

Pro gradu -tutkielma

Maantiede

Luonnonmaantiede

## **Helsingin lämpösaareke ajallisena ja paikallisena ilmiönä**

Achim J. Drebs

2011

Ohjaajat:

Olli Ruth, FT, maantiede

Elena Saltikoff, FT, meteorologia (Ilmatieteen laitos)

HELSINGIN YLIOPISTO  
GEOTIETEEN JA MAANTIETEEN LAITOS

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)

00014 Helsingin yliopisto



|   |  |   |   |
|---|--|---|---|
| Tiedekunta/Osasto – Fakultet/Sektion – Faculty/Section<br>Matemaattis-luonnontieteellinen   |  | Laitos – Institution – Department<br>Geotieteen ja maantieteen laitos |   |
| Tekijä – Författare – Author<br>Achim J. Drebs  |  |   |   |
| Työn nimi – Arbetets titel – Title<br>Helsingin lämpösaareke ajallisena ja paikallisena ilmiönä   |  |   |   |
| Oppiaine – Läroämne – Subject<br>Maantiede - luonnonmaantiede   |  |   |   |
| Työn laji – Arbetets art – Level<br>Pro gradu -tutkielma  |  | Aika – Datum – Month and year<br>Lokakuu 2011                         | Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages<br>79 |
| Tiivistelmä – Referat – Abstract  |  |   |   |
| <p>Kaupungin lämpösaarekeilmiö on tunnetuin ympärivuotinen kaupunki-ilmastoilmiö. Sen synnyttää kesällä päivisin auringosta tuleva lyhytaaltainen energiasäteily ja talvella ympärivuorokautinen antropogeeninen, ihmisten aiheuttama, energiantuotanto. Kesällä kaupungin rakennusmateriaalien lämpöominaisuudet määräävät, miten paljon energiaa varastoituu, kuinka pitkälle energiaa johtuu ja kuinka paljon energiaa pääsee materiaalin läpi. Vastaavasti rakennukset ja maanpinta luovuttavat päivällä varastoidun energian yöllä takaisin ilmakehään. Talvella rakennusten lämmitys ja liikenne tuottavat energiaa ilmakehään.</p> <p>Ensimmäisissä Helsinkiä käsittelevissä kaupunki-ilmastotutkimuksissa keskityttiin esittelemään tilanteita, joissa esiintyi ääreviä ilman lämpötiloja (Fogelberg 1973, Alestalo 1975). Tässä tutkimuksessa oli tavoitteena suorittaa laajalla alueella niin paljon mittauksia, että niiden perusteella on mahdollista arvioida Helsingin kaupungin lämpösaarekkeen ilmenemistä pitkällä aikavälillä. Helsingin kaupungissa on noin 550 000 asukasta ja sijaitsee Suomenlahden pohjoisrannalla. Alustavilla tutkimuksilla selvitettiin kuinka edustava Helsingin lämpösaareketutkimus voisi olla, jos mittauksia suoritettaisiin vain kerran viikossa.</p> <p>Mittaukset suunniteltiin siten, että ne kattoivat 12 kuukauden aikana heinäkuusta 2009 kesäkuuhun 2010 kaikki vuodenajat Mittausmenetelmään kuului liikkuva alusta, joka kehitettiin noudattaen pienklimatologian mittauserinnettä. Mittauspäiväksi valittiin tiistai, joka oli ainoa viikonpäivä mittauskampanjan aikana, jolle ei osunut pyhä- tai vapaapäiviä. Lämpötiloiltaan heterogeenisessä Helsingin ydinkeskustassa suoritettiin kerran viikossa vuorokauden aikana kaksi mittausajoa eli 104 luotausajoa vuodessa, homogeenisemmissä esikaupungeissa vain joka toinen viikko. Luotausajot aloitettiin ennen keskipäivää ja ennen keskiyötä. Projektin referenssisääsamaksi valittiin Helsinki Kaisaniemen sääasema. Asema sijaitsee Kaisaniemen puistossa keskellä Helsingin ydinkeskustaa. Luotausreitien varrelle perustettiin 336 kiintopistettä, joiden avulla laskettiin jokaiselle kuukaudelle lämpötilaerotuksia kiintopisteen ja Kaisaniemen sääaseman välillä. Kuukausitietojen perusteella laskettiin myös 12 kuukautta kattava vuoden lämpötilaerotuskartta. Keskimääräiset lämpötilaerotukset interpoloitiin kriging-menetelmällä 100 metrin hilan resoluutiolla koko Helsingin kaupungin alueelle 38 191 hilapisteeseen. Selittävänä tausta-aineistona kriging-menetelmässä käytettiin paikan korkeutta merenpinnasta, merellisyyttä, puuston osuutta pinta-alasta, avoimuutta, rakennusten tilavuutta ja väestön tiheyttä. Oikean tausta-aineisto-yhdistelemän avulla interpoloitu kuukausilämpötilanerotuskartta esittää vaihtelevien sääolojen takia vain kunkin kuukauden lämpötilaerotusta. Vuoden yleistetyn kartan sen sijaan voidaan katsoa edustavan Helsingin pitkän ajan lämpösaarekeilmiötä.</p> <p>Tämän tutkimuksen keskeisiä tuloksia ovat: a) kaikissa kartoissa näkyy Helsingin ydinkeskustan lämpöylijäädä. Todella suuria lämpötilaeroja löytyy kuitenkin vain kourallisesta hilapisteistä. Vuoden lämpötilaerotuskartan 38 191 hilapisteestä vain 46:n lämpötilaerotus on suurempi kuin 1 K. b) Silloin kun koko hilakentän vaihtelu on pieni, myös ydinkeskustan vaihtelu on samassa suhteessa pieni. c) Yksittäiset isot rakennukset ja alakeskukset luovat selkeästi omia lämpösaarekkeita. Talvisin (marraskuu 2009 - maaliskuu 2010) lämpötilan jakauman ollessa tasainen koko tutkimusalueella myöskin alakeskusten paikallinen lämpösaareke heikkenee. d) Kuukausikartoissa topografian vaikutus jäi heikoksi. Yksittäisissä säätilanteissa topografia on kuitenkin suurin jäähdyttävä tekijä.</p> |  |   |   |
| Avainsanat – Nyckelord – Keywords<br>Lämpösaareke, kaupunki-ilmasto, liikkuva mittausmenetelmä, Helsinki  |  |   |   |
| Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited<br>Kumpulan tiedekirjasto  |  |   |   |
| Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information   |  |   |   |

HELSINGIN YLIOPISTO – HELSINGFORS UNIVERSITET – UNIVERSITY OF HELSINKI

|  |  |  |   |
|--|--|--|---|
| Tiedekunta/Osasto – Fakultet/Sektion – Faculty/Section<br>Faculty of Science   |  | Laitos – Institution – Department<br>Department of Geosciences and Geography |   |
| Tekijä – Författare – Author<br>Achim J. Drebs   |  |  |   |
| Työn nimi – Arbetets titel – Title<br>Helsinki urban heat island as temporal and spatial phenomena (Helsingin lämpösaareke ajallisena ja paikallisena ilmiönä)   |  |  |   |
| Oppiaine – Läroämne – Subject<br>Geography - physical geography  |  |  |   |
| Työn laji – Arbetets art – Level<br>Master thesis  |  | Aika – Datum – Month and year<br>October 2011                                | Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages<br>79 |
| Tiivistelmä – Referat – Abstract<br><p>The urban heat island phenomenon is the most well-known all-year-round urban climate phenomenon. It occurs in summer during the daytime due to the short-wave radiation from the sun and in wintertime, through anthropogenic heat production. In summertime, the properties of the fabric of city buildings determine how much energy is stored, conducted and transmitted through the material. During night-time, when there is no incoming short-wave radiation, all fabrics of the city release the energy in form of heat back to the urban atmosphere. In wintertime anthropogenic heating of buildings and traffic deliver energy into the urban atmosphere.</p> <p>The initial focus of Helsinki urban heat island was on the description of the intensity of the urban heat island (Fogelberg 1973, Alestalo 1975). In this project our goal was to carry out as many measurements as possible over a large area of Helsinki to give a long term estimate of the Helsinki urban heat island. Helsinki is a city with 550 000 inhabitants and located on the north shore of Finnish Bay of the Baltic Sea. Initially, comparison studies against long-term weather station records showed that our regular, but weekly, sampling of observations adequately describe the Helsinki urban heat island.</p> <p>The project covered an entire seasonal cycle over the 12 months from July 2009 to June 2010. The measurements were conducted using a moving platform following microclimatological traditions. Tuesday was selected as the measuring day because it was the only weekday during the one year time span without any public holidays. Once a week, two set of measurements, in total 104, were conducted in the heterogeneous temperature conditions of Helsinki city centre. In the more homogeneous suburban areas, one set of measurements was taken every second week, to give a total of 52. The first set of measurements took place before noon, and the second 12 hours, just prior to midnight. Helsinki Kaisaniemi weather station was chosen as the reference station. This weather station is located in a large park in the city centre of Helsinki. Along the measurement route, 336 fixed points were established, and the monthly air temperature differences to Kaisaniemi were calculated to produce monthly and annual maps.</p> <p>The monthly air temperature differences were interpolated 21.1 km by 18.1 km horizontal grid with 100 metre resolution residual kriging method. The following independent variables for the kriging interpolation method were used: topographical height, portion of sea area, portion of trees, fraction of built-up and not built-up area, volumes of buildings, and population density.</p> <p>The annual mean air temperature difference gives the best representation of the Helsinki urban heat island effect- Due to natural variability of weather conditions during the measurement campaign care must be taken when interpretation the results for the monthly values.</p> <p>The main results of this urban heat island research project are: a) The city centre of Helsinki is warmer than its surroundings, both on a monthly main basis, and for the annual mean, however, there are only a few grid points, 46 out of 38 191, which display a temperature difference of more than 1K. b) If the monthly spatial variation is air temperature differences is small, then usually the temperature difference between the city and the surroundings is also small. c) Isolated large buildings and suburban centres create their own individual heat island. d) The topographical influence on air temperature can generally be neglected for the monthly mean, but can be strong under certain weather conditions.</p> |  |  |   |
| Avainsanat – Nyckelord – Keywords<br>Urban heat island, urban climate, moving measurements, Helsinki   |  |  |   |
| Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited<br>Kumpula campus library   |  |  |   |
| Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information  |  |  |   |

## Sisällysluettelo

|   |    |
|---|----|
| 1. Johdanto   | 7  |
| 2. Kaupunki-ilmasto   | 9  |
| 2.1 Kaupunki-ilmaston määritelmä ja siihen vaikuttavat tekijät    | 9  |
| 2.2 Kaupunki-ilmaston tutkimuksen historia                        | 12 |
| 3. Tutkimusmenetelmät   | 16 |
| 3.1 Helsingin lämpösaarekemittaukset heinäkuu 2009 – kesäkuu 2010 | 17 |
| 3.1.1 Päiväluotaukset   | 20 |
| 3.1.2 Yöluotaukset  | 21 |
| 3.2 Luotausreitit   | 21 |
| 3.2.1 Helsingin keskustan luotausreitti                           | 22 |
| 3.2.2 Helsingin esikaupungin luotausreitti                        | 23 |
| 3.2.3 Kiintopisteet   | 25 |
| 3.3 Luotausauto   | 27 |
| 3.4 Luotauslaitteet   | 28 |
| 3.4.1 Thiesin psykrometri   | 28 |
| 3.4.2 Vaisalan Humicap HMP45A, DTR 502 -säteilysuoja              | 29 |
| 3.4.3 GPS-vastaanotin   | 30 |
| 3.4.4 Dataloggeri   | 30 |
| 3.5 Luotautietojen käsittely                                      | 31 |
| 3.5.1 Dataloggerin .cvs-tiedosto                                  | 33 |
| 3.5.2 TurboBasic-ohjelmat   | 33 |
| 3.5.3 Tilastollinen tarkastelu                                    | 33 |
| 3.5.4 Kriging-interpolointimenetelmä                              | 33 |
| 3.5.5 Graafinen esitys ArcGIS®-ohjelmistolla                      | 35 |
| 4. Tausta-aineistot   | 35 |
| 4.1 Topografinen korkeusaineisto                                  | 36 |
| 4.2 Merellisyys   | 37 |
| 4.3 Puuston osuus   | 38 |
| 4.4 Avoimuus  | 38 |
| 4.5 Rakennusten tilavuus  | 38 |
| 4.6 Väestötiheys  | 39 |
| 5. Tulosten tarkastelu  | 39 |
| 5.1 Tausta-aineistojen tilastollinen tarkastelu                   | 39 |
| 5.2 Tausta-aineistojen vaikutuksesta interpolointiin              | 41 |
| 5.3 Luotausten tarkastelu   | 42 |
| 5.3.1 Heinäkuun 2009 luotaukset                                   | 44 |
| 5.3.2 Elokuun 2009 luotaukset                                     | 46 |
| 5.3.3 Syyskuun 2009 luotaukset                                    | 48 |
| 5.3.4 Lokakuun 2009 luotaukset                                    | 50 |
| 5.3.5 Marraskuun 2009 luotaukset                                  | 52 |
| 5.3.6 Joulukuun 2009 luotaukset                                   | 54 |
| 5.3.7 Tammikuun 2010 luotaukset                                   | 56 |
| 5.3.8 Helmikuun 2010 luotaukset                                   | 58 |
| 5.3.9 Maaliskuun 2010 luotaukset                                  | 60 |
| 5.3.10 Huhtikuun 2010 luotaukset                                  | 62 |

|   |        |
|---|--------|
| 5.3.11 Toukokuun 2010 luotaukset  | ... 64 |
| 5.3.12 Kesäkuun 2010 luotaukset   | ... 66 |
| 5.3.13 Heinäkuu 2009 – kesäkuu 2010 keskiarvokartta   | ... 68 |
| 6. Johtopäätökset   | ... 70 |
| Kiitokset   | ... 72 |
| Lähteet   | ... 72 |
| Liitteet  | ... 76 |
| Liite 1: Helsingin kaupungin lämpösaarekkeen ääritapaus<br>15./16. syyskuuta 2009   | ... 76 |
| Liite 2: Lämpötilan interpoloinnin kiintopisteiden sijainnit luotausreitien<br>varrella kartalla, kartan taustana CORINE maankäyttöluokitus | ... 78 |

## 1. Johdanto

Maapallon väestön määrän kasvaessa kaupunkien ja kaupunkilaisten määrä on lisääntynyt. Yhdistyneiden kansakuntien alaisen taloutta ja yhteiskunnallisia asioita tutkivan osaston, UN Department of Economic and Social Affairs, Population Division (ESA), mukaan vuosien 2005 ja 2010 välillä ensimmäistä kertaa kaupungeissa asui enemmän ihmisiä kuin maaseuduilla. Vuoteen 2050 mennessä kaupungeissa asuvien ihmisten osuuden maailman väestöstä arvioidaan kasvavan 69 prosenttiin (UN ESA 2008).

Suomen vastaavat luvut kertovat, että jo vuonna 1970 yli puolet väestöstä asui kaupungissa ja vuoteen 2050 mennessä luku lähenee 80 prosenttia (UN ESA 2008). Kaupungin määritelmä vaihtelee eri maissa. Jakobsonin ja Prakashin (1974) luoma logaritminen luokitus sopii hyvin kuvaamaan erikokoisia kaupunkeja. Heidän luokittelunsa mukaan kymmenestä tuhannesta sataantuhanteen asukkaan asumiskeskittymiä kutsutaan kaupungiksi (town), sadastatuhannesta miljoonaan suurkaupungiksi (city), miljoonasta kymmenen miljoonaan metropoliksi ja suurempia megalopoliksi. Teollisuusmaissa muutto maaseudulta kaupunkeihin on hidastumassa. Suomalaiset kaupungit eivät kasva ainoastaan muuttovoiton ansiosta, vaan myös kuntaliitoksilla ja muilla hallinnollisilla ja poliittisilla toimenpiteillä. Uusille asukkaille on järjestettävä tiloja ja palveluja asumiselle, työnteolle ja vapaa-ajanvietoille. Suurimmissa suomalaisissa kaupungeissa on usein perinteinen muuttaman neliökilometrin kokoinen tiheästi rakennettu ydinkeskusta.

Kaupunki-ilmastotutkimuksessa pyritään selvittämään miten muutettu ympäristö vaikuttaa ilmakehän olosuhteisiin. Vertailukohteina ovat äsken mainitut tiheästi rakennetut kaupunkien ydinkeskustat ja niiden lähellä sijaitsevat avoimet maaseutumaiset rakentamattomat alueet. Erot kaupunki- ja maaseutuilmaston välillä ovat seuraus monesta meteorologisesta tekijästä, kuten ilmanpaineesta, ilman lämpötilasta, suhteellisesta kosteudesta, pilvisyydestä, tuulesta ja sadannasta. Tunnetuin ja selkein tapa kuvata kaupunki-ilmastoa on esittää ilman lämpötilaeroja kaupungin ja maaseudun välillä. Tällöin puhutaan lämpösaarekeilmiöstä. Myös tässä tutkimuksessa kaupungin lämpösaarekeilmiö on keskeisessä osassa.

Suomessa kaupungin keskusta on säilyttänyt perinteisen asemansa kaupallisena ja hallinnollisena keskuksena, vaikka suuremmat asukasmäärät asuvat esikaupungeissa tai kaupungin lähiössä. Myös osa työpaikoista ja palveluista sijaitsee kaupunkien keskustojen ulkopuolella. Kaupunkien kasvaessa keskustan ulkopuolella on rakennettu uusia alakeskuksia tai kehitetty esikaupunkien keskuksia, joiden tarkoitus on palvella asukkaita ydinkeskustan tavoin. Jotkin alakeskukset sijaitsevat hyvien lähiliikenteen yhteyksien ulottuvuudella, toiset

taas ovat pelkästään henkilöautolla saavutettavissa. Sen lisäksi useimpiin vapaa-ajanmatkoihin joudutaan käyttämään yksityisautoja. Ala- ja vapaa-ajankeskusten maankäyttö muistuttaa yhä enemmän kaupunkien ydinkeskuksia: suuria rakennuksia, päällystettyjä teitä ja parkkipaikkoja sekä vähän viheralueita. Niinpä myös kaupunki-ilmastotutkimuksessa täytyy huomioida nämä uudet alakeskukset. Keskusten välissä maankäyttö on varsin heterogeenista. Topografiassa ei Etelä-Suomessa juuri esiinny suuria korkeuseroja, mutta ei maanpinta kuitenkaan ole tasainen. Tästä syystä maanpinnan muodon ja sen ominaisuuksien vaikutus on myös otettava huomioon. Topografian mikroskaalan vaikutus ilman lämpötilaan on sekä lämpenevään että jäädyttävään suuntaan, että alueellisesti ilman lämpötilan keskiarvo voi olla tasapainoissa (Wolfe, Wareham, Scofield 1949 teoksessa Geiger 1961).

Paikoissa, joissa yksinkertainen vertailu kahden mittausaseman välillä ei enää riitä esittämään kaupungin ilmastoa sopivalla tarkkuudella, on kehitetty mittausmenetelmiä kahdella tavalla. Ensimmäiseksi on tihennetty mittausverkostoa väliaikaisilla kiinteillä mittauspisteillä. Jos tämä ei riittänyt, lisättiin mittauksia liikkuvilla alustoilla. Silloin, kun tilaa tai mahdollisuuksia perustaa kiinteitä havaintopisteitä ei ole, suoritetaan mittauksia liikkuvilla alustoilla ennalta määrättyä reitin pitkin. Tässä tutkimuksessa käytetty kaupunki-ilmaston tutkimusmenetelmä ei perustu pelkästään kahden mittauspisteen väliseen tarkasteluun, vaan laajempaan Helsinki Kaisaniemen ja ennalta määrättyjen 336 luotausreitin varrella olevan kiintopisteen lämpötilaerotukseen. Jokaiselta kiintopisteeltä on kerätty kuusi taustatietoa: korkeus merenpinnasta, avoimuus, puuston osuus, merellisyys, lähellä olevien rakennusten tilavuus ja väestön tiheys. Helsingin ylle muodostettiin 100 metrin jaolla hila, yhteensä 38 191 hilapistettä. Lähimpään 100 metrin hilapisteeseen yhdistettiin lämpötilahavainnot ja taustaineisto. Taustatietojen avulla ekstrapoloittiin mitattuja lämpötilaeroja koko Helsingin kaupungin maa-alueelle.

Tässä tutkimuksessa selvitetään lyhyesti kaupunki-ilmastontutkimusta sekä Suomessa että Euroopassa. Yksi syy siihen on, että oletetut tutkimustulokset ovat samansuuntaisia kuin aikaisimmin Suomessa tehdyissä kaupunki-ilmastontutkimuksissa. Toinen syy on, että Helsinki on eurooppalainen kaupunki ja on todennäköistä, että eurooppalainen tapa suunnitella ja rakentaa kaupunki vaikuttaa eri tavalla kaupunki-ilmastoon kuin esimerkiksi Yhdysvalloissa tai Aasiassa. Koska nykypäivän kaupunki-ilmastontutkimus on hyvin laaja-alaista, tämä tutkimus rajoittuu kuvaamaan vain Helsingin kaupungin alueella esiintyviä ilman lämpötilaeroja.

Ensimmäisissä Helsingissä liikkuvalla alustalla tehdyissä kaupunki-ilmastotutkimuksissa keskityttiin tuomaan esille äärevien ilman lämpötilojen tilanteita (Fogelberg 1973, Alestalo



1975). Omassa projektissani tavoitteena on, ettei esitellä pelkästään heikkotuulisten ja vähäpilvisten säätilanteiden aikaisia lämpötilaeroja, vaan suoritetaan niin paljon luotauksia, että ne niiden perusteella on mahdollista arvioida 550 000 asukkaan Suomenlahden pohjoisrannalla sijaitsevan Helsingin kaupungin lämpösaarekkeen ilmenemistä pidemmällä ajalla. Tutkimuksen esikuvana on toiminut Berliinin kaupungin ympäristöatlas-projekti Saksassa (ISU Berlin 2008).

Luotaukset suunniteltiin siten, että ne kattoivat 12 kuukauden aikana kaikki vuodenaajat. Tässä tutkimuksessa käytetty menetelmä on kehitetty perinteisten kaupunki-ilmastotutkimusmenetelmien pohjalta ja se on esitelty omassa luvussa. Tutkimusmenetelmäosuus on jaettu viiteen osaan: luotaukset, luotausreitit, luotausauto, laitteistot ja tietojenkäsittely. Tutkimuksen tausta-aineistoa käsitellään omassa luvussaan. Sen jälkeen tarkastellaan luotaustuloksia kuukausi- ja vuosikarttojen avulla. Vaikka käytettyä tutkimusmenetelmää on kehitetty, on kerätty myös perinteisiä mittaustuloksia. Yksi näistä luotaustuloksista esitellään liitteessä 1. Yhteenvedon ja johtopäätösten jälkeen esitän kiitokset tutkimuksen osallistuneille, koska tänä päivänä tutkimuksia ei enää tehdä yksin.

Tämän tutkimuksen tarkoitus on:

1. testata uudenlaista kaupunki-ilmastotutkimusmenetelmää,
2. tarkastella, miten erilaisia tausta-aineistoja voidaan käyttää kaupunki-ilmastotutkimuksessa ja
3. päätavoitteena on selvittää, millainen Helsingin kaupunkilämpösaareke on vuoden kestäneiden mittausten perusteella.

## 2. Kaupunki-ilmasto

### 2.1 Kaupunki-ilmaston määritelmä ja siihen vaikuttavat tekijät

Kaupunki-ilmastoksi määritellään yleensä ilmasto, joka poikkeaa huomattavasti sitä ympäröivän alueen ilmastosta ja joka on ihmisten aiheuttama ja nimenomaan kaupungin rakenteista syntynyt. Sen tunnetuin ilmiö on lämpösaarekeilmiö, jossa ilman lämpötila kaupungissa on merkittävästi kohonnut ympäröivään rakentamattomaan alueeseen verrattuna. Kaupunki-ilmasto on mesoskaalan ilmasto, eli sen vaikutusalue on yhdestä kilometristä sataan kilometriin. Kaupunki-ilmasto on laaja ja monimutkainen ilmiö, jossa eri energiasäteilykomponentit, tuuli, ilman lämpötila ja kosteus sekä ilman epäpuhtaudet

vaikuttavat vuorotellen toisiinsa (taulukko 1).

Lähtökohtana on päivällä auringosta tuleva lyhytaaltainen energiasäteily. Vaikka kaupunkien yllä olevan ilmakehän aerosolit pienentävät säteilyä maanpinnalla noin kymmenellä prosentilla, säteilyä on kuitenkin vielä niin paljon, että se imeytyy tehokkaasti

Taulukko 1: Keskileveysasteen suurkaupungin ilmastolle tyypilliset ominaisuudet (eri kirjoittajien mukaan, Hupferin ja Kuttlerin (1998) muodossa).

| <i>Vaikutussuure</i>   | <i>Muutos ympäröivään rakentamattomaan alueeseen nähden</i> | <i>Vaikutussuure</i>   | <i>Muutos ympäröivään rakentamattomaan alueeseen nähden</i> |
|--|---|--|---|
| Globaalisäteily  | -10% saakka   | Tuuli<br>- nopeus<br>- suuntaus<br>- puuskaisuus   | -20% saakka<br>suuri vaihtelu<br>lisääntyvän                |
| Albedo   | ±   | Ilmankosteus   | ±   |
| Ulossäteily  | +10% saakka   | Sumu<br>- suurkaupunki<br>- kaupunki   | vähemmän<br>enemmän   |
| UV-säteily<br>kesällä<br>talvella  | -5% saakka<br>-30% saakka                                   | Sadanta<br>- sade<br>- lumi<br>- kaste   | lisääntyvän (tuulen suojapuolella)<br>vähemmän<br>vähemmän  |
| Auringonpaiste<br>kesällä<br>talvella  | -8% saakka<br>-10% saakka                                   | Ilman epäpuhtaudet<br>- CO, NO <sub>x</sub> , AVOC <sup>1)</sup> , PAN <sup>2)</sup><br>- O <sub>3</sub> | enemmän<br>vähemmän   |
| Havaittava lämpövu   | +50% saakka   | Bioklima, kasvukausi   | <+10 päivää   |
| Lämmön varastointi maanpinnassa ja rakennuksissa                                   | +40% saakka   | Pakkaskausi  | <-30%   |
| Ilman lämpötila<br>- vuoden keskilämpötila<br>- talven minimi<br>- ääritapauksessa | ~ + 2 K<br>+10 K saakka<br>+15 K saakka                     | <sup>1)</sup> = antropogeeniset hiilivedyt<br><sup>2)</sup> = peroxiacetylnitraatti                      |   |

maahan ja rakennuksiin. Rakennusmateriaalien lämpöominaisuudet määräävät, miten paljon energiaa varastoituu, kuinka pitkälle energiaa johtuu ja kuinka paljon energiaa pääsee materiaalin läpi (taulukko 2). Vastaavasti rakennukset ja maanpinta luovuttavat yöllä päivällä varastoimansa energian takaisin ilmakehään. Lämpösaarekeilmiö on ympärivuotinen ilmiö, vaikka talvisin antropogeeninen energiantuotanto on suurempaa kuin kesällä ja korvaa näin ollen osan talvella puuttuvasta lyhytaaltoisesta energiansäteilystä. Taulukko 1 esittää suurkaupungin ilmaston monimuotoisuuden. Taulukosta on helppo havaita, kuinka mainitut meteorologiset elementit vaikuttavat toisiinsa. Taulukko on laadittu keskileveysasteiden suurkaupungille, koska laajaa kaupunki-ilmastontutkimusta ei ole vielä suoritettu korkean leveysasteen alueilla. Tässä tutkimuksessa käytetty suure ilman lämpötila on suoraan yhteydessä suoranaisesti kaikkien säteilysuureiden ja albedon kanssa.

Ilma on itse asiassa huono lämmönjohtoinen, jolla on hyvin alhainen lämmönjohtokyky (0,02623 W / (m \* K) 300 kelvinissä, Lienhard & Lienhard 2011). Tästä syystä ilma lämpenee parhaiten, kun se on kosketuksessa lämpimämpään väliaineeseen.

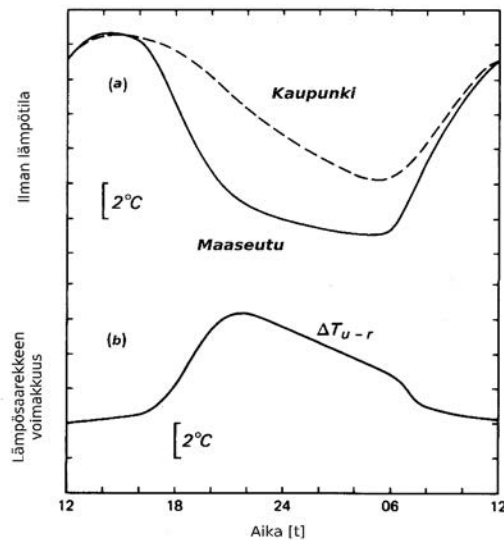
Taulukko 2: Muutamien rakennusmateriaalien tiheys, ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus ja diffuusiokerroin ilmaan verrattuna (wikipedia.de 2009 ja Lienhard & Lienhard 2011 mukaan).

|                   | Tiheys                          | Ominais-<br>lämpökapasiteetti                 | Lämmön-<br>johtavuus                             | Diffuusio-<br>kerroin                      |
|-------------------|---------------------------------|---|--|--|
| Yksikkö           | $[\rho]$ , $10^3 \text{kg/m}^3$ | $[cp]$ , $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ | $[\lambda]$ , $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $[\alpha]$ , $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ |
| <b>Ilma</b>       | 0,0013                          | 1.01  | 0.03   | 20,00                                      |
| <b>Graniitti</b>  | 2.75                            | 0.89  | 2,90   | 1.18                                       |
| <b>Betoni</b>     | 2,40                            | 0,88  | 2,10   | 0.54                                       |
| <b>Ikkunalasi</b> | 2.48                            | 0,70  | 1,10   | 0,50                                       |
| <b>Asfaltti</b>   | 2.12                            | 0.92  | 0,70   | 0.36                                       |
| <b>Tiiliskivi</b> | 2,00                            | 0.84  | 0,1-0,2  | 0,054                                      |
| <b>Puu, kuusi</b> | 0.41                            | 2.72  | 0.14   | 0.12                                       |

Lyhytaaltainen energiasäteily tunkeutuu kaupungeissa nopeammin ja syvemmälle suuremman lämmönjohto- ja lämmönvarastointikyvyn omaaviin rakennusmateriaaleihin kuten kattoihin ja teihin. Osa lyhytaaltoisesta energiasäteilystä heijastuu suoraan takaisin alailmakehään ja lämmittää ilmaa varastoimalla energian ilman molekyyliin. Kun lyhytaaltoisen energiasäteilyn tulo loppuu, ovat rakennukset, katot ja tiet ilmaa lämpimämpiä ja alkavat luovuttaa energiaa pitkäaaltoisena lämmönsäteilynä takaisin ympäröivään ilmaan.

Koska rakennusten ja teiden pintojen määrä on kaupungeissa moninkertainen rakentamattomaan ympäristöön verrattuna, myös varastoidun energian määrä on suurempi. Auringonlaskun jälkeen pinnat alkavat luovuttaa lämpönsä takaisin ilmaan. Ilma jäähtyy kaupungeissa hitaammin ja tasaisempi kuin maaseuduilla (kuva 1).

Kaupungin lämpösaarekkeen voimakkuus on suurimmillaan muutamaa tuntia auringonlaskun jälkeen. Myös ilmankosteus vaikuttaa ilman lämpötilaan. Veden haihtuessa ja tiivistyessä poistuu tai lisääntyy energia ilmassa. Haihtuminen kuluttaa lämpöä ilmasta ja tiivistäminen tuottaa lämpöä ilmaan. Veden suurin mahdollinen määrä ilmassa vaihtelee ilman lämpötilan mukaan. Mitä lämpimämpi ilma on, sitä enemmän vettä se voi sisältää. Vettä tulee yleensä sateella ja/tai kosteampien ilmanmassojen saapuessa. Myös puistot ja muut viheralueet haihduttavat vettä kaupunkien alempiin ilmakerroksiin. Kaupunkien kunnallistekniikka poistaa kuitenkin hyvin tehokkaasti sadevedet kaduilta. Siten haihdunnan aiheuttama ilman viilentymine on kaupungeissa vähäisempää kuin maaseuduilla. Tässä tutkimuksessa mitattiin myös ilmankosteus silloin, kun ilman lämpötila oli  $0\text{ }^\circ\text{C}$  yläpuolella. Ilmankosteus on kuitenkin vaikeasti hallittavissa oleva meteorologinen suure, joten se päätettiin jättää pois lopullisesti tarkastelusta.



