

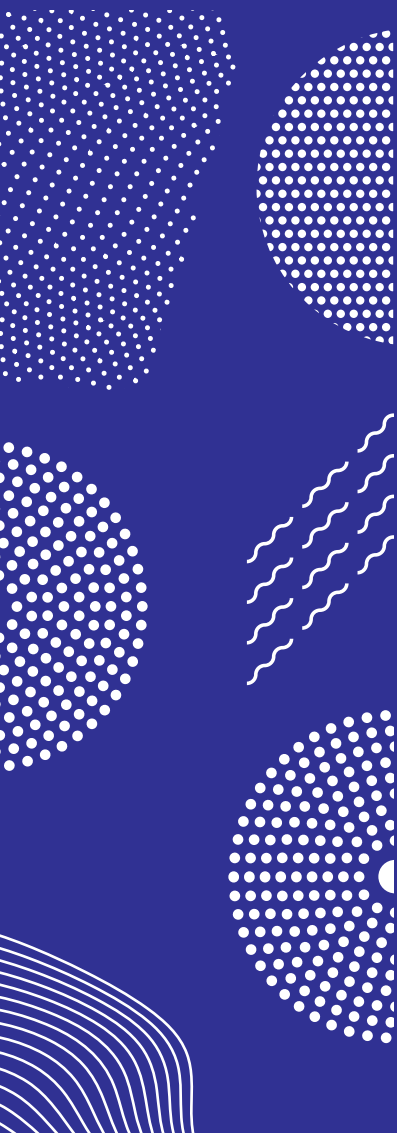


ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

RAPORTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2023:1

ILMASTONMUUTOS PÄÄKAUPUNKISEUDULLA

MIKA RANTANEN
KIMMO RUOSTEENOJA
SANNA LUHTALA
MERI VIRMAN
HAVU PELLIKKA
SURAJ POLADE
REIJA RUUHELA
ANNA LUOMARANTA





Julkaisija	Ilmatieteen laitos (Erik Palménin aukio 1) PL 503, 00101 Helsinki	Julkaisun sarja, numero ja raporttikoodi Raportteja - Rapporter - Reports 2023:1 Huhtikuu 2023
------------	--------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tekijät	Mika Rantanen, Kimmo Ruosteenoja, Sanna Luhtala, Meri Virman, Havu Pellikka, Suraj Polade, Reija Ruuhela, Anna Luomaranta	Toimeksiantaja Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY
---------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------

Nimeke
Ilmastonmuutos pääkaupunkiseudulla

Tiivistelmä

Ihmiskunnan toiminnasta aiheutuneet kasvihuonekaasupäästöt ovat lämmittäneet maapallon ilmastoa jo yli asteen. Merkittäviä muutoksia on havaittu mm. helleaaltojen ja rankkasateiden voimakkuudessa. Tulevaisuuden ilmastonmuutos riippuu ihmiskunnan päästöjen kehityksestä, mutta on varsin todennäköistä, että maapallon keskilämpötila nousee tällä vuosisadalla vielä noin 1–2 astetta lisää.

Käynnissä oleva ilmaston lämpeneminen näkyy jo pääkaupunkiseudun ilmastossa. Monet havaitut muutokset ovat sopusoinnussa sen kanssa, mitä ihmiskunnan aiheuttama kasvihuoneilmiön voimistuminen tuo mukanaan. Viimeksi kuluneiden 60 vuoden aikana keskilämpötilat ovat nousseet kaikkina vuodenaikoina, mutta voimakkainta nousu on ollut talvella. Myös sademäärät ovat nousseet talvikaudella, mutta muina vuodenaikoina sateissa ei ole havaittavissa tilastollisesti merkitseviä trendejä. Keskimääräisten ilmasto-olosuhteiden lisäksi sään ääri-ilmiöistä helleaallot ovat voimistuneet, ja helteiden lisääntyminen on ollut voimakkaampaa pääkaupunkiseudun sisämaassa kuin rannikolla.

Tähän raporttiin on myös päivitetty tuoreimmat ilmastonmuutosarviot perustuen IPCC:n kuudennessa arviointiraportissa käytettyihin CMIP6-ilmastomalleihin ja SSP-kasvihuonekaasuskenaarioihin. Keskinkertaisen SSP2-4.5 päästöskenaarion mukaan eri kuukausien keskilämpötilojen ennustetaan nousevan pääkaupunkiseudulla 2,5–3 astetta vuosista 1981–2010 vuosiin 2040–2069 mennessä. Nousu on hieman pienempää kuin Suomen alueella keskimäärin, ja muutokset ovat talvella jonkun verran suurempia kuin kesällä. Leudontuva talvi-ilmasto tarkoittaa lumen ja jääpeitteen vähentymistä entisestään. Kesäaikaan nouseva lämpötila tuo mukaan voimakkaampia helteitä, rankkasateita ja kuivuusjaksoja. Tuulisuudessa ei näy selkeitä muutossignaaleja, eikä siten talvimyrskyjen ennusteta olevan tulevaisuudessa selkeästi nykyistä voimakkaampia. Sen sijaan talvisten matalapaineiden mukanaan tuomat sademäärät lisääntyvät ja satavat yhä useammin vetenä. Meriveden ei ennusteta vielä vuosisadan puoliväliin mennessä juurikaan nousevan, mutta vuosisadan loppuun mennessä sen ennustetaan olevan noin 25 cm nykyistä tasoa korkeammalla.

Kaikista optimistisimmankin päästöskenaarion mukaan pääkaupunkiseudun ilmasto lämpenisi yli asteen lisää 2080-lukuun mennessä. Tulevien sukupolvien kokema vuosisadan loppupuolen ilmasto riippuu suuresti ihmiskunnan päästöistä, ja jonkinasteiseen muutokseen on oltava valmiita varautumaan. Toisaalta pitää tiedostaa, että pääkaupunkiseudun ilmasto on luonnostaan hyvin vaihteleva, ja siksi tulevaisuudessa voi esiintyä kylmiäkin ajanjaksoja.

Julkaisijayksikkö

Sään ja ilmastonmuutoksen vaikutustutkimus

Luokitus (UDK)	Asiasanat	
504.7, 551.58, 551.583, 551.584.2	Ilmasto, ilmastonmuutos, ilmastomallit, pääkaupunkiseutu, ilmastoskenaariot	
ISSN ja avainnimeke	ISBN	
2342-7108 (verkkojulkaisu)	978-952-336-173-7 (verkkojulkaisu)	
DOI	Kieli	Sivumäärä
https://doi.org/10.35614/isbn.9789523361737	Suomi (tiivistelmä ruotsiksi ja englanniksi)	35



Utgivare	Meteorologiska institutet (Erik Palméns plats 1) PB 503, 00101 Helsingfors	Publikationens serie och nummer Raportteja - Rapporter - Reports 2023:1 April 2023	
Författare	Mika Rantanen, Kimmo Ruosteenoja, Sanna Luhtala, Meri Virman, Havu Pellikka, Suraj Polade, Reija Ruuhela, Anna Luomaranta	Uppdragsgivare Helsingforsregionens miljötjänster HRM	
Rubrik	Klimatförändringar i huvudstadsregionen		
Sammandrag	<p>Växthusgasutsläpp orsakade av mänsklig verksamhet har redan värmt upp jordens klimat med mer än en grad. Betydande förändringar har observerats till exempel i intensiteten av värmeböljor och kraftiga regn. Framtida klimatförändringar beror på människans utsläpp av växthusgaser, men det är ganska sannolikt att jordens medeltemperatur kommer att stiga med ytterligare 1–2 grader under detta århundrade.</p> <p>Den pågående uppvärmningen är redan synlig i huvudstadsregionens klimat. Många av de observerade förändringarna stämmer överens med vad människans förorsakade intensifiering av växthuseffekten medför. Under de senaste 60 åren har medeltemperaturen stigit under alla årstider, men uppvärmningen har varit kraftigast under vintern. Nederbörden har även ökat under vintersäsongen, men inga statistiskt säkerställda förändringar kan observeras i nederbörden under de andra årstiderna. Utöver de genomsnittliga klimatförhållandena har värmeböljorna intensifierats och värmeökningen har varit kraftigare i inlandet än vid kusten i huvudstadsregionen.</p> <p>Denna rapport har också uppdaterats med de senaste uppskattningarna av klimatförändringarna, vilka är baserade på CMIP6 klimatmodeller och SSP växthusgasscenarier som används i IPCC:s sjätte utvärderingsrapport. Enligt det genomsnittliga utsläppsscenarioet SSP2-4.5 förutspås medeltemperaturen för olika månader att stiga i huvudstadsregionen med 2,5–3 grader från åren 1981–2010 till 2040–2069. Ökningen är något mindre än medeltalet i Finland och förändringarna är något större på vintern än under sommaren. Ett mildare vinterklimat innebär en ytterligare minskning av snö- och istäcket. Den stigande temperaturen på sommaren ger starkare värmeböljor, kraftiga regn och perioder med torka. Det finns inga tydliga tecken i förändringar i vindförhållanden, och därför förutspås att vinterstormar inte blir starkare i framtiden än vad de är nu. Istället ökar nederbördsmängderna i samband med vinterlågtryck och nederbörden förekommer oftare i form av regn. Havsnivån förutspås inte stiga mycket före mitten av seklet, men i slutet av århundradet kan havsnivån stiga med cirka 25 cm från nuvarande nivå.</p> <p>Enligt det mest optimistiska utsläppsscenarioet skulle klimatet i huvudstadsregionen värmas upp med mer än en grad tills 2080-talet. Klimatet som de kommande generationerna kommer att uppleva i slutet av seklet är alltså starkt beroende av människans utsläpp, och man måste vara redo att förbereda sig till en viss grad av förändring. Däremot måste man vara medveten om att klimatet i huvudstadsregionen har naturligt stor variation och därför kan kalla perioder också förekomma i framtiden.</p>		
Publikationsenhet	Forskning av väder och klimatförändringens effekter		
Klassificering (UDK)	504.7, 551.58, 551.583, 551.584.2	Nyckelord Klimat, klimatförändringar, klimatmodeller, huvudstadsregionen, klimatscenarier	
ISSN	2342-7108 (online)	ISBN 978-952-336-173-7 (online)	
DOI	https://doi.org/10.35614/isbn.9789523361737	Språk Finska, sammandrag på svenska och engelska	Sidantal 35



Published by **Finnish Meteorological Institute** Series title, number and report code of publication
(Erik Palménin aukio 1), P.O. Box 503 Raportteja - Rapporten - Reports 2023:1
FIN-00101 Helsinki, Finland April 2023

Authors Commissioned by
Mika Rantanen, Kimmo Ruosteenoja, Sanna Luhtala, Meri Virman, Helsinki Region Environmental Services
Havu Pellikka, Suraj Polade, Reija Ruuhela, Anna Luomaranta

Title
Climate change in the capital region of Finland

Abstract

Greenhouse gas emissions caused by human activity have already warmed the climate of Earth by more than one degree. Significant changes have been observed e.g. in the intensity of heatwaves and heavy rainfall. Future climate change depends on human emissions, but it is likely that the global mean temperature still rises by another 1–2 degrees by the end of this century.

The ongoing global warming is already visible in the climate of the capital region. Many of the observed changes are consistent with what human-caused intensification of the greenhouse effect will bring. During the past 60 years, the average temperatures have risen in all seasons, but the strongest warming has been observed in winter. Precipitation has increased in the winter season, but no statistically significant trends in precipitation can be observed in other seasons. In addition to the average climatic conditions, heatwaves have intensified with a stronger increase in the inland regions than on the coast.

In this report, the latest climate change projections based on CMIP6 climate models and SSP greenhouse gas scenarios used in the IPCC's Sixth Assessment Report are presented. According to the moderate SSP2-4.5 emission scenario, the average temperatures are predicted to rise in the capital region by 2.5–3 degrees in all months from the period 1981–2010 by the period 2040–2069. The warming is slightly weaker than in Finland on average, and the changes are somewhat larger in winter than in summer. A milder winter climate results in a further decrease in snow and ice cover. The rising temperatures in summer bring stronger heatwaves, heavy rainfalls and prolonged periods of droughts. There are no clear signs of change in the windiness, and thus winter storms are not predicted to be notably stronger in the future than they are now. Instead, the amount of precipitation induced by winter cyclones increases and comes more often as rain than snow. The sea level is not projected to rise much by the mid-century, but by the end of the century it is estimated to rise by about 25 cm from its current level.

Even according to the most optimistic emission scenario, the climate in the capital region would warm by more than one degree by the 2080s. The climate change by the end of the century experienced by future generations is highly dependent on human emissions, and one must be ready to prepare for some degree of change. On the other hand, the climate in the capital region is subject to significant natural variability, and therefore cold periods of weather may occur also in the future.

Publishing unit

Weather and Climate Change Impact Research

Classification (UDC)	Keywords
504.7, 551.58, 551.583, 551.584.2	Climate, climate change, climate models, the capital region, climate scenarios

ISSN	ISBN
2342-7108 (online)	978-952-336-173-7 (online)

DOI	Language	Pages
https://doi.org/10.35614/isbn.9789523361737	Finnish, abstract in Swedish and English	35

Esipuhe

Ilmastonmuutos näkyy pääkaupunkiseudulla sekä tilastokäyrinä että omin silmin. Lämpötilat ovat nousseet kaikkina vuodenaikoina ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kohottua joka vuosi uusiin ennätyslukemiin. Ilmastoa maailmanlaajuisesti lämmittävien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisellä on kiire, mikäli haluamme vähentää ilmaston lämpenemisen ja sen seurausten tuhoisimpia vaikutuksia ihmisiin ja elinympäristöömme kaupunkiseudulla.

Monet muutokset tulevat näkyviin vasta pidemmällä aikavälillä, mutta joiltain osin muutos on ollut nopeaa. Muuttuvat olosuhteet vaikuttavat sekä suoraan että välillisesti ihmisten hyvinvointiin. Ihmisten ja luonnon kyky mukautua tai sopeutua lämpötilan jatkuvan nousun vaikutuksiin vaihtelee.

Kaupunkiseutumme on pääosin suunniteltu yli yhden asteen viileämpään ilmastoon – aikaan, jota ei enää ole, ja joka ei meidän, lastemme eikä edes lastenlastemme elinaikana palaa. Rakennettu ympäristömme on suunniteltu ja rakennettu menneeseen ilmastoon. Sen ajan suunnittelunormit eivät kaikin osin vastaa niitä olosuhteita ja erityisesti ääriolosuhteita, joihin meidän tulee sopeutua. Siksi on tärkeää selvittää tulevia muutoksia, parantaa jo olemassa olevan kaupunkirakenteen ilmastokestävyyttä ja tietysti suunnitella kaikki uusi niin, että se edistää terveyttämme ja turvallisuuttamme.

Tämä raportti tilattiin Ilmatieteen laitokselta, jotta pääkaupunkiseudun kaupungeilla ja muilla suunnittelutyöhön osallistuvilla toimijoilla olisi käytössään uusin ilmastotieto vuonna 2023. Raportissa on käytetty Hallitustenvälisen ilmastopaneelin (IPCC) kuudennen arviointiraportin perustana olleita uusimpia ilmastomalleja siltä osin, kuin niiden käyttö on ollut mahdollista.

Tämän raportin tavoitteena on kohdentaa ilmaston lämpenemisen seurauksia koskeva tieto konkreettisemmin kaupunkiseutumme kohdistettuina arvioina, jotta tietoa olisi helpompi käyttää suunnittelun ja päätöksen teon tukena.

Irma Karjalainen
Tulosaluejohtaja
Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY

Ilmastonmuutos pääkaupunkiseudulla

Mika Rantanen¹, Kimmo Ruosteenoja¹, Sanna Luhtala¹, Meri Virman¹, Havu Pellikka², Suraj Polade¹, Reija Ruuhela¹, Anna Luomaranta¹

¹Ilmatieteen laitos, Helsinki, Suomi

²Aalto-yliopisto, Espoo, Suomi

1.	Johdanto	6
1.1.	Kasvihuonekaasuskenaariot	7
1.2.	Ilmastonmuutosarvioiden laatiminen	9
2.	Pääkaupunkiseudun ilmasto on jo muuttunut	9
2.1.	Keskimääräiset lämpötilat	9
2.2.	Keskimääräiset sademäärät	11
2.3.	Helteet ja rankkasateet	13
3.	Tulevaisuuden ilmastonmuutosarviot	15
3.1.	Keskimääräiset lämpötilat ja sademäärät	15
3.2.	Rankkasateet	18
3.3.	Tuulisuus	20
3.4.	Lumensyvyys	22
3.5.	Helteet ja kaupungin lämpösaarekeilmiö	24
3.5.1.	Ennustetut muutokset helteiden voimakkuudessa	24
3.5.2.	Kaupungin lämpösaarekeilmiö	27
3.6.	Merivedenkorkeus sekä korkean meriveden ja rankkasateiden yhdistelmätilanteet	28
3.7.	Kuivuus	30
4.	Yhteenveto ja johtopäätökset	32
	Kiitokset	34
	Kirjallisuusviitteet	34

1. Johdanto

Ihmisten toiminnasta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt ovat lämmittäneet maapallomme ilmastoa jo yli asteen ja aiheuttaneet merkittäviä muutoksia eri sääilmiöiden, kuten helleaaltojen tai rankkasateiden, esiintyvyyteen. Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) viimeisimmän raportin mukaan maapallon keskilämpötilan nousu on ennenkokematonta vähintään 2000 vuoteen (IPCC 2021). Hitaasti palautuvia muutoksia on tapahtunut myös merissä ja mannerjäätiköissä. Muutokset ovat erityisen voimakkaita arktisilla alueilla, joihin Suomikin osittain kuuluu.

