekä kuvattavan kohteen korkeus maan pinnasta  $L$ . Helikopteriin tarvitaan siis kaksi etäisyysmittaria. Tällöin saadaan kuvauskulmaksi  $\beta$  horisontin suhteen

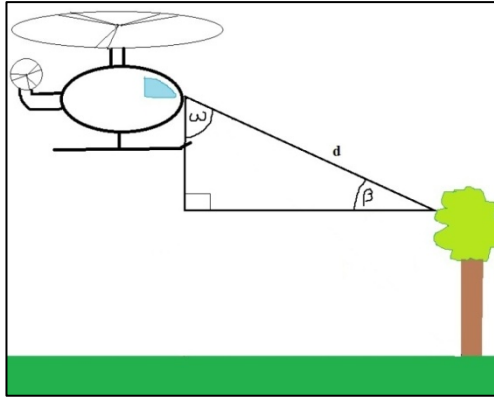
$$\beta = \sin^{-1} \frac{H-L}{d}. \quad (6.3)$$



**Kuva 6.14.** Yksi tapa määrittää kuvauskulma helikopterikuvauksissa, kun näytealue on puiden latvusto.

Tämä tapa edellyttää mahdollisuutta mitata tai arvioida jokaisen latvustoalueen korkeus.

Etäisyysmittarin puutteesta huolimatta kulma voidaan mitata toisellakin tavalla. Tässä tavassa kameran kulma  $\omega$  maahan nähden on pidettävä vakiona ja kopterin lennettävä suoraan. Näytealue on saatava aina keskelle kameran kuvaa, esimerkiksi ottamalla näytteet samalta etäisyydeltä  $d$  (kuva 6.15). Etäisyys pidetään silmämääräisesti samana näytteisiin nähden.



**Kuva 6.15.** Kuvauskulman määrittäminen ilman etäisyysmittareita. Kulman  $\omega$  on oltava vakio koko kuvausten ajan ja kohteen kameran kuvan keskellä.

Koska kameran kulma  $\omega$  voidaan mitata, saadaan pystysuoraksi kuvauskulmaksi

$$\beta = 180^\circ - 90^\circ - \omega. \quad (6.4)$$

Käytännössä voi olla vaikeaa saada lennon aikana tutkittavat näytealueet aina samaan kohtaan kuvaa. Koska tämä tapa on helppo ja nopea, sitä voidaan käyttää olettaen, että näytealueet on kuvattu riittävän tarkasti samassa kulmassa.

Myös helikopterilennolla täytyy tietää kameran ilmansuunta näytteeseen nähden, jotta voidaan määrittää auringon kiertokulma. Jos sekä auringon kiertokulmaan että pystysuoraan kuvauskulmaan liittyvät ongelmat saadaan ratkaistua, eri näytteiden jakaumien varianssien voidaan katsoa johtuvan spatiaalisesta vaihtelusta. Mikäli vaihtelu osoittautuu hyvin pieneksi, voidaan tehdä yksi malliyhtälö ennustamaan jakaumien ominaisuuksia. Mikäli vaihtelu on merkittävää, voidaan jokaista spatiaalista aluetta kohti tehdä yksi malli.

