

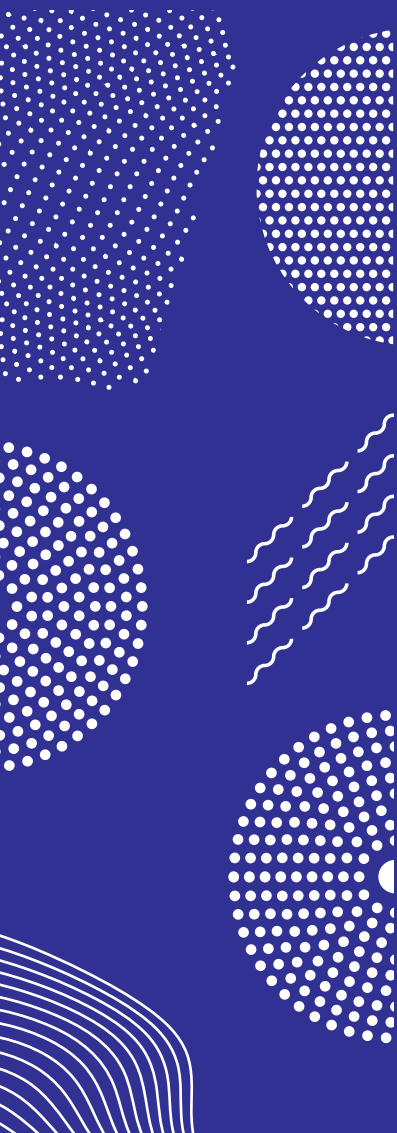


ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

RAPORTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2025:7

KUUMUUDEN AIHEUTTAMIEN ILMASTORISKIEN TARKASTELU HELSINGISSÄ

OLLI SARANKO
KIMMO RUOSTEENOJA
NIKO SOKKA





Julkaisun tiedot ja tiivistelmä suomeksi

Julkaisija

Ilmatieteen laitos
(Erik Palménin aukio 1)
PL 503, 00101 Helsinki

Julkaisun sarja ja numero

Raportteja 2025:7

Tekijät

Olli Saranko, Kimmo Ruosteenoja, Niko Sokka

Toimeksiantaja

Helsingin kaupunki

Nimeke

Kuumuuden aiheuttamien ilmatoriskien tarkastelu Helsingissä

Tiivistelmä

Tutkimuksessa tarkasteltiin korkeiden lämpötilojen käyttäytymistä Helsingin kaupungin eri alueilla lähimenneisyyden ja tulevaisuuden ilmastossa. Työvälineenä toimivat meteorologinen HARMONIE-AROME-malli sekä ilmakehän ja maanpinnan vuorovaikutuksia simuloiva SURFEX-energiatasemalli. Lähimenneisyyden ilmaston esimerkkikuukausina käytettiin v. 2018 toukokuuta, v. 2021 kesä- ja heinäkuuta sekä v. 2022 elokuuta, jotka kaikki olivat sääoloiltaan harvinaisen lämpimiä. Tulevien ajanjaksojen 2025–2054 ja 2055–2084 ilmastoa kuvaamaan luotiin keinotekoiset säätiedot delta-menetelmän avulla eli muokkaamalla esimerkkikuukausien havaittuja säätilanteita CMIP6-ilmastomallien simuloimilla lämpötilojen ja muiden keskeisten sääsuureiden muutoksilla. Ennustettu ilmastonmuutos perustui voimakkuudeltaan keskinkertaiseen SSP2-4.5-kasvihuonekaasuskenaarioon. Kaupungin sääolosuhteita mallinnettiin yleiskaavaa vastaavalla 100 metrin alueellisella tarkkuudella.

Ilmastomallitulosten perusteella keskilämpötilat nousevat kuukaudesta riippuen keskimäärin 0.77–0.83 °C jakson 2025–2054 ilmastoon ja 1.66–1.77 °C jakson 2055–2084 ilmastoon siirryttäessä. Keskilämpötilan nousu näyttää toteutuvan Helsingin eri alueilla suunnilleen yhtä voimakkaana, eli eri maankäyttöluokkien välillä ei nähdä suuria eroja lämpötilan kuukausikeskiarvojen muutoksessa. UTCI-lämpömukavuusindeksin (Universal Thermal Climate Index) maksimiarvojen kasvaessa myös kuumarasituksessa vietetty aika kasvaa. Kaupungin lämpösaarekeilmiö on voimakkainta tiheästi rakennetuilla puuttomilla alueilla, joilla rakennukset ovat matalia ja suuria (Local Climate Zone 8). Myös meren läheisyyden viilentävä vaikutus eteläisissä kaupunginosissa näkyy tuloksissa selkeästi.

Julkaisijayksikkö

Meteorologinen tutkimus

Luokitus (UDK)

551.5, 551.58

Asiasanat

Kaupunki-ilmasto, ilmastonmuutos, säämallit, Helsinki, ilmastoskenaariot, helteet, kuumarasitus

ISSN

2342-7108 (verkkojulkaisu)

ISBN

978-952-336-210-9 (verkkojulkaisu)

DOI

<https://doi.org/10.35614/isbn.9789523362109>

Kieli

Suomi (tiivistelmä ruotsiksi ja englanniksi)

Sivumäärä

46

Käyttöoikeustieto

CC BY-NC 4.0. Lisenssi sallii jakamisen lähdeviite merkiten, mutta ei salli kaupallista käyttöä ilman erillistä lupaa.



Publikationsuppgifter och sammandrag på svenska

Utgivare

Meteorologiska institutet
(Erik Palméns plats 1)
PB 503, 00101 Helsingfors

Publikationens serie och nummer

Rapporter 2025:7

Författare

Olli Saranko, Kimmo Ruosteenoja, Niko Sokka

Uppdragsgivare

Helsingfors stad

Rubrik

Analys av värmeinducerade klimatrisker i Helsingfors

Sammandrag

Denna studie undersökte förekomsten av höga temperaturer i olika delar av Helsingfors stad i det nuvarande och framtida klimatet. Arbetet använde den numeriska väderförutsägelsemodellen HARMONIE-AROME och yt-atmosfär-interaktionsmodulen SURFEX. För att studera det nuvarande klimatet valdes maj 2018, juni och juli 2021 och augusti 2022 ut för att representera sällsynta månader av ovanlig värme. För att beskriva klimatet under tidsperioderna 2025—2054 och 2055—2084, användes delta-metoden för att skapa artificiella vädertidserier: temperatur och andra väderparametrar för de valda månaderna från det nuvarande klimatet modifierades, baserat på CMIP6-klimatmodellsimuleringarna. Den förutspådda klimatförändringen baserades på den mellanliggande utvecklingvägen för utsläpp av växthusgaser SSP2-4.5. Väderförhållandena modellerades med en rumslig upplösning på 100 m, vilket motsvarar stadens generalplan.

Klimatsimuleringarna förutspår att medeltemperaturen kommer att stiga, beroende på månad, i genomsnitt 0,77—0,83 °C under perioden 2025—2054 och 1,66—1,77 °C under perioden 2055—2084. Medeltemperaturen stiger på liknande sätt i olika delar av Helsingfors stad, vilket innebär att det inte finns några signifikanta skillnader i förändringen av månadsmedeltemperaturerna för de olika markanvändningstyperna. När de maximala värdena för UTCI (Universal Thermal Climate Index) värmestressindex ökar, ökar också tiden som spenderas i värmestress. Den urbana värmeöeffekten är starkast i stadsområden utan träd och med låga och stora byggnader (Lokal klimatzon 8). Den kylande effekten från havets närhet är också tydlig i de södra delarna av staden.

Publikationsenhet

Meteorologisk forskning

Klassificering (UDK)

551.5, 551.58

Nyckelord

Urbant klimat, klimatförändringar, vädermodell, Helsingfors, klimatscenarier, värmeböljor, värmestress

ISSN

2342-7108 (online)

ISBN

978-952-336-210-9 (online)

DOI

<https://doi.org/10.35614/isbn.9789523362109>

Språk

Finska, sammandrag på svenska och engelska

Sidantal

46

Nyttjanderätt

CC BY-NC 4.0. Licensen tillåter delning med angivande av källa, men tillåter inte kommersiell användning utan särskilt tillstånd.



Publication details and abstract in English

Published by

Finnish Meteorological Institute
(Erik Palménin aukio 1), P.O. Box 503
FI-00101 Helsinki, Finland

Series title and number of the publication

Reports 2025:7

Authors

Olli Saranko, Kimmo Ruosteenoja, Niko Sokka

Commissioned by

City of Helsinki

Title

Analysis on heat-induced climate risks in Helsinki

Abstract

This study examined the behaviour of high temperatures in different parts of the city of Helsinki in recent past and future climate. The work utilized numerical weather prediction model HARMONIE-AROME and surface-atmosphere interaction module SURFEX. To study the recent past climate, May 2018, June and July 2021, and August 2022 were selected to represent months with unusual heat. To describe the climates of the time periods of 2025—2054 and 2055—2084, a delta-method was utilized to create artificial weather timeseries: temperature and other weather parameters of the selected months from the recent past were modified according to the CMIP6 climate model simulations. The projected climate change was based on the intermediate greenhouse gas emission pathway SSP2-4.5. The weather conditions were modelled at a spatial resolution of 100 m corresponding to the city plan.

According to the climate model simulations, the mean temperature will rise, depending on the month, on average 0.77—0.83 °C by 2025—2054 and 1.66—1.77 °C by 2055—2084. The mean temperature rises approximately equally in different parts of the city of Helsinki, indicating that there are no significant differences in the changes of the monthly average temperatures among the different land use types. As the maximum values of the UTCI (Universal Thermal Climate Index) heat stress index rise, the time spent in heat stress also increases. The urban heat island effect is strongest on dense urban areas without trees and with lowrise and large buildings (Local Climate Zone 8). Cooler conditions in the vicinity of the sea are also clearly visible in the southern parts of the city.

Publishing unit

Meteorological research

Classification (UDC)

551.5, 551.58

Keywords

Urban climate, climate change, weather models, Helsinki, climate scenarios, heat waves, heat stress

ISSN

2342-7108 (online)

ISBN

978-952-336-210-9 (online)

DOI

<https://doi.org/10.35614/isbn.9789523362109>

Language

Finnish, abstract in Swedish and English

Pages

46

Access rights

CC BY-NC 4.0. The license allows sharing with attribution but does not permit commercial use without explicit permission.



Esipuhe

Tässä tutkimuksessa selvitettiin lämpötilan ja UTCI-lämpömukavuusindeksin alueellisia jakaumia Helsingissä kuumien kesäkuukausien aikana nykyisessä ja tulevassa ilmastossa. Työ tehtiin Helsingin kaupungin ympäristö- ja kaupunkisuunnittelijoiden toiveita ja tarpeita kuunnellen. Pyydetyn 100 m alueellisen tarkkuuden saavuttamiseksi työssä on käytetty koneoppimismallien avulla luotua maankäyttöaineistoa (Rieutord ym. 2024), jota ennen tätä tutkimusta ei ole Suomeen keskittyvässä tutkimuksessa käytetty. Käytettyä mallinnusmenetelmää on hyödynnetty aikaisemminkin (Saranko ym. 2020), mutta ei vastaavalla alueellisella tarkkuudella. Säämuuttujien tulevia muutoksia laskettaessa päädyttiin käyttämään pohjana SSP2-4.5-kasvihuonekaasuskenaariota, sillä tätä vaihtoehtoa pidetään nykytiedon perusteella todennäköisimpänä kaikista kehityssuunnista.

Tutkimuksessa on tarkasteltu yksittäisiä kuukausia, joten tässä työssä esitetyt tulevan ilmaston kuukausien mallinnukset eivät kuvaa tulevaa ilmastoa kokonaisuutena. Toisaalta, koska tarkka sään mallintaminen vuosia etukäteen on mahdotonta, mallinnettuja tulevan ilmaston kuukausia tuskin nähdään täysin samanlaisina. Mallinnetut kuukaudet ovat esimerkkejä kuumista tapauksista, joiden kaltaisten tilanteiden vuosittainen esiintymistodennäköisyys vastaa – käytetyn kasvihuonepäästöjen kehityskulun toteutuessa – mallinnusten pohjana käytettyjen nykyilmaston kuumien kuukausien esiintymistodennäköisyyttä.

Kiitämme Helsingin kaupunkia yhteistyöstä ja tämän tutkimuksen rahoituksesta. Lisäksi haluamme kiittää kaikkia niitä kollegoita Ilmatieteen laitoksella, jotka ovat työpanoksellaan osallistuneet tutkimuksen tieteelliseen vahvistamiseen.

Olli Saranko
Tutkija
Ilmatieteen laitos



Sisältö

1	Johdanto	6
1.1	Helteiden vaikutus terveyteen	6
1.2	Säämallit ja ilmastomallit kaupungin suunnittelun tukena.....	6
1.3	Tulevan ilmaston kuumien kesien tutkiminen	7
2	Käytetyt mallit ja menetelmät	8
2.1	HARMONIE-AROME ja SURFEX	8
2.2	CMIP6-mallit.....	9
2.3	Tulevan ilmaston säätilanteiden mallintaminen	11
3	Kuumat kesät nykyisen ja tulevan ilmaston Helsingissä	13
3.1	Nykyilmaston kuukausittaiset arvot	13
3.1.1	Lämpötila	13
3.1.2	UTCI.....	16
3.1.3	Tuulen suunnista johtuvat poikkeamat	19
3.2	Sää erilaisissa rakennetuissa ympäristöissä	21
3.3	Kaupunki-ilmaston kehittyminen tulevaisuudessa	27
3.3.1	Keskilämpötila	27
3.3.2	Helletilanteet	30
3.3.3	UTCI.....	35
4	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	40
	Lähteet	42
	Liitteet.....	44
	A UTCI-indeksin laskukaava	44
	B SURFEX-mallin konfiguraatio	44
	C Ilmastomallien tuloksiin perustuvat deltamuutokset.....	45
	D Sääparametrien muutokset.....	46

1 Johdanto

1.1 Helteiden vaikutus terveyteen

Suomessa kovimmatkaan helteet eivät ole tuoneet mukanaan yhtä korkeita lämpötiloja kuin mitä esimerkiksi Etelä-Euroopassa on totuttu näkemään viime vuosina. Helteistä aiheutuva kuumarasitus voi kuitenkin tutkitusti aiheuttaa terveysriskejä myös Helsingissä, kuten Ruuhelan ym. (2021) tekemä tutkimus osoittaa.

Lämpötilan lisäksi esimerkiksi kosteus, tuuli ja auringonsäteily vaikuttavat ihmisen kokemaan kuumuuden tunteeseen. Näiden tekijöiden yhteisvaikutuksen huomioimiseksi on kehitetty erilaisia indeksejä, kuten lämpömukavuusindeksi UTCI (Universal Thermal Climate Index). UTCI ottaa huomioon edellä mainitut sääsuureet ja laskee niistä lämpötilan kaltaisen arvon käyttäen ihmisen lämpötasapainoa kuvaavia yhtälöitä (laskukaavaa selitetty lyhyesti liitteessä A). Indeksien arvot on luokiteltu stressin voimakkuuden mukaan eri kategorioihin, joista lämpöstressiä kuvaavat on listattu taulukossa 1. Eri tasojen vaikutuksista kertoo esimerkiksi Blazejczyk ym. (2010) tutkimus.

Taulukko 1. UTCI-lämpömukavuusindeksin lämpöstressiluokat.

UTCI (°C)	Stressitaso (suomennos)
46+	Äärimmäinen kuumarasitus
38–46	Hyvin voimakas kuumarasitus
32–38	Voimakas kuumarasitus
26–32	Kohtalainen kuumarasitus
9–26	Ei kuumarasitusta

1.2 Säämallit ja ilmastomallit kaupungin suunnittelun tukena

Sääennusteet ovat oleellinen osa nyky-yhteiskunnan toimintaa. Mahdollisimman tarkat ennusteet hyödyttävät niin ihmisten arjen suunnittelua kuin pelastustöiden ennakoimista. Nykyään ennusteiden pohjana on aina säänennustusmalli, jonka tuloksia meteorologi

tulkitsee. Säämalli tuottaa sääsuureesta ja säätilanteesta riippuen käyttökelpoista tietoa muutamasta päivästä reiluun viikkoon.

Säämallin tarkkuus heikkenee merkittävästi ennusteen pituuden kasvaessa, joten ne soveltuvat ainoastaan lähipäivien sään ennustamiseen. Ilmastomuutosta tutkittaessa käyttöön otetaan ilmastomalli, joka ei pyri ennustamaan päivittäistä säätilaa vaan ilmaston kehittymistä. Usein ilmastoa tutkittaessa on käytössä useampi malli, joiden tuloksia vertailemalla saadaan luotettavampaa tietoa tulevaisuuden ilmastosta. Oleellinen osa ilmastomallin syöttötietoja on oletettu kasvihuonekaasujen kehityskaari, joka kertoo millä aikataululla ilmaston kehitykseen vaikuttavia päästöjä rajoitetaan.

Sekä säämalleja että ilmastomalleja voidaan hyödyntää kaupungin suunnittelussa. Säämalleihin perustuvat ennusteet auttavat suunnittelemaan päivittäisiä toimintamalleja, kuten helteisiin varautumista kesäisin tai lumen auraustarpeita talvisin. Ilmastomallien tuottamia ilmaston kehityssuuntia voidaan puolestaan ottaa huomioon pitkän aikavälin suunnittelussa, kuten kaavoituksessa.

1.3 Tulevan ilmaston kuumien kesien tutkiminen

Taulukko 2. Nykyilmaston (2005–2034) kuumien esimerkkikuukausien vuosittaiset esiintymistodennäköisyydet. Todennäköisyydet on laskettu Rantasen ym. (2024) tutkimuksessa esitetyllä menetelmällä. Luvut kertovat vuosittaisen todennäköisyyden sille, että vastaava kuukausi olisi yhtä lämmin tai lämpimämpi kuin mitä kyseisenä kuukautena mitattiin.

Kuukausi	Vuosittainen esiintymistodennäköisyys jakson 2005–2034 ilmastossa
Toukokuu 2018	1.8 %
Kesäkuu 2021	2.5 %
Heinäkuu 2021	9.4 %
Elokuu 2022	12.9 %

Tässä hankkeessa on tutkittu erityisen kuumia kesäkuukausia nykyisessä sekä tulevaisuuden ilmastossa mallintamalla sääolosuhteita Helsingin yleiskaavaa vastaavalla alueellisella tarkkuudella käyttäen HARMONIE-AROME säämallia sekä SURFEX energiatasemallia. Mallinnetut nykyisen ilmaston kuukaudet ovat erityisen kuumia kuukausia

lähihistoriasta, ja niiden arvioidut vuosittaiset esiintymistodennäköisyydet on esitetty taulukossa 2. Tulevien ilmastojen kuukausien säätiedot ovat delta-menetelmällä luotuja keinotekoisia arvoja. Näiden esimerkkikuukausien vuosittaiset esiintymistodennäköisyydet tulevassa ilmastossa vastaavat taulukossa 2 esitettyjä arvoja, mikäli ilmaston kehitys noudattaa tässä hankkeessa käytettyä ilmastoskenaariota (kappale 2.2).

