Maa- ja metsätalous-
ministeriö

REIJA RUUHELA, TIMOTHY R. CARTER,
MIKA RANTANEN, SURAJ POLADE,
ANNA LIPSANEN, KIRSTI JYLHÄ,
TERHI K. LAURILA, ANNA LUOMARANTA,
STEFAN FAGERSTRÖM, SANNA LUHTALA,
HILPPA GREGOW

# Ilmasto- ja sosioekonomiset skenaariot ilmastonmuutokseen sopeutumisen suunnittelussa

MAA- JA METSÄTALOUSMINISTERIÖN JULKAISUJA **2023:4**

Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 2023:4

# Ilmasto- ja sosioekonomiset skenaariot ilmastonmuutokseen sopeutumisen suunnittelussa

Reija Ruuhela, Timothy R. Carter, Mika Rantanen, Suraj Polade, Anna Lipsanen, Kirsti Jylhä, Terhi K. Laurila, Anna Luomaranta, Stefan Fagerström, Sanna Luhtala, Hilppa Gregow

Maa- ja metsätalousministeriö Helsinki 2023

**Julkaisujen jakelu**
Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston julkaisuarkisto Valto**

Publikations-
arkivet Valto

julkaisut.valtioneuvosto.fi

**Julkaisumyynti**
Beställningar av publikationer

**Valtioneuvoston verkkokirjakauppa**

Statsrådets
nätbokhandel

vnjulkaisumyynti.fi

Maa- ja metsätalousministeriö
CC BY-NC-ND 4.0

ISBN pdf: 978-952-366-867-6
ISSN pdf: 1797-397X

Taitto: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2023

**Kuvailulehti**
24.2.2023

# Ilmasto- ja sosioekonomiset skenaariot ilmastonmuutokseen sopeutumisen suunnittelussa

**Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 2023:4**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Julkaisija** | Maa- ja metsätalousministeriö | | |
| **Tekijä/t** | Reija Ruuhela, Timothy R. Carter, Mika Rantanen, Suraj Polade, Anna Lipsanen, Kirsti Jylhä, Terhi K. Laurila, Anna Luomaranta, Stefan Fagerström, Sanna Luhtala, Hilppa Gregow | | |
| **Yhteisötekijä** | Ilmatieteen laitos, Suomen ympäristökeskus | | |
| **Kieli** | suomi | **Sivumäärä** | 43 |

**Tiivistelmä**

Ilmastonmuutoksen vaikutukset eri toimialoilla ovat usein seurausta usean meteorologisen tekijän ja niiden muuttumisen yhteisvaikutuksesta yhdistettynä haavoittuvuuteen ja altistumiseen. Raportissa kuvataan skenaarioita valittujen meteorologisten tekijöiden yhdistelmistä, ja kehys, joka integroi ilmasto- ja sosioekonomisia skenaarioita Suomessa.

Tulevaisuuden muutoksia termisessä kasvukaudessa ja kuivuusriskissä tutkittiin erittäin korkean resoluution ilmastomallilla ja kuivuusindeksillä (VPD), joka yhdistää ilman lämpötilaa ja kosteutta. Vuosisadan loppuun mennessä kasvukausi pitenee, mutta kuivuuden lisääntyminen rajoittaa saatavia hyötyjä kaikkialla Suomessa.

Maailmanlaajuisten CMIP6-ilmastomallien avulla tutkittiin talvisin kertyvää pakkassummaa ja vesisateiden yleistymistä keskitalvella yhdistämällä lämpötila- ja sademääräskenaarioita. Pakkassummat vähenevät absoluuttisesti eniten Lapissa, mutta suhteellisesti eniten Etelä- ja Länsi-Suomessa. Keskimääräisen päästöskenaarion mukaan Helsingissä yli 60 % ja Rovaniemellä 20 % talvisateista tulisi vuosisadan lopussa vetenä.

Kansalliset sosioekonomiset kehityspolut, jotka perustuvat maailmanlaajuisiin sosio-ekonomisiin kehityspolkuihin (SSP), ovat saatavilla maa- ja elintarvikealalle sekä sosiaali- ja terveysalalle. Maakunnallisten, järjestelmätason SSP-pohjaisten skenaarioiden ja narratiivien yhteiskehittäminen on alkuvaiheessa.

**Klausuuli** Julkaisun sisällöstä vastaavat kirjoittajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta maa- ja metsätalousministeriön näkemystä.

**Asiasanat** ilmastonmuutokset, sopeutuminen, skenaariot, kasvukausi, kuivuus, ilmastoskenaariot, sosio-ekonomiset skenaariot, pakkassumma

| | | | |
|---|---|---|---|
| **ISBN PDF** | 978-952-366-867-6 | **ISSN PDF** | 1797-397X |
| **Julkaisun osoite** | https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-366-867-6 | | |

**Presentationsblad**
24.2.2023

# Klimat och socioekonomiska scenarier för klimatförändringens anpassnignsplaner

**Jord- och skogsbruksministeriets publikationer 2023:4**

**Utgivare** Jord- och skogsbruksministeriet

**Författare** Reija Ruuhela, Timothy R. Carter, Mika Rantanen, Suraj Polade, Anna Lipsanen, Kirsti Jylhä, Terhi K. Laurila, Anna Luomaranta, Stefan Fagerström, Sanna Luhtala, Hilppa Gregow

**Utarbetad av** Meteorologiska Institutet, Finlands miljöcentral

**Språk** finska **Sidantal** 43

**Referat**

Klimatförändringarnas effekter inom olika sektorer beror ofta på en interaktion mellan flera meteorologiska faktorer, tillsammans med sårbarhet och exponering. I denna rapport beskrivs scenarier med kombinationer av meteorologiska faktorer och en referensram som integrerar klimatrelaterade och socioekonomiska framtidsscenarier i Finland.

Framtida förändringar i vegetationsperioden och risken för torka undersöktes med hjälp av en klimatmodell med mycket hög upplösning och ett index som beskriver torkan (VPD) som kombinerar luftens temperatur och fukt. Vegetationsperioden kommer att bli längre före utgången av århundradet, men den ökade torkan begränsar fördelarna med denna utveckling överallt i Finland.

Med hjälp av globala CMIP6-klimatmodeller undersöktes den köldsumma som uppstår under vintern och ökat regn under midvintern. Detta gjordes genom att kombinera temperatur- och nederbördsscenarier. Resultaten visar att köldsummorna absolut sett minskar mest i Lappland, men proportionellt sett mest i södra och västra Finland. Enligt det genomsnittliga utsläppsscenariot kommer upp till 60 procent av nederbörden i Helsingfors och 20 procent av nederbörden i Rovaniemi att vara regn i slutet av seklet.

De nationella socioekonomiska utvecklingsvägarna som baserar sig på de globala socioekonomiska utvecklingsvägarna (SSP) är tillgängliga för jordbruks- och livsmedelssektorn samt för social- och hälsovårdssektorn. Samutvecklingen av regionala SSP-baserade scenarier och narrativ på systemnivå är i en inledande fas.

**Klausul** Innehållet i denna publikation är på författarnas ansvar och återspeglar inte nödvändigtvis jord- och skogsbruksministeriets åsikter.