Ilmastonmuutos näkyy myös jo pääkaupunkiseudun ilmastossa. Lämpötilat ovat nousseet kaikkina vuodenaikoina, lumen määrä on vähentynyt ja erityisesti talvella sademäärät ovat kasvaneet. Siinä missä muutama vuosikymmen sitten ilmastonmuutoksesta puhuttiin lähinnä tulevaisuuden uhkana, nyt ilmaston lämpeneminen on jo konkreettisesti havaittavissa. Vaikka Suomessa ilmasto vaihtelee myös ihan luonnostaan vuosikymmenestä toiseen, viime vuosikymmeninä havaitut muutokset pääkaupunkiseudun ilmastossa ovat hyvin sopusoinnussa kasvihuonekaasujen aiheuttaman lämpenemisen kanssa.

Pääkaupunkiseudun alueen sisälläkin ilmasto on monella tapaa vaihteleva. Rannikolla meren lämmittävä vaikutus pitää rantaviivan syksyisin ja talvisin selvästi lauhempana kuin sisämaan. Toisaalta avoin meri voi tuottaa sakeita lumisateita, jotka suosiollisten ilmavirtausten mukana ajautuvat rannikolle ja tuovat runsaasti lunta lyhyessä ajassa. Edellä mainittujen syiden takia ilmastonmuutoksen ennustaminen pääkaupunkiseudulle on haastavaa ja sisältää epävarmuuksia: maailmanlaajuiset ilmastomallit eivät välttämättä kykene simuloimaan kunnolla rannikon melko pienipiirteisiä muotoja tai ilmaston luonnollisia pitkäaikaisvaihteluja. On lisäksi tärkeää muistaa, että säiden luonnollisen vaihtelun ei odoteta oleellisesti vähentyvän tulevaisuudessa. Siten idänpuoleiset ilmavirtaukset voivat tuoda tulevaisuudessakin kylmiä talvia, vaikka niiden todennäköisyys hiljalleen pienenee ilmaston lämmitessä. Toisaalta ilmakehän luontainen vaihtelu voi myös aika ajoin voimistaa kasvihuonekaasujen aiheuttamaa lämpenemistä.

IPCC julkaisi viimeisimmän, eli kuudennen arviointiraporttinsa maapallon ilmastonmuutoksesta vuonna 2021. Edelliset arviointiraportit julkaistiin vuosina 2007 ja 2013, eli laajoja raportteja julkaistaan noin 6–8 vuoden välein. Raportit sisältävät arvioita ilmaston nykytilasta ja sen tulevasta kehityssuunnista. Tuoreimmassa arviointiraportissa ilmastonmuutosennusteet perustuvat uusimpaan ilmastomallisukupolveen eli niin sanottuihin CMIP6¹-ilmastomalleihin. Ilmastonmuutosta ennustettaessa käytetään pohjana useita vaihtoehtoisia kasvihuonekaasujen päästöskenaarioita (ks. kappale 1.1). Ilmastonmuutoksesta pääkaupunkiseudulla on julkaistu aiemmin raportteja vuosina 2010 (HSY 2010) ja 2016 (Mäkelä ym. 2016). Vuonna 2016 ilmestynyt raportti on monilta osin edelleen ajan tasalla, vaikka sen tiedot perustuvat nykyistä edeltävään CMIP5-mallisukupolveen. Tässä raportissa ilmastonmuutosarviot on suurelta osin päivitetty vastaamaan tuoreimmassa IPCC:n raportissa

¹ Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>

käytettyjä CMIP6-ilmastomalleja. Osa tuloksista perustuu kuitenkin edelleen vanhempaan CMIP5-mallisukupolveen.

1.1. Kasvihuonekaasuskenaariot

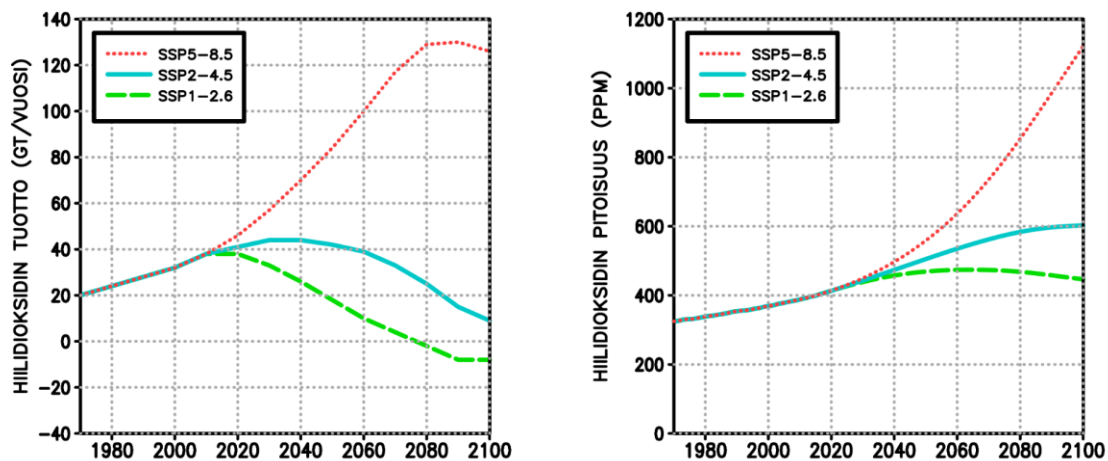
Ihmiskunnan tuottamista kasvihuonekaasuista ylivoimaisesti tärkein on hiilidioksidi (CO₂), jonka pitoisuus ilmakehässä oli ennen teollistumisen aikaa noin 280 ppm (ppm = tilavuuden miljoonasosa) mutta vuonna 2022 jo lähes 420 ppm. Muita ihmisten ilmakehään päästämiä kasvihuonekaasuja ovat muun muassa metaani, typpioksiduuli ja halogenisoidut hiilivedyt. Niilläkin on oma merkityksensä kasvihuoneilmaston voimistajina, mutta edes kaikki ne yhdessä eivät aiheuta yhtä paljoa lämpenemistä kuin CO₂ yksistään. Toisaalta ihmiskunnan ilmakehään tuottamat pienhiukkaset ovat jossakin määrin hidastaneet ilmaston lämpenemistä, mutta niiden pitoisuuksien ei enää ennakoida juurikaan kasvavan vaan maailmanlaajuisesti tarkasteltuna pikemminkin kääntyvän laskuun. Sen sijaan hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä kasvaa vääjäämättä, joskin kasvun nopeutta voidaan huomattavasti hidastaa päästöjä rajoittamalla.

Tulevaisuuden kasvihuonekaasujen kehitystä kuvataan kansainvälisiin sosioekonomisiin kehityskulkuihin (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) pohjautuen (Ruuhela ym. 2023). Kuvassa 1 on esitetty kolmen SSP-kasvihuonekaasuskenaarion² mukaisia hiilidioksidin maailmanlaajuisia päästöjä. Lyhyet luonnehdinnat kustakin skenaarista:

- SSP1-2.6: Erittäin tehokkaat päästöjen rajoitustoimet. Maailmanlaajusten CO₂-päästöjen pitäisi kääntyä selvään laskuun jo 2020-luvulla ja olla vuosisadan lopulla jopa hieman negatiivisia. CO₂:n pitoisuus yltää vuosisadan puolivälin jälkeen korkeimmillaan noin 470 ppm:ään mutta alkaa sen jälkeen hitaasti laskea. IPCC:n (2021) arvion mukaan tämän skenaarion toteutuessa maapallon keskilämpötila olisi noussut tämän vuosisadan lopulla 1,8 °C (epävarmuusväli 1,3–2,4 °C) verrattuna teollistumista edeltävään aikaan.
- SSP2-4.5: Välttävä ilmastopolitiikka. CO₂:n päästöt kasvavat aluksi hieman, mutta kääntyvät laskuun vuodesta 2040 lähtien. Vuosisadan loppupuolella CO₂-pitoisuuden kasvu ilmakehässä taittuu, ja pitoisuus olisi suurin piirtein kaksinkertainen teollistumista edeltävään tasoon verrattuna. Maapallon keskimääräinen lämpötilan arvioitu nousu tämän vuosisadan lopulla on 2,7 (2,1–3,5) °C.
- SSP5-8.5: Pyrkimykset päästöjen rajoittamiseksi epäonnistuvat perin pohjin. CO₂:n päästöt kasvavat nopeasti, enemmän kuin kolminkertaistuen ennen vuosisadan loppua. CO₂:n pitoisuus kohoaisi tuolloin jopa yli nelinkertaiseksi teollistumista edeltävään aikaan verrattuna, ja voimakas kasvu jatkuisi vielä vuodesta 2100 eteenpäinkin. Keskimääräinen maailmanlaajuinen lämpötilan nousu tämän vuosisadan lopulla olisi 4,4 (3,3–5,7) °C.

² Skenaarioiden lyhenteissä esiintyvät lukuarvot ilmaisevat ns. säteilypakotetta. Esim. SSP2-4.5-skenaariossa kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten pitoisuuksien muutokset aiheuttavat maapallon lämpötaseeseen epätasapainon, jonka suuruus v. 2100 tienoilla on noin 4.5 wattia neliometriä kohti.

Myös muun muassa metaanin päästöt ja pitoisuudet ovat suurimpia SSP5-8.5-skenaariossa ja pienimpiä SSP1-2.6-skenaariossa.



Kuva 1. Eri SSP-skenaarioiden mukaiset hiilidioksidin maailmanlaajuiset päästöt (vasen kuva; yksikkö miljardia tonnia hiilidioksidia vuodessa) ja pitoisuudet ilmakehässä (oikea kuva; yksikkö ppm eli tilavuuden miljoonasosa) vuosina 1970–2100. Kuvat ovat piirretty kirjallisuudesta (O'Neill ym. 2016; Meinshausen ym. 2020) saatujen numeroarvojen perusteella.

Kun otetaan huomioon ilmastopolitiikan tavoitteet ja tähän mennessä hyväksytyt ilmastopöytäkirjat, SSP5-8.5-skenaario näyttää varsin epätodennäköiseltä tulevaisuuden kehityskululta. Tämän skenaarion tarkoituksena onkin lähinnä osoittaa, että kävisi todella huonosti, jos ilmastonsuojelu tyystin laiminlyötäisiin. Tällä hetkellä SSP2-4.5-skenaariota voisi kuvitella olevan lähinnä todennäköisimmin toteutuvaa tulevaisuutta. Siihen päädyttäisiin, jos osa maailman maista sitoutuu sovituihin päästövähennystavoitteisiin tunnollisesti, mutta jotkut muut ovat leväperäisempiä. Yltäminen SSP1-2.6-skenaariota vastaavalle päästöjen vähennysuralle taas vaatisi maailman valtioilta nykyisiä sitoumuksia selvästi suurempia päästövähennyksiä. Eri SSP-skenaarioista on kerrottu tarkemmin mm. IPCC:n (2021) raportissa.

Edellä kerrotun perusteella tässä selvityksessä annetaan suurin paino SSP2-4.5-skenaariolle, mutta tarkastellaan myös SSP1-2.6- ja SSP5-8.5-skenaarioiden tuloksia. Tämän hetken käsityksen mukaan SSP5-8.5 skenaarioita ei kuitenkaan tulisi käyttää pohjana suunniteltaessa kaukaisempaa tulevaisuutta. Tähän skenaarioon liittyvät hyvin suuret ilmastolliset muutokset ainoastaan kertovat, miltä kaikelta pahalta on mahdollista järkevällä ilmastopolitiikalla vältyä.

Lisäksi on huomioitava, että osa tässä raportissa esitetyistä tuloksista perustuu vanhempiin CMIP5-sarjan ilmastomalleihin ja niissä käytettyihin RCP-päästöskenaarioihin (Representative Concentration Pathways). Näistä päästöskenaarioista RCP4.5 ja RCP8.5 vastaavat säteilypakotteeltaan suurin piirtein SSP2-4.5- ja SSP5-8.5-skenaarioita, vaikka yksittäisten kasvihuonekaasujen päästöjen osalta kehityskulut eivät ole täysin identtisiä.

1.2. Ilmastonmuutosarvioiden laatiminen

Kun halutaan saada tietoa ilmaston muuttumisesta tulevaisuudessa, arviot kasvihuonekaasujen päästöistä ja muista ilmastoon vaikuttavista tekijöistä syötetään ilmastonmuutosmalleille. Ilmastonmuutosmalli on ilmastoa sääteleviä luonnonlakeja kuvaava simulointimalli, jossa nämä fysikaaliset lainalaisuudet on puettu matemaattisten yhtälöiden muotoon, jotka edelleen ratkaistaan tietokonealgoritmien avulla. Ilmastonmuutosmallissa on oma osamallinsa muun muassa ilmakehälle, merivirroille, lumipeitteelle ja maan pintakerrokselle. Malleja muodostettaessa joudutaan tekemään monia yksinkertaistuksia. Nämä yksinkertaistukset on toteutettu eri malleissa eri tavoin, joten mallien tulokset poikkeavat toisistaan enemmän tai vähemmän. Kun halutaan saada luotettava käsitys ilmaston tulevista muutoksista ja muutoksiin liittyvistä epävarmuustekijöistä, pitää sen tähden aina käyttää arvioiden pohjana riittävän suurta joukkoa malleja.

Tässä selvityksessä esitettävät ilmastonmuutosarviot perustuvat enimmillään 28 malliin (Ruosteenoja ja Jylhä 2021, taulukko 1). Joidenkin ilmastosuureiden tiedot kylläkin puuttuvat muutamista malleista.

2. Pääkaupunkiseudun ilmasto on jo muuttunut

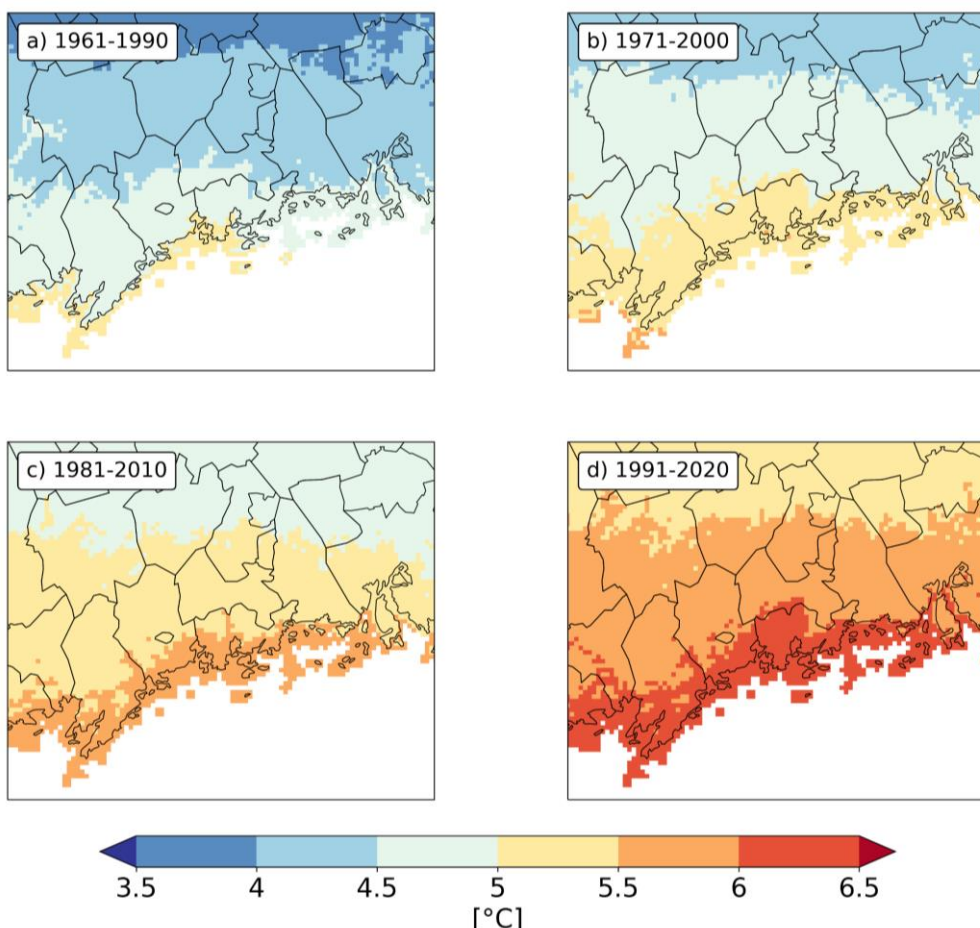
Tässä luvussa käydään läpi lämpötilan ja sademäärien havaittuja muutoksia pääkaupunkiseudulla viime vuosikymmenien aikana. Tulokset perustuvat Ilmatieteen laitoksen hila-aineistoon, jossa matemaattisten menetelmien avulla on tuotettu tietoa sääsuureista myös niille alueille, joilta suoria säähavaintoja ei ole saatavilla. Hila-aineiston lisäksi on käytetty suoria asemahavaintoja Helsingin Kaisaniemen ja Helsinki-Vantaan lentoaseman säähavaintoasemilta.

2.1. Keskimääräiset lämpötilat

Kuvassa 2 on esitetty vuoden keskilämpötila pääkaupunkiseudulla neljän viimeisen 30-vuotisen ilmastollisen vertailukauden aikana. Vuosina 1961–1990 vuoden keskilämpötila vaihteli rannikon noin viidestä asteesta sisämaan neljään asteeseen (kuva 2a). Sen jälkeen Uudenmaan ilmasto on kuitenkin lämmennyt niin, että nykyään käytössä oleva ilmastollinen vertailukausi 1991–2020 on noin 1,3 astetta lämpimämpi kuin jakso 1961–1990 (kuva 2d).