2 Käytetyt mallit ja menetelmät

2.1 HARMONIE-AROME ja SURFEX

HARMONIE-AROME-säänennustusmallia käytetään sääennusteiden luomiseen Ilmatieteen laitoksella Suomessa ja useassa muussa Euroopan maassa, ja sitä kehitetään ACCORD-konsortion johdolla. HARMONIE-AROME on numeerinen malli: ennustettavan säätilan laskemiseen tarvitaan alkutila, josta päästään ennustehetkeen jäljittelemällä ilmakehän prosesseja fysiikan lakien mukaisesti. Malli luo alkutilan yhdistelemällä havaintoja sekä mallin aikaisempia ennusteita hyödyntäen assimilointimenetelmiä, jolloin saadaan mahdollisimman tarkka kuvaus ilmakehän tilasta ennusteen alkuhetkellä. HARMONIE-AROME:lla tuotetaan ennusteita enimmillään 66 tunnin päähän, ja operatiivisia ennusteita laskettaessa mallia ajetaan nykyisin kolmen tunnin välein.

Ilmakehän meteorologinen tilanne pitkälti määrää maan pinnan lähellä vallitsevat sääolosuhteet, ja toisaalta olosuhteet pinnan lähellä vaikuttavat yläpuoliseen ilmakehään. HARMONIE-AROME:n mallinnusjärjestelmässä ilmakehän ja maanpinnan vuorovaikutuksesta vastaa itsenäinen SURFEX-energiatasemalli, joka on integroitu osaksi HARMONIE-AROME:a. Malli käsittelee olosuhteita erikseen neljällä erilaisella aluspinnan päätyypillä: merellä, sisävesillä, luonnossa ja rakennetulla alueella. Viimeisin SURFEX-mallin versio käyttää maanpinnan ominaisuuksille ECOCLIMAP-SG-luokitusta, jolloin pinta jaetaan ominaisuuksiensa perusteella edelleen 33 maankäyttöluokkaan. Näistä kaupunkimaisia luokkia on kymmenen, ja ne noudattavat Stewartin ja Oken (2012) esittämää luokitusta (Local Climate Zones, LCZ). Mallilaskelmissa käytetyt kaupunkiluokat on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Local Climate Zone –luokituksen mukaiset kaupunkiluokat

Luokka		Kuvaus	
LCZ 1	Tiivis ja korkea	LCZ 6	Avoin ja matala
LCZ 2	Tiivis ja keskikorkea	LCZ 7	Pieniä ja matalia rakennuksia tiiviisti
LCZ 3	Tiivis ja matala	LCZ 8	Suuria ja matalia rakennuksia väljästi
LCZ 4	Avoin ja korkea	LCZ 9	Harvaan rakennettu
LCZ 5	Avoin ja keskikorkea	LCZ 10	Teollisuusalue

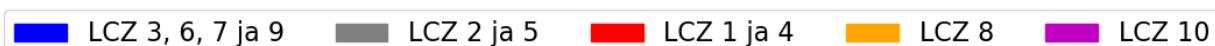
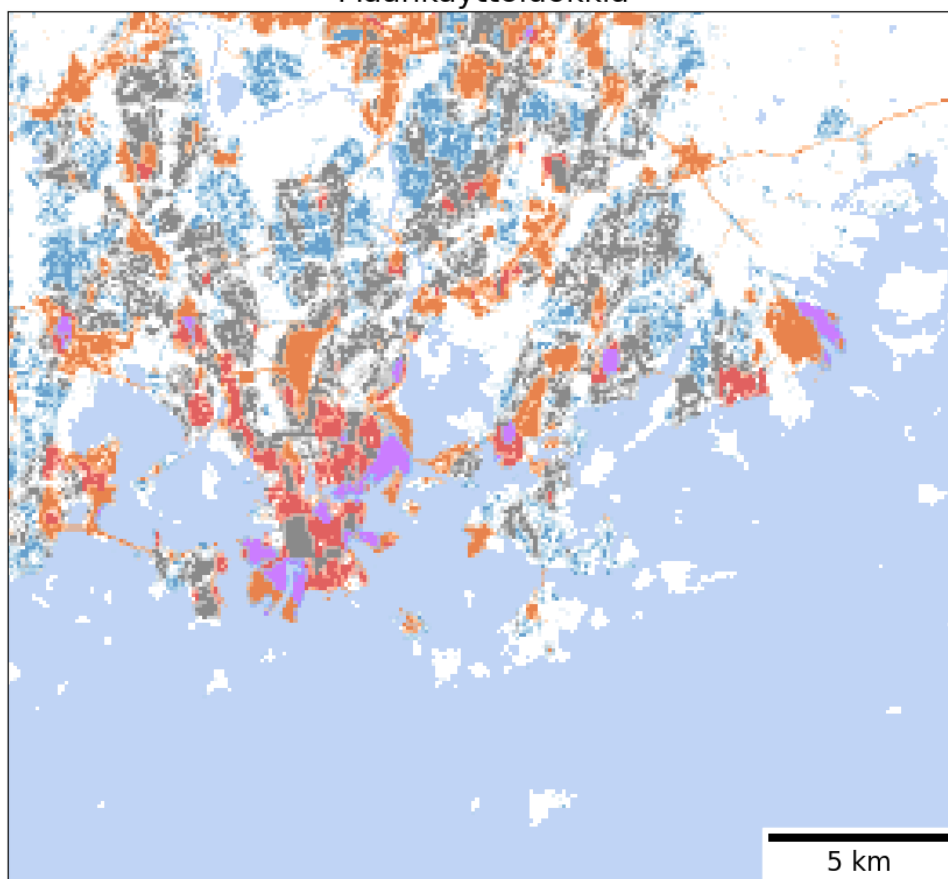
Alkuperäisen ECOCLIMAP-SG-maankäyttöaineiston tarkkuus on 10 astesekuntia eli 0.00278 astetta, joka vastaa noin 300 metriä maanpinnalla. Koska tämän hankkeen tavoitteena oli tuottaa mallinnustuloksia yleiskaavaa vastaavalla tarkkuudella (100 metriä), päädyttiin alkuperäisen aineiston sijaan käyttämään koneoppimismallien avulla luotua ECOCLIMAP-SG+ML-aineistoa, jonka tarkkuus on 60 metriä (Rieutord ym. 2024). Aineiston mukaiset kaupunkiluokat Helsingin alueella on esitetty kuvassa 1. Aineiston hyödyntäminen laajemmin säämallinuksissa on vielä kokeiluasteella, ja sen vuoksi tämän hankkeen laskelmissa on päädytty tekemään joitakin yksinkertaistuksia, jotta tavoiteltu 100 metrin tarkkuus saavutettaisiin. SURFEX-mallin asetukset on esitetty tarkemmin liitteessä B.

2.2 CMIP6-mallit

Tulevan ilmaston mallintamiseen tarvitaan ilmastomalleja, jotka ottavat huomioon ilmaston muuttumiseen vaikuttavat tekijät, kuten kasvihuonekaasujen pitoisuuksien oletetun kehityskaaren tulevaisuudessa. Ilmastomalli on tietokoneohjelma, joka perustuu ilmastojärjestelmän eri osia (ilmakehä, meret, maan pintakerros, lumipeite yms.) kuvaaviin fysiikan lakeihin; nämä lait esitetään ensin matemaattisina yhtälöinä ja sitten puetaan tietokonealgoritmin muotoon. Lämpötilan, vesihöyryn määrän, ilmapvirtausten suunnan ja nopeuden sekä muitten ilmakehäsuureitten 3-ulotteiset jakaumat esitetään mallissa hilapisteikössä, jossa hilapisteitten välimatka on tyypillisesti sadan kilometrin luokkaa. Ilmakehäsuureitten arvojen muuttuminen hilapisteissä ajan suhteen määräytyy virtausmekaniikan ja lämpöopin peruslakien perusteella, ja tällöin otetaan huomioon mm.

auringonsäteilyn tuoman lämmön jakautuminen eri puolille maailmaa ja ilmakehän kyky pidättää lämpösäteilyn karkaamista avaruuteen (=kasvihuoneilmiö). Hilaväliä pienemmän mittakaavan ilmiöitten, esimerkiksi kuurosadepilvien, vaikutus otetaan huomioon epäsuorasti. Ilmakehässä kaikki vaikuttaa kaikkeen, niin eri kokoluokan kuin eri puolilla maailmaakin esiintyvät ilmiöt. Vaikka oltaisiin kiinnostuneita jonkun rajallisen alueen kuten Suomen ilmastosta, mallin on sen tähden katettava koko maapallo.

Maankäyttöluokkia



Kuva 1. SURFEX-mallin käyttämät kaupunkimaankäyttöluokat Helsingissä rakennuskorkeuden mukaan luokiteltuina. Sinisellä on merkitty matalat, harmaalla keskikorkeat ja punaisella korkeat rakennukset. Oranssilla on merkitty alueet, jotka koostuvat suurista, harvassa sijaitsevista rakennuksista, ja violetilla teollisuusalueet. Vesialueet on merkitty vaaleansinisellä ja muuksi kuin kaupunkimaiseksi luokitellut maa-alueet valkoisella.

Ilmastomalli tuottaa laskentatuloksenaan lämpötilan, sademäärän ja muitten sääsuureitten aikasarjoja yleensä vähintäänkin sadan vuoden ajalle. Yksittäiset hetkelliset säätilanteet eivät kylläkään osu mallissa samoihin ajankohtiin kuin luonnossa, vaan kiinnostavaa on nimenomaan sääsuureitten pitkän aikavälin tilastollinen käyttäytyminen eli ilmasto. Mallilta on siten turha kysyä, millaiset kelit vallitsevat vaikkapa vuoden 2064 jouluaattona, mutta hyvin rakennettu ilmastomalli voi tarjota arvokasta tietoa siitä, miten 2060-luvun lämpötilat yleisesti ottaen poikkeavat nykyisistä.

Alueellisen laskentatarkkuutensa rajallisuuden vuoksi maailmanlaajuinen ilmastomalli ei kykene tekemään eroa esimerkiksi pääkaupunkiseudun eri kaupunkien, saatika kaupunginosien välillä. Maailmanlaajuisen ilmastomallin tuloksia käytetään näin ollen odotettavissa olevan lämpenemisen ja muiden ilmastollisten muutosten suuruuden arvioimiseen, mutta alueelliset yksityiskohdat on pääteltävä muilla tavoin (ks. kappale 2.3).

Tässä selvityksessä esitettävät jaksoille 2025–2054 ja 2055–2084 lasketut ilmastonmuutosarvot perustuvat 23–28 CMIP6-ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvoon (Eyring ym., 2016; Ruosteenoja ja Jylhä, 2021), ja laskelmien pohjana on käytetty SSP2-4.5-kasvihuonekaasuskenaariota (O'Neill ym., 2016). Tuon skenaarion mukaan kasvihuonekaasuista tärkeimmän eli hiilidioksidin maailmanlaajuiset päästöt vielä hivenen kasvaisivat lähivuosisikymmeninä mutta kääntyisivät selvään laskuun 2040-luvun jälkeen. Kyseessä on voimakkuudeltaan keskitasoinen skenario, jota ilmastopolitiikan nykyiset tavoitteet huomioon ottaen voidaan pitää jossakin määrin pessimistisenä. Tämän skenaarion toteutuessa maapallon keskilämpötilan arvioidaan nousevan v. 2100 mennessä vajaalla kolmella asteella teollistumista edeltävään aikaan verrattuna (IPCC, 2021).

Monilla malleilla on taipumusta ali- tai yliarvioida havaittuja keskilämpötiloja muutamalla asteella, mutta mallin simuloimat lämpötilojen muutokset voivat silti olla järkeenkäyviä. Tämän ongelman ratkaisemiseksi käytetään tulevia lämpötiloja arvioitaessa ns. delta-menetelmää, eli esimerkiksi lisätään havaittuihin lähimenneisyyden keskilämpötiloihin mallien ennustama lämpötilan muutos. Lisäksi otetaan huomioon lämpötilojen ajallisten vaihteluitten mahdollinen vaimentuminen tai voimistuminen. Menetelmästä kerrotaan enemmän tämän raportin liitteessä C.

2.3 Tulevan ilmaston säätilanteiden mallintaminen

Ilmastomallit pystyvät mallintamaan ilmaston kehittymistä, jolloin saadaan arvio siitä, millaisia säätilanteita keskimäärin koetaan tulevaisuudessa. Tulevaa säätä, eli yksittäisiä hetkiä ilmastomallit eivät kuitenkaan kykene ennustamaan, ja säämallien tarkkuus riittää kuvaamaan sään kehitystä korkeintaan muutamia viikkoja eteenpäin. Sään käyttäytymistä tulevassa ilmastossa päästään kuitenkin tutkimaan hyödyntämällä niin kutsuttua delta-

menetelmää. Delta-menetelmässä nykyisen ilmaston säätä muokataan ilmastomallien ennusteiden mukaisilla muutoksilla niin, että tuloksena saadun tulevan ilmaston keinotekoisien säätilan ero nykyilmaston todelliseen säätilaan noudattaa ilmastomallien ennustamaa ilmaston kehitystä. Tässä hankkeessa käytetty delta-menetelmä mukailee Sarangon ym. (2020) tutkimuksessa käytettyä menetelmää, ja se pohjautuu Jylhän ym. (2021, 2015a, 2015b) ja Lehtosen ym. (2014) tutkimuksiin.

Tässä hankkeessa tulevan ilmaston sääolosuhteita maanpinnan lähellä on mallinnettu seuraavin askelin:

1. HARMONIE-AROME:lla mallinnetaan yksittäisten kuukausien säätä Etelä-Suomessa 750 metrin tarkkuudella ja 6 tunnin ennustepituudella. Mallinnetut kuukaudet ovat: toukokuu 2018, kesäkuu 2021, heinäkuu 2021 sekä elokuu 2022.
2. HARMONIE-AROME:n tuloksista luodaan sääpakote Helsingin alueelle 100 metrin tarkkuudella. Sääpakote sisältää tunnitaiset arvot lämpötilalle, kosteudelle, tuulennopeudelle ja suunnalle, auringonsäteilylle, ilmanpaineelle sekä sademäärälle.
3. Sääpakotetta muokataan CMIP6-ilmastomallien tuottamilla kuukausikohtaisilla muutoksilla, jolloin saadaan tulevan ilmaston säätä vastaava pakote. Sääpakote luodaan vuosien 2025–2054 ja vuosien 2055–2084 ilmastoille. Muutokset tehdään kullekin neljälle tarkastellulle kuukaudelle erikseen. Nykyilmaston mallinnoissa kohta 3 jätetään välistä.
4. Lopuksi SURFEX-pintamallia ajetaan joko nykyisen tai tulevan ilmaston sääpakotteilla.

Tulevan ilmaston säätä kuvaavien tilanteiden mallintaminen tällä menetelmällä on laskennallisesti edullista, sillä menetelmä ei vaadi uusien, paljon aikaa ja laskentatehoa vaativien ilmastomalliajojen tekemistä.

3 Kuumat kesät nykyisen ja tulevan ilmaston Helsingissä

Tässä kappaleessa on esitelty ilmatoriskitarkastelun tuloksia. Kappaleessa 3.1 kerrotaan nykyilmaston mallinnuksen tuloksista lasketut esimerkkikuukausien kuukausikeskiarvot ja rakennetusta ympäristöstä johtuvat poikkeamat lämpötilalle, sekä päivittäisten maksimiarvojen 90. prosenttipisteet ja kuumarasituksessa vietetty aika UTCI-lämpömukavuusindeksin perusteella. Päivittäisten maksimiarvojen 90. prosenttipiste kertoo rajan, jonka alapuolelle 90 prosenttia kaikista kuukauden päivien maksimiarvoista sijoittuu: toisin sanoen, tämä raja ylitetään noin yhtenä päivänä kymmenestä. Kappaleessa 3.2 on esitelty mallien tuloksia erilaisissa rakennetuissa ympäristöissä. Kappaleessa on keskitytty rakennusten korkeuden vaikutukseen, sillä muista mallin käyttämisestä kaupunkiparametreista (rakennustiheys, rakennusten korkeus-leveys-suhde) ei mallidataa analysoidessa löytynyt yhtä selvää yhteyttä lämpötilaan tai UTCI-arvoihin. Kappaleessa 3.3 on esitelty tulevan ilmaston kuukausien mallinnusten tuloksia. Jokaisessa osiossa tulokset näytetään kuukausittain. Tuloksia tarkasteltaessa käytetään käsitettä lämpösaarekeilmiö, millä tässä yhteydessä viitataan rakennetulle alueelle ja rakentamattomalle alueelle mallinnettujen lämpötilojen erotukseen.

3.1 Nykyilmaston kuukausittaiset arvot

3.1.1 Lämpötila

Toukokuu

Toukokuussa 2018 hilapisteiden keskilämpötilat asettuvat 10 ja 17 asteen väliin (kuva 2). Sisämaan kaupunkialueilla on kuuminta, kun taas kylmintä on rannikolla ja saarilla. Lämpösaarekeilmiön voimakkuus on suurimmillaan 3.5 astetta.

Kesäkuu

Kesäkuussa 2021 keskilämpötila on rannikolla alimmillaan 16 astetta, ja sisämaan kaupunkialueilla ylimmillään 22.5 astetta (kuva 3). Lämpösaarekeilmiössä ei ole merkittäviä alueellisia eroja toukokuuhun verrattuna.

Heinäkuu

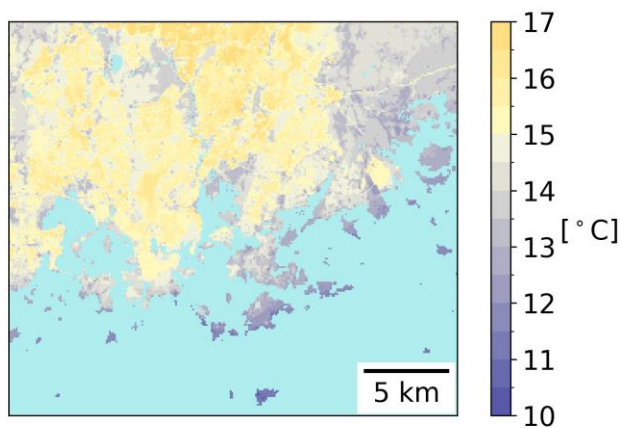
Heinäkuun 2021 mallinnettujen lämpötilojen keskiarvot (kuva 4) jakautuvat samankaltaisesti kuin touko- ja kesäkuussakin, mutta vaihteluvälinä on 19–23.5 °C. Lämpösaarekeilmiö on noin puolen asteen verran heikompi eli rakennukset eivät aiheuta niin suurta ylimääräistä

lämpörasitetta rakentamattomaan alueeseen verrattuna, vaikka lämpötilat itsessään ovat korkeampia.