**Nyckelord** klimatförändringen, anpassing, klimat scnenarier, socioekonomiska scenarier, SSP, växtsägong, torka, köldsumma

**ISBN PDF** 978-952-366-867-6 **ISSN PDF** 1797-397X

**URN-adress** https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-366-867-6

**Description sheet**
24 February 2023

## Climate and socioeconomic scenarios for climate change adaptation planning

**Publications of the Ministry of Agriculture and Forestry 2023:4**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Publisher** | Ministry of Agriculture and Forestry | | |
| **Author(s)** | Reija Ruuhela, Timothy R. Carter, Mika Rantanen, Suraj Polade, Anna Lipsanen, Kirsti Jylhä, Terhi K. Laurila, Anna Luomaranta, Stefan Fagerström, Sanna Luhtala, Hilppa Gregow | | |
| **Group author** | Finnish Meteorological Institute, Finnish Environmental Institute | | |
| **Language** | Finnish | **Pages** | 43 |

**Abstract**

Impacts of climate change in different sectors often result from joint effects of changes in several weather factors combined with vulnerability and exposure. This report describes scenarios of selected combinations of weather factors and a framework for integrating climate and socioeconomic scenarios in Finland.

Future changes in the thermal growing season and drought risk were studied using a very high-resolution climate model and a drought index (VPD) that combines temperature and humidity. The growing season will lengthen by the end of the century but increasing drought will limit the benefits of this in all parts of Finland.

Global CMIP6 climate models were used to study the sum of winter frost and increasing frequency of rain in mid-winter by combining temperature and precipitation scenarios. In absolute terms the frost sums will decrease the most in Lapland but in relative terms in southern and western Finland. Under an intermediate emission scenario, by the end of the century more than 60% of the precipitation in winter in Helsinki and 20% in Rovaniemi will fall as rain.

National socioeconomic pathways are available for the agriculture and food and social welfare and health sectors based on the global shared socioeconomic pathways (SSPs). Co-creation of regional, system-level SSP-based scenarios and narratives is in its early stages.

**Provision** The content of this publication is the responsibility of the authors and does not necessarily reflect the views of the Ministry of Agriculture and Forestry.

**Keywords** climate change, adaptation, climate scenarios, socioeconomic scenarios, SSP, growing season, drought, freezing degree days

| | | | |
|---|---|---|---|
| **ISBN PDF** | 978-952-366-867-6 | **ISSN PDF** | 1797-397X |
| **URN address** | https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-366-867-6 | | |

# Sisältö


Esipuhe ..... 7

1 Johdanto ..... 8
1.1 Maailmanlaajuiset skenaariot ilmastopolitiikan tukena ..... 8
1.2 SSP-pohjaiset ilmastoskenaariot ja sosioekonomiset kehityspolut ..... 10
1.3 Kohti kansallisia, integroituja SSP-pohjaisia ilmasto- ja sosioekonomisia skenaarioita ..... 15

2 Kansallisia skenaarioita ilmastollisten tekijöiden yhdistelmistä ..... 16
2.1 Uudet kansallisen tason ilmastonmuutosskenaariot ..... 16
2.2 Kasvukauden lämpösumma – kuumuus ja kuivuus ..... 18
2.3 Talvikausien pakkassummat ja vesisateet ..... 23

3 Kansalliset SSP-pohjaiset sosioekonomiset kehityspolut ..... 26
3.1 Esimerkkejä kansallisen tason SSP-pohjaisten sosioekonomisten kehityspolkujen hyödyntämisestä maailmalta ..... 26
3.2 Menetelmät kansallisten SSP-kehityspolkujen tuottamiseksi ..... 27
3.3 Toimialakohtaiset SSP-kehityspolut Suomessa ..... 28
3.4 Alueelliset, järjestelmätason integroidut SSP-pohjaiset ilmasto- ja sosioekonomiset skenaariot Suomessa ..... 29

4 Integroitujen ilmasto- ja sosioekonomisten skenaarioiden kehitystarpeet ..... 31

5 Yhteenveto ja johtopäätökset ..... 34

Liitekuviot ..... 36

Lähteet ..... 41

# ESIPUHE

”Ilmasto- ja sosioekonomiset skenaariot ilmastonmuutokseen sopeutumisen suunnittelussa” toteutettiin vuoden 2022 aikana tavoitteena tukea Kansallisen ilmastonmuutokseen sopeutumissuunnitelman 2030 valmistelua.

Ilmastonmuutoksen vaikutukset eri toimialoilla ovat usein seurausta usean meteorologisen tekijän yhdistelmissä tapahtuvista muutoksista. Tässä työssä Ilmatieteen laitoksen tutkijat tuottivat esimerkkeinä uusia skenaarioita tällaisista yhdistelmistä. Suomen ympäristökeskuksen tutkijat puolestaan tuottivat raporttiin kuvauksia kansallisten sosioekonomisten kehityspolkujen kehittämismenetelmistä. Työn toivotaan auttavan toimialoja integroimaan ilmastonmuutostietoja entistä konkreettisemmin osaksi toimintaansa.

Työn rahoitti maa- ja metsätalousministeriö, jossa sitä ovat ohjanneet eritysasiantuntija Karoliina Pilli-Sihvola ja neuvotteleva virkamies Kirsi Mäkinen. Lisäksi on hyödynnetty Strategisen tutkimuksen neuvoston (STN) rahoituksella toteutettavan FINSCAPES-hankkeen työtä. Pohjoismaisena yhteistyönä alueellisella ilmastomallilla (HCLIM) tuotettuja simulaatioita hyödynnettiin tässä aiempaa tarkemmalla paikkaresoluutiolla. Simulaatiot on tuotettu osana NorCP (Nordic Convection Permitting Climate Projections) projektia.

Helsinki, tammikuu 2023

**Reija Ruuhela**
Tutkija, Ilmatieteen laitos

# 1 Johdanto

## 1.1 Maailmanlaajuiset skenaariot ilmastopolitiikan tukena

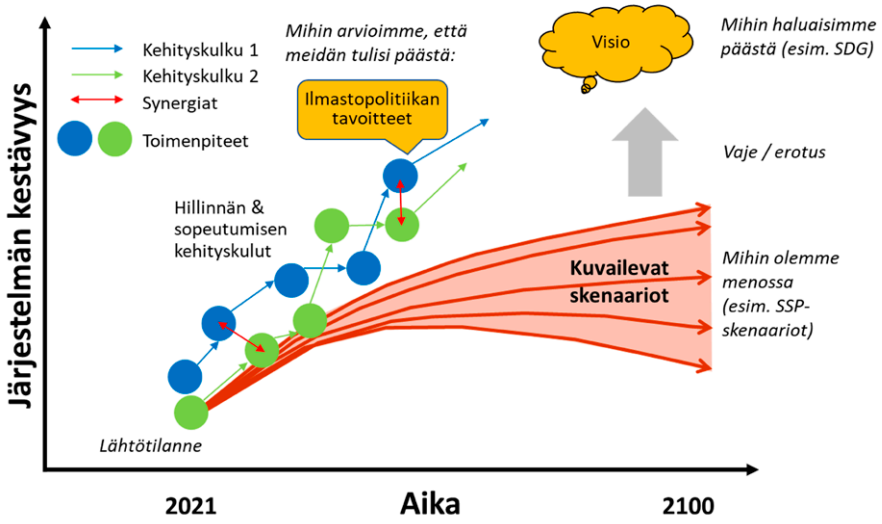
Kansainväliset ilmastonmuutoksen rajoittamiseen tähtäävät neuvottelut ja ilmastosopimukset perustuvat suurelta osin kansainvälisen tiedeyhteisön tuottamiin maailmanlaajuisiin tulevaisuuden skenaarioihin. Tulevaisuuden kehitystä voidaan kuvata kansainvälisiin sosioekonomisiin muutospolkuihin (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) pohjautuvan viitekehyksen avulla (O'Neill ym., 2017; 2020). SSP-skenaarioita tarvitaan, koska sosioekonomisten tekijöiden muutoksia on mahdotonta ennustaa luotettavasti pitkälle tulevaisuuteen.