Keskilämpötila

Koko vuosi

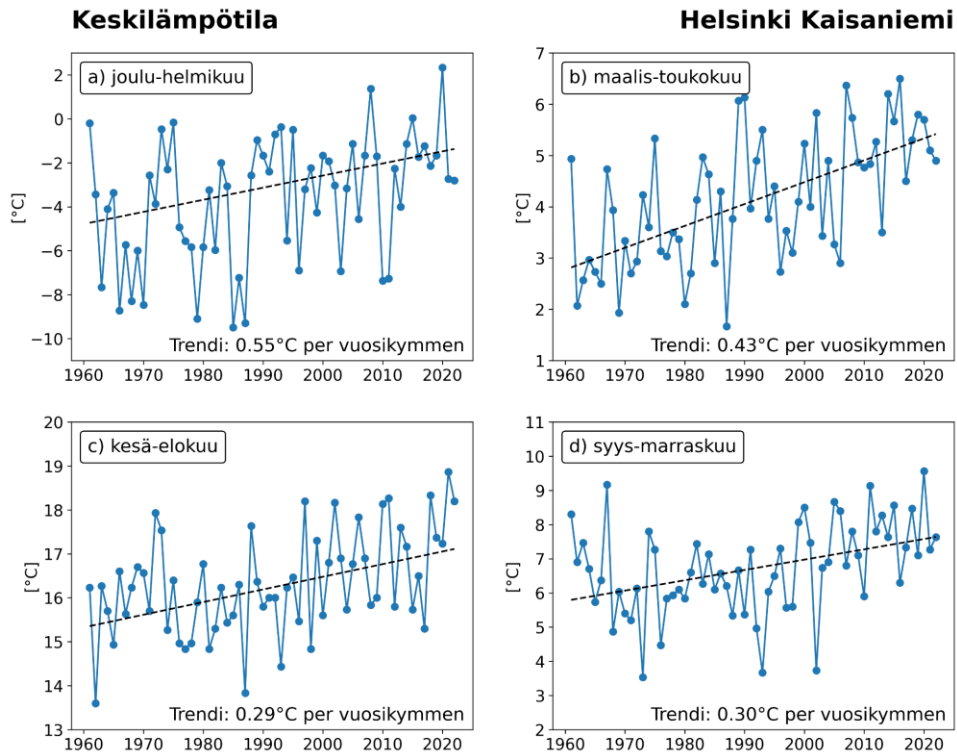


Kuva 2. Vuoden keskilämpötila pääkaupunkiseudulla neljän 30-vuotisen ilmastollisen vertailukauden aikana. Kartat esittävät kalenterivuoden keskimääräistä lämpötilaa vuosina a) 1961–1990, b) 1971–2000, c) 1981–2010 ja d) 1991–2020.

Jos lämpenemistä tarkastellaan vuodenajoittain, niin eniten ovat lämmenneet talvet (kuva 3). Helsingissä talvien keskilämpötilan lineaarinen trendi on ollut $0,55\text{ }^{\circ}\text{C}$ vuosikymmentä kohti, eli viimeisen 60 vuoden aikana talvien lämpötila on noussut hieman yli kolme astetta. Kuvasta 3a voi kuitenkin hahmottaa suuren vuosien välisen vaihtelun talven keskilämpötiloissa. Esimerkiksi talvi 1984/1985 oli erittäin kylmä (keskilämpötila Helsingissä $-9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), kun taas talvi 2019/2020 oli poikkeuksellisen lauha (keskilämpötila $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$). Talvien keskilämpötilan vaihtelu ääripäästä toiseen voi siis olla yli 10 astetta. Vaihtelu johtuu luontaisesta ilmavehän vaihtelusta eli siitä, mistä vallitsevat ilmavirtaukset kunkin talven aikana käyvät. Suuren vaihtelun takia taustalla olevaa lämpenemistrendiä voi joskus olla vaikea havaita. Toisaalta trendin suuruus on jossain määrin herkkä sille, miten tarkasteltavan jakson alku- ja loppuajankohta valitaan.

Seuraavaksi eniten lämpenemistä on tapahtunut keväisin ($0,43\text{ }^{\circ}\text{C}$ vuosikymmentä kohti). Vaikka absoluuttinen lämpenemistrendi on suurin talvella, trendin suhde vuosien väliseen vaihteluun on kuitenkin suurin keväällä. Siksi lämpenemistrendi keväällä näyttää kuvassa 3 voimakkaammalta kuin talvella. Kesät ja syksyt ovat lämmenneet jotakuinkin yhtä paljon,

noin 0,3 °C vuosikymmenessä. Vaikka lämpötilojen lineaarinen trendi on tilastollisesti merkitsevä kaikkina vuodenaikoina, on hyvä huomata, että lämpötilojen vaihtelun peräkkäisten vuosien välillä ei odoteta oleellisesti vähenevän tulevaisuudessa. Siispa suhteellisesti kylmätkin vuodenaajat ovat tulevaisuudessa yhä mahdollisia, vaikka niiden esiintymistodennäköisyys pienenee ilmaston lämpenemisen myötä.



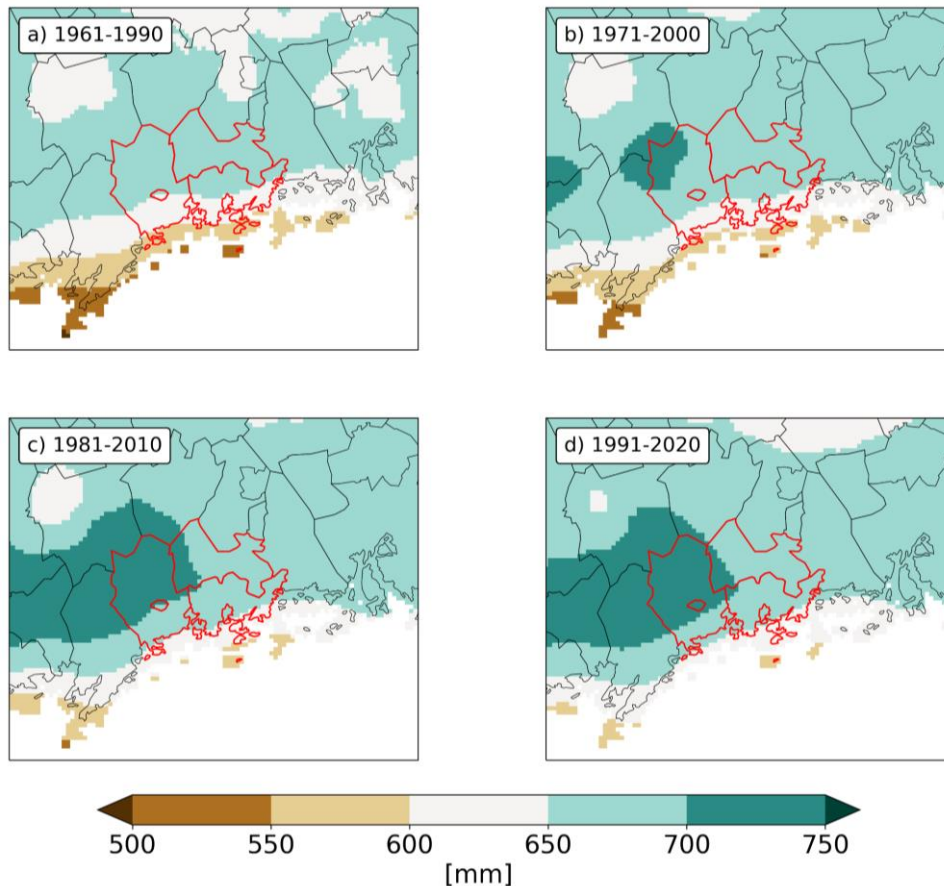
Kuva 3. Eri vuodenaikojen keskilämpötila ja sen lineaarinen trendi Helsingin Kaisaniemessä eri vuodenaikoina vuosina 1961–2022. Kaavio a) esittää talven (joulu-helmikuu) keskilämpötiloja, b) kevään (maaliskuu-huhtikuu), c) kesän (kesä-elokuu) ja d) syksyn (syys-marraskuu). Talven (joulu-helmikuu) keskilämpötilaan on laskettu mukaan edellisen vuoden joulukuu. Siten esimerkiksi talvi vuonna 1961 tarkoittaa joulukuuta 1960/1961.

2.2. Keskimääräiset sademäärät

Siinä missä vuoden keskimääräisessä lämpötilassa on nähtävissä pääkaupunkiseudulla selvää nousua viimeksi kuluneiden 60 vuoden aikana, sademäärissä muutokset ovat vaihtelevampia. Vuosina 1961–1990 keskimääräinen sademäärä vaihteli rannikon noin 550 millimetristä sisämaan 700 millimetriin (kuva 4). Tuoreimpaan ilmastolliseen vertailukauteen tultaessa (1991–2020) sademäärä on lisääntynyt kauttaaltaan, mutta erityisesti Uudenmaan länsiosassa, missä vuotuiset sademäärät ovat nousseet jopa 80 millimetriä. Sen sijaan jos vuosia 1991–2020 verrataan jakson 1981–2010 keskiarvoon (kuva 4c), niin muutokset ovat hyvin pieniä ja sademäärä on jopa vähentynyt Uudenmaan itä- ja koillisosissa.

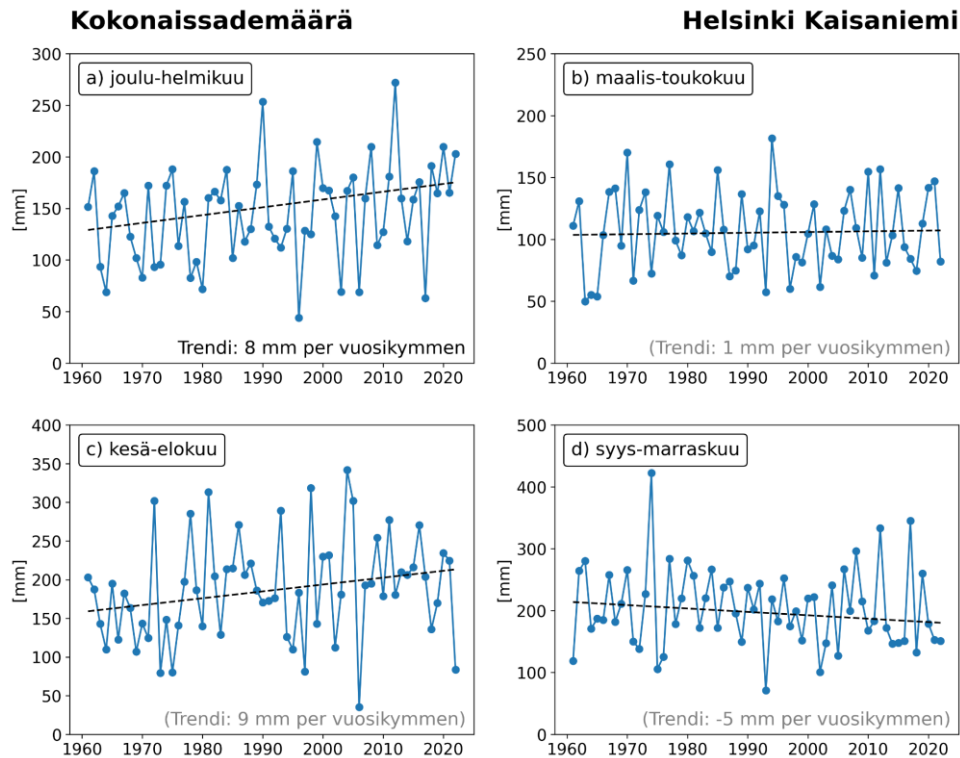
Sademäärä

Koko vuosi



Kuva 4. Vuoden keskimääräinen sademäärä pääkaupunkiseudulla neljän 30-vuotisen ilmastollisen vertailukauden aikana. Kartat esittävät kalenterivuoden keskimääräistä kokonaissademäärää jaksoilla a) 1961–1990, b) 1971–2000, c) 1981–2010 ja d) 1991–2020. HSY:n alue on merkitty karttoihin punaisilla ääri viivoilla.

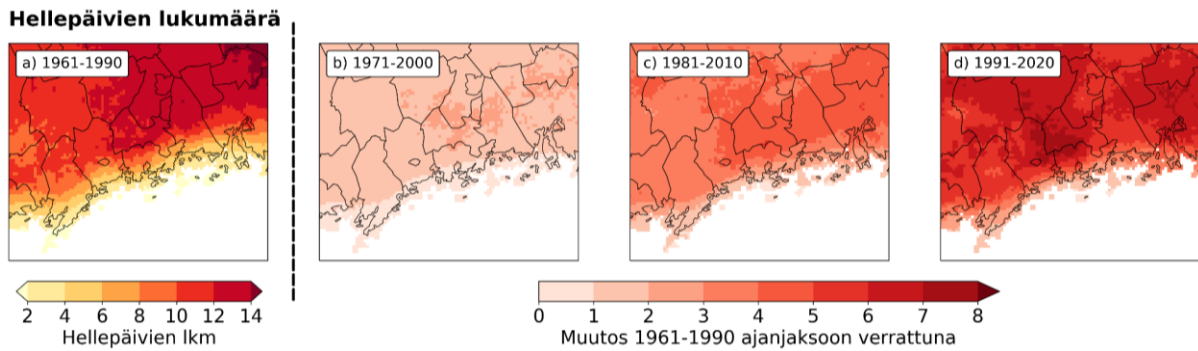
Eri vuodenaikojen sademäärissä ja niiden muutoksissa on selkeitä eroja (kuva 5). Sekä talvien että kesien sademäärät ovat trendinomaisesti nousseet Helsingissä viimeisen 60 vuoden aikana (kuva 5a ja c). Näistä kuitenkin vain talven sademäärän trendi on tilastollisesti merkitsevä 5 %:n tasolla. Myös muualla Suomessa juuri talvien sademäärät ovat lisääntyneet merkittävästi viime vuosikymmenien aikana. Sen sijaan keväiden ja syksyjen sademäärät ovat pysyneet likimain samoina, joskin syksyllä mahdollisesti jopa hieman vähentyneet (eivät kuitenkaan tilastollisesti merkitsevästi).



Kuva 5. Eri vuodenaikojen kokonaissademäärä ja sen lineaarinen trendi Helsingin Kaisaniemessä vuosina 1961–2022. Kaavio a) esittää talven (joulu-helmikuun) kokonaissademäärää, b) kevään (maaliskuu-huhtikuun), c) kesän (kesä-elokuun) ja d) syksyn (syys-marraskuun). Talven (joulu-helmikuun) sademäärään on laskettu mukaan edellisen vuoden joulukuu. Siten esimerkiksi talvi vuonna 1961 tarkoittaa joulu-helmikuuta 1960/1961. Huomaa erilainen pysty akselin asteikko eri vuodenaajoissa. Talven (a) sademäärän trendi on tilastollisesti merkitsevä, 5 %:n tasolla, muiden vuodenaikojen ei.

2.3. Helteet ja rankkasateet

Hellepäivien (päivän ylin lämpötila vähintään 25,1 °C) lukumäärässä pääkaupunkiseudulla on jo nähtävissä selvää nousua vuosien 1961–1990 ilmastolliseen vertailukauteen nähden. Siinä missä vuosina 1961–1990 hellepäiviä esiintyi keskimäärin noin 10 kertaa vuodessa (kuva 6a), viimeisimmän ilmastollisen jakson 1991–2020 aikana niitä oli noin 16. Hellettä havaitaan siis nyt lähes viikon verran enemmän kuin vuosina 1961–1990. Hellepäivien määrä on lisääntynyt erityisesti sisämaassa (kuva 6d).

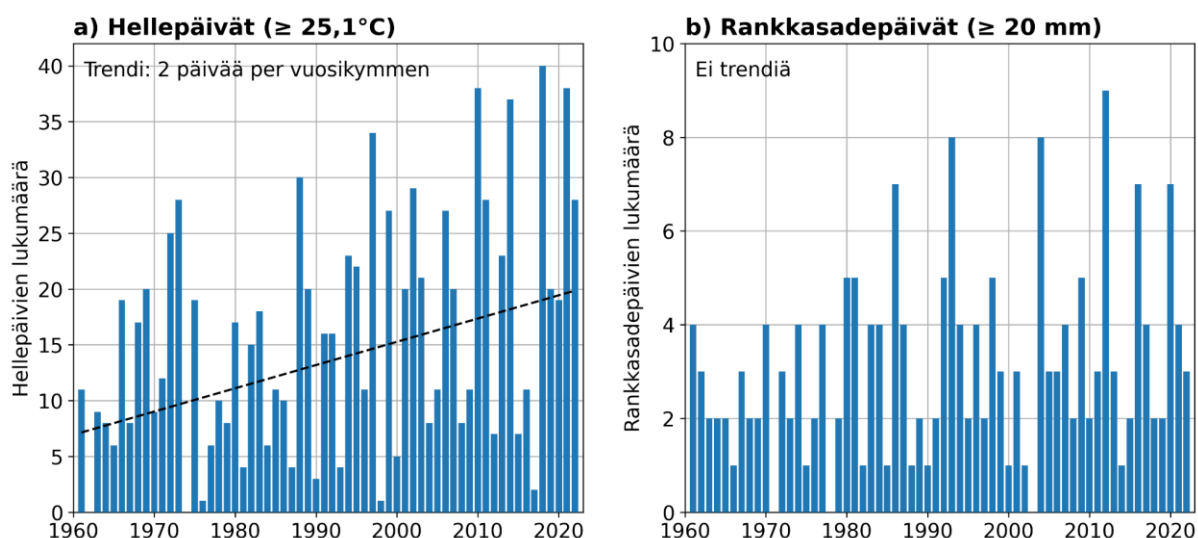


Kuva 6. Hellepäivien keskimääräinen vuotuinen lukumäärä pääkaupunkiseudulla ilmastollisella vertailujaksolla 1961–1990 (vasen kuva) ja hellepäivien lukumäärän muutos eri ilmastollisina vertailujaksoilla jaksoon 1961–1990 verrattuna (kolme oikeanpuoleista kuvaa).