Elokuu

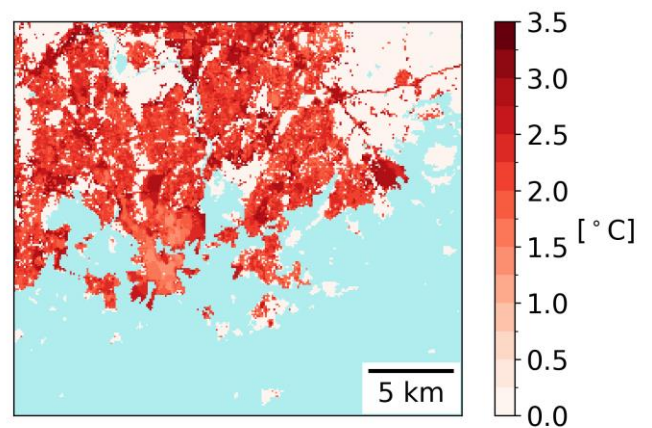
Myös elokuun 2022 mallinnettujen lämpötilojen keskiarvojen jakauma (kuva 5) käyttäytyy samansuuntaisesti kuin muina tarkasteltavina kuukausina, nyt 17 ja 21 asteen välissä. Lämpösaarekeilmiö on suurin piirtein samansuuruinen kuin heinäkuun 2021 aikana.

a) Keskimääräinen lämpötila
toukokuussa 2018



maksimiarvo: 17.0 °C

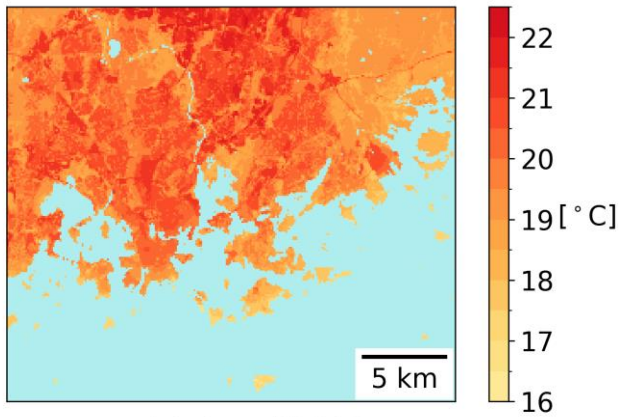
b) Rakennetun ja rakentamattoman alueen
lämpötilaero toukokuussa 2018



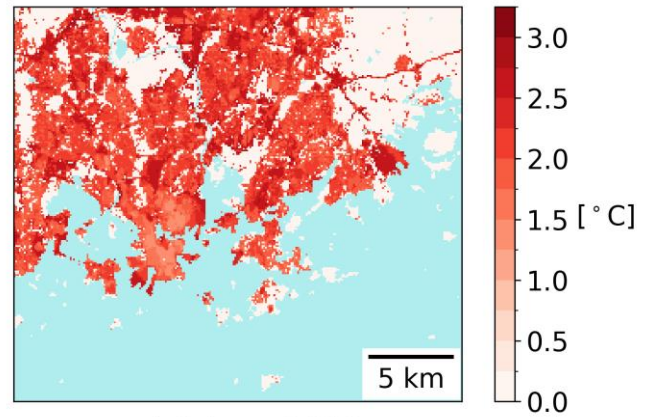
maksimiarvo: 3.3 °C

Kuva 2. Toukokuun 2018 mallinnettujen lämpötilojen keskiarvot kartalla. Osakuvassa a) on esitetty mallinnettujen lämpötilojen keskiarvo tarkastellulla alueella. Vesialueet on merkitty sinisellä. Osakuvassa b) on esitetty hilapisteessä esiintyvän rakennetun ja rakentamattoman ympäristön keskilämpötilojen erotus. Erotuksen arvo on 0 °C niissä hilapisteissä, jotka eivät mallin mukaan sisällä lainkaan rakennettua ympäristöä.

a) Keskimääräinen lämpötila kesäkuussa 2021

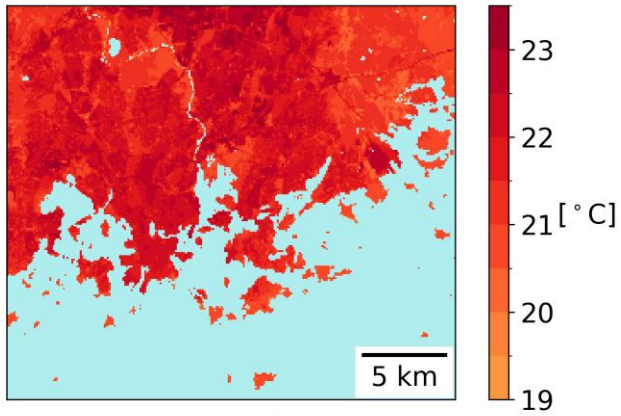


b) Rakennetun ja rakentamattoman alueen lämpötilaero kesäkuussa 2021

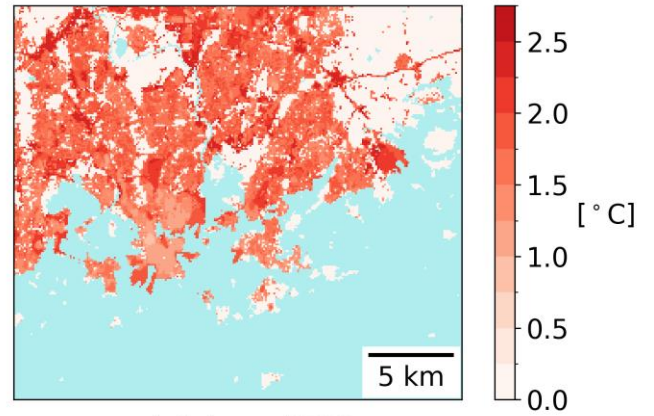


Kuva 3. Kesäkuun 2021 mallinnettujen lämpötilojen keskiarvot kartalla. Osakuvien sisältö on selitetty kuvassa 2.

a) Keskimääräinen lämpötila heinäkuussa 2021

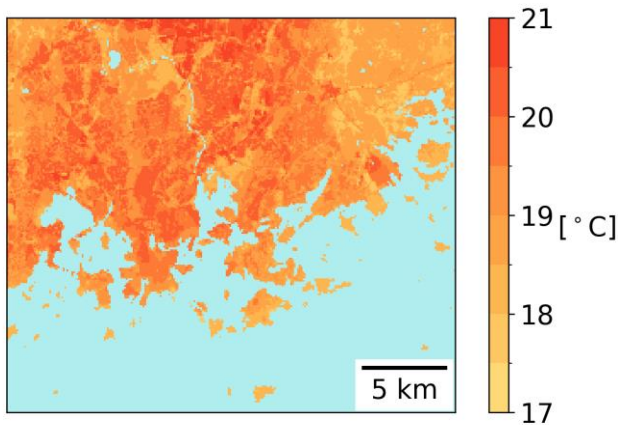


b) Rakennetun ja rakentamattoman alueen lämpötilaero heinäkuussa 2021



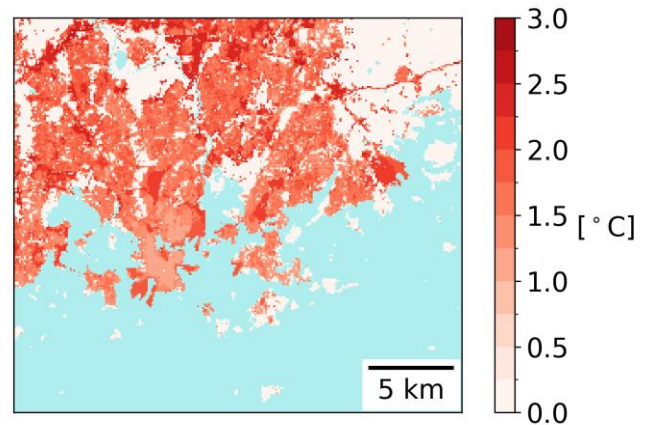
Kuva 4. Heinäkuun 2021 mallinnettujen lämpötilojen keskiarvot kartalla. Osakuvien sisältö on selitetty kuvassa 2.

a) Keskimääräinen lämpötila elokuussa 2022



maksimiarvo: 20.8 °C

b) Rakennetun ja rakentamattoman alueen lämpötilaero elokuussa 2022



maksimiarvo: 2.8 °C

Kuva 5. Elokuun 2022 mallinnettujen lämpötilojen keskiarvot kartalla. Osakuvien sisältö on selitetty kuvassa 2.

3.1.2 UTCI

Tässä kappaleessa on esitetty SURFEX-mallin laskemia UTCI-indeksin arvoja nykyilmaston kuukausille. UTCI riippuu lämpötilan lisäksi kosteudesta, tuulen nopeudesta ja auringonsäteilystä, joten se kertoo lämpötilaa tarkemmin ihmisen kokeman lämpörasituksen. Malli laskee UTCI:n ainoastaan rakennetulle ympäristölle, joten rakentamattomalle alueelle sitä ei ole SURFEX-mallissa saatavilla. Kuvissa on esitetty kunkin kuukauden päivittäisten maksimi-arvojen 90. prosenttipiste, joka kertoo ääriarvojen esiintymisestä: päivittäinen UTCI-indeksin suurin arvo ylittää annetun arvon keskimäärin kerran kymmenessä päivässä. Prosenttipistearvoja esittävässä osakuvissa on käytetty liukuväriä, jossa vihreä vastaa tilanteita ilman kuumarasitusta, keltainen vastaa kohtalaista kuumarasitusta, oranssi voimakasta kuumarasitusta ja punainen erittäin voimakasta kuumarasitusta.

Toukokuu

Toukokuussa 2018 UTCI-indeksin mallinnetuista tuloksista lasketut 90-prosenttipistearvot (kuva 6) asettuvat noin 25 ja 35 asteen väliin, mikä tarkoittaa, että näissä kuumimmissa tilanteissa koettiin joko kohtalaista tai voimakasta kuumarasitusta. Keskimääräinen päivän aikana kuumarasituksessa vietetty aika oli jopa 3.2 tuntia. Kyseisenä kuukautena kuumat säät ajoittuivat kuun jälkipuoliskolle, jolloin kuumarasituksessa vietettyjä tuntejakin kertyi enemmän. Kuumarasitus oli mallinnusten mukaan voimakkaampaa sisämaassa kuin rannikolla.

Kesäkuu

Kesäkuussa 2021 UTCI-indeksin 90. prosenttipistearvot olivat 31 ja 40 °C välillä, rannikon ollessa jälleen sisämaata viileämpi (kuva 7). Päivittäinen kuumarasitusnousi sijainnin mukaan jopa 6.1 tuntiin.

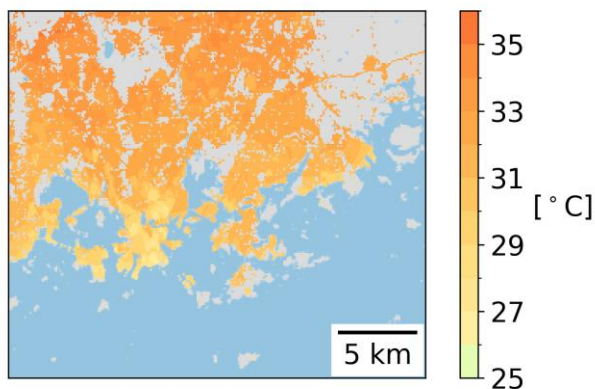
Heinäkuu

Heinäkuussa 2021 kuumarasituksen 90. Prosenttipistearvot (kuva 8) käyttäytyvät samoin kuin kesäkuussa. Vaikka ääriarvot ovatkin kuukausien välillä hyvin samanlaiset, tuon kuukauden korkeampi keskilämpötila johtaa noin puoli tuntia pidempiaikaiseen rasitukseen kuumimmilla alueilla ja noin 1.5 tunnin pidempään aikaan viileämmillä alueilla.

Elokuu

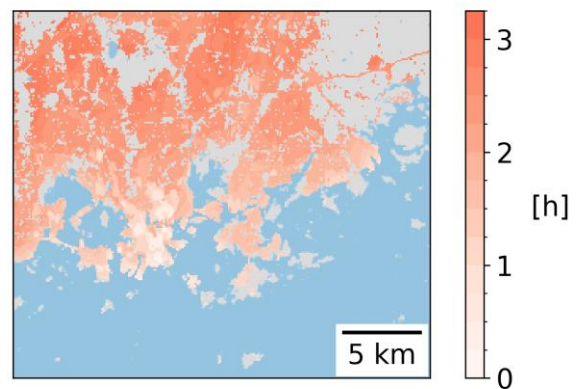
Elokuussa UTCI-indeksin 90. prosenttipistearvot sijoittuvat pääosin kohtalaisen kuumarasituksen rajoihin, kuumimpien alueiden kokiessa jopa vahvaa kuumarasitusta (kuva 9). Kuumarasituksessa vietetty päivittäinen aika voi olla keskimäärin jopa 4 tuntia. Rannikolla arvot ovat jälleen sisämaata alhaisempia.

a) UTCI:n maksimi-arvojen 90. prosenttipiste toukokuussa 2018



maksimi-arvo: 35.2 °C

b) Keskimääräinen päivittäinen kuumarasitus tunteina toukokuussa 2018

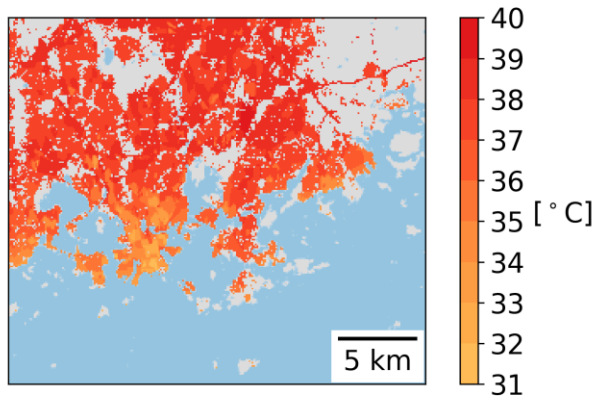


maksimi-arvo: 3.2h

Kuva 6. Toukokuun 2018 mallinnettu kuumarasitus kartalla. Osakuvassa a) on esitetty mallinnetun UTCI-indeksin 90. prosenttipiste. Koska malli laskee UTCI-arvon vain rakennetulle ympäristölle, luontoalueet on merkitty harmaalla ja vesialueet sinisellä. Osakuvassa b) on esitetty keskimääräinen päivittäinen

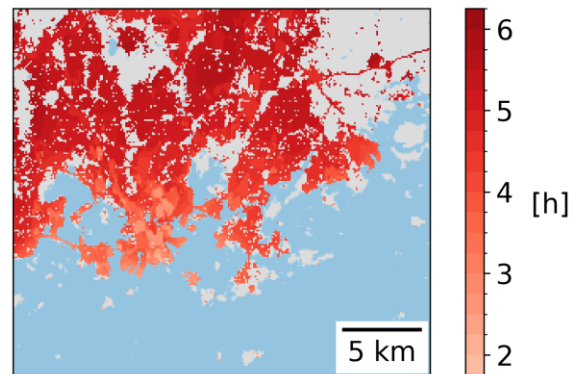
kuumarasituksessa (UTCI:n kategoriat kohtalainen, voimakas, hyvin voimakas ja äärimmäinen kuumarasitus) vietetty aika.

a) UTCI:n maksimiarvojen 90. prosentti-piste kesäkuussa 2021



maksimiarvo: 39.5 °C

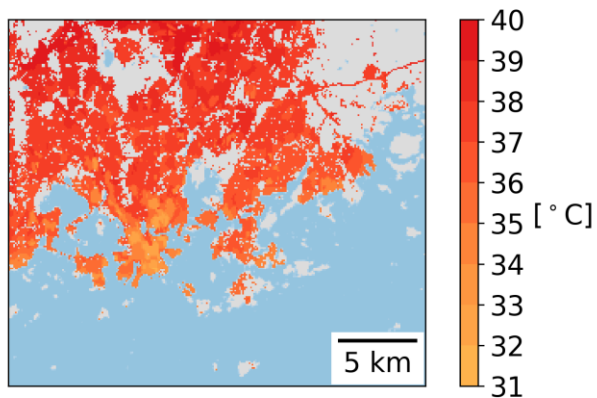
b) Keskimääräinen päivittäinen kuumarasitus tunteina kesäkuussa 2021



maksimiarvo: 6.1h

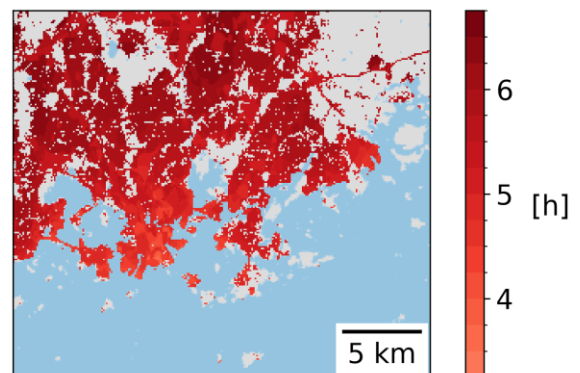
Kuva 7. Kesäkuun 2021 mallinnettu kuumarasitus kartalla. Osakuvien sisältö on selitetty kuvan 6 kuvatekstissä.

a) UTCI:n maksimiarvojen 90. prosentti-piste heinäkuussa 2021



maksimiarvo: 39.6 °C

b) Keskimääräinen päivittäinen kuumarasitus tunteina heinäkuussa 2021

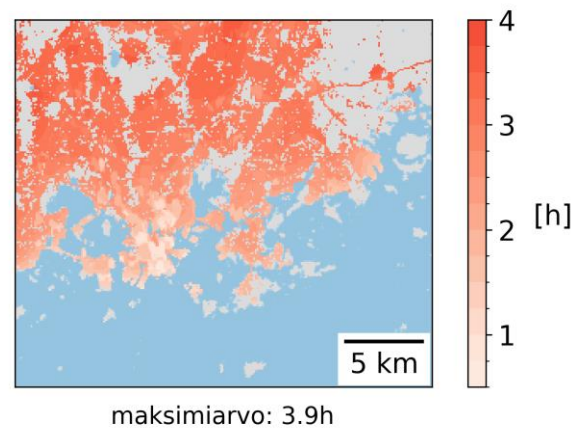
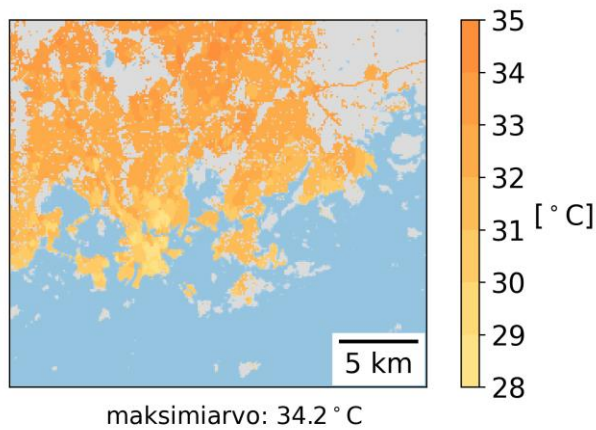


maksimiarvo: 6.7h

Kuva 8. Heinäkuun 2021 mallinnettu kuumarasitus kartalla. Osakuvien sisältö on selitetty kuvan 6 kuvatekstissä.

a) UTCI:n maksimi-arvojen 90. prosentti-piste elokuussa 2022

b) Keskimääräinen päivittäinen kuumarasitus tunteina elokuussa 2022



Kuva 9. Elokuun 2022 mallinnettujen UTCI-arvojen keskiarvot kartalla. Osakuvien sisältö on selitetty kuvassa 6.