SSP-kehityspolkuja on käytetty esimerkiksi hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (IPCC) arvioinneissa (Chen ym., 2021, Cross-Chapter Box 1.4). Ne kuvaavat sosioekonomisen kehityksen epävarmuustekijöitä, kuten väestön kokoa ja rakennetta, kaupungistumista, taloudellista kehitystä ja teknologista muutosta. Nämä tekijät ovat olennaisia kahdella tavalla: ennakoitaessa tulevia ilmastonmuutoksia sekä arvioitaessa näiden aiheuttamia riskejä ja tarvittavia sopeutumistoimia.

Tulevia ilmastonmuutoksia ennakoitaessa SSP:t ovat tärkeitä, koska sosioekonomiset trendit ja hillintätoimien kehityskulut vaikuttavat siihen, miten ihmiskunnan tuottamat kasvihuonekaasu- ja pienhiukkaspäästöt ilmakehään sekä maankäyttötavoista riippuvat hiilinielut ja -varastot voivat kehittyä tulevaisuudessa. Nämä päästöjen ja maankäytön epävarmuustekijät vaikuttavat maailmanlaajuisiin ilmastoennusteisiin erityisesti vuosisadan loppupuolella. Muita tärkeitä ilmastoennusteiden epävarmuuden lähteitä ovat ilmaston luonnollinen vaihtelu ja ilmastomalleihin liittyvä epävarmuus (Ylhäisi ym., 2015).

Ilmastonmuutokseen sopeutumistoimia arvioitaessa SSP:t yhdessä ilmastoennusteiden kanssa auttavat kuvaamaan altistumista ja haavoittuvuutta muuttuvan ilmaston riskeille sekä yhteiskunnan sopeutumiskykyä (van Vuuren ym., 2014). SSP-pohjaiset ilmasto- ja sosioekonomiset skenaariot tarjoavat integroidun, globaalin viitekehyksen ilmastonmuutosanalyysille, jota voidaan soveltaa myös Suomessa, kun kehitetään kansallisia ja paikallisia hillintä- ja sopeutumiskeinoja ja strategioita. Tässä työssä voidaan käyttää erityyppisiä skenaarioita (Kuvio 1).

**Kuvio 1.** Skenaarioiden käyttö ilmastonmuutostutkimuksessa ja -politiikassa (mukaillen Holman ym., 2017)

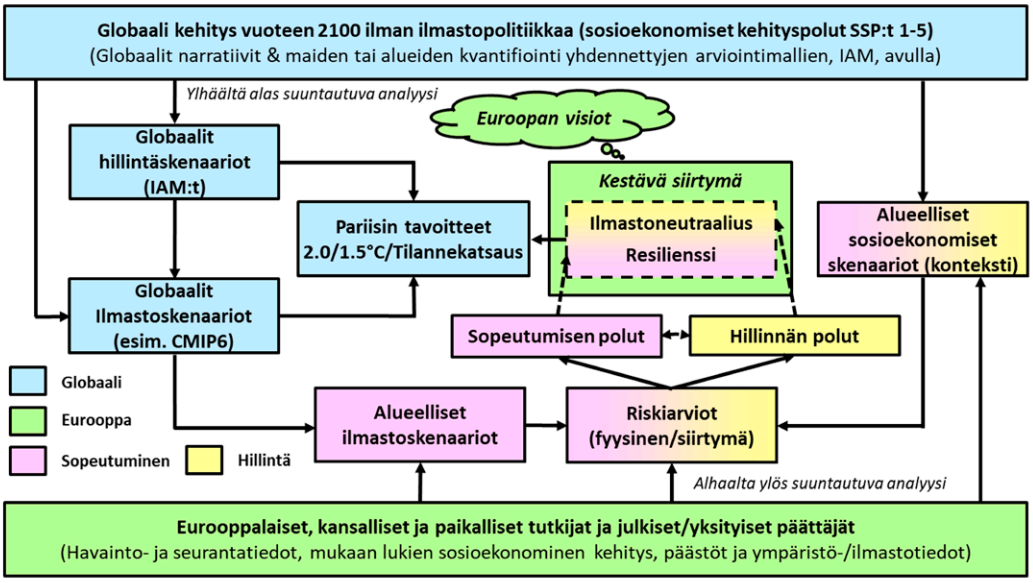



*Eksploratiiviset eli kuvailevat skenaariot* kartoittavat mahdollisia tulevaisuuden kehityssuuntia. Ne perustuvat tietoon jo tapahtuneista muutoksista ja vaihtoehtoisiin oletuksiin tulevasta kehityksestä. SSP:t ovat tällaisia skenaarioita. *Normatiiviset eli tavoitteelliset skenaariot* kuvaavat tulevaisuuden tavoitteita ja visioita, jotka yhteiskunta pyrkii saavuttamaan, tai tilanteita, joita pyritään välttämään. YK:n Pariisin sopimuksen tavoite rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu alle 2 °C ja kestävän kehityksen tavoitteet (SDG) ovat normatiivisia skenaarioita (IPCC, 2019).

Globaalit skenaariot luovat johdonmukaisen viitekehyksen esimerkiksi IPCC:n tekemille kansainvälisille arvioinneille sekä ilmastonmuutoksen tutkimukselle. Kuviossa 2. esitellään ”ylhäältä alas”- ja ”alhaalta ylös” -analyysien avulla tuotettujen skenaarioiden välisiä suhteita käyttäen esimerkkinä Euroopassa tehtyjä analyysejä.

Ylhäältä alas -analyysi (siniset alueet) tarjoaa kontekstin globaalien lämpötilatavoitteiden arvioimiseen (esim. Pariisin sopimukset tavoitteet) globaalien skenaarioiden, kuten SSP:t, avulla. Alueelliset tavoitteet ovat linjassa globaalien tavoitteiden kanssa ja ovat osa laajempaa alueellisesta kestävän kehityksen visiota (vihreät alueet). Alhaalta ylös -analyysi mahdollistaa tulevaisuuden siirtymäriskin ja fyysisen riskin tutkimisen alueellisten sosioekonomisten ja ilmastoskenaarioiden avulla. Näin voidaan rakentaa sekä sopeutumisen (vaaleanpunainen) että hillinnän polkuja (keltainen), jotka on suunniteltu saavuttamaan alueelliset ilmastotavoitteet mahdollisimman tehokkaasti riippumatta tarkastellusta sosioekonomisesta kehityksestä.