Hellepäivien vuosittaisessa määrässä Helsinki-Vantaan lentoaseman säähavaintoasemalla on suurta vaihtelua (kuva 7a). Kuumimpina kesinä hellepäivien lukumäärä voi ylittää 35:n. Ennätys on 40 hellepäivää kesällä 2018, jolloin hellepäiviä olikin yhtämittaisesti 25 vuorokauden ajan (12.7.–5.8.). Toisaalta kokonaan helteettömiä kesiäkin on nähty. Sellainen sattui viimeksi vuonna 1974, eikä kolea kesä 2017 kahdella hellepäivällään jäänyt siitä kovin kauas.

Pitkällä aikavälillä hellepäivien lukumäärä on kuitenkin selkeässä nousussa, noin kaksi hellepäivää vuosikymmentä kohti (kuva 7a). Vuosien 1961–1990 aikana hellepäivien lukumäärä saavutti 30:n vain yhtenä kesänä (vuonna 1988), mutta sen jälkeen 30 hellepäivän rajapyykki on saavutettu jo viitenä kesänä (1997, 2010, 2014, 2018 ja 2021). Helsinki-Vantaan säähavaintoaseman historian neljä helteisintä kesää ovat kaikki esiintyneet 2010-luvulla tai sen jälkeen.

Helteiden lisäksi ilmastomuutoksen ennustetaan voimistavan erityisesti rankkasateita. Koska rankkasadepäiville ei ole mitään yleisesti käytössä olevaa määritelmää, rankkasadepäiväksi on tässä raportissa määritetty ne päivät, jolloin vuorokauden kokonaissademäärä on vähintään 20 millimetriä. Mukaan on laskettu päivät koko vuoden ajalta, joten pieni osa rankkasadetapauksista on voinut sataa lumena. Käytetyn määritelmän mukaisia rankkasadepäiviä esiintyy tyypillisesti noin kolme kertaa vuoden aikana (kuva 7b), ääri vuosien vaihdella nollan ja yhdeksän välillä.



Kuva 7. Hellepäivien (a) ja rankkasadepäivien (b) vuosittaiset lukumäärät Helsinki-Vantaan lentoaseman säähavaintoasemalla vuosina 1961–2022. Hellepäiviksi on laskettu päivät jolloin vuorokauden ylin lämpötila on ollut vähintään 25,1 astetta, ja rankkasadepäiviksi ne päivät jolloin vuorokauden sademäärä on vähintään 20 millimetriä. Hellepäivien trendi on tilastollisesti merkitsevä 5 %:n tasolla (2 päivää vuosikymmentä kohti) mutta rankkasadepäivissä ei ole trendiä.

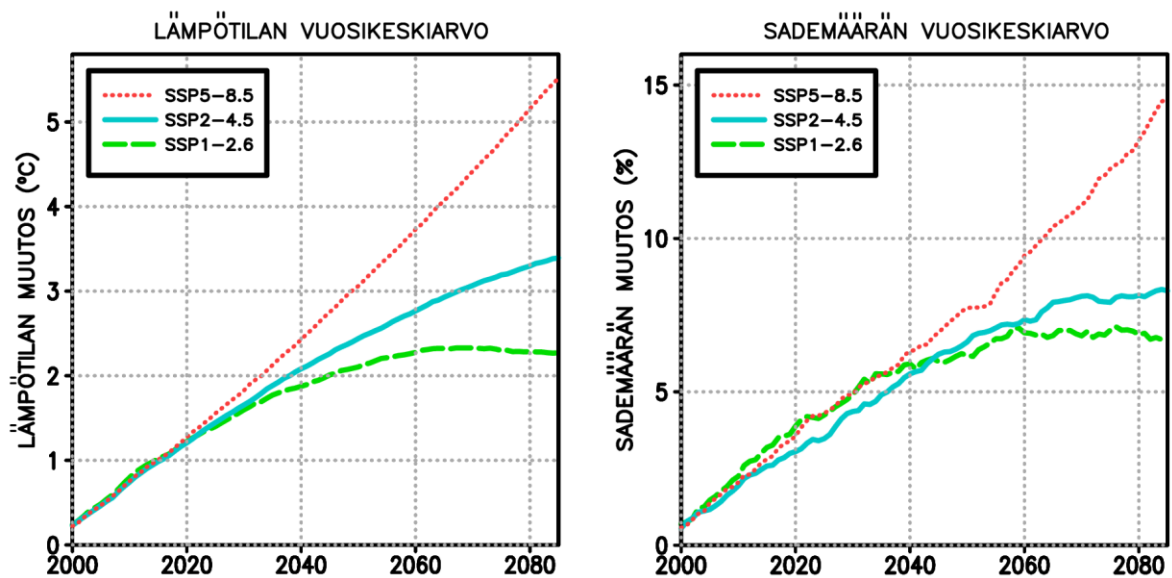
Vaikka rankkasadepäiväaineistoon sovitettu lineaarinen muutostrendi on tasainen (ei trendiä), voi graafista (kuva 7b) silti havaita lievää nousua rankkasateiden esiintyvyydessä. Vuosina 1961–1990 rankkasadepäivien keskimääräinen lukumäärä on 2,6 kertaa vuodessa, kun vastaava lukuarvo vuosina 1991–2020 on 3,6. Tulos on sopusoinnussa viimeaikaisen tutkimuksen kanssa, jonka mukaan rankkasateet ovat voimistuneet monin paikoin Suomessa viimeisen 50 vuoden aikana, mutta tilastollisesti merkitsevästi vain joillakin havaintoasemilla (Dyrddal ym. 2021).

3. Tulevaisuuden ilmastonmuutosarviot

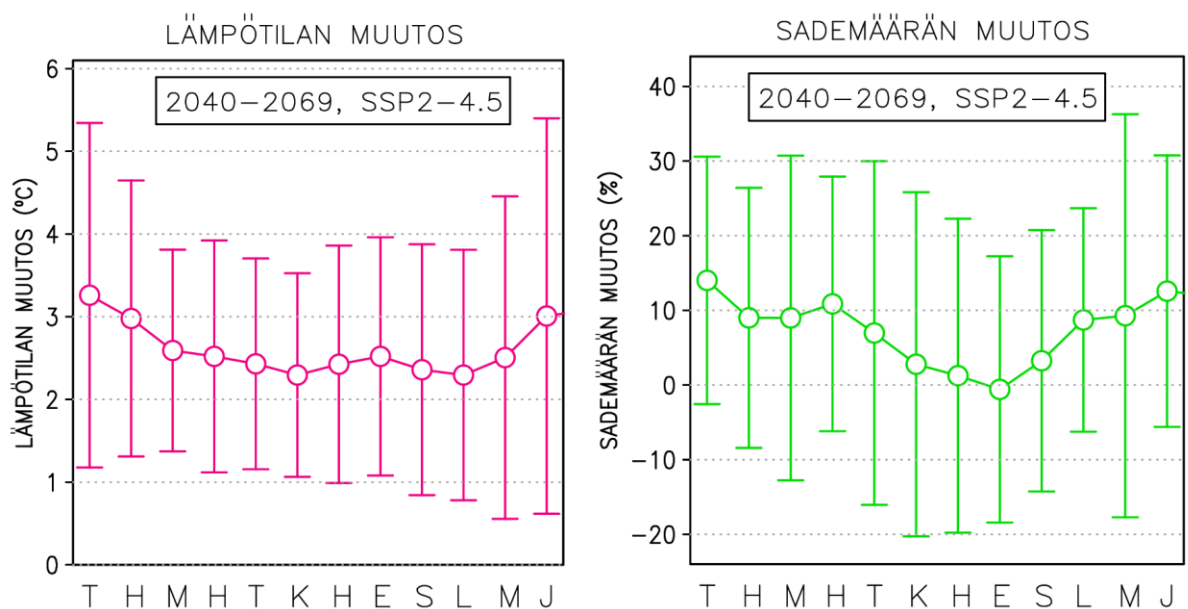
Tämä luku kertoo eri sää- ja ilmastosuureiden arvioiduista muutoksista tämän vuosisadan aikana. Pääpaino on vuosisadan puolivälissä sekä SSP2-4.5 skenaariossa, mutta luvussa esitetään myös vuosisadan lopun ja muiden päästöskenaarioiden antamia tuloksia.

3.1. Keskimääräiset lämpötilat ja sademäärät

Kuvassa 8 on esitetty, miten vuotuinen keskilämpötila ja keskimääräinen kokonaissademäärä muuttuvat pääkaupunkiseudulla tämän vuosisadan loppuun mennessä. Kyseessä on 28 mallin tulosten keskiarvo. Kuva 9 vastaavasti kertoo lämpötilojen ja sademäärien muutoksista eri vuodenaikoina ja antaa myös käsityksen eri mallien tulosten välisistä eroista. Lämpötilan ja sademäärän tulevien muutosten arviointimenetelmistä on kerrottu on kerrottu Ruosteenojan ja Jylhän (2021) tutkimuksen luvussa 2.



Kuva 8. Vuoden keskilämpötilan (asteina; vasen kuva) ja keskimääräisen sademäärän (prosentteina; oikea kuva) muutokset pääkaupunkiseudulla vuosina 2000–2085 verrattuna jakson 1981–2010 keskimääräisiin arvoihin kolmen vaihtoehdoisen kasvihuonekaasuskenaarion perusteella.



Kuva 9. SSP2-4.5-skenaariota vastaava lämpötilan ($^{\circ}\text{C}$; vasen kuva) ja sademäärän (%) muutos pääkaupunkiseudulla vuoden eri kuukausina (T=tammikuu, H=helmikuu, jne.) siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2040–2069. Käyrä esittää 28 maailmanlaajuisen ilmastomuutosmallin tulosten keskiarvoa ja pystyjanat mallituloksista laskettua 90 %:n todennäköisyysväliä.

Sekä vuoden keskilämpötila että vuotuinen kokonaissademäärä nousevat pääkaupunkiseudulla tulevaisuudessa (kuva 8), joskin jonkin verran vähemmän kuin Suomen alueella keskimäärin (Ruosteenoja ja Jylhä, 2021, kuva 2). Ennen vuotta 2040 eri kasvihuonekaasuskenaarioita vastaavat muutokset etenevät suurin piirtein yhtä nopeasti.

Vuosisadan jälkipuolella SSP5-8.5-skenaarion tuottama ilmastonmuutos jatkuu jopa hiukan kiihtyen, SSP2-4.5-skenaarion mukainen hidastuu ja SSP1-2.6-skenaariota vastaava muutos pysähtyy.

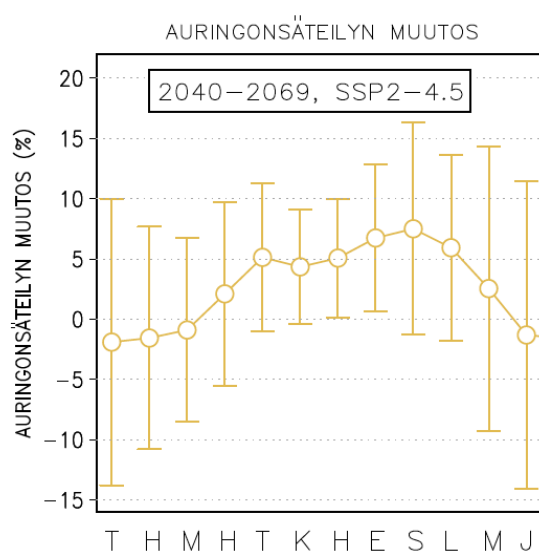
Jos tarkastellaan noin kahden ihmiskukupolven väliä vastaavaa muutosta 2020-luvulta 2080-luvulle, pääkaupunkiseutu lämpenisi alimman kasvihuonekaasuskenaarion perusteella noin yhden asteen, keskiskenaarion mukaan hiukan yli kaksi astetta ja suurten päästöjen skenaarion mukaan yli neljä astetta. Tästä voidaan päätellä kaksi asiaa. Ensinnäkään ilmastonmuutosta ei voida millään kokonaan pysäyttää vielä lähivuosikymmeninä, vaan jonkinasteiseen muutokseen on oltava valmiita varautumaan. Toisaalta lastenlastemme kokema vuosisadan loppupuolen ilmasto on hyvin erilainen riippuen siitä, millaista ilmastopolitiikkaa nyt ja tulevaisuudessa noudatetaan.

Kuvasta 9 nähdään, että muutokset eivät jakaudu tasaisesti eri vuodenaajoille. Lämpötilat kohoavat talvella jonkun verran enemmän kuin kesällä, joskaan lämpenemisen erot eri vuodenaikojen välillä eivät ole ihan yhtä isoja kuin edellistä mallisukupolvea tarkasteltaessa (Ruosteenoja ja Jylhä, 2021, kuva 14). Uusimmat mallit lämmittävät Suomen kesiä enemmän kuin vanhat, kun taas talvien lämpenemisessä ei ole mallisukupolvien välillä suurtakaan eroa. Mallitulosten keskiarvon perusteella eri kuukausien keskilämpötilat nousisivat reilun puolen vuosisadan aikana noin 2,5–3 asteella. Tämänsuuruinen lämpeneminen kutistaisi pääkaupunkiseudun termisen talven, jolloin lämpötila keskimäärin on pakkasen puolella, ainoastaan kahden kuukauden mittaiseksi. Toinen kuvan 9 vasemmanpuoleisen kaavion keskeinen viesti on, että eri mallien tulosten välillä on selviä eroja. Epävarmuutta kuvaavan vaihteluvälin alaraja on noin yksi ja yläraja kuukaudesta riippuen vajaasta neljästä runsaaseen viiteen asteeseen. Todennäköisemmin muutos kuitenkin asettuu lähemmäksi mallitulosten keskiarvoa kuin kumpaakaan ääripäätä.

Samalla kun keskilämpötilat nousevat, talvisin myös lämpötilojen ajalliset vaihtelut päivästä toiseen vaimentuvat. Tämä tarkoittaa, että kovimmat pakkaset lauhtuvat enemmän kuin mitä keskilämpötilat nousevat. Kesällä sen sijaan lämpötilojen vaihtelevuus pysyy suunnilleen nykyisellä tasolla, eli kovat helteet muuttuvat kuumemmiksi suunnilleen samassa suhteessa kuin mitä keskilämpötila kohoaa.

Sademäärät näyttäisivät mallitulosten keskiarvon perusteella lisääntyvän loka-huhtikuun välisenä aikana noin 10 % mutta pysyvän kesällä lähes entisellään (kuva 9b). Mallien väliset erot ovat suhteellisesti ottaen vieläkin suurempia kuin lämpötilaennusteissa, eikä muutoksen suuntaa voida tietää täysin varmasti minään vuodenaikana. Talvipuolella vuotta sademäärän lisääntyminen on toki paljon todennäköisempää kuin vähentyminen. Kesällä epävarmuushaarukka taas ulottuu noin 20 prosentin vähentymisestä yhtä suureen lisääntymiseen. Lisäksi on olemassa viitteitä, että nimenomaan kesällä sadeolot kävisivät ilmaston lämmitessä yhä vaihtelevimmiksi, eli sekä hyvin runsaita sateita että pitkään jatkuvaa kuivuutta koettaisiin nykyistä useammin. Lämpeneminen myös lisää voimakkaasti veden haihtumista, eli luonto kärsisi kuivuudesta entistä pahemmin siinäkin tapauksessa, että sademäärät pysyvät entisellään tai jopa hiukan kasvaisivat.

Auringonsäteily näyttäisi tulevaisuudessa lisääntyvän hieman varsinkin kesällä ja syksyllä (kuva 10), kun taas talvella aurinkoa mahdollisesti näkyisi aavistuksen verran nykyistä vähemmän. Auringonsäteilyn muutokset tietysti riippuvat pilvisyyden muutoksista, mutta säteilyä lisää myös ilman kirkastuminen pienhiukkassaasteen vähentyessä. Talvien synkentymiseen taas vaikuttaa osaltaan lumipeitteen vähentyminen.



Kuva 10. SSP2-4.5-skenaariota vastaava maan pinnalle saatavan auringonsäteilyn määrän muutos (%) pääkaupunkiseudulla vuoden eri kuukausina (T=tammikuu, H=helmikuu, jne.) siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2040–2069. Käyrä esittää 28 maailmanlaajuisen ilmastomuutosmallin tulosten keskiarvoa ja pystyjanat mallituloksista laskettua 90 %:n todennäköisyysväliä.

Ilman suhteellinen kosteus näyttäisi keskimäärin putoavan kesällä parilla prosenttiyksiköllä. Lämpötilan vuorokausivaihtelut pysyisivät kesällä suunnilleen entisellään mutta pienentyisivät talvella 15–20 % (näistä ei kuvia).