Kuva 1: (a) Kaupungin ja maaseudun idealisoitu ilman lämpötilan vuorokautinen kulku ja (b) lämpösaarekkeen voimakkuus (Oken (1982) mukaan),  $\Delta T_{u-r}$  tarkoittaa lämpötilaero kaupungin (u) ja rakentamattomaan ympäristön (r) välillä.

Kaupunkien lämpösaarekkeen synnyttämä pilvisuus havaitaan useimmiten vain tuulen suojaisella puolella. Siten pilvet eivät viilennä kaupunki-ilmaa. Pilvien muodostuminen kuitenkin kertoo kaupungissa olevasta vertikaalisesta ilmanliikkeistä, koska ympäristöä lämpimämpi ilma on kevyempi kuin kylmempää maaseudun ilma ja siten pyrkii ylöspäin. Ylöspäin liikkuva ilma täytyy korvata maanpinnan lähellä olevilla ilmassoilla. Korvaava ilma tulee tavallisesti ympäröiviltä rakentamattomilta kylmemmiltä alueilta. Tuulen muutokset kaupungeissa liittyvät enemmän kaupungin geometriaan, miten kaupungit on rakennettu ja rakennukset sijoitettu. Niiden vaikutuksesta tuulen voimakkuus yleensä heikkenee. Erikoistapauksessa, kuten kapeissa katukuiluissa ja rakennusten kulmissa, tuulen puuskaisuus voi kuitenkin kasvaa. Tuulen voimakkuuden muutokset vaikuttavat enemmän viihtyvyyteen, koska tuulinen sää koetaan usein kylmempänä kuin mitä todellinen ilman lämpötila on.

Kaupungin ilmastoon vaikuttavat ylhäällä mainittujen mikro- ja mesoskaalan meteorologisten suureiden lisäksi päivästä toiseen vaihtelevat suursäätilat sekä enemmän tai vähemmän pysyvät topografiset ja maantieteelliset tekijät.

## 2.2 Kaupunki-ilmastotutkimuksen historia

Kaupunki-ilmastotutkimuksen voidaan ajatella alkavan jo 2000 vuotta sitten, kun roomalainen arkkitehti Marcus Vitruvius Pollio (75 eaa – 26 eaa) julkisti teoksensa *Kaupunkisuunnittelu ja*

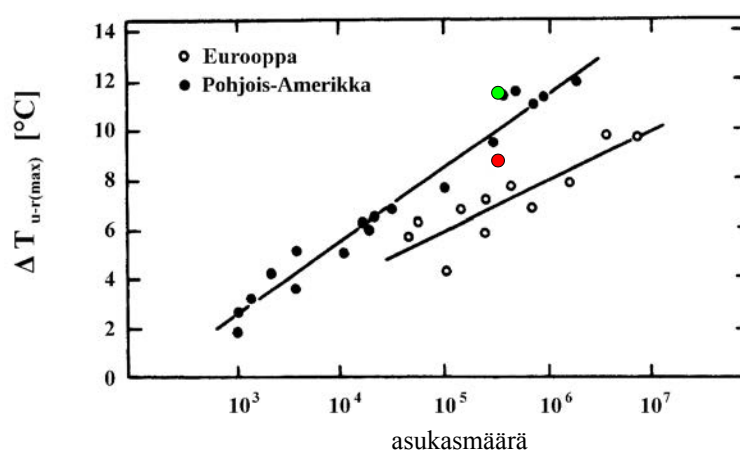
*ilmasto-olo* ja Horaz 24 eaa teoksensa *Rooman ilmansaasteet* (Kuttler 2004). Keskiajalla ilmalaatukysymykset nousivat esille monissa kaupungeissa, koska antropogeeninen energiatuotanto eli talojen lämmitys aiheutti suuria ongelmia. Ongelmien ”mallikaupungiksi” nousi pian jo keskiajalla suhteellisen tiheästi asuttu Lontoo. John Evelyn (1620 – 1706) julkisti 1661 laajasti tunnetun monografiansa *Fumifugium*. Tähän julkaisuun hän yhdisti erilaisia yksittäisiä tutkimuksia ”ilman saasteista”, ”kaupungin lämpötilasta” ja ”kaupunkisumusta” (Kuttler 2004). Laajempi yhteenveto kaupunki-ilmastotutkimuksesta löytyy Yoshino:n (1990/1991) teoksesta. Empiirisen kaupunki-ilmastotutkimuksen historia alkoi vuonna 1818, jolloin Luke Howard (1818, 1833), lontoolainen kemisti ja apteekkari, julkaisi tekemiään ilmastollisia havaintoja kotipaikoistaan Lontoon esikaupungeista ja Lontoon keskustasta. Hän havaitsi, että Lontoon keskusta oli kesällä noin 0,6 K ja talvella noin yhden kelvinin lämpimämpi kuin esikaupungit. Hän päätteli myös, että Lontoon keskustan lämpöylijäämä aiheutui runsaasti käytetyistä fossiilisista polttoaineista. Seuraavina viitenäkymmenenä vuotena julkistettiin muutamia ilman lämpötiloja koskevia tutkimuksia. Vuodesta 1891 lähtien kiinnitettiin kaupunki-ilmastotutkimuksessa huomiota myös muihin meteorologisiin suureisiin kuten säteilyyn, sumuun, sadantaan ja aerosoleihin (Kratzer 1956). Nüblerin (1979) mukaan 1920- ja 1930-luvulla suoritettiin ensimmäisiä tutkimuksia, joissa yritettiin jakaa kaupunkia pienempiin tutkimusalueisiin. Tuohon aikaan kehiteltiin uusia mittausmenetelmiä, muun muassa mittauksia liikkuvalla alustalla. Albert Kratzer julkaisi vuonna 1937 ensimmäistä kaupunki-ilmastoä käsittelevä bibliografiansa. Toiseen maailmansotaan asti meteorologit vastasivat kaupunki-ilmastotutkimuksen kehittämistä. Maailmansodan jälkeen tutkimusta siirtyi yksittäisistä meteorologisista suureista kokonaisvaltaisiin tutkimuksiin. Tässä vaiheessa myös maantieteen piirissä heräsi kiinnostus kaupunki-ilmastotutkimukseen, koska mittauksia alettiin yhdistää paikalliseen näkökulmaan. Kaupunki-ilmastotutkimuksen läpimurto tapahtui laajoilla alueilla 1960-luvulla. Muun muassa Chandler (1965) julkaisi monografiansa *The Climate of London*. Myös kansainvälinen yhteistyö kaupunki-ilmastotutkimuksessa lisääntyi (Chandler 1970, 1976; Oke 1974). Samaan aikaan taas meteorologia valtasi kaupunki-ilmastotutkimuksen takaisin ja tutkimuksen painopiste siirtyi Euroopasta Pohjois-Amerikkaan (Nübler 1979).

Suomessa varsinainen kaupunki-ilmastotutkimus alkoi Mauri Tommilan teoksella *Eräitä kaupunki-ilmaston piirteitä sekä Helsingin kaupungin ja sen ympäristön lämpötilavertailuja* (1961). Hän vertaisi kiinteiden havaintoasemien lämpötiloja Helsingin keskustan ja ympäröivän maaseudun välillä ainakin Vantaan Tammistoon asti. Hän tuli siihen tulokseen, että Helsingin keskusta on noin 0,6 °C ympäröivää maaseutua lämpimämpiä. Sen lisäksi hän

mainitsee, että tätä erotusta ei ollut havaittavassa sotavuosina 1917 – 1918 ja 1940 – 1945. Hänen arvionsa mukaan syy siihen on Helsingissä siihen aikaan ollut polttoainepula. Maantieteilijä Fogelberg ja meteorologi Alestalo tekivät ensimmäisiä tutkimuksia liikuteltavalla alustalla vuonna 1973. Alestalo (1975: 4) käytti sanaa "luotaus" kuvatakseen mittausmatkan horisontaalista ulottuvuutta. Luotausten perusteella voitiin ensimmäistä kertaa arvioida tarkasti Helsingin kaupungin lämpösaarekkeen voimakkuus. Heidän mukaansa lämpötilaerot olivat suurimmillaan 9 ja 11 asteen välissä, joskus jopa 13 asteeseen asti. Äärimäisiin havaintoihin lienee kuitenkin vaikuttanut vahvasti topografia. Heino (1979: 186) esitteli ilman lämpötilan lisäksi myös ilman kosteuden, pilvisyyden, sadannan eroja kahdessa suomalaisessa kaupungissa. Viimeisen laajemman kaupunki-ilmastotutkimuksen Helsingissä teki Piispa (2003) pro gradu -työnä Helsingin yliopiston maantieteen laitokselle.

Laajempi yhteenveto Helsingin ja kolmen muun eurooppalaisen kaupungin lämpösaarekeilmiöstä löytyy kirjoittajan omasta LuK-tutkielmasta (Drebs 2009). Helsingin lisäksi kaupunki-ilmastotutkimuksia on tehty myös Joensuussa (Ekholm 1981), Hyvinkäällä (Laaksonen 1994), Oulussa (Hara et al. 1999) ja Turussa (Suomi 2005).

Yksi merkittävistä nykypäivän kaupunki-ilmastotutkijoista on kanadalainen Timothy R. Oke. Hän yhdisti jo 1970-luvulla alussa empiirisesti yhteen kaupunkilämpösaarekkeen voimakkuuden ja kaupungin koon asukasmäärän funktioksi (Oke 1973). Hän tutki kymmentä kaupunkia ja lämpösaarekeilmiötä liikkuvalla mittausalustalla. On mainittava, että hän käytti vain saman tasangon alueella sijaitsevia kaupunkeja, joiden ympäristöt olivat äärimmäisen tasaisia ja mittauspisteiden lähellä ei ollut merkittäviä vesistöjä.



Kuva 2: Suurin lämpösaarekkeen ilmeneminen,  $\Delta T_{u-r(max)}$ , ja asukasmäärän suhde eurooppalaisille ja pohjoisamerikkalaisille kaupungille (muokattu Oken (1973) mukaan), punainen piste: Helsingin suurin lämpösaarekkeen havainto Drebsin (2006) mukaan, +9 °C, vihreä piste: Helsingin suurin lämpösaarekkeen havainto Alestalon (1975) mukaan, +12 °C.

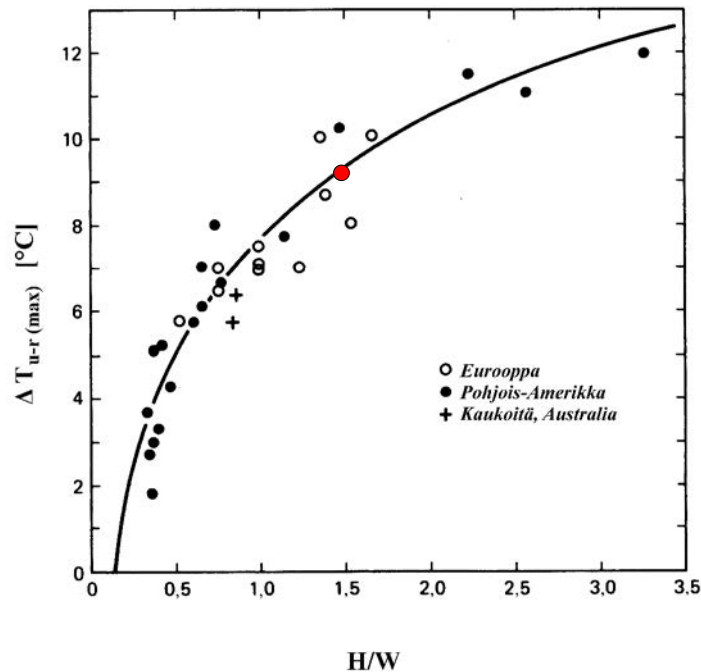
Näin ollen hän pääsi sulkemaan pois eräitä kaupunki-ilmastontutkimuksessa vahvasti häiritseviä taustatekijöitä, kuten topografian ja veden läheisyyden vaikutuksen. Lopputulokseksi hän sai vahvan korrelaation asukasmäärän ja lämpösaarekkeen voimakkuuden välillä. Oke jatkoi tutkimuksiaan vertaillen Pohjois-Amerikan kaupunkeja keskenään ja lopuksi myös eurooppalaisia kaupunkeja. Eri kaupunkiryhmille havaittiin oma korrelaationsa, joista eurooppalaisten kaupunkien korrelaatio oli kaikkein alhaisin (kuva 2).

Hänen päätelmänsä oli, että vaikka eurooppalaisilla kaupungeilla oli suurempi asukastiheys, antropogeeninen energiantuotanto oli Euroopassa pienempää kuin amerikkalaisissa kaupungeissa. Sen lisäksi eurooppalaisten kaupunkien rakennukset on rakennettu erilaisista rakennusmateriaaleista ja haihdunta oli täällä kaupunkien viheralueiden ja katupuiden takia suurempi. Tämä on syynä siihen, miksi on vaikea verrata erilaisia kaupunkeja lämpösaarekeilmion avulla. Kuvaan 2 on lisätty kaksi pistettä kuvamaan Helsingissä tehtyjä tutkimuksia. Punainen piste esittää Drebsin (2006) saamaa lämpötilaeroa kolmen Vantaan ja Pohjois-Helsingin alueella sijaitsevan mittauspisteen ja yhden Helsingin ydinkeskustassa sijaitsevan mittauspisteen välillä. Vihreä piste esittää Alestalon (1975) saamaa lämpötilaeroa. Hänen vertailupisteensä oli Viikin alueella noin 7,5 kilometriä Helsingin keskustasta koilliseen ja siten huomattavasti lähempänä Helsingin ydinkeskusta kuin Drebsin tutkimuksessa, mutta silti hän mittasi vielä suuremman erotuksen. Todennäköisesti molempiin tuloksiin on vaikuttanut myös topografiset tekijät.

Toinen Oken merkittävimmistä tutkimuksista oli hänen vuosina 1981 ja 1982 kehittämänsä taivaan näkyvyyskerroin, TNK (Sky View Factor (SVF)), (Oke 1981, 1982), jolla hän pysyi määrittämään kaupunkien lämpösaarekkeen suurinta voimakkuutta. Yksinkertaistettu TNK tarkoittaa sitä, kuinka paljon taivasta nähdään katukuilun pohjalta.

Oken oivallus oli, että mitä vähemmän taivasta nähtiin, sitä enemmän lyhytaaltoista energiasäteilyä jäisi katukuiluihin ja sitä kautta tunkeutumaan rakennusten seiniin ja katujen pintoihin. Katukuilussa lähellä olevien talojen seinät estäisivät ulosheijastumisen tehokkaasti. Kapeissa katukuiluissa suuremmalla TNK:llä säteily heijastuisi useita kertoja talojen seiniltä ennen kun säteilyenergian olisi kulutettu loppuun. TNK voidaan määrittää kahdella tavalla: kalasilmänvalokuvalla tai katukuilun leveyden (W) ja talojen korkeuden (H) suhteena. H/W-menetelmä on hyvin yksinkertainen, mutta antaa alustavia ja suhteellisen tarkkoja tuloksia lämpösaarekkeen suurimmasta voimakkuudesta. Oke esitteli vuonna 1981 kaavansa, millä hän estimoi kaupunkien lämpösaarekkeen voimakkuutta ( $\Delta T_{u-r(max)} = 7,45 + 3,97 * \ln(H/W)$ ).

Kaava sopii myös Helsingin kaupunkiolosuhteisiin. Kuvassa 3 punaisella pisteellä esitetty Helsingin  $\Delta T_{u-r(max)}$  vastaa noin 19 metrin korkeita taloja ja noin 13 metrin leveitä katuja.



Kuva 3: Lämpösaarekkeen suurimman voimakkuuden ja H/W-suhteen suhde. Mustat pisteet kaupungeja Pohjois-Amerikassa, avoimet pallot Euroopassa, ristit Australiassa (Oken (1987) mukaan). Punainen piste: Helsingin lämpösaarekkeen suurimman voimakkuuden Uudenmaankadun H/W-suhteen perusteella, Drebs (2006).

Nämä mittasuhteet ovat tyypillisiä Helsingin keskustalle isompia liikenneväyliä lukuun ottamatta. Lämpösaarekeilmiö esiintyy, kuten Oke todisti, kaikenkokoisissa asumiskeskittymissä. Sen lisäksi myös runsas, korkea ja tiheä puusto (Taha et al. 1989; Taha et al. 1991) ja yksittäiset rakennukset (Thurow 1983) voivat synnyttää lämpösaarekeilmiön.

### 3. Tutkimusmenetelmät

Empiirinen luonnontiede perustuu tarkkoihin tutkimusmenetelmiin ja mittausvälineisiin. Se, mitä laboratoriossa ei ole mahdollista simuloida, täytyy mitata luonnossa. Kaupunkien mittasuhteet ovat useimmiten niin suuria, että kaupungeja voidaan ajatella omana laboratorionaan. Vain kaupunkien tuulisuussimulaatioissa on käytetty keinotekoisia tuulitunneleita, joihin mallit kaupungista tai kaupunkiosista on sijoitettu (Landsberg 1981: 12,13; Kuttler 1993: 97).

Eri meteorologisia muuttujia joudutaan havainnoimaan erityyppisillä havaintoverkostoilla. Vähiten havaintopisteitä tarvitaan pilvisyyden- ja ilmanlaatuerojen havaitsemiseen. Sadannan ja tulen erojen havaitsemiseen tarvitaan havaintopisteitä vaihtelevissa paikoissa. Eniten havaintopisteitä tarvitaan ilman lämpötilan havaitsemiseen, koska ilman lämpötilan erot ovat kaupungeissa horisontaalisesti ja vertikaalisesti hyvin suuria. Sen lisäksi ilman lämpötila on



tärkein vaikuttaja monessa meteorologisessa prosessissa. Tavallisesti kaupunkiin on sijoitettu yksi sääasema keskustan tuntumaan. Toinen sääasema sijaitsee usein kaupungin läheisyydessä olevalla lentoasemalla. Useampien sääasemien sijoittamisen esteenä on usein sopivien havaintopaikkojen löytäminen kaupungista. Ilman lämpötilan tiheämpään mittaamiseen on kehitetty 1920-luvulta lähtien erilaisia liikkuvalla alustalla kiinnitettyjä antureita. Ne olivat alussa perinteisiä lasilämpömittareita, mutta jo pian siirryttiin sähköisiin mittareihin, joihin oli yhdistetty ensin vain lämpötilan näyttö ja myöhemmin myös erilaisia tallentavia yksiköitä. Liikkuva alusta on ollut alusta lähtien hyvin laaja käsite. Se sisältää kävelystä autolla ajoon kaikki liikkumisen muodot. Tavallisesti tutkimuksen lähtökohta määrää minkälaista liikkuvaa alustaa käytetään. Myös spatiaalinen lähtökohta vaikuttaa valintaan. Huonosti saavutettavissa tutkimuskohteissa tai tutkimuskohteissa, jossa mittaja itse häiritseisi mittaustuloksia, hidas kävely on paras tapa suorittaa mittauksia. Silloin mittausalue jää kuitenkin varsin pieneksi. Tasaisella tutkimusalueella voidaan liikkua myös polkupyörällä (Strobel 2002: 26; Müskens 2004: 35). Muuten auto on yleisimmin käytetty luotausalusta. Jos tutkimukseen löytyy yhteistyökumppaneita, voidaan käyttää mitä eksoottisimpia mittaustapoja. Tästä esimerkkinä on Yamashita:n (1996) tutkimus, jossa hän asensi lämpömittareita raitiovaunuihin Tokiossa. Luettelo merkittävistä mittausajoista toisen maailmansodan jälkeiseltä ajalta löytyy Nüblerin (1979) tutkimuksesta.

Liikkuvissa mittauksissa pyritään tavallisesti siihen, että kaikki havainnot edustavat samoja havaintohetkiä. Mittausjaksojen aikana sää ja muut auringon kulusta riippuvat fysikaaliset olot voivat kuitenkin muuttua. Silloin havainnot on korjattava ennalta määrätyn aikakiintopisteen suhteen. Jos tutkimuksen tarkoitus on esittää absoluuttisia arvoja, on havaintoihin aina tehtävä aikakorjauksia. Tässä tutkimuksessa aikakorjauksia ei kuitenkaan ole tehty, koska tarkastelu perustuu kahden havaintopisteen lämpötilaeroihin ja havaintojen tulokset esitetään lämpötilaerotuskarttoina.

### 3.1 Helsingin lämpösaarekemittaukset heinäkuu 2009 – kesäkuu 2010

Tämän tutkimuksen tarkoitus oli alun perin noudattaa perinteistä vertailevaa lämpösaarekeilmiötutkimusta. Koska muun muassa Alestalon (1975) ja Fogelbergin (1973) tutkimukset osoittivat jo luotettavasti lämpösaarekkeen voimakkuuden, mutta rajoittivat mittaukset vain muutamiin luotausajoihin ja ajanhetkille, suunniteltiin lämpösaarekehavaintojen laajentamista vähintään yhden kokonaisen vuoden (12 kuukautta) kaikille vuodenaajoille ja mahdollisimman laajalle alueelle. Alun perin suunniteltiin kiinteiden

mittausasemien lisäksi käyttää myös polkupyörä- ja kävelymittauksia. Kasvava kiinnostusta kaupunkitutkimusta kohtaan lisäsi kuitenkin resurssien määrä niin paljon, että oli mahdollista rakentaa tutkimus järjestetyimmältä pohjalta. Satunaisten luotausten sijalle otettiin kiinteitä luotuspäiviä. Jo Kratzer (1956) esitti vastaavaa mittausasetelmaa yhtenä kaupunkitutkimuksen lähestymistapana. Luotuspäivälle suunniteltiin kaksi luotusajoa, yhtä aamupäiväksi ja yhtä alkuyöksi. Luotusajot suoritettiin heterogeenisessä Helsingin keskustassa joka viikko ja homogeenisemmissä esikaupungeissa joka toinen viikko.

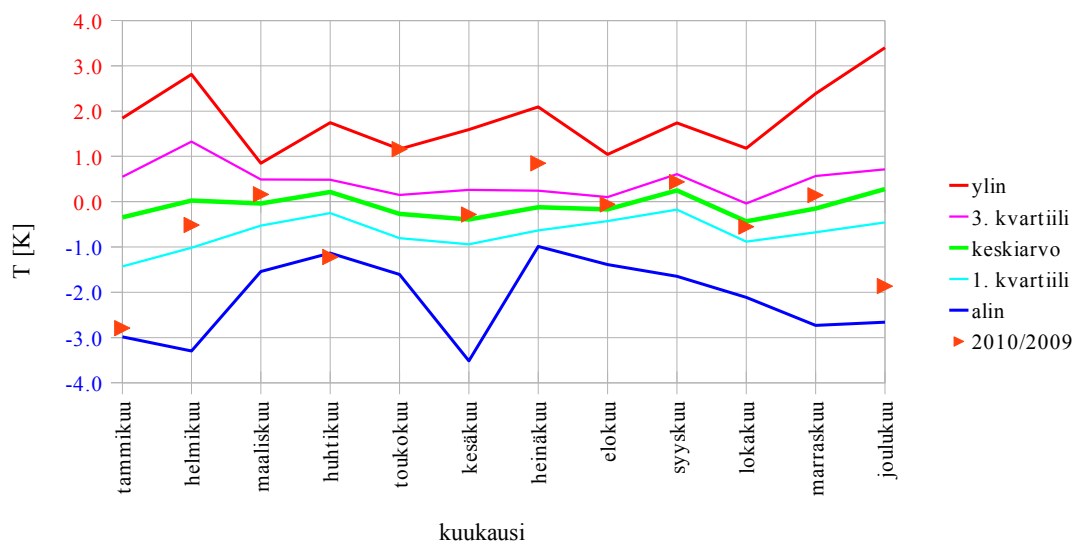
Luotusjakson lopulla tarkastettiin vielä kuinka monina päivinä oli ollut lämpösaareketutkimukselle suotuisa sää. Siihen käytettiin Wilmersin (1976) esittelemiä rajoja pilvisyydelle ( $N \leq 1$ ) ja tuulelle ( $v \leq 4$  solmua), joiden aikana olisi odottavissa parhaita mikroklimatologisia tuloksia. Vertailussa käytettiin Helsinki Kaisaniemen ja Vantaan Helsinki-Vantaan lentoaseman kolmen tunnin havaintoja, yhteensä 8760 kappaletta. Lentoaseman havainnoista 490 (6%) täytti edellä mainitut ehdot, Helsinki Kaisaniemessä vastaavat luvut olivat 368 ja 15%.

Luotuspäiväksi valittiin tiistaipäivä. Päivän katsottiin olevan liikenneoloiltaan tavanomainen sekä keskustassa että esikaupungissa. Tutkimuksen aikana (heinäkuu 2009 - kesäkuu 2010) ei ollut tiistaisin yhtään juhla- tai vapaapäivää eikä myöskään pitkää viikonloppua. Näin ollen voitiin olettaa ihmisten käyttäytymisen ja liikenteen määrän olevan suurin piirtein samanlainen koko tutkimuksen aikana. Kuitenkin Suomen kaltaisessa pienessä maassa huomataan loma-aikojen vaikutukset liikenteeseen. Helsingissä niitä kuitenkin kompensoi kesäisin turistien määrä liikenteessä. Sekä vuodenaikojen välillä että kesä- ja talviajan siirtymispäivien (25.10.2009 ja 28.3.2010) aikana havaittiin pieniä eroja liikennetiheydessä. Valoisampina aikoina ihmiset liikkuivat enemmän kuin pimeänä vuodenaikana. Luotusajot aloitettiin aina Suomen talviajan mukaan, koska päätettiin olla huomioimatta liikenteen muutoksia kesä- ja talviajan siirtymisen takia. Niiden vaikutus arvioitiin olevan pienempi kuin auringon energiansäteilyn muutoksista tulleet vaikutukset.

Jokaisesta luotusajosta pidettiin ajopäiväkirjaa, johon merkittiin kaikki luotusajon tapahtumat. Myös luotusajojen säät kirjoitettiin muistiin.

Säännöllisistä luotuspäivistä ja luotusajosta huolimatta arvioitiin luotaustulosten yleistettävyyden olevan varsin pieni. Yhden luotuspäivän tuloksien yleistämistä yritettiin vahvistaa tutkimalla luotuspäivien lämpötilojen suhde Helsinki Kaisaniemen pitkän jakson keskilämpötiloihin 1971 – 2000 sekä pitkäaikaispäivälämpötilan havaintoihin. Jaksolle 1971 – 2000 laskettiin kaikille kuukausille kuukausilämpötila joka seitsemännen päivän perusteella. Kalenteripäivät olivat samat kuin luotuspäivät 2009/2010. Sen jälkeen laskettiin erotus

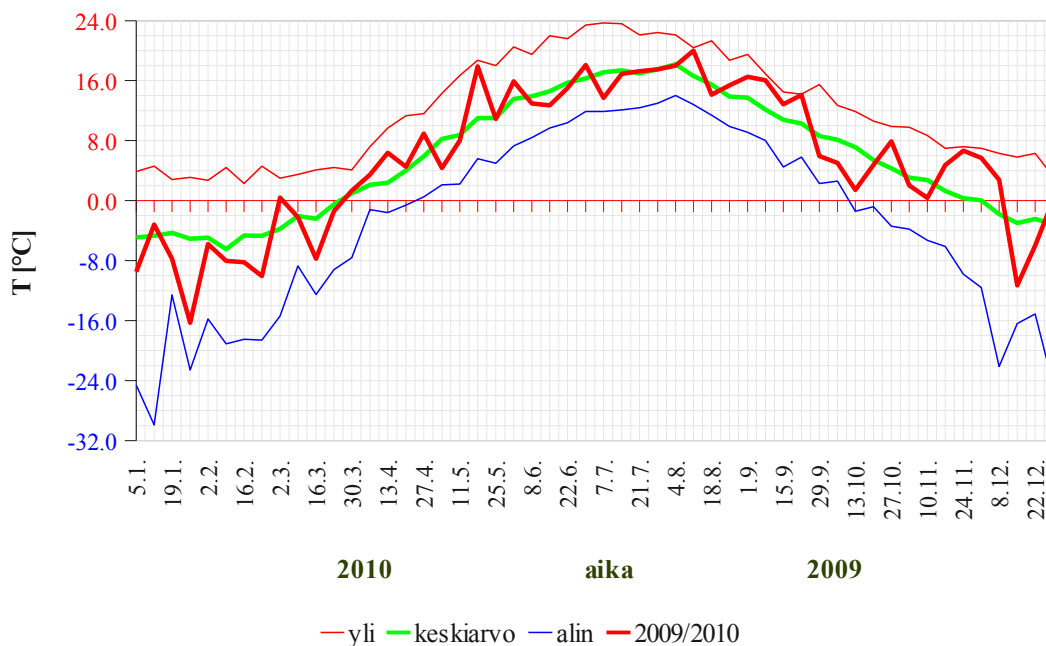
näiden kuukausilämpötilojen ja varsinaisten keskilämpötilojen välillä ja määrättiin jakson 1971 – 2000 havaintojen kvartiilit.



Kuva 4. Helsinki Kaisaniemen normaalikauden 1971 – 2000 kuukausien keskilämpötilojen ja joka seitsemännen päivän keskiarvojen erotukset (vihreä viiva) ja niiden kvartiiliarvot sekä Kaisaniemen luotausjakson 2009/2010 aikana tiistaipäivien keskiarvojen erotus (selitys tekstissä).

Kuvassa 4 on esitetty näiden vertailujen tulokset. Siihen on myös lisätty luotausjakson Kaisaniemen kuukausikeskiarvojen erotukset. Kuva 4 osoittaa, että luotausjaksosta suurimmalla osalla (7 kuukautta) kuukausikeskiarvot sijaitsevat 50% havaintojen vaihtelualueella. Kolmen kuukauden arvot ovat lähellä yhden asteen erotusrajaa. Vain kahden luotausjakson kuukauden keskiarvojen erot ovat lähellä -2 astetta tai enemmän. Noiden kuukausien keskiarvot poikkesivat myös normaalikaudesta 1971 – 2000 (katso kappaleet 5.1 - 5.12). Vuoden keskilämpötilan tarkastelussa ero kaikkien päivien keskilämpötiloista ja vain joka seitsemännestä päivästä lasketusta keskiarvosta on vain -0,08 K. Näin ollen normaalikauden vuoden keskiarvoa on mahdollistaa verrata luotausjakson vuoden keskilämpötilaan.

Lämpötilan vaihtelut jatkuivat myös kuukausien sisällä. Helsingin alueen ilmastollisiin erikoispiirteisiin kuuluu, että kuukausien sisällä ilman keskilämpötila voi heilahdella paljon lyhyessä ajassa. Syy löytyy meren läheisyydestä ja säätilojen nopeasta vaihtelusta. Varsinkin talvella matalapaineiden tuomat lämpimät ilmassat voivat aiheuttaa vuorokauden sisällä suuria lämpötilaeroja. Niiden takia myös ero vuorokausien lämpötilan keskiarvoissa on talvella suurempi kuin kesällä. Kuvassa 5 on esitetty sekä Helsinki Kaisaniemen normaalikauden 1971 – 2000 vuorokausien ylimmät, keskimääräiset ja alimmat keskilämpötilat että luotauskauden vuorokausien keskilämpötilat.



Kuva 5. Helsinki Kaisaniemen 7 päivän keskilämpötila jaksolta 1971 – 2000 (leveä vihreä viiva), jakson ylin (ohut punainen viiva) ja alin (ohut sininen viiva) päivän keskilämpötila että luotausjakson heinäkuu 2009 – kesäkuu 2010 päivän keskilämpötila (leveä punainen viiva). Havainnot Ilmatieteen laitos, 2010.

Havaitaan, että luotausjakson lämpötilat heilahtelevat jatkuvasti pitkänajan keskiarvon ympärillä ja lähentelevät jopa ennätyksiä. Koko vuoden tarkastelussa, näyttäisi siltä, että vaihtelut tasaantuvat. Johtopäätös vertailusta on, että luotausprojektin lämpötilahavaintoja voidaan luotauspäivien vähydestä huolimatta käyttää kuvaamaan Helsingin lämpösaareketta tieteellinen kriittisyys huomioiden.