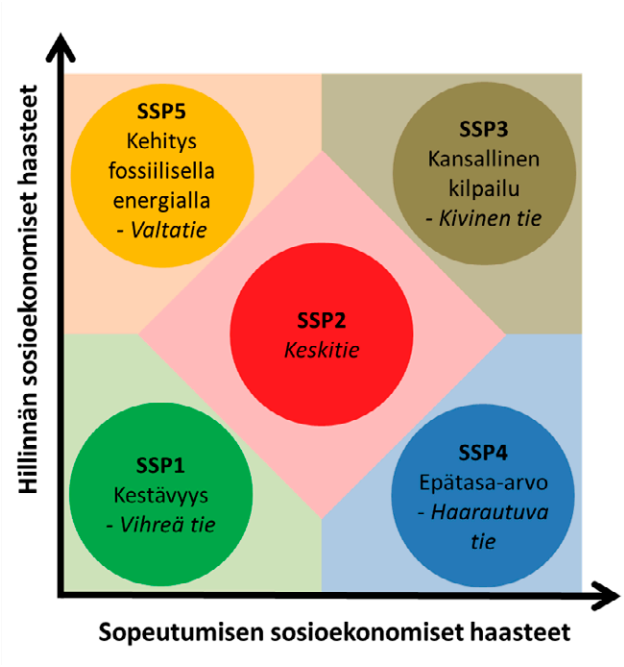
**Kuvio 2.** Ylhäältä alas ja alhaalta ylös suuntautuvien analyysien väliset suhteet alueellisesta näkökulmasta keskittyen Eurooppaan.




## 1.2 SSP-pohjaiset ilmastoskenaariot ja sosioekonomiset kehityspolut

IPCC omaksui globaalit kuvailevat skenaariot jo ensimmäisessä arviointiraportissaan vuonna 1990 ja soveltaa niitä myös uusimmissa raporteissaan (IPCC, 2021; IPCC 2022a; IPCC 2022b). Ne on suunniteltu välittämään tietoa tulevaisuuden arviointia varten laajemmin kuin vain kasvihuonepäästöjen osalta. Kansainvälisiä SSP-kehityspolkuja on viisi (kuvio 3); ne kuvaavat mahdollisia tulevaisuuden sosioekonomisia kehityskulkuja vuoteen 2100 asti ja niiden tarkoituksena on tukea ilmastonmuutoksen tutkimusta ja politiikkaa.

**Kuvio 3.** Viisi sosioekonomista kehityspolkua (SSP), jotka kuvastavat haasteita ilmastonmuutoksen hillinnässä ja sopeutumisessa. Lähteet: O'Neill ym. (2014) ja Frame ym. (2018).




## 1.2.1 Sosioekonomiset kehityspolut (SSP:t)

SSP-poluissa on sekä kvantitatiivisia elementtejä (mm. väestönkasvun, tulojen ja kaupungistumisen tarkastelu) että laadullisia tulevaisuuden kuvauksia (narratiivit ja kerronnalliset/ tarinalliset kuvaukset[1]) (O'Neill ym., 2014). Globaalit SSP-kehityspolut poikkeavat toisistaan siinä, kuinka paljon niihin liittyy sosioekonomisia ja poliittisia haasteita sekä hillinnän että sopeutumisen kannalta. Alla on kuvattu tiivistetysti globaalien narratiivien kuvaukset viidestä sosioekonomisesta kehityspolusta pohjautuen laajoihin SSP narratiiveihin (O'Neill ym. 2017):

1 Termejä narratiivi (narrative) ja kerronalliset/ tarinalliset kuvaukset (storyline) käytetään usein skenaarioiden yhteydessä tekemättä selvää eroa niiden välille. Tässä työssä käytämme kuitenkin näitä termejä eri merkityksissä seuraavasti:
- Narratiiveja käytetään SSP-kehityspolkujen yhteydessä kuvaamaan, miten erilaiset tapahtumat ja ajurit vaikuttavat toisiinsa ja mitä siitä seuraa tulevaisuudessa.
- Kerronnallisia/ tarinallisia kuvauksia käytetään konkretisoimaan muuttuvaa ilmastoa ja sen vaikutuksia tietystä valitusta näkökulmasta. Ne voivat sisältää yksityiskohtaisiakin kuvauksia ja voivat tiivistyä sanomaan tai opetukseen.

**SSP1: Kestävyys – vihreä tie.** Maailma siirtyy vähitellen kohti tulevaisuutta, jossa kestävän kehityksen tavoitteisiin sitoudutaan ja niitä pyritään aktiivisesti ja yhtenäisesti saavuttamaan. Ihmisten hyvinvointia ja tasa-arvoa painotetaan, ympäristötietoisuus lisääntyy ja yhteiskunnat siirtyvät ekologiseen, vähemmän resursseja vaativaan elämäntapaan. *Vähäisiä haasteita ilmastonmuutoksen hillinnässä ja sopeutumisessa.*

**SSP2: Keskitie.** Yhteiskunnalliset, taloudelliset ja tekniset suuntaukset eivät poikkea merkittävästi historiallisista kehityskuluista. Sosioekonominen kehitys ja tulojen kasvu etenevät epätasaisesti joidenkin maiden edistyessä suhteellisen hyvin, kun taas toiset maat jäävät kehityksessä jälkeen. *Kohtalaisia haasteita ilmastonmuutoksen hillinnässä ja sopeutumisessa.*

**SSP3: Kansallinen kilpailu – Kivinen tie.** Kansainvälinen yhteistyö ja kaupankäynti ovat katkenneet, mikä johtuu nousevasta nationalismista sekä kansallisen kilpailun ja turvallisuuden korostumisesta. Talouskehitys on hidasta, ja materialistisia arvoja korostavat kulutustottumukset ovat vallalla. Eriarvoisuutta ja äärimmäistä köyhyyttä esiintyy ja tilanne voi näiden suhteen huonontua. *Suuria haasteita ilmastonmuutoksen hillinnässä ja sopeutumisessa.*

**SSP4: Epätasa-arvo – Haarautuva tie.** Valta keskittyy pienelle eliitille, sosiaalinen yhteenkuuluvuus kärsii ja konfliktit ja levottomuudet yleistyvät. Yhteiskunnan kahtiajako syvenee esimerkiksi epätasa-arvoisten koulutusmahdollisuuksien takia. Markkinat kärsivät epävarmuudesta, mutta teknologinen kehitys on edelleen korkealla tasolla joillakin maantieteellisillä alueilla ja yhteiskunnan sektoreilla. *Vähäisiä haasteita ilmastonmuutoksen hillinnässä, mutta sopeutumisessa suuria haasteita.*

**SSP5: Kehitys fossiilisella energialla – Valtatie.** Kaupallistuminen ja markkinakeskeisyys korostuvat pitkälle integroituneilla maailmanlaajuisilla markkinoilla. Teknologinen kehitys on huipussaan ja fossiilisten polttoaineiden resursseja hyödynnetään täysimääräisesti resurssi-intensiivisen ja kulutuskeskeisen elämäntavan ylläpitämiseksi ympäristön kustannuksella. *Suuria haasteita ilmastonmuutoksen hillinnässä, mutta sopeutumisessa vähäisiä haasteita.*

SSP:t ovat viitteellisiä kehityspolkuja, ja ne sulkevat tarkoituksellisesti pois oletukset ilmastopoliittisista toimista. Tämä mahdollistaa ilmastopolitiikkatoimien lisäämisen skenaarioihin myöhemmässä vaiheessa (SPA:t, ks. termin avaus alla), jolloin politiikkatoimien tehokkuutta voidaan tutkia suhteessa yksinomaan SSP-polkuihin (Riahi ym., 2017; O'Neill ym., 2020).