## 7 YHTEENVETO JA TÄRKEIMMÄT JATKO-TOIMENPITEET

Tämän diplomityön tavoitteena oli kehittää menetelmä mallintaa metsän lämpötilajakauma, missä ylin ja alin lämpötila kuvataan lineaarisen monimuuttujamallin avulla kuvausolosuhteiden funktiona. Tätä varten työn aikana tehtiin MatLabilla analyysiohjelma, joka hakee lämpökamerakuvasta näytealueen lämpötilajakauman keskilämpötilan ja jakautuman, sekä sovittaa siihen kolme Gaussin jakaumaa. Analyysiohjelman tärkein jatkokehitysehdotus on tapa tunnistaa epäonnistuneet sovitukset. Mikäli ohjelma onnistuisi tunnistamaan nämä, se voisi edelleen pyytää käyttäjältä uudet alkuarvot epäonnistuneelle sovitukselle. Jos halutaan mallintaa tarkasti myös jakaumien keskiosia (mikä tässä työssä ei ollut lainkaan tärkeää), voitaisiin esimerkiksi lisätä keskelle uusia Gauss-sovituksia, jotka vähennetään tai lisätään ensimmäiseen sovitukseen. Toinen tapa on kokeilla multipeak-sovitusta eli sovitetaan samanaikaisesti useaa Gauss-sovitusta. Ennen kuin tehdään matemaattista mallia Gauss-sovitusten parametreille eri olosuhteissa, ohjelmaan kannattaa tehdä lisäys, joka normeeraa yhteissovituksia.

Työssä selvitettiin millainen voisi olla matemaattinen malli taustan lämpöherätejakaumien alimmalle ja ylimmälle lämpötilalle. Todettiin, että ilman hetkellinen lämpötila on käyttökelpoinen parametri lineaariseen malliin. Taivaan irradianssi ja sade vaikuttavat lupaavilta suureilta myös, kunhan saadaan selville, miten pitkälle niiden historiaa tulee ottaa mukaan parhaiden tulosten saamiseksi. Malliin tulisi lisätä parametri, joka ottaa huomioon kameran kuvaussuunnan ja auringon välisen kiertokulman. Jakaumien leveyksien mallintamisessa oletettiin, että yhden asteen virhe on hyväksyttävä. Tulisi selvittää, onko tämän suuruisen virheen hyväksyntä sopiva kätkemistarkoitusta varten. Työssä myös pohdittiin, miten helikopterilämpökamerakuvausten avulla saadaan kerättyä tietoa maastojen spatiaalisesta vaihtelusta.

Kun aikanaan saadaan mallit kehitettyä riittävän hyväksi kuvaamaan metsän lämpötilajakauman vaihtelua eri olosuhteissa, on kaksi vaihtoehtoa sille, miten malleilla ennustetaan leveys. Voidaan tehdä mallit jokaiselle kuvaussuunnalle, jolloin leveyttä ennustettaessa tulee tietää katselusuunta, ja käyttää tämän suunnan mallia leveyden ennustamiseksi. Toinen vaihtoehto on olettaa, että suunta voi olla mikä tahansa, jolloin valitaan eri katselusuuntien ennustettujen leveyksien arvojen joukko-opillinen leikkaus.

Metsän lisäksi on paljon muitakin maastoja, joita on tarve hyödyntää kätkemisessä, kuten pellot, metsäaukiot, hiekka-alueet ja rakennettu ympäristö. Osa maastoista on edellisten yhdistelmiä. Näitä maastoja voidaan lähtökohtaisesti kuvata, analysoida ja mallintaa samoin kuin tässä diplomityössä tehtiin metsälle. Näin ollen diplomityö onnis-

tui hyvin tarkoituksessaan, joka oli pohjan luominen lämpökameran kuvaaman maaston herätteiden mallin rakentamiselle.