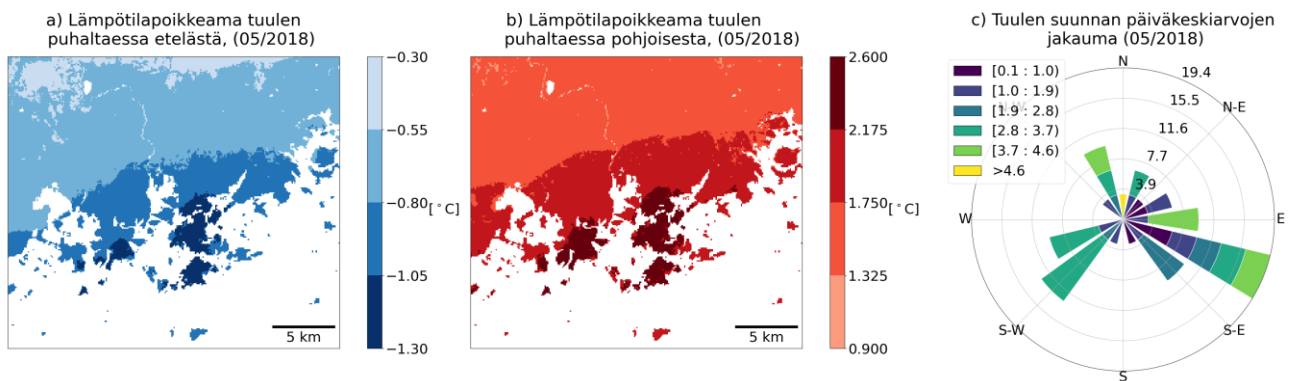
3.1.3 Tuulen suunnista johtuvat poikkeamat

Tässä kappaleessa on esitetty tuulen suunnasta aiheutuvia lämpötilan poikkeamia. Kuvat 10–13 on jäsennetty kuukausittain, ja ne noudattavat samaa kaavaa: a- ja b-kuvissa on esitetty tuulen suunnasta johtuvat lämpötilan keskiarvon poikkeamat, ja c-kuvissa on esitetty tuulen suunnan päiväkeskiarvojen jakaumat maa-alueilta. Lämpötilan poikkeamat on laskettu niin, että koko kuukauden lämpötilan keskiarvo on vähennetty hilapisteittäin niiden päivien keskiarvosta, jolloin tuuli on maa-alueella keskimäärin puhaltanut etelästä (a-kuvat) tai pohjoisesta (b-kuvat). Etelätuuleksi on laskettu tilanteet, jolloin 75 %:ssa maa-alueiden mallinnetuista hilaruuduista tuulen suunta on ollut 90° (itätuulen) ja 270° (länsituulen) välissä, ja pohjoistuuleksi on luokiteltu vastaavat tilanteet vastakkaisesta suunnasta. Etelätuulen ja pohjoistuulen sektoreiden koko valittiin kahdella perusteella: 1) pohjoistuuli oli jokaisena tarkasteltavana kuukautena kohtalaisen harvinaista, eivätkä kapeammalle sektorille lasketut poikkeamat olisi olleet tilastollisesti yhtä luotettavia, sekä 2) Helsingin keskustan alueella tuuli puhaltaa mereltä päin, jos tuulen suunta on mitä vain idän ja lännen eteläpuolelta. Tämän vuoksi kaikkia näitä suuntia on tarkasteltu yhdessä.

Jokaisen tarkastelun kohteena olleen kuukauden (toukokuu 2018, kesäkuu 2021, heinäkuu 2021 ja elokuu 2022) aikana tuulen suunnan päiväkeskiarvot olivat useammin etelästä kuin pohjoisesta. Toisin sanoen, maa-alueilla tuuli puhalsi useammin mereltä kuin mantereelta. Touko- ja kesäkuussa meren viilentävä vaikutus määrittää lämpötilan käyttäytymistä, kun taas heinä- ja elokuussa etelätuulen aikaan vallitsevan suursäätilan lämmittävä vaikutus on

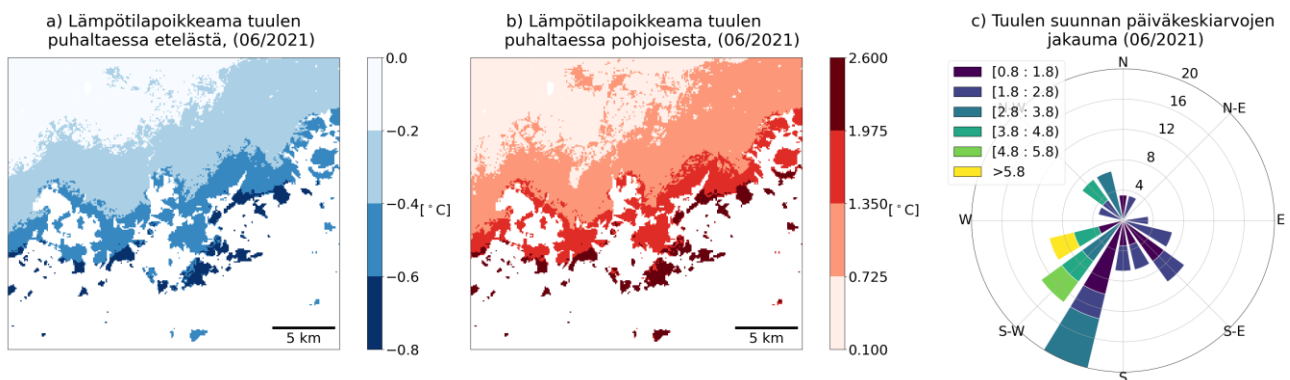
meren vaikutusta merkittävämpi. Jokaisena kuukautena etelätuulen aikana sisämaan lämpötilat olivat kuitenkin korkeampia kuin lähellä merta olevilla alueilla.

Toukokuu



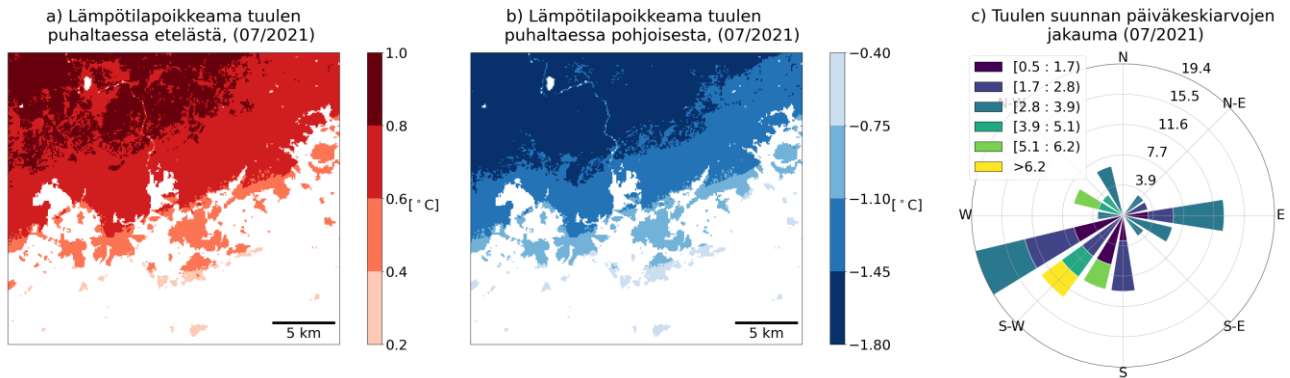
Kuva 10. Tuulensuunnan vaikutus lämpötiloihin toukokuussa 2018. Osakuvassa a) on esitetty keskimääräinen poikkeama lämpötilan päiväkeskiarvossa silloin, kun tuuli puhaltaa eteläisistä ilmansuunnista, osakuvassa b) vastaavasti tuulen puhaltaessa pohjoisista ilmansuunnista. Tuulen lämmittävä vaikutus näkyy punaisena, ja viilentävä vaikutus sinisenä. Lämpötilapoikkeamien yksikkö on celsiusaste. Osakuvassa c) on esitetty tuulensuunnan päiväkeskiarvojen jakauma. Jakauman sektorit osoittavat, mistä suunnasta tuuli on puhaltanut: sektorin pituus ilmaisee kyseisen suunnan osuuden kaikista suunnista, ja sektorin eri värit kertovat miten usein milläkin nopeudella tuuli (yksikkönä metriä sekunnissa) on puhaltanut kyseisestä suunnasta.

Kesäkuu



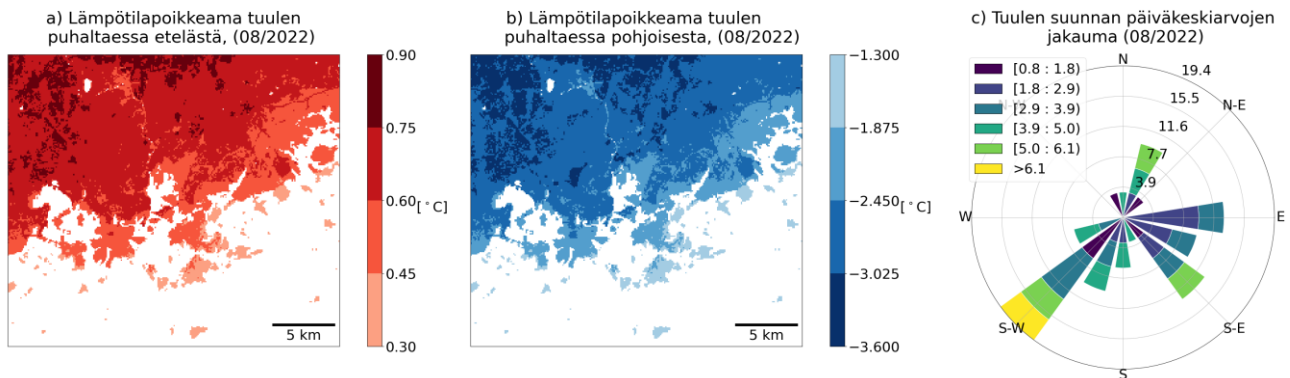
Kuva 11. Tuulensuunnan vaikutus lämpötiloihin kesäkuussa 2021. Osakuvien sisältö on selitetty kuvassa 10.

Heinäkuu



Kuva 12. Tuulensuunnan vaikutus lämpötiloihin heinäkuussa 2021. Osakuvien sisältö on selitetty kuvassa 10.

Elokuu



Kuva 13. Tuulensuunnan vaikutus lämpötiloihin elokuussa 2022. Osakuvien sisältö on selitetty kuvassa 10.

3.2 Sää erilaisissa rakennetuissa ympäristöissä

Lämpötilan ja UTCI-indeksin alueelliset jakaumat rakennusten keskimääräisen korkeuden mukaan on esitetty laatikko-jana –kuvioina (eng. box plot). Alla olevassa infolaatikossa on ohjeet laatikko-jana –kuvion tulkitsemiseen.

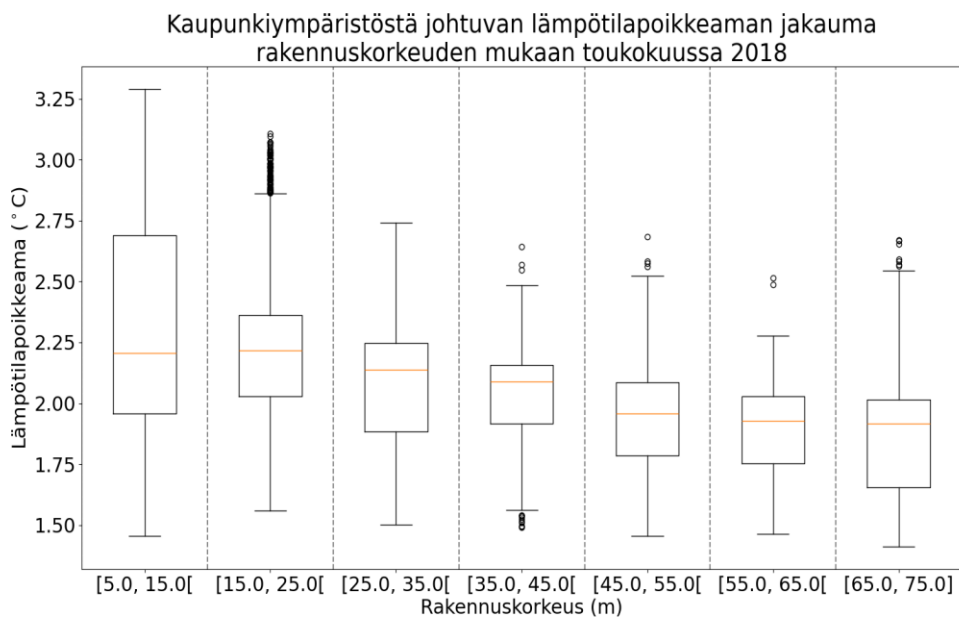
Laatikko-jana –kuvion tulkitseminen

- Laatikko-jana –kuvio esittää y-akselilla olevan muuttujan tilastollista jakaumaa (sen sijaan, että koko jakauma esitettäisiin yksittäisinä pisteinä):
- Laatikon sisällä oleva punainen viiva osoittaa muuttujan mediaanin.
- Laatikon ylä- ja alareunan väliin jää 50 % muuttujan koko jakaumasta. Pitkä laatikko tarkoittaa suurta hajontaa, lyhyt puolestaan pientä hajontaa. Mediaaniviiva jakaa jakauman puoliksi niin, että 25 % jakaumasta on laatikon sisällä viivan yläpuolella ja 25 % viivan alapuolella.
- Laatikon ‘viiksien’ väliin jää loput 50 % jakaumasta, 25 % yläpuolelle ja 25 % alapuolelle.
- Viiksien pituus voi kuitenkin olla maksimissaan 1,5 kertainen laatikon pituuteen verrattuna. Viiksien ulkopuolelle jäävät poikkeavat arvot (eng. outlier) on merkitty palloilla, eikä niitä ole otettu huomioon mediaania laskettaessa.
- Tässä tutkimuksessa esitetyissä kuvioissa x-akselilla oleva muuttuja (rakennuskorkeus) on jaettu tasaisin välein luokkiin. Esimerkiksi luokka [5.0,15.0[tarkoittaa, että kyseisen luokan laatikko-jana –kuviossa on huomioitu niiden hilaruutujen mallinnetut arvot, joiden keskimääräinen rakennuskorkeus osuu 5 m ja 15 m väliin. Aloittava hakasulku ([) vasemmalla puolella tarkoittaa, että minimiarvo kuuluu luokkaan mukaan luettuihin arvoihin, ja sulkeva hakasulku (]) oikealla puolella tarkoittaa samaa maksimiarvolle. Vastaavasti päinvastainen sulkeiden suunta tarkoittaa, että raja-arvo ei kuulu luokan arvoihin. Hilaruudut, joissa keskimääräinen rakennuskorkeus on tasan 15.0 m, eivät siis kuulu luokkaan [5.0,15.0[vaan luokkaan [15.0,25.0[.

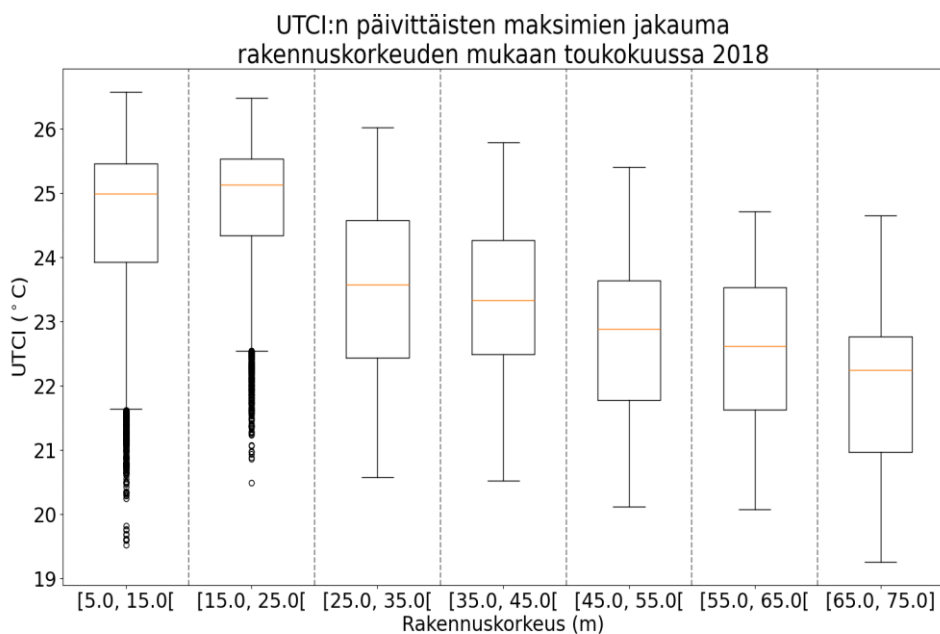
Eri kuukausien tulokset ovat hyvin samankaltaisia (kuvat 15–21). Tuloksista näkyy, että 15–25 m korkuisten rakennusten alueilla rakennetun ympäristön lämpötilapoikkeama on suurempi kuin sitä korkeampien rakennusten alueilla. Rakennuskorkeuden kasvaessa lämpötilapoikkeama alkaa keskimäärin pienenemään. Matalimpien rakennusten (korkeus 5–15 m) alueilla mediaani on monessa tapauksessa pienempi kuin 15–25 m korkeiden rakennusten ympäristössä, mutta hajonta kyseisessä luokassa on suurta.

UTCI-indeksin kohdalla mediaanit asettuvat samankaltaisesti kuin lämpötilankin, mutta hajonta on kaikissa luokissa paljon suurempaa.

Toukokuu

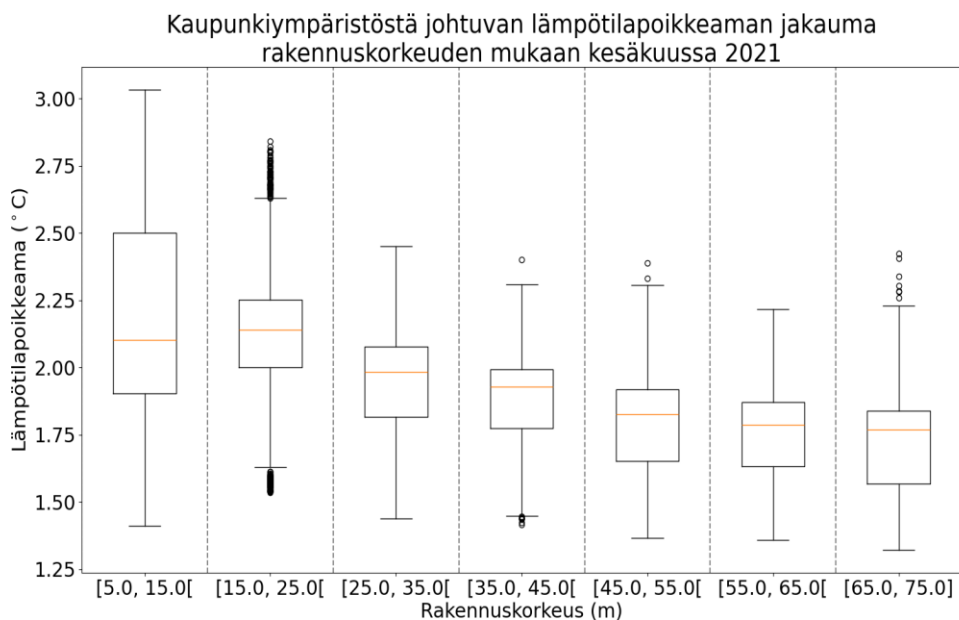


Kuva 14. Kuukausikeskilämpötilojen ero rakennettujen ja rakentamattomien alueiden välillä alueen keskimääräisen rakennuskorkeuden mukaan luokiteltuna toukokuussa 2018.