SSP-kehityspolkuja voidaan käyttää kahdella tavalla skenaarioiden luomiseen. Ensinnäkin kvantifioituja SSP-polkuja voidaan käyttää tukemaan hillintäpolitiikkaa politiikkakehitystä

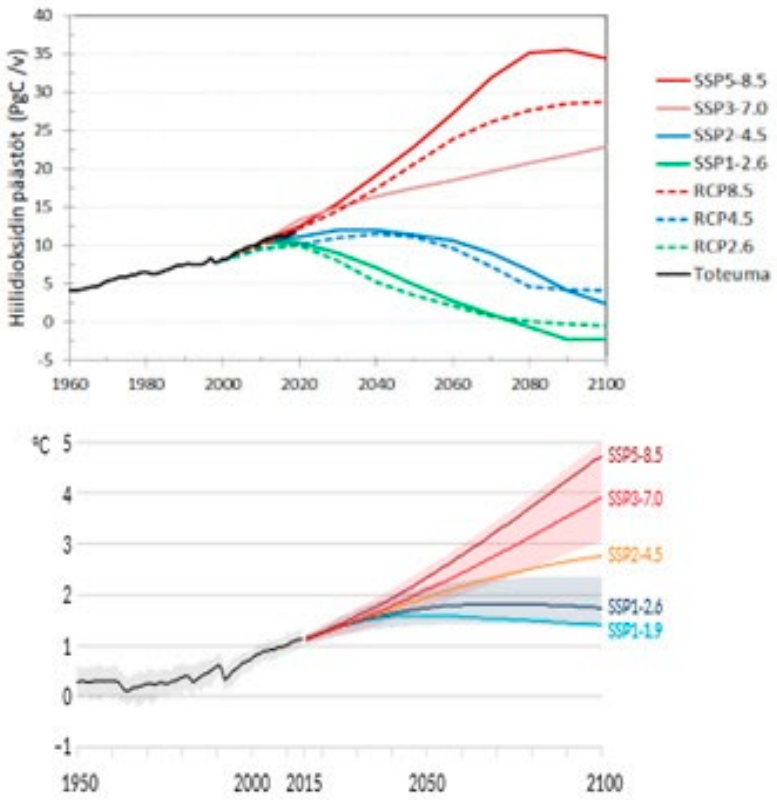
kuvaavan viitekehyksen (shared climate policy assumptions, SPA) rinnalla (Kriegler ym., 2014). Näitä kehityskulkuja käytetään yhdessä integroitujen arviointimallinnusten (integrated assessment models, IAM) kanssa, joiden avulla mallinnetaan kasvihuonekaasupitoisuuksia ja ilmakehän säteilypakotetta. Näitä tietoja syötetään globaaleihin ilmastomalleihin, jotta tulevaisuuden ilmastoa voidaan simuloida. Ilmastomallintamisessa käytetään rajallisesti SSP-SPA-yhdistelmiä ja näihin viitataan mallintamisessa käytetyn SSP:n mukaan, esimerkiksi skenaariossa SSP1-2.6 käytetään SSP1:n ja arvioidun säteilypakotteen tason (watteina neliömetriä kohti, $Wm^{-2}$) yhdistelmää, tässä esimerkissä voimakasta hillinnän kehityspolkua (Chen ym., 2021, Cross-Chapter Box 1.4). On myös hyvä huomioida, että aikaisempia ilmastomallinnuksessa käytettyjä polkuja kutsuttiin RCP-skenaarioiksi (representative concentration pathways, RCP).

Toiseksi SSP-polkujen narratiiveja voidaan käyttää tarkennettujen alueellisten tai sektorikohtaisten sosioekonomisten narratiivien luomisessa yhdessä paikallisten asiantuntijoiden ja sidosryhmien kanssa. Nämä tarkennukset ovat yksityiskohtaisempia kuin alkuperäiset globaalit narratiivit. Tarkennusten yhteydessä voidaan myös kehittää määrällisiä ennusteita, jotka ovat yhdenmukaisia narratiiveissä tunnistettujen kehityskulkujen kanssa.

### 1.2.2 SSP-pohjaiset ilmastoskenaariot

Skenaariot siitä, miten ilmasto muuttuu, perustuvat ilmastomallien avulla tuotettuihin arvioihin. Kasvihuonekaasujen päästöskenaariot vaikuttavat ilmakehäpitoisuuksien ja siten ns. säteilypakotteen kautta näihin arvioihin. Pariisin sopimuksen tavoite – maapallon keskilämpötilan nousu jäisi alle 2 °C – vaatii pienten kasvihuonekaasupäästöjen skenaariota ja kestävän kehityksen mukaista SSP1-polkua (Kuvio 4).

**Kuvio 4.** Maailmanlaajuisten hiilidioksidipäästöjen (yllä) ja maapallon keskilämpötilan (alla) kehitys eri skenaarioissa. Ylempi kuvio esittää maapallon hiilidioksidipäästöjä vuosina 1960–2100 petagrammoina (gigatonneina) eli miljardeina tonneina hiiltä vuodessa (PgC/v). Siinä yhtenäiset värilliset viivat kuvaavat nykyisin käytössä olevia SSP-skenaarioita ja katkoviivat aiemmin käytössä olleita RCP-skenaarioita mustan viivan kuvatessa jo toteutuneita päästöjä. Alempi kuvio kuvaa maapallon keskilämpötilan muutosta celsiusasteissa 1950–2100 verrattuna ajanjaksoon 1850–1900. Lämpötilan nousun määrä riippuu päästöjen määrästä. Varjostetut alueet kuvaavat muutoksen epävarmuusvälejä SSP1-2.6- ja SSP3-7.0-skenaarioille. Lähteet: muokaten Jylhä ym. 2020; Ruosteenoja ja Jylhä 2021 (yllä) sekä IPCC, 2021 (alla).




Globaalien SSP-skenaarioiden viitekehys pyrkii yhdistämään ajatuksen siitä, että ilmaston tulevaisuudet ja sosioekonomiset tulevaisuudet ovat jossain määrin linkitettyjä. Mahdollisia ilmaston ja sosioekonomisen muutoksen yhdistelmiä tulevaisuudelle on kuitenkin globaalisti monia ja näiden yhdistelmien määrä moninkertaistuu alueellisella tasolla.