### 3.1.1 Päiväluotaukset

Päiväajojen alkamisaika valittiin alussa niin, että luotausauto ohittaisi noin kello yhdentoista aikaan Helsinki Kaisaniemen sääaseman, joka on noin puolessa välissä keskustan luotausreittiä. Luotauksen alkaessa ei ollut kokemuksia, miten ulkopuoliset tekijät, kuten liikenne, vuodenaika ja sää, vaikuttaisivat ajoaikaan. Siksi luotausajojen alkamishetkiksi suunniteltiin noin kello 09:50. Siten laskettu ohitushetki Kaisaniemessä olisi ollut noin tuntia myöhemmin. Kyseinen aika kello 11:00 (09:00 UTC, englanniksi Coordinated Universal Time) on yksi kansainvälisesti sovituista meteorologisista havaintohetkistä. Ensimmäisten luotausajojen jälkeen lähtöaika muuttui kello 9:45:een. Projektin lopulla lähtöajantarkastelu toi keskihajonnaksi 7,27 minuutin eron aamupäivän lähtöajoissa. Vain yhden kerran (19.1.2010) lähtö tapahtui teknisen vian takia vasta kello 11:28. Keskustareitin luotausajot

kestivät keskimäärin tunti 46 minuuttia ja aikojen keskihajonnaksi saatiin 11,80 minuuttia. Keskustareitin kesto vaikutti luonnollisesti esikaupunkireitin alkamishetkeen. Esikaupungin luotausajojen alku viivästyi alussa teknisen datakäsittelyn takia. Esikaupungin luotausajojen kesto oli keskimäärin 2 tuntia 26 minuuttia ja keskihajonnaksi saatiin 7,10 minuuttia. Näin ollen esikaupunkireitti oli ajallisesti tasaisempi kuin keskustareitti. Syy siihen oli, että olosuhteet, kuten liikenne ja ajokeli, olivat esikaupungeissa paremmin hallittavissa kuin keskustassa.

### 3.1.2 Yöluotaukset

Yöajot alkoivat noin 12 tuntia myöhemmin. Yöajoja suorittaessa seurattiin päiväajojen periaatteita. Liikennettä oli kuitenkin yöllä sen verran vähemmän kuin päivällä, että ajot voitiin suorittaa ajokelistä huolimatta paljon tasaisemmissa olosuhteissa. Tärkeä tekijä oli muun muassa se, että suurin osa Helsingin liikennevaloista oli sammutettu. Yöajot alkoivat keskimäärin kello 19:43 ja lähtöajan tarkastelu toi keskihajonnaksi 4,06 minuutin eron lähtöajoissa. Rauhallisissa oloissa keskustareitin luotausajot kestivät keskimäärin 1 tunti ja 26 minuuttia ja niiden aikojen keskihajonnaksi saatiin 6,63 minuuttia.

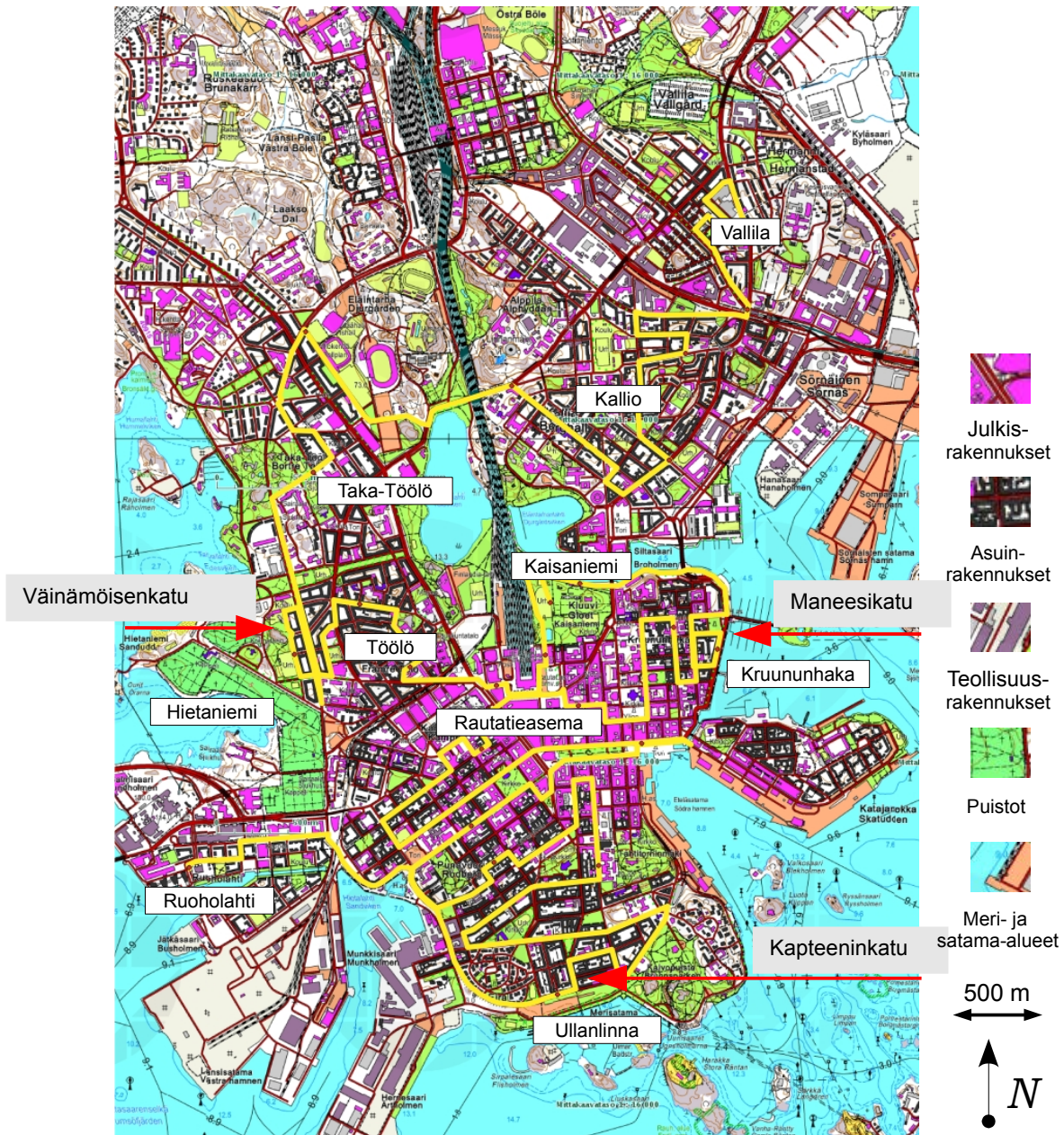
Yöllä esikaupunkireitin kesto ei huomattavasti lyhentynyt. Se kesti keskimäärin 2 tuntia ja 12 minuuttia, eli oli vain kahdeksan minuuttia lyhyempi kuin päivällä.

### 3.2 Luotausreitit

Luotausreitien suunnittelu oli yksi tutkimuksen tärkeimmistä tehtävistä. Helsingin keskustan heterogeeninen ympäristö on haaste jokaiselle kaupunki-ilmastotutkimukselle. Helsingin keskustasta löytyy kaikkia kaupungin maankäyttömuotoja. Ruoholahdessa on korkeita kerrostaloja, Punavuoressa, Kruununhaassa ja Töölössä tiivistä rakennettuja kortteleita. Laajoja puistoja ja viheralueita ovat Kaivopuisto, Kaisaniemen puisto ja Hietalahden hautausmaa. Sen lisäksi Helsingin ydinkeskustaa ympäröivät Suomenlahden sisimmät vedet. Ylimääräisenä muuttujana toimii korkeus merenpinnasta. Varsinkin Punavuoressa, Kruununhaassa ja Kalliossa korkeuserot voivat olla yhdessä korttelissa jopa kahden kerroksen korkuisia. Helsingin suuremmat puistot ja viheralueet eivät sijaitse rakennetun ympäristön sisällä, vaan ne sijaitsevat aina vesirajan läheisyydessä. Näin niiden vaikutus kaupunki-ilmastoon on kytkettävä lähellä oleviin vesiin ja sen takia puistot ja viheralueet toimivat puskurina meren ja kaupungin välissä. Luotausreittien valinta tapahtui ensin kartan avulla.

Keskustan reitti hahmoteltiin nopeasti Helsingin ruutukaavan takia. Esikaupunkireitillä voitiin kerran suorittaa koeajo. Kokonaisuudessaan luotausreittien pituus oli 105,4 kilometriä. Yhteenlaskettuna koko projektin aikana ajettiin 6981,8 kilometriä. Aikaa siihen kuului 278 tuntia ja 23 minuuttia.

### 3.2.1 Helsingin keskustan luotausreitti



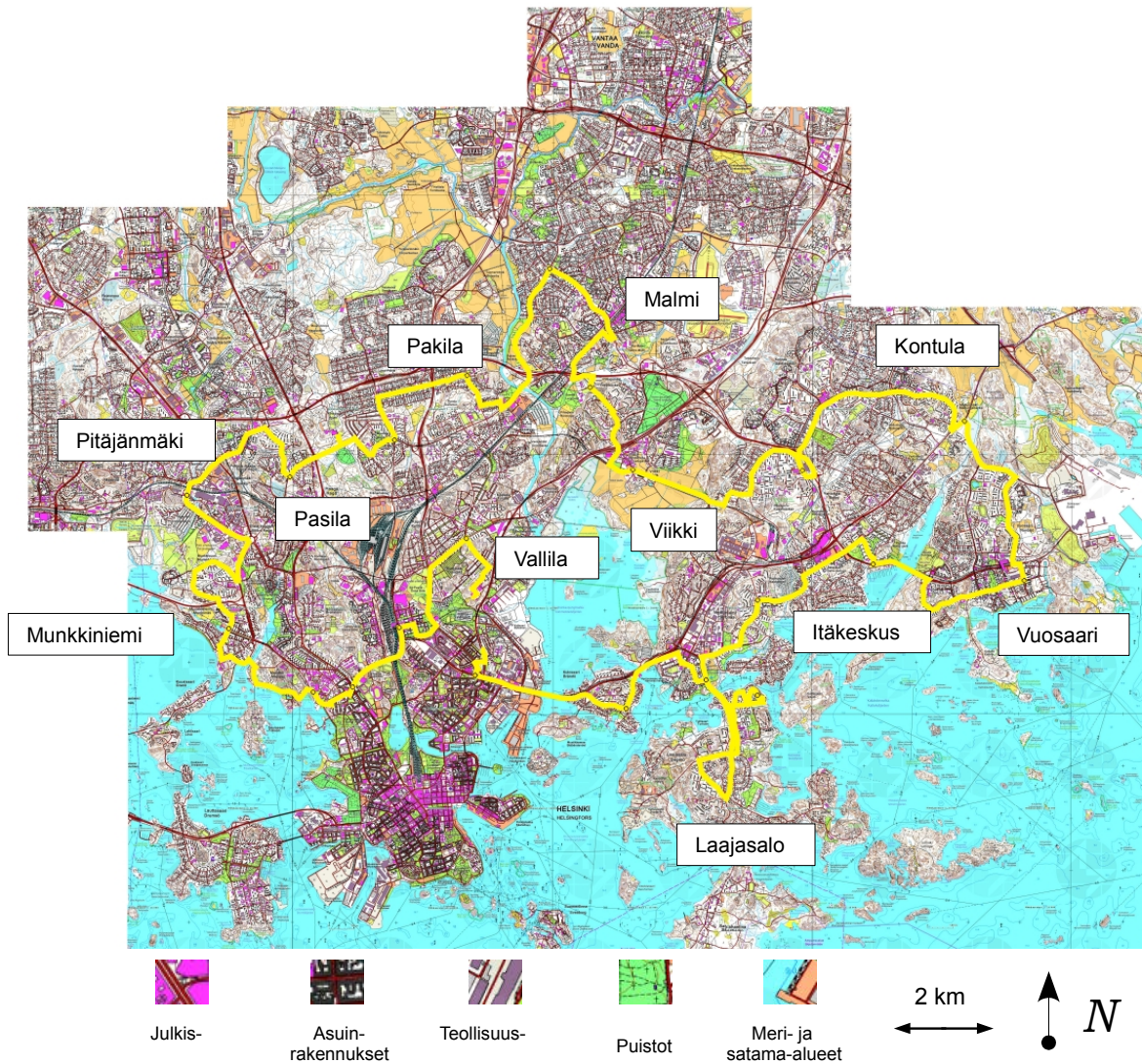
Kuva 6: Helsingin keskustan reitti, ajoreitti kuvattu keltaisella viivalla, karttopohja Maanmittauslaitos, 2009.

Helsingin keskustareitti sijoitettiin kokonaan tiiviisti rakennettuun ympäristöön. Reitin pituus oli 31,4 kilometriä. Se alkoi Ruoholahdessa vanhan kaapelitehtaan vierestä keskustan länsipuolelta. Tästä se kulki Ullanlinna suuntaan, missä oli reitin ensimmäinen erikoisalue.



Korkeita kerrostaloalueita löytyy muun muassa Herttoniemestä, Itäkeskuksesta, Vuosaaresta, Kontulasta, Pihlajamäeltä ja Pasilasta. Suurempia ostoskeskuksia ovat Itäkeskus ja Kannelmäen Prisma.

Esikaupunkireitti oli noin 74 kilometriä pitkä. Se alkoi Vallilasta ja kulki Kulosaareen, Herttoniemeen, Laajasalon kautta Itäkeskukseen ja Vuosaareen. Tähän asti reitti seurasi Suomenlahden rantaviivaa. Vuosaaren pohjoispuolella oli reitin itäisin piste. Täältä reitti kulki Mellunkylän kautta Kontulaan ja Myllypuron kautta Viikkiin, missä oli ensimmäinen suurempi tasankoalue. Toinen oli Vantaanjoen varrella Pukinmäellä.

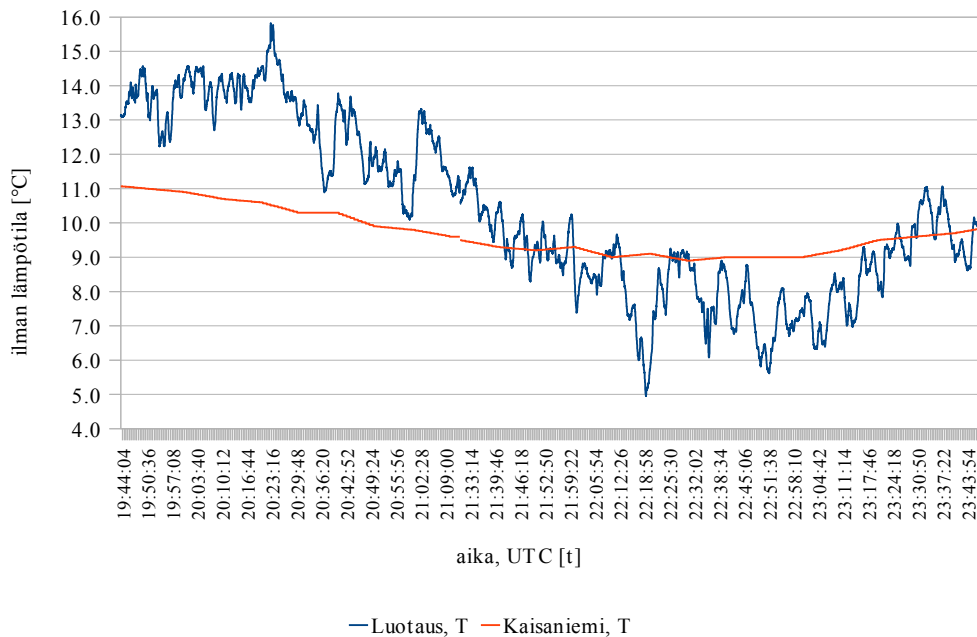


Kuva 7: Helsingin esikaupungin reitti, ajoreitti kuvattu keltaisella viivalla, karttapohja Maanmittauslaitos, 2009.

Luotausajojen nopeus vaihteli homogeenisessa ympäristössä 40 ja 50 kilometrin välillä. Siellä, missä oli odotettavissa lämpötilavaihteluja, nopeus pudotettiin kuitenkin 30 ja 40 kilometrin välille. Reitin pohjoisin piste sijaitsi Tapaninvainion kaupunkiosassa Kirkonkylän



ja Tapaninvainiontien risteyksessä. Reitin läntisin piste oli Pitäjänmäen kaupunkiosassa Pitäjänmäentien ja Pajamäentie liittymässä. Esikaupunkireitti loppui Kumpulassa Ilmatieteen laitoksen kohdalla. Kappaleessa 4.1 on esitetty yhtenä esimerkkinä yhden luotauspäivän 15./16. 9. 2009 yöajon sekä Helsingin keskustan että esikaupunkien absoluuttiset ilman lämpötila luotaustulokset. Kuva 8 esittää saman yöajon 13 539 havaintoja ja Kaisaniemen 10 minuutin havaintoja samassa kuvassa.



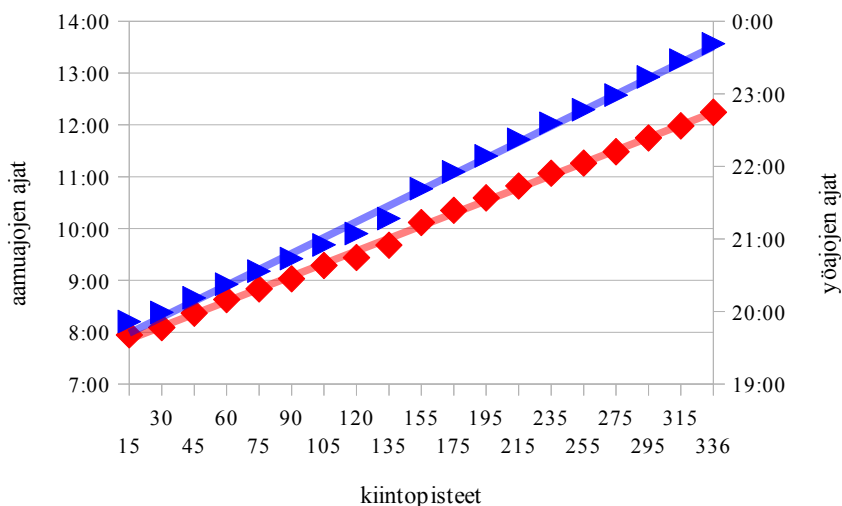
Kuva 8. 15./16. 9. 2009 yöluotausajon havainnot ja Helsinki Kaisaniemen sääaseman 10 minuutin havaintoja, aika on UTC:ssä.

### 3.2.3 Kiintopisteet

Tutkimuksen tavoitteena on esittää Helsingin lämpötilaoloja mahdollisimman yksityiskohtaisesti. Parhaiten se saavutetaan, kun käytettävissä on paljon havaintopisteitä. Liikkuvalla alustalla tehtyjä mittauksia voidaan käyttää silloin, kun on mahdollista yhdistää havaintoja ja paikkoja. Nykypäivän paikannustekniikalla paikanmääritys on varsin yksinkertaista ja helppoa. Uusimmilla GPS-laitteilla (Global Positioning System) voidaan tallentaa paikkatieto ja lämpötilahavainto jo luotaushetkellä. Tärkeäksi tutkimuksen valmistelutehtäväksi muodostuu niin kutsuttujen kiintopisteiden valinta. Kiintopisteellä

tarkoitetaan pysyvää pistettä luotausreitinvarellä, johon kaikki vakioetäisyyden sisällä tehdyt havainnot yhdistetään. Kiintopisteiden tarkoitus on toimia tietyn pienalueen havaintopisteenä. Luotausajojen ajan ei kuitenkaan pysähdytty kiintopisteillä. Luotusten vähyden takia ja havaintojen edustavuuden parantamiseksi yhdistettiin kaikki kiintopisteestä 50 metrin säteen sisällä olevat havainnot yhdeksi havainnoksi. Se tarkoittaa teoriassa, että 30 – 40 kilometrin ajonopeudella yhdeksästä kahteentoista havaintoa voi osua samaan alueeseen. Käytännössä määrä oli kuitenkin pienempi, mutta riittävä tasoittamaan äkillisiä liikenteestä tai muista syistä esiintyviä lämpötilamuutoksia. Kiintopisteiden valinta ei ollut satunaista, vaan valintakriteereinä oli maankäyttö, topografia ja paikan tärkeys. Keskustareitin varrella oli alun perin 135 kiintopisteittä, eli keskimäärin 232 metrin välein. Kiintopisteiden tiheys perustuu siihen, että Helsingin keskusta oli heterogeeninen alue ja tutkimuksen pääkohde. Myöhemmin keskustan reitin kiintopisteiden määrä pudotettiin 101:een, koska osa kiintopisteistä oli niin lähellä toisistaan, että sadan metrin keräilyalueet olisivat olleet osittain liiaksi päällekkäin. Esikaupunkireitin varrella oli 201 kiintopisteittä, keskimäärin 348 metrin välillä. Kaikkien kiintopisteiden sijainnit luotausreitinvarellä on esitetty kartalla liitteessä 2. Liitteen kartan taustana on CORINE maankäyttöluokitus (EEA 2009).

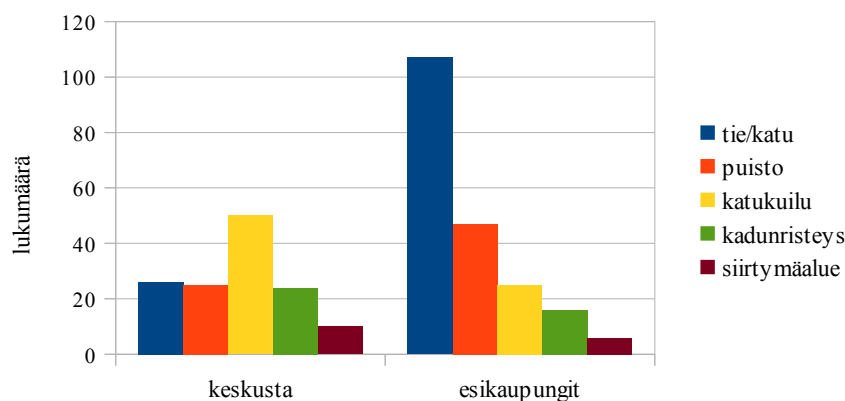
Kiintopisteille tehtiin myös vertaileva aikatutkimus, millä yritettiin selvittää, oliko kiintopisteiden ohitusajoissa havaittavissa muutoksia tai siirtymistä ajan suhteen (kuva 9).



Kuva 9. Kiintopisteiden aikatarkastus. Siniset kolmiot: päiväajojen keskiajat ja lineaarinen regressio. Punaiset ruudut: yöajojen keskiajat ja lineaarinen regressio kiintopisteittäin.

Aikatarkastuskiintopisteiden sijainnit valittiin tasavälisiksi siten että, keskustareitistä joka viidestoista ja esikaupunkireitistä joka kahdeskymmenes kiintopiste oli

aikatarkastuskiintopiste. Yhteensä niitä oli 19 pisteitä. Keskustan kiintopisteet ohitettiin 104 kertaa ja esikaupunkien kiintopisteet 52 kertaa. Päiväajon hajonta on liikenteen takia luonnollisesti suurempi kuin yöajon hajonta. Kiintopisteiden ohitusajon keskiajan keskihajontojen korrelaatiot olivat kuitenkin hyvin korkeita,  $R^2$  -arvo päiväajolle on 0,86 ja yöajolle vielä korkeampi, 0,92. Näistä luvuista voidaan päätellä, että kiintopisteiden ohitusaikojen välillä ei ollut tapahtunut muutoksia.



Kuva 10. Kiintopisteiden luokat, 135 pisteittä Helsingin keskustassa, 201 pisteittä esikaupungissa, selitykset tekstissä.

Kiintopisteiden valinta oli ohjattu. Jälkikäteistä luokitusta varten luotiin viisi maankäyttöluokkaa; tie/katu, puisto, katukuilu, kadunristeys ja siirtymäalue (kuva 10). Luokituksen tarkoitus ei ollut olla edustava Helsingin maankäytön kanssa. Tie/katu-luokka sisältää kaikki kiintopisteet, joiden reunarakennukset olivat matalia ja katkonaisia. Puisto-luokka sisältää puistojen lisäksi myös pisteittä, joiden kadunreunoilla oli puutarhoja tai pienempiä viheralueita. Kadunristeys-luokka poikkeaa katukuilu-luokasta, koska tässä etäisyys rakennuksiin on yleensä suurempi kuin katujen kuiluissa. Viidenneksi on pieni siirtymäalue-luokka, mihin on sijoitettu kaikki ne pisteet, joiden toisella reunalla on meri tai lahti.

### 3.3 Luotausauto

Luotausautona toimii koko tutkimuksen ajan tummansininen Volkswagen Transporter Syncro Diesel (kuva 11). Auton väri ei ollut paras vaihtoehto mittauksiin. Tummasta väristä oli odotettavissa, että auton kori pidättäisi osan auringosta tulevasta energiansäteilystä ja vaikuttaisi sen takia mahdollisesti mittauksiin. Auton moottori on edessä. Luotausautoksi



Kuva 11: Tutkimusprojektin luotausauto (Kuva: A.Drebs).

Auton aerodynaamisen muodon vuoksi jo pienillä nopeuksilla tuulilasini yli kulkeva ilmavirtaus johtaa moottorista tulevan lämmön pois mittareiden ulottuvilta. Dieselmoottorin käyntilämpötila on myös alhaisempi kuin vastaava bensiinimoottorin. Autolle asennettiin kiinteä teline siten, että tutkimuksen pääinstrumentin, Thiesin psykrometrin, mittariaukot ulottuivat Suomen autorekisterilain sallimaan yhteen metriin auton etupuolelle (FINLEX 1992). Auton vaihteisto sallii juuri sopivalla tavalla pitää luotausajojen nopeuden noin kolmen- ja neljänkymmenen kilometrin tuntivauhdissa.

suositellaan valkoista kulkuneuvoa, jossa moottori on nykyisistä autoista poiketen auton takaosassa (Bründel et al. 1987). Siksi kiinnitettiin erityistä huomiota siihen, mille korkeudelle instrumentit tulisi asentaa. Jotta luotautiedot olisivat vertailukelpoisia Kaisaniemen säähavaintojen kanssa, valittiin mittauskorkeudeksi tasan kaksi metriä.

Auton aerodynaamisen muodon vuoksi jo

### 3.4 Luotauslaitteet

#### 3.4.1 Thiesin tuuletettu psykrometri

Erityisesti tätä projektia varten hankittiin saksalaiselta valmistajalta Adolf Thiesiltä tuulettimella varustettu sähköinen psykrometri. Laite on alunperin suunniteltu lämpö- ja kosteusmittariksi kiinteälle automaattiselle sääasemalle, mutta se soveltuu kohtuullisen painonsa takia myös liikkuvien luotautusten suorittamiseen. Laitteen mittauseriaate on varsin yksinkertainen, kahden lasiin sulatetun platinalangan avulla mitataan sekä kuivaa että kosteaa ilmanlämpötilaa. Anturit on suojattu auringon lämpösäteilyiltä kahdella sisustaltaan kiiltävällä, ohuella teräsputkella. Kosteaa ilmanlämpötilaa tarkoittaa tässä tapauksessa, että anturin päälle on asennettu pieni puuvillasukka, joka pidetään jatkuvasti kosteana. Kostealla anturilla veden haihtuminen alentaa ilman lämpötilan kosteaksi lämpötilaksi. Molempien antureiden ohi johdetaan tuulettimella tasainen noin neljästä kuuteen sekuntimetrin nopea ilmavirtaus (kuva 12). Vastuslämpömittareiden mittaustarkkuus on varsin hyvä,  $\pm 0,1$  K. Antureiden haittapuoli on niiden niin kutsuttu hitaus. Tavallisesti vapaasti asennettu platinalanka mittaa ilmanlämpötilan sekunnin murto-osassa.

Käytännön ja turvallisuuden takia lanka joudutaan suojaamaan sulattamalla sen lasiin. Lasilla on kuitenkin oma lämmönjohtokykynsä, joka hidastaa lankaa savuttamasta oikeaa ilmanlämpötilaa. Tutkimuksessa

käytetyn laitteen hitaus oli laitteen valmistajan mukaan 17 sekuntia. Se tarkoittaa, että äkilliseen lämpötilamuutoksen jälkeen anturit saavuttavat 90 prosenttia uudesta lämpötila-arvosta 17 sekunnin kuluttua.

Antureiden hitaus otettiin luotauksissa huomioon. Ensimmäisten luotausajojen aikana paljastui laitteen tuulettimen suuren tehon haittapuolia. Varsinkin päivällä lämpimänä vuodenaikana ja heikkotuulisella luotausajolla tuuletin

saattoi imeä ei-toivuttuja rakennusten ja liikenteen tuottamia lämpöpäästöjä. Näiden virheluotausten välttämiseksi, liitettiin tuulettimen ja sen voimalähteen väliin virrankatkaisin. Siten oli mahdollista sopivalla hetkellä lopettaa tuulettimen toiminta. Mittaria ei tarkistettu ennen luotausajojen alkua. Tarkastuksia päästiin tekemään vasta heinäkuussa 2011. Tarkastus tehtiin Ilmatieteen laitoksen lämpökaapilla välillä 0 °C - +35 °C, jolloin myös suhteellista kosteutta koskeva kaavaa tarkastettiin. Tässä vaiheessa antureiden lämpötila-alue -25 °C - 0 °C jäi tarkistamatta. Tarkistuspöytäkirja vahvistaa valmistajan antamat mittausvirhemarginaalit. Luotauksiin tarvittava sähkö tuotettiin dataloggerin akusta. Tuulettimen sähköntarve oli sen verran suuri, että jo laitetta hankittaessa kiinnitettiin huomioon siihen, että tuuletin voidaan yhdistää luotausauton akkuun.



Kuva 12: Tutkimusprojektissa käytetty tuulettettu lämpömittari (Kuva A. Drebs).

### 3.4.2 Vaisalan Humicap HMP45A ja DTR 502 -säteilysuoja

Lämpötilaluotausten varamittarina toimi Vaisalan HMP45D-tyyppinen anturi. Anturi koostui yhdestä kosteusanturista (HUMICAP®180) ja yhdestä lämpötila-anturista (Pt 100 IEC751) (Vaisala 2010a). Molemmat anturit olivat suojattu ohuella suodattimella ja sijoitettu DTR 502

-tyyppiseen säteilysuojaan (Vaisala 2010b). Kosteusanturin tarkkuus on varsin hyvä, kolme prosenttia mittausalueella 90 - 100 prosenttia, muuten kaksi prosenttia. Lämpötila-anturi saavuttaa parhaan tarkkuuteensa +20 asteessa, jolloin tarkkuus on  $\pm 0,2$  astetta. Tästä tarkkuus huononee molempiin mittaussuuntiin yhtä tasaisesti siten, että nollassa asteessa tarkkuus on enää  $\pm 0,3$  astetta. Anturit eivät olleet aktiivisessa ilmanvirtauksessa kuten psykrometrin anturit (kuva 10, Thiesin tuuletetun psykrometrin takana). Suodattimen ja säteilysuojan rakenne voimistivat antureiden omaa mittaussuuntia siten, että anturit eivät mittaa yhtä nopeasti vaihtelevissa olosuhteissa kuin psykrometrin anturit. Alun perin koko laitetta ei ole suunniteltu tällaisiin liikkuviin mittauksiin. Sitä huolimatta laitteen mittaukset otettiin talteen kaikkien luotausajojen aikana psykrometrin rinnalla. Laite soveltuu tutkimukseen varsin hyvin, jos halutaan tarkastella keskimääräisiä oloja. Ilmatieteen laitos käyttää Humicap HMP45A kosteusanturia omilla automaattisilla sääasemilla. Silloin se on sijoitettuna väljempään säteilysuojaan.

### 3.4.3 GPS-vastaanotin

Yhtä tärkeä kuin psykrometri on ilman lämpötilan mittaukselle, on GPS-vastaanotin paikan ja ajan määrittämiselle. Uuden tekniikan ansiosta voi yksi henkilö suorittaa luotausajot ja yhdistää havainnot heti paikka- ja aikatietoihin. Tutkimusprojektissa käytetty vastaanotin oli GlobalSat Technology Corporationin RS232 GPS receiver BR-355. Laite oli vain 53 mm läpimitaltaan ja 19 mm korkea. Kiinnitys tapahtui magneetilla luotausauton katolle. Laite käyttää parhaimmillaan 20 satelliittia. Alustavat epäilykset siitä, miten GPS-satelliittien signaalien vastaanottaminen kapeassa katukuilussa onnistuisi, eivät pitäneet paikkaansa. Vastaanottimen ajallinen resoluutio voitiin säätää vapaasti tallennuslaitteen tarpeiden mukaan. Laitteen käyttämä koordinaattijärjestelmä oli WGS-84. Laitteen paikannustarkkuus oli noin 10 metriä. Koordinaattien tarkastelun jälkeen päädyttiin siihen, että se tarkoittaa WGS-84-koordinaattijärjestelmässä paikannustarkkuutta viidellä desimaalilla itälänsisuunnassa 9 metriä ja pohjois-eteläsuunnassa 28 metriä.

