

Ilmastonmuutos pääkaupunkiseudulla

Luonnos HSY:n hallitus 21.4.2023.

Lopullinen raportti julkaistaan HSY:n julkaisujärjestelmässä sekä Ilmatieteen laitoksen julkaisusarjassa. Kuvat tulevat olemaan saatavilla erikseen ladattavina esityskäyttöön.

Mika Rantanen¹, Kimmo Ruosteenoja¹, Meri Virman¹, Havu Pellikka², Suraj Polade¹, Anna Luomaranta¹

¹Ilmatieteen laitos, Helsinki, Suomi

²Aalto-yliopisto, Espoo, Suomi

1. Johdanto	2
1.1. Kasvihuonekaasuskenaariot	3
1.2. Ilmastonmuutosarvioiden laatiminen	5
2. Pääkaupunkiseudun ilmasto on jo muuttunut	5
2.1. Keskimääräiset lämpötilat ja hellepäivät	5
2.2. Keskimääräiset sademäärät	8
3. Tulevaisuuden ilmastonmuutosarviot	10
3.1. Keskimääräiset lämpötilat ja sademäärät	10
3.2. Rankkasateet	13
3.3. Tuulisuus	15
3.4. Lumensyvyys	18
3.5. Helteet	19
3.6. Merivedenkorkeus sekä korkean meriveden ja rankkasateiden yhdistelmätilanteet	23
3.7. Kuivuus	25
4. Yhteenveto ja johtopäätökset	26
Kirjallisuusviitteet (huom. vielä englanniksi)	28

1. Johdanto

Ihmisten toiminnasta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt ovat lämmittäneet maapallomme ilmastoa jo yli asteen, aiheuttaen 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, johon Suomikin osittain kuuluu.

Ilmastonmuutos näkyy myös jo pääkaupunkiseudun ilmastossa. Lämpötilat ovat nousseet kaikkina vuodenaikoina, lumen määrä on vähentynyt ja erityisesti talvella sademäärät ovat nousseet. Siinä missä muutama vuosikymmen sitten ilmastomuutoksesta 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 sopuinnassa kasvihuonekaasujen aiheuttaman lämpenemisen kanssa.

Pääkaupunkiseudun alueen sisälläkin ilmasto on monella tapaa vaihteleva. Rannikolla meren lämmittävä vaikutus pitää rantaviivan syksyisin ja talvisin selvästi leudompana kuin sisämaan. Toisaalta avoin meri voi tuottaa sakeita lumisateita, jotka suosiollisten ilmavirtausten mukana ajautuvat rannikolle, tuoden runsaasti lunta lyhyessä ajassa. Edellä mainittujen syiden takia ilmastomuutoksen 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, vaikkakin niiden todennäköisyys hiljalleen pienenee ilmaston lämmitessä. Toisaalta ilmakehän luontainen vaihtelu voi aika ajoin voimistaa kasvihuonekaasujen aiheuttamaa lämpenemistä.

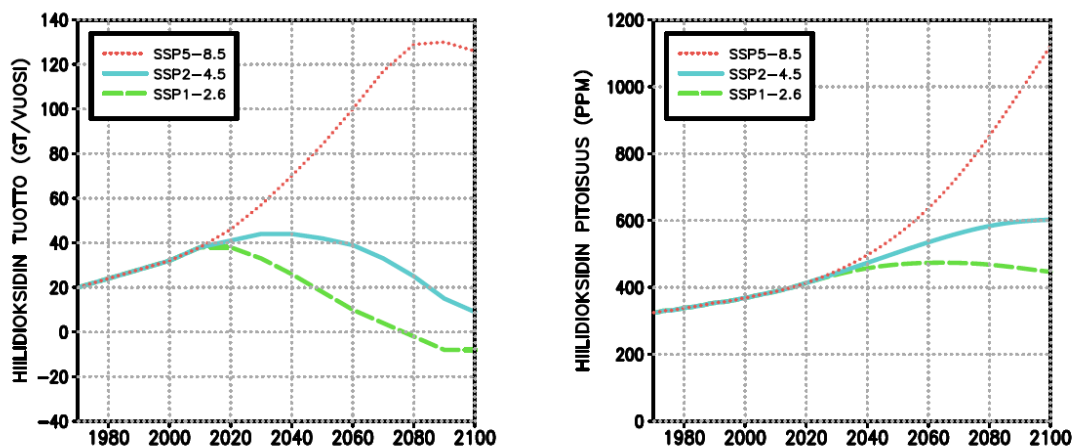
IPCC julkaisi viimeisimmän, eli kuudennen arviointiraporttinsa maapallon ilmastomuutoksesta vuonna 2021. Edelliset arviointiraportit julkaistiin vuosina 2007 ja 2013, eli laajoja raportteja julkaistaan noin 6-8 vuoden välein. Raportit sisältävät arvioita ilmaston nykytilasta ja sen tulevasta kehityssuunnista. Tuoreimmassa eli kuudennessa arviointiraportissa ilmastomuutosennusteet perustuvat uusimpaan ilmastomallisukupolveen eli niin sanottuihin CMIP6¹-ilmastomalleihin. Ilmastomuutosta ennustettaessa käytetään pohjana useita vaihtoehtoisia kasvihuonekaasujen päästöskenaarioita (kts. kappale 1.1).

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

Ilmastonmuutoksesta pääkaupunkiseudulla julkaistiin edellinen raportti vuonna 2016 (Mäkelä et al. 2016) sekä sitä aiemmin vuonna 2010 (HSY 2010). Vuonna 2016 ilmestynyt raportti on monilta osin edelleen ajan tasalla, vaikkakin sen tiedot perustuvat nykyistä edeltävään CMIP5-mallisukupolveen. Tässä raportissa ilmastonmuutosarviot on suurelta osin päivitetty vastaamaan tuoreimmassa IPCC:n raportissa käytettyjä CMIP6-ilmastomalleja. Osa tuloksista perustuu kuitenkin edelleen vanhempaan CMIP5-mallisukupolveen.

1.1. Kasvihuonekaasuskenaariot

Ihmiskunnan tuottamista kasvihuonekaasuista ylivoimaisesti tärkein on hiilidioksidi (CO_2), jonka pitoisuus ilmakehässä oli ennen teollistumisen aikaa n. 280 ppm mutta v. 2022 jo lähes 420 ppm (ppm = tilavuuden miljoonasosa). Muita ihmisten ilmakehään päästämiä kasvihuonekaasuja ovat mm. metaani, typpioksiduuli ja halogenisoidut hiilivedyt. Niilläkin on oma merkityksensä kasvihuoneilmion voimistajina, mutta edes kaikki ne yhdessä eivät aiheuta yhtä paljoa lämpenemistä kuin CO_2 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.



Kuva 1. Eri SSP-skenaarioitten 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 piirretyt kirjallisuudesta (O'Neill et al. 2016; Meinshausen et al. 2020) saatujen numeroarvojen perusteella.

Tulevaisuuden kasvihuonekaasujen kehitystä kuvataan kansainvälisiin sosioekonomisiin muutospolkuihin (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) pohjautuen (Ruuhela et al. 2023).

Kuvassa 1 on esitetty neljän SSP-kasvihuonekaasuskenaarion² mukaisia hiilidioksidin maailmanlaajuisia päästöjä. Lyhyet luonnehdinnat kustakin skenaarista:

- SSP1-2.6: Erittäin tehokkaat päästöjen rajoitustoimet. Maailmanlaajuisten CO₂-päästöjen pitäisi kääntyä selvään laskuun jo 2020-luvulla ja olla vuosisadan lopulla jopa hieman negatiivisia. CO₂:n pitoisuus ylittää vuosisadan puolivälin jälkeen korkeimmillaan n. 470 ppm:ään mutta alkaa sen jälkeen hitaasti laskemaan. 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.

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

HUOM: Vastaavat skenaarioitten luonnehdinnat olivat edellisessä raportissa laatikkoteksteinä.

Kun otetaan huomioon ilmastopolitiikan tavoitteet ja tähän mennessä hyväksytyt ilmastopöytäkirjat, SSP5-8.5-skenaario näyttää varsin epätodennäköisiltä tulevaisuuden kehityskululta. Tämän skenaarion tarkoituksena onkin lähinnä osoittaa, että todella huonosti kävisi, jos ilmastonsuojelu tyystin laiminlyötäisiin. Tällä hetkellä SSP2-4.5-skenaariota voisi kuvitella olevan lähinnä todennäköisimmin toteutuvaa tulevaisuutta. Siihen päädyttäisiin, jos osa maailman maista sitoutuu sovittuihin 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-skenaarioitten tuloksia. Ehdottomasti on kuitenkin syytä pitää mielessä, että SSP5-8.5-skenaariota ei tule käyttää pohjana

² Skenaarioitten 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.

suunniteltaessa kaukaisempaa tulevaisuutta. Tähän skenaarioon liittyvät hyvin suuret ilmastolliset muutokset ainoastaan kertovat, miltä kaikelta pahalta on mahdollista järkevällä ilmastopolitiikalla välttyä.

Lisäksi on huomioitava, että osa tässä raportissa esitetyistä tuloksista perustuu vanhempiin CMIP5-sarjan ilmastomalleihin ja niissä käytettyihin RCP (Representative Concentration Pathway) -päästökkenaarioihin. Näistä päästökkenaarioista RCP4.5- ja RCP8.5-skenaariot vastaavat säteilypakotteeltaan suurin piirtein SSP2-4.5 ja SSP5-8.5 skenaarioita, vaikkakaan 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 ilmastomuutosmalleille. Ilmastonmuutosmalli on ilmastoa sääteleviä luonnonlakeja kuvaava simulointimalli, jossa nämä fysikaaliset lainalaisuudet on puettu matemaattisten yhtälöitten muotoon, jotka edelleen ratkaistaan tietokonealgoritmien avulla. Ilmastonmuutosmallissa on oma osamallinsa mm. ilmakehälle, merivirroille, lumipeitteelle ja maan pintakerrokselle. Malleja muodostettaessa joudutaan tekemään monia yksinkertaistuksia. Nämä yksinkertaistukset on toteutettu eri malleissa eri tavoin, ja niinpä 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 ilmastomuutosarviot perustuvat enimmillään 28 malliin (Ruosteenoja ja Jylhä, 2021, taulukko 1). Joidenkin ilmastosuureiden tiedot kylläkin puuttuvat muutamista malleista.

2. Pääkaupunkiseudun ilmasto on jo muuttunut

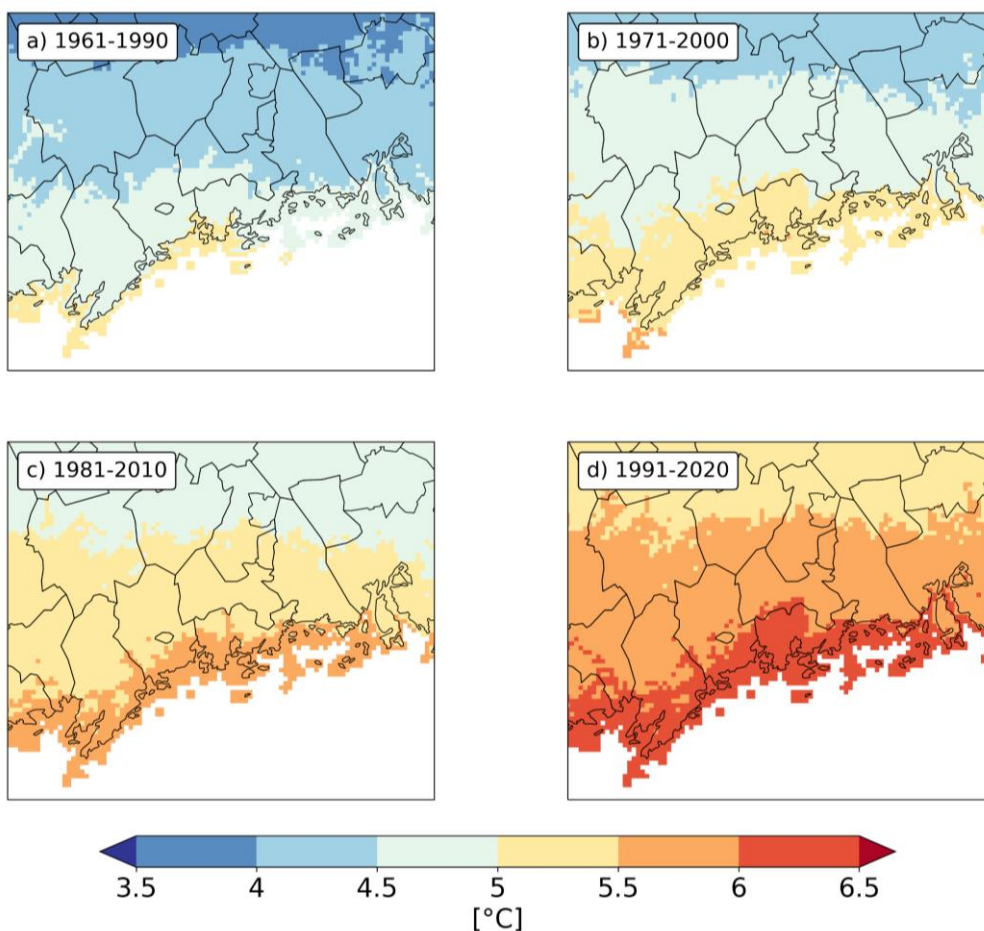
Tässä kappaleessa käydään läpi lämpötilan ja sademäärien havaittuja muutoksia pääkaupunkiseudulla viime vuosikymmenien aikana. Tulokset perustuvat Ilmatieteen laitoksen hila-aineistoon, missä matemaattisten menetelmien avulla on tuotettu tietoa sääsuureista myös niille alueille mistä suoria säähavaintoja ei ole saatavilla. Hila-aineiston lisäksi on käytetty suoria asemahavaintoja Helsingin Kaisaniemen säähavaintoasemalta.

2.1. Keskimääräiset lämpötilat ja hellepäivät

Kuvassa 2 on esitetty vuoden keskilämpötila Keski-Uudellamaalla 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 1961–1990 (kuva 2d).

Keskilämpötila

Koko vuosi

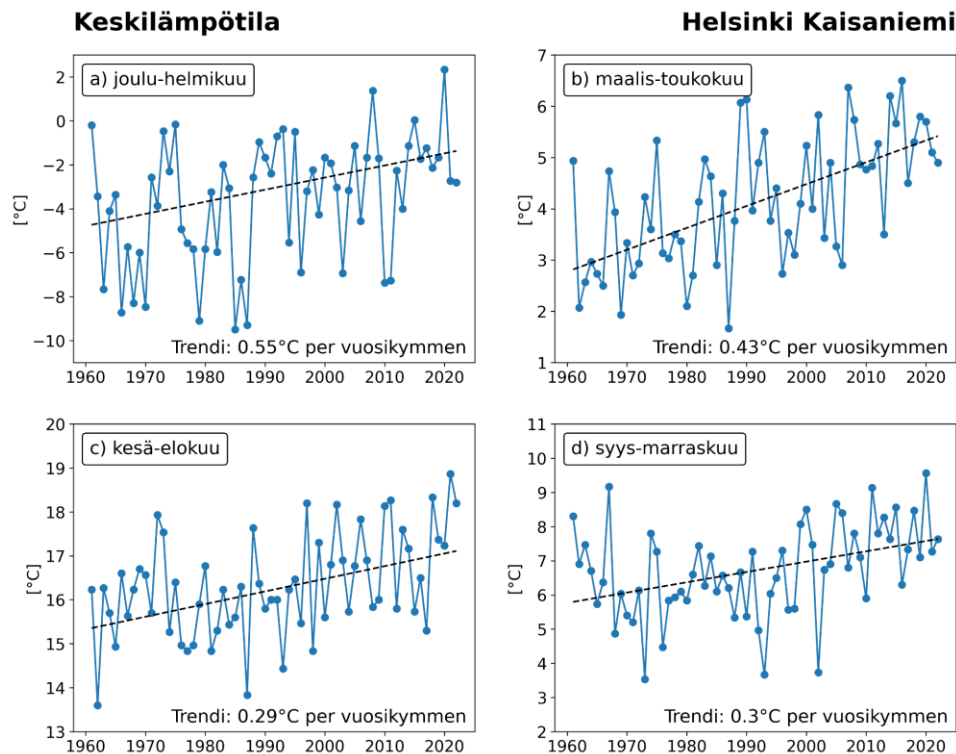


Kuva 2. Vuoden keskilämpötila pääkaupunkiseudulla neljän 30-vuotisen ilmastollisen vertailukauden aikana. Kartat esittävät kalenterivuoden keskimääräistä lämpötilaa vuosina a) 1961–1990, b) 1971–2000, c) 1981–2010 ja d) 1991–2020.

Jos lämpenemistä tarkastellaan vuodenajoin, 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 $-9,5^{\circ}\text{C}$) kun taas talvi 2019/2020 oli poikkeuksellisen lauha (keskilämpötila $2,3^{\circ}\text{C}$). Talvien keskilämpötilan vaihtelu ääripäästä toiseen voi siis olla yli 10 astetta. Vaihtelu johtuu luontaisesta ilmaston vaihtelusta, eli siitä mistä vallitsevat ilmavirtaukset kunkin talven aikana käyvät. Suuren vaihtelun takia taustalla olevaa lämpenemistrendiä voi joskus olla vaikea havaita, ja toisaalta trendin suuruus on jossain määrin herkkä sille, miten tarkasteltavan jakson alku- ja loppupää valitaan.

Seuraavaksi eniten lämpenemistä on tapahtunut keväisin ($0,43^{\circ}\text{C}$ per vuosikymmen). Vaikka talvella absoluuttinen lämpenemistrendi on suurin, trendin suhde vuosien väliseen vaihteluun on suurin kuitenkin keväällä. Kesät ja syksyt ovat lämmenneet jotakuinkin yhtä paljon, noin $0,3^{\circ}\text{C}$ vuosikymmenessä. Vaikka lämpötilojen lineaarinen trendi on tilastollisesti merkitsevä

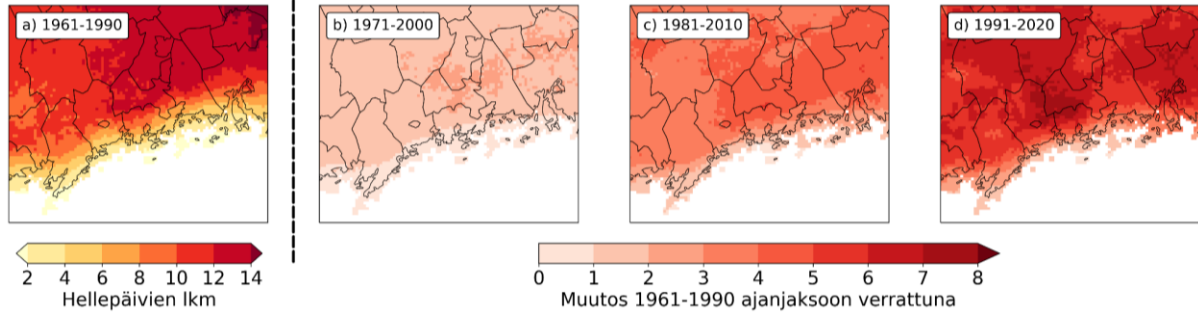
kaikkina vuodenaikoina, on hyvä huomata, että lämpötilojen vaihtelun peräkkäisten vuosien välillä ei odoteta oleellisesti vähenevän tulevaisuudessa. Siispä suhteellisen kylmätkin vuodenaajat ovat tulevaisuudessa yhä mahdollisia, vaikkakin niiden esiintymistodennäköisyys pienenee ilmaston lämpenemisen myötä.



Kuva 3. Eri vuodenaikojen keskilämpötila ja sen lineaarinen trendi Helsingin Kaisaniemessä vuosina 1961–2022. Talven (joulu-helmikuu) keskilämpötilan on laskettu mukaan edellisen vuoden joulukuuta. Siten esim. talvi v. 1961 tarkoittaa joulukuuta 1960/1961.

Myös hellepäivien (päivän ylin lämpötila vähintään 25,1°C) lukumäärässä on jo nähtävissä selvää nousua vuosien 1961–1990 ilmastolliseen vertailukauteen nähden. Siinä missä vuosina 1961–1990 hellepäiviä esiintyi keskimäärin noin 10 kertaa vuodessa (kuva 4a), viimeisimmän ilmastollisen jakson 1991–2020 aikana tämä määrä on noin 16. Hellettä havaitaan siis nyt lähes viikon verran enemmän kuin vuosina 1961–1990. Määrä on lisääntynyt erityisesti sisämaassa (kuva 4d).

Hellepäivien lukumäärä



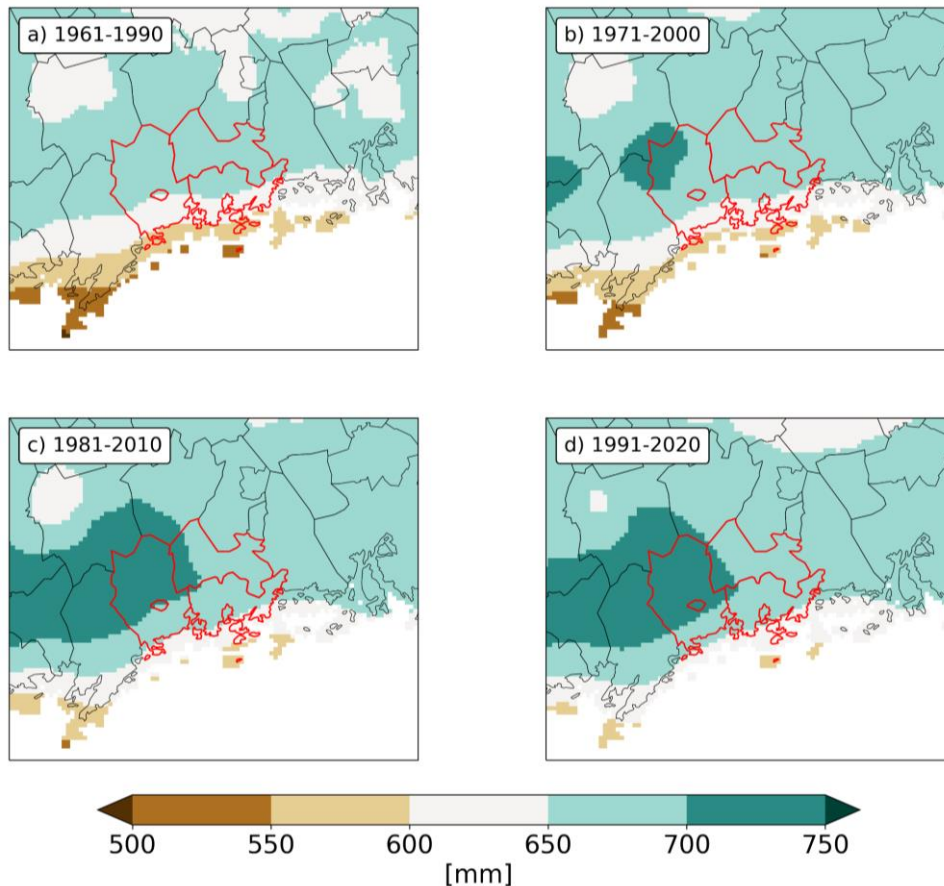
Kuva 4. Hellepäivien keskimääräinen vuotuinen lukumäärä ajanjaksolla 1961–1990 (vasen kuva) ja hellepäivien lukumäärän muutos eri ilmastollisina ajanjaksoina jaksoon 1961–1990 verrattuna (kolme oikeanpuoleista kuvaa).

2.2. Keskimääräiset sademäärät

Siinä missä vuoden keskimääräisessä lämpötilassa on nähtävissä selvää nousua viimeksi kuluneiden 60 vuoden aikana, sademäärissä muutokset ovat vaihtelevampia. Vuosina 1961–1990 keskimääräinen sademäärä vaihteli rannikon noin 550 millimetristä sisämaan 700 millimetriin. Tuoreimpaan ilmastolliseen normaaliinjaksoon 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 5c), niin muutokset ovat hyvin pieniä ja sademäärä on jopa vähentynyt Uudenmaan itä- ja koillisosissa.

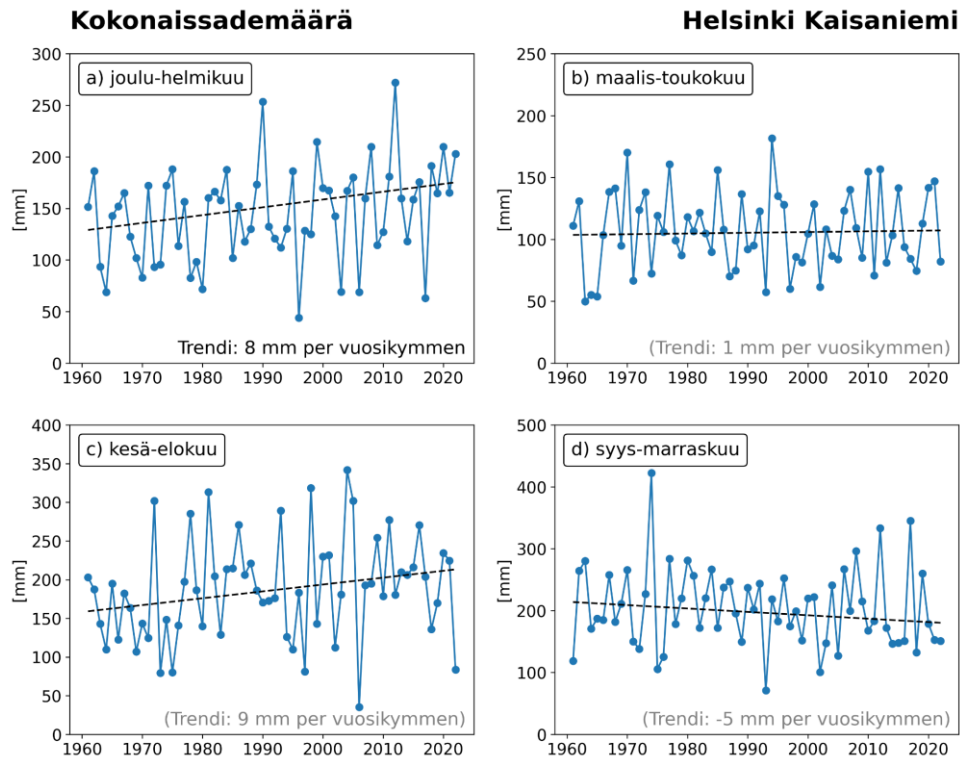
Sademäärä

Koko vuosi



Kuva 5. Vuoden keskimääräinen sademäärä pääkaupunkiseudulla 30-vuotisten ilmastollisten vertailukausien aikana. Kartat esittävät kalenterivuoden keskimääräistä kokonaissademäärää vuosina a) 1961–1990, b) 1971–2000, c) 1981–2010 ja d) 1991–2020. HSY:n alue on merkattu karttoihin punaisilla ääriveriivoilla.

Eri vuodenaikojen sademäärissä ja niiden muutoksissa on selkeitä eroja (kuva 6). Sekä talvien että kesien sademäärät ovat trendinomaisesti nousseet Helsingissä viimeisen 60 vuoden aikana (kuva 6a ja c). Näistä kuitenkin vain talven sademäärän trendi on tilastollisesti merkitsevä 5 % 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).



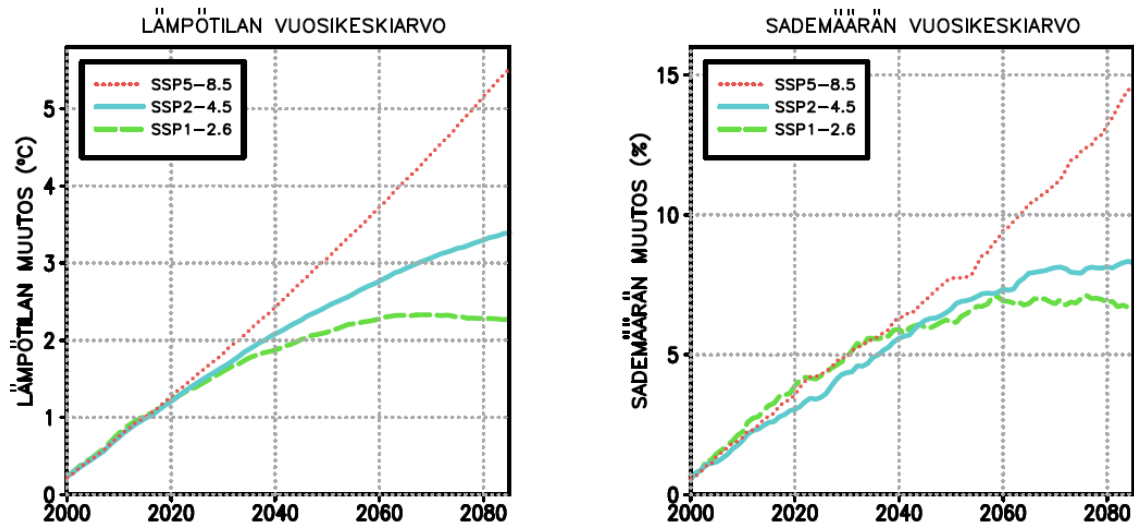
Kuva 6. Eri vuodenaikojen kokonaissademäärä ja sen lineaarinen trendi Helsingin Kaisaniemessä vuosina 1961–2022. Talven (joulu-helmikuu) sademäärään on laskettu mukaan edellisen vuoden joulukuu. Siten esim. talvi v. 1961 tarkoittaa joulu-helmikuuta 1960/1961. Huomaa erilainen pystyakselin asteikko eri vuodenaajoissa. Talven (a) sademäärän trendi on tilastollisesti merkitsevä 5 % tasolla, muiden vuodenaikojen ei.

3. Tulevaisuuden ilmastonmuutosarviot

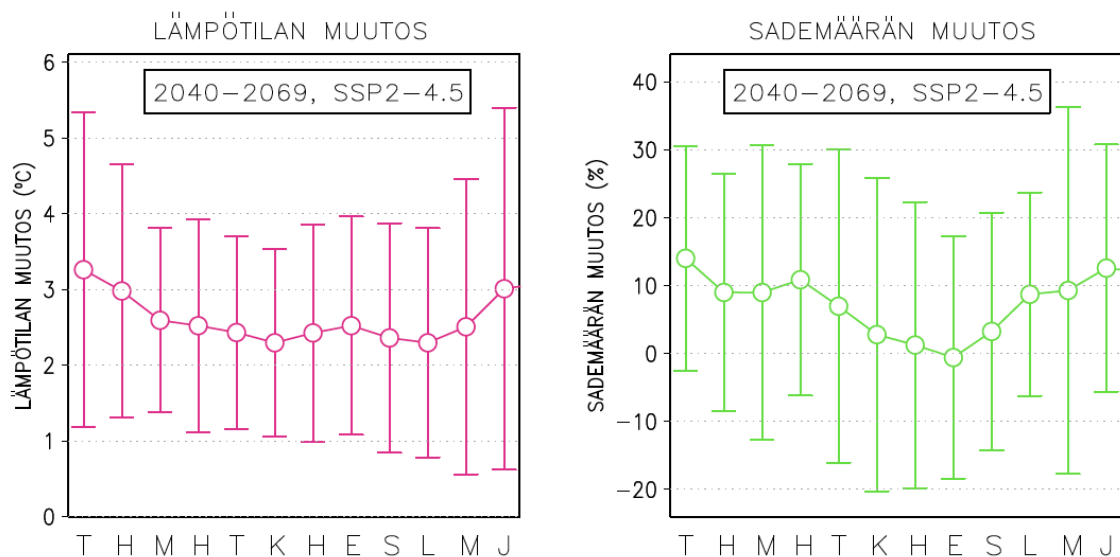
Tässä kappale kertoo eri sää- ja ilmastosuureiden arvioituista muutoksista tämän vuosisadan aikana. Pääpaino on vuosisadan puolivälissä sekä SSP2-4.5 skenaariossa, mutta myös vuosisadan lopun ja muiden päästöskenaarioiden antamia tuloksia esitetään.

3.1. Keskimääräiset lämpötilat ja sademäärät

Miten lämpötilan ja sademäärän tulevia muutoksia on arvioitu, siitä on kerrottu Ruosteenojan ja Jylhän (2021) tutkimuksen luvussa 2. Kuvassa 7 on esitetty, miten vuotuinen keskilämpötila ja kokonaissademäärä muuttuvat pääkaupunkiseudulla tämän vuosisadan loppuun mennessä. Kyseessä on 28 mallin tulosten keskiarvo. Kuva 8 vastaavasti kertoo lämpötilojen ja sademäärien muutoksista eri vuodenaikoina ja antaa myös käsityksen eri mallien tulosten välisistä eroista.



Kuva 7. Vuoden keskilämpötilan (asteina; vasen kuva) ja sademäärän (prosentteina; oikea kuva) muutokset pääkaupunkiseudulla verrattuina jakson 1981–2010 keskimääriisiin arvoihin kolmen vaihtoehtoisen kasvihuonekaasuskenaariion perusteella.



Kuva 8. 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% todennäköisyysväliä.

Sekä vuoden keskilämpötila että vuotuinen kokonaissademäärä nousevat pääkaupunkiseudulla tulevaisuudessa (kuva 7), joskin jonkun 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-skenaariion tuottama ilmastomuutos jatkuu jopa hiukan kiihtyen, SSP2-4.5-skenaariion mukainen hidastuu ja SSP1-2.6-skenaariota vastaava muutos

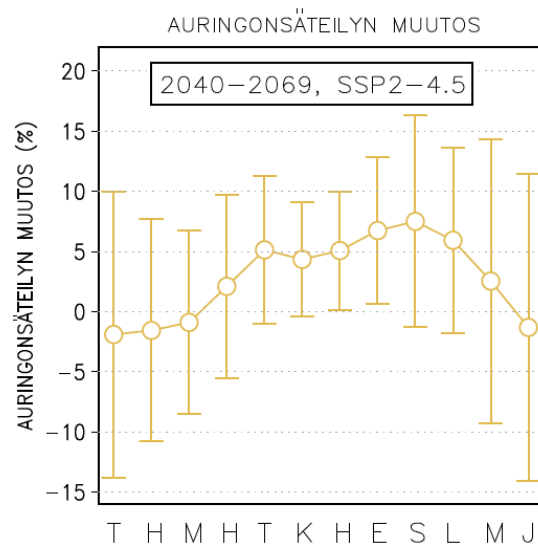
pysähtyy. Jos tarkastellaan noin kahden ihmiskupolven väliä vastaavaa muutosta 2020-luvulta 2080-luvulle, pääkaupunkiseutu lämpenisi alimman kasvihuonekaasuskenaarion perusteella noin yhden asteen, keskiskenaarion mukaan hiukan yli kaksi astetta ja suurten päästöjen skenaarion mukaan yli neljä astetta. Tästä voidaan päätellä kaksi asiaa.

Ensinnäkään ilmastonmuutosta ei voida millään kokonaan pysäyttää vielä lähivuosikymmeninä, vaan jonkinasteiseen muutokseen on oltava valmiita sopeutumaan. Toisaalta lastenlastemme kokema vuosisadan loppupuolen ilmasto on hyvin erilainen riippuen siitä, millaista ilmastopoliittikkaa nyt ja tulevaisuudessa noudatetaan.

Kuvasta 8 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 mitä edellistä mallisukupolvea tarkasteltaessa näytti (Ruosteenoja ja Jylhä, 2021, kuva 14). Uusimmat mallit lämmittävät Suomen kesiä enemmän kuin vanhat, kun taas talven 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, eli sen vuodenaajan jona lämpötila keskimäärin on pakkasen puolella, ainoastaan kahden kuukauden mittaiseksi. Toinen kuvan 8 vasemmanpuoleisen kaavion keskeinen viesti on, että eri mallien tulosten välillä on selviä eroja. Epävarmuushaarukan 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 leudontuvat enemmän kuin mitä keskilämpötilat nousevat. Kesällä sen sijaan lämpötilojen vaihtelevaisuus 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 8b). 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 vaihtelevaisemmiksi, 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.



Kuva 9. SSP2-4.5-skenaariota vastaava maan pinnalle saatavan auringonsäteilyn määrän muutos (%) pääkaupunkiseudulla vuoden eri kuukausina siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2040–2069; katso kuvan 8 selitystekstiä. **(VOIDAAN MAHDOLLISESTI YHDISTÄÄ EDELLISEEN KUVAAN TAI JÄTTÄÄ POIJES ELLEI MAHDU RAPORTTIIN.)**

Auringonsäteily näyttäisi tulevaisuudessa pikkuisen lisääntyvän varsinkin kesällä ja syksyllä (kuva 9), 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.

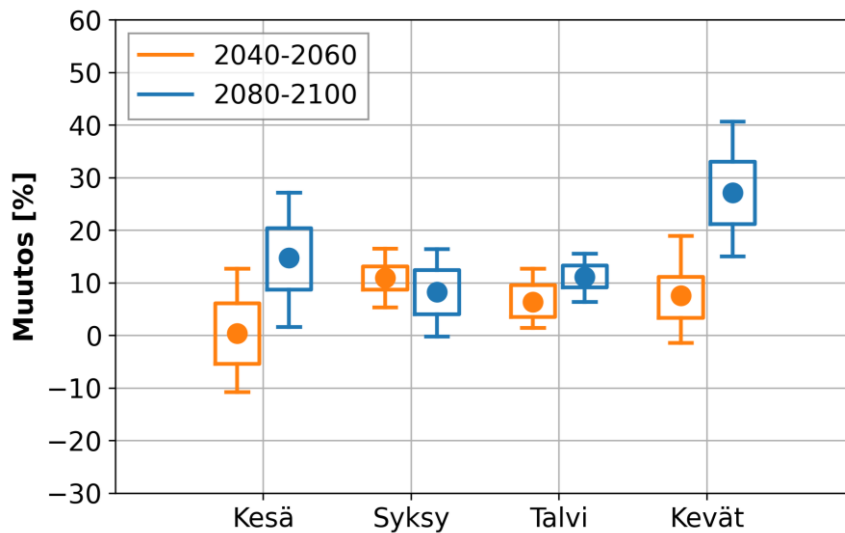
Ilman suhteellinen kosteus näyttäisi keskimäärin putoavan kesällä parilla prosenttiyksiköllä. Lämpötilan vuorokausivaihtelut pysyisivät kesällä suunnilleen entisellään mutta pienentyisivät talvella 15-20 % verran (näistä ei kuvia).

3.2. Rankkasateet

Sateiden merkittävimmät vaikutukset liittynevät rankkasateisiin ja niiden aiheuttamiin hulevesitulviin. Rankkasateita ja niihin liittyviä tulvia esiintyy Suomessa vuosittain, mutta koska Suomi on harvaan asuttu maa, ja rankkasateet ovat tyypillisesti pienialaisia, vahinkoa aiheuttavia rankkasadetulia esiintyy suurissa kaupungeissa kuten Helsingissä suhteellisen harvoin. 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 vain kerran tai pari vuosisadassa.

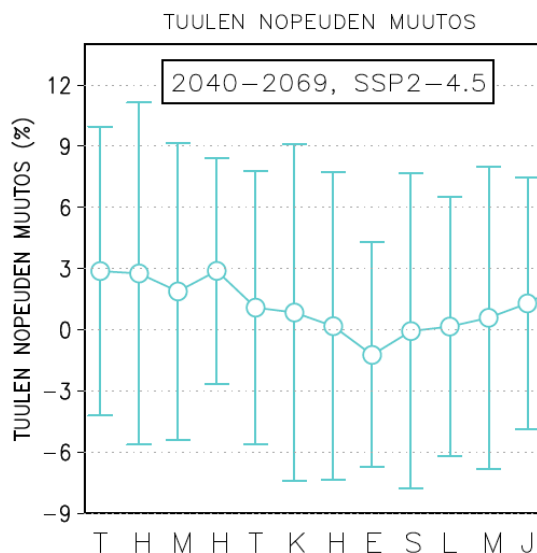
Päivän suurimman tunnittaisen sademäärän muutosta RCP-4.5-ilmastonmuutosskenaarion mukaisesti tutkittiin HCLIM-ilmastonmuutosmallilla (Lind et al. 2022), jossa alueellinen laskentatarkkuus oli 3 km. Tarkka erottelukyky takaa sen, että pienialaiset konvektiiviset rankkasateet saadaan simuloitua realistisesti. Toisaalta on hyvä muistaa, että kyseessä on vain yksittäinen malli, joten tuloksissa on väistämättä epävarmuuksia.

Kuvan 10 mukaan vuorokauden voimakkaimmat tunnittaiset sademäärät kasvaisivat vuosisadan puoliväliin siirryttäessä syksyisin, talvisin ja keväisin. Kesäisin tuntisademäärät pysyttelisivät keskimäärin samalla tasolla vuosisadan puoliväliin siirryttäessä, vaikkakin hajonta Uudenmaan alueella on suurta. Vuosisadan loppuun mennessä voimakkaimmat sademäärät kuitenkin 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 10. 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-ilmastonmuutosmallilla tehtyyn ajoon, jossa pakotteena on käytetty RCP4.5-kasvihuonekaasuskenaariota.

3.3. Tuulisuus

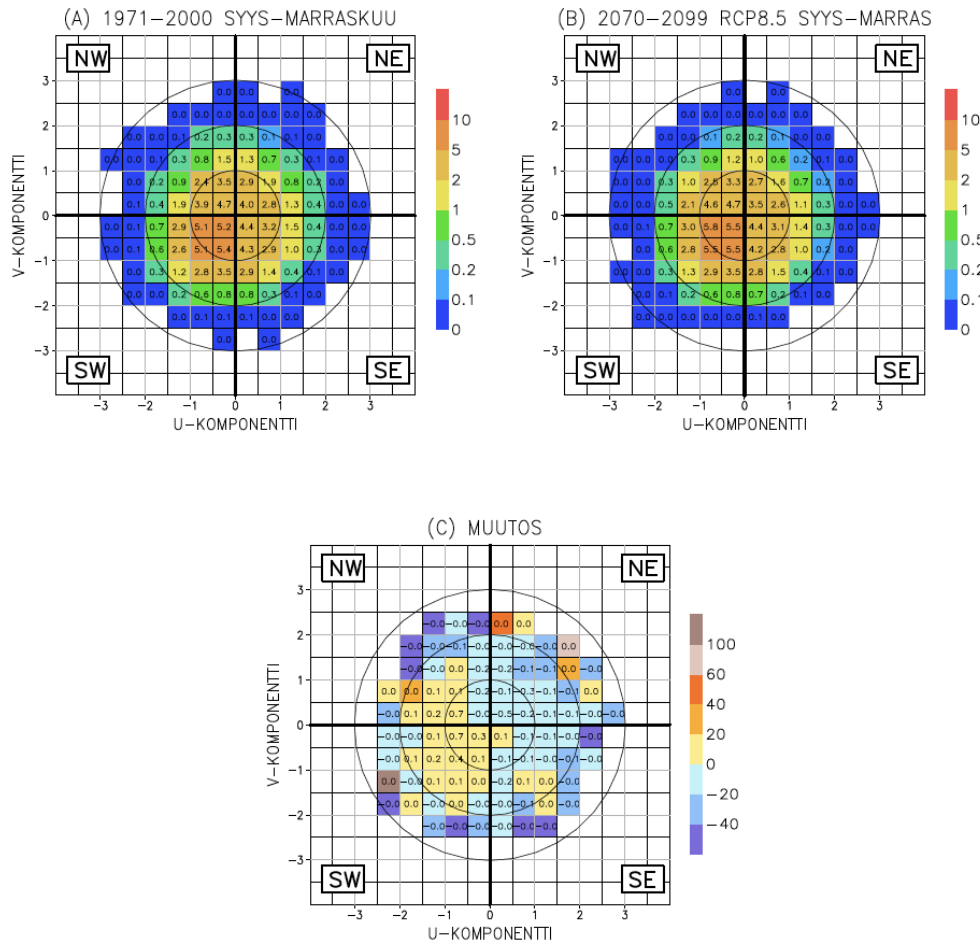


Kuva 11. Tuulen nopeuden muutos (%) pääkaupunkiseudulla vuoden eri kuukausina siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2040–2069; katso kuvan 8 selitystekstiä.

Keskimääräisen tuulen nopeuden muutoksia vuoden eri kuukausina on esitetty kuvassa 11. Kun tarkastellaan mallitulosten keskiarvoa, muutokset ovat erittäin vähäisiä. Talvella ja keväällä tuulet mahdollisesti hiukkasan 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.

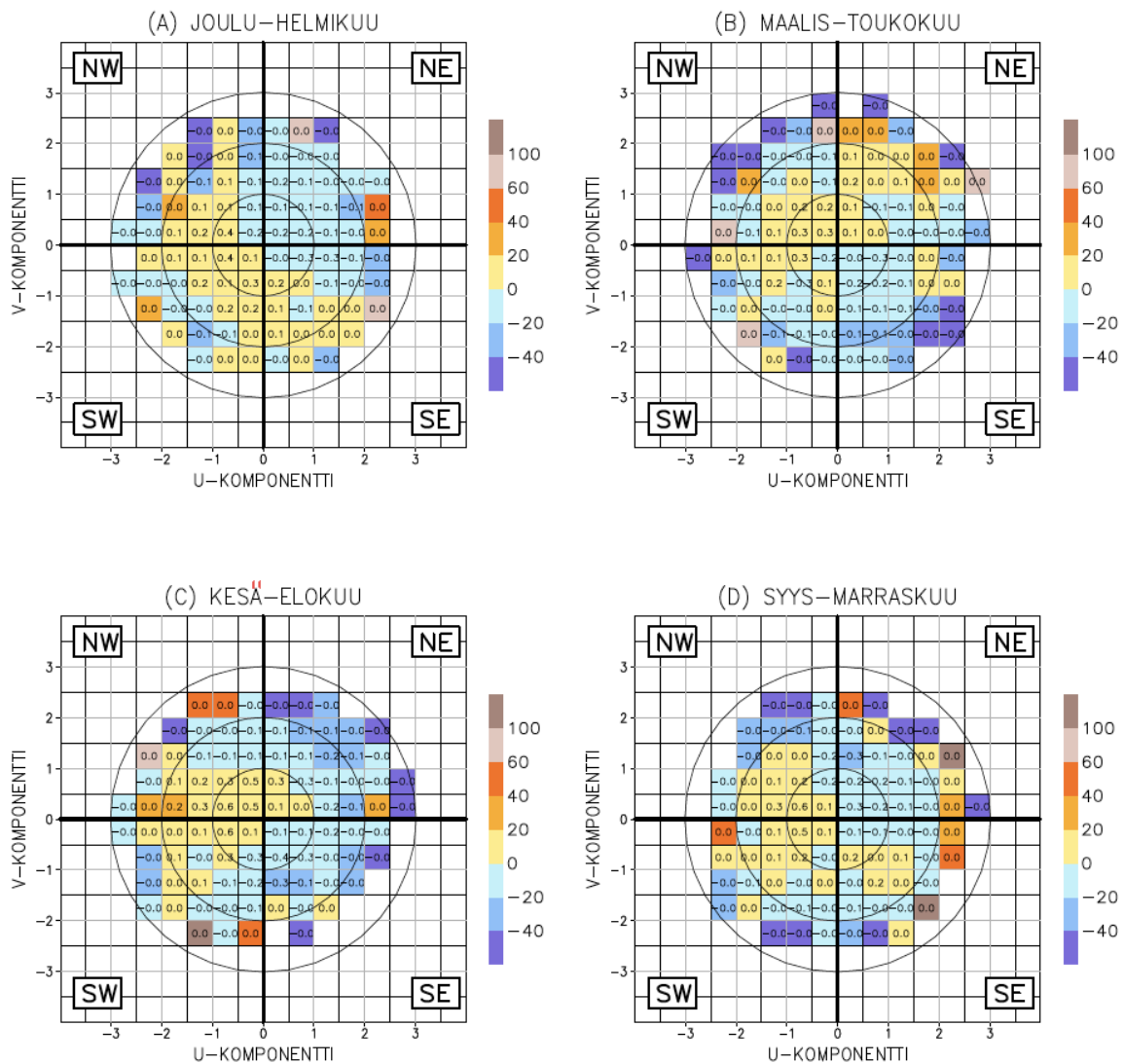
Paitsi tuulet keskimäärin, myös kovimpien tuulien nopeudet näyttävät muuttuvan ilmaston lämmetessä vain vähän (Ruosteenoja et al. 2019, kuvat 6 ja 14). Myrskyjä siis koetaan tulevaisuudessakin, ja todennäköisesti ne ovat suunnilleen yhtä ankaria kuin mitä on esiintynyt tähänkin asti. Puistojen ja kaupunkimetsien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



Kuva 12. Havainnollistava esimerkkikuva — tuulen nopeuden ja suunnan jakaumat pääkaupunkiseudulla syksyllä jaksojen (a) 1971–2000 ja (b) 2070–2099 (RCP8.5-skenaario) aikana sekä (c) näitten erotus. Kuva perustuu 13 CMIP5-mallin tuloksiin. Kaavion keskipiste vastaa tyyniä tilanteita, keskimmäisen ympyrän sisällä oleva alue kuvaa heikkoja tuulia, seuraava väli kohtalaisia ja sitä seuraava kovia tuulia. Kaavioitten yläosa kuvaa pohjoistuulia, oikea puoli itätuulia, alaosa etelätuulia ja vasen puoli länsituulia. Kuvissa (a)–(b) numeroarvot ja värit kertovat kyseiseen luokkaan kuuluvien tuulien esiintymisen prosenttiosuudet. Esimerkiksi hyvin heikkojen koillisenpuoleisten tuulien osuus on mallien mukaan ollut jaksolla 1971–2000 4.0 % ja jaksolla 2070–2099 3.5 %. (c)-kuvaosiosta nähdään, että tähän luokkaan kuuluvien tuulien osuus on vähentynyt 0.5 prosenttiyksiköllä (pikseliin merkitty numeroarvo), mikä vastaa n. 12 prosentin suhteellista vähentymistä (väriasteikko). Teknillisistä yksityiskohdista on kerrottu lisää Ruosteenojan ym. (2019) kuvan 7 selitystekstissä.