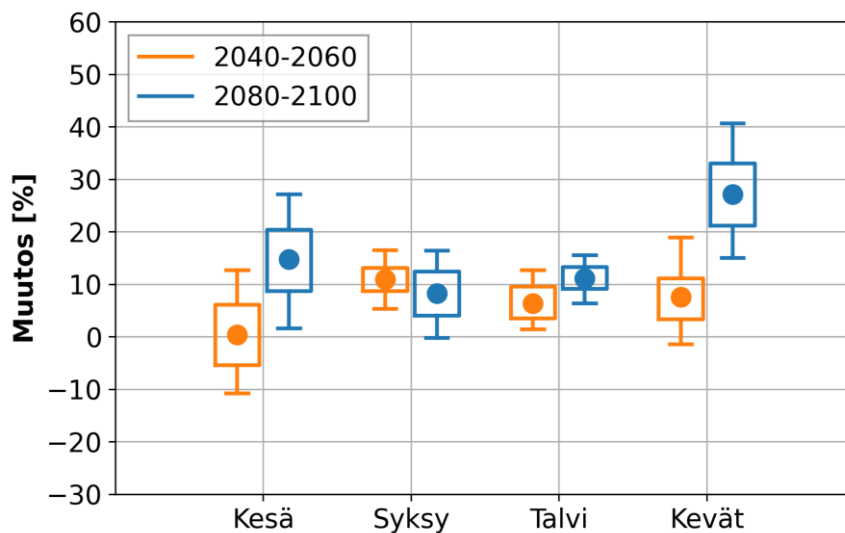
3.2. Rankkasateet

Sateiden merkittävimmät vaikutukset liittynevät rankkasateisiin ja niiden aiheuttamiin hulevesitulviin. Niitä esiintyy Suomessa vuosittain, mutta koska Suomi on harvaan asuttu maa, ja rankkasateet ovat tyypillisesti pienialaisia, vahinkoa aiheuttavia rankkasadetulia esiintyy suhteellisen harvoin suurissa kaupungeissa, kuten Helsingissä. Yksi viimeaikainen merkittävä rankkasadetulva sattui 23.8.2019, kun Helsingissä satoi varhain aamulla muutaman tunnin aikana yli 50 mm vettä. Tulvavesi aiheutti mittavaa vahinkoa mm. metrotunnelissa. Vaikka vastaavia sademääriä esiintyy Suomessa vuosittain, samaan paikkaan näin rankka sadekuuro osuu keskimäärin vain kerran tai pari vuosisadassa.

Päivän suurimman tunnittaisen sademäärän muutosta RCP-4.5-ilmastonmuutosskenaarion mukaisena tutkittiin HCLIM-ilmastonmuutosmallilla (Lind ym. 2022), jossa alueellinen laskentatarkkuus oli 3 x 3 km. Tarkka erottelukyky takaa sen, että pienialaiset konvektiiviset

rankkasateet saadaan simuloitua realistisesti. Toisaalta on hyvä muistaa, että kyseessä on vain yksittäinen malli, joten tuloksissa on väistämättä epävarmuuksia.

Kuvan 11 mukaan vuorokauden voimakkaimmat tunnitaiset sademäärät kasvaisivat vuosisadan puoliväliin siirryttäessä syksyisin, talvisin ja keväisin. Kesäisin tuntisademäärät pysyttelisivät keskimäärin samalla tasolla vuosisadan puoliväliin siirryttäessä, vaikka hajonta Uudenmaan alueella on suurta. Vuosisadan loppuun mennessä voimakkaimmat sademäärät taas kasvaisivat melko voimakkaasti kesällä ja erityisesti keväällä. On kuitenkin tärkeää muistaa, että vaikka kasvu on voimakkaampaa keväällä kuin kesällä, kevään tuntisademäärät ovat tyypillisesti pienempiä kuin vastaavat kesän sademäärät.

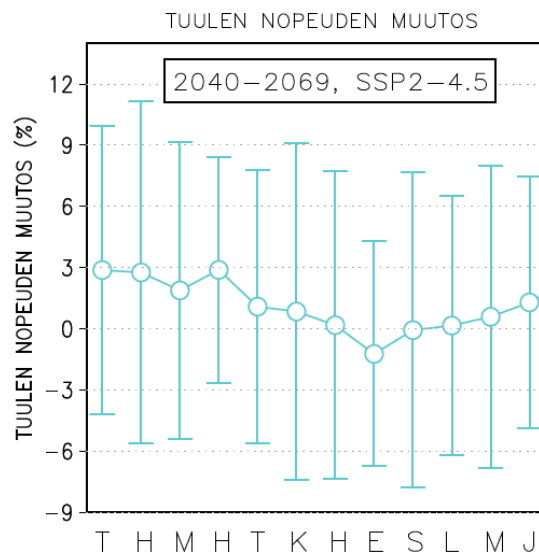


Kuva 11. Päivän suurimman yhden tunnin sademäärän keskimääräinen muutos siirryttäessä ajanjaksosta 1985–2005 jaksoon 2040–2060 (oranssi) ja 2080–2100 (sininen). Kuvassa pisteet edustavat Uudenmaan alueen keskiarvoa. Arvojen hajontaa Uudenmaan alueella kuvataan laatikoiden ja pystyviivojen avulla siten, että laatikon ja ylemmän pystyviivan yläosa kuvastaa arvojen 75. ja 95. prosenttipisteitä ja alaosa 25. ja 5. prosenttipisteitä. Tulos perustuu HCLIM-ilmastomalliin ja RCP4.5-kasvihuonekaasuskenaarioon.

Yleisesti ottaen lyhytkestoiset ja rankimmat sateet voimistuisivat Suomessa eniten. Sekä alueellisten EURO-CORDEX-ilmastonmuutosmallien että hienohilaisen HCLIM-mallin mukaan tuntisateiden toistuvuustasot kasvaisivat vuorokausisateiden toistuvuustasoja enemmän (Toivonen ym. 2021). Siinä missä keskimäärin kerran kymmenessä vuodessa esiintyvän vuorokauden sademäärän ennustetaan olevan RCP8.5-skenaariossa mukaan vuosisadan lopussa 25 % suurempi kuin vertailujakson 1986–2005 aikana, kerran kymmenessä vuodessa toistuvalla tuntisademäärällä kasvua ennustetaan tulevan noin 40 %. Todennäköisemmässä RCP4.5-skenaariossa muutokset olisivat toki pienempiä, mutta senkin mukaan tuntisateet voimistuisivat suhteessa vuorokausisateita enemmän.

3.3. Tuulisuus

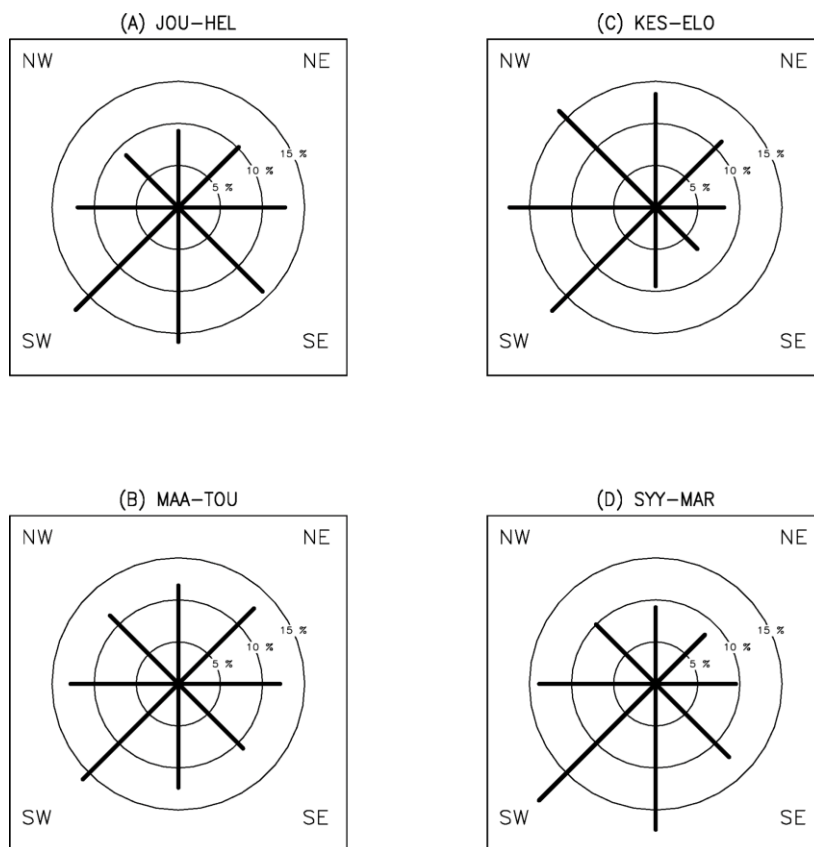
Keskimääräisen tuulen nopeuden muutoksia vuoden eri kuukausina on esitetty kuvassa 12. Kun tarkastellaan mallitulosten keskiarvoa, muutokset ovat erittäin vähäisiä. Talvella ja keväällä tuulet mahdollisesti hieman voimistuisivat, pari-kolme prosenttia. Rannikkoalueilla tätä voimistumista selittää pitkälti meren jääpeitteen hupeneminen. Jään peittämän meren ylle muodostuu usein kylmä ilmakerros, joka vähentää ilman sekoittumista pystysuunnassa ja siten tuulen liikemäärän siirtymistä ylempää ilmakehästä pinnanläheiseen ilmakerrokseen. Milloin jäätä ei ole, ilmakerrosten sekoittuminen on tyypillisesti voimakkaampaa, mikä on omiaan voimistamaan tuulta. Eri mallien tulosten väliset erot ovat kuitenkin suuria, niin että jotkut mallit heikentävät ja toiset vahvistavat tuulia enimmillään lähes kymmenellä prosentilla.



Kuva 12. Tuulen nopeuden muutos (%) pääkaupunkiseudulla vuoden eri kuukausina (T=tammikuu, H=helmikuu, jne.) siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2040–2069. Käyrä esittää 28 maailmanlaajuisen ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvoa ja pystyjanat mallituloksista laskettua 90 %:n todennäköisyysväliä.

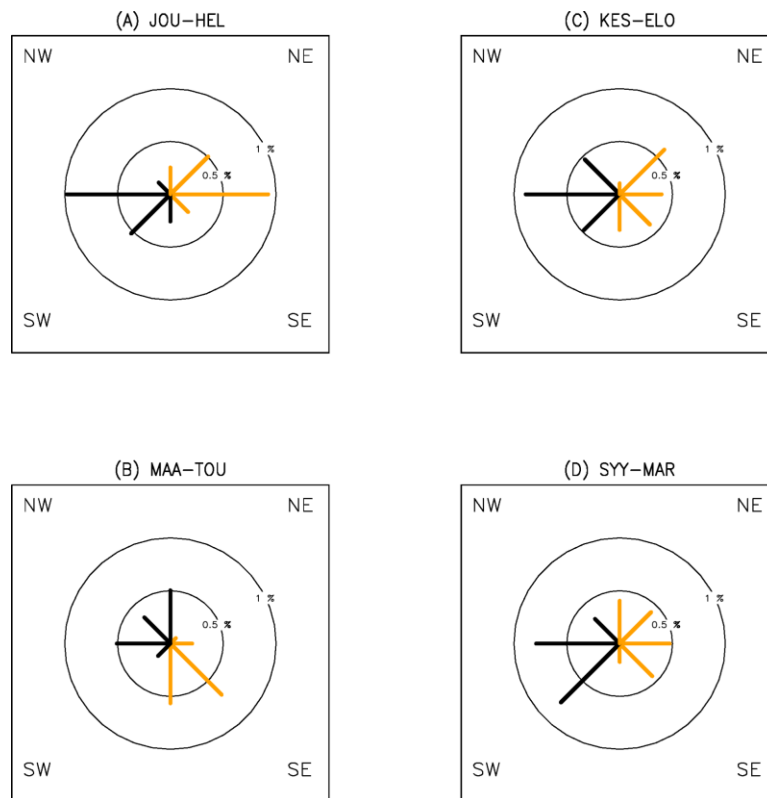
Paitsi tuulet keskimäärin, myös kovimpien tuulien nopeudet näyttävät muuttuvan ilmaston lämmetessä vain vähän (Ruosteenoja ym. 2019, kuvat 6 ja 14). Myrskyjä siis koetaan tulevaisuudessakin, ja todennäköisesti ne ovat suunnilleen yhtä ankaria kuin tähänkin asti. Puistojen ja kaupunkimetsien puita saattaa kuitenkin kaatua talven myrskyissä enemmän, kun maaperän routa ei enää pidä niiden juuria kiinni maassa.

Tuulen voimakkuuden lisäksi kiinnostava on myös sen suunta. Kuvassa 13 on esitetty eri suunnista puhaltavien simuloitujen tuulien osuudet jakson 1971–2000 aikana. Huomattakoon, että jakauma perustuu ilmastonmuutosmallien tuloksiin eikä näin ollen täysin vastaa havaintoihin perustuvaa jakaumaa. Kuva kertoo, että mallitulosten perusteella kesällä esiintyy eniten länsituulia (osuus n. 17 %), kun muina vuodenaikoina puhaltelee yleisimmin lounaasta.



Kuva 13. Eri ilmansuunnista puhaltavien tuulien prosenttiosuudet pääkaupunkiseudulla vuosina 1971–2000 (a) talvella, (b) keväällä, (c) kesällä ja (d) syksyllä. Kuva perustuu ilmastomallien tuloksiin. Kunkin kuvion keskipisteeseen vasemmalta osoittavat nuolet kuvaavat länsituulia; ylhäältä osoittavat pohjois-, oikealta osoittavat itä- ja alhaalta osoittavat etelätuulia; vinosuuntaiset nuolet väli-ilmansuunnista puhaltavia tuulia. Esimerkki: c-kuvaosion nuoli vasemmalta ylhäältä kertoo, että kesällä luoteistuulien osuus on n. 16 % kaikista tuulista.

Mallien ennustamia erisuuntaisten tuulien yleisyyden muutoksia on esitetty kuvassa 14. Mallitulosten mukaan lounais-, länsi- ja luoteistuulet yleistyvät kaikkina vuodenaikoina, keväällä myös pohjois- ja talvella etelätuulet. Vastaavasti idästä puhaltaisi tulevaisuudessa nykyistä harvemmin. Eniten vähenisivät syksyllä ja talvella itätuulet, keväällä kaakkois- ja kesällä koillistuulet. Muutossignaali ei kuitenkaan ole järin vahva, vaan muutokset yksittäisten tuulensuuntien osuuksissa ovat enimmilläänkin vain yhden prosenttiyksikön suuruusluokkaa. Eri mallien tuloksissakin on eroja. Myös on syytä pitää mielessä, että tuuliolosuhteet vaihtelevat suuresti vuodesta toiseen vallitsevasta säätyypistä riippuen, eli tulevaisuudessakin tuulet saattavat joinakin vuosina puhaltaa tavallista useammin myös idän puolelta.



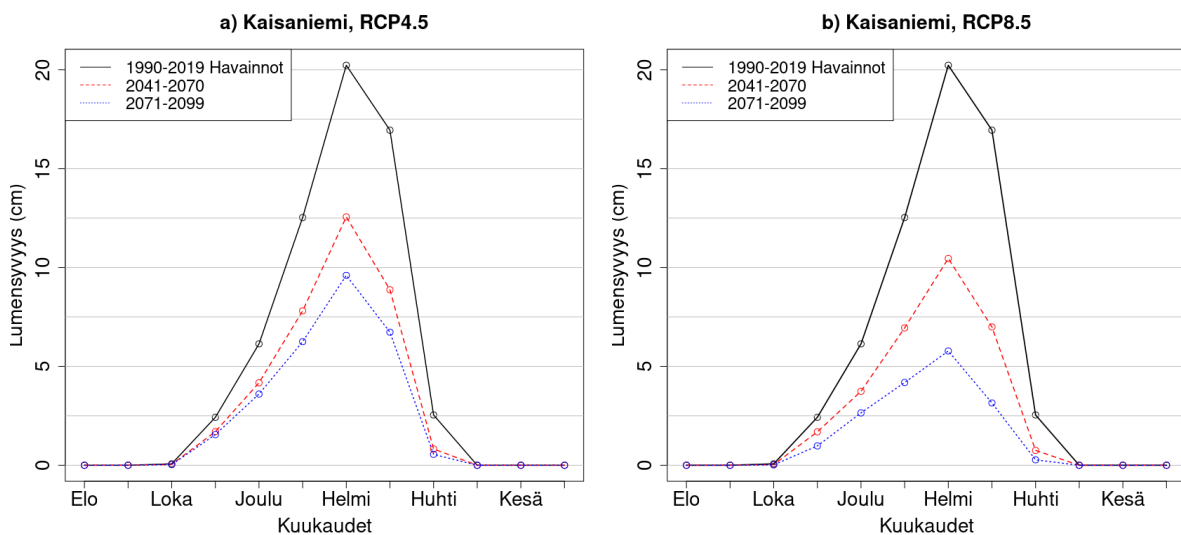
Kuva 14. Mallien simuloimat eri ilmansuunnista puhaltavien tuulien prosenttiosuuksien muutokset pääkaupunkiseudulla (jaksosta 1971–2000 jaksoon 2040–2069 RCP4.5-skenaarion perusteella): (a) talvi, (b) kevät, (c) kesä ja (d) syksy. Lisääntyvä osuus on merkitty mustalla ja vähenevä osuus keltaisella nuolella. Ilmansuuntien esittämistapa käy ilmi kuvan 13 selitystekstistä. Esimerkki: kesällä (kuvaosio c) koillistuulien (nuoli oikealta ylhäältä) osuus vähenisi 0,6 prosenttiyksiköllä ja luoteistuulien (nuoli vasemmalta ylhäältä) osuus kasvaisi 0,5 prosenttiyksiköllä.