### 3.4.4 Dataloggeri

Dataloggerina käytettiin kahdeksan analogisen kanavan Vaisalan QML20:tä. Se pystyy vastaanottamaan mittauksia sekunnin välein. Kun keskustan reitin läpiajaminen kesti keskimäärin 75 minuuttia kertyi 4.500 havaintoa. Esikaupunkireitillä kertyi vähintään 7200

havaintoa. Dataloggeriin oli kytketty kaikki luotausajolla mukana olevat luotauslaitteet, psykrometri, Vaisalan Humicap ja GPS-vastaanotin. Varsin rajoitetun 1,7 megabitin kapasiteetin takia muisti oli tyhjennettävä jokaisen keskustan - ja esikaupungin luotausajon jälkeen. Koko luotausjärjestelmän voimanlähteenä toimi ulkopuolinen akku. Akun lataus riitti yleensä kahden viikon luotausajoille. Suuren kaapelimäärän takia dataloggeri oli sijoitettu luotausauton katolle säänkestävään suojakoteloon (kuva 11). Dataloggeri oli toinen projektia varten erikseen hankittu laite. Dataloggerin ja mittauslaitteiden yhteentoimivuuden varmistamiseksi projekti sai tukea Ilmatieteen laitoksen havaintotekniseltä osastolta. Kaikkien mittareiden tuloksia voitiin seurata samanaikaisesti luotausajoilla dataloggerin yhteydessä olevalta kannettavalta tietokoneelta.

### 3.5 Luotautustietojen käsittely

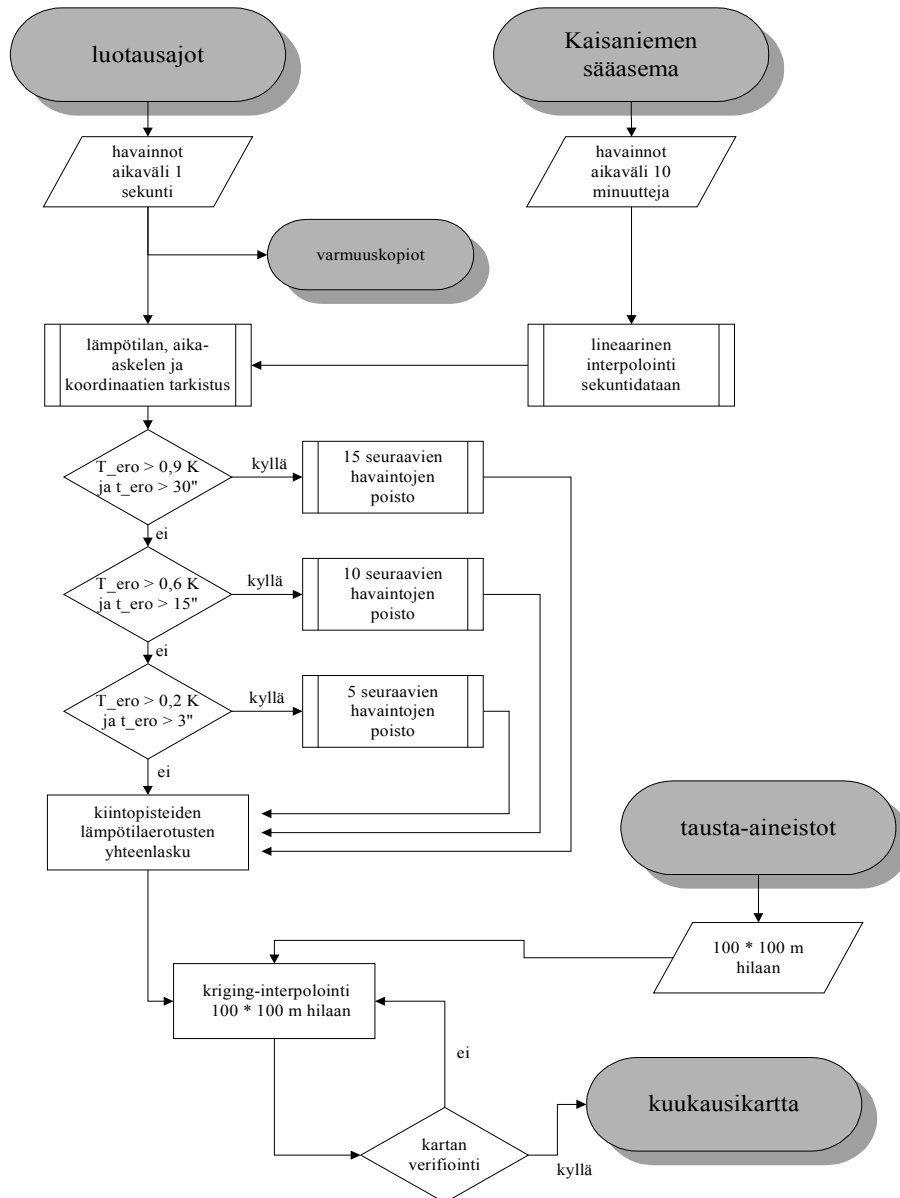
Mittauksia projektin aikana kertyi yhteensä noin miljoona kappaletta. Luotausajolla mitattiin sekä kuiva- että kostealämpötilaa. Kostealämpötilaa mitattiin kuitenkin vain kun lämpötila oli 0 °C yläpuolella. Sen jälkeen kostealämpötilan luotausanturin mittauksia käytettiin kuivan luotausanturin tarkastamiseen. Mitatuista ilman lämpötiloista laskettiin neljä meteorologista suuretta: kastepiste, suhteellinen kosteus, vesihöyryn osapaine ja ekvivalenttilämpötila. Kaikki neljä suuretta liittyvät ihmisten hyvinvointiin ja ovat käytettävissä lisätutkimuksiin. Tässä tutkimuksessa keskityttiin vain ilman lämpötiloihin.

Jokaiselle reitille syntyi oma päivä- ja yödatatiedosto, yhteensä 154 erillistiedostoa. Luotautustietojen käsittely alkoi heti luotausajojen alkamisesta. Näen ollen tietojen tarkastelu edesauttoi laadun varmistamisessa. Havainnot käsiteltiin lämpötilojen havaitsemisesta kiintopisteiden keskiarvoihin seuraavasti. Luotausajon aikana havainnot tallennettiin automaattisesti sekunnin välein GPS-satelliittien paikantiedoilla ja aikamerkillä dataloggerin muistiin. Jokaisen luotausajon jälkeen tiedot siirrettiin tietokoneelle.

Tässä vaiheessa Helsinki Kaisaniemen sääaseman kymmenen minuutin lämpötilahavainnot interpoloitiin sekuntidataksi ja liitettiin luotausajojen havaintoihin. Seuraavaksi aliohjelmalla poimittiin jokaisesta koordinaatista vain ensimmäinen havainto. Liikenteen aiheuttamia virrehavaintoja poistettiin yksinkertaisella tarkastusalgoritmilla. Oletettiin, että jos koordinaatit pysyvät samana luotausauto seisoo tai liikkuu hyvin hitaasti esimerkiksi liikennevalojen edessä tai liikenneruuhkassa. Silloin virhemittausten mahdollisuus kasvaa. Jos samasta koordinaatista oli enemmän kuin kolme havaintoa ja lämpötilaero seuraavaan havaintoon kasvoi suuremmaksi kuin 0,2 K, seuraavat viisi havaintoa hylättiin, koska

oletettiin, että lämpömittarin palautus kestäisi tuon ajan.

Muita aika- ja lämpötilaerojen raja-arvot olivat 15 sekuntia ja 0,6 K ja 30 sekuntia ja 0,9 K, jolloin hylättyjen havaintojen määrät olivat vastaavasti 10 ja 15. Tämän tarkastelun jälkeen laskettiin seuraavalla ohjelmalla yhden luotausajon reittien kiintopisteiden ja Helsingin



Kuva 13. Vuodiagrammi projektin tietojen käsittelystä havainnoista lämpötilaerotuskuukausikarttoihin. Selitykset tekstissä. ( $T_{ero}$ , lämpötilan ero;  $t_{ero}$ , aikaero).

Kaisaniemen lämpötilaerojen keskiarvoja. Siihen tarkoitukseen kerättiin yhteen kaikki kiintopisteiden koordinaatin vieressä alle 50 metrin etäisyydelle osuneet havainnot. Lopuksi laskettiin vielä kaikki samaan kuukauteen kuuluvien luotausajojen lämpötilaerojen keskiarvot. Tiedot siirrettiin sitten Ilmatieteen laitoksen alueelliseen tietojen analyysiin tarkoitettu kriging-tietokoneympäristöön. Ohjelmalla interpoloitiin saatuja keskiarvoja koko Helsingin



kaupungin lämpötilakartaksi (kuva 13). Lopullinen karttaesitys tehtiin sitten vielä ArcGIS®-ohjelmalla.

### 3.5.1 Dataloggerin .cvs-tiedosto

Dataloggerin tuottama pakattu datatiedosto purkautuu valmistajan omalla ohjelmalla tiedoston siirtovaiheessa myös tekstinkäsittelyohjelmalla luettavaan pilkulla erotettuun tekstimuotoon. Näen ollen tietojen käsittely oli myös mahdollista tehdä taulukkolaskentaohjelmalla. Suuren data- ja tiedostomäärän takia tämä mahdollisuus hylättiin alusta lähtien. Dataloggerin tuottamia tiedostoja käytettiin kuitenkin datan varmistuskopioina. Havaintojen siirto MySQL-tietokantaan suoritettiin vasta projektin loppuvaiheessa. Tietokannan avulla oli mahdollista tehdä yksittäisiä tapauskohtaisia tarkasteluja.

### 3.5.2 Turbo-Basic-ohjelman skriptit

Kaikki Turbo-Basic-ohjelmat kirjoitettiin ja testattiin luotausajojen alkuvaiheessa. Alkuvaiheen tuloksia tarkastettiin taulukkolaskentaohjelmien avulla. Suurimmat ongelmat syntyivät aika- ja lämpötilaerojen tarkastusalgoritmia kehittäessä. Myös kiintopisteiden läheisyys tuotti silloin tällöin vaikeuksia. Ohjelmoitu tietojenkäsittely mahdollistaa kaikkien tuloksien uudelleen tarkasteluja muuttuvilla aika-, paikka- ja lämpötilarajoilla.

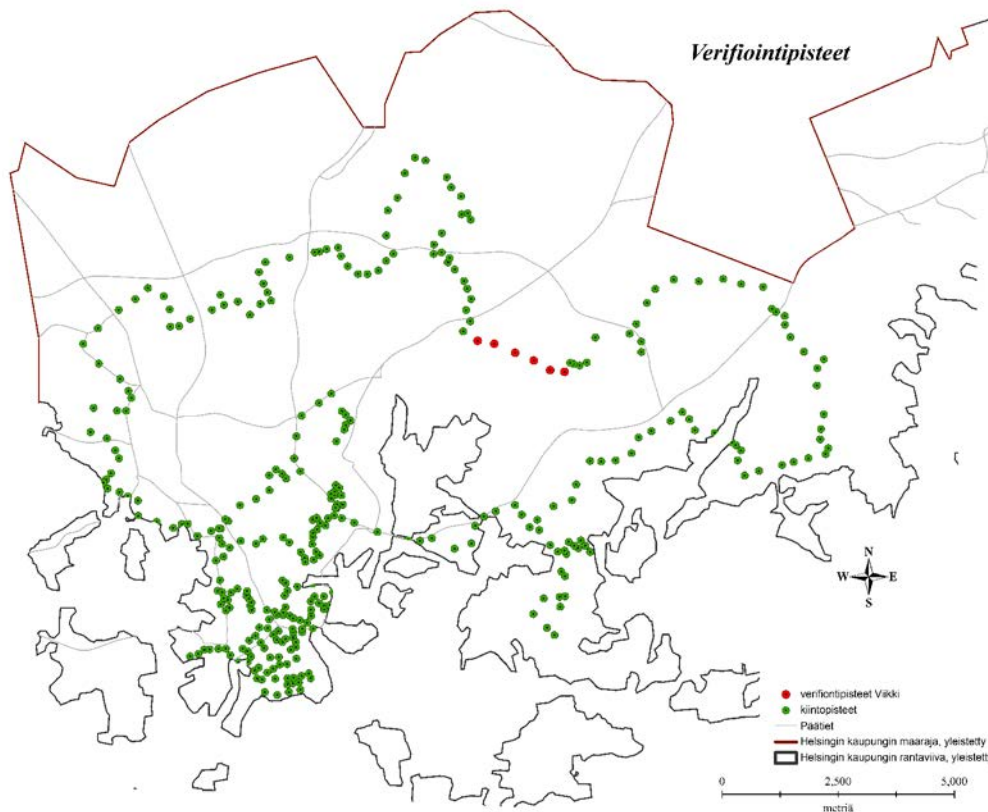
### 3.5.3 Tilastollinen tarkastelu

Tilastollinen tarkastelu rajoittui peruslaskentoihin kuten korrelaatiokertoimen ja sen merkitsevyyden määrittämiseen. Työkaluna siihen käytettiin sekä R ohjelmointi- ja tilastollista kieltä (R 2010), Michael J. Crawley'in The R Book:a, (Crawley 2007), että Microsoftin excel-taulukkolaskentaohjelmaa.

### 3.5.4 Kriging-interpolointimenetelmä

Krigingillä tarkoitetaan menetelmää, jolla voidaan interpoloida ympäröivien arvojen avulla arvoja paikoille, joilla ei ole havaintoja. Menetelmä sai nimensä eteläafrikkalaisen Krigen (1951) mukaan. Varsinaista menetelmää on kehitelty vuodesta 1963 lähtien ja se on saanut vankan aseman geotieteellisenä interpolointimenetelmänä. Kriging kuuluu pienimmän

neliösumman menetelmäperheeseen. Käyttötarkoituksen mukaisesti menetelmästä on syntynyt erilaisia kehityssuuntia, joista yhtä, niin kutsuttua residuaalikrigingiä, käytetään myös Ilmatieteen laitoksessa (Henttonen 1992). Szymanowski ja Kryza (2009) arvioivat residuaalikrigingin parhaaksi menetelmäksi kaupunkilämpösaareketutkimuksessa. Jokaisella tilasto- tai interpolointimenetelmällä on oma verifiointimenetelmänsä. Krigingin kaltaisessa menetelmässä käytetään ristiinvalidointia. Menetelmässä poistetaan vuorotellen yksi arvo kerrallaan ja vertaillaan uuden interpoloinnin avulla virhe-erotuksia ennustetun ja havaitun arvon välillä (Bailey ja Gatrell, 1995). Havaintojen vähyyden ja luotaus tietojen keräilytavan takia ristiinvalidointia oli tässä projekti mahdotonta toteuttaa. Sen sijaan päätettiin testata, kuinka hyvin residuaalikriging pystyy ennustamaan tietyllä luotausreitillä poistettujen kiintopisteiden arvoja. Tarkastelualueeksi luotausreitiltä valittiin Viikin tasainen peltoinen ja puistomainen osuus (kuva 14).



Kuva 14. Valittujen tarkastuskiintopisteiden sijainnit (punaiset pisteet) luotausreitillä (vihreät pisteet). (karttapohja ArcGIS®).

Kiintopisteet ovat testialueella lähes samalla etäisyydellä toisistaan. Uusien verifiointiarvojen ja luotausarvojen välillä tehtiin erilaisia vertailuja, kuten vertailu vaihteluvälien - ja hajonta-arvojen välillä. Yksikään näistä tuloksista ei osoittanut riippuvuuksia verifiointiarvojen ja

luotausarvojen välillä. Tulos vahvistaa vielä kerran, että järkevä interpoloinnin verifiointi ja tulkinta on havaintojen vähyyden takia mahdoton toteuttaa.

### 3.5.5 Graafinen esitys ArcGIS®-ohjelmistolla

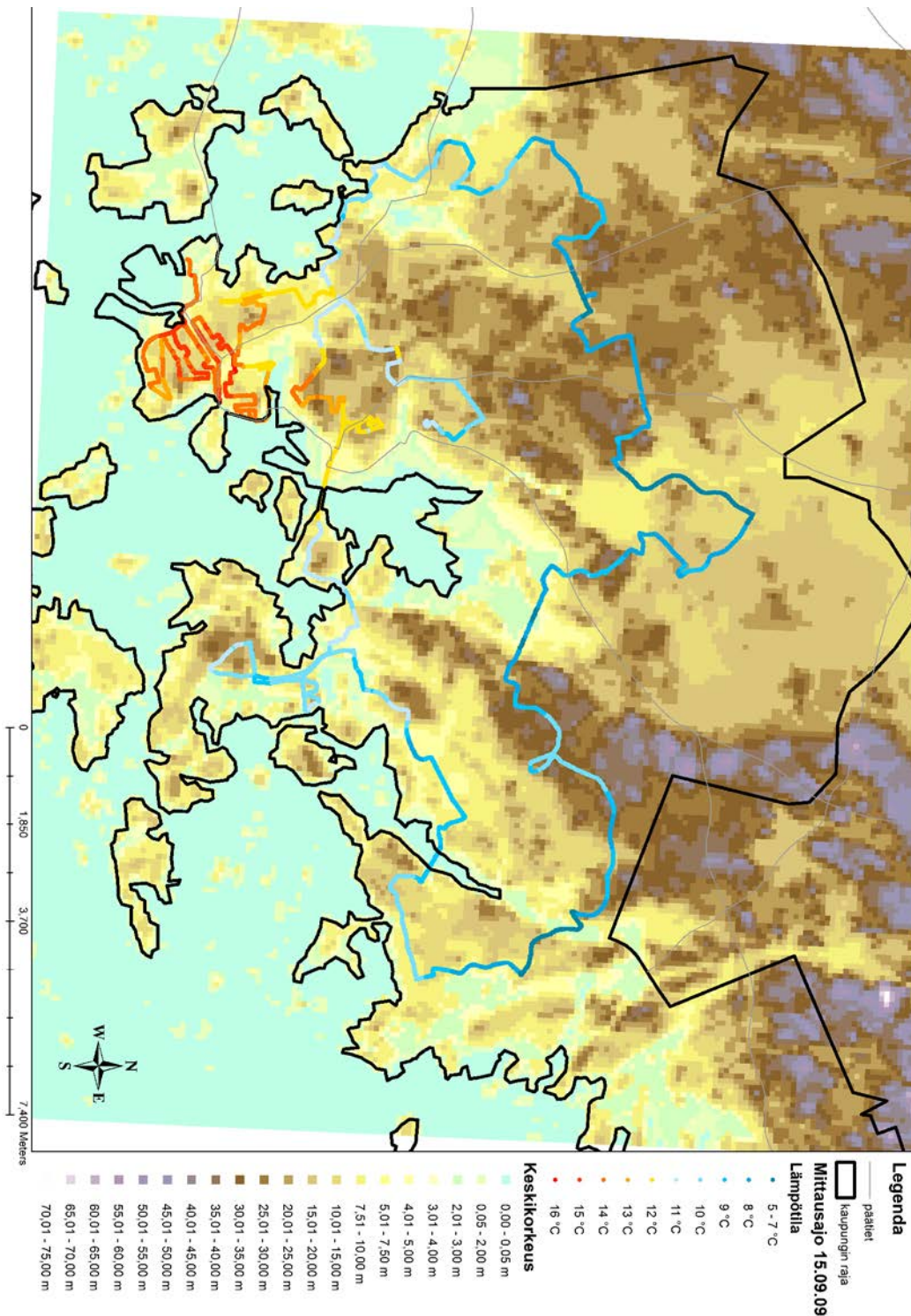
Yksi tutkimuksen tavoitteista on loppuun asti viimeistellyt lämpötilaerotuskartat. Esimerkkinä oli Auerin, Böhmin ja Mohrl (1989) karttateos *Klima von Wien*. Tämän tutkimuksen kartat on viimeistely ArcGIS® -paikkatieto-ohjelmistolla. Ohjelmiston valintaan vaikutti se, että oli jo valmiina saatavia kartta-aineistoja: Helsingin kaupungin rajat, ääriveriivat ja tiestöt. Myös helppous yhdistää erilaisia koordinaattijärjestelmiä puhuu ohjelmankäytön puolesta. Koska lämpötilaluotaushavaintojen lähdekoordinaatisto oli WGS84, kriging-interpolointimenetelmästä saatu hila-aineisto taas suomalaisessa kartastokoordinaattijärjestelmässä KKJ2, ArcGIS®-ohjelmalla ei tehty muita laskennallisia toimintoja.

## 4. Tausta-aineistot

Tausta-aineistojen valinta vaikutti olennaisesti luotau tulosten selittävyteen. Tässä tutkimuksessa suunniteltiin käytettäväksi kuutta tausta-aineistoa: paikan korkeus merenpinnasta, merellisyys, puuston osuus pinta-alasta, avoimuus, rakennusten tilavuus ja väestön tiheys. Rakennusten tilavuuden ja väestön aineisto saatiin Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymältä (HSY) sähköisessä muodossa SeutuCD'08:na (HSY 2010). Kaikki muut aineistot saatiin Maanmittauslaitokselta (Maanmittauslaitos 2009). Osa oli sen omaa aineistoa (korkeus merenpinnasta), osa yleiseurooppalaisena yhteistyönä (CORINE land cover, EEA 2009) tehtyä. Kaikki aineistot olivat vapaasti käytettävissä tutkimusta varten. Aineistojen pinta-alayksiköt olivat erilaisia. Maanmittauslaitoksen aineistot olivat rasteritietona 25 metrin hilassa, SeutuCD:n aineistot olivat pisteaineistona. Sen vuoksi kaikki aineistot muutettiin 100 metrin hilaan. Tässä yhteydessä hyväksyttiin pisteaineiston syntyvä epätarkkuus siirtyessä hilapisteeseen, koska tiheämpi hila, 25\*25 metriä tai 50\*50 metriä olisi moninkertaistunut hilapisteiden määrä ja heikentänyt tutkimuksen tulosten tulkintaa ja laatua. Pienempi hilakoko kuin 100 metriä olisi vähentänyt lämpötilahavaintojen määrä hilapisteessä. Muita mahdollisia tausta-aineistoja olisivat rosoisuuskorkeus, rakennetun ja rakentamattoman pinta-alan suhde, kasvillisuuden normalisoitujen erotusten indeksi (NDVI), terminen johtokyky ja antropogeeninen lämmön vuo (Szymanowski & Kryza, 2009: 176). Näitä tausta-aineistoja ei kuitenkaan ollut saatavana.

#### 4.1. Topografinen korkeusaineisto

Eräs tärkeä tausta-aineisto kaupunki-ilmastotutkimuksessa on korkeus merenpinnasta. Normaali-ilmakehässä ilma jäähtyy 0,65 – 0,98 K 100 metriä ylöspäin mentäessä.



Kuva. 15. Luotausajon 15./16. syyskuuta 2009 kaikki absoluuttiset lämpötilahavainnot, pohjakartana 100 metrin keskikorkeus merenpinnasta (kartan ulkoasu: ArcGIS® 9.3)

Käytetyssä hilassa (38 191 pistettä) korkeus on laskettu kuudentoista 25\*25 metrin hilan keskikorkeudesta. Kaikkien hilapisteiden suurin keskikorkeus on 70,47 metriä, kun se on 36,9 metriä kiintopisteiden hilaruutujen yhteydessä. Keskimäärin Helsingin korkeuserot eivät ole suuria, mutta sekä kantakaupungissa Ullanlinnassa ja Kruununhaassa, että Kalliossa, Pihlajamäellä ja Mellunkylässä löytyy pienillä etäisyyksillä suurempia korkeuseroja. Kuvassa 15 on esitetty topografian vaikutus ilman lämpötilaan. Vaikutus tulee parhaiten esille siellä missä muut vahvat tekijät eivät vaikuta. Esimerkiksi Helsingin keskustassa Kruununhaan kaupunkiosassa korkeuseron vaikutusta ei juuri näe. Sen sijaan Laajasalon, Kontulan, Myllypuron ja Itä-Pakilan alueilla lämpötila nousee, kun maasto on korkeampaa. Se merkitsee sitä, että tällöin vallitsee säätyyppi, joka suosii pintainversioiden muodostumista. Tässä säätyypissä pilvisuus on vähäinen ja tuuli on heikkoa tai ei tuule ollenkaan. Silloin maanpinta jäähtyy ilmaa nopeammin ja jäähdyttää voimakkaammin ilmakehän alempia kerroksia. Sen seurauksena ilman lämpötila nousee ylöspäin mentäessä. Toinen ilmiö havaitaan Helsingin ydinkeskustan etelä- ja länsilaidalla. Siellä luotausreitti siirtyi tarkoituksella rakennetun ja rakentamattoman rajalta korttelin tai kaksi rakennetulle alueelle ydinkeskustaan päin. Tässä yhteydessä havaintaan lämpötilan nousua. Ilmiötä ei esiinny Helsingin ydinkeskustan itälaidalla, missä myös suuret korkeuserot vaikuttavat lämpötilaan. Kuva 15 esittää 15./16. syyskuuta 2009 -luotausajon kaikki absoluuttiset lämpötilahavainnot, pohjakartana 100 metrin keskikorkeus merenpinnasta.

#### 4.2. Merellisyys

Toinen tärkeä maantieteellinen taustatieto on paikan etäisyys merkittävistä vesistöistä. Helsingissä Suomenlahden läheisyys vaikuttaa kaupunki-ilmastoon monella tavalla eri vuoden aikoina. Talvella, kun meri on jäässä, jään läheinen ilmakerros jäähtyy paljon enemmän kuin kaupungin keskustassa. Pienellä tuulen vireellä sopivasta suunnasta tämä kylmempi ilma pääsee keskustaan. Keväällä kylmempi merivesi jäähdyttää tehokkaasti Helsingin niemeä. Syksyllä vaikutus on toisinpäin. Tuulen suunta muuttaa meren vaikutusta jokaisena vuodenaikana. Kaikista edellä mainituista syistä meren vaikutus rajoitettiin vain meren välittömään läheisyyteen. Merellisyysluku 0 - 100 prosenttiin kuvaa rantakaistaleen 100 metrin hilan meriosuuden. Merellisyys on laskettu CORINE land cover - 25\*25 metrin rasteriaineistosta.

#### 4.3. Puuston osuus

Myös puuston osuuden laskettiin CORINE land cover 25\*25 metrin rasteriaineistosta. Puuston osuus otettiin mukaan tarkasteluun, koska haluttiin käyttää haihduntaa edustava luonnontekijää selittävien tausta-aineistoihin. Helsingissä on myös suuria puistoja, joiden paikallinen vaikutus ilmastoon on merkittävä. Puuston määrä esitettiin 0 - 100 prosenttiin. Puusto vaikuttaa ilmastoon kevästä syksyyn kasvukauden aikana, jolloin päivän keskilämpötila on 5 °C yläpuolella, haihdunnan takia viilentävästi. Loppusyksyllä ja alkukevällä puurungot voivat auringonpaisteessa toimia energiasäteilyvarastona ja -heijastimena ja siten myös lämmittää ympäristönsä.

#### 4.4. Avoimuus

Helsingin kaupungin alueella on suuria avoimia peltoja, niittyjä sekä vähäpuustoisia puistoalueita. Niiden vaikutus on yleisesti sekä päivällä että yöllä viilentävä, koska täällä ei ole energiasäteilyä varastoivia rakennuksia tai suojaavia metsiköitä. Näin ollen avoimuus toimii TNK:n (kappale 2.2) vastakohtana. Avoimuuden luku laskettiin samalla tavalla 0 - 100 prosenttiin kuin edellä olevat aineistot CORINE land cover rasteriaineistosta.

#### 4.5. Rakennusten tilavuus

Kaikilla edellä mainituilla tausta-aineistoilla on luonnollinen vaikutus kaupunki-ilmastoon. Rakennusten tilavuus otettiin mukaan tarkasteluun, koska etsittiin sopivaa tausta-aineistoa esittämään ihmisten luomaa kaupunkia ja sen antropogeenista energiakulutusta. Kuten jo varhaisessa kaupunki-ilmastotutkimuksessa todettiin, myös yksittäiset isommat rakennukset luovat omat lämpösaarekkeensa. Tausta-aineisto oli käytettävissä pisteaineistona. Koko kaupungin 38 191 hilapisteistä 13 445 hilapisteeseen oli sijoitettu rakennuksia (35,2%). Suurin rakennusten tilavuus oli 37 872 m<sup>3</sup>. Kiintopisteiden (336 kappaletta) vastaavat luvut olivat 270, 80,4% ja 13 484 m<sup>3</sup>. Näin ollen luotausreitti kulki selvästi enemmän rakennettujen alueiden läpi. Helsingistä löytyy 37 rakennusta, joiden tilavuus on suurempi kuin 200.000 m<sup>3</sup>. Se tarkoittaa tutkimuksen hilakokoista ja 20 metriä korkeaa rakennusta, jolloin hilapiste itse on kokonaan rakennuksen peittämä.

## 4.6 Väestötiheys

Kuudenneksi tausta-aineistoksi valittiin väestömäärä pistetietona. Myös tälle aineistolle voitiin tehdä samanlaista jakaumanvertailua kuin rakennusten tilavuusaineistolle. Niiden hilapisteiden määrä, missä kaupunkilaisia asui, oli noin 8% (27,7%) pienempi kuin rakennusten hilapisteiden ja suurin asukastiheys 100 metrin hilassa oli 703 asukasta. Vastaavat luvut kiintopisteiden puolella olivat 215, 64,0% ja 591. Myös väestötiheyden perusteella luotausreitti oli keskimääräistä kaupunkimaisempi.

## 5. Tulosten tarkastelu

### 5.1 Tausta-aineistojen tilastollinen tarkastelu

Tausta-aineistojen valinnan ja hilapisteisiin sijoituksen jälkeen testattiin niiden keskinäisiä riippuvuuksia. Tällainen testaus on tarpeellinen, koska erilaiset tausta-aineistot voivat olla riippuvaisia myös keskenään. Sellaista riippuvuutta kutsutaan multikollinearisuudeksi ja se voi olla niin vahva, että näiden selittävien tekijöiden suhde heikentää regressioanalyysin tulosta ja tekee vaikeaksi todistaa, mikä selittävä tekijä on merkitsevempi.

Koska kaikki kuusi aineistoa noudattivat ei-normaalijakaumaa, käytettiin Spearmanin järjestyskorrelaatiokerrointestiä. Sen tärkeimmät tunnusluvut ovat  $\rho$  (rho) ja  $p$ . Näistä  $\rho$  kertoo riippuvuudesta ja  $p$  merkitsevyydestä. Multikollinearisuuden oletetaan vaikuttavan Spearmanin testissä, kun  $\rho$  on pienempi kuin -0,7 ja  $\rho$  on suurempi kuin 0,7. Taulukossa 3 on esitetty tausta-aineistojen keskinäiset riippuvuudet. Yksiään riippuvuussuhde ei saavuttanut edellä mainittuja rajoja. Lähellä niitä ovat kuitenkin sekä puuston osuuden ja rakennusten tilavuuden ( $\rho = -0,52$ ) että merellisyden ja korkeuden ( $\rho = -0,61$ ) suhde. Tässä vaiheessa multikollinearisuuden puute ei herätä epäilyksiä, koska suurimmalla osalla tausta-aineistosta ei ole yhteisiä tekijöitä. Toisin on rakennusten tilavuuden ja väestötiheyden kanssa. Siellä missä paljon ihmisiä on myös isoja rakennuksia.

Toisaalta isoissa kauppakeskuksissa, julkisissa rakennuksissa ja varastohalleissa ei asu kukaan. Tausta-aineistojen keskinäinen riippuvuus on kuitenkin vain 0,36, mutta merkitsevä 95% luottamustasolla. Korrelaatiokertoimien etumerkkitarkastelu tuo perustavia fysikaalisia ominaisuuksia esiin.

Taulukko 3. Tausta-aineistojen keskenmääräiset riippuvuudet, värillinen tausta merkitsee, että korrelaatio ei ole merkitsevä 95% luottamustasolla.

| $\rho$        | rakennusten tilavuus | puuston osuus | korkeus | merellisyys | avoimuus |
|---------------|----------------------|---------------|---------|-------------|----------|
| puuston osuus | -0,52                | -             | -       | -           | -        |
| korkeus       | 0,04                 | 0,01          | -       | -           | -        |
| merellisyys   | 0,06                 | -0,05         | -0,61   | -           | -        |
| avoimuus      | -0,07                | -0,07         | 0,04    | 0,03        | -        |
| väestötiheys  | 0,36                 | -0,26         | 0,14    | 0,08        | 0,04     |

Esimerkiksi puuston osuuden ja rakennusten tilavuuden negatiivinen korrelaatio, -0,52, selittyy hyvin siten, että puuston viilentävä vaikutus kasvaa kun puuston osuus kasvaa. Toinen tilastollinen tarkastelu käsitteli tausta-aineistojen suhdetta kuukausittaisiin ilman lämpötilahavaintoihin.

Taulukossa 4 on esitetty tausta-aineistojen riippuvuudet kuukausittaisiin ilman lämpötilahavaintoihin. Suurin positiivinen korrelaatio kaikkien kuukausien aikana oli rakennusten tilavuuden ja ilman lämpötilojen välillä. Puuston osuuden ja lämpötilojen välinen korrelaatiokerroin oli aina negatiivinen. Tämä tarkoittaa, että puustolla olisi aina viilentävä vaikutus. Tulos on ristiriidassa sen kanssa, että puuston viilentävä haihdutus oletetaan vain kesällä. Tarkempi syy jää vielä tulevaisissa tutkimuksissa selvitettäväksi.