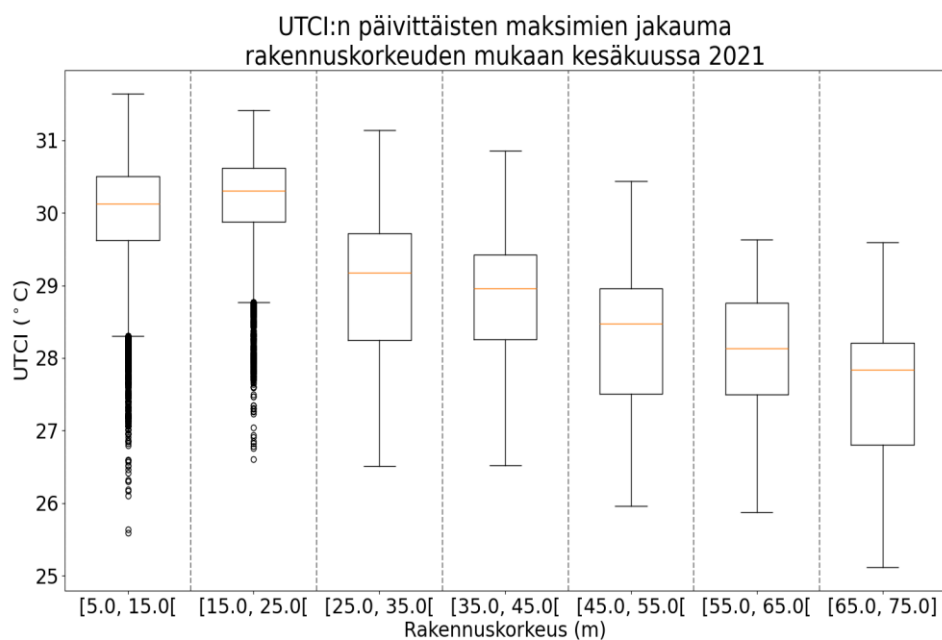


Kuva 15. UTCI-indeksin päivittäisistä maksimi-arvoista laskettujen keskiarvojen alueellinen jakauma hilapisteiden rakennuskorkeuksien mukaan luokiteltuna toukokuussa 2018.

Kesäkuu

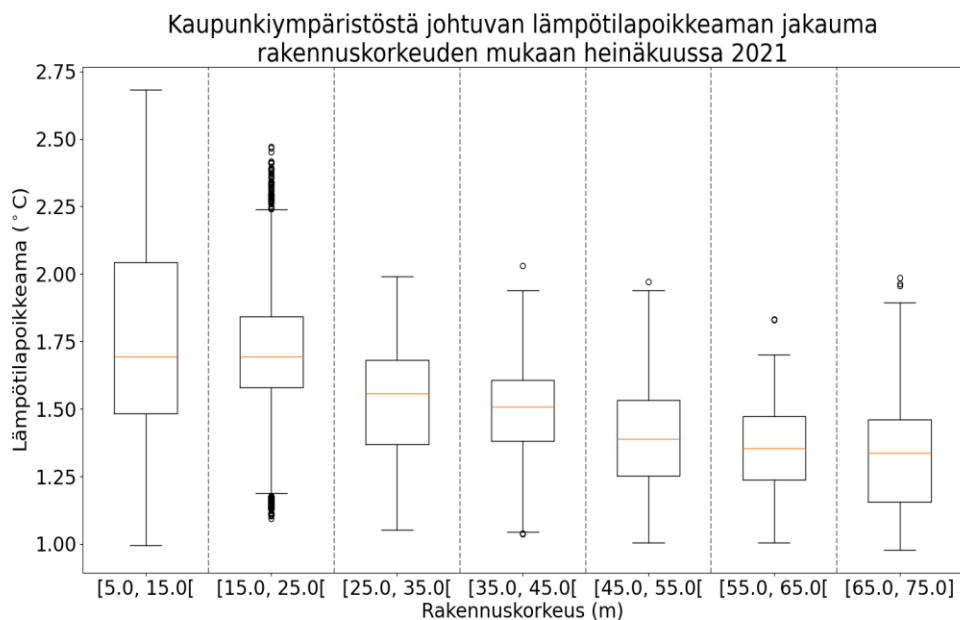


Kuva 16. Kuukausikeskilämpötilojen ero rakennettujen ja rakentamattomien alueiden välillä alueen keskimääräisen rakennuskorkeuden mukaan luokiteltuna kesäkuussa 2021.

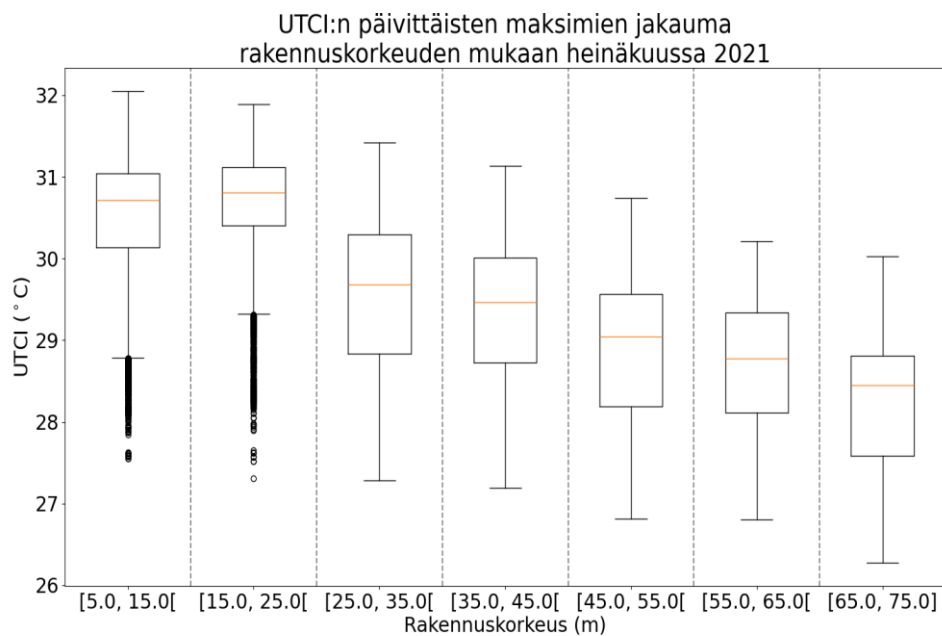


Kuva 17. UTCI-indeksin päivittäisistä maksimiarvoista laskettujen keskiarvojen alueellinen jakauma hilapisteiden rakennuskorkeuksien mukaan luokiteltuna kesäkuussa 2021.

Heinäkuu

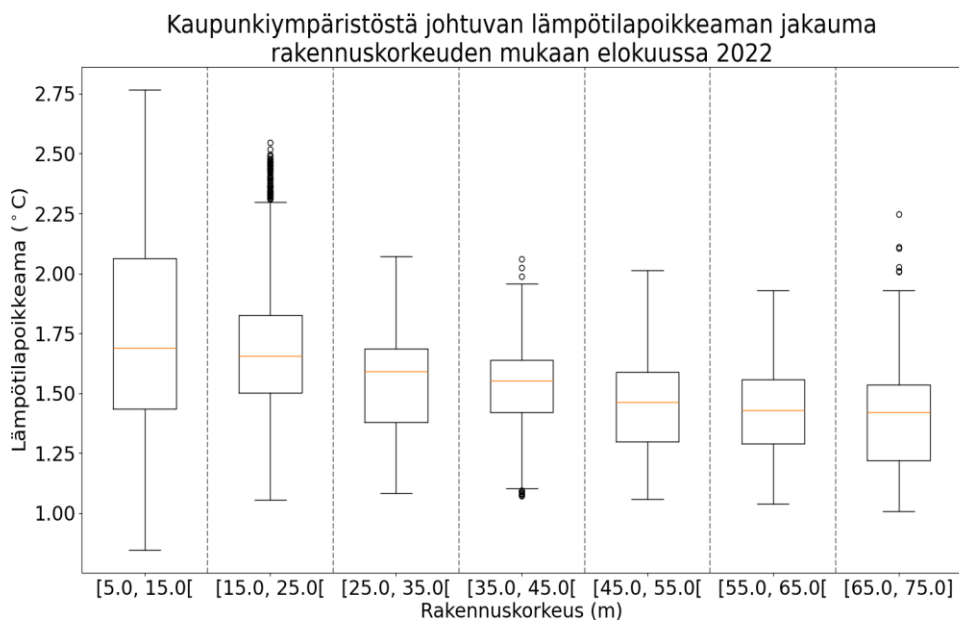


Kuva 18. Kuukausikeskilämpötilojen ero rakennettujen ja rakentamattomien alueiden välillä alueen keskimääräisen rakennuskorkeuden mukaan luokiteltuna heinäkuussa 2021.

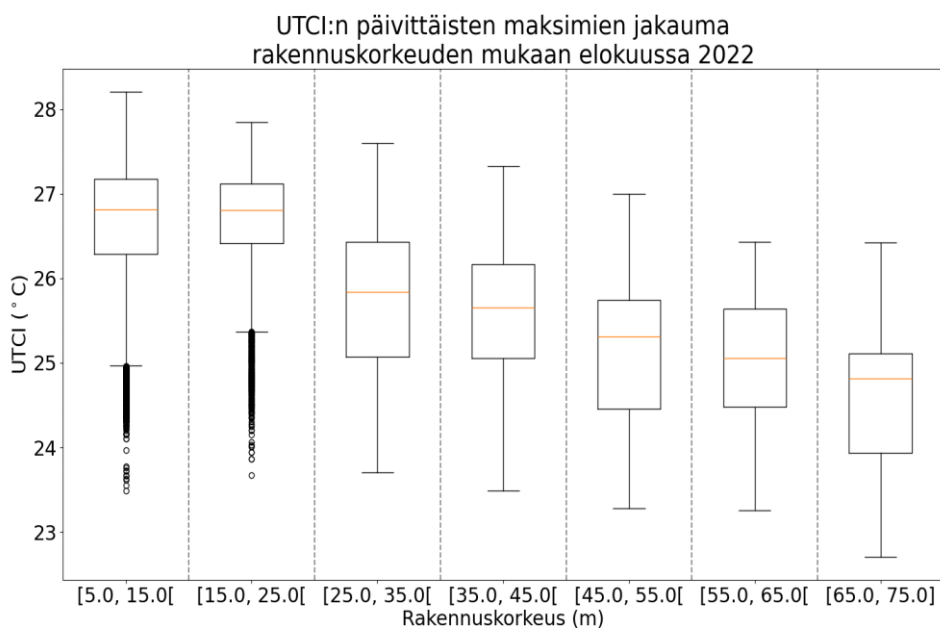


Kuva 19. UTCI-indeksin päivittäisistä maksimiarvoista laskettujen keskiarvojen alueellinen jakauma hilapisteiden rakennuskorkeuksien mukaan luokiteltuna heinäkuussa 2021.

Elokuu



Kuva 20. Kuukausikeskilämpötilojen ero rakennettujen ja rakentamattomien alueiden välillä alueen keskimääräisen rakennuskorkeuden mukaan luokiteltuna elokuussa 2022.



Kuva 21. UTCI-indeksin päivittäisistä maksimiarvoista laskettujen keskiarvojen alueellinen jakauma hilapisteiden rakennuskorkeuksien mukaan luokiteltuna elokuussa 2022.

3.3 Kaupunki-ilmaston kehittyminen tulevaisuudessa

Tässä kappaleessa on esitetty tulevan ilmaston kuumien kuukausien mallinnettuja tuloksia. Koska mallinnukset perustuvat erityisen kuumiin nykyilmaston säätilanteisiin, myös mallinnetut tulevan ilmaston tilanteet vastaavat yhtä harvinaisia tilanteita kyseisessä ilmastossa. Näiden erityisen kuumien kuukausien esiintymistodennäköisyydet vastaavat siten taulukossa 2 esitettyjä todennäköisyyksiä. Lämpötilamuutokset tässä raportissa tutkituille tulevaisuuden ajanjaksoille (2025–2054 sekä 2055–2084) on esitetty taulukossa 4. Muiden sääparametrien (kosteus, tuulen nopeus, auringon säteily) muutokset on esitetty liitteessä D.

Taulukko 4. Keskimääräinen lämpötilan muutos (°C) tulevaan ilmastoon siirryttäessä. Vertailukohtana on käytetty vuosille 2005–2034 laskettua ilmastoa.

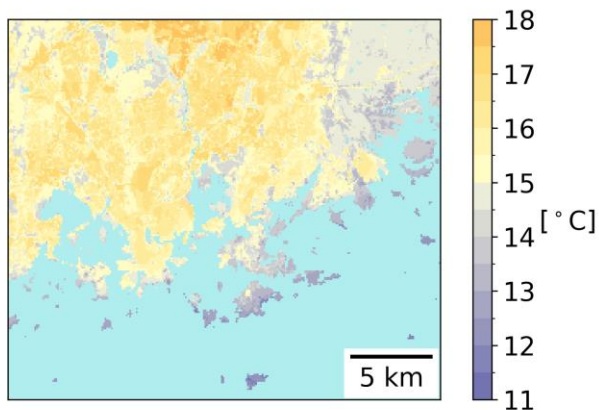
Ajanjakso	Toukokuu	Kesäkuu	Heinäkuu	Elokuu
2025–2054	0.83	0.77	0.78	0.81
2055–2084	1.68	1.66	1.68	1.77

3.3.1 Keskilämpötila

Lämpötilaerot eri hilapisteiden välillä eivät mallitulosten mukaan keskimäärin juuri muutu nykyilmaston ja tulevien ajanjaksojen välillä, eli lämpötilan nousu on keskimäärin yhtä voimakasta eri maankäyttöluokissa (kuvat 22–25). Erot nykyilmaston ja tulevan ilmaston lämpötiloissa mukailevat taulukossa 4 esitettyjä lämpötilamuutoksia.

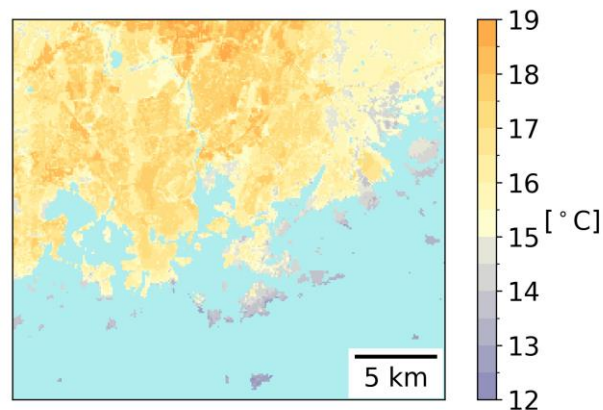
Toukokuu

a) Erityisen kuumien toukokuun keskilämpötila 2025-2054 -ilmastossa



maksimiarvo: 17.8 °C

b) Erityisen kuumien toukokuun keskilämpötila 2055-2084 -ilmastossa

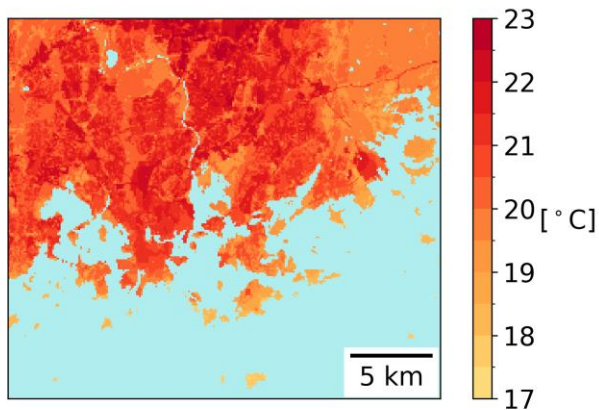


maksimiarvo: 18.6 °C

Kuva 22. Erityisen kuumien toukokuun mallinnettujen lämpötilojen keskiarvot tulevassa ilmastossa. Osakuvassa a) on esitetty keskiarvot jaksolle 2025–2054 ja osakuvassa b) jaksolle 2055–2084.

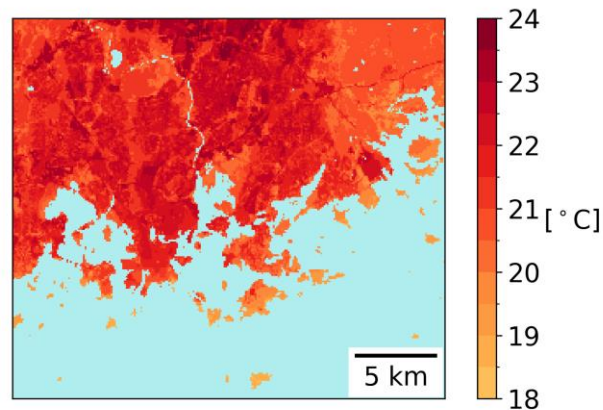
Kesäkuu

a) Erityisen kuumien kesäkuun keskilämpötila 2025-2054 -ilmastossa



maksimiarvo: 22.8 °C

b) Erityisen kuumien kesäkuun keskilämpötila 2055-2084 -ilmastossa

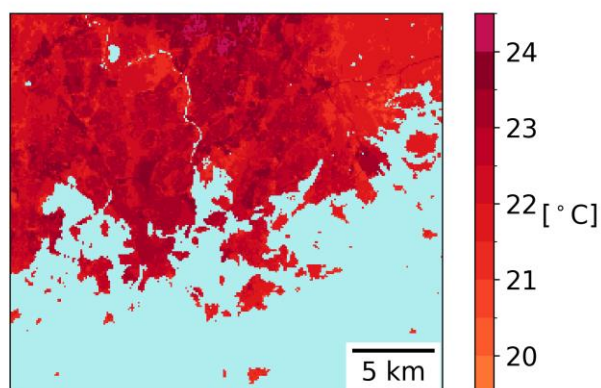


maksimiarvo: 23.7 °C

Kuva 23. Erityisen kuumien kesäkuun mallinnettujen lämpötilojen keskiarvot tulevassa ilmastossa. Osakuvassa a) on esitetty keskiarvot jaksolle 2025–2054 ja osakuvassa b) jaksolle 2055–2084.

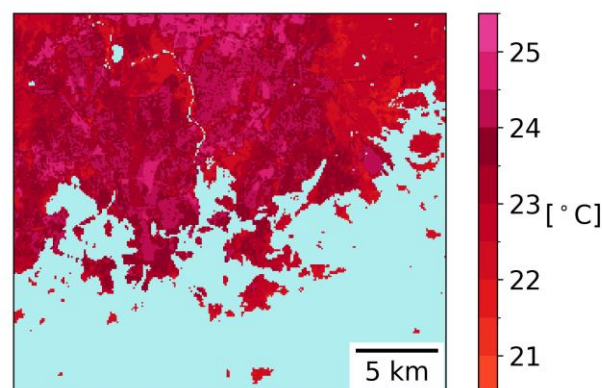
Heinäkuu

a) Erityisen kuuman heinäkuun keskilämpötila 2025-2054 -ilmastossa



maksimiarvo: 24.1 °C

b) Erityisen kuuman heinäkuun keskilämpötila 2055-2084 -ilmastossa

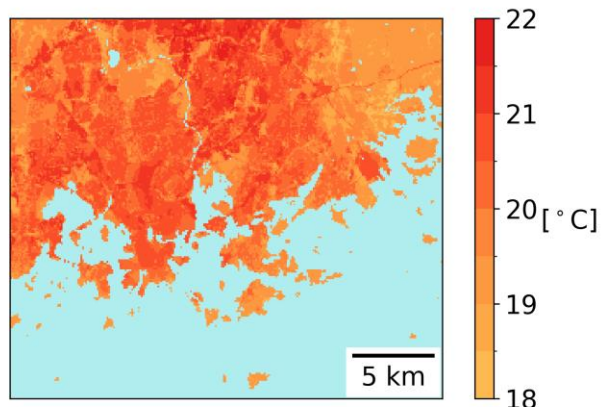


maksimiarvo: 25.0 °C

Kuva 24. Erityisen kuuman heinäkuun mallinnettujen lämpötilojen keskiarvot tulevassa ilmastossa. Osakuvassa a) on esitetty keskiarvot jaksolle 2025–2054 ja osakuvassa b) jaksolle 2055–2084.