On syytä huomata, että kuvassa 12 esitetyt tuulien nopeuksien muutokset ja kuvan 14 suuntajakauman muutokset eivät ole täysin vertailukelpoisia. Tämä johtuu siitä, että keskimääräisen nopeuden muutokset perustuvat uusimpaan mallisukupolveen, mutta tuulen suuntia ei ole ainakaan vielä ehditty analysoida näistä malleista, vaan oli tyytyminen edellisen mallisukupolven tuloksiin (Ruosteenoja ym., 2019). Lisäksi kuvassa 14 on käytetty vertailukohtana jaksoa 1971–2000 eikä 1981–2010 sekä RCP4.5-kasvihuonekaasuskenaariota, joka kyllä on melko lähellä uudempaa SSP2-4.5-skenaariota.

3.4. Lumensyvyys

Lumensyvyyden muutoksia tarkasteltiin alueellisten EURO-CORDEX-ilmastomallisimulaatioiden pohjalta kahdelle tulevaisuuden jaksolle, 2041–2070 ja 2071–2099, ja kahdelle eri kasvihuonekaasuskenaariolle. Tarkasteluissa oli mukana kymmenen eri ilmastomallikokoonpanoa ja tulokset on laskettu näiden keskiarvona. Alueellisten ilmastomallien alueellinen erottelukyky on n. 12,5 km.

Talven suurin lumensyvyys saavutetaan Helsingissä tyypillisesti helmikuussa (kuva 15). Jaksolla 1990–2019 helmikuun keskimääräinen lumensyvyys oli havaintojen mukaan n. 20 cm. Keskitasoista kasvihuonekaasupitoisuuksien kasvua kuvaavan RCP4.5-skenaarion mukaan lumensyvyys pienenee tulevaisuudessa jokaisena kuukautena. Jaksolla 2041–2070 helmikuun keskimääräinen lumensyvyys olisi Kaisaniemessä n. 12 cm ja jaksolla 2071–2099 alle 10 cm. RCP8.5-skenaarion tulokset ovat samankaltaisia, mutta lumensyvyyden pieneneminen on kauttaaltaan voimakkaampaa. Vuosisadan loppua kuvaavalla jaksolla 2071–2099 helmikuun keskimääräinen lumensyvyys olisi tämän skenaarion mukaan vain n. 6 cm, eli noin kolmasosa viime vuosikymmenien lumimäärästä.



Kuva 15. Kuukausien keskimääräiset lumensyvyydet Helsingin Kaisaniemen havaintoasemalla havaintojen mukaan jaksolla 1990–2019 sekä kahdella tulevaisuuden jaksolla 2041–2070 ja 2071–2099: a) RCP4.5-kasvihuonekaasuskenaario, b) RCP8.5-kasvihuonekaasuskenaario.

Lumensyvyyden suhteellinen pieneneminen on ilmastomallitulosten mukaan voimakkainta keväisin huhtikuussa. RCP4.5-skenaarion mukaan huhtikuun keskimääräinen lumensyvyys olisi Helsingissä n. 70 % pienempi jaksolla 2041–2070 kuin havaintojen mukaan jaksolla 1990–2019. Toki huhtikuussa on tyypillisesti muutenkin jo vähän lunta, eli tämä ero ei näyttäytyisi kovin merkittävänä.

Vaikka kuukausien keskimääräinen lumensyvyys pienenee tarkastelluilla tulevaisuuden jaksoilla selkeästi, on hyvä kuitenkin muistaa, että vuosien välistä vaihtelua lumiolosuhteissa on odotettavissa tulevaisuudenkin talvina. Lumisuuden voimakas vuosien välinen vaihtelu on tyypillistä pääkaupunkiseudun talville. Runsaslumiset talvet ovat siis tulevinakin vuosina pääkaupunkiseudulla edelleen mahdollisia, mutta vähitellen ne kuitenkin harvinaistuvat. Suomenlahden pysyessä auki pidempään sakeat rannikkolumisateet ovat mahdollisia myös tulevaisuuden lämmenneessä ilmastossa, mikäli vallitseva ilmamassa on riittävän kylmää. Vaikka tutkimusten mukaan rannikkolumisateiden ei ole havaittu lisääntyvän, niiden esiintymisen on havaittu siirtyvän alkutalvesta entistä useammin sydäntalvelle (Olsson ym. 2023).

3.5. Helteet ja kaupungin lämpösaarekeilmiö

3.5.1. Ennustetut muutokset helteiden voimakkuudessa

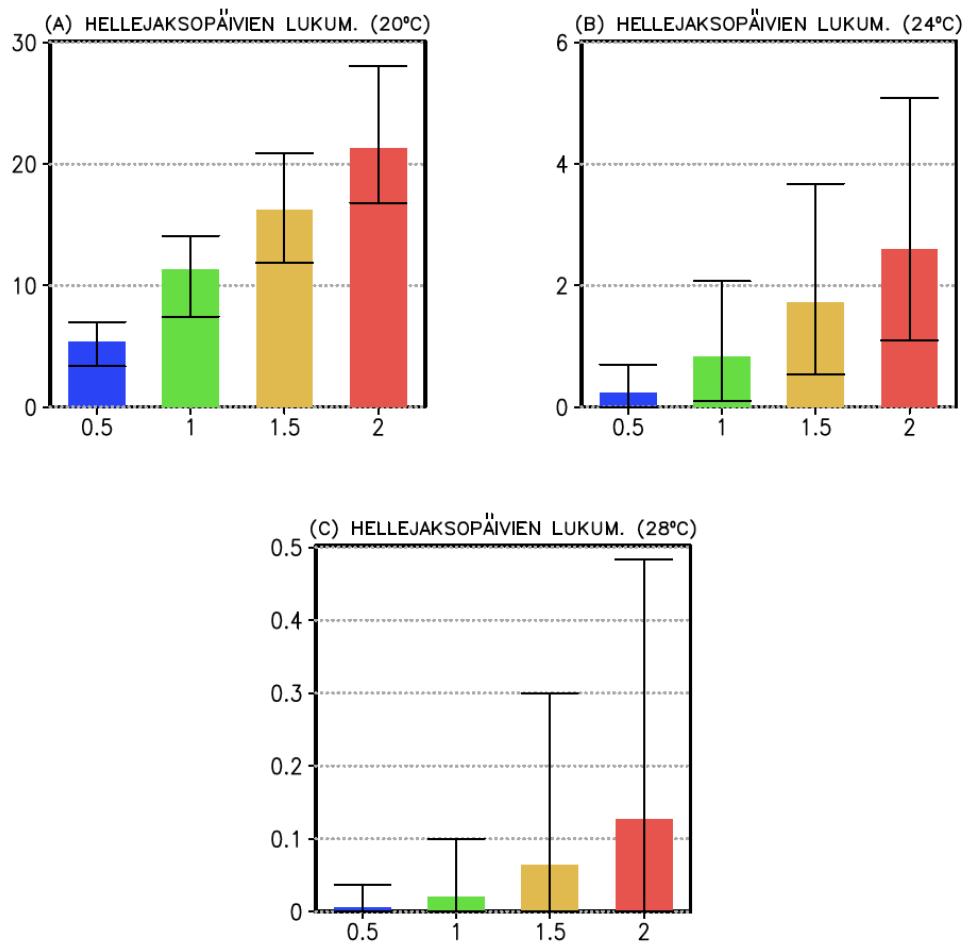
Helteitten esiintymistä pääkaupunkiseudulla ei tutkittu valittuina 30-vuotisajanjaksoina kuten muita ilmastosuureita tässä raportissa vaan sen sijaan tietyillä kiinteillä maapallon lämpenemisen tasoilla (Ruosteenoja ja Jylhä 2023). Näistä alhaisin, maapallon keskilämpötilan nousu 0,5 asteella teollistumista edeltävään aikaan nähden, edustaa 1980-luvun ilmastoa. Vastaavasti 1,0 °C:n lämpeneminen vastaa 2010-lukua ja 1,5 °C:n lämpeneminen luultavimmin 2030-luvun alkua. Korkein tässä tarkasteltava lämpenemisen taso on 2,0 °C esiteolliseen aikaan verrattuna. Näin lämpimään ilmastoon päädytään SSP2-4.5-skenaarion toteutuessa vuosisadan puolivälin tienoilla (IPCC, 2021, taulukko SPM.1).

Hellepäiviksi luokiteltiin sellaiset päivät, joina vuorokauden keskilämpötila on korkeampi kuin 20 °C. Sen ohella on tarkasteltu myös kahta korkeampaa rajalämpötilaa, 24 °C (hyvin kuuma päivä) ja 28 °C (äärimmäisen kuuma päivä). Useimpina viime vuosien kesinä 24 °C:n raja on ylittynyt pääkaupunkiseudulla muutamana päivänä, mutta 28 °C:n vuorokausikeskilämpötilan ylityksiä alueella ole vielä koettu. Tuokin raja kyllä ylittyi Kuopiossa yhtenä päivänä vuoden 2010 heinäkuussa.

Erityisesti Helsingissä meren läheisyys nostaa yölämpötiloja pitkäkestoisten helleaaltojen aikana. Korkeita yölämpötiloja havaitaan pääosin heinä- ja elokuussa, kun Suomenlahden pintavesi on lämmennyt riittävän korkealle tasolle. Jos yön alin lämpötila jää 20,0 asteeseen tai sen yli, puhutaan trooppisesta yöstä. Meren lämmittävästä vaikutuksesta johtuen trooppiset yöt ovat selvästi yleisempiä Uudenmaan rannikolla kuin sisämaan puolella. Käytettäessä vuorokauden keskilämpötilaa helleaaltojen arviointiin myös korkeat yölämpötilat tulevat huomioiduksi.

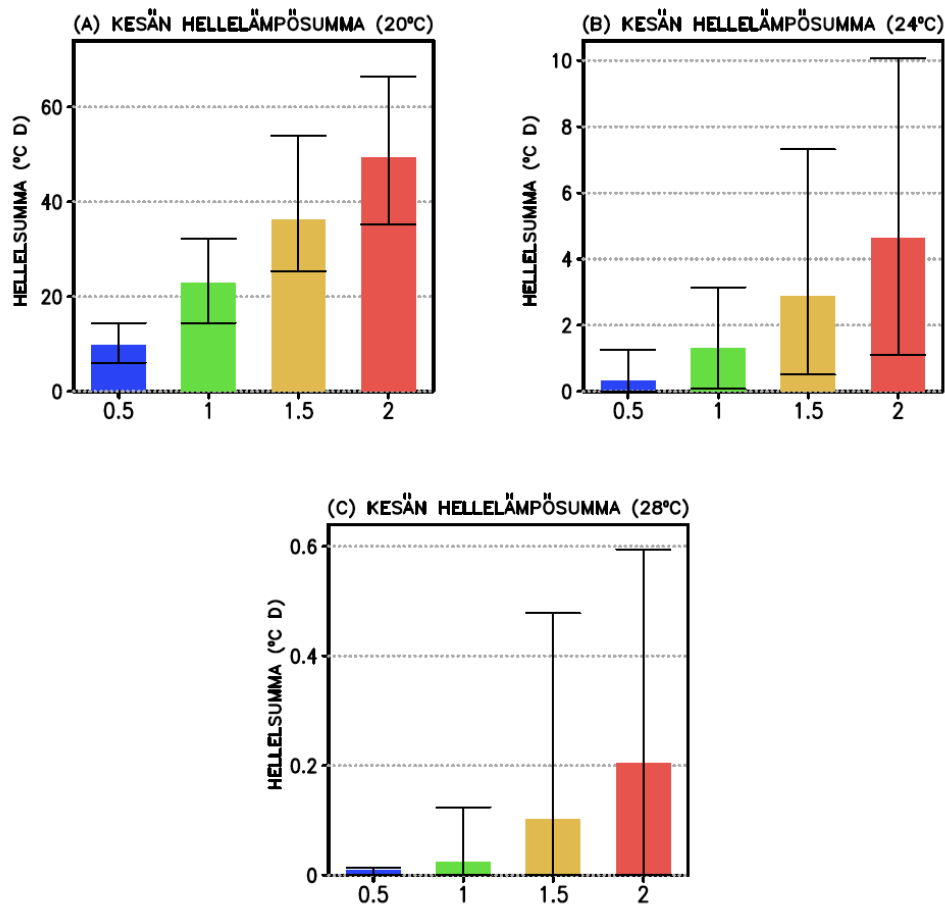
Helteen vaikutukset ihmisten terveyteen ym. tulevat kunnolla näkyviin vasta, jos kuumuutta kestää useamman päivän. Sen tähden hellejakson vähimmäispituudeksi on määritelty vähintään kolme sellaista peräkkäistä päivää, joina kynnyslämpötila ylittyy. Tämän jälkeen hellejakso jatkuu, kunnes kynnyslämpötila jälleen alitetaan vähintään kahtena peräkkäisenä päivänä. Hellejaksopäiviksi katsotaan kaikki nämä päivät, niin jaksoon kuuluvat kynnyslämpötilan ylityspäivät kuin enintään yhden päivän mittaiset katkoksetkin.

Hellejaksopäivien määrän muutoksia ilmaston lämmitessä on tarkasteltu kuvassa 16. Käytettäessä 20 asteen kynnyslämpötilaa 0,5 °C:n lämpenemistasolla hellejaksopäiviä oli mallitulosten perusteella keskimäärin noin 5 kesässä. 1,0 °C:n lämpenemisen tasolla niiden määrä noin kaksin-, 1,5 °C:n tasolla kolmin- ja 2,0 °C:n tasolla nelinkertaistuu. Korkeampia rajalämpötiloja käytettäessä hellejaksopäivien lukumäärät ovat luonnollisesti kauttaaltaan paljon pienempiä mutta niiden lisääntyminen suhteellisesti ottaen voimakkaampaa. Äärimmäisen ankarat hellejaksot, joina keskilämpötila ylittää 28 °C vähintään kolmena päivänä peränjälkeen, ovat mallitulostenkin perusteella olleet lähimenneisyyden ilmastossa hyvin epätodennäköisiä, mutta 1,5–2,0 asteen lämpenemisen tasolla niitäkin jo alkaisi joskus esiintyä (kuva 16c).



Kuva 16. Hellejaksopäivien keskimääräisen vuotuisen lukumäärän kehittyminen pääkaupunkiseudulla ilmaston lämmitessä, kun käytetään helteen alarajana (a) 20, (b) 24 ja (c) 28 asteen vuorokausikeskilämpötilaa. Kussakin kaaviossa vasemmanpuoleinen pylväs kuvaa sellaista ilmastoa, jossa maapallon keskilämpötila on noussut 0,5 °C teollistumista edeltävään aikaan nähden; kolme seuraavaa pylvästä 1,0, 1,5 ja 2,0 °C lämmennyttä maailmaa. Väritetyt pylväät edustavat mallitulosten keskiarvoa, pystyjanat mallituloksiin perustuvaa epävarmuushaarukkaa.

Hellejaksopäivien määrän ohella on hyvä tietää, kuinka kuumia hellejaksot ovat. Sitä varten laskettiin kullekin hellejaksolle hellelämpösomma eli kynnyslämpötilan ylitysten summa jakson ensimmäisestä viimeiseen päivään. Kuvassa 17 on näytetty, kuinka suuri kesän kaikkien hellejaksojen yhteenlaskettu hellelämpösomma keskimäärin on lämpiämisen eri tasoilla. Siirryttäessä 0,5 asteen lämpenemisen tasosta 2,0 asteen tasolle yhteenlaskettu hellelämpösomma keskimäärin viisin- (20 °C:n kynnyslämpötila), 14- (24 °C) tai 24-kertaistuu (28 °C). Hellelämpösomman kasvu on siis suhteellisessa mielessä voimakkaampaa kuin hellejaksopäivien lukumäärän. Tämä johtuu siitä, että hellelämpösommaan vaikuttaa sekä hellejaksopäivien määrä että näiden päivien kuumuus (kynnyslämpötilan ylittymisen suuruus), jotka molemmat suurentuvat ilmaston lämmitessä.

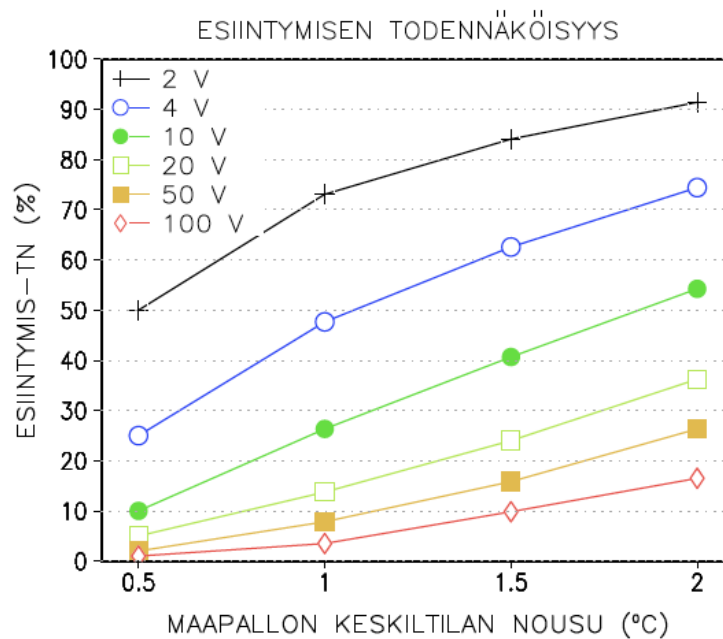


Kuva 17. Kesän keskimääräisen yhteenlasketun hellelämpösumman kehittyminen pääkaupunkiseudulla ilmaston lämmitessä, kun käytetään rajana (a) 20, (b) 24 ja (c) 28 asteen vuorokausikeskilämpötilaa. Pylväät esittävät hellelämpösummia maapallon keskilämpötilan kohoamisen funktiona. Kussakin kaaviossa vasemmanpuoleinen pylväs kuvaa sellaista ilmastoa, jossa maapallon keskilämpötila on noussut 0,5 °C teollistumista edeltävään aikaan nähden; kolme seuraavaa pylvästä 1,0, 1,5 ja 2,0 °C lämmennyttä maailmaa. Väritetyt pylväät edustavat mallitulosten keskiarvoa, pystyjanat mallituloksiin perustuvaa epävarmuushaarukkaa.