Taulukko 4. Tausta-aineistojen ja kuukausittaisten lämpötilahavaintojen erotusten keskenmääräiset riippuvuudet, värillinen tausta merkitsee, että korrelaatio ei ole merkitsevä 95% luottamustasolla.

| $\rho$        | rakennusten tilavuus | avoimuus | korkeus | merellisyys | puuston osuus | väestö |
|---------------|----------------------|----------|---------|-------------|---------------|--------|
| heinäkuu '09  | 0,22                 | 0,04     | 0,10    | -0,24       | -0,17         | -0,14  |
| elokuu '09    | 0,54                 | 0,18     | -0,22   | 0,16        | -0,40         | 0,20   |
| syyskuu '09   | 0,56                 | 0,11     | -0,31   | 0,36        | -0,37         | 0,20   |
| lokakuu '09   | 0,55                 | 0,18     | -0,41   | 0,33        | -0,35         | 0,24   |
| marraskuu '09 | 0,56                 | 0,18     | -0,40   | 0,26        | -0,37         | 0,19   |
| joulukuu '09  | 0,52                 | 0,16     | -0,40   | 0,36        | -0,37         | 0,27   |
| tammikuu '10  | 0,61                 | 0,14     | -0,26   | 0,31        | -0,35         | 0,28   |
| helmikuu '10  | 0,59                 | 0,20     | -0,25   | 0,25        | -0,36         | 0,27   |
| maaliskuu '10 | 0,50                 | 0,15     | -0,12   | 0,15        | -0,29         | 0,17   |
| huhtikuu '10  | 0,42                 | 0,02     | 0,36    | -0,41       | -0,33         | 0,19   |
| toukokuu '10  | 0,31                 | 0,03     | 0,11    | -0,19       | -0,33         | 0,09   |
| kesäkuu '10   | 0,57                 | 0,06     | -0,12   | 0,21        | -0,41         | 0,24   |



Sen sijaan merellisyyden ja korkeuden etumerkkivaihdolle huhtikuussa ja toukokuussa 2010 löytyy selkeä selitys. Kevään puoleiset pintainversiot yhdessä kylmän meren kanssa pitivät alailmankerrokset kylmänä. Monien korrelaatiokertoimien suurimmat arvot löytyvät talvella, eli juuri silloin, kun niiden tausta-aineistojen vaikutus on suurimmillaan.

Tulkinta on, että kesällä löytyy vielä muita vaikuttavien tekijöitä kuten esimerkiksi energiasäteily ja myös Szymanowskin ja Kryzan (2009: 16) mainitsevat tekijät: rosoisuuskorkeus, rakennetun ja rakentamattoman pinta-alan suhde, kasvillisuuden normalisoitujen erotusten indeksi (NDVI), terminen johtokyky ja antropogeeninen lämmön vuo. Talvella antropogeeninen vaikutus näkyy rakennusten lämmityksen kautta.

## 5.2 Tausta-aineistojen vaikutuksesta interpolointiin

Suurista korrelaatioiden merkitsevyyksistä huolimatta kaikkien tausta-aineistojen käyttöä interpoloinnissa ei ole saatu toteutettua. Tapauksissa, joissa on ollut kaksi vahvaa korrelaatiota molempiin suuntiin kriging-interpolointimenetelmä ei ole tuottanut selkeää selitettävää karttaa. Vasta kun yksi tausta-aineisto jätettiin pois, tulokset olivat järkeviä. Niissä tapauksissa, missä tausta-aineistoa jouduttiin poistamaan, valittiin aina toiseksi vahvimmin korreloiva aineisto. Positiivisella korrelaatiolla olivat rakennusten tilavuudet ja väestö, jolloin väestö suljettiin pois. Negatiivisella korrelaatiolla poissulkemispäätös ei ollut yksiselitteinen, ja ratkaisu tehtiin vuodenaikojen/fysikaalisen syiden perusteella. Syitä, miksi interpolointimenetelmä käyttäytyi näin, ei ole saatu ratkaistuksi. Ensiarviona syinä pidetään havaintoaineiston maantieteellistä jakaumaa, havaintojen käsittelymenetelmää ja tutkittavan alueen heterogeenisuutta. Taulukkoon 5 on merkitty interpoloinnissa käytetyt tausta-aineistot. Perusteluja tausta-aineiston valintaan esitettiin jo tausta-aineistojen esittelyn yhteydessä. Tausta-aineistojen tarkoitus oli luoda pohjaa interpoloinnille niiden fysikaalisten ominaisuuksien ja paikan ilman lämpötilan vuorovaikutuksen kautta. On itsestään selvää, että kun tausta-aineistojen lukumäärä on suurempi kuin kaksi, niiden korrelaatiot ilman lämpötilan suhteen ovat sekä positiivisia että negatiivisia. Koko interpoloinnin tarkastelun aikana yhden tausta-aineiston, väestön, mukaanotto interpolointiin aiheutti vakavan ongelman graafiselle esitykselle. Ongelmaa ei saatu ratkaistua ja se johti väestön hylkäämiseen interpoloinnin tausta-aineistona kaikkina kuukausina.

Taulukko 5: Interpolaation tausta-aineistot (x = käytetty interpoloinnissa, - = ei ole käytetty interpoloinnissa).

|               | rakennusten tilavuus | avoimuus | korkeus | merellisyys | puuston osuus | väestö |
|---------------|----------------------|----------|---------|-------------|---------------|--------|
| heinäkuu '09  | x                    | x        | x       | x           | x             | -      |
| elokuu '09    | x                    | x        | x       | x           | x             | -      |
| syyskuu '09   | x                    | x        | x       | x           | x             | -      |
| lokakuu '09   | x                    | x        | x       | x           | x             | -      |
| marraskuu '09 | x                    | x        | x       | x           | x             | -      |
| joulukuu '09  | x                    | x        | x       | x           | -             | -      |
| tammikuu '10  | x                    | x        | x       | x           | -             | -      |
| helmikuu '10  | x                    | x        | x       | x           | -             | -      |
| maaliskuu '10 | x                    | x        | x       | x           | -             | -      |
| huhtikuu '10  | x                    | x        | x       | x           | x             | -      |
| toukokuu '10  | x                    | -        | x       | x           | x             | -      |
| kesäkuu '10   | x                    | -        | -       | -           | x             | -      |

Mahdolliseksi syyksi väestön epäsopivuudesta tausta-aineistoksi esitetään muun muassa ilman lämpötilojen keruuta. Muiden tausta-aineistojen osittainen poissulkeminen interpoloinnista selitetään fysikaaliseksi. Selitykset on esitetty kyseisien kuukausien kohdalla luvuissa 5.1 – 5.12 .

### 5.3. Luotausten tarkastelu

Tuloksien tarkastelu rajoittuu tämän tutkimuksen aikana kehitetyn menetelmän kuukausi- ja vuosilämpötilakarttojen analyysiin. Alun perin oli myös suunniteltu esittää myös lämpötilakarttoja jokaiselle vuodenajalle. Tästä kuitenkin luovutettiin, koska ensinnäkin luotausjakson kesä ei ollut yhtenäinen ja toiseksi yksittäisten kuukausien lämpötilaheilahdusten vaikutus oli liian voimakas. Kaikille kuukausikartoille on liitetty sen kuukauden Helsinki Kaisaniemen ja Vantaalla Helsinki-Vantaan (Hki-Vantaa) lentoasemalla mitattuja lämpötiloja ja niiden normaalikauden 1971 - 2000 keskiarvoja. Sen lisäksi esitetään lämpösaarekkeen keskimääräistä kuukautista voimakkuutta näiden kahden aseman keskilämpötilan erotuksena (taulukot 7 – 18; Ilmatieteen laitos 2009, 2010). Äärimittausajojen ja kuukausien tilastollisen tarkastelun jälkeen analysoidaan kyseisen kuukauden lämpötilaerotuskarttaa fysikaalisesti ja maantieteellisesti. Apuna on edellä mainitut taulukot ja luotausajojen päiväkirja.

Ilmatieteen laitoksen kriging-interpolointimenetelmässä käytettyjen tausta-aineistojen yhdistelmää selitetään kuukausien kohdalla. Kaikkien erotuskarttojen nollatasona on keltainen värisävy. Kun kuukausikarttojen lämpötilaluokkaraja on 0,3 K koko lämpötilaskaalan esittämiseen tarvittiin 21 luokkaa. Monistustekniikan yleinen heikkouden takia lämpötilaskaala esitetään vain liukuväriskaalana. Meriveden lämpötilamittauksia ei ollut käytettävissä. Näin ollen kaikki Helsingin lähivesistöihin interpoloinut lämpötilat perustuvat rantaviivalla tehtyihin mittauksiin (katso kappale 4.2) ja eivät edusta vesialueita. Sen takia meripisteet kartalla peitettiin. Suomenlahden jäähtymistä ja sulamista seurattiin Ilmatieteen laitoksen Harmajan saaren sääasemalla. Asema sijaitsee noin kuusi kilometriä etelään Helsingin ydinkeskustan etelärajasta. Tutkimuksen vuosikartta luotiin yksittäisten kuukausitulosten keskiarvoina.

Taulukko 6 esittää luotausprojektin kuukausien lämpötilaerotusten arvoja ja näiden sijoja kuukausivertailussa (arvoista tarkemmin kappaleissa 5.3.1 – 5.3.12).

Taulukko 6. Ylin positiivinen ja alin negatiivinen lämpötilaerotus, erotusten hajonta ja keskiarvo sekä lämpötilaerotusten sijoitustaulukko.

sija<sup>1</sup> itseisarvoltaan suurimmasta pienimpään, sija<sup>2</sup> itseisarvoltaan pienimmästä suurimpaan, sija<sup>3</sup> alimmasta ylempään

|               | ylin positiivinen lämpötilaerotus | sija <sup>1</sup> | alin negatiivinen lämpötilaerotus | sija <sup>2</sup> | erotusten hajonta | sija <sup>1</sup> | erotusten keskiarvo | sija <sup>3</sup> |
|---------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| heinäkuu '09  | 1.03                              | 12.               | -0.58                             | 2.                | 0,192             | 8.                | 0,015               | 6                 |
| elokuu '09    | 2.47                              | 8.                | -0.72                             | 3.                | 0,167             | 10.               | 0,148               | 9.                |
| syyskuu '09   | 2.78                              | 6.                | -1,00                             | 5.                | 0,450             | 2.                | 0,103               | 7.                |
| lokakuu '09   | 3.96                              | 3.                | -0,90                             | 4.                | 0,261             | 4.                | 0,186               | 10.               |
| marraskuu '09 | 1.87                              | 10.               | -0.42                             | 1.                | 0,109             | 12.               | -0,019              | 5.                |
| joulukuu '09  | 2,90                              | 5.                | -1.11                             | 6.                | 0,167             | 10.               | -0,066              | 3.                |
| tammikuu '10  | 4.17                              | 1.                | -1.79                             | 12.               | 0,211             | 6.                | -0,062              | 4.                |
| helmikuu '10  | 3.58                              | 4.                | -1.39                             | 9.                | 0,197             | 7.                | -0,418              | 1.                |
| maaliskuu '10 | 2.45                              | 9.                | -1.29                             | 8.                | 0,176             | 9.                | -0,219              | 2.                |
| huhtikuu '10  | 2.72                              | 7.                | -1.53                             | 11.               | 0,570             | 1.                | 0,112               | 8.                |
| toukokuu '10  | 1.74                              | 11.               | -1.26                             | 7.                | 0,220             | 5.                | 0,332               | 12.               |
| kesäkuu '10   | 4.11                              | 2.                | -1,45                             | 10.               | 0,441             | 3.                | 0,249               | 11.               |

### 5.3.1 Heinäkuun 2009 luotaukset

Taulukko 7. Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman heinäkuun 2009 ilman lämpötilan tunnusluvut (Ilmatieteen laitos, 2009).

|                          | ylin    | päivä | keskilämpötila | alin   | päivä | 1971-2000<br>keskilämpötila | erotus 2010 -<br>1971-2000 |
|--------------------------|---------|-------|----------------|--------|-------|-----------------------------|----------------------------|
| Helsinki Kaisaniemi      | 28,5 °C | 2.    | 17,2 °C        | 7,7 °C | 6.    | 17,2 °C                     | 0,0 K                      |
| Hki-Vantaa               | 28,9 °C | 2.    | 17,2 °C        | 5,5 °C | 6.    | 16,9 °C                     | 0,3 K                      |
| erotus Kaisaniemi-Vantaa | -       | -     | 0,0 K          | -      | -     | -                           | -                          |

Vaikka kuukausi alkoi suurilla ilman lämpötilan vaihteluilla, heinäkuu 2009 oli ilman lämpötilan kannalta hyvin tasainen. Kuukauden ylin lämpötila mitattiin heti kuukauden alussa 2. heinäkuuta. Säättyypin nopean vaihtelun ansiosta myös kuukauden alin lämpötila mitattiin kuukauden ensimmäisellä kolmanneksella. Loppukuukauden lämpötilat vaihtelivat +12 ja +23 °C välillä. Kuukauden keskilämpötila oli Kaisaniemessä sama, 17,2 °C kuin normaalikauden 1971 – 2000 keskilämpötila. Heinäkuussa 2009 lämpösaarekeilmiötä ei voitu havaita Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman välillä (taulukko 7).

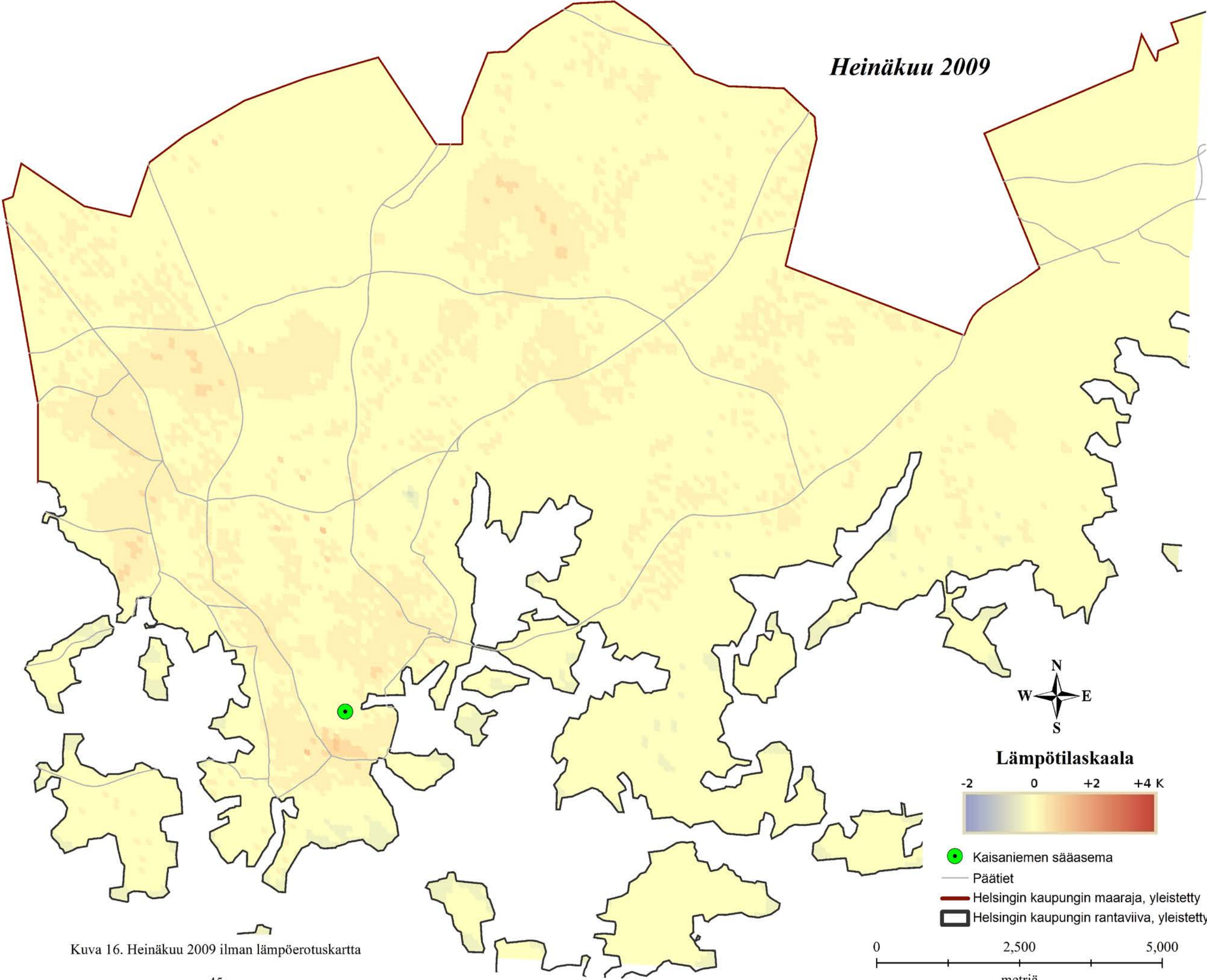
Heinäkuussa 2009 tehtiin yhteensä kymmenen luotausajoa, kahdeksan päivällä ja kaksi yöllä. Helsingin esikaupungeissa jäi projektin alun takia ajamatta 7. heinäkuuta suoritettava ensimmäinen luotausajo. Lämpötilojen erotus kiintopisteiden ja Helsinki Kaisaniemen välillä vaihteli +1,03 ja -0,58 K välillä. Vaihteluväli oli koko luotausprojektin pienin. Erotusten hajonta oli kuitenkin vasta viidenneksi pienin, mikä tarkoittaa, että paikasta toiseen on ollut suurempia vaihteluja.

#### **Kartta-analyysi** (kuva 16)

Kartan interpoloimiseen käytettiin kaikkia tausta-aineistoja väestön määrää lukuun ottamatta.

Koko kuukauden tasaisuus ilman lämpötiloissa heijastui interpoloidulla kartalla. Helsingin ydinkeskusta rautatieaseman ympäristöineen erottuu selvästi lämpimänä. Sen sijaan Suomenlahti jäädyttää tehokkaasti ydinkeskustan ranta-alueita. Myös Kalliossa laajat tiiviisti rakennetut alueet ovat selvästi lämpimämpiä kuin alavat rantakaistaleet. Muut lämpimät alueet Helsingin keskustan ulkopuolella olivat idässä antropogeenisen energiatuotannon aiheuttamia (Herttoniemen, Itäkeskuksen ja Vuosaaren keskukset) sekä pohjoisessa ja luoteessa topografian aiheuttamia (Malmi, Pohjois-Haaga, Munkkivuori ja Munkkiniemi). Yksittäisten suurempien rakennusten aiheuttamia paikallisia lämpösaarekkeita havaitaan vain heikosti koko interpolointialueella (Messukeskus, Arabia, Myyrmanni ja Keskon keskusvarasto Vantaalla).

Heinäkuu 2009



Kuva 16. Heinäkuu 2009 ilman lämpöerotuskartta

### 5.3.2 Elokuun 2009 luotaukset

Taulukko 8. Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman elokuun 2009 ilman lämpötilan tunnusluvut (Ilmatieteen laitos, 2009).

|                            | ylin    | päivä | keskilämpötila | alin   | päivä | 1971-200<br>keskilämpötila | erotus 2010 -<br>1971-2000 |
|----------------------------|---------|-------|----------------|--------|-------|----------------------------|----------------------------|
| Helsinki Kaisaniemi        | 25,6 °C | 7.    | 16,7 °C        | 8,4 °C | 20.   | 15,8 °C                    | 0,9 K                      |
| Hki-Vantaan lentoasema     | 26,0 °C | 9.    | 16,3 °C        | 7,1 °C | 20.   | 15,3 °C                    | 1,0 K                      |
| erotus Kaisaniemi - Vantaa | -       | -     | 0,4 K          | -      | -     | -                          | -                          |

Elokuu 2009 oli lämpötilan kannalta yhtä tasainen kuin heinäkuu 2009, vain kahtena päivänä ylin lämpötila ylitti hellerajan ( $T > 25$  °C) ja alin lämpötila laski alle 10 °C. Tasaisuudesta huolimatta kuukausi oli asteen normaaliarvoa lämpimämpi. Lämpösaarekkeen voimakkuus alkoi näkyä, kun Kaisaniemi oli 0,4 K Hki-Vantaan lentoasemaa lämpimämpi (taulukko 8).

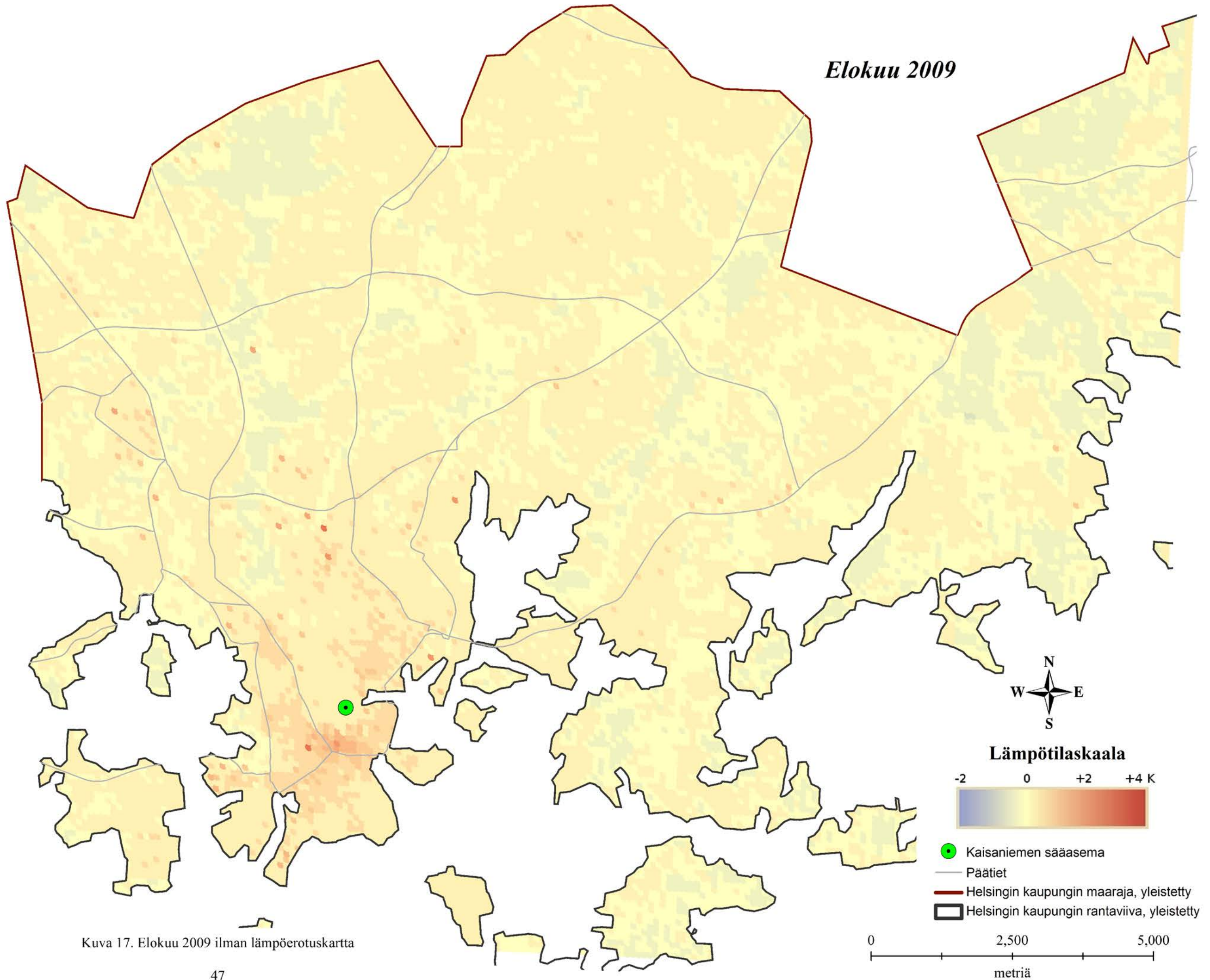
Elokuussa 2009 tehtiin 12 luotausajoja. Kuukauden lämpötilojen tasaisuus havaittiin myös luotausajoissa, vaikka lämpötilaerotuksen vaihtelu oli 3,19 K, niiden hajonta oli toiseksi pienin.

#### **Kartta-analyysi** (kuva 17)

Kartan interpoloimiseen käytettiin kaikkia tausta-aineistoja väestön määrää lukuun ottamatta.

Suurempi lämpötilaerotuksen vaihtelu edesauttoi interpoloinnissa. Sen osoituksena myös riippuvuudessa heikommat tausta-aineistot pääsevät vaikuttamaan. Puuston jäähdyttävä osuus tuli selvästi esille. Kartalla on hyvin havaittavissa Helsingin keskuspuiston sijainti keskustan pohjoisrajalta pohjoiseen. Myös laajat metsäiset alueet Laajasalon ja Santahaminan saarilla erottuvat hyvin. Harmajan saarella mitattu veden keskilämpötila oli +16,6 °C, rannikolla se olisi todennäköisesti vielä korkeampaa. Helsingin ydinkeskusta rautatieaseman ympäristöineen jatkaa kaupungin lämpimimpänä alueena, vaikka yksittäiset rakennukset osoittautuvat vielä lämpimämmiksi. Kampin ostoskeskus nousee selvästi esille. Samanaikaisesti myös muiden alakeskusten alueet erottuvat hyvin. Elokuu 2009 on hyvä esimerkki kaupungistumisen vaikutuksesta ilman lämpötiloihin, vaikka tässä kuussa ei vielä ole havaittu suurimpia lämpötilaeroja kaupungin sisällä.

*Elokuu 2009*



Kuva 17. Elokuu 2009 ilman lämpöerotuskartta

### 5.3.3 Syyskuun 2009 luotaukset

Taulukko 9. Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman syyskuun 2009 ilman lämpötilan tunnusluvut (Ilmatieteen laitos, 2009).

|                            | ylin    | päivä | keskilämpötila | alin   | päivä | 1971-2000 keskilämpötila | erotus 2010 - 1971-2000 |
|----------------------------|---------|-------|----------------|--------|-------|--------------------------|-------------------------|
| Helsinki Kaisaniemi        | 21,0 °C | 2.    | 13,5 °C        | 2,5 °C | 30.   | 10,9 °C                  | 2,6 K                   |
| Hki-Vantaan lentoasema     | 21,4 °C | 2.    | 12,9 °C        | 1,1 °C | 30.   | 10,1 °C                  | 2,8 K                   |
| erotus Kaisaniemi - Vantaa | -       | -     | 0,6 K          | -      | -     | -                        | -                       |

Syyskuussa 2009 oli vielä pitkään esillä menneen kesän merkkejä, vasta kuukauden lopulla ilman lämpötila laski syksyn tasolle. Pitkään kestäneen lämpimän jakson ansiosta syyskuun keskilämpötila oli Helsingissä 2,6 K korkeampi kuin normaalikaudella 1971 – 2000. Kaupungin lämpösaareke voimistui hiukan edellisestä kuukaudesta (taulukko 9).

Koska syyskuun ensimmäinen päivä oli tiistai, kuukauteen mahtui viisi luotauspäivää, joista kolmena päivänä ajettiin läpi koko luotausreitti. Lämpötilaerotukset liikkuvat +2,78 ja – 1,00 K välillä ja niiden hajonta 0,45 K oli toiseksi suurin koko projektin aikana. Luotausajojen aikana sattui olemaan myös syksyyn kuuluvia vähäpilvisiä, heikkotuulisia päiviä, jolloin voimakkaan ulossäteilyn takia ilman lämpötilaerotus rakennetun ja rakentamattomien alueiden välillä on suurimmillaan. Syyskuun 15./16. päivänä havaittiin projektin suurin lämpötilaerotus +9,24 K (katso kappale 4.1).

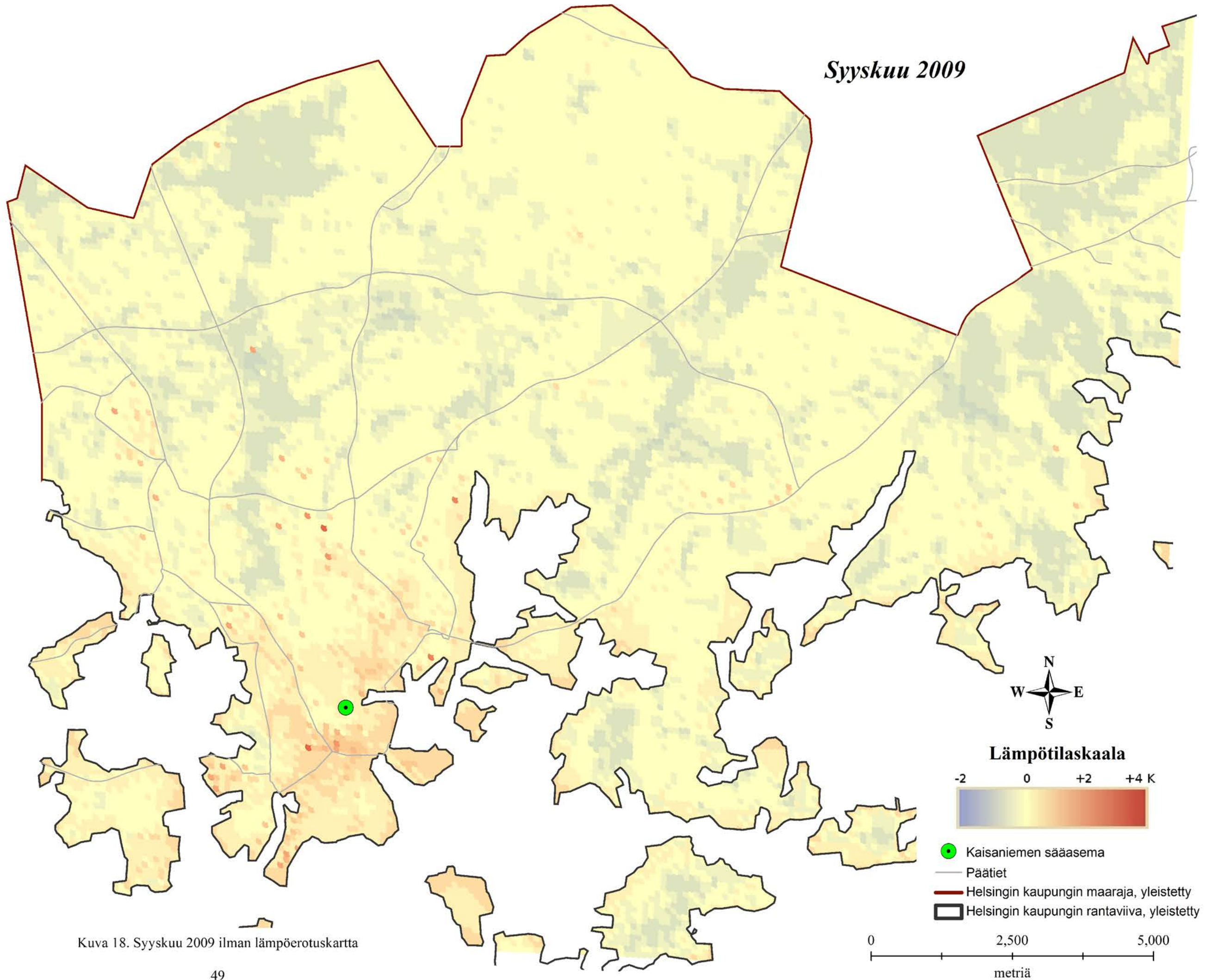
#### **Kartta-analyysi** (kuva 18)

Kartan interpoloimiseen käytettiin kaikkia tausta-aineistoja väestön määrää lukuun ottamatta.

Syksyinen lämmin meriveden keskilämpötila oli Harmajalla +13,88 °C. On huomattava, että interpoloinnissa ei ollut käytettävissä yhtään veden lämpötilamittauspistettä. Alakeskusten elokuiset lämpimät alueet kutistuivat muutamaksi isommaksi rakennusalueeksi, mutta ne ovat edelleen selvästi lämpimämpiä kuin niiden lähialueet. Helsingin Keskuspuiston keskellä oleva Pirkkolan jäähalli on syyskuussa Pohjois-Helsingin eniten antropogeenista lämpöä tuotava rakennus. Syyskuun 15./16. päivän suurin lämpötilaerotus mitattiin Helsingin rautatieaseman ympäristön ja idässä olevan Vuosaaren ja Mellunkylän maaston välillä. Siellä on suuria yhtenäisiä kylmempiä alueita, osittain puistoalueita, mutta myös suuria topografisia korkeuseroja, jolloin syksyisellä ulossäteilyllä voi syntyä suuria ilman lämpötilaeroja.