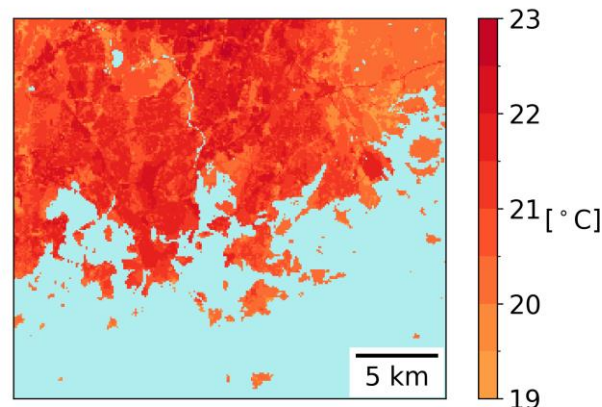
Elokuu

a) Erityisen kuuman elokuun keskilämpötila 2025-2054 -ilmastossa



maksimiarvo: 21.6 °C

b) Erityisen kuuman elokuun keskilämpötila 2055-2084 -ilmastossa



maksimiarvo: 22.6 °C

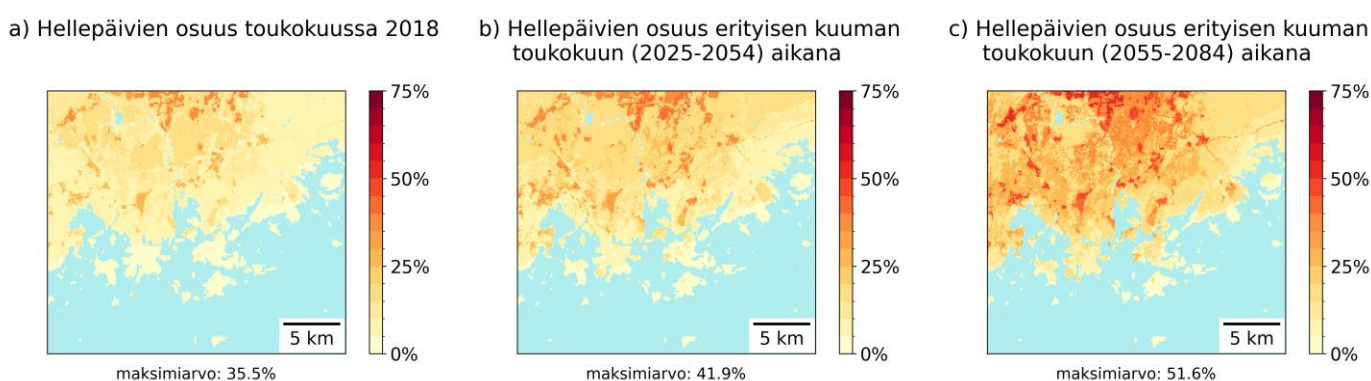
Kuva 25. Erityisen kuuman elokuun mallinnettujen lämpötilojen keskiarvot tulevassa ilmastossa. Osakuvassa a) on esitetty keskiarvot jaksolle 2025–2054 ja osakuvassa b) jaksolle 2055–2084.

3.3.2 Helletilanteet

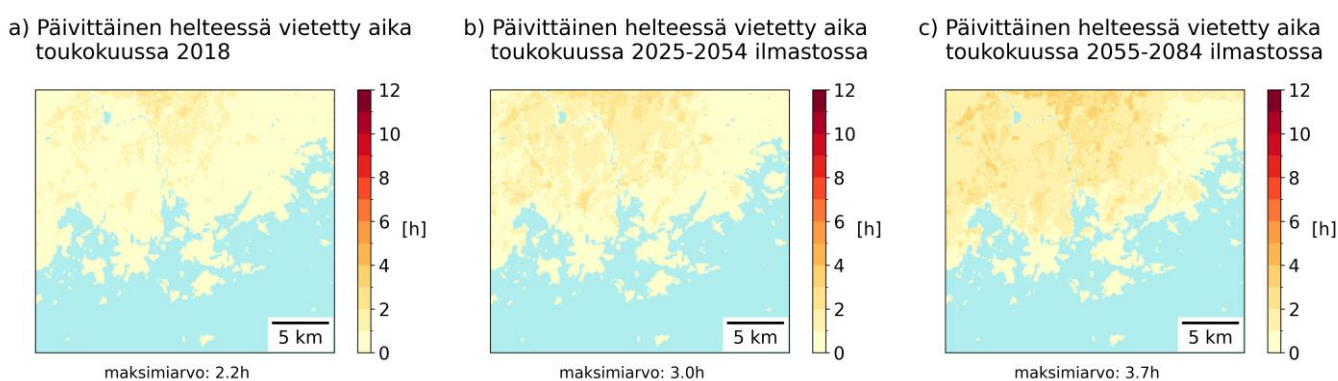
Tässä kappaleessa on esitelty helteiden esiintymistä mallinnettujen kuukausien aikana. Hellepäiviksi lasketaan päivät, joiden ylin lämpötila on vähintään 25.1 °C. Koska nykyilmaston tutkittavat ajanjaksot ovat yksittäisiä kuukausia, yksittäiset säätilanteet vaikuttavat tuloksiin. Tästä hyvänä esimerkkinä toimivat esimerkiksi kuvissa 28 ja 30 nähtävät kesäkuun ja heinäkuun tilanteet: heinäkuussa 2021 esiintyi enemmän hellettä kuin kesäkuussa 2021, mutta tulevan ilmaston kuukausina kesäkuussa hellepäiviä näyttäisi olevan enemmän. Tämän selittänee se, että kesäkuussa 2021 on ollut enemmän sellaisia päiviä, jotka ovat hyvin lähellä hellerajaa ja mallinnetun lämpötilan nousun jälkeen muuttuvat hellepäiviksi. Tämän vuoksi esitettyjä mallinnettujen kuukausien hellelukemien muutoksia voidaan pitää ainoastaan suuntaa antavina arvioina.

Toukokuu

Kuvista 26 ja 27 nähdään, että mallinnusten mukaan toukokuun 2018 aikana helleraja ylitettiin tietyillä rakennetuilla alueilla noin joka kolmas päivä (35.5 % kaikista päivistä), kun taas rakentamattomalla alueella helleraja ylitettiin vain muutamana päivänä. Rannikon lähetyvillä hellettä ei esiinny juuri lainkaan. Mallinuksissa käytetyn kehityskaaren mukainen ilmaston lämpeneminen aiheuttaisi hellepäivien lisääntymistä niin, että jaksolla 2055–2084 vastaavan erityisen kuumen toukokuun aikana hellettä olisi jopa joka toinen päivä (51.6 % päivistä). Rannikon alueilla voitaisiin kuitenkin edelleen pysytellä suurimmaksi osaksi hellerajan alapuolella.



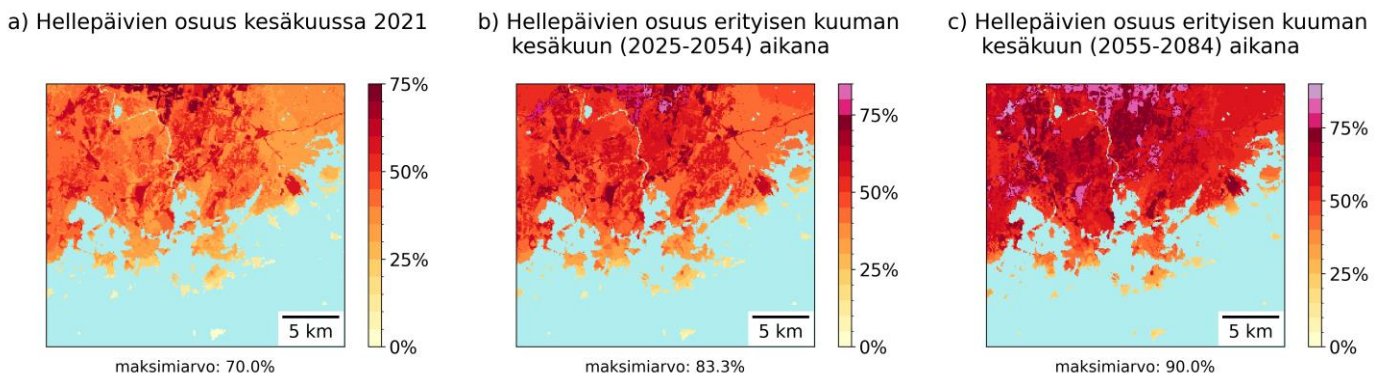
Kuva 26. Hellepäivien prosentuaalinen osuus (a) toukokuussa 2018 sekä vastaavina toukokuina jaksosten (b) 2025–2054 ja (c) 2055–2084 ilmastoissa. Vesialueet on merkitty sinisellä.



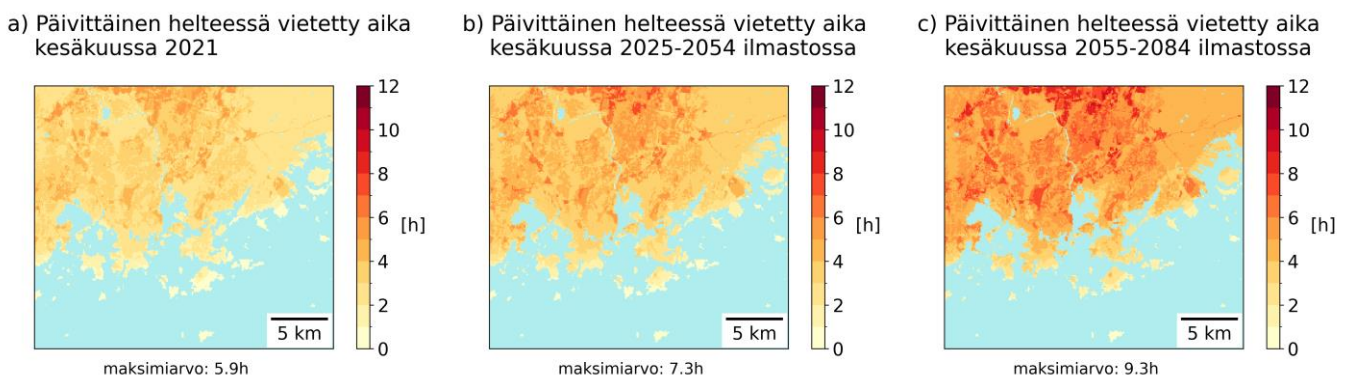
Kuva 27. Keskimääräinen päivässä helteessä vietetty aika tunteina (a) toukokuussa 2018 sekä vastaavina toukokuina jaksosten (b) 2025–2054 ja (c) 2055–2084 ilmastoissa. Vesialueet on merkitty sinisellä.

Kesäkuu

Kesäkuussa 2021 hellepäiviä oli jopa 70 % kaikista päivistä (kuva 28). Mallinnusten mukainen lämpeneminen voisi johtaa siihen, että vastaavan kuumen kesäkuun aikana hellepäiviä olisi vuosisadan puolessa välissä yli neljä viidesosaa kaikista päivistä ja jakson 2055–2084 aikana jopa 90 %. Keskimääräinen päivittäinen helteen kesto voisi tuolloin olla jopa 9.3 tuntia (kuva 29).



Kuva 28. Hellepäivien prosentuaalinen osuus (a) kesäkuussa 2021 sekä vastaavina kesäkuina jaksojen (b) 2025–2054 ja (c) 2055–2084 ilmastoissa. Vesialueet on merkitty sinisellä. Violetilla liukuvärillä on esitetty 75 % ylittävät arvot.

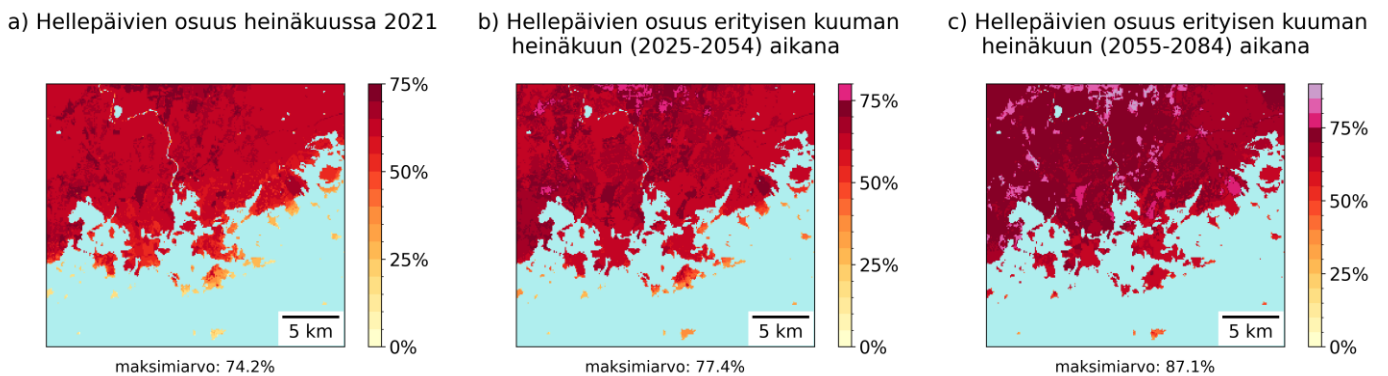


Kuva 29. Keskimääräinen päivässä helteessä vietetty aika tunteina (a) kesäkuussa 2021 sekä vastaavina kesäkuina jaksojen (b) 2025–2054 ja (c) 2055–2084 ilmastoissa. Vesialueet on merkitty sinisellä.

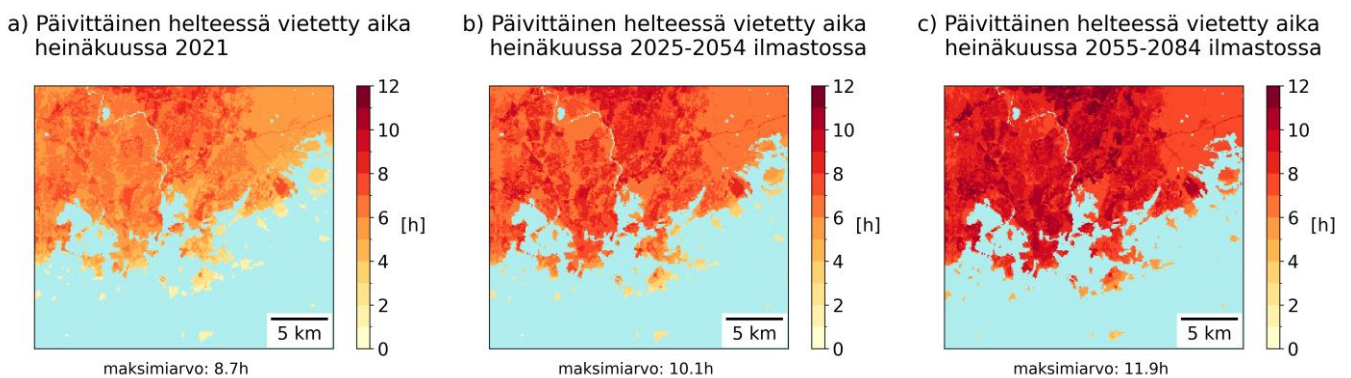
Heinäkuu

Kuvasta 30 nähdään, että jo heinäkuun 2021 aikana hellettä oli suurimmassa osassa Helsingin aluetta kaksi kolmasosaa tai jopa kolme neljäsosaa kaikista päivistä.

Kehityskaaren mukainen lämpeneminen nostaa hellepäivien määrää entisestään, ja jakson 2055–2084 aikana jopa 87.1 % kuuman heinäkuun päivistä voisi olla hellepäiviä. Päivittäinen helteessä vietetty aika kasvaa jopa 11.9 tuntiin (kuva 31).



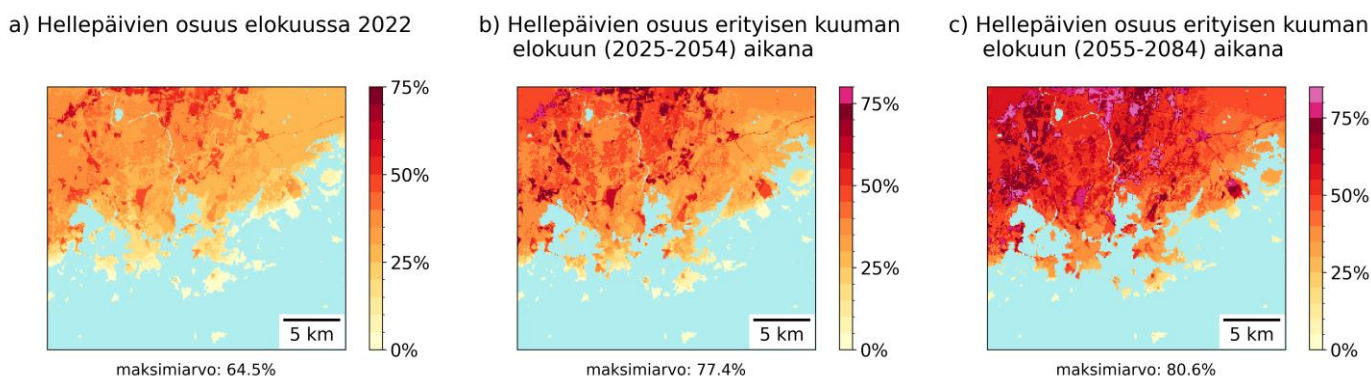
Kuva 30. Hellepäivien prosentuaalinen osuus (a) heinäkuussa 2021 sekä vastaavina heinäkuina jaksojen (b) 2025–2054 ja (c) 2055–2084 ilmastoissa. Vesialueet on merkitty sinisellä. Violetilla liukuvärillä on esitetty 75 % ylittävät arvot.



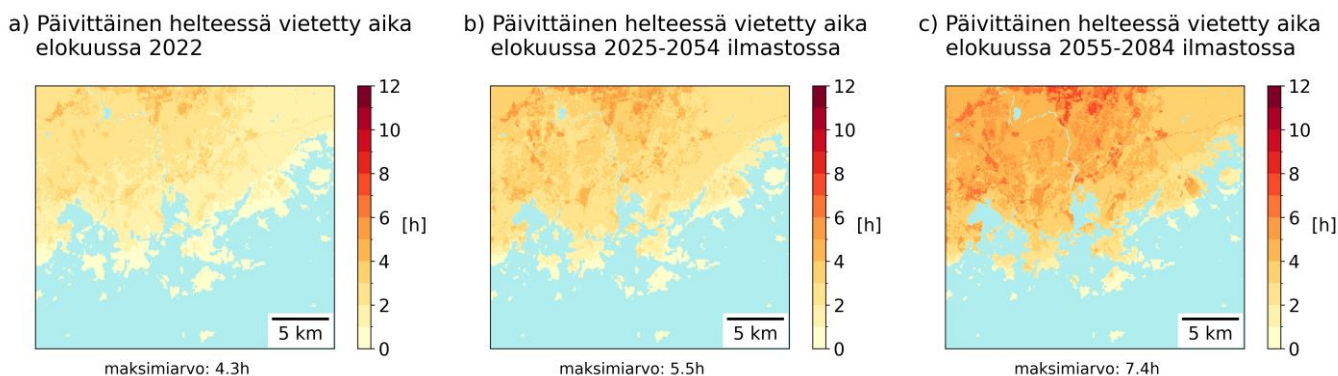
Kuva 31. Keskimääräinen päivässä helteessä vietetty aika tunteina heinäkuussa (a) vuonna 2021 sekä vastaavina heinäkuina jaksojen (b) 2025–2054 ja (c) 2055–2084 ilmastoissa. Vesialueet on merkitty sinisellä.

Elokuu

Muiden kuukausien tavoin hellettä esiintyy elokuussa enemmän rakennetuilla kuin rakentamattomilla alueilla (kuvat 32 ja 33). Erityisen kuumana jakson 2055–2084 elokuuna hellettä voi esiintyä jopa 80.6 % kaikista päivistä ja päivittäin keskimäärin 7.4 tuntia.