Huomattakoon, että sekä kuvassa 16 että 17 eri mallien tulokset poikkeavat toisistaan (kuvien pystyjanat). Erot korostuvat sitä enemmän mitä korkeampaa rajalämpötilaa tarkastellaan. Näin käy mm. siksi, että oikein kuumia päiviä esiintyy lukumäärällisesti vähän, jolloin satunnaiset vaihtelut vaikuttavat niihin paljon. Kaikissa tapauksissa mallitulosten keskiarvoa voidaan kuitenkin pitää todennäköisempänä vaihtoehtona kuin jakauman ääripäitä.

Keskimääräisen helleilmaston muutosten ohella tutkittiin myös kaikista kovimpien hellejaksojen esiintymisiä. Kuvassa 18 on esitetty, kuinka usein lämpenemisen eri tasoilla esiintyy sellaisia hellejaksoja, joita oli koettu 0,5 °C:n lämpenemistasolla eli 1900-luvun lopun ilmastossa kerran 2, 4, 10, 20, 50 tai 100 vuodessa. Esimerkiksi kerran 10 vuodessa koettavan ankaran hellejakson vuotuinen todennäköisyys on 0,5 °C:n lämpenemisen tasolla suoraan määritelmän perusteella 10 %. Ilmaston lämmitessä todennäköisyys kasvaa hyvin nopeasti: 1,0 °C:n tasolla se on n. 26 %, 1,5 °C:n tasolla 41 % ja 2,0 °C:n teollistumista

edeltäneeseen tasoon verrattuna lämmenneessä maailmassa jo 54 %. Hieman mutkia suoristaen siis voidaan sanoa, että 1900-luvun lopulla kerran 10 vuodessa koettavan tasoisia hellejaksoja esiintyisi tämän vuosisadan puolivälin ilmastossa keskimäärin joka toinen vuosi. Vastaavasti lähimenneisyydessä kerran sadassa vuodessa esiintyneitä erittäin kovia hellejaksoja nähtäisiin vuosisadan keskivaiheilla vuosittain n. 17 % todennäköisyydellä eli keskimäärin joka kuudentena vuotena.



Kuva 18. Todennäköisyyksiä sellaisen hellejakson esiintymiselle, jollainen oli koettu pääkaupunkiseudulla kerran 2, 4, 10, 20, 50 tai 100 vuodessa (kuvan kuusi eri käyrää) perusjakson ilmastossa, jossa maapallon keskilämpötila oli noussut 0,5 °C teollistumista edeltävään aikaan nähden; todennäköisyydet 0,5 °C, 1,0, 1,5 ja 2,0 °C lämmenneessä maailmassa.

3.5.2. Kaupungin lämpösaarekeilmiö

Kaupunkialueilla on yleensä lämpimämpää kuin ympäröivällä maaseudulla niin sanotun lämpösaarekeilmiön takia. Ilmiö syntyy rakennusten, liikenteen ja teollisuuden tuottamasta hukkalämmöstä sekä siitä, että auringon säteilyenergia varastoituu kaupungin rakenteisiin, josta se vapautuu ympäröivään ilmaan. Yhtäältä lämpösaarekeilmiö vähentää lämmitysenergian tarvetta talvisin mutta toisaalta kasvattaa jäähdytystarvetta kesäisin. Helsingissä voi olla lämpösaarekeilmiön aikana useita asteita lämpimämpää kuin ympäristössä (Drebs ym. 2023). Lämpösaarekeilmiön takia myös helteiden vaikutukset korostuvat suurissa kaupungeissa. Mallinnusten mukaan Helsingissä koettu kuumarasitus lisääntyy sen myötä mitä korkeampia alueen rakennukset ovat, mutta rakennusten korkeuden kasvaessa yli 20 metrin kuumarasitus ei enää kasva, todennäköisesti rakennusten varjostavan vaikutuksen vuoksi (Chitu ym. 2021). Vaikka ilmastonmuutosta voidaan siis hillitä tiiviillä kaupunkirakentamisella, samalla voimistetaan kaupunkien lämpösaarekeilmiötä. Myös tummat pinnat ovat omiaan voimistamaan lämpösaareketta erityisesti kesäaikana.

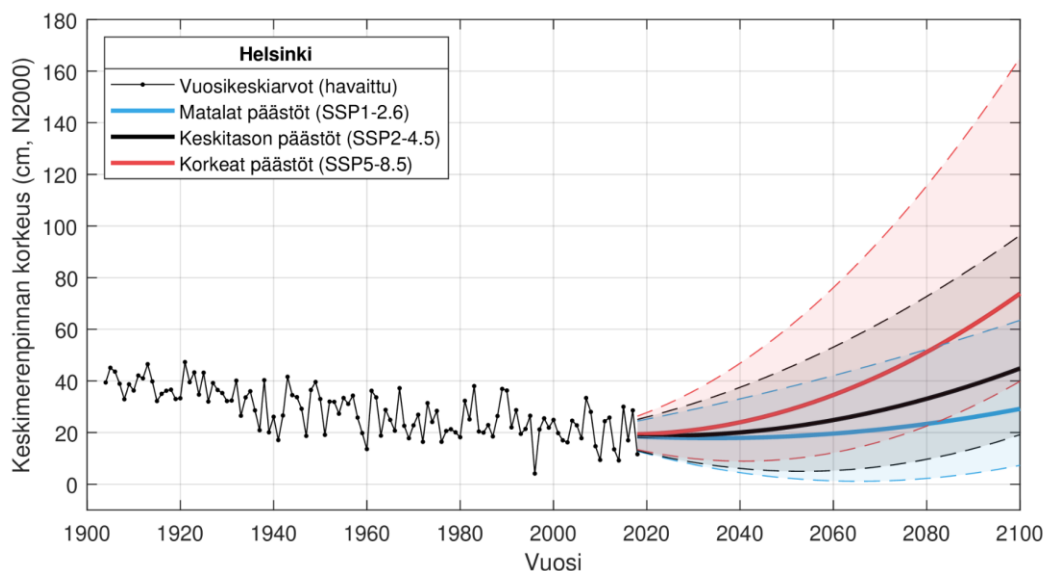
Rakennetun ympäristön lisäksi yhteiskunnalliset haavoittuvuustekijät, kuten väestön ikääntyminen, voivat korostaa lämpösaarekeilmiön vaikutuksia. Helsingin kantakaupungissa, voimakkaimman lämpösaarekkeen alueella, asuu runsaasti ikääntyneitä. Kaupungin lämpösaareke lisää kuumarasitusta, ja kuolleisuusriski helleaaltojen aikana kasvaa Helsingissä noin 2,5-kertaiseksi ympäröivään pääkaupunkiseutuun verrattuna (Ruuhela ym. 2021). Kasvillisuuden ja viherpinta-alan lisääminen kaupungeissa helpottaa kuumarasitusta, mutta vaikutus on merkittävä vasta, kun puistojen osuus kasvaa kyllin suureksi. Viimeaikaisessa tutkimuksessa havaittiin, että kasvillisuuden lisääminen Vantaan kaupungissa tuo lievää helpotusta kuumuuteen, mutta ilmastonmuutoksen mukanaan tuoma lämpötilan nousu oli selvästi merkittävämpää (Saranko ym. 2020). Yksittäiset puut eivät siis juuri vaikuta lämpösaarekeilmiön voimakkuuteen mutta tuovat toki varjoa kuumana päivänä ja vaikuttavat siten ihmisen kokemaan suoraan kuumarasitukseen.

Kesäisen lämpösaarekeilmiön voimakkuus ja alueellinen jakauma Helsingissä vaihtelee suuresti säätilanteesta ja erityisesti tuulensuunnasta ja -nopeudesta riippuen. Pohjoisenpuoleinen eli sisämaan suunnasta puhaltava tuuli hellepäivinä lisää kuumarasitusta kantakaupungissa, koska tällöin meren viilentävä vaikutus jää vähäisemmäksi (Votsis ym. 2021). Sen sijaan jos hellepäivinä tuulee lounaasta, kuumarasitus kantakaupungissa voi olla heikompaa kuin niissä kaupunginosissa, jotka sijaitsevat kauempana rannikosta.

3.6. Merivedenkorkeus sekä korkean meriveden ja rankkasateiden yhdistelmätilanteet

Helsingissä merenpinnan keskimääräiseen tasoon vaikuttavat merenpinnan maailmanlaajuinen nousu, maankohoaminen ja pohjoisen Atlantin alueen tuuli-ilmasto. Merenpinnan nousu johtuu ilmaston lämpenemisestä, joka aiheuttaa meriveden lämpölaajenemista ja jäätiköiden sulamista. Maankohoamisen vauhti on Helsingissä noin 3,7 mm vuodessa ja jatkuu tasaisena vielä ainakin vuosisatoja. Tuuli-ilmasto puolestaan vaikuttaa merenpinnan tasoon, koska Itämeri on lähes suljettu vesiallas. Länsituulten vallitessa tuuli työntää vettä sisään Tanskan salmista ja Suomen rannikkoa vasten, jolloin merenpinta Helsingissä nousee.

Merenpinnan maailmanlaajuisen nousun nopeus on tällä hetkellä suunnilleen sama kuin maankohoamisen vauhti Helsingissä, ja niinpä merenpinnan tasossa vallinnut, maankohoamisen aiheuttama historiallinen laskusuuntaus on käytännössä pysähtynyt (kuva 19). Tulevaisuudessa on odotettavissa merenpinnan nousua. Keskimmäisen SSP2-4.5-päästöskenaarion mukainen kehitys johtaisi parhaan arvion mukaan 25 cm:n nousuun vuoteen 2100 mennessä verrattuna vuosien 1995–2014 tasoon. Epävarmuushaarukka (5–95 %) arviolle on –1 ... +76 cm. Arvion tekemisessä käytetyt menetelmät on esitelty Pellikan ym. (2023) tutkimuksessa, josta löytyvät myös tarkemmat tulokset eri todennäköisyydestasojen päästöskenaarioille.



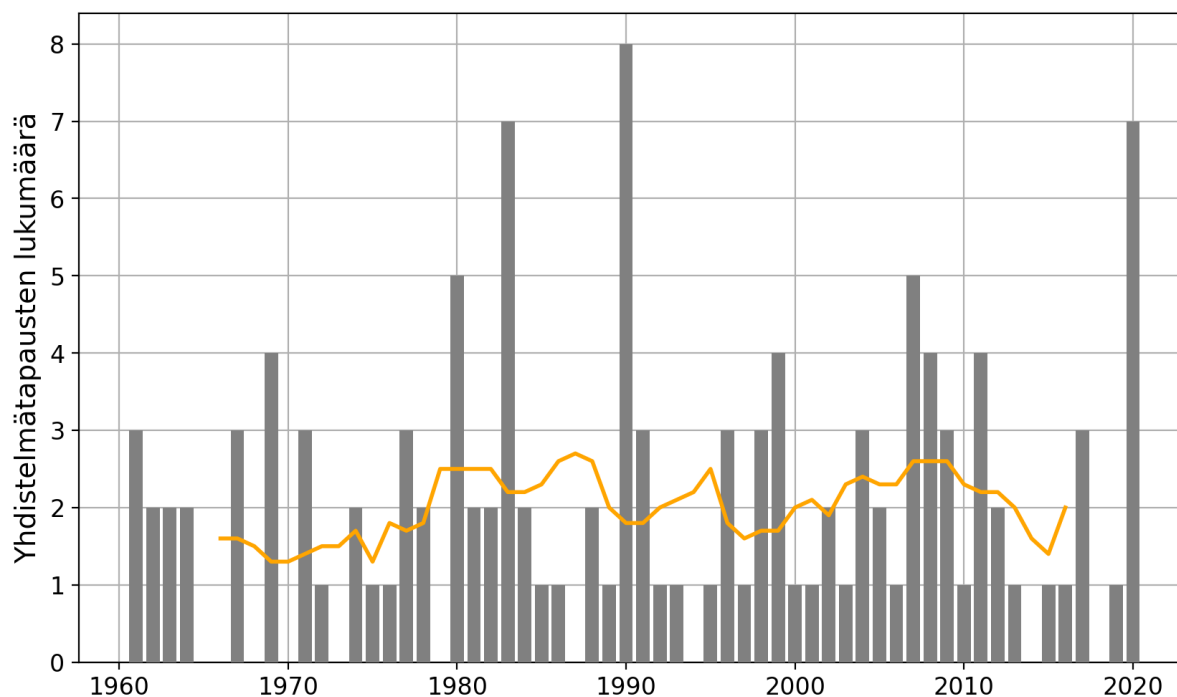
Kuva 19. Merenpinnan keskimääräisen tason tähänastinen kehitys (havaittu vuosikeskiarvo, cm, N2000) ja tulevaisuuden ennusteet Helsingissä kolmelle eri kasvihuonekaasuskenaariolle: matalien päästöjen SSP1-2.6-skenaariolle, keskitason päästöjen SSP2-4.5-skenaariolle ja korkeiden päästöjen SSP5-8.5-skenaariolle. Katkoviivojen rajaamat ennusteiden 5–95 %:n vaihteluvälit kuvaavat merenpinnan nousuennusteisiin liittyvää suurta epävarmuutta.

Edellä sanottu koskee vain keskimääräistä merenpinnan tasoa, jonka päälle tulevat lyhytkestoisesta meriveden korkeuden vaihtelusta aiheutuvat tulvat. Merenpinnan nousu nostaa tulevaisuudessa odotettavissa olevia tulvakorkeuksia. Aiemmin julkaistut alimmat suositeltavat rakentamiskorkeudet Suomen rannikolla (Kahma ym. 2014) ovat kuitenkin toistaiseksi edelleen voimassa. Niiden pohjana olevat merenpinnan nousuennusteet ovat varsin lähellä tässä raportissa esitetyn SSP2-4.5-skenaariota mukaista todennäköisyysjakaumaa (kuva 19, musta viiva).

Keskimääräisen merivedenkorkeuden lisäksi tutkittiin sellaisten säätilanteiden lukumääriä, joissa korkea merivesi ja rankkasateet esiintyvät saman päivän aikana. Korkealle kohonnut merivesi täyttää hulevesien poistoviemäreitä ja siten hidastaa rankkasateiden tuomien tulvavesien poistumista. Vaikutukset voivat olla siis suurempia kuin mitä olisi, jos korkea merivesi ja rankkasade esiintyisivät erikseen. Tyypillisesti tällaiset yhdistelmätilanteet liittyvät syksy- ja talviaikaisiin matalapaineisiin, jotka tuovat rankkoja sateita ja nostavat samalla vedenpintaa tuulien ja matalamman ilmanpaineen takia.

Raja-arvoina suurille sademäärälle ja korkealle merenpinnalle pidettiin niiden jakaumien 95. prosenttipisteitä, jotka vastasivat pääkaupunkiseudulla +55 cm:n vedenkorkeutta ja vähintään 8,7 mm:n päivittäistä sademäärää. Kuvassa 20 on esitetty tällaisten päivien vuotuiset lukumäärät. Kuvasta voi nähdä, että ainakaan vielä rankkasateiden ja korkean meriveden yhdistelmätilanteet eivät ole oleellisesti lisääntyneet, vaan määrässä on suurta vuosien välistä

vaihtelua. On kuitenkin mahdollista, että tulevaisuudessa yhdistelmätilanteita esiintyy useammin, sillä talviaikaisten matalapaineiden sademäärien ennustetaan kasvavan.

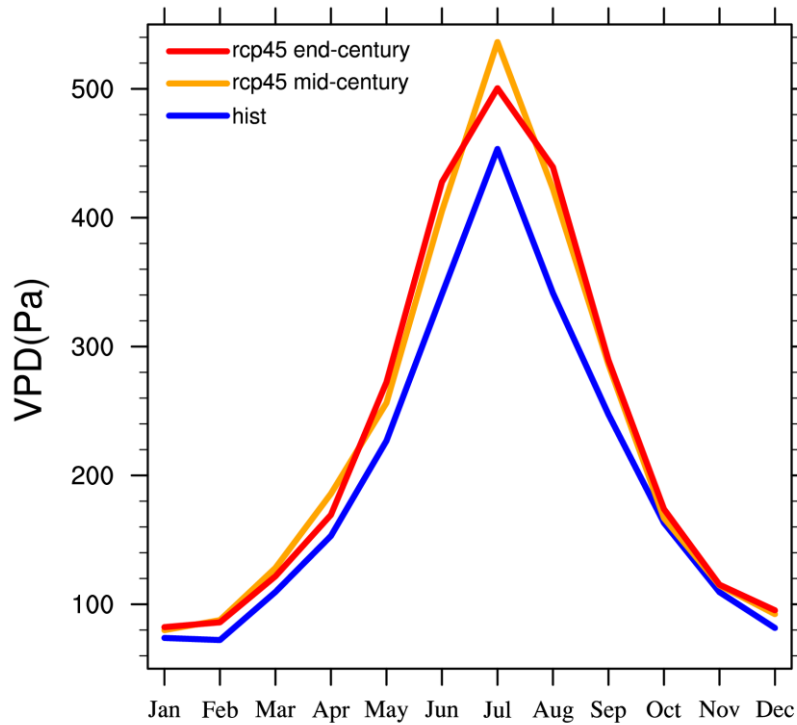


Kuva 20. Korkean meriveden ja rankkasateiden yhdistelmätilanteiden lukumäärä vuosittain Helsingissä 1961–2020. Pylväät kuvaavat tilanteiden vuosittaista määrää ja oranssi viiva niiden 10-vuotista liukuvaa keskiarvoa.