*Syyskuu 2009*



Kuva 18. Syyskuu 2009 ilman lämpöerotuskartta

### 5.3.4 Lokakuun 2009 luotaukset

Taulukko 10. Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman lokakuun 2009 ilman lämpötilan tunnusluvut (Ilmatieteen laitos, 2009).

|                            | ysin    | päivä | keskilämpötila | alin    | päivä | 1971-2000<br>keskilämpötila | erotus 2010 -<br>1971-2000 |
|----------------------------|---------|-------|----------------|---------|-------|-----------------------------|----------------------------|
| Helsinki Kaisaniemi        | 11,9 °C | 4.    | 4,2 °C         | -4,2 °C | 30.   | 6,2 °C                      | -2,0 K                     |
| Hki-Vantaan lentoasema     | 11,9 °C | 7.    | 3,3 °C         | -4,7 °C | 30.   | 5,2 °C                      | -1,9 K                     |
| erotus Kaisaniemi - Vantaa | -       | -     | 0,9 K          | -       | -     | -                           | -                          |

Lokakuu 2009 oli ensimmäinen keskimääräistä kylmempi kuukausi projektin aikana. Merkittävä oli, että Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman ääriarvoissa ei ole havaittavissa eroja, mutta kuukausiarvoissa kyllä. Kaupungin lämpösaareke voimistui 0,9 K:in maa-alueiden nopeamman jäähtymisen ja vallitsevasta säätyypin vuoksi (taulukko 10).

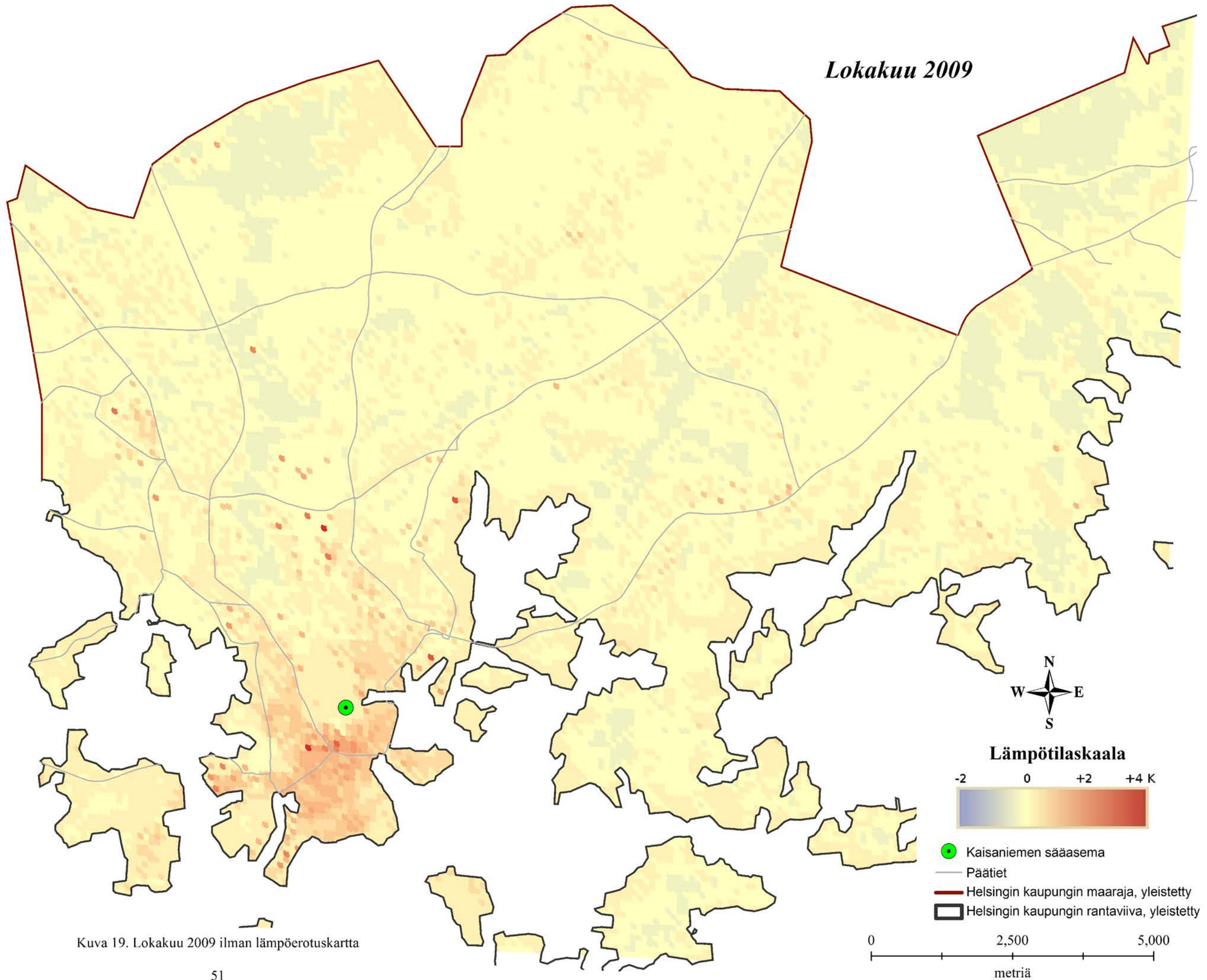
Lokakuussa 2009 tehtiin 12 luotausajoa. Lämpötilaerotukset liikkuivat +3,96 ja -0,90 K välillä, se oli neljänneksi suurin erotus koko projektin aikana. Myös erotusten hajonta oli samalla sijalla. Suuri erotusten hajonta ei kuitenkaan johdu lämpötilojen ääritapauksista, koska lokakuussa 2009 niitä ei esiintynyt.

#### **Kartta-analyysi** (kuva 19)

Kartan interpoloimiseen käytettiin kaikkia tausta-aineistoja väestön määrää lukuun ottamatta.

Syksyinen lämmin meriveden keskilämpötila oli Harmajalla vielä +9,11 °C, mutta veden lämpötilan vaikutus ilman lämpötilaan jäi näin vähäiseksi. Sen lisäksi vallitsevien tuulen suunta oli lokakuussa 2009 pohjoisesta tai idästä. Vaikka muulla Helsingin kaupungin alueella lämpötilan erotukset pienenevät, Helsingin ydinkeskustassa ne voimistuivat ja laajenivat. Myös alakeskusten alueet ja isommat rakennukset tulivat voimakkaammin esille. Jäähdyttävät puistoalueet havaitaan enää heikosti. Tässä interpoloinnissa ilmeni ensimmäisiä epäilyksiä puuston osuudesta menetelmässä. Vaikka nopea sään kylmeneminen kuukauden alussa jätti puille liian vähän aikaa talveen valmistautumiseen, eivätkä puiden lehdet eivät ehtineet kellastua ja pudota, puiden osuus jäähdyttävässä haihtumisprosessissa loppui jo kuukauden alussa.

*Lokakuu 2009*



Kuva 19. Lokakuu 2009 ilman lämpöerotuskartta

### 5.3.5 Marraskuun 2009 luotaukset

Taulukko 11. Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman marraskuun 2009 ilman lämpötilan tunnusluvut (Ilmatieteen laitos, 2009).

|                            | ysin   | päivä | keskilämpötila | alin     | päivä | 1971-2000<br>keskilämpötila | erotus 2010 -<br>1971-2000 |
|----------------------------|--------|-------|----------------|----------|-------|-----------------------------|----------------------------|
| Helsinki Kaisaniemi        | 9,4 °C | 21.   | 3,6 °C         | -6,5 °C  | 14.   | 1,4 °C                      | 2,2 K                      |
| Hki-Vantaan lentoasema     | 9,1 °C | 21.   | 2,5 °C         | -10,0 °C | 14.   | 0,1 °C                      | 2,4 K                      |
| erotus Kaisaniemi - Vantaa | -      | -     | 1,1 K          | -        | -     | -                           | -                          |

Marraskuu 2009 oli selvästi jakaantunut kahteen jaksoon. Ensimmäisessä ilman lämpötila oli kylmempi kuin pitkäajan keskilämpötila. Jakso loppui kuukauden alimpaan lämpötilaan 14. marraskuuta. Toisessa jatkossa ilman lämpötilat olivat aina korkeampia kuin pitkäajan keskilämpötilat ja myöskin satoi miltei päivittäin. Lauhan toisen jakson ansiosta koko kuukausi oli taas +2,2 K lämpimämpi kuin normaalikaudella 1971 – 2000. Pienistä lämpötilavaihteluista (15,9 K) huolimatta kaupungin lämpösaareke voimistui entistään 1,1 K:in maa-alueiden nopeimmasta jäähtymisestä takia (taulukko 11).

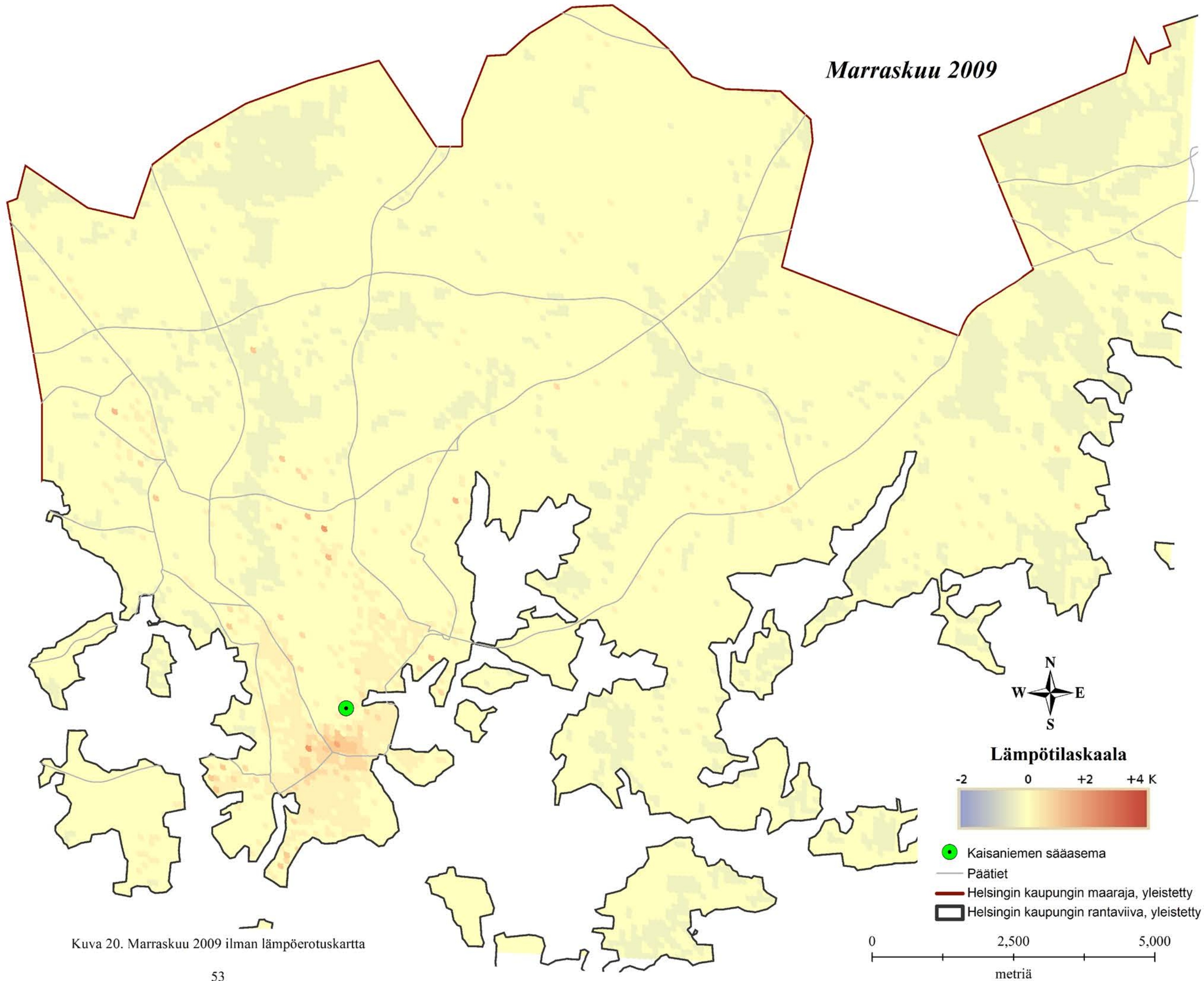
Marraskuussa 2009 tehtiin 12 luotausajoja. Lämpötilaerotukset liikkuivat +1,87 ja -0,42 K välillä, se oli toiseksi pienin erotus koko projektin aikana. Erotusten pieninkin arvo, -0,42 K, havaittiin marraskuussa 2010.

#### **Kartta-analyysi** (kuva 20)

Kartan interpoloimiseen käytettiin kaikkia tausta-aineistoja väestön määrää lukuun ottamatta.

Syksyn viimeisen kuukauden lämpötilojen erotusten pienuus näkyy myös kartalla. Meri on vielä huomattavasti lämpimämpi kuin maa-alueet (Harmajan saarelle +6,24 °C), mutta sen vaikutus havaitaan vain kostean ilman ja sadepäivien muodossa. Helsingin ydinkeskustan lämpimämpi alue heikkenee. Myös alakeskusten alueiden ja isompien rakennusten lämpösaarekkeet heikentyvät voimakkaasti. Myös jäädyttävät puistoalueet havaitaan enää heikosti. Tässä interpoloinnissa ilmenee samanlaisia epäilyksiä puuston osuuden menetelmässä kuin kuukautta aikaisemmin. Kuukauden alusta lähtien lämpötila laski + 4 °C:sta -6 °C:een, mutta oli koko loppukuukaudessa selvästi +5 °C (kasvukauden rajalämpötila) yläpuolella.

*Marraskuu 2009*



Kuva 20. Marraskuu 2009 ilman lämpöerotuskartta

### 5.3.6 Joulukuun 2009 luotaukset

Taulukko 12. Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman joulukuun 2009 ilman lämpötilan tunnusluvut (Ilmatieteen laitos, 2009).

|                            | ysin   | päivä | keskilämpötila | alin     | päivä | 1971-2000<br>keskilämpötila | erotus 2010 -<br>1971-2000 |
|----------------------------|--------|-------|----------------|----------|-------|-----------------------------|----------------------------|
| Helsinki Kaisaniemi        | 6,6 °C | 1.    | -3,6 °C        | -18,3 °C | 18.   | -2,2 °C                     | -1,4 K                     |
| Hki-Vantaan lentoasema     | 5,8 °C | 1.    | -5,3 °C        | -21,8 °C | 18.   | -3,2 °C                     | -2,1 K                     |
| erotus Kaisaniemi - Vantaa | -      | -     | 1,7 K          | -        | -     | -                           | -                          |

Joulukuu 2009 oli selvästi kylmempi kuin normaalikauden 1971 – 2000 ilman keskilämpötila. Kuukauden alussa ainakin 14. päivän asti ilman lämpötila heilahteli 0 °C molemmin puolin. Sen jälkeen oli ilman lämpötiloja +2 °C:sta -18 °C:een asti. Lämpötilavaihteluja aiheuttaneet matalapaineet toivat myös runsaasti lumisateita. Suomenlahden läheisyys piti Kaisaniemen keskilämpötilan vielä korkealla. Hki-Vantaan lentoaseman lämpötilakeskiarvo laski jo paljon enemmän. Kuun aikana havaittiin toiseksi suurin kaupungin lämpösaareke 1,7 K erotuksella (taulukko 12).

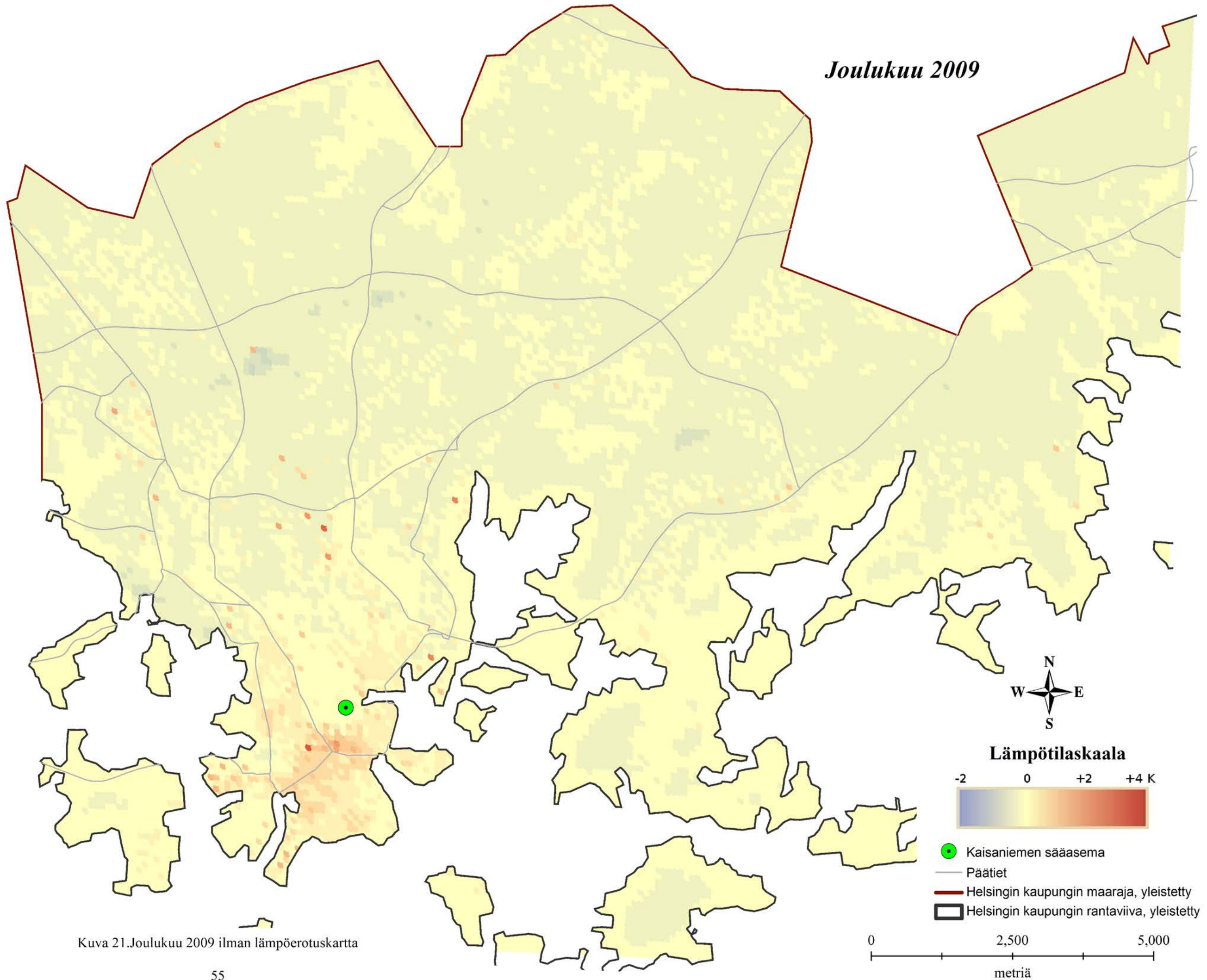
Joulukuussa 2009 tehtiin 14 luotausajoa, joista neljä ajoa esikaupungeissa. Lämpötilaerotukset olivat varsin suuria, +2,90 ja -1,11 K välillä. Joulukuu 2009 oli myös ensimmäinen kuukausi, jolloin kaikkien 38 191 hilapisteen erotusten keskiarvo vaihtoi etumerkkiä. Syy siihen oli laajojen maa-alueiden jäähtyminen ja peittyminen lumeen.

#### **Kartta-analyysi** (kuva 21)

Kartan interpoloimiseen käytettiin kaikkia tausta-aineistoja väestön määrää ja puuston osuutta lukuun ottamatta.

Talven ensimmäisenä kuukautena laajat lämpötilaltaan kylmät maa-alueet näkyvät kartalla. Meri oli Harmajan kohdalla vielä joulukuun loppuun asti avoin. Kuukauden keskilämpötila oli +2,93 °C, mutta kun 30. joulukuuta iltapäivällä veden lämpötila laski alle 0 °C, Helsingin ydinkeskustan lämpimämpi alue voimistui hiukan. Alakeskusten ja isompien rakennusten lämpösaarekkeet sen sijaan erottivat vain heikosti. Jäähdyttäviä puistoalueita ei enää havaita. Kuukauden puolestavälistä lähtien lumisateiden osuus sadannasta kasvoi. Varsinkin esikaupungeissa muodostuva lumipeite lisäsi ulossäteilyn jäähdytystä, mikä selittää luvun alussa mainitut kylmien maa-alueiden sijainnit kartalla.

*Joulukuu 2009*



Kuva 21. Joulukuu 2009 ilman lämpöerotuskartta

### 5.3.7 Tammikuun 2010 luotaukset

Taulukko 13. Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman tammikuun 2010 ilman lämpötilan tunnusluvut (Ilmatieteen laitos, 2010).

|                            | ysin    | päivä | keskilämpötila | alin     | päivä | 1971-2000 keskilämpötila | erotus 2010 - 1971-2000 |
|----------------------------|---------|-------|----------------|----------|-------|--------------------------|-------------------------|
| Helsinki Kaisaniemi        | -0,6 °C | 31.   | -10,4 °C       | -22,6 °C | 24.   | -4,2 °C                  | -6,2 K                  |
| Hki-Vantaan lentoasema     | -1,2 °C | 31.   | -12,4 °C       | -27,7 °C | 24.   | -5,2 °C                  | -7,2 K                  |
| erotus Kaisaniemi - Vantaa | -       | -     | 2,0 K          | -        | -     | -                        | -                       |

Tammikuu 2010 oli monessa mielessä hyvin äärevä kuukausi. Kuukauden keskilämpötila poikkesi pitkänajan keskilämpötilasta peräti -6,2 K. Suomenlahti oli ainakin Harmajan saarelle asti jäässä, ja myös kuukauden ylimmäksi lämpötilaksi jäi -0,6 °C. Kaikki tämä ei kuitenkaan ollut poikkeuksellista, koska talvikuukausien keskilämpötilat vaihtelevat jo luonnostaan enemmän kuin kesäkuukausien keskilämpötilat. Keskilämpötilan erotuksen kasvu jatkui myös tammikuussa 2010, jolloin se saavutti koko projektin suurimman arvon, +2,0 K (taulukko 13).

Tammikuussa 2010 tehtiin 12 luotausajoa. Lämpötilaerotukset olivat koko projektin suurimpia ja vaihtelivat +4,17 ja -1,79 K välillä. Myös tammikuun 2010 hilapisteiden erotusten keskiarvo oli negatiivinen. Syyinä siihen oli lumipeite laajoilla maa-alueilla.

Tammikuun 19. päivänä voitiin ensimmäistä kertaa jo luotausajon aikana todeta, miten idänpuoleinen tuuli muokkaa lämpösaarekkeen vaikutusalueen. Tuulenpuoleiset lämpötilagradientit olivat huomattavasti jyrkempiä kuin tuulen suojanpuoleiset. Ilmiö havaittiin sekä Kruununhaassa (tuulenpuoli) että Taka-Töölössä (tuulen suoja puoli).

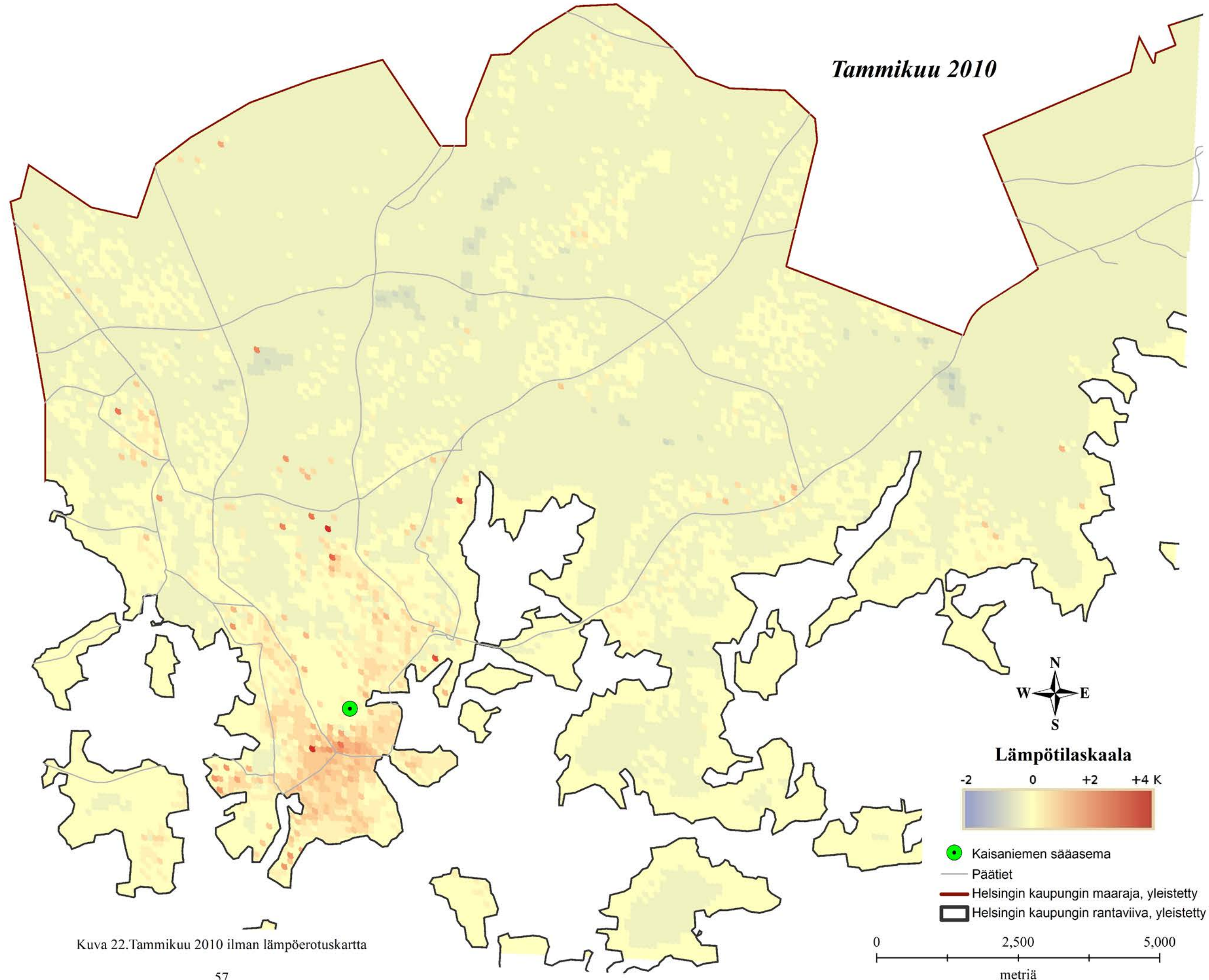
#### **Kartta-analyysi** (kuva 22)

Kartan interpoloimiseen käytettiin kaikkia tausta-aineistoja väestön määrää ja puuston osuutta lukuun ottamatta.

Suurten lämpötilojen erojen takia myös asutuskeskusten ja isompien rakennusten lämpövaikutukset heijastuivat laajemmalle alueelle. Helsingin ydinkeskusta on tammikuussa 2010 yhtä suurta lämpösaarekettä. Kylmempiä alueita löytyivät sekä idästä, Itäväylän varrella, että pohjoisessa, Vantaanjoen laaksosta ja Keskuspuistosta. Itäväylän alue on myös tämä kuun ääriämpötilapaikka. Viides päivä tammikuuta havaittiin siellä koko projektin toiseksi suurin lämpötilaerotus, +7,87 K. Helsingin Aleksanterinkadulla lähellä Senaatintoria mitattiin -11,49 °C:een lämpötila ja -19,12 °C:tta Vuosaaren ja Mellunkylän välillä. Näiden erotusten summa oli mainittu +7,87 K. Kaupunkiranta-alueet ovat saaneet hiukan liian suuria arvoja, koska Suomenlahti oli pääosin jäässä.



Tammikuu 2010



Kuva 22. Tammikuu 2010 ilman lämpöerotuskartta

### 5.3.8 Helmikuun 2010 luotaukset

Taulukko 14. Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman helmikuun 2010 ilman lämpötilan tunnusluvut (Ilmatieteen laitos, 2010).

|                            | ysin   | päivä | keskilämpötila | alin     | päivä | 1971-2000<br>keskilämpötila | erotus 2010 -<br>1971-2000 |
|----------------------------|--------|-------|----------------|----------|-------|-----------------------------|----------------------------|
| Helsinki Kaisaniemi        | 1,6 °C | 28.   | -8,1 °C        | -21,0 °C | 20.   | -4,9 °C                     | -3,2 K                     |
| Hki-Vantaan lentoasema     | 1,3 °C | 28.   | -9,1 °C        | -22,3 °C | 23.   | -5,7 °C                     | -3,4 K                     |
| erotus Kaisaniemi - Vantaa | -      | -     | 1,0 K          | -        | -     | -                           | -                          |

Myös helmikuu 2010 oli monessa mielessä hyvin äärevä kuukausi. Kuukauden keskilämpötila poikkesi pitkän ajan keskilämpötilasta -3,2 K. Ilman lämpötila oli kuukauden aikana kahta viimeistä päivää lukuun ottamatta 0 °C alapuolella. Tämä ei ole kovin poikkeavaa, mutta kun helmikuussa 2010 satoi noin 30% enemmän kuin tavanomaisesti ja sateet tulivat lumena, voidaan puhua ääritilanteista. Helsingin Kaisaniemen lumipeite kasvoi silloin 73 senttimetriin. Runsaan lumentulon takia myös luotausajot myöhästyivät normaalista aikataulusta.

Keskilämpötilan erotuksen kasvu taittui helmikuussa 2010, jolloin se laski +1,0 kelviniin (taulukko 14).

Helmikuussa 2010 tehtiin 12 luotausajoja. Lämpötilaerotukset vaihtelivat +3,58 ja -1,39 K välillä. Helmikuun hilapisteiden erotusten keskiarvo oli suurimmillaan -0,418 °C. Sen sijaan lämpötilan erotusten hajonta oli vain keskivertoinen.

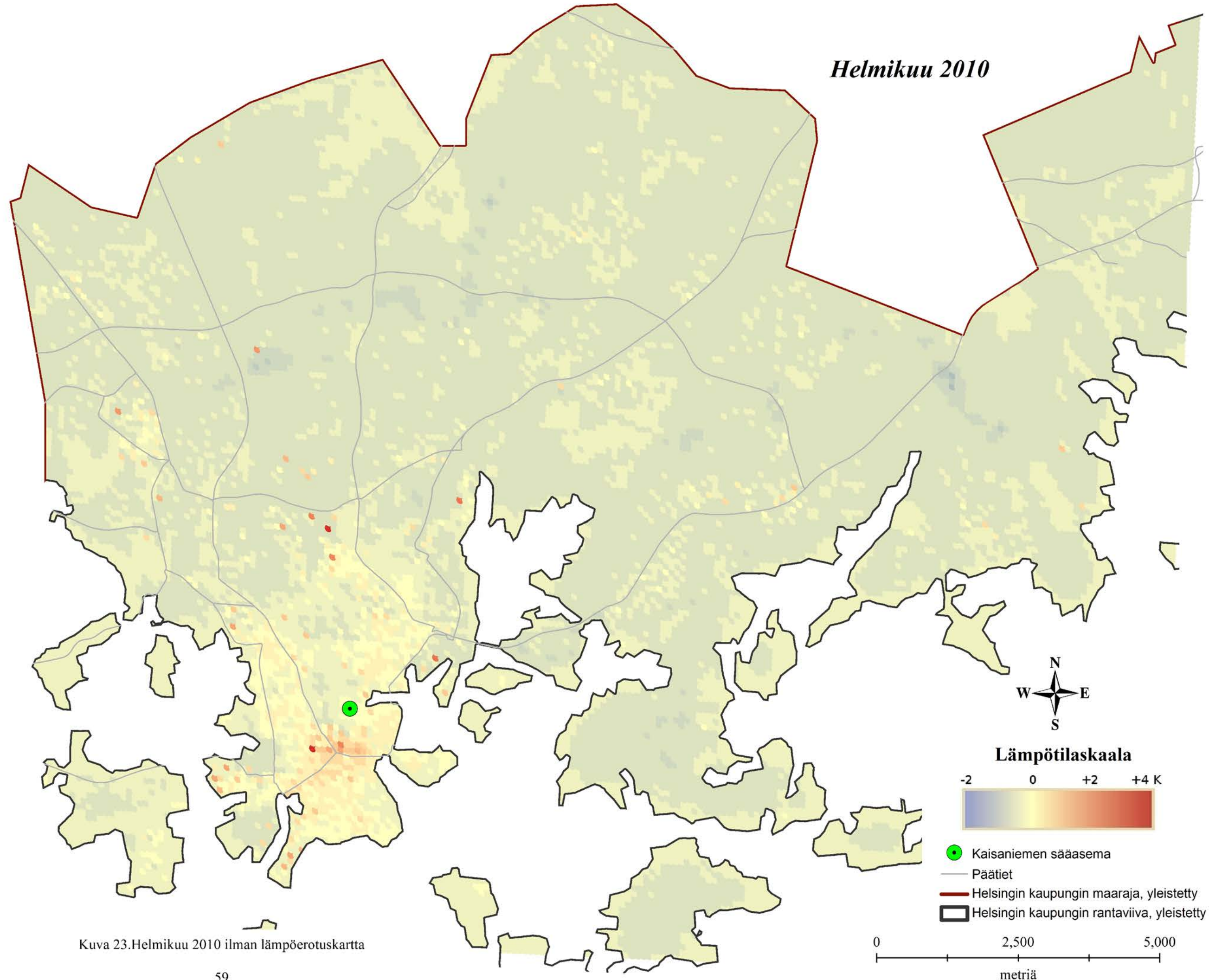
#### **Kartta-analyysi** (kuva 23)

Kartan interpoloimiseen käytettiin kaikkia tausta-aineistoja väestön määrää ja puuston osuutta lukuun ottamatta.