Kuva 32. Hellepäivien prosentuaalinen osuus (a) elokuussa 2022 sekä vastaavina elokuuna jaksojen (b) 2025–2054 ja (c) 2055–2084 ilmastoissa. Vesialueet on merkitty sinisellä. Violetilla liukuvärillä on esitetty 75 % ylittävät arvot.



Kuva 33. Keskimääräinen päivässä helteessä vietetty aika tunteina (a) elokuussa 2022 sekä vastaavina elokuuna jaksojen (b) 2025–2054 ja (c) 2055–2084 ilmastoissa. Vesialueet on merkitty sinisellä.

3.3.3 UTCI

Lämpömukavuusindeksi UTCI:n muutokseen vaikuttaa merkittävimmin lämpötilan muutos. Muutos ei kuitenkaan ole identtinen lämpötilan kanssa kosteudessa, tuulen nopeudessa ja auringonsäteilyn määrässä tapahtuvien muutosten vuoksi. Indeksien arvon kasvusta seuraa luonnollisesti, että myös rasittavammissa kuumastressikategorioissa vietetty aika kasvaa. Tämän kappaleen kuvissa on esitetty UTCI-indeksien kuukausikohtaiset ääriarvot 90. prosenttipisteiden avulla sekä keskimääräiset muutokset päivittäisessä kuumarasitusaltistumisessa.

Toukokuu

Erityisen kuumien toukokuun aikana voidaan mallinnusten mukaan kokea voimakasta kuumarasitusta lähes koko Helsingin alueella. Mallin mukaan ainoastaan ydinkeskustan korkeiden rakennusten alueilla 90. prosenttipiste asettuu kohtalaisen kuumarasituksen puolelle, johtuen todennäköisesti rakennusten varjostavasta vaikutuksesta. Ajanjaksojen 2025–2054 (kuva 34) ja 2055–2084 (kuva 35) ääriarvojen käyttäytyminen on hyvin samankaltaista, jälkimmäisen saadessa noin asteen verran korkeampia arvoja. Lisäys päivittäisessä kuumarasitusaltistumisessa voi mallitulosten mukaan olla jakson 2025–2054 ilmastossa 0.7 h ja jakson 2055–2084 ilmastossa 1.3 h. UTCI:n kuukausikeskiarvot voivat kasvaa jopa 18.8 asteeseen.

Kesäkuu

Mallitulosten mukaan kesäkuussa voidaan kokea voimakasta ja jopa erittäin voimakasta kuumarasitusta lähes koko Helsingin alueella jo jakson 2025–2054 aikana (kuva 36), ja jakson 2055–2084 aikana myös keskustan korkeiden rakennusten alueiden UTCI:n 90. prosenttipiste nousee voimakkaan kuumarasituksen puolelle (kuva 37). Kuumarasituksessa vietetty päivittäinen aika nousee näihin ajanjaksoihin mennessä jopa 1.3 h ja 2.6 h. Keskimääräinen UTCI mallinnettujen erityisen kuumien kesäkuun aikana voi nousta 24.9 asteeseen.

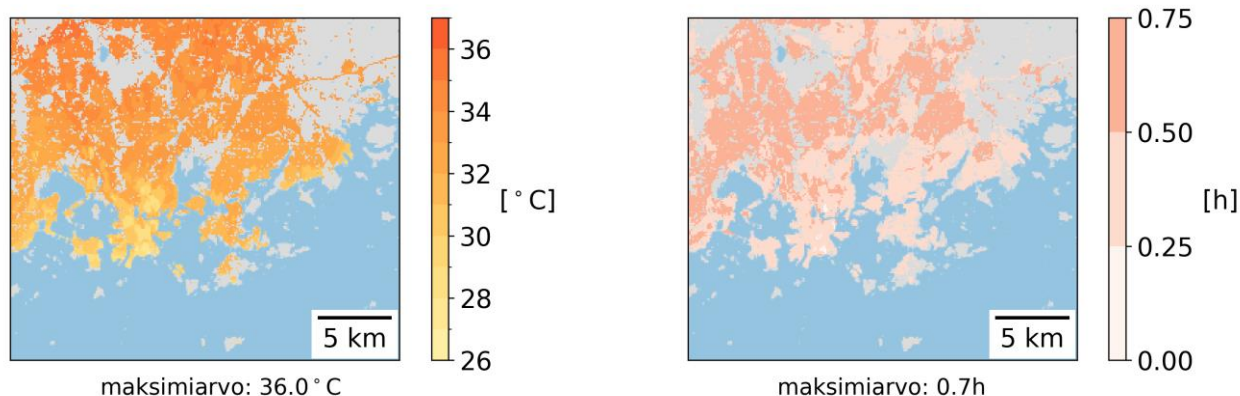
Heinäkuu

Heinäkuun UTCI:n maksimi- ja keskimääräiset arvot ovat samankaltaiset kesäkuun mallinnettujen arvojen kanssa (kuvat 38 ja 39). Keskimääräinen UTCI voi olla tulevaisuudessa jopa 25.6 astetta, mikä tarkoittaisi, että kuumarasitusta koettaisiin keskimäärin lähes puolet ajasta.

Elokuu

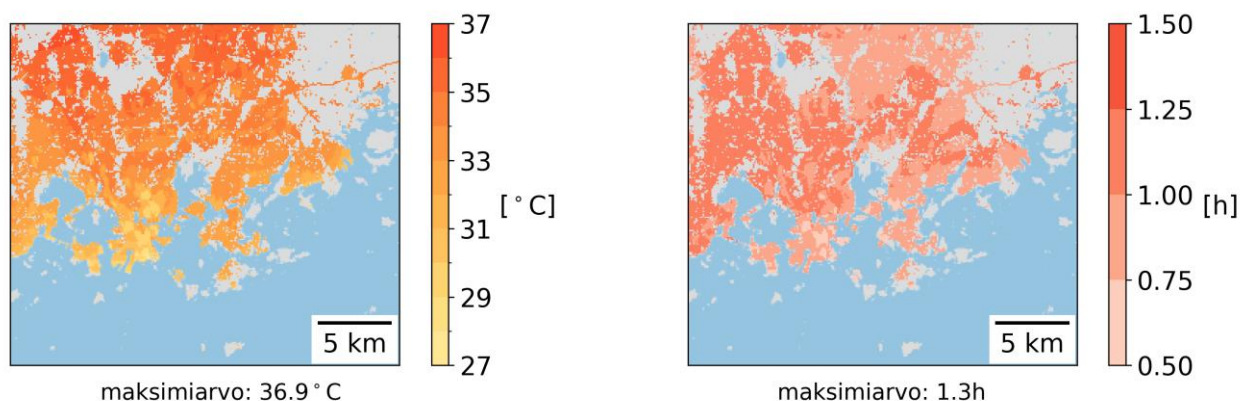
Mallinnusten mukaan erityisen kuumun elokuun aikana koetaan voimakasta kuumarasitusta lähes kaikkialla Helsingissä jo jakson 2025–2054 ilmastossa (kuva 40), ilmiön voimistuessa jaksoon 2055–2084 mennessä (kuva 41). Kuukauden keskimääräinen UTCI voi nousta enimmillään 22.7 asteeseen.

- a) UTCI:n maksimiarvojen 90. prosentti-
piste erityisen kuumun toukokuun
aikana 2025-2054 ilmastossa
- b) Keskimääräinen muutos päivittäisessä
kuumarasituksessa tunteina toukokuussa
2025-2054 -ilmastoon siirryttäessä



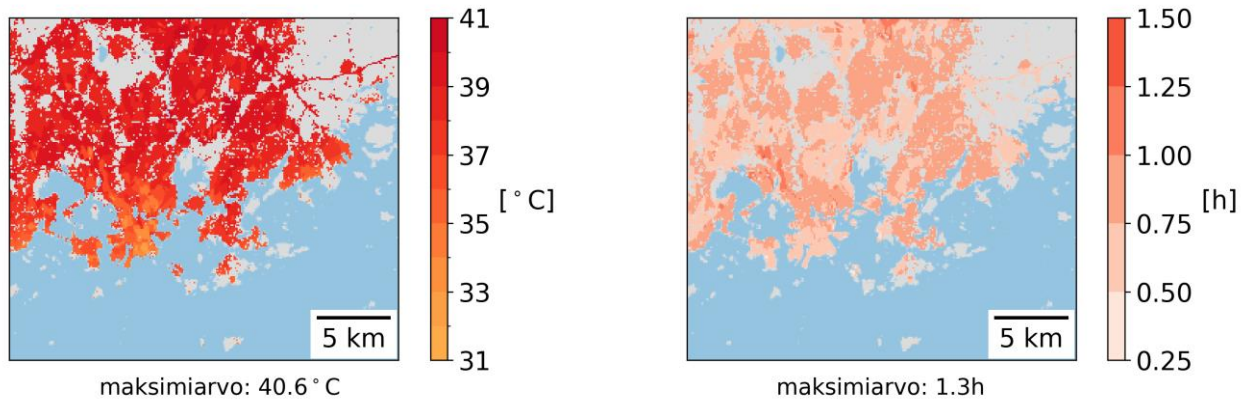
Kuva 34. Erityisen kuumun toukokuun mallinnettujen UTCI-indeksin arvoja kartalla jakson 2025–2054 ilmastossa. Osakuvassa a) on esitetty mallinnetun UTCI-indeksin 90. prosenttipiste. Osakuvassa b) on esitetty, kuinka paljon kuumarasituksessa vietetty päivittäinen aika lisääntyy keskimäärin nykyilmastoon verrattuna.

- a) UTCI:n maksimiarvojen 90. prosentti-
piste erityisen kuumun toukokuun
aikana 2055-2084 ilmastossa
- b) Keskimääräinen muutos päivittäisessä
kuumarasituksessa tunteina toukokuussa
2055-2084 -ilmastoon siirryttäessä



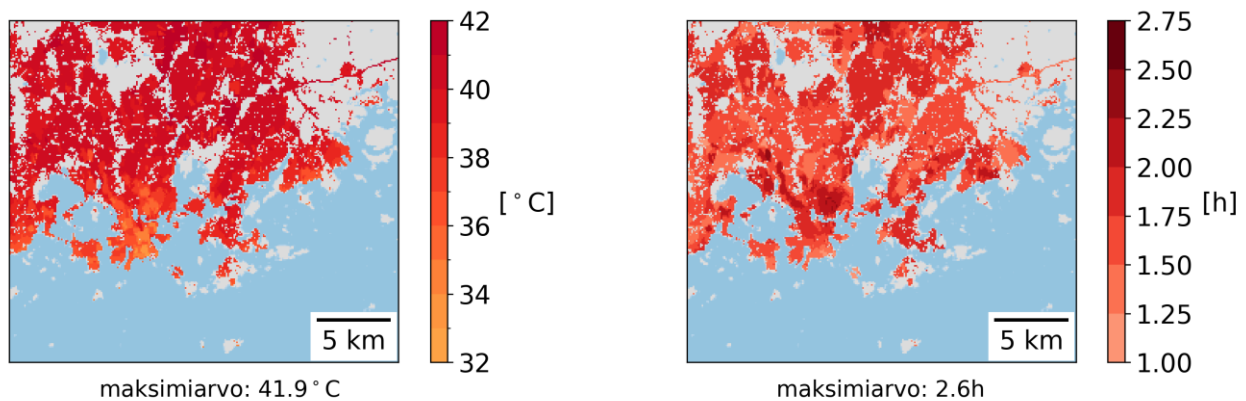
Kuva 35. Erityisen kuumun toukokuun mallinnettujen UTCI-indeksin arvoja kartalla jakson 2055–2084 ilmastossa. Osakuvien sisältö on esitetty kuvassa 34.

- a) UTCI:n maksimi-arvojen 90. prosentti-piste erityisen kuumien kesäkuun aikana 2025-2054 ilmastossa
- b) Keskimääräinen muutos päivittäisessä kuumarasituksessa tunteina kesäkuussa 2025-2054 -ilmastoon siirryttäessä



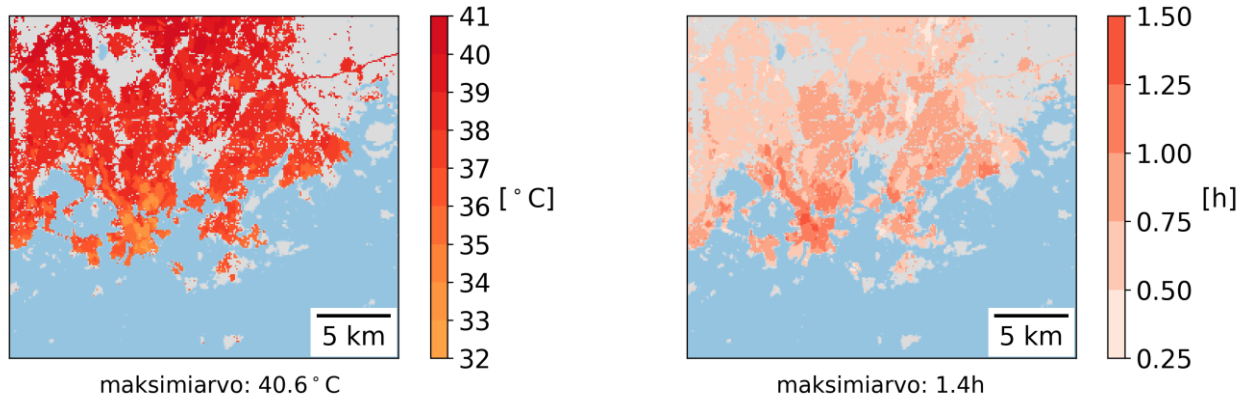
Kuva 36. Erityisen kuumien kesäkuun mallinnettujen UTCI-indeksin arvoja kartalla jakson 2025–2054 ilmastossa. Osakuvien sisältö on esitetty kuvassa 34.

- a) UTCI:n maksimi-arvojen 90. prosentti-piste erityisen kuumien kesäkuun aikana 2055-2084 ilmastossa
- b) Keskimääräinen muutos päivittäisessä kuumarasituksessa tunteina kesäkuussa 2055-2084 -ilmastoon siirryttäessä



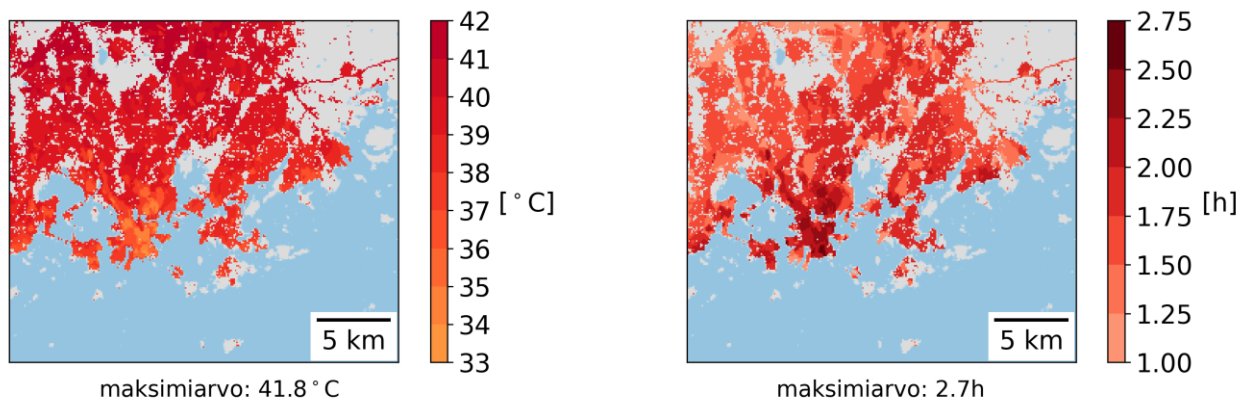
Kuva 37. Erityisen kuumien kesäkuun mallinnettujen UTCI-indeksin arvoja kartalla jakson 2055–2084 ilmastossa. Osakuvien sisältö on esitetty kuvassa 34.

- a) UTCI:n maksimiarvojen 90. prosentti-piste erityisen kuumun heinäkuun aikana 2025-2054 ilmastossa
- b) Keskimääräinen muutos päivittäisessä kuumarasituksessa tunteina heinäkuussa 2025-2054 -ilmastoon siirryttäessä



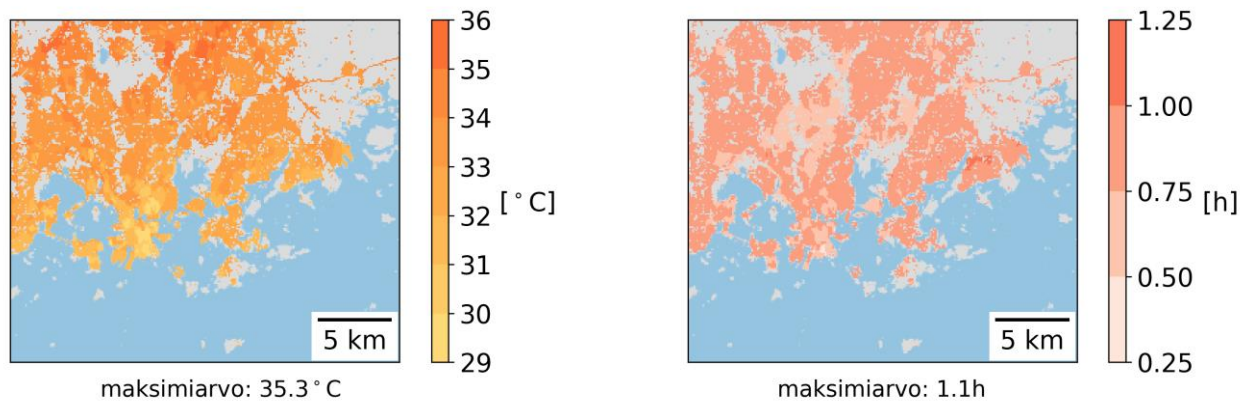
Kuva 38. Erityisen kuumun heinäkuun mallinnettujen UTCI-indeksin arvoja kartalla jakson 2025–2054 ilmastossa. Osakuvien sisältö on esitetty kuvassa 34.

- a) UTCI:n maksimiarvojen 90. prosentti-piste erityisen kuumun heinäkuun aikana 2055-2084 ilmastossa
- b) Keskimääräinen muutos päivittäisessä kuumarasituksessa tunteina heinäkuussa 2055-2084 -ilmastoon siirryttäessä



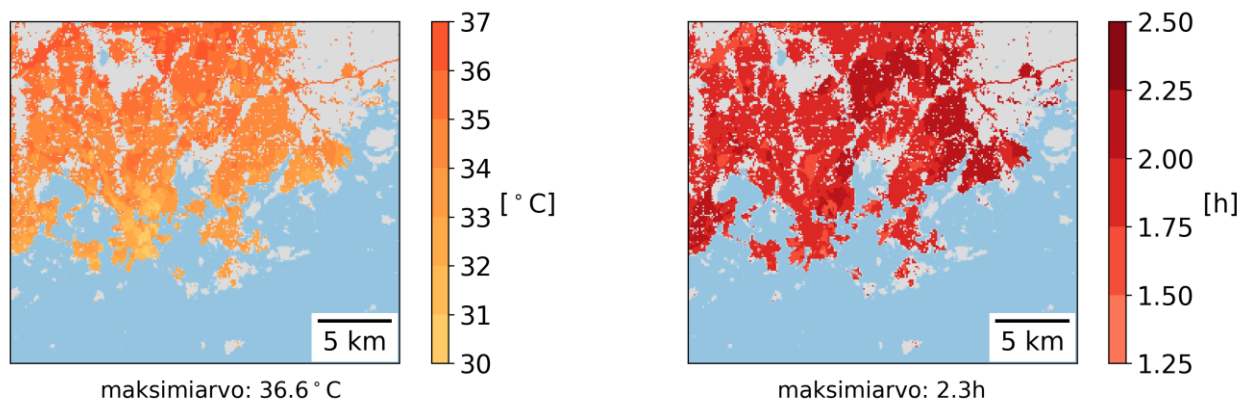
Kuva 39. Erityisen kuumun heinäkuun mallinnettujen UTCI-indeksin arvoja kartalla jakson 2055–2084 ilmastossa. Osakuvien sisältö on esitetty kuvassa 34.