3.7. Kuivuus

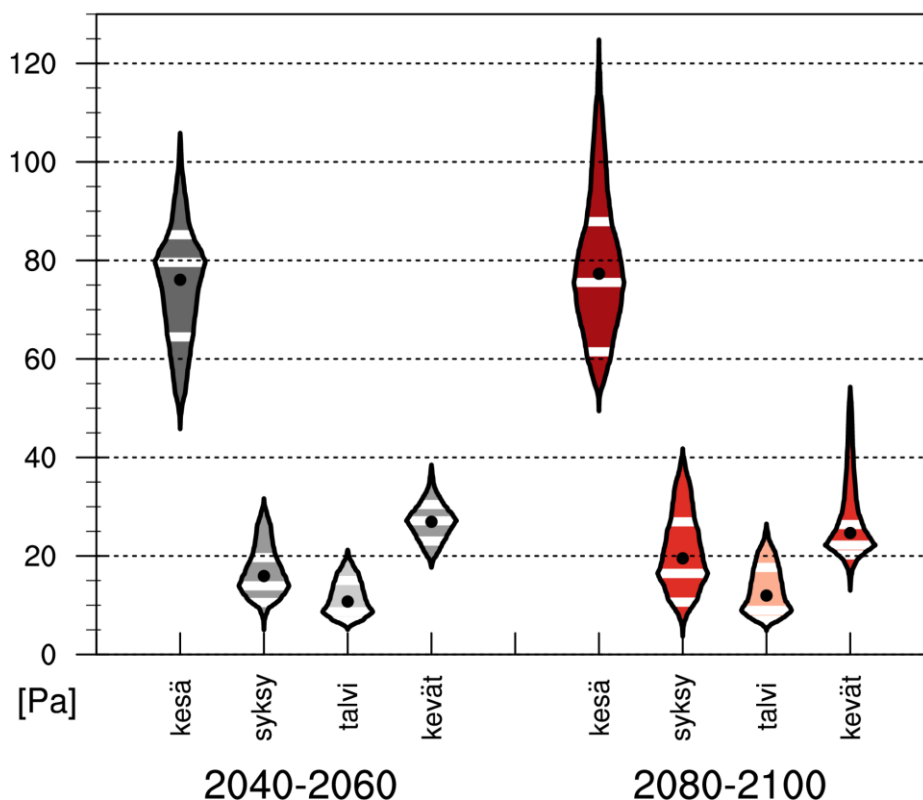
Kesällä rankkasateiden lisäksi ongelmia saattaa aiheuttaa myös pitkäkestoinen kuivuus. Lisääntyvästä kuivuudesta saatiin Euroopassa esimakua kesällä 2022, jolloin myös pääkaupunkiseudulla elokuu oli erittäin kuiva: Helsinki-Vantaalla jopa ennätysellisen kuiva (5,9 mm sadetta) ja Helsingin Kaisaniemessäkin yksi mittaushistorian kuivimmista (8,4 mm sadetta).

Yksi kuivuuden tunnusluku on ilman kyllästysvajaus (engl. *vapour pressure deficit*, *VPD*), joka kuvaa kosteudella kyllästetyn ilman ja vallitsevan ilman vesihöyryn osapaineen erotusta. Jos ilman kosteusprosentti on 100 %, kyllästysvajaus on nolla. Kyllästysvajaus siis kertoo, miten paljon ilmaan mahtuisi lisää vesihöyryä, ennen kuin se alkaa tiivistyä. Kesällä lämpötilat ovat talvea korkeampia, ja silloin kyllästysvajaus on tyypillisesti talvea suurempi (kuva 21). Kyllästysvajauksen kasvaessa haihtuminen on tehokkaampaa ja kasvit joutuvat ottamaan enemmän vettä juuristoistaan, mikä johtaa maaperän kuivumiseen. Kun maasto on kuivaa, auringon säteilyenergiasta on käytettävissä isompi osuus lämpötilan nostamiseen kuin veden haihduttamiseen. Syntyy noidankehä, joka voimistaa helleaaltoja ja kuivuusjaksoja.



Kuva 21. Kyllästysvajauksen eli vesihöyryn osapaineen vajauksen (yksikkö pascal, Pa) keskiarvo eri kuukausina vuosina 1985–2005 (sininen viiva), vuosisadan puolivälissä (oranssi viiva) ja vuosisadan lopussa (punainen viiva). Arviot perustuvat HCLIM-ilmastonmuutosmalliin, jossa on käytetty tulevaisuutta kuvaamaan RCP4.5-skenaariota.

HCLIM-ilmastonmuutosmallin mukaan kuivuusjaksot pääkaupunkiseudulla pahentuisivat tulevaisuudessa erityisesti kesäisin (kuva 22), jolloin kyllästysvajaus kasvaisi keskimäärin noin 80 pascalia (n. 20 %, suhteellisesta muutoksesta ei kuvaa). Vaikka tulos on laskettu vain yhtä ilmastonmuutosmallia käyttäen, se on linjassa CMIP6-malleilla laskettujen tulosten kanssa. Niiden mukaan kesäkaudella tulevaisuudessa ei olisi juurikaan odotettavissa muutosta sateisuudessa (kuva 9) mutta toisaalta hieman enemmän auringonpaistetta (kuva 10). Myös ennustettu helteiden yleistyminen ja ankaroituminen (kuvat 16–18) ovat sopusoinnussa lisääntyvän kuivuuden kanssa.



Kuva 22. Ennustetut kyllästysvajauksen muutokset (yksikkö pascal eli Pa) pääkaupunkiseudulla RCP4.5-skenaarion mukaan vuosisadan puolivälissä (vasen) ja vuosisadan lopussa (oikea) verrattuna ajanjaksoon 1985–2005. Tulokset perustuvat HCLIM-ilmastonmuutosmallin laskelmiin. Mustat pisteet kuvaavat jakaumien keskiarvoa ja valkoiset viivat 25, 50 ja 75 prosenttipisteitä.

4. Yhteenveto ja johtopäätökset

Tähän raporttiin on koottu viimeisin tieto ilmastonmuutoksen etenemisestä ja tulevaisuuden arvioista pääkaupunkiseudulla. Yhteenvetona voi sanoa, että ilmastonmuutos näkyy jo konkreettisesti pääkaupunkiseudun ilmastossa. Monet havaitut muutokset ovat sopusoinnussa sen kanssa, mitä ihmiskunnan aiheuttama kasvihuoneilmiön voimistuminen tuo mukanaan.

Lämpötilat ovat nousseet kaikkina vuodenaikoina, mutta erityisesti talvella, jolloin lämpötilan muutosvauhti viimeksi kuluneiden 60 vuoden aikana on ollut Helsingissä 0,55 astetta vuosikymmentä kohti. Tämä on noin kolme kertaa nopeampaa kuin maapallolla keskimäärin. Talvien ennustetaan lämpenevän viime vuosikymmenten ilmastosta vielä muutamalla asteella vuosisadan puoliväliin mennessä, millä olisi dramaattisia vaikutuksia lumen ja merijään vähentyessä entisestään. Terminen talvi lyhentyisi noin kahden kuukauden mittaiseksi. Myös hellepäivät ovat jo lisääntyneet, ja niiden ennustetaan lisääntyvän siten, että 1900-luvun lopulla (0,5 asteen lämpenemistaso) kerran kymmenessä vuodessa esiintyvä hellejakso koettaisiin noin joka toinen vuosi vuosisadan puolivälissä eli noin 2 astetta esiteollista aikaa lämpimämmässä ilmastossa. Voimakkaammat kesähelteet tuovat mukanaan

yhtäältä lisääntyvää kuivuutta ja toisaalta rankkasateita, eli ääripäiden ennustetaan kärjistyvän.

Lämpötilan lisäksi muutoksia on havaittu talvikuukausien sateissa. Niiden määrä on lisääntynyt Helsingissä noin 8 mm vuosikymmentä kohti. Muiden vuodenaikojen sademäärissä ei ole tapahtunut merkittäviä muutoksia. Tämäkin havainto on linjassa ilmastomalliennusteiden kanssa: talvipuolella vuotta sateiden lisääntyminen on todennäköisempää kuin kesäaikana. Rankkasateiden intensiteetin ennustetaan kuitenkin nousevan suhteessa enemmän kuin kokonaissademäärän, eli yksinkertaistaen voisi sanoa, että silloin kuin sataa, sataa yleensä kerralla enemmän.

Siinä missä lämpötilassa ja osin myös sateisuudessa nähdään selkeitä muutossignaaleja, tuulisuuden ei ennusteta oleellisesti muuttuvan. On todennäköistä, että ilmakehän luontainen vaihtelu dominoi jatkossakin tuulisuuden vuotuista ja vuosikymmenten välistä vaihtelua. Talvimyrskyjen ei siis odoteta voimistuvan eikä niiden ennusteta määrällisesti lisääntyvän. Sen sijaan niiden mukanaan tuomat sademäärät voivat lämmenneessä ilmastossa olla isompia ja tulla talviaikaan entistä useammin vetenä kuin lumena.

Meriveden korkeuden ei ennusteta vielä vuosisadan puoliväliin mennessä juurikaan nousevan, koska maankohoaminen suurelta osin kumoaa ennustetun maailmanlaajuisen merenpinnan nousun. Sen sijaan vuosisadan loppuun mennessä vedenkorkeus voisi keskitason päästöskenaarion mukaan nousta noin 25 cm nykyisestä tasostaan, jonka päälle tulevat esimerkiksi talvimyrskyjen aiheuttamat meritulvat.

Selkeimmät ja näkyvimät muutokset pääkaupunkiseudun ilmastossa koetaan talvella. Entistä useammin nollan molemilla puolilla sahaava lämpötila lisää liukastumisriskiä. Vähentyvä lumi- ja jääpeite hankaloittaa monia talviharrastuksia kuten hiihtoa tai pilkkimistä. Kesällä entistä kuumempien helleaaltojen vaikutukset korostuvat suurissa kaupungeissa lämpösaarekeilmiön takia. Varsinkin vanhuksille ja riskiryhmään kuuluville ihmisille voimakkaat helleallot voivat olla hengenvaarallisia, ja tutkimuksissa on selvinnyt, että kuolleisuusriski kasvaa Helsingissä kuumuuden seurauksena enemmän kuin muualla Helsingin ja Uudenmaan sairaanhoitopiirin alueella (Ruuhela ym. 2021).

Vaikka ilmastomuutoksella siis on monia kielteisiä vaikutuksia, näköpiirissä oleva ilmastomuutos ei muuttaisi Suomea elinkelvottomaksi maaksi asua. Maailmanlaajuisesti hallitsemattomasti etenevä ilmastomuutos kuitenkin aiheuttaisi paljon tuhoa, esimerkiksi vaarallisia sään ääri-ilmiöitä ja eliölajien sukupuuttoaalton. Varsinkin monissa kehitysmaissa seurauksena olisi suuria inhimillisiä kärsimyksiä, yhteiskuntien vakauden heikkenemistä ja jopa aseellisia konflikteja. Koska eri maailman alueet ovat vahvasti riippuvaisia toisistaan, yksikään maanosa tai valtio ei voi välttyä ilmaston lämpenemisen aiheuttamilta haittavaikutuksilta. Esimerkiksi miljoonien vuosittaisten ympäristöpakolaisten maailma olisi ankea ja turvaton meille kaikille.

On myös tärkeää ymmärtää, että käynnissä oleva maailmanlaajuinen ilmaston lämpeneminen johtuu yksinomaan ihmiskunnan aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä. Vaikka asia on monin tavoin huolestuttava, on muistettava, että pysäyttämällä päästöt saamme myös

lämpenemisen loppumaan. Toisaalta päästöjen lopettaminen ei vielä viilennä maapalloa, vaan planeettamme keskilämpötila jää sille tasolle, mikä se on, kun nettopäästöt menevät nolliin. Tämä tarkoittaa sitä, että parhaassakin tapauksessa jonkinasteiseen muutokseen on oltava valmiita varautumaan.

Kiitokset

Kiitämme Helsingin seudun ympäristöpalveluita rakentavista kommentteista tätä raporttia kohtaan. Lisäksi kiitämme Lisa Hagaa ruotsinkielisen tiivistelmän kielellisestä tarkistamisesta.

Kirjallisuusviitteet

- Chitu, Z., and Coauthors, 2021: *URCLIM project deliverable 5.3*. https://www.researchgate.net/publication/365186846_URCLIM_D53_version_280621 (Accessed March 30, 2023).
- Drebs, A., J. Suomi, and A. Mäkelä, 2023: Urban heat island research at high latitudes — utilising Finland as an example. *Boreal Environ. Res.*, **28**, 81–96.
- Dyrddal, A. V., and Coauthors, 2021: Observed changes in heavy daily precipitation over the Nordic-Baltic region. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, **38**, 100965, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100965>.
- HSY, 2010: *Pääkaupunkiseudun ilmasto muuttuu. Sopeutumissstrategian taustaselvityksiä*. HSY Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä, https://ilmastotyokalut.fi/files/2014/07/ILKKA_raportti_paakaupunkiseudun_ilmasto_muuttuu.pdf (Accessed February 23, 2023).
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp., <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- Kahma, K., H. Pellikka, K. Leinonen, U. Leijala, and M. Johansson, 2014: *Pitkän aikavälin tulvariskit ja alimmat suositeltavat rakentamiskorkeudet Suomen rannikolla*. Ilmatieteen laitos, <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/135226> (Accessed March 30, 2023).
- Lind, P., and Coauthors, 2022: Climate change information over Fenno-Scandinavia produced with a convection-permitting climate model. *Clim. Dyn.*, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06589-3>.
- Mäkelä, A., I. Lehtonen, K. Ruosteenoja, K. Jylhä, H. Tuomenvirta, and A. Drebs, 2016: *Ilmastomuutos pääkaupunkiseudulla*. Finnish Meteorological Institute, <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/170155> (Accessed February 22, 2023).
- Meinshausen, M., and Coauthors, 2020: The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci. Model Dev.*, **13**, 3571–3605, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>.
- Olsson, T., A. Luomaranta, H. Nyman, and K. Jylhä, 2023: Climatology of sea-effect snow in Finland. *Int. J. Climatol.*, **43**, 650–667, <https://doi.org/10.1002/joc.7801>.
- O'Neill, B. C., and Coauthors, 2016: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, **9**, 3461–3482, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.

- Pellikka, H., M. M. Johansson, M. Nordman, and K. Ruosteenoja, 2023: Probabilistic projections and past trends of sea level rise in Finland. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **23**, 1613–1630, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1613-2023>.
- Ruosteenoja, K., and K. Jylhä, 2021: Projected climate change in Finland during the 21st century calculated from CMIP6 model simulations. *Geophysica*, **56**, 39–69.
- , and ———, 2023: Average and extreme heatwaves in Europe at 0.5-2.0°C global warming levels in CMIP6 model simulations. *Clim. Dyn.* (*in press*), <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06798-4>.
- , T. Vihma, and A. Venäläinen, 2019: Projected Changes in European and North Atlantic Seasonal Wind Climate Derived from CMIP5 Simulations. *J. Clim.*, **32**, 6467–6490, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0023.1>.
- Ruuhela, R., A. Votsis, J. Kukkonen, K. Jylhä, S. Kankaanpää, and A. Perrels, 2021: Temperature-Related Mortality in Helsinki Compared to Its Surrounding Region Over Two Decades, with Special Emphasis on Intensive Heatwaves. *Atmosphere*, **12**, 46, <https://doi.org/10.3390/atmos12010046>.
- , and Coauthors, 2023: Ilmasto- ja sosioekonomiset skenaariot ilmastonmuutokseen sopeutumisen suunnittelussa. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164670> (Accessed March 3, 2023).
- Saranko, O., C. Fortelius, K. Jylhä, K. Ruosteenoja, E. Brattich, S. Di Sabatino, and V. Nurmi, 2020: Impacts of town characteristics on the changing urban climate in Vantaa. *Sci. Total Environ.*, **727**, 138471, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138471>.
- Toivonen, E., A.-I. Partanen, and K. Jylhä, 2021: *Ilmastonmuutos vaikuttaa hulevesien mitoitukseen Suomessa ja muissa Pohjoismaissa*. https://vesitalous.fi/wp-content/uploads/2021/03/Vesitalous_0221_lowres-1.pdf (Accessed March 4, 2023).
- Votsis, A., R. Ruuhela, and H. Gregow, 2021: The socio-spatial patterns of heat stress exposure in Helsinki on two hot days of 2018 and 2019. *FMI's Clim. Bull. Res. Lett.*, **3**, 22–24, <https://doi.org/10.35614/ISSN-2341-6408-IK-2021-08-RL>.



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

ILMATIETEEN LAITOS

Erik Palménin aukio 1

PL 503

00560 HELSINKI

Puh. 029 539 1000

WWW.ILMATIETEENLAITOS.FI

FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE
RAPORTTEJA - RAPPORTER - REPORTS 2023:1

ISSN 2342-7108 (verkkojulkaisu)

ISBN 978-952-336-173-7 (verkkojulkaisu)

<https://doi.org/10.35614/isbn.9789523361737>

Helsinki 2023