Helmikuu 2010 oli tasaisen talvinen, jolloin Helsingin lämpösaarekkeen alue oli ainakin tämä interpolointimenetelmän mukaan pienin koko projektin aikana. Suurempia lämpötilojen erotuksia löytyi vain isompien rakennusten alueelta. Korostettava on, että myös Helsingin ydinkeskustan reuna-alueille muodostui suuria kylmempiä alueita (Hietalahti, Jätkäsaari).

Tammikuun kylmempiä alueita löytyivät myös helmikuussa, mutta ääritapauksia ei.

*Helmikuu 2010*



Kuva 23.Helmikuu 2010 ilman lämpöerotuskartta

### 5.3.9 Maaliskuun 2010 luotaukset

Taulukko 15. Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman maaliskuun 2010 ilman lämpötilan tunnusluvut (Ilmatieteen laitos, 2010).

|                            | ylin   | päivä | keskilämpötila | alin     | päivä | 1971-2000 keskilämpötila | erotus 2010 - 1971-2000 |
|----------------------------|--------|-------|----------------|----------|-------|--------------------------|-------------------------|
| Helsinki Kaisaniemi        | 6,2 °C | 10.   | -1,8 °C        | -14,2 °C | 17.   | -1,5 °C                  | -0,3 K                  |
| Hki-Vantaan lentoasema     | 5,1 °C | 10.   | -2,7 °C        | -19,6 °C | 17.   | -2,2 °C                  | -0,5 K                  |
| erotus Kaisaniemi - Vantaa | -      | -     | 0,9 K          | -        | -     | -                        | -                       |

Maaliskuu 2010 oli ensimmäinen kevätkuukausi, mutta kuukauden alussa Helsingin keskustassa oli monissa paikoissa vielä niin paljon lunta, että luotausmatkojen kesto oli vielä huomattavasti pidempi kuin tavallisesti. Maaliskuu 2010 voidaan jatkaa kolmeen jaksoon. Ensimmäinen jakso huipentui 10. päivänä kuukauden lämpimimpään päivään. Toinen jakso oli taas talvinen ilman suurempia sateita. Kuukauden lopulla myös päivän keskilämpötila nousi 0 °C:een yläpuolelle. Kehitys Hki-Vantaan lentoasemalla oli samankaltainen, joten kaupungin lämpösaarekkeen voimakkuus pysyi samoissa lukemissa kuin helmikuussa 2010, 0,9 K (taulukko 15). Maaliskuun viimeisellä kolmanneksella (25. maaliskuuta) myös Suomenlahti vapautui jäädä Harmajan saaren kohdalla.

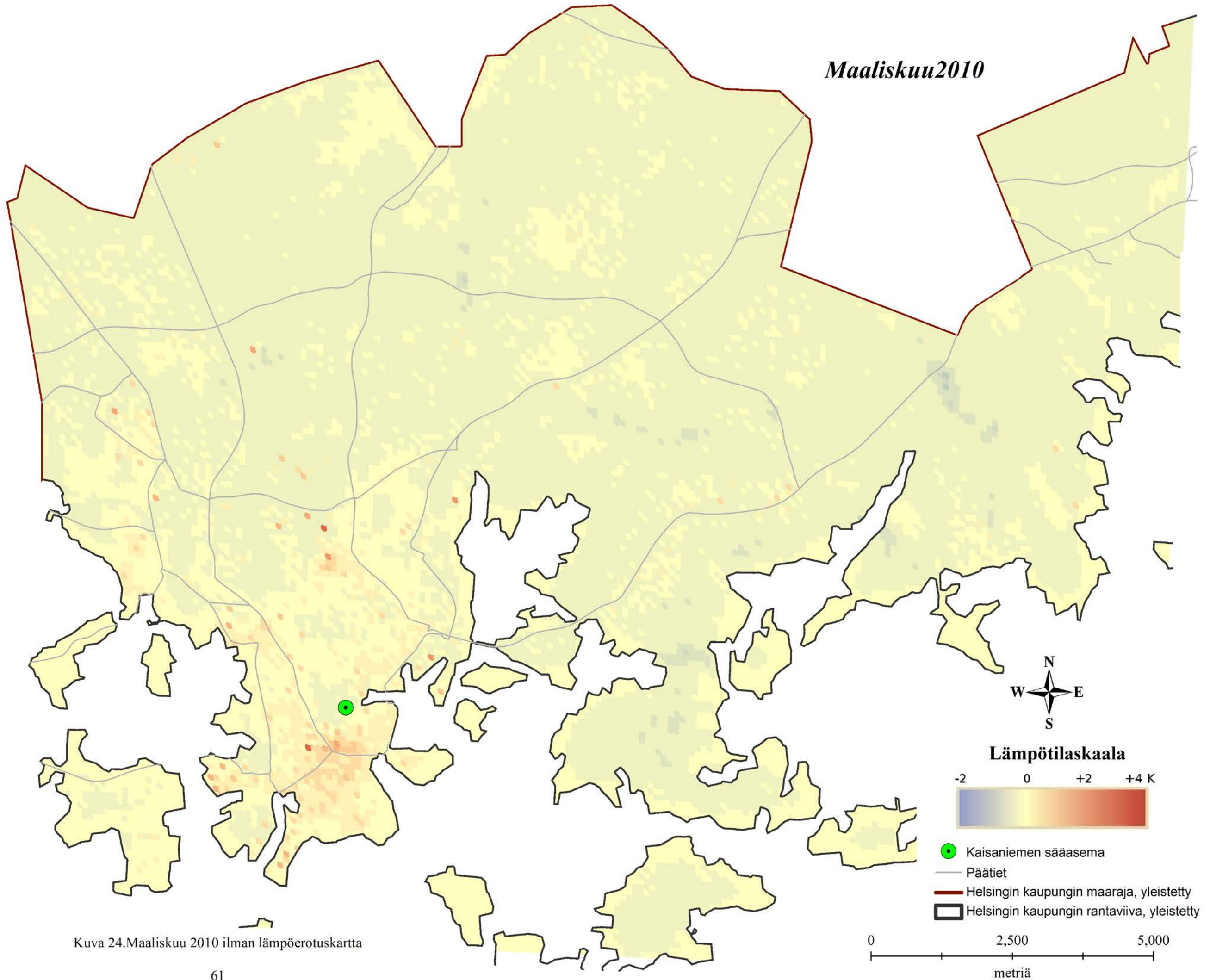
Maaliskuussa 2010 tehtiin taas 16 luotausajoja, joista kolmena päivänä ajettiin läpi koko luotausreitit. Lämpötilaerotukset vaihtelivat +2,45 ja -1,29 K välillä. Maaliskuun hilapisteiden erotusten keskiarvo oli viimeistä kertaa negatiivinen, -0,219 °C. Lämpötilan erotusten hajonta oli 0,176, joka on neljänneksi pienin hajonta.

#### **Kartta-analyysi** (kuva 24)

Kartan interpoloimiseen käytettiin kaikkia tausta-aineistoja väestön määrää ja puuston osuutta lukuun ottamatta.

Maaliskuu 2010 oli lämpötilaerotukseltaan tasainen kuukausi. Positiivisia lämpötilaeroja havaittiin laajemmalla alueella. Mutta myös ääriämpötilatapauksia havaittiin. Maaliskuun 16. päivänä mitattiin projektin kolmanneksi suurin lämpötilaerotus (7,55 K), tällä kerta Helsingin keskustan Mannerheimintien ja Simonkadun risteyksen (+1,46 K) ja Vantaanjoen laakson Pukinmäen kaupunginosan (-6,09 K) välillä. Vastaavia tapauksia havaitaan usein keväisin, kun avoimessa maastossa ilman lämpötila pääsee laskemaan ulossäteilyn takia paljon enemmän kuin Helsingin keskustassa. Tapaus oli myös niin voimakas, että se näkyy myös interpolointikartalla. Muita topografian aiheuttamia kylmempiä alueita löytyi myös Laajasalon sillan kohdalla ja Vuosaaren ja Mellunkylän välillä.

*Maaliskuu2010*



Kuva 24. Maaliskuu 2010 ilman lämpöerotuskartta

### 5.3.10 Huhtikuun 2010 luotaukset

Taulukko 16. Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman huhtikuun 2010 ilman lämpötilan tunnusluvut (Ilmatieteen laitos, 2010).

|                            | ylin    | päivä | keskilämpötila | alin    | päivä | 1971-2000<br>keskilämpötila | erotus 2010 -<br>1971-2000 |
|----------------------------|---------|-------|----------------|---------|-------|-----------------------------|----------------------------|
| Helsinki Kaisaniemi        | 14,2 °C | 27.   | 4,6 °C         | -1,3 °C | 20.   | 3,3 °C                      | 1,3 K                      |
| Hki-Vantaan lentoasema     | 14,7 °C | 30.   | 4,7 °C         | -2,7 °C | 20.   | 3,3 °C                      | 1,4 K                      |
| erotus Kaisaniemi - Vantaa | -       | -     | -0,1 K         | -       | -     | -                           | -                          |

Huhtikuu 2010 oli ensimmäinen kuukausi, jolloin lämpösaarekkeen vaikutus kääntyi negatiiviseksi Helsinki Kaisaniemen sääasemalla. Tämä on täysin ymmärrettävää, koska Suomenlahden läheisyys jähdyttää tehokkaasti sääaseman ympäristöä. Harmajan saaren mittauspisteessä Suomenlahden veden keskilämpötila oli +1,89 °C. Myös lumipeitteen häviäminen lisäsi maanpinnan kykyä vastaanottaa auringon lyhytaaltoista energiasäteilyä. Sekä Kaisaniemessä että Hki-Vantaan lentoasemalla maa oli lumeton 10. päivästä lähtien. Kuukauden lämpötilavaihtelu oli koko projektin pienin, vain 15,5 K (taulukko 16).

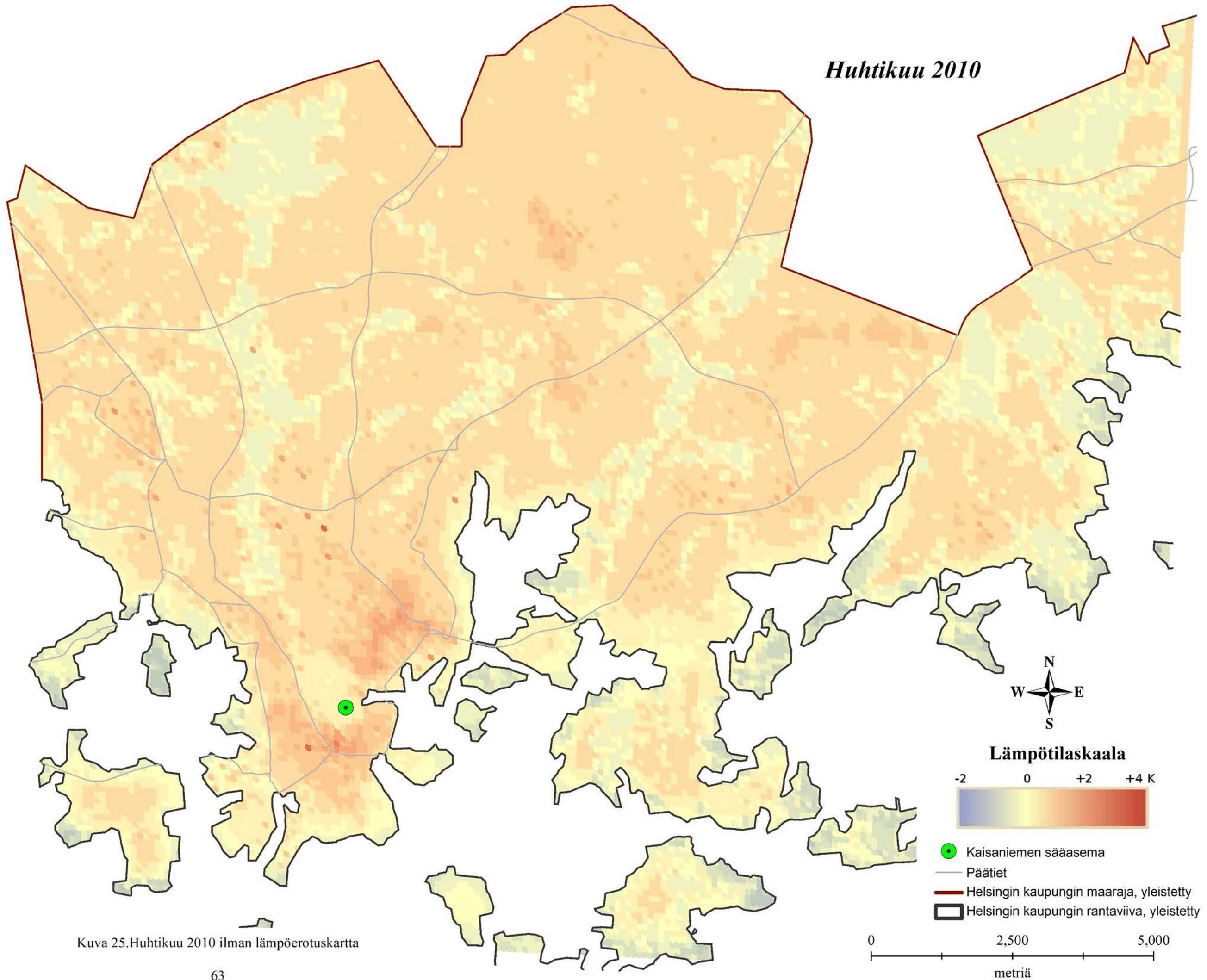
Huhtikuussa 2010 tehtiin 12 luotausajoa. Lämpötilaerotukset vaihtelivat +2,72 ja -1,53 K välillä, mikä on neljänneksi suurin vaihtelu projektin aikana. Lämpötilaerotusten hajonta oli sen sijaan koko projektin suurin, peräti 0,570.

#### **Kartta-analyysi** (kuva 25)

Kartan interpoloimiseen käytettiin kaikkia tausta-aineistoja väestön määrää lukuun ottamatta.

Huhtikuun 2010 interpolointikartta oli yllätys. Suuret lämpimät alueet miltei koko kaupungin alueella välittävät kuvan, että Helsingin keskusta olisi vain yhtä lämmin kuin Hki-Vantaan lentoaseman alue. Näin ei ole, sillä lämpösaarekkeen vertailu koskee vain Kaisaniemen puistossa olevaa sääasemaa ja Hki-Vantaan lentoasemalla avoimella paikalla olevaa sääasemaa. Kaisaniemen kohdalla on kuitenkin pieni keltainen alue todistuksena 0-asteen erotustason olemisesta. Kartta esittää hyvin maa- ja ranta-alueiden keväisen lämpöerotuksen, vaikka ilmanlämpötilahavaintoja mereltä ei ollut käytettävissä. Puuston jähdyttämä alue on havaittavissa, mutta rajoittuu jyrkkään lämpötilagradienttiin. Helsingin Kallion kaupunkiosa näkyy huhtikuussa 2010 voimakkaammin kuin muina kuukausina. Syy voi olla enemmän topografinen kuin antropogeeninen. Alueellisten keskusten paikalliset lämpösaarekkeet erottuvat heikommin.

*Huhtikuu 2010*



Kuva 25. Huhtikuu 2010 ilman lämpöerotuskartta

### 5.3.11 Toukokuun 2010 luotaukset

Taulukko 17. Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman toukokuun 2010 ilman lämpötilan tunnusluvut (Ilmatieteen laitos, 2010).

|                            | ylin    | päivä | keskilämpötila | alin    | päivä | 1971-2000<br>keskilämpötila | erotus 2010 -<br>1971-2000 |
|----------------------------|---------|-------|----------------|---------|-------|-----------------------------|----------------------------|
| Helsinki Kaisaniemi        | 24,5 °C | 21.   | 11,5 °C        | 0,7 °C  | 6.    | 9,9 °C                      | 1,6 K                      |
| Hki-Vantaan lentoasema     | 26,5 °C | 21.   | 11,9 °C        | -0,8 °C | 6.    | 10,0 °C                     | 1,9 K                      |
| erotus Kaisaniemi - Vantaa | -       | -     | -0,4 K         | -       | -     | -                           | -                          |

Toukokuu 2010 alkoi säätilaltaan tavanomaisena kuukautena. Kuukauden ensimmäisellä kolmanneksella ilman lämpötilat liikkuvat pitkänajan keskiarvon ympärillä. Suursäätilan muuttuessa tuuli kääntyi idänpuoleiseksi ja toi lämmintä ilmaa pääkaupunkiseudulle. Kuukauden lämpimän keskivaiheen ansiosta kuukauden keskilämpötila oli reilusti puolitoista astetta korkeampi kuin pitkänajan keskiarvo. Viimeisellä kolmanneksella kuukauden lämpötilat palasivat miltei samalle tasolle kuin kuukauden alussa. Suomenlahden vaikutuksen (veden keskilämpötila Harmajan saaren mittauspisteessä +6,69 °C) takia Helsingin Kaisaniemen keskilämpötila jäi myös toukokuussa Hki-Vantaan lentoasemaa -0,4 kelviniä pienemmäksi. Toukokuu lämpötilanvaihtelu oli koko projektin suurin, 23,8 K (taulukko 17).

Toukokuussa 2010 tehtiin 12 luotausajoa. Teknisen vian takia 11. päivän luotausajot suoritettiin 12./13. päivänä.

Lämpötilaerotukset vaihtelivat +1,74 ja -1,26 K välillä. Toukokuun hilapisteiden erotusten keskiarvo oli koko projektin suurin, 0,332 K. Sen sijaan lämpötilan erotusten hajonta oli vain keskivertoinen.

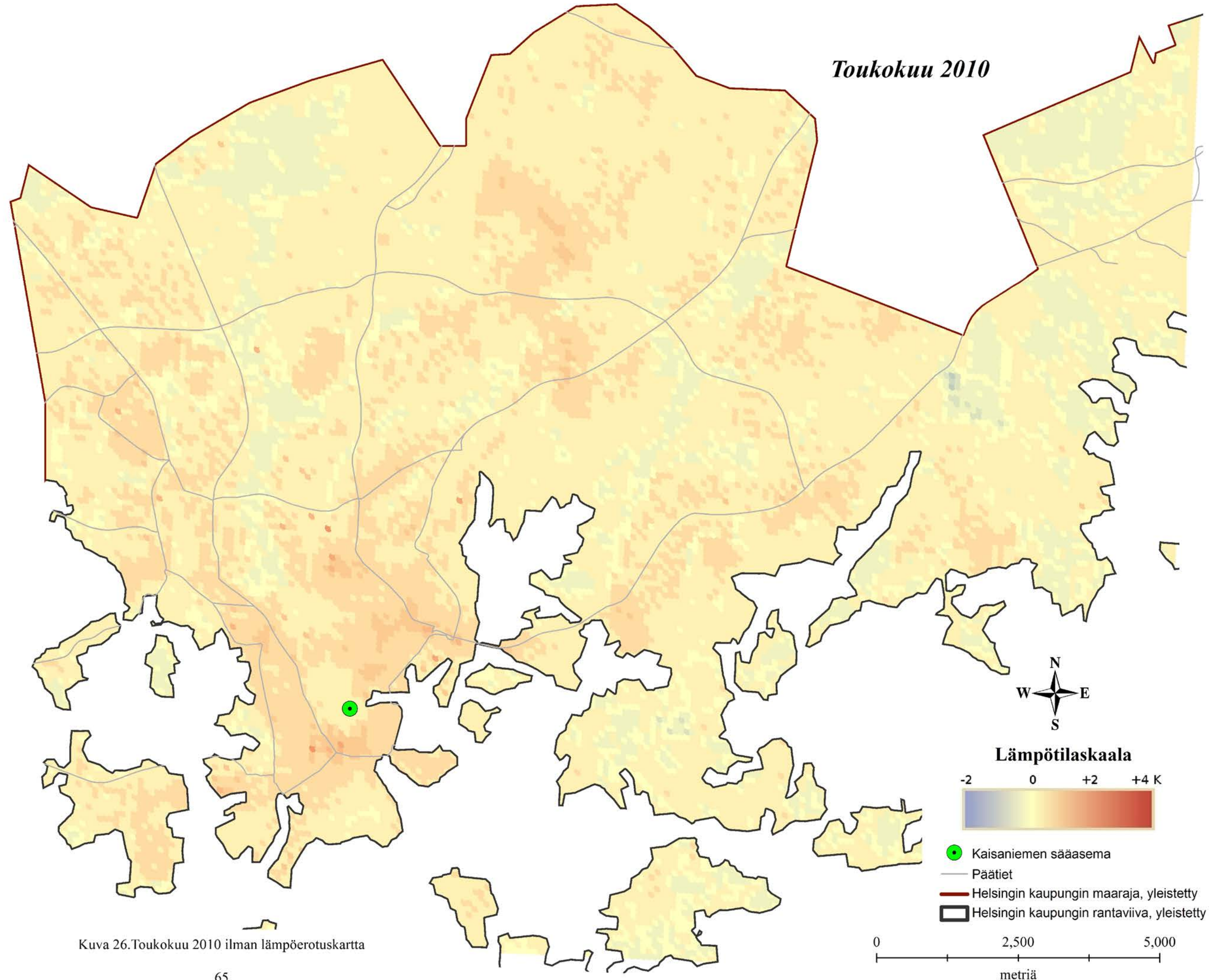
#### **Kartta-analyysi** (kuva 26)

Kartan interpoloimiseen käytettiin kaikkia tausta-aineistoja väestön määrää ja avoimuutta lukuun ottamatta.

Toukokuu 2010 kartalla on laajoja lämpimiä alueita. Kaikki esikaupungin aluekeskukset voi erottaa selvästi. Tiiviimmin rakennetut alueet, kuten Helsingin ydinkeskusta ja Kallion ja Itä-Pasilan kaupunkiosat, erottuvat vielä paremmin. Sen sijaan yksittäisten rakennusten luoman lämpösaarekkeen vaikutus on heikompi. Kylmiä paikkoja löytyy vain Itä-Helsingin alueelta. Huomiota herättäviä ovat Keskuspuiston laidalla esiintyvät suuret lämpötilaerotukset. Siellä ilman lämpötila muuttuu yli asean verran muuttaman sadan metrin matkalla.



*Toukokuu 2010*



Kuva 26. Toukokuu 2010 ilman lämpöerotuskartta

### 5.3.12 Kesäkuun 2010 luotaukset

Taulukko 18. Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman kesäkuun 2010 ilman lämpötilan tunnusluvut (Ilmatieteen laitos, 2010).

|                            | ylin    | päivä | keskilämpötila | alin   | päivä | 1971-2000<br>keskilämpötila | erotus 2010 -<br>1971-2000 |
|----------------------------|---------|-------|----------------|--------|-------|-----------------------------|----------------------------|
| Helsinki Kaisaniemi        | 23,6 °C | 29.   | 14,6 °C        | 5,1 °C | 6.    | 14,8 °C                     | -0,2 K                     |
| Hki-Vantaan lentoasema     | 25,8 °C | 30.   | 15,1 °C        | 3,2 °C | 6.    | 14,6 °C                     | 0,5 K                      |
| erotus Kaisaniemi - Vantaa | -       | -     | -0,5 K         | -      | -     | -                           | -                          |

Kesäkuussa 2010 Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman ilman lämpötilan keskiarvojen erotus oli vielä negatiivinen, vaikka pitkänajan keskiarvojen mukaisesti erotusten etumerkin pitäisi olla jo positiivisesti. Syy sellaiseen tulokseen oli kuukauden lämpötilojen tasaisuus. Lämpötilan ääriarvojen vaihteluväli oli vain 18,5 K (taulukko 18).

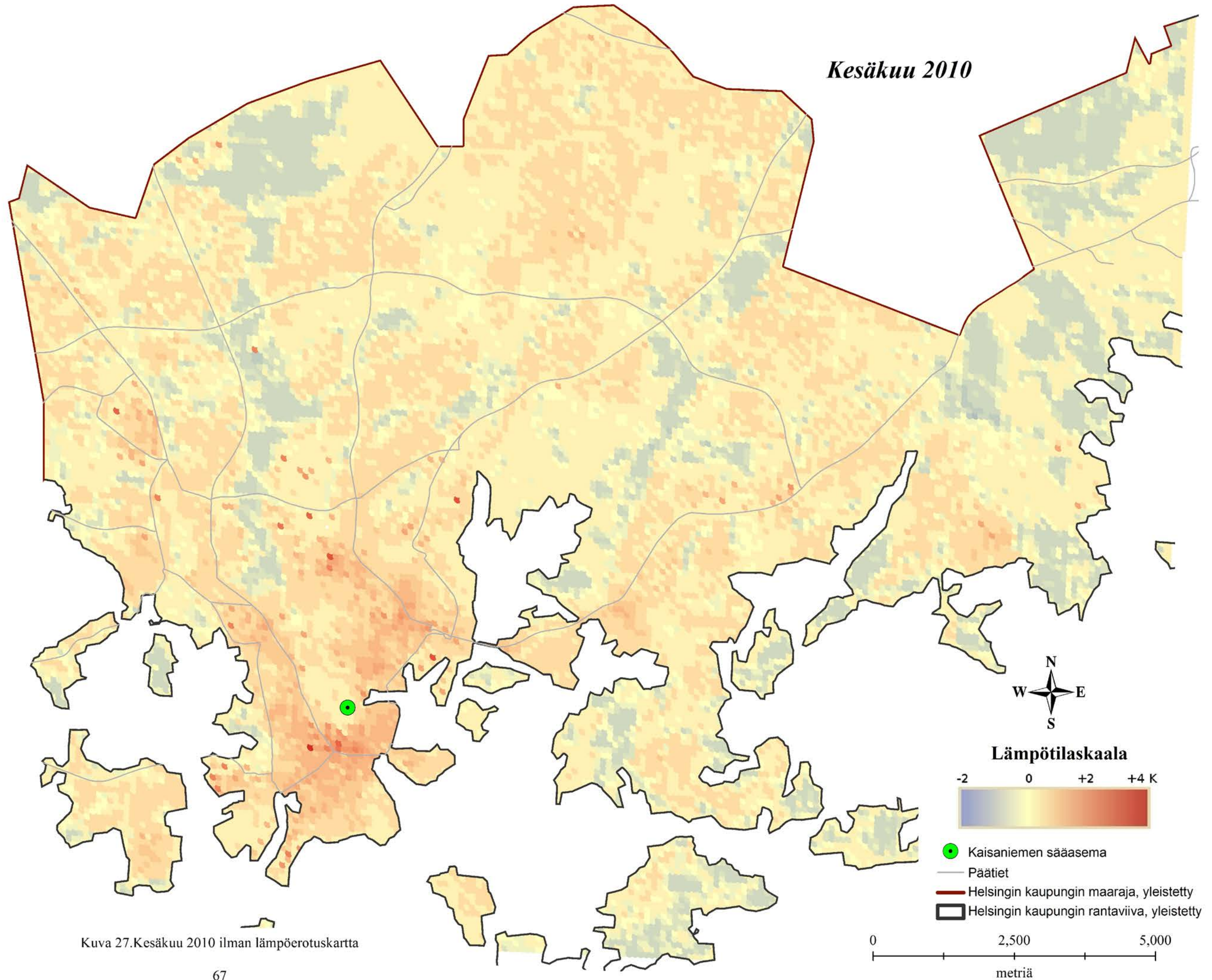
Kesäkuussa 2010 tehtiin 12 luotausajoja. Lämpötilaerotukset vaihtelivat +4,11 ja -1,45 K välillä. Lämpötilojen erotusten hajonta oli kolmanneksi suurin, -0,411.

#### **Kartta-analyysi** (kuva 27)

Kartan interpoloimiseen käytettiin tausta-aineistoina vain rakennusten tilavuutta ja puuston osuutta.

Kesäkuun 2010 interpoloidut lämpötilaerotukset oli asteen voimakkaampia kuin toukokuussa. Kaikki asuinalueet nousevat esille tasaisesti lämpiminä alueina. Yksittäisten rakennusten vaikutus ei kasva samassa suhteessa. Helsingin lämpösaareke on hyvin laajasti levittäytynyt ja ulottuu pohjoisessa ainakin Pasilan kaupunginosaan asti. Vastakohtana metsäiset alueet erottuvat kylminä alueina. Mielenkiintoisena yksityiskohtana nousee esille liikenneväylien vaikutus ilman lämpötilaan. Rakennetuilla alueilla, esimerkiksi Lauttasaaren luoteiskärjissä, Vihdintiellä, Hämeenlinnan väylällä, liikenneväylien vaikutus on jäähdyttävä. Sen sijaan Hakamäentiellä, Pasilassa Metsäläntiellä ja kehä I:llä Keskuspuiston kohdalla liikenneväylien vaikutus on lämmittävä.

*Kesäkuu 2010*



Kuva 27. Kesäkuu 2010 ilman lämpöerotuskartta

### 5.3.13 Heinäkuu 2009 – kesäkuu 2010 keskiarvokartta

Taulukko 19. Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman heinäkuu 2009 – kesäkuu 2010 ilman lämpötilan tunnusluvut (Ilmatieteen laitos, 2010).

|                            | ysin    | päivä | keskilämpötila | alin     | päivä | 1971-2000 keskilämpötila | erotus 2010 - 1971-2000 |
|----------------------------|---------|-------|----------------|----------|-------|--------------------------|-------------------------|
| Helsinki Kaisaniemi        | 28,5 °C | 2.7.  | 5,17 °C        | -22,6 °C | 24.1. | 5,5 °C                   | -0,33 K                 |
| Hki-Vantaan lentoasema     | 28,9 °C | 2.7.  | 4,53 °C        | -27,7 °C | 24.1. | 4,9 °C                   | -0,37 K                 |
| erotus Kaisaniemi - Vantaa | -       | -     | 0,63 K         | -        | -     | -                        | -                       |

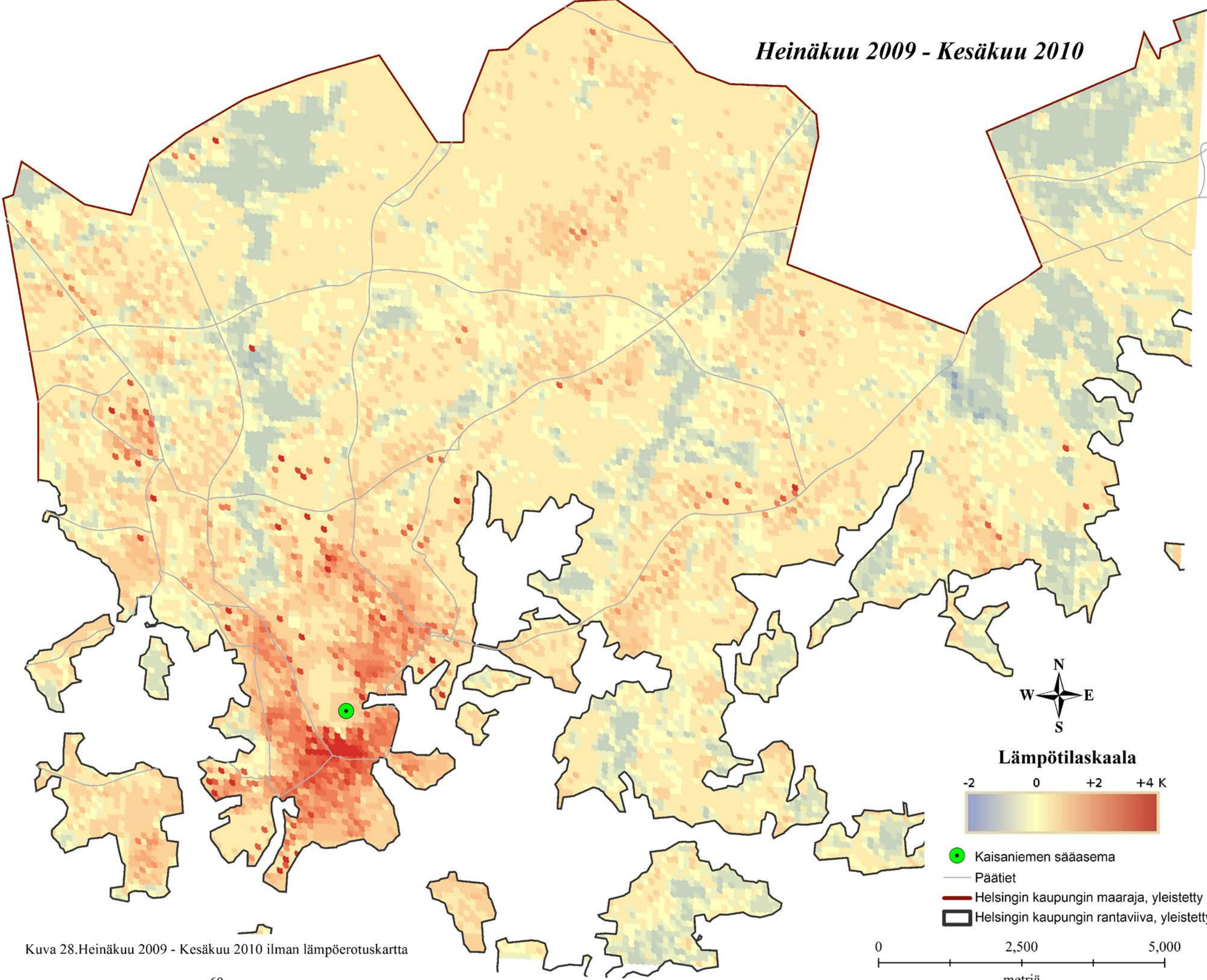
Luotausjakson heinäkuu 2009 – kesäkuu 2010:n hilakeskiarvot on laskettu kaikkien yksittäisten kuukausien interpoloitujen hila-arvojen pohjalta.