- a) UTCI:n maksimiarvojen 90. prosentti-
piste erityisen kuumun elokuun
aikana 2025-2054 ilmastossa
- b) Keskimääräinen muutos päivittäisessä
kuumarasituksessa tunteina elokuussa
2025-2054 -ilmastoon siirryttäessä



Kuva 40. Erityisen kuumun elokuun mallinnettujen UTCI-indeksin arvoja kartalla jakson 2025–2054 ilmastossa. Osakuvien sisältö on esitetty kuvassa 34.

- a) UTCI:n maksimiarvojen 90. prosentti-
piste erityisen kuumun elokuun
aikana 2055-2084 ilmastossa
- b) Keskimääräinen muutos päivittäisessä
kuumarasituksessa tunteina elokuussa
2055-2084 -ilmastoon siirryttäessä



Kuva 41. Erityisen kuumun elokuun mallinnettujen UTCI-indeksin arvoja kartalla jakson 2055–2084 ilmastossa. Osakuvien sisältö on esitetty kuvassa 34.

4 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä projektissa tarkasteltuja hienohilaisia, n. 100 metrin erottelukyvyn pintaolosuhteiden SURFEX-mallinnuksia ei ole laskettu vastaavalla menetelmällä aikaisemmin, joten mallinnusten vastaavuutta todellisiin lämpötiloihin ei pystytä suoraan arvioimaan ilman laajan mittausverkoston perustamista. Hienohilaisten HARMONIE-AROME-mallinnusten tarkkuutta on kuitenkin tutkittu esimerkiksi Suomen ym. (2024) tutkimuksessa, jossa todetaan 750 metrin tarkkuudella ajatun mallin toimivan pääsääntöisesti hyvin ja suurimpien erojen syntyvän tilanteissa, joissa mallin maankäytön kuvaus ei vastaa todellisuutta. Tässä hankkeessa käytetty maankäyttöaineisto on aikaisempaa tarkempi (Rieutord ym. 2024), mikä Suomen ym. (2024) mukaan voi parantaa mallitulosten vastaavuutta mitattuihin lämpötiloihin. Tämän varmistaminen vaatisi kuitenkin jatkotutkimuksia.

Mallinnettujen lämpötilojen keskiarvoissa on suurta alueellista vaihtelua, joka aiheutuu maankäytön eroista sekä etäisyydestä merestä. Kaupunkiluokista etenkin paikallinen ilmastoluokka 8 (LCZ 8, matalat ja suuret rakennukset) erottuu sisämaassa ympäröiviä alueita lämpimämpänä. Helsingin mallinnetulla alueella korkeita ja tiiviitä kaupunkiluokkia esiintyy vain lähellä merta, kuten kantakaupungin alueella, joten näistä tuloksista on vaikea erotella esimerkiksi LCZ 1:n (tiivis, korkea rakennuskanta) ja LCZ 4:n (avoin, korkea rakennuskanta) vaikutusta lämpötiloihin. Meren viilentävää vaikutusta korostaa se, että Jätkäsaari, joka mallissa kuuluu enimmäkseen LCZ 8 –luokkaan, näkyy lämpötilakartoilla viileämpänä kuin muut saman maankäyttöluokan alueet. LCZ 8 –luokan korkeat lämpötilat korostavat myös puiden ja muun viherympäristön viilentävää vaikutusta.

Tuulen suunnalla näyttäisi olevan odotuksia vastaava vaikutus lämpötiloihin, sillä tuulen puhaltaessa mereltä lämpötilat rannikolla ovat viileämpiä kuin sisämaassa. Päiväkeskiarvoista nähdään, että mereltä puhaltava tuuli on keskimäärin yleisempää kuin mantereelta puhaltava. On kuitenkin tärkeä huomioida se, että meren lisäksi vallitseva säätila voi vaikuttaa merkittävästi siihen, onko tietystä suunnasta puhaltava tuuli vaikutukseltaan lämmittävä vai viilentävä.

Lämpömukavuutta mittaavan UTCI-indeksin ääriarvot nousevat nykyilmaston kuukausien mallinnuksissa kohtalaisen, vahvan sekä erityisen vahvan kuumarasituksen tasoille. Kuten lämpötilankin kohdalla, UTCI:n arvot ovat alhaisempia lähellä rannikkoa. Lämpötilan lisäksi myös rannikon voimakas tuuli viilentää mukavuusindeksin arvoja ja kasvattaa sisämaan ja rannikon välistä eroa. LCZ 8 –luokkaa edustavilla alueilla UTCI-arvot eivät näytä saavan

yhtä poikkeavia arvoja kuin lämpötilan kohdalla, mutta näiden alueiden ääriarvot ovat kuitenkin kartoilla kuumimpien alueiden joukossa. Korkeiden rakennusten luokissa arvot vaikuttaisivat olevan muita luokkia alhaisempia, mitä voi selittää rakennusten varjostava vaikutus.

Rakennetun ympäristön vaikutusta analysoitaessa tutkittiin mm. rakennustiheyttä ja rakennusten mittasuhteita, mutta tutkituista parametreista rakennusten korkeuden yhteys kaupunkilämpötilaan ja UTCI-arvoihin näkyi selkeimpänä. Kaupungin lämmittävä vaikutus näkyy tilastoissa voimakkaimpana silloin, kun rakennuskorkeus on 15 m ja 25 m välissä. Tulos on samankaltainen kuin URCLIM-projektissa, jossa havaittiin voimakkaan kuumarasituksen yleisyys noin 20 m korkeiden rakennusten alueilla (URCLIM 2021). Tämän hankkeen tuloksissa on kuitenkin enemmän hajontaa kuin URCLIM-projektin tuloksissa, eikä tulosten riippuvuus rakennusten korkeudesta ole yhtä selkeä. Hankkeiden välisiä eroja voivat selittää erot mallien asetuksissa (esimerkiksi alueellinen erotuskyky), mutta myös erot mallinnettujen ajanjaksojen välillä. On myös tärkeää muistaa, että SURFEX-malli ei pysty kuvaamaan Helsingin oikeiden rakennuksien ympäristöä, sillä se mallintaa olosuhteita ideaalisissa kaupunkiluokissa, joita se maankäyttöaineiston perusteella tulkitsee Helsingissä sijaitsevan. Tämän vuoksi mallin maankäyttökuvauksessa esiintyy Helsingille epätyypillisiä, jopa 75 m korkeita rakennuksia.

Tulevaa ilmastoa mallinnettaessa lämpötilojen keskiarvojen alueellisessa vaihtelussa ei nähdä juurikaan vaihtelua, vaan muutokset ovat samansuuruisia ja taulukon 4 mukaisia koko mallinnetulla Helsingin alueella. Tulos on odotusten mukainen, sillä tulevan ilmaston sääpakotteen luomisessa lämpötilan keskiarvon muutos on jokaisessa hilapisteessä asetettu vastaamaan ilmastomallien ennustamaa muutosta. Hellepäivien määrässä ja helteessä vietetyssä ajassa korostuu jälleen luokka LCZ 8 eli matalista ja suurista rakennuksista koostuvat rakennetut ympäristöt.

Ilmaston lämmitessä kuumarasituksessa vietetty aika kasvaa, sillä kuumarasituksen alarajaksi määritetty indeksin raja-arvo ylittyy entistä useammin. Mallinnettujen, erityisen kuumien kuukausien tapauksissa muutos päivittäisessä altistuksessa voi olla jopa 1.4 tuntia jakson 2025–2054 ilmastoon siirryttäessä ja jopa 2.7 tuntia jaksolle 2055–2084. Lämpömukavuusindeksin muutokseen vaikuttaa merkittävimmin lämpötilan muutos, mutta myös kosteuden, tuulen nopeuden sekä auringonsäteilyn muutoksilla on oma osuutensa.

Lähteet

- Blazejczyk, K., P. Bröde, D. Fiala, G. Havenith, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann & A. Błażejczyk, 2010: Principles of the New Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its Application to Bioclimatic Research in European Scale. *Miscellanea Geographica*. 14. 91-102. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2010-0009>.
- Jylhä, K., T. Kalamees, H. Tietäväinen, K. Ruosteenoja, J. Jokisalo, R. Hyvönen, S. Ilomets, S. Saku & A. Hutila, 2011: Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista. (Test reference year 2012 for building energy demand and impacts of climate change). *Raportteja 2011:6*, Ilmatieteen laitos. 110 s.
- Jylhä, K., J. Jokisalo, K. Ruosteenoja, K. Pilli-Sihvola, T. Kalamees, T. Seitola, H.M. Mäkelä, R. Hyvönen, M. Laapas & A. Drebs, 2015: Energy demand for the heating and cooling of residential houses in Finland in a changing climate. *Energy and Buildings*, 99, pp. 104-116. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.001>
- Jylhä, K., K. Ruosteenoja, J. Jokisalo, K. Pilli-Sihvola, T. Kalamees, H. Mäkelä, R. Hyvönen & A. Drebs, 2015: Hourly test reference weather data in the changing climate of Finland for building energy simulations. *Data Br*, 4, pp. 162-169. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2015.04.026>
- Lehtonen, I., K. Ruosteenoja, A. Venäläinen & H. Gregow, 2014: The projected 21st century forest-fire risk in Finland under different greenhouse gas scenarios. *Boreal Environ. Res.*, 19, pp. 127-139
- Rantanen, M., J. Räisänen & J. Merikanto, 2024: A method for estimating the effect of climate change on monthly mean temperatures: September 2023 and other recent record-warm months in Helsinki, Finland. *Atmos. Sci. Lett.* e1216. [doi:10.1002/asl.1216](https://doi.org/10.1002/asl.1216).
- Rieutord T., G. Bessardon & E. Gleeson, 2024: High-Resolution Land Use Land Cover Dataset for Meteorological Modelling—Part 2: ECOCLIMAP-SG-ML an Ensemble Land Cover Map. *Land*. 13(11):1875. <https://doi.org/10.3390/land13111875>
- Ruosteenoja, K., & Jylhä, K., 2021: Projected climate change in Finland during the 21st century calculated from CMIP6 model simulations. *Geophysica*, 56(1), 39–69. <https://www.geophysica.fi/article/id-56-3-ruosteenoja/>
- Ruuhela, R., A. Votsis, J. Kukkonen, K. Jylhä, S. Kankaanpää & A. Perrels, 2021: Temperature-Related Mortality in Helsinki Compared to Its Surrounding Region Over Two Decades, with

Special Emphasis on Intensive Heatwaves. *Atmosphere*. 12(1):46.

<https://doi.org/10.3390/atmos12010046>

Suomi, J., O. Saranko, A.-I. Partanen, C. Fortelius, C. Gonzales-Inca & J. Käyhkö, 2024: Evaluation of surface air temperature in the HARMONIE-AROME weather model during a heatwave in the coastal city of Turku, Finland. *Urban Climate*, Volume 53, 101811,

<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101811>

URCLIM project technical report: Deliverables 5.3 and 5.4 combined: Impact simulation for combined urban and climate change scenarios. 2021. Saatavilla:

<https://www.researchgate.net/publication/365186846> URCLIM D53 version 280621

Liitteet

A UTCI-indeksin laskukaava

UTCI-lämpömukavuusindeksi perustuu ihmiskehon lämpötasapainoa kuvaaviin yhtälöihin. Kokonaisuudessaan yhtälö on kuudennen asteen polynomikaava neljällä muuttujalla (lämpötila, kosteus, auringonsäteilyn lämmittävä vaikutus ja tuulennopeus). Yhtälön lauseke löytyy indeksille omistetulta verkkosivulta (<https://www.utci.org/>).

B SURFEX-mallin konfiguraatio

SURFEX-malli tarvitsee tiedon yläpuolisen ilmakerroksen tilasta, ja tätä sen käyttämää syötetiedostoa kutsutaan yleisesti nimellä sääpakote. Tässä projektissa sääpakotteet luotiin HARMONIE-AROME:lla (versio Cy43.h2.1) tehdyistä ilmakehämallinnuksista PySURFEX-kirjastoa hyödyntämällä. Ilmakehämallinnusten alueellinen tarkkuus oli 750 m, ja ne kattoivat koko Etelä-Suomen.

SURFEX-mallista käytettiin avoimen lähdekoodin versiota 8. Malliajot tehtiin kullekin ilmastolle kolmessa osassa: toukokuu, kesä-heinäkuu sekä elokuu. Kesä- ja heinäkuu pystyttiin yhdistämään malliajovaiheessa yhdeksi kokonaisuudeksi, koska molemmat olivat peräisin samalta vuodelta (2021), ja siksi kuukausien välissä ei ollut epäjatkuvuutta.

Nykyilmaston SURFEX-ajoissa maaperän ja vesialueiden lämpötilat alustettiin tilastoihin perustuvilla vakioarvoilla. Tulevan ilmastojen ajoissa näitä vakioarvoja nostettiin yhdellä asteella jakson 2025–2054 ilmastoja ja kahdella asteella jakson 2055–2084 ilmastoja tutkittaessa. Näin tehtiin, koska tulevien ilmastojen maaperän tai veden lämpötilasta ei tämän tutkimuksen yhteydessä ollut tarkempaa tietoa, ja vakioarvot oli mahdollista syöttää vain kokonaislukuina. Jokaisen SURFEX-ajon alussa oli yhden viikon pituinen lämmittelyjakso, jonka aikana alkuarvauksista syntyvien mahdollisten virheiden voidaan olettaa tasaantuneen maaperän osalta mitättömiksi. Vesialueet jätettiin pois SURFEX-mallin tulosten käsittelyssä.

Maankäyttöaineistona käytettiin tavanomaisen ECOCLIMAP-SG-aineiston sijaan koneoppimismalleilla luotua ECOCLIMA-SG-ML-aineistoa, jonka paikallinen tarkkuus on 60 m (Rieutord ym. 2024). Koska tavallisesti käytössä olevat lehtialaindeksin (leaf area index, LAI), puiden korkeuksien (HT) ja maan pinnan heijastuvuuteen (albedo) liittyvät aineistot

eivät ole yhteensopivia päivitetyn maankäyttöluokkien aineiston kanssa, päädyttiin käyttämään mallissa määritettyjä luokkakohtaisia oletusarvoja.

C Ilmastomallien tuloksiin perustuvat deltamuutokset

Keskilämpötilojen, sademäärien ja auringonsäteilyn muutokset siirryttäessä tulevaisuuden ilmastoon perustuvat 28 mallin tuloksiin; tuulen voimakkuuden muutos 26 ja suhteellisen kosteuden muutos 23 malliin. Tieto kunkin suureen laskennan pohjana käytetyistä malleista on esitetty Ruosteenojan ja Jylhän (2021) tutkimuksen taulukossa 1.

Keskilämpötilan, sademäärän, auringonsäteilyn ja tuulen voimakkuuden muutokset on laskettu yksinkertaisesti vähentämällä suureen arvo jaksoilta 2025–2054 ja 2055–2084 vastaavasta jaksolle 2005–2034 lasketusta arvosta; kaikki nämä ovat 23–28 mallin tulosten keskiarvoja. Niille suureille, joille muutos on ilmaistu prosentteina, tästä aiheutuu pieni epälineaarisuusvirhe, jolla ei kuitenkaan ole käytännön merkitystä. Ilmastosuureitten muutosten eri mallien keskiarvot on esitetty koko maapallon kattavassa 2.5 x 2.5 asteen hilassa (Ruosteenoja ja Jylhä, 2021). Helsingin ilmastomuutosselvitystä varten poimittiin tiedot hilapisteestä 60°N, 25°E.

Lämpötilan ajallisten vaihtelujen keskihajonnat perustuvat v. 2014 asti 25:n ja v. 2015 lähtien 24 mallin tuloksiin. Ruosteenojan ja Jylhän (2021) taulukossa 1 luetelluista malleista päiväkohtaiset lämpötilatiedot puuttuivat kokonaan INM-CM4-8- ja GISS-E2-1-G-malleista, ja TaiESM1 antoi nämä tiedot vain vuoteen 2014 asti. Lisäksi NESM3-mallissa lämpötilojen vaihtelut näyttivät sangen epäilyttäviltä, joten myös tämä malli jouduttiin jättämään pois. Kunkin kalenterikuukauden vuorokausikeskilämpötilojen keskihajonnat laskettiin neljälle ajanjaksolle (1981–2010, 2020–2049, 2040–2069 ja 2070–2099), ensin erikseen jokaiselle malliajolle. Sen jälkeen laskettiin kullekin mallille rinnakkaisajojen keskiarvot ja näistä edelleen kaikkien mallien tulosten keskiarvo. Jaksojen 2005–2034, 2025–2054 ja 2055–2084 keskiarvot saatiin näistä ajan suhteen lineaarisesti interpoloimalla. Jatkolaskelmia varten keskihajonnoista tulostettiin kullekin 12 kuukaudelle suhdeluvut $\sigma(2025-2054)/\sigma(2005-2034)$ ja $\sigma(2055-2084)/\sigma(2005-2034)$.

Suhteellisen kosteuden muutosten laskemisessa käytettiin algoritmia, joka olettaa keskimääräisen havaitun kyllästysvajauksen suurentuvan tai pienentyvän ilmastojaksojen välillä samassa suhteessa kuin mitä mallit ennustavat (Jylhä ym. 2011).

D Sääparametrien muutokset

Taulukko D1. Keskimääräinen suhteellisen kosteuden muutos (%-yksikköinä) tulevaan ilmastoon siirryttäessä. Vertailukohtana on käytetty vuosille 2005–2034 laskettua ilmasto.

Jakso	Toukokuu	Kesäkuu	Heinäkuu	Elokuu
2025–2054	-0.54	-0.24	-0.51	-0.37
2055–2084	-1.08	-0.74	-1.33	-1.06

Taulukko D2. Keskimääräinen tuulennopeuden suhteellinen muutos (%) tulevaan ilmastoon siirryttäessä. Vertailukohtana on käytetty vuosille 2005–2034 laskettua ilmasto.

Jakso	Toukokuu	Kesäkuu	Heinäkuu	Elokuu
2025–2054	0.60	0.40	0.46	-0.60
2055–2084	0.71	0.35	0.49	-1.79

Taulukko D3. Keskimääräinen auringon säteilyn suhteellinen muutos (%) tulevaan ilmastoon siirryttäessä. Vertailukohtana on käytetty vuosille 2005–2034 laskettua ilmasto.

Jakso	Toukokuu	Kesäkuu	Heinäkuu	Elokuu
2025–2054	0.97	1.25	1.19	1.48
2055–2084	1.94	1.94	1.94	3.06



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

ILMATIETEEN LAITOS

Erik Palménin aukio 1

PL 503

00560 HELSINKI

p. 029 539 1000

WWW.ILMATIETEENLAITOS.FI

FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

RAPORTTEJA - RAPPORTER - REPORTS 2025:7

ISSN 2342-7108 (verkkojulkaisu)

ISBN 978-952-336-210-9 (verkkojulkaisu)

<https://doi.org/10.35614/isbn.9789523362109>

Helsinki 2025