## 1.3 Kohti kansallisia, integroituja SSP-pohjaisia ilmasto- ja sosioekonomisia skenaarioita

Ilmasto muuttuu eri puolilla maapalloa eri tavoin. Myös globaalit SSP-skenaariot realisoituvat kansallisella ja alueellisella tasolla eri tavoin, sillä yhteiskunnat ovat lähtökohdiltaan erilaisia. Suomessa on tuotettu kansallisesti ilmastonmuutosskenaarioita (ensimmäiset vuonna 1996), joita on hyödynnetty ilmastonmuutoksen vaikutustutkimuksissa, sopeutumisstrategiassa ja sopeutumistoimien suunnittelussa. Nämä skenaariot ovat olleet yleensä ilmastoprojektioita, mutta joihinkin skenaarioihin on sisältynyt myös sosioekonomisiin ja ympäristöllisiin tekijöihin liittyviä muutoksia, joita ennakoidaan tapahtuvan ilmastonmuutoksen yhteydessä. Skenaarioiden taustalla olevia SSP-skenaarioita ei kuitenkaan ole hyödynnetty systemaattisesti ilmastonmuutokseen sopeutumisessa.

Luvussa 3. kuvataan, miten integroituja ilmasto- ja sosioekonomisia skenaarioita voidaan tuottaa ja hyödyntää kansallisella tasolla.

# 2 Kansallisia skenaarioita ilmastollisten tekijöiden yhdistelmistä

Suomen muuttuviin olosuhteisiin liittyviä yhdistelmäriskejä on tarkasteltu ja ennakointimenetelmiä on aiemmin kehitetty tutkimuksissa, jotka liittyvät etenkin maatalouteen (Peltonen-Sainio ym., 2021), metsiin (esim. Gregow ym., 2011; Lehtonen ym., 2016; Lehtonen ym., 2019; Lehtonen ym., 2020; Venäläinen ym., 2020) ja metsänhoidon suosituksiin (Äijälä ym., 2019), energiaan sekä infrariskeihin (esim. Groenemeier ym., 2016; Kämäräinen ym., 2018; Gregow ym., 2020). Viime aikoina tutkimusta on lisätty heijastevaikutuksiin, taloudellisiin ja terveysvaikutuksiin (esim. Nurmi ym., 2019; Ruuhela ym., 2021; Uusitalo ym., 2021).

Luvuissa 2.2 ja 2.3 tarkastellaan uusia yhdistelmiä, joita ovat kuumuus ja kuivuus kasvukauden aikana sekä lämpötila ja sade talviaikana. Nämä täydentävät aiempia tarkasteluita. Niitä edeltää katsaus tuoreimpiin kansallisen tason ilmastoskenaarioihin.

## 2.1 Uudet kansallisen tason ilmastonmuutosskenaariot

Suomen ilmastonmuutosskenaariot on päivitetty vastaamaan tuoreimpien ilmastomallien tuloksia (Ruosteenoja 2021; Ruosteenoja ja Jylhä, 2021). Näiden ns. CMIP6-mallien tuloksiin perustui pitkälti myös vuonna 2021 julkaistu IPCC:n arviointiraportti. Suurin ero edellisiin, vuonna 2016 julkaistuihin Suomen ilmastonmuutosskenaarioihin verrattuna on kesien lämpötilojen voimakkaampi kohoaminen. Sademäärien muutosarviot ovat sen sijaan säilyneet jokseenkin ennallaan.

Jos kasvihuonekaasujen maailmanlaajuisia päästöjä onnistutaan rajoittamaan edes välttävästi (SSP2-4.5-skenaario), Suomen keskilämpötilat nousisivat jaksolla 2070–2099 talvisin 2–7 °C ja kesäisin 1–5 °C verrattuna jaksoon 1981–2010 (Kuvio 5a). Muutokset maan pohjoisosassa ovat suurempia kuin maan eteläosassa. Talvipuolella vuotta uudet lämpötilan muutosennusteet eivät juuri poikkea aiemmista, mutta kesäkuukausina uusimmat mallit ennustavat lähes asteen verran voimakkaampaa lämpenemistä.

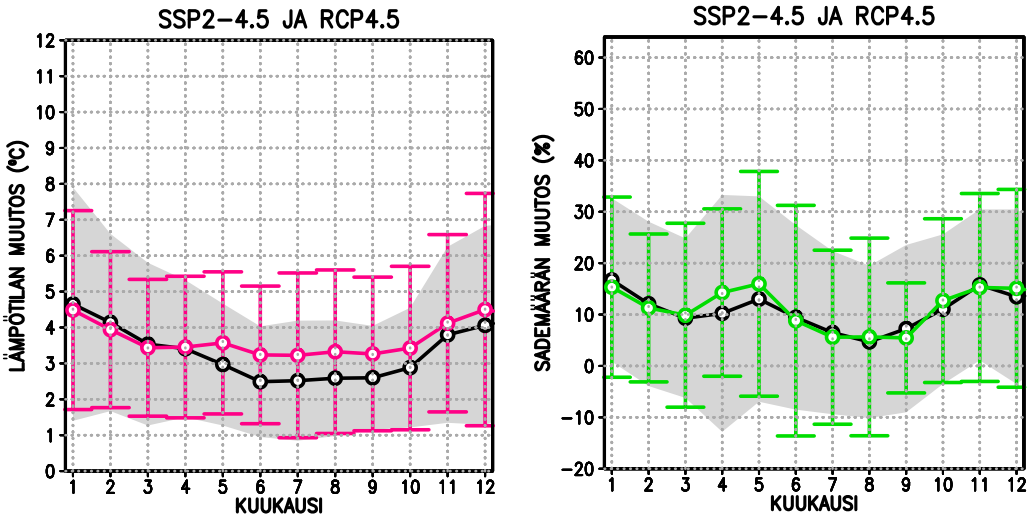
Sademäärät todennäköisesti lisääntyvät kaikkina vuodenaikoina, parhaan arvion mukaan keskitalvella 15 % ja loppukesällä 5 % (kuvio 5b). Mallitulosten erot huomioon ottaen varsinkin Etelä-Suomessa kesän sademäärät voivat kuitenkin pysyä suunnilleen entisellään tai

jopa hiukan vähentyä. Uudet sade-ennusteet ovat käytännössä samoja kuin mitä edellinenkin mallisukupolvi tuotti.

Auringonsäteilyä saataneen maanpinnalle tulevaisuudessa kesällä muutama prosentti nykyistä enemmän ja talvella taas hiukan vähemmän. Edellisen mallisukupolven tuloksista auringonsäteilyn muutoksen arviot poikkeavat läpi vuoden 1–4 prosenttiyksikköä valoisampaan suuntaan. Niinpä ennustettu talvien pimeneminen on nyt lievempää ja aurinkoisen kesäsään yleistyminen vahvempaa kuin aiemmissa arvioissa.

Tuulen keskimääräisen nopeuden muutokset Suomen maa-alueilla ovat pieniä. Itämerellä tuulten ennakoidaan hiukan voimistuvan tammi-huhtikuussa. Tuulituhot maa-alueilla liittyvät tyypillisesti tuulen puuskaisuuteen, eivät niinkään keskimääräiseen tuuleen. Niinpä tuulta tulisi aina tarkastella vaikutuksia tuottaviin ilmiöihin liittyen riittävän tarkalla ajallisella ja paikallisella erotuskyvyllä.