Luotausjakson ilman keskilämpötila oli 5,17 °C, minkä erotus pitkänajan keskiarvosta oli vain -0,33 K. Erotus Helsinki Kaisaniemen ja Hki-Vantaan lentoaseman välillä oli +0,63 K (taulukko 19). Erotus oli suurimmillaan talvikuukausina ja pienemmillään kesäkuukausina. Kartan lämpötilaerotusten vaihteluväli on +2,80 ja -0,87 K välillä. Lämpötilaluokkaraja on 0,1 K.

#### **Kartta-analyysi** (kuva 28)

Helsingin kaupungin erotusten lämpötilakarttaa hallitsee kaupungin ydinkeskusta laajentuen ainakin Meilahteen, Pasilaan ja Vallilaan asti. Kylmänä alueena nousivat esiin Hietalahden laajat puistomaiset alueet. Esikaupunkialueella alakeskukset muodostavat omia pieniä lämpösaarekealueitaan. Vahvimmillaan ne esiintyvät Herttoniemessä, Itäkeskuksessa, Vuosaaressa, Malmilla ja Pitäjänmäellä. Alakeskusten välillä laajat avoimet ja metsäiset alueet jäädyttävät kaupunkia. Yksittäisten rakennusten synnyttämiä lämpösaarekkeita on suuruusjärjestyksessä hila-arvojen kärjessä, useimmiten näiden rakennusten pohjapinta-ala on hilakokoa suurempi. Suurin lämpöerotus havaitaan Kampin ostoskeskuksen yhteydessä Helsingin ydinkeskustassa, +2,80 K. Toiseksi suurin erotus löytyy Pasilan Messukeskuksesta, +2,79 K. Kolmanneksi ja neljänneksi suurin erotusarvo löytyy kaupungin rajan ulkopuolelta Vantaalta, Keskon keskusvarasto +2,73 K ja Jumbon ostoskeskuksesta +2,25 K. Jumbon ostoskeskus lähellä Hki-Vantaan lentoasemaa ja Keskon keskusvarasto kuuluu interpolointialueeseen, mutta ovat kartan ulkopuolella. Viidenneksi suurin lämpöerotus löytyy Arabianrannasta, Arabian vanhalta teollisuusalueelta, +2,06 K. Erotusten lämpötilakartan kylmempiä alueita on Itä-Helsingin Pohjois-Vuosaaren ja Mellunkylän alueilla, erotukset ovat -0,52 ja -0,68 K välillä. Kylmin paikka löytyy Vantaan Westerkullan kartanolta, -0,807 K. Paikka sijaitsee alavalla maalla.

*Heinäkuu 2009 - Kesäkuu 2010*



Kuva 28. Heinäkuu 2009 - Kesäkuu 2010 ilman lämpöerotuskartta

## 6. Johtopäätökset

Tämän tutkimuksen tarkoitus oli esitellä uudenlaista kaupunkilämpösaareketutkimusmenetelmää. Uutta on että, että vertailumittaukset tehtiin kokonaan liikkuvalla alustalla ja luotausajot suoritettiin kiinteällä havaintohetkellä. Mittaustekniikan kehittämissä on aina tuntemattomia tekijöitä. Minkälaisella mittauskalustolla voidaan mitata, millaisia ovat sääolot mittausten aikana ja miten saadaan esitettyä havainnot oikein. Ensimmäiseen kysymykseen vastaa kaupunki-ilmastotutkimuksen historia antamalla esimerkkejä, kuinka liikkuvalla alustalla on mitattu muulla. Näiden esimerkkien avulla löydettiin Helsingin oloihin sopiva tapa. Toiseen kysymykseen luonto vastaa itse, Helsingin vaihtelevan ilmaston takia luotausajot saatiin suoritettua vaihtelevissa sääoloissa (kuva 5). Kolmanteen kysymykseen vastaus oli, että lämpötilaerotuskarttaa esitystapana oli oikea ratkaisu, koska haettiin yleispätevää tulkintaa Helsingin kaupungin lämpösaarekkeesta.

Taustatutkimuksella selvitettiin, kuinka hyvin yhden luotauspäivän tulokset voidaan yleistää. Helsingin vaihtelevan ilmaston vuoksi onnistuttiin alkupäivän jälkeen melko hyvin. Yksittäisten kuukausien lämpötilaerotuskartoissa oli jonkin verran epävarmuutta, mutta yhteenvetona koko projektin vuosikartta on vaikuttava. Miltä tulos olisi näyttänyt, jos Helsinki Kaisaniemen tilalla olisi ollut Helsinki-Vantaan lentoaseman ilman lämpötilat? Ajatus ei ole kaukaa haettu. Helsinki Kaisaniemen sääasema on kuitenkin toiminut pitkään ja monet vertailut ja laskennat perustuvat juuri Kaisaniemen havaintosarjaan. Tämän tutkimuksen avulla voidaan nyt tämentää näitä vertailuja ja laskentoja kaupunginosakohtaisesti.

Epävarmuus yksittäisten kuukausien lämpötilaerotuskartoissa yllätti. Kun projektin alussa suunniteltiin tausta-aineiston käyttöä lämpötilaerotuskarttojen interpoloinnissa, oli itsestään selvää, että kaikki aineistot kelpuutettaisiin mukaan. Syynä siihen oli, että silloin olisi mahdollista tutkia, minkälaisia yksittäisiä riippuvuuksia ilman lämpötilaerotusten ja tausta-aineistojen välillä on. Koko interpoloinnin ja tietojenkäsittelyn aikana väestön osuus osoittautui häiritseväksi tekijäksi. Kaikkien kuukausien kohdalla väestön osuuden ja lämpötilahavaintojen erotusten korrelaatiot olivat suuruudeltaan samaa luokkaa kuin muiden tausta-aineistojen ja lämpötilahavaintojen erotusten korrelaatiot (taulukko 4). Tarkempi syy väestön osuuden tausta-aineiston vaikutuksesta ja käyttäytymisestä jäi selvittämättä. Keskustelua tausta-aineistojen laadusta toi myös esille, että molempien aineistojen tuottajat päivittävät ja parantavat aineistoja jatkuvasti. SeutuCD'08:lle ilmestyi jo seuraaja (HSY 2010), CORINEN maankäyttöluokitusta päivitetään noin kymmenen vuoden välein (EEA

2009). Tausta-aineiston valintaan vaikutti aineiston paikallinen saatavuus. Vaikka CORINE:n maankäyttöluokitus on eurooppalainen, siihen käytettiin myös suomalaisia maankäyttöluokkia. Szymanowskin ja Kryzan (2009 : 176) ehdottamat aineistot olisivat olleet vaikeammin saatavissa. 100 metrin hilakoko osoittautui sopivaksi hilakooksi. Isompi hila olisi yleistänyt liikaa. Sen sijaan pienempi hilakoko toisi tapaustutkimuksessa uusia näkökulmia. Niiden luotettavuus olisi vahva kuitenkin vain lähellä ilman lämpötilan luotausreittiä. Koko kaupungin mittakaavassa pienempi hilakoko ei ole järkevä kuten luvussa 4 todettiin.

Tutkimuksen karttaisuus antaa kattavan kuvan Helsingin ilman lämpötilaoloista. Vaikka on vielä kerran korostettava, että yksittäiset kuukaudet edustavat vain kyseistä kuukautta, projektin tuottama koko vuoden kartta sisältää yleistettävämpiä piirteitä. Yhteinen piirre kaikissa kartoissa on Helsingin ydinkeskustan esille tulo. Silloin, kun koko hilakentän vaihtelu on pieni, myös ydinkeskustan vaihtelu on samassa suhteessa pieni (katso marraskuu 2009, kappale 5.5). Yksittäisten isojen rakennusten vahva esille tulo on toinen piirre. Kolmas tulos on alakeskusten esilletulo alueellisena lämpösaarekkeena, toki heikompana niiden kuukausien aikana (marraskuu 2009 - maaliskuu 2010), jolloin kaikkien hilapisteiden lämpötilaerotussumma on negatiivinen. Kuukausikartoissa topografian vaikutus jäi heikommaksi. Yksittäisissä säätilanteissa topografia on kuitenkin suurin jäähdyttävä tekijä (Liite 1). Koko vuoden kartalla Helsingin ydinkeskustaa hallitsee punainen väri. Todella suuria lämpötilaeroituksia löytyy kuitenkin vain kourallisesta hilapisteistä (kappale 5.3.13). Vain 46 hilapisteen (0,12% hilapisteistä) lämpötilaerotus on suurempi kuin 1 K.

Yksittäisten ostoskeskusten ja isompien kortteleiden vaikutus ilman lämpötilan on kuitenkin kasvamassa. Pasi Mäenpään (2005 : 283) mukaan Helsingin keskustan katetut kävelytilat lisääntyivät vähintään 300%:lla viimeisen 20 vuoden aikana. Myös julkisista rakennuksista tehdään kansalaisille ”olohuoneita” (Mäenpää 2005 : 297). Kaikki tämä lisää antropogeenista energiantuotantoa Helsingin keskustassa. Tiheämmin rakennettujen alueiden lämpöylijäämä pidentää kuitenkin kasvukautta. Se, onko tästä hyötyä luonnolle, on kyseenalaista, koska kasvupaikkojen valon ja veden saanti vaihtelee suuresti.

## Kiitokset

”Hyvä tutkimustulos aina tutkijaa palkitsee.” (Achim Drebs, elokuu 2011)

Lopussa tutkimuksen tekijä haluaa kiittää kaikkia jollakin lailla tutkimusta avustaneita. Ja heitä oli monta. Ilmatieteen laitos toimi projektin rahoittajana. Laitoksen edustajista kiitän ilmastonmuutosyksikön päällikköä Ari Laaksosta resurssien hyväksymisestä. Kirsti Jylhä ja Hilppa Gregow toimivat projektin ja sen viimeistelyn aikana tutkimuksen tekijän esimiehinä ja järjestivät aikaa ja tilaa toteuttaa tutkimus. Pentti Pirinen on Ilmatieteen laitoksen ilmastokeskuksen interpoloinnin asiantuntija. Kiitän häntä, koska hän seurasi koko projektin aikana mielenkiinnolla interpoloinnin edistymistä ja avusti ongelmien ratkaisemisessa. Kiitän ylitarkastaja Esko Puheloista tehdystä miehen työstä, kun hän suoritti pro gradu -työn suomen kielen tarkastusta. Ewan O'Connor tarkasti englanninkielisen abstraktin. Tutkija Svante Henriksson suoritti kaksi luotausajoa, kun tutkimuksen tekijä on itse estynyt. Ilman häntä luotausten aikasarjaa ei olisi saatu kasaan. Tutkija Juha Aalto avusti R-ympäristön käytössä. Mittaustekniikan puolella kiitän Ilmatieteen laitoksen havaintoteknistä yksikköä saumattomasta yhteistyöstä luotausten yhteydessä.

Kiitän myös Susanna Kankaanpäästä HSY:ltä (Helsingin seudun ympäristöpalvelut) SeutuCD'08:n tausta-aineistojen käyttöoikeuksista.

Lopuksi kiitän vielä tohtoreita Elena Saltikoffia Ilmatieteen laitoksesta ja Olli Ruthia Helsingin yliopiston geotieteiden ja maantieteen laitoksesta tämä pro gradun hyvästä ohjaamisesta.

## Lähteet

Alestalo, Mikko (1975). Esimerkkejä ns. lämpösaarekeilmiöstä Helsingin alueella. *Report University of Helsinki, Department of Meteorology*, Helsinki. 16 s.

Auer, Ingeborg, Reinhard Böhm, Hans Mohnl (1989). Klima von Wien - eine anwendungsorientierte Klimatographie. *Beiträge zur Stadtforschung, Stadtentwicklung und Stadtgestaltung*, Band 20. Wien, 270 s.

Bailey, T., A. Gatrell (1995). *Interactive Spatial Data Analysis*. Prentice Hall, London

Bründl, W.; Mayer, H.; Baumgartner, A. (1987). STADTKLIMA BAYERN - Abschlußbericht zum Teilprogramm „Klimamessungen München“. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, *Reihe Materialien* Nr. 43.



- Chandler, Tony J. (1965). *The Climate of London*. Hutchinson of London. 292 s.
- Chandler, Tony J. (1970). Urban climate: Inventory and prospects. In *Urban climates, Technical Note No. 108*, WMO, Geneva, 2 – 14.
- Chandler, Tony J. (1976). Urban climatology and its relevance to urban design. *Technical Note No. 149*, WMO, Geneva, 61 pp.
- Drebs, Achim (2009). Eurooppalaisia kaupunkilämpösaarekkeitä. LuK-tutkielma, Helsingin yliopisto, maantieteen laitos, 35 s.
- Drebs, Achim (2010). Helsingin kaupungin lämpösaarekkeen ajallisesta esiintymisestä ja ominaisuuksista. Opinnäyttö, julkaisematon, 18 s.
- Drebs, Achim, Anneli Nordlund, Pirkko Karlsson, Jaakko Helminen, Pauli Rissanen (2002). Tilastoja Suomen ilmastosta 1971 - 2000. *Ilmastotilastoja Suomesta 2002:1*. Ilmatieteen laitos, Helsinki. 99 s.
- Drebs, Achim, Andrea Vajda (2006). Air temperature gradient studies in Helsinki. Metropolitan Area during 2002 – 2005 (Poster). *Preprint 6th International Conference on Urban Climate*, June 12 – 16, 2006, Göteborg, Sweden. 736 – 738.
- European Environment Agency (EEA) 2009. CORINE Land Cover. <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>. 1.7.2009.
- FINLEX (1992). Asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä 4.12.1992/1257, luku 6, pykälä 45, momentti 2. Helsinki, Suomi.
- Informationssystem Stadt und Umwelt (ISU) der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (2008). 26.12.2008. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Berlin. <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/index.shtml>.
- Fogelberg, P., M. Nikiforow, G. Söderman, L. Tornberg (1973). Havaintoja Helsingin talvisesta lämpöilmastosta. *Terra* 85:4, 234 – 239.
- Geiger, Rudolf (1961). Das Klima der bodennahen Luftschicht. *Die Wissenschaft*, Band 78. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 645 s.
- Hara, Y., H. Tabuchi, O. Heikkinen, J. Autio, Y. Oka & T. Tsuji (1999). Urban heat island phenomena in Oulu, central Finland, as an example of heat island within high latitude. *Proceedings of the ICUC conference in Sydney Australia*.
- Heino, Raino (1979). Urban effect on climatic elements in Finland. *Geophysica* 15, N:o 2, 171 – 188.
- Henttonen, H. (1992). Kriging in Interpolating July Mean Temperatures and Precipitation Sums. *Reports from the Department of Statistics University of Jyväskylä* 12, 41 pp.
- Hupfer, P., W. Kuttler (ed.) (1998). *Witterung und Klima*. 10. edition. BG Teubner, Stuttgart, Leipzig 413 s.

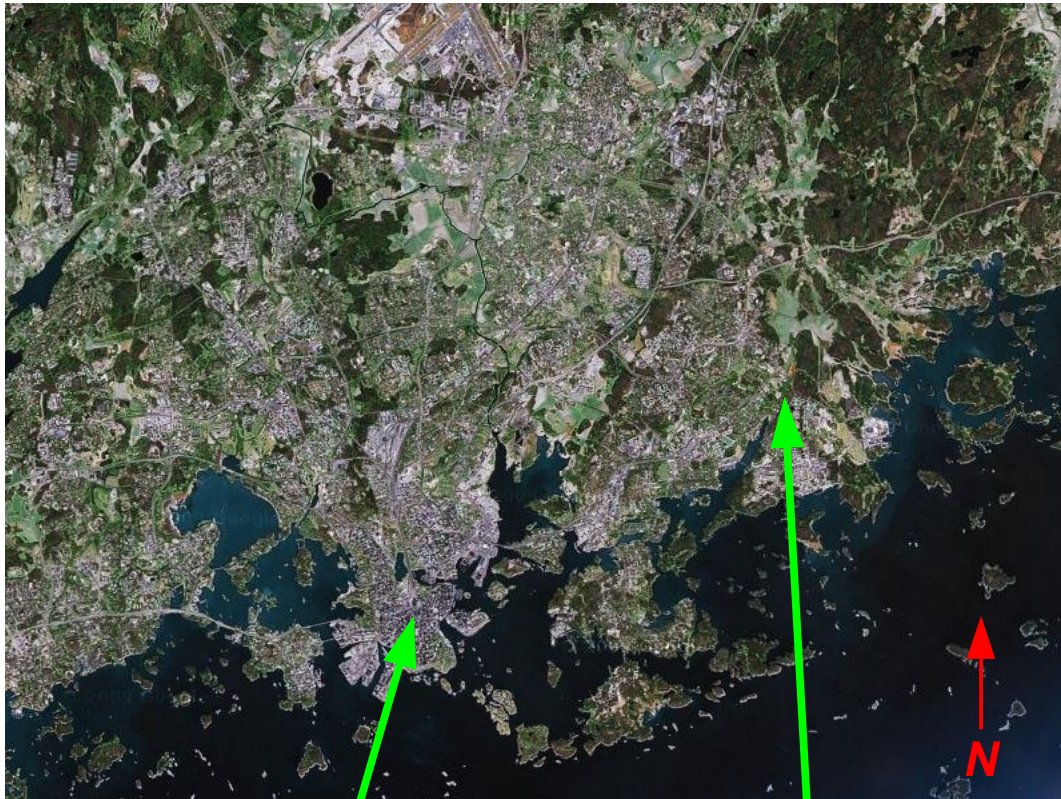
- HSY (2010). SeutuCD'08,  
<http://www.hsy.fi/seututieto/kaupunki/paikkatiedot/seutucd/Sivut/default.aspx>. 1.1.2010
- Ilmatieteen laitos (2009,2010). *Ilmastokatsaus heinäkuu 2009 – kesäkuu 2010*. Helsinki. 16 s.
- Jakobson, L, V. Prakash (ed.) (1974). *Metropolitan growth*. Public policy for South and Southeast Asia. New York.
- Kutter, Wilhelm (1993). Planungsorientierte Stadtklimatologie. *Geografische Rundschau* 45, Heft 2, 95 – 106, Braunschweig
- Kuttler, Wilhelm (2004). Stadtklima, Teil 1: Grundzüge und Ursachen. *Beitragsserie: Klimaänderung und Klimaschutz*, BTU Cottbus, Berlin, 13 S.
- Kratzer, Albert (1956). *Das Stadtklima*, 2. Auflage. Die Wissenschaft, Band 90, Friedrich Viewig & Sohn, Braunschweig, 184 S.
- Krige, Daniel G. (1951). *A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand*. J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa 52 (6): 119–139.
- Landsberg, Helmut E. (1981). *The Urban Climate*. Academic Press, New York. 276 s.
- Lienhard, John H. IV & John H. Lienhard V (2011). *A Heat Transfer Textbook*. 4. edition. Phlogiston Press Cambridge, Massachusetts, U.S.A, 766 p.
- Maanmittauslaitos (2009). Korkeusmalli 25 metriä.  
 <<http://www.maanmittauslaitos.fi/digituotteet/korkeusmalli-25-m>> 1.9.2009.
- Müskens, Andreas (2004). Die Wärmeinsel der Stadt Münster. 75 s. Diplomarbeit an der Universität Münster, Münster.
- Nübler, Wilfried (1979). Konfiguration und Genese der Wärmeinsel der Stadt Freiburg. *Freiburger geographische Hefte*, Heft 16, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, 113 S.
- Piispa, Hannu (2004) Helsingin lämpöolot 1.7.2001–31.1.2003. Pro Gradu -tutkielma, Helsingin yliopiston maantieteen laitos, Helsinki. 84 s.
- Oke, Timothy R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, Volume 7, 769 – 779.
- Oke, Timothy R. (1974). Review of Urban Climatology 1968 – 1973. Technical Note No. 134, WMO, Geneva.
- Oke, Timothy R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology* 1, 237 – 254.
- Oke, Timothy R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1 – 24.
- Oke, Timothy R. (1987). *Boundary layer climates*. 2. painos. Routledge, Lontoo. 435 s.

- R Development Core Team (2010). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Strobel, Barbara Elisabeth (2002). Klima-Mosaik der Stadt Erlangen. 122 S. Diplomarbeit an der Universität Erlangen, Erlangen
- Szymanowski, Mariusz, Maciej Kryza (2009). GIS based techniques for urban heat island spatialization, *Climate Research*, 38, 171 - 187.
- Taha, H, H.Akbari, and A. Rosenfeld (1989). Vegetation microclimate measurements: the Davis project, *Lawrence Berkeley Lab. Rep. 24593*.
- Taha, H, H.Akbari, and A. Rosenfeld (1991). Heat island and oasis effects on vegetative canopies: Micrometeorological field measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 44, 123-138
- Tommila, Mauri (1961). Eräitä kaupunki-ilmaston piirteitä sekä Helsingin kaupungin ja sen ympäristön lämpötilavertailuja. *Terra* 73, 68 – 77.
- Thurrow, Charles (1983). Improving street climate through urban design. *American Planning Association*.
- UN ESA (2008). Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, World Population Prospects: The 2006 Revision and World Urbanization Prospects: The 2007 Revision, <<http://esa.un.org/unup>> , 1.7.2011.
- Wilmers, Fritz (1976). Die Anwendung von Wettertypen bei ökoklimatischen Untersuchungen. *Wetter und Leben*, 28, 224 – 235.
- Wolfe, J.N., R.T. Wareham, H.T. Scofield (1949). Microclimates and macroclimates of Neotoma, a small valley in central Ohio. *Bull. Ohio Biolog. Survey* 8, Nr. 1, 1 – 267.
- Yamashita Shuji (1996). Detailed structure of heat island phenomena from moving observations from electric tram-cars in metropolitan Tokyo. *Atmospheric Environment*, Volume 30, 429-435.
- Yoshino, M. (1990/1991). Development of urban climatology and problems today. *Energy and Buildings*, 15-16, 1-10.
- wikipedia.de (2009). <<http://de.wikipedia.org/wiki/Temperaturleitf%C3%A4higkeit>>. 1.2.2009.

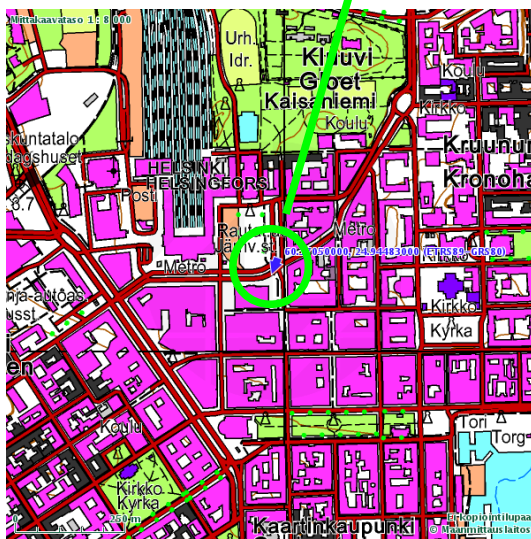
## Liitteet

### Liite 1

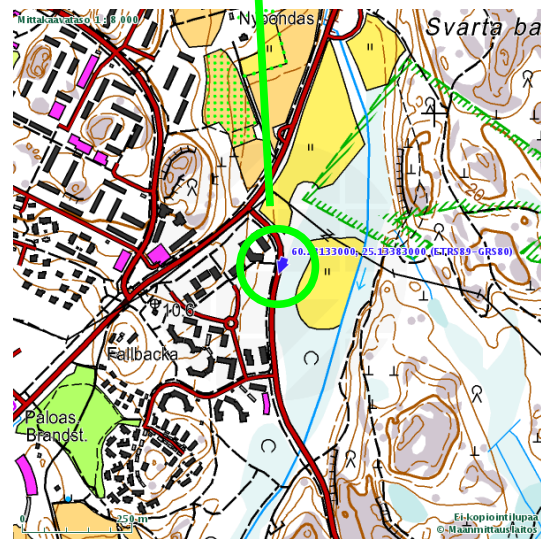
Luotausyönä 15./16. syyskuuta 2009 mitattiin koko mittausprojektin suurin lämpötilanerotuksen. Ääriarvo syntyy, kun lasketaan suurin positiivisin ja suurin negatiivisin erotuksen yhteen. Ensimmäisenä havaittiin Helsingin keskustassa luotausajon aikana +15,62 °C, jolloin Helsingin Kaisaniemissä mitattiin vain enää +10,51 °C. Noin kaksi tuntia myöhemmin, kello 22:19 UTC, havaittiin Itä-Helsingin Melunkylässä +4,96 °C, jolloin Kaisaniemissä lämpötila oli vielä +9,09 °C. Molempien havaintojen erotuksien summa on +9,24 K. Erotuksen suuruuteen vaikuttaa vahvasti paikan topografia korkeuserojen kautta. Ajopäiväkirja kertoo, että silloin, kun mittausauto ohitti kyseisen paikan, pintasumukerros oli muodostumassa. Samanlainen ilmiö havaittiin myöhemmin myös tasaisemmillä alueilla, esimerkiksi Vantaanjoen laakson pelloilla. Siellä toki myös Vantaanjoen vesi vaikutti sumun muodostumiseen.



c)



a)



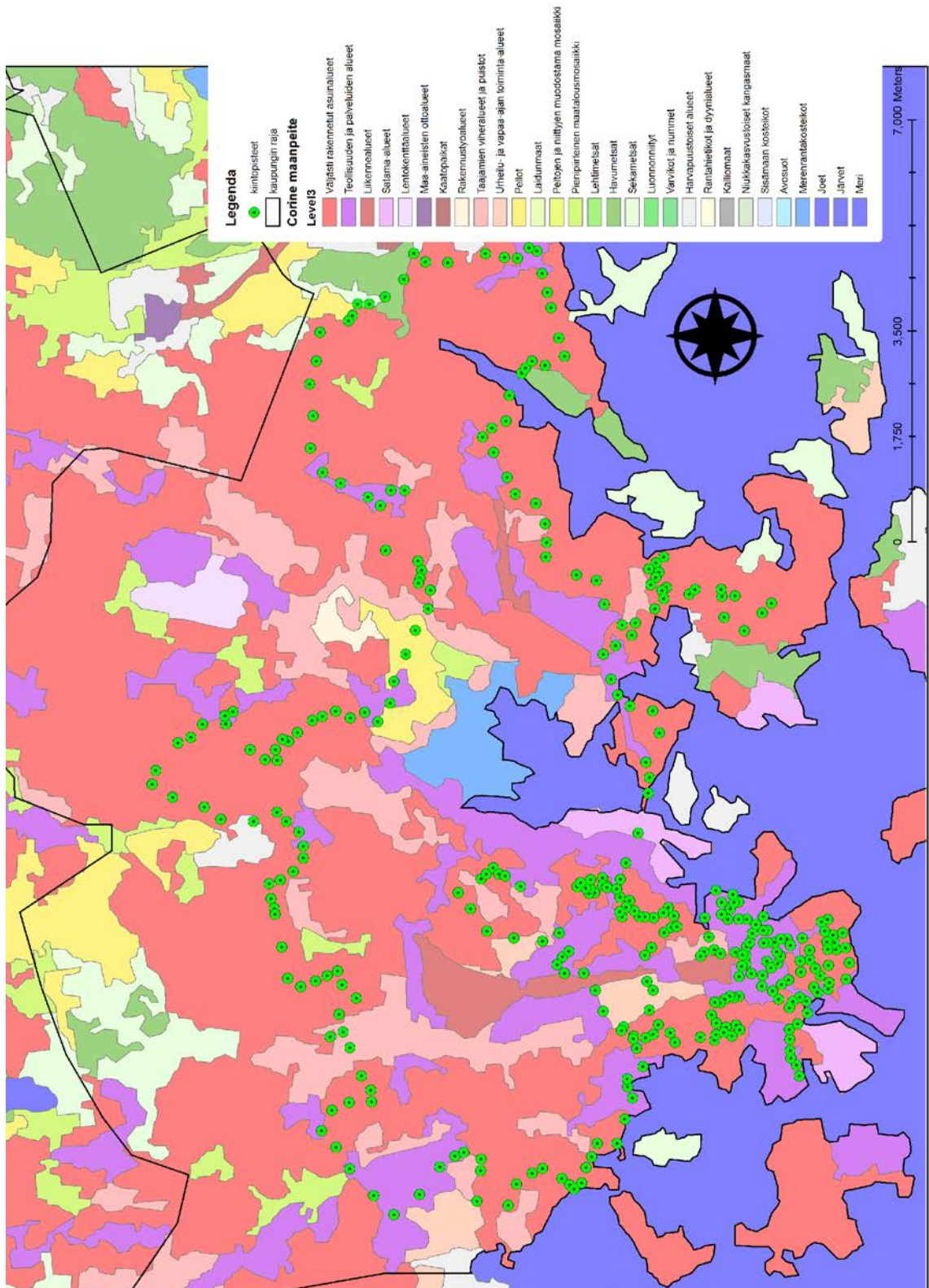
b)

Liitteen 1 kuva.

- Vasemmalla alhaalla kartta Helsingin rautatien ympäristön lämpimimmistä havaintopaikasta luotausyönä 15./16. syyskuuta 2009, kello 20:23 UTC,
- oikealla alhaalla kartta kylmimmistä havaintopaikasta Mellunkylän ja Vuosaaren kaupunkiosassa, kello 22:19 UTC, ja
- niiden sijainnit Helsingin satelliittikartalla (Kuvien lähteet: alhaalla, Maanmittauslaitos, 2009; ylhäällä, GoogleMaps, TerraMetrics, 2009).

## Liite 2

Liitteen 2 kuvassa on esitetty kaikkien Helsingin keskustassa ja esikaupungeissa sijaitsevien lämpötilan kiintopisteiden paikat. Kartan pohjana käytetyn CORINE maankäyttöluokituksen (EEA 2009) avulla esitetään minkä alueiden kautta luotausreitti kulki. CORINE maankäyttöluokitus antaa kuvan Helsingin kaupunkimaisuudesta. On toki muistettava, että myös väljästi rakennetuilta asuinalueilta löytyy myös puistomaisia ja avoimia alueita. Varsinaisesti peltoalueeksi esitetään kartalla vain Viikin ja Tuomarinkylän peltoalueet ja pieni alue Itä-Helsingissä, jossa havaittiin suurempia lämpötilavaihteluja (katso liite 1). Viikin peltoalueet olivat Fogelbergin (1973) ja Alestalon (1975) mukaan alueen kylmimpiä paikkoja. Sitä ei voitu todeta uudestaan, koska tämän projektin luotausajoja ei ole suoritettu äärisäätilanteissa.



Liitteen 2 kuva. Helsingin keskustan ja esikaupungin reittien kiintopisteiden sijainnit, pohjakartana CORINE maankäyttöluokitus (kartan layout: ArcGIS® 9.3)