## LÄHTEET

- [1] Lämpösäteily ja infrapuna [WWW]. Infradex Oy. [viitattu 31.8.2012]. Saatavissa: <http://www.infradex.com/teoria.html>.
- [2] What is infrared [WWW]. Professional Thermographers Association. [viitattu 4.9.2012]. Saatavissa: [http://www.prothermographer.com/what\\_is\\_infrared.htm](http://www.prothermographer.com/what_is_infrared.htm).
- [3] Jacobs, P.A. Thermal infrared characterization of ground targets and backgrounds. 2<sup>nd</sup> ed. Bellingham, Washington, USA, 2006, SPIE - The International Society for Optical Engineering. 183 p.
- [4] ThermoVision® SC6000/SC4000 Researcher package, User's manual. Version 130. 2006, Flir Systems, Inc., Indigo Operations.
- [5] Ilmakehän vaikutus sähkömagneettiseen säteilyyn [WWW]. [viitattu 8.11.2012]. Saatavissa: [http://foto.hut.fi/~markus/Mrs/Sva/sm\\_ilmakeha.html](http://foto.hut.fi/~markus/Mrs/Sva/sm_ilmakeha.html).
- [6] Naboulsi, A., Sizun, H., de Fornel, F. Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere [WWW]. URSI – Union Radio\_Scientific Internationale. [viitattu 9.11.2012]. Saatavissa: [http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/F01P.7\(01729\).pdf](http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/F01P.7(01729).pdf).
- [7] Sipilä, M. Tuulivoimaloiden vaikutus valvontasensoreihin [verkkodokumentti]. 2011, VTT. [viitattu 9.11.2012]. Saatavissa: [http://www.vtt.fi/files/news/2011/tuulivaikutus\\_IP-vaikutukset.pdf](http://www.vtt.fi/files/news/2011/tuulivaikutus_IP-vaikutukset.pdf).
- [8] John Tyndall [WWW]. NASA Earth Observatory. [viitattu 8.11.2012]. Saatavissa: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Tyndall/>.
- [9] Infrared cameras: how they work [WWW]. IEC Infrared Systems. [viitattu 5.9.2012]. Saatavissa: <http://www.iecinfrared.com/how-infrared-cameras-work.html>.
- [10] How thermal imaging works [WWW]. Veterinary Thermal Imaging Limited. 2012. [viitattu 5.9.2012]. Saatavissa: <http://www.veterinary-thermal-imaging.com/veterinary-thermography-and-animal-thermal-imaging/how-thermal-imaging-works>.
- [11] Lämpökameran toiminta [WWW]. Infradex Oy. [viitattu 3.9.2012]. Saatavissa: <http://www.infradex.com/kuinka.html>.

- [12] Sprafke, T., Beletic, J. W. High-performance infrared focal plane arrays for space applications [verkkolehti]. *OPN Optics & Photonics News* 19(2008)6, pp. 22-27. 6. [viitattu 5.9.2012]. Saatavissa: [http://www.ee.ucla.edu/~leosla/documents/James\\_Beletic\\_OPN.pdf](http://www.ee.ucla.edu/~leosla/documents/James_Beletic_OPN.pdf).
- [13] Bois, P. Quantum well infrared detectors. [verkkodokumentti] Onera – the French Aerospace Lab [viitattu 30.11.2012] Saatavissa: <http://www.onera.fr/scientific-events/jubilee-rosencher-2011/pdfs/PhilippeBois.pdf>.
- [14] How thermal imaging technology works [WWW]. Morovision. [viitattu 3.9.2012]. Saatavissa: [http://www.morovision.com/how\\_thermal\\_imaging\\_works.htm](http://www.morovision.com/how_thermal_imaging_works.htm).
- [15] Choi, K. K. The physics of quantum well infrared photodetectors [verkkodokumentti]. World Scientific, p.1. [viitattu 10.8.2012]. Saatavissa: [http://worldscientific.com/doi/suppl/10.1142/3291/suppl\\_file/3291\\_chap01.pdf](http://worldscientific.com/doi/suppl/10.1142/3291/suppl_file/3291_chap01.pdf).
- [16] Thermal analysis for today's complex designs [WWW]. Compix Incorporated, 2010. [viitattu 5.9.2012]. Saatavissa: <http://www.compix.com/articles.npconint.html>.
- [17] Fever screening [WWW]. Compix Incorporated, 2010. [viitattu 5.9.2012]. Saatavissa: <http://www.compix.com/feverscreening.htm>.
- [18] ThermoVision® 900 series, User's Manual 1. 1st ed. 1994, AGEMA Infrared Systems AB.
- [19] Ballard Jr., J.R., Berry, T. E., Leese, D. L. & Anderson, S. C. High temporal and spatial thermal infrared characterization of dense grass during high humidity conditions. In: Watkins, W., R., Clement, D. & Reynolds, W., R. (ed). *Targets and background X: characterization and representation*. Proceedings of SPIE Volume: 5431. Orlando, Florida, USA 2004, SPIE - The International Society for Optical Engineering. pp. 117-125.
- [20] Rivera, S., Jr. Analysis of thermal imagery collected at Yuma 1, Yuma, Arizona. Vicksburg, MS 1994, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Saatavissa: National Technical Information Service, 5285 Port Royal, Springfield, VA 22161. 89 s.
- [21] Kuttikkad, S., Chellappa, R. Non-Gaussian CFAR techniques for target detection in high resolution SAR images [verkkodokumentti]. *Image Processing, 1994. Proceedings. ICIP-94., IEEE International Conference, Austin, TX, 13-16.11.1994*. Vol. 1. pp. 910-914. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=413444>.