Tuulen voimakkuuden lisäksi kiinnostava on myös sen suunta. Kuvassa 12 on esitetty aluksi havainnollistava esimerkki tuulen nopeuden ja suuntien esiintymisen todennäköisyyden yhteisjakaumasta syksyllä lähimenneisyydessä ja tämän vuosisadan lopulla, jolloin mallien ennustamat muutokset tuulien suunnissa ovat selvimpiä. Mallitulosten perusteella, kuten myös todellisuudessa, eniten esiintyy heikohkoja lounaanpuoleisia tuulia, niin 1900-luvun lopun kuin tulevaisuudenkin ilmastossa (kuva 12a-b). Muilta ilmansuunnilta ei tuule yhtä

usein, ja kovat tuulet ovat kaiken kaikkiaan huomattavasti harvinaisempia kuin heikot. Vuosisadan lopulla syksyisin lännen ja lounaansuuntaisten tuulien osuus näyttää edelleen kasvavan, kun taas idänpuoleiset tuulet harvinaistuvat (kuva 12c).

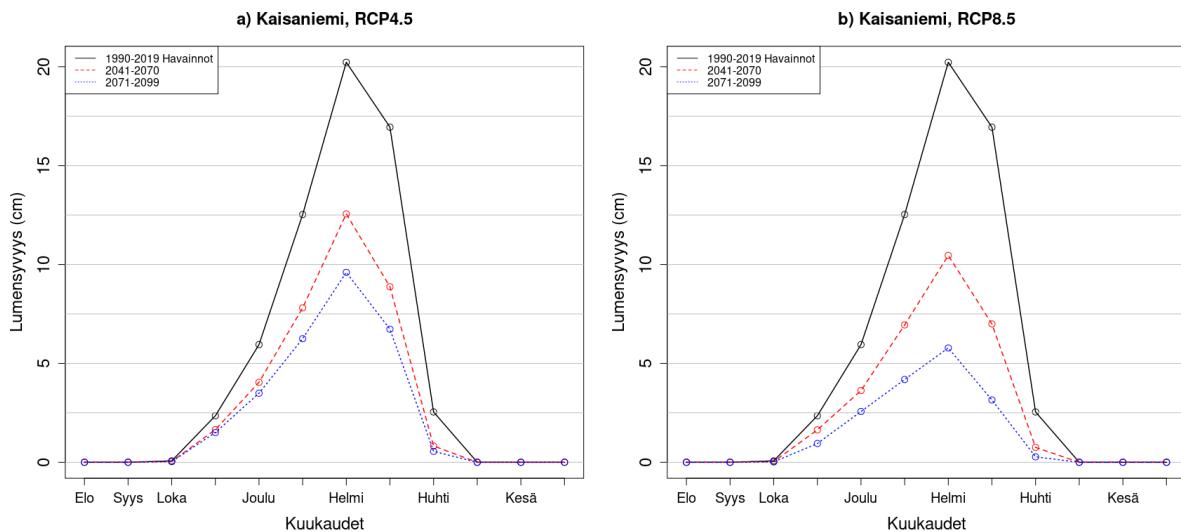


Kuva 13. Tuulen nopeuden ja suunnan jakauman muuttuminen pääkaupunkiseudulla jaksojen 1971–2000 ja 2040–2069 (RCP8.5-skenaario) välillä (a) talvella, (b) keväällä, (c) kesällä ja (d) syksyllä. Kyseessä on vastaavanlainen esitys kuin kuvan 12 c-osiossa, mutta nyt siis kaikille neljälle vuodenajalle ja vuosisadan puolivälin eikä lopun ilmastolle.

Kuvassa 13 on esitetty tuulen suuntien ja nopeuksien esiintymisen muutoksia eri vuodenaikoina vuosisadan puolivälin ilmastossa. Nähdään, että tätä ajanjaksoa tarkasteltaessa kesällä ja syksyllä yleistyvät lännen-, talvella lounaan ja keväällä luoteenpuoleiset tuulet. Muutossignaali ei kuitenkaan ole järin vahva, vaan muutokset jakauman yksittäisissä pikseleissä ovat vain muutamia prosenttiyksikön kymmenysoasia. Myös on syytä pitää mielessä, että tuuliolosuhteet vaihtelevat suuresti vuodesta toiseen vallitsevasta säätyypistä riippuen, eli tulevaisuudessakin tuulet saattavat joinakin vuosina puhallella tavallista useammin myös idän puolelta.

On syytä huomata, että kuvassa 11 esitetyt tuulen nopeuksien muutokset ja kuvan 13 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 et al. 2019). Edelleen kuvassa 13 on käytetty pohjana voimakkaampaa kasvihuonekaasuskenaariota (RCP8.5) ja varhaisempaa vertailujaksoa (1971–2000) kuin tässä selvityksessä yleensä.

3.4. Lumensyvyys



Kuva 14. Kuukausien keskimääräiset lumensyvyyydet 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 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 14.). 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. 12,5 cm ja jaksolla 2071-2099 alle 10 cm. Voimakkaamman 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 alle puolet viime vuosikymmenien lumimäärästä.

Lumensyvyuden 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 et al. 2023).

3.5. Helteet

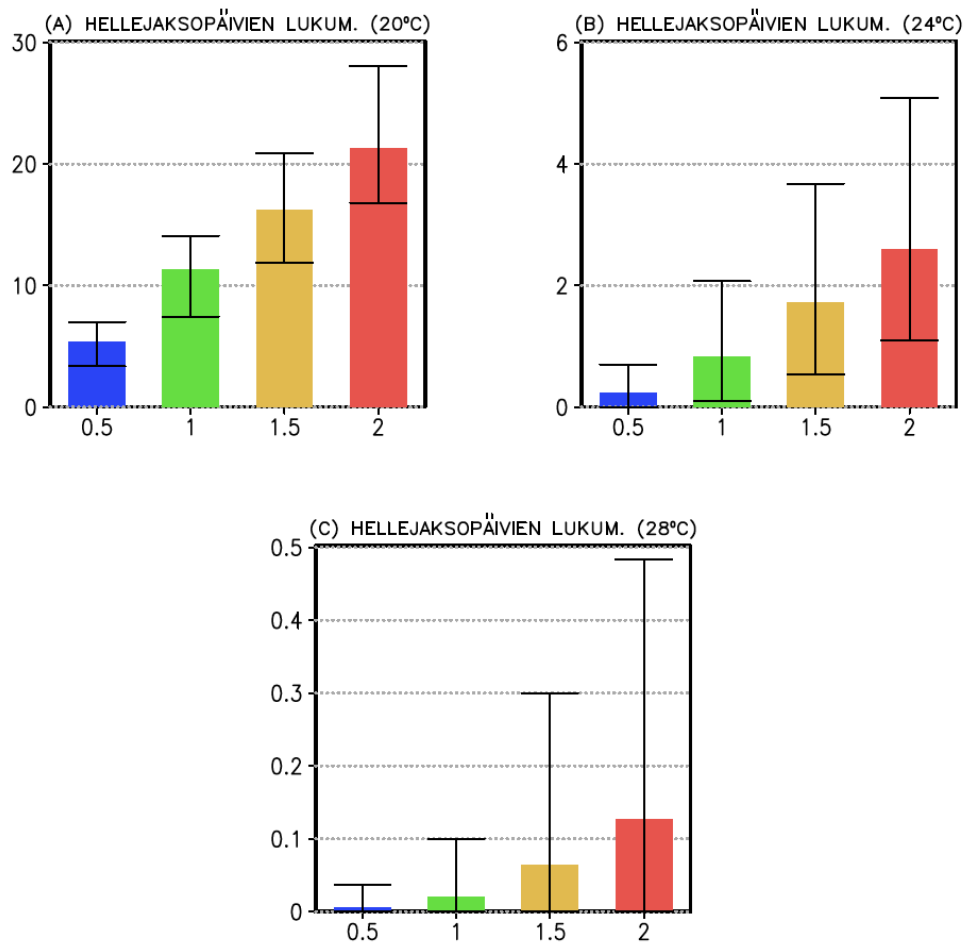
HUOM: Näissä hellelaskelmissa pitäisi viitata Ruosteenojan ja Jylhän artikkelikäsitteilyyn, jossa on kerrottu laskentamenetelmistä ym., mutta koska tuo juttu on vasta hiljan lähtenyt lehteen 1. arviointikierrokselle, näin ei ole uskallettu tässä tehdä.

Helteitten esiintymistä pääkaupunkiseudulla ei tutkittu valittuina 30-vuotisajanjaksoina kuten muita ilmastosuureita tässä raportissa vaan sen sijaan tietyillä kiinteillä maapallon lämpenemisen tasoilla. Näistä alhaisin, maapallon keskilämpötilan nousu 0.5 asteella teollistumista edeltävään aikaan nähden, edustaa 1980-luvun ilmasto. Vastaavasti 1.0°C lämpeneminen vastaa 2010-lukua ja 1.5°C 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 raja on ylittynyt pääkaupunkiseudulla muutamana päivänä, mutta 28°C vuorokausikeskilämpötilan ylityksiä ei täällä päin Suomea ole vielä koettu. Tuokin raja kyllä ylittyi Kuopiossa yhtenä päivänä v. 2010 heinäkuussa.

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.

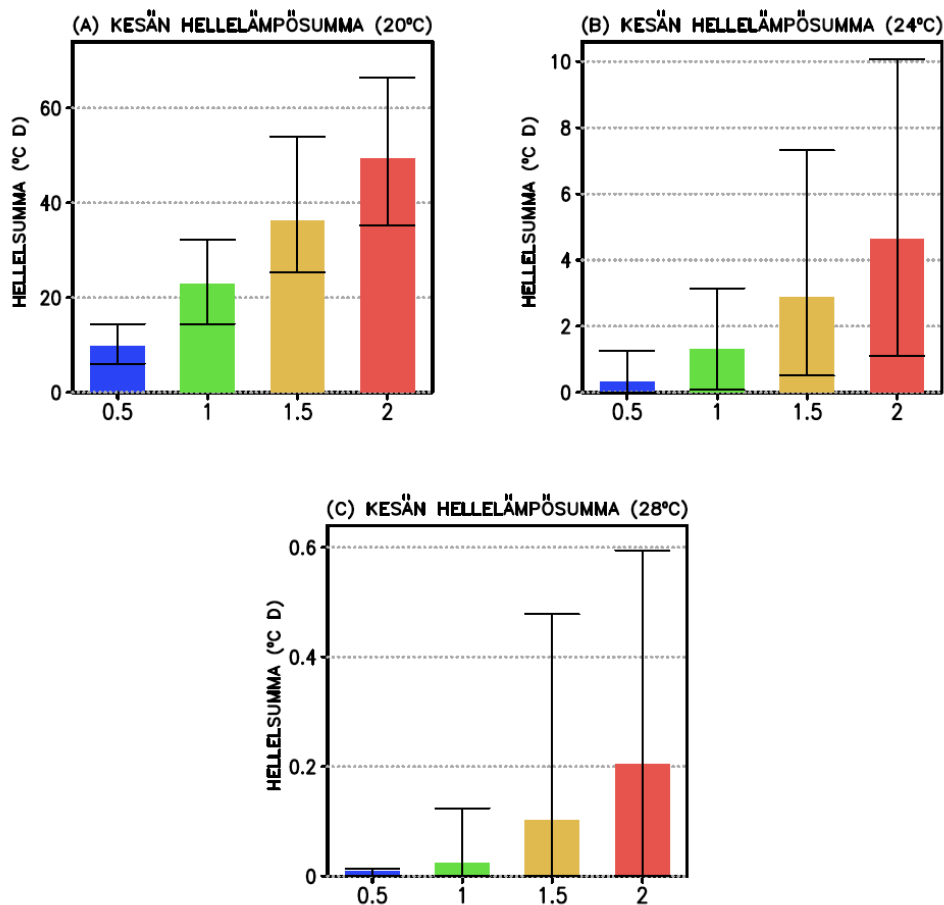
Hellejaksopäivien määrän muutoksia ilmaston lämmitessä on tarkasteltu kuvassa 14. Käytettäessä 20 asteen kynnyslämpötilaa 0.5°C lämpenemistasolla hellejaksopäiviä oli mallitulosten perusteella keskimäärin noin 5 kpl kesässä. 1.0°C lämpenemisen tasolla niiden määrä noin kaksin-, 1.5°C asteen tasolla kolmin- ja 2.0°C 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 peränpäälle, ovat mallitulostenkin perusteella olleet lähimenneisyyden ilmastossa hyvin epätodennäköisiä, mutta $1.5\text{-}2.0$ asteen lämpenemisen tasolla niitäkin jo alkaisi joskus esiintyä (kuva 14c).



Kuva 14. 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 hellelämpösumma eli kynnyslämpötilan ylitysten summa

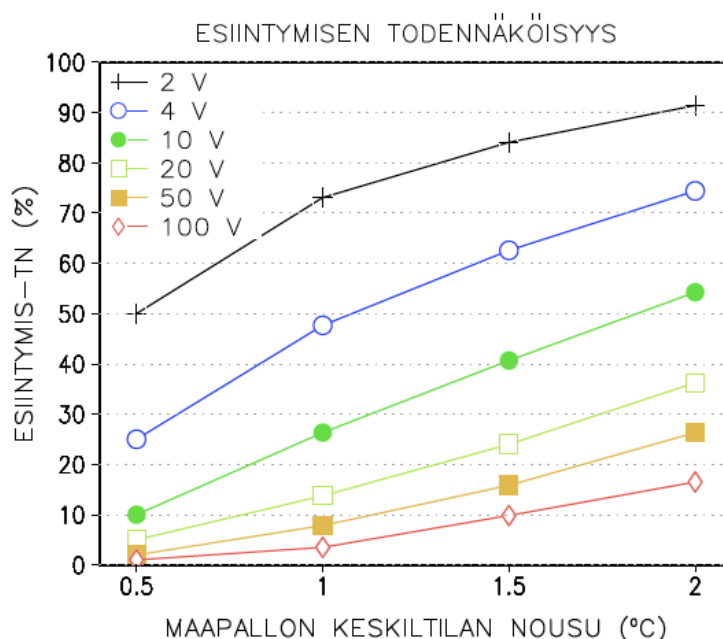
jakson ensimmäisestä viimeiseen päivään. Kuvassa 15 on näytetty, kuinka suuri kesän kaikkien hellejaksojen yhteenlaskettu hellelämpösomma keskimäärin on lämpiämisen eri tasoilla. Siirryttäessä 0.5 asteen lämpenemisen tasosta 2.0 asteen tasolle yhteenlaskettu hellelämpösomma keskimäärin viisin- (20°C 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 näitten päivien kuumuus (kynnyslämpötilan ylittymisen suuruus), jotka molemmat suurentuvat ilmaston lämmitessä.



Kuva 15. Kesän keskimääräisen yhteenlasketun hellelämpösomman kehittyminen pääkaupunkiseudulla ilmaston lämmitessä, kun käytetään rajana (a) 20, (b) 24 ja (c) 28 asteen vuorokausikeskilämpötilaa. Pylväät esittävät hellelämpösommia maapallon keskilämpötilan kohoamisen funktiona; katso kuvan 14 selitystekstiä.

Huomattakoon, että sekä kuvassa 14 että 15 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

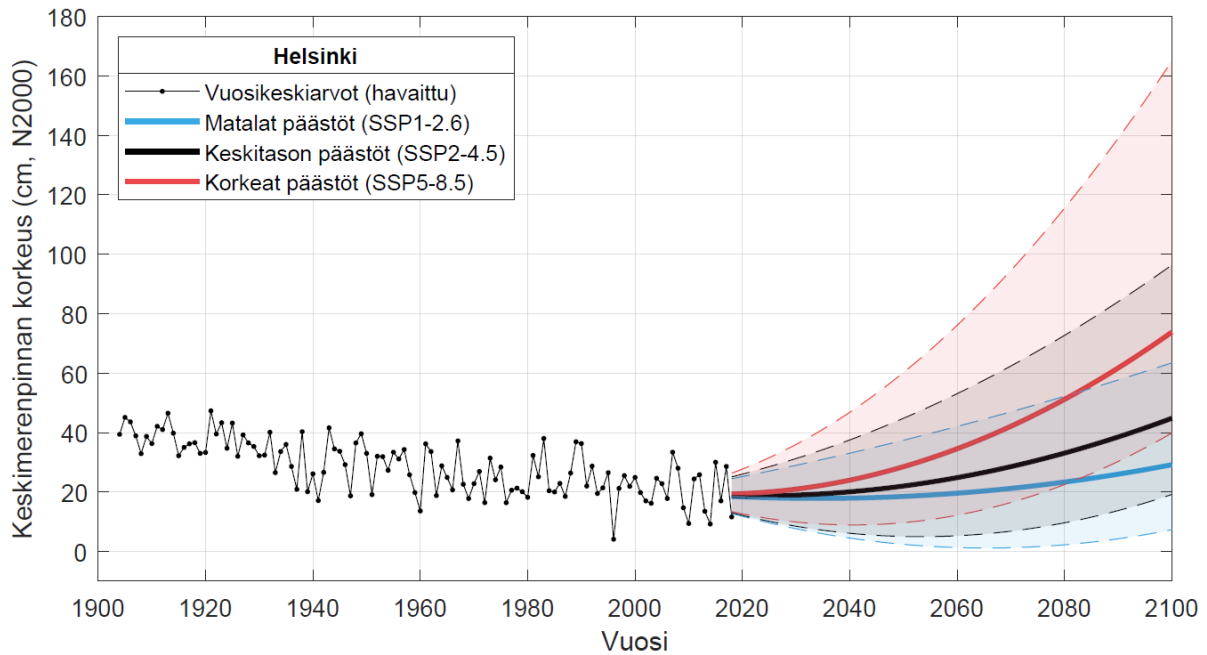
satunnaiset vaihtelut vaikuttavat niihin paljon. Kaikissa tapauksissa mallitulosten keskiarvoa voidaan kuitenkin pitää todennäköisempänä vaihtoehtona kuin jakauman ääripäitä.



Kuva 16. 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.

Keskimääräisen helleilmaston muutosten ohella tutkittiin myös kaikista kovimpien hellejaksojen esiintymisiä. Kuvassa 16 on näytetty, kuinka usein lämpenemisen eri tasoilla esiintyy sellaisia hellejaksoja, joita oli koettu 0.5°C 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 lämpenemisen tasolla suoraan määritelmän perusteella 10 %. Ilmaston lämmitessä todennäköisyys kasvaa hyvin nopeasti: 1.0°C tasolla se on n. 26 %, 1.5°C tasolla 41 % ja 2.0°C 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 lähimenneisyudessa kerran sadassa vuodessa esiintyneitä erittäin kovia hellejaksoja nähtäisiin vuosisadan keskivaiheilla vuosittain n. 17 % todennäköisyydellä eli keskimäärin joka kuudentena vuotena.

3.6. Merivedenkorkeus sekä korkean meriveden ja rankkasateiden yhdistelmätilanteet



Kuva 17. Merenpinnan keskimääräisen tason tähänastinen kehitys ja tulevaisuuden ennusteet Helsingissä kolmelle eri kasvihuonekaasuskenaariolle. Katkoviivojen rajaamat ennusteiden 5–95 % vaihteluvälit kuvaavat merenpinnan nousuennusteisiin liittyvää suurta epävarmuutta.

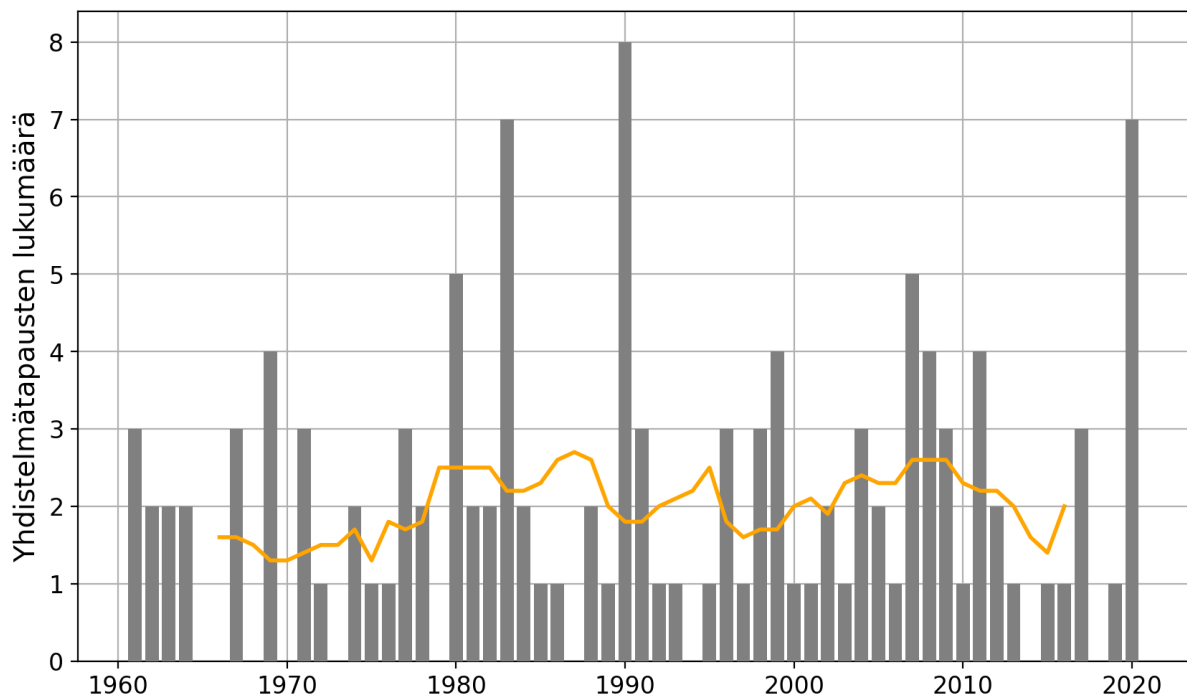
Helsingissä merenpinnan keskimääräiseen tasoon vaikuttavat merenpinnan maailmanlaajuinen nousu, maankohoaminen ja pohjoisen Atlantin alueen tuuli-ilmasto. Merenpinnan nousu johtuu ilmaston lämpenemisestä, joka aiheuttaa meriveden lämpölaajenemista ja jäätiköiden sulamista. Maankohoamisen vauhti on Helsingissä 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 17). Tulevaisuudessa on odotettavissa merenpinnan nousua. Keskimäisen 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. (2022) tutkimuksessa, josta löytyvät myös tarkemmat tulokset eri todennäköisyystasojille ja päästöskenaarioille.

Edellä sanottu koskee vain keskimääräistä merenpinnan tasoa, jonka päälle tulevat lyhytkestoisesta meriveden korkeuden vaihtelusta aiheutuvat tulvat. Merenpinnan nousu nostaa tulevaisuudessa odotettavissa olevia tulvakorkeuksia.

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 vedenkorkeutta ja vähintään 8,7 mm päivittäistä sademäärää. Kuvassa 18 on esitetty näiden 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 18. Korkean meriveden ja rankkasateiden yhdistelmätilanteiden lukumäärä vuosittain Helsingissä. Pylväät kuvaavat tilanteiden vuosittaista määrää ja oranssi viiva niiden 10-vuotista liukuvaa keskiarvoa.

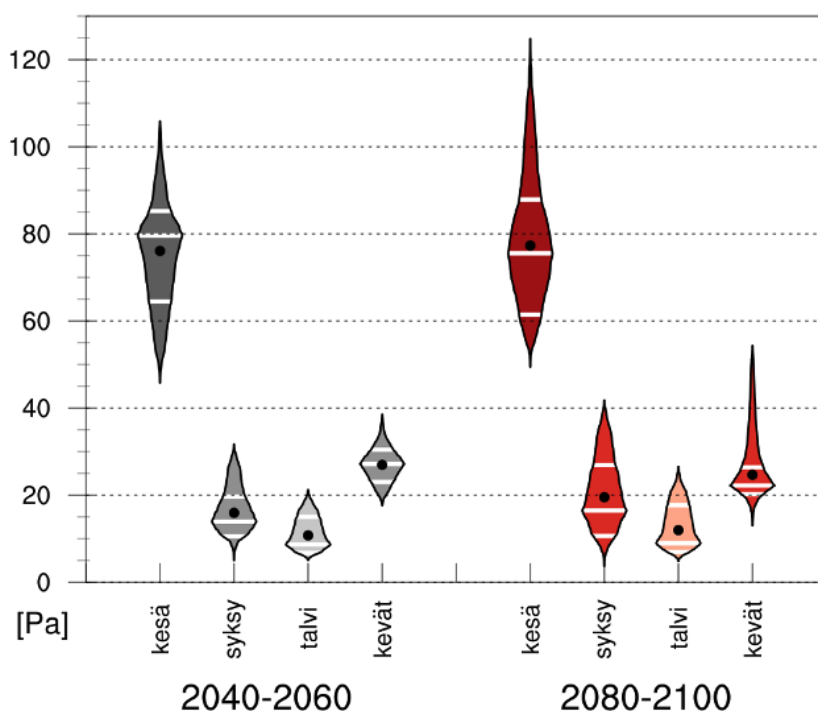
3.7. Kuivuus

Kesällä rankkasateiden lisäksi myös pitkäkestoinen kuivuus saattaa aiheuttaa ongelmia. 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.

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.

HCLIM-ilmastonmuutosmallin mukaan kuivuusjaksot pääkaupunkiseudulla pahentuisivat tulevaisuudessa erityisesti kesäisin (kuva 19), 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-ilmastonmuutosmalleilla laskettujen tulosten kanssa, joiden mukaan kesäkaudella tulevaisuudessa ei olisi juurikaan odotettavissa muutosta sateisuudessa (kuva 8) mutta toisaalta hieman enemmän auringonpaistetta (kuva 9). Myös ennustettu helteiden yleistuminen ja ankaroituminen (kuvat 14 ja 15) ovat sopusoinnussa lisääntyvän kuivuuden kanssa.



Kuva 19. Ennustetut kyllästysvajauksen muutokset (yksikkö Pascal) pääkaupunkiseudulla RCP4.5-skenaarion mukaan vuosisadan puolivälissä (vasen) ja vuosisadan lopussa (oikea) verrattuna ajanjaksoon 1985-2005. Tulokset perustuvat HCLIM-ilmastonmuutosmallin laskelmiin.

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 sopuinnussa sen kanssa, mitä ihmiskunnan aiheuttama kasvihuoneilmaston 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, jolla 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 esiintyisi 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 vähän 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 olevan erityisesti voimakkaampia eikä niiden ennusteta määrällisesti lisääntyvän. Sen sijaan niiden mukanaan tuomat sademäärät voivat lämmenneessä ilmastossa olla isompia ja tulevan talviaikaan entistä useammin vetenä kuin lumena.

Meriveden korkeuden ei ennusteta vielä vuosisadan puoliväliin mennessä nousevan juurikaan, 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 näkyvimmat 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 lämpösaarekeilmion 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 pääkaupunkiseudulla (Ruuhela et al. 2021).

Vaikka ilmastonmuutoksella siis on monia kielteisiä vaikutuksia, näköpiirissä oleva ilmastonmuutos ei muuttaisi Suomea elinkelvottomaksi maaksi asua. Maailmanlaajuisesti hallitsemattomasti etenevä ilmastonmuutos kuitenkin aiheuttaisi paljon tuhoa, esimerkiksi vaarallisia sään ääri-ilmiöitä ja eliölajien sukupuuttoaaltoa. 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 nolnaan. Tämä tarkoittaa sitä, että parhaassakin tapauksessa jonkinasteiseen muutokseen on oltava valmiita sopeutumaan.

Kirjallisuusviitteet (huom. vielä englanniksi)

- Pelikka, H., M.M. Johansson, M. Nordman, and K. Ruosteenoja, 2022. Probabilistic projections and past trends of sea level rise in Finland. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, in review. <https://doi.org/10.5194/nhess-2022-230>
- HSY, 2010: *Pääkaupunkiseudun ilmasto muuttuu. Sopeutumisstrategian 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/>.
- 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: *Ilmastonmuutos 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, 2022: Probabilistic projections and past trends of sea level rise in Finland. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, 1–27, <https://doi.org/10.5194/nhess-2022-230>.
- Ruosteenoja, K., and K. Jylhä, 2021: Projected climate change in Finland during the 21st century calculated from CMIP6 model simulations. *Geophysica*, **56**, 39–69.
- , 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).