**Kuvio 5.** Ilmastomallien ennustama Suomen (a) kuukausikeskilämpötilojen (°C) ja (b) sademäärien (%) muutos jaksosta 1981–2010 jaksoon 2070–2099). Värilliset käyrät esittävät uuden CMIP6-sukupolven mallin tuottamien muutosten keskiarvoa ja pystyjanat muutoksen 90 %:n epävarmuusväliä. Vastaavat aiempiin malleihin perustuvat muutosarviot on esitetty mustalla viivalla ja harmaalla varjostuksella. Uusien laskelmien pohjana on käytetty "keskitasoista" SSP2-4.5-kasvihuonekaasuskenaariota, jonka toteutuessa maapallon keskilämpötila olisi vuosina 2081–2100 arviolta 2,7 °C korkeampi kuin ennen teollistumisen aikaa. Aiempien muutosarvioiden taustalla oleva ns. RCP4.5-kasvihuonekaasuskenaario on vastaavanlainen (Ruosteenoja ja Jylhä, 2021) (Ks. myös Kuvio 4).



Uusimmat, CMIP6-mallisukupolven, ja aiemmin laaditut, CMIP5-mallisukupolven ilmastonmuutosarviot eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia, sillä uusissa skenaariossa yksittäisten kasvihuonekaasujen pitoisuuksien kehitys poikkeaa jonkin verran aikaisemmasta. Johtopäätöksenä on kuitenkin, että sopeutumissuunnitelmia tehtäessä aiemman CMIP5-mallisukupolven ilmastonmuutosarvioihin pohjautuva vaikutus- ja sopeutumistutkimus on edelleen käyttökelpoista. Näiden tutkimusten tuloksia on kuitenkin hyvä tarkastella myös uusimpien ilmastoskenaarioiden valossa.

## 2.2 Kasvukauden lämpösumma – kuumuus ja kuivuus

Termisen kasvukauden pituutta ja kuivuutta tutkittiin menneessä (1985–2005) ja tulevassa (2040–2060 ja 2080–2100) ilmastossa. Tutkimuksessa käytettiin paikalliselta erotuskyvyltään (3 km) erittäin hyviä NorCP-ilmastosimulaatioita (Nordic Convection Permitting Climate Projections), jotka on tuotettu alueellisella HARMONIE-Climate-ilmastomallilla. Alueellisilla ilmastomalleilla voidaan mallintaa ilmasto-olosuhteita maantieteellisesti rajatulla alueella. Tällöin alueen reunoilla ilmasto-olosuhteet tuotetaan globaalien ilmastomallien avulla.

Tähän työhön oli käytettävissä kaksi erilaista NorCP-simulaatiota, joissa alueen reunatiedot tuotettiin globaaleilla EC-EARTH- ja GFDL-CMIP5-ilmastomalleilla. Käytettävissä oli skenaario RCP8.5, joka kuvaa päästöjen voimakasta kasvua, sekä EC-EARTH-NorCP-simulaatiolle myös keskimääräistä päästöjen kasvua kuvaava RCP4.5-skenaario (Kuvio 4). Tuloksia tulkitessa on hyvä muistaa, että suurten päästöjen RCP8.5-skenaariota ei enää pidetä todennäköisenä kehityskulkuna (Hausfather ja Peters, 2020).

Kasvien kasvamisen ajanväliä kuvaavaa termistä kasvukautta käytetään mm. metsätalouden ja metsien olosuhteiden ja kasvun arviointiin. Terminen kasvukausi määritellään ajanjaksoksi, jolloin vuorokauden keskilämpötila on pysyvästi yli +5 °C. Kasvukauden pituus kuvaa siis vuorokausien määrää kasvukauden alkamisen ja päättymisen välillä. Ilmaston lämpeneminen muuttaa kasvukauden alkamis- ja päättymisajankohta sekä sen kestoa.

NorCP-simulaatioiden tulokset osoittavat, että kasvukausi tulee merkittävästi pitenemään (liitteenä olevat Kuviot S2 ja S3). Kasvukauden pitenemisen alueellinen jakauma näyttää molemmissa käytetyissä ilmastomallikokoonpanoissa samanlaiselta. Mallitulosten mukaan etelä- ja länsirannikoiden alueilla kasvukausi pitenee yli 3 kuukautta vuosisadan loppuun mennessä. Tämä tarkoittaa noin 240–270 päivän kasvukautta vuosisadan lopulla. Muilla alueilla tarkastellut kaksi ilmastomallikokoonpanoa eroavat toisistaan jossain määrin: Keski-, Itä- ja Pohjois-Suomessa GFDL-NorCP-mallissa kasvukausi pitenee enemmän kuin EC-Earth-NorCP-mallissa. Mallit näyttävät kasvukauden pitenevän keski- ja pohjoisboreaalisilla alueilla (liitteen Kuvio S1) keskimäärin 1–2 kuukautta. Koska käytössä oli ainoastaan

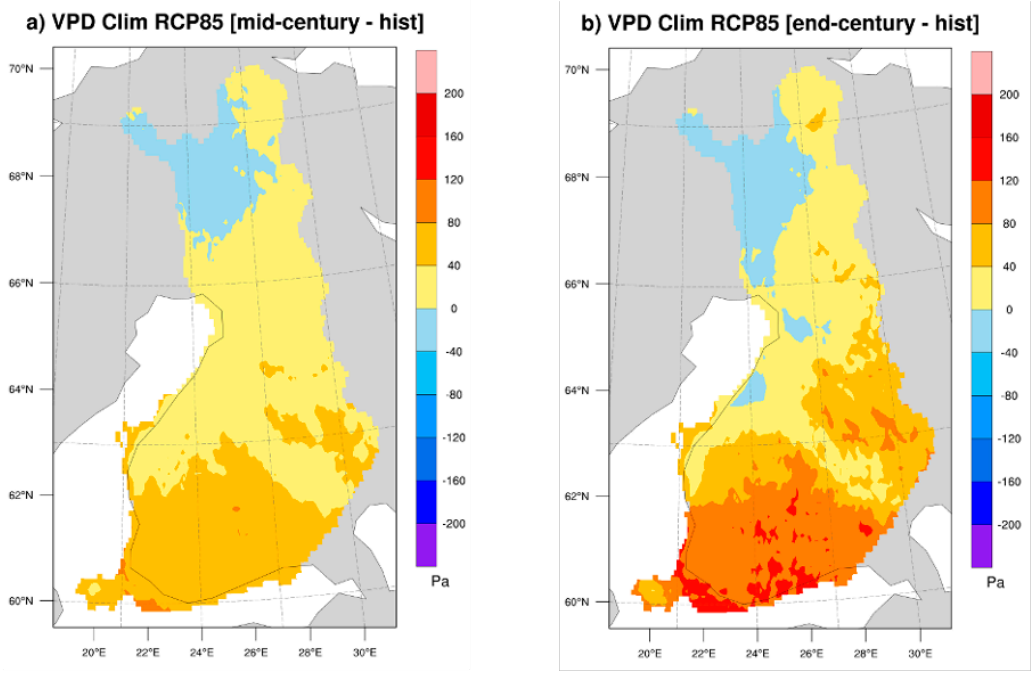
kaksi ilmastomallikokoonpanoa, tuloksista ei ole mahdollista tehdä epävarmuusarvioita. Kuitenkin mallikokoonpanoissa mukana olleet mallit EC-Earth ja GFDL edustavat CMIP5-ilmastomallien jakauman ylä- ja alarajoja. Ruosteenoja ym. (2016) totesivat erotuskyvyltään karkeampien CMIP5-ilmastomallien keskiarvon osoittavan samankaltaista kasvukauden pitenemistä kuin tässä työssä käytetyt NorCP-simulaatiot.

Kuivuuden indikaattorina tässä käytetään vesihöyryn osapaineen vajausta ilmassa (VPD = vapor pressure deficit). VPD kertoo, kuinka paljon ilmaan vielä mahtuisi vesihöyryä, ennen kuin se alkaa tiivistyä. VPD riippuu ilman lämpötilasta ja kosteudesta. Se kuvaa kuivuutta maanpinnan lähettyvillä ja vaikuttaa mm. kasvien kasvuun. Esimerkiksi, kun VPD kasvaa – eli ilmassa on vähemmän kosteutta – kasvit joutuvat ottamaan enemmän vettä juuristoistaan, mikä voi johtaa kasvien kuivumiseen ja kuolemiseen. Kuivuminen ja haihtuminen lisäävät myös metsäpaloriskiä.

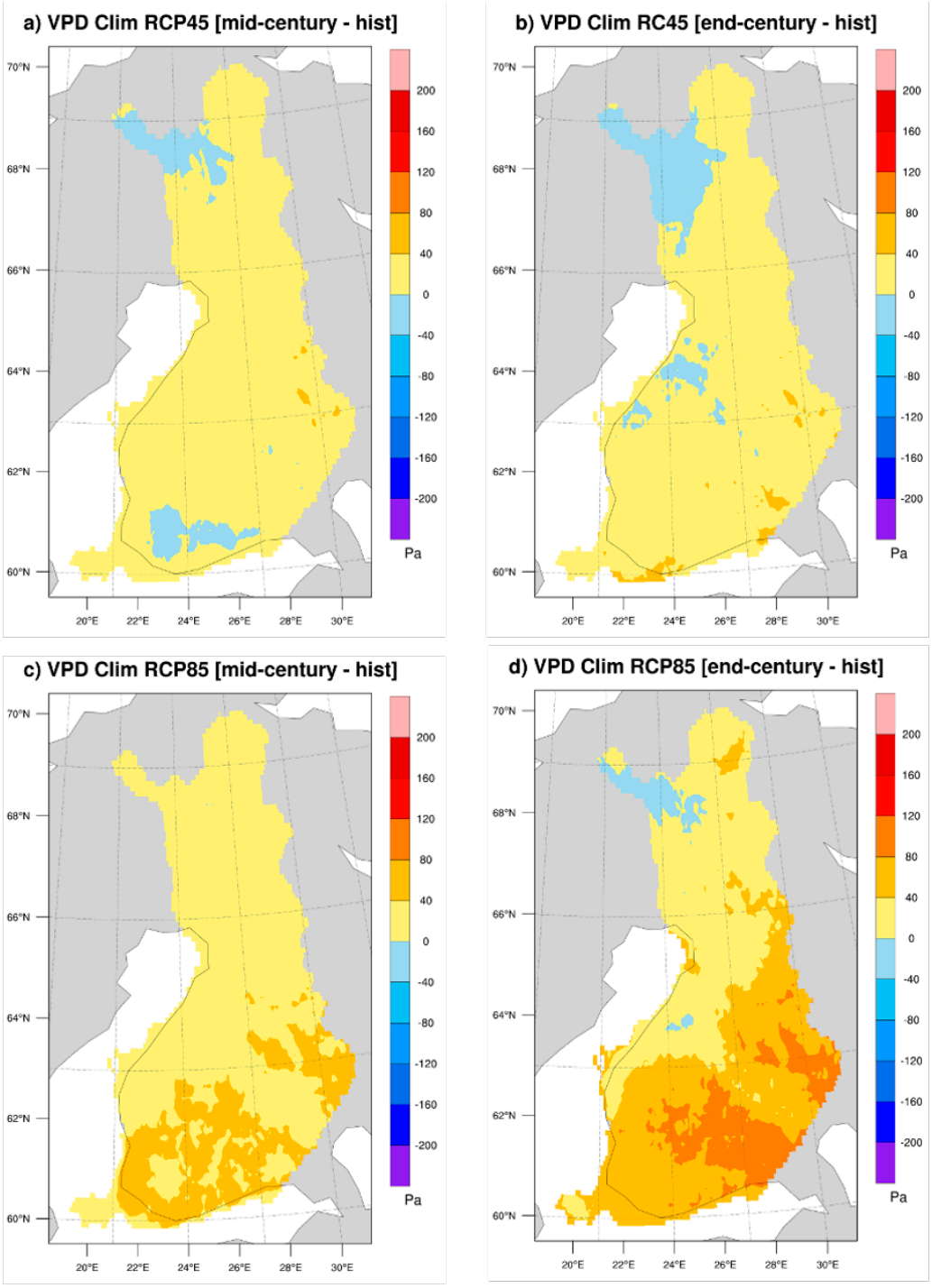
Todelliset kuivuusjaksot ovat yhdistelmiä pitkään jatkuneista korkeista lämpötiloista ja korkeasta VPD:stä. Täten VPD:tä voidaan käyttää yhtenä kuivuuden indikaattorina. Tässä työssä ei ollut mahdollista tarkastella laajemmin VPD:n suhdetta esimerkiksi maankosteuteen tai pohjaveteen Suomessa. VPD:n vaikutus rajoittuu kuitenkin maaperän ylimpään kerrokseen. Aiempien muualla tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan myös todeta, että VPD ja maankosteus liittyvät vahvasti toisiinsa maapinnan ja ilmakehän vuorovaikutuksen kautta. Vuositasolla maankosteuden ja VPD:n välillä on vahva negatiivinen korrelaatio tarkoittaen, että korkea VPD esiintyy aina yhdessä vähäisen maankosteuden kanssa (Liu ym., 2020).

**Molemmat mallikokoonpanot ja skenaariot ovat yksimielisiä siitä, että tulevaisuudessa kuivuuden indikaattori, VPD, kasvaa suurimmassa osassa Suomea lukuun ottamatta Luoteis-Suomea,** jossa VPD laskee noin 40 Pa eli pascalia (Kuviot 6 ja 7). VPD kasvaa eniten, noin 80–160 Pa, Itä- ja Etelä-Suomessa, kun taas Pohjois-Suomessa VPD kasvaa 40 Pa. Kuivuudella (VPD:llä) on selvä kausivaihtelu, ja se on suurimmillaan kesä-heinäkuussa molemmissa mallikokoonpanoissa ja skenaarioissa sekä kaikilla neljällä kasvillisuusvyöhykkeellä (Kuvio 8). Hemi- ja eteläboreaalisilla vyöhykkeillä (liitteen Kuvio S1) VPD:n kasvu on kaikkina kuukausina voimakkaampaa kuin pohjois- ja keskiboreaalisilla vyöhykkeillä. VPD kasvaa molemmissa mallikokoonpanoissa ja skenaarioissa alkukeväästä loppusyksyyn. Aiemmissa CMIP5-ilmastomallitutkimuksissa on selvinnyt, että VPD:n kasvu