[22] Characteristics of the Weibull distribution [WWW]. Reliability HotWire. ReliaSoft Corporation. Issue 14. 4/2002. [viitattu 29.8.2012]. Saatavissa: <http://www.weibull.com/hotwire/issue14/relbasics14.htm>.

[23] Wachowiak M. P., Smolikova R., Zurada J. M., Elmaghraby A. S. Estimation of K distribution parameters using neural networks [verkkodokumentti]. CiteSeerX 2002. [viitattu 29.11.2012]. Saatavissa: <http://ci.louisville.edu/zurada/publications/wachowiak.tbme.2002.pdf>.

[24] Holbo, H. R. & Luvall, J. C. Modeling surface temperature distributions in forest landscapes [verkkodokumentti]. [viitattu 2.10.2012]. Saatavissa: <http://andrewsforest.oregonstate.edu/pubs/pdf/pub966.pdf>.

[25] Wollenweber, F. G. Weather impact on background temperatures as predicted by an IR-background model. In: Triplett, M. J., Watkins, W. R., Zegel, F. H. Characterization, Propagation and Simulation of Infrared Scenes. Vol. 1311. 1990, SPIE - The International Society for Optical Engineering pp. 119-128. (saatavissa: [http://spie.org/x648.html?product\\_id=21826](http://spie.org/x648.html?product_id=21826))

[26] de Vries, J. S, Lensen, H. A., Maas, A. J. Thermal image sequences for natural background modeling [verkkodokumentti]. [viitattu 12.12.2012]. Saatavissa: [http://spie.org/x648.html?product\\_id=160543](http://spie.org/x648.html?product_id=160543).

[27] Lokki, O. Tutkimustulosten tilastollinen hallinta ja käyttö. Helsinki 1980, Insinööri-tieto Oy. 591 s.

[28] Sturges' rule [WWW]. Vose Software. 2007 [viivattu 31.10.2012]. Saatavissa: [http://www.vosesoftware.com/ModelRiskHelp/index.htm#Presenting\\_results/Histogram\\_plots/Sturges\\_rule.htm](http://www.vosesoftware.com/ModelRiskHelp/index.htm#Presenting_results/Histogram_plots/Sturges_rule.htm).

[29] Shimazaki, H., Shinomoto, S. A method for selecting the bin size of a time histogram [verkkodokumentti]. 2007 [viitattu 28.8.2012]. Saatavissa: [http://176.32.89.45/~hideaki/res/pdf/shimazaki\\_neco07.pdf](http://176.32.89.45/~hideaki/res/pdf/shimazaki_neco07.pdf).

[30] Weather sensor FD12P User's guide. 2002, Vaisala.

## JULKAISEMATON LÄHDE

[31] Kaurila, T., Raerinne, P. ATRAIN-projektin loppuraportti: Aerosolien aiheuttama säteilyn etenemisvaimennus Suomen olosuhteissa. Ylöjärvi 2007, Puolustusvoimien teknillinen tutkimuslaitos PVTT. Julkaisematon sisäinen tutkimusraportti, saatavilla PVTT:ltä pyydettyäessä. 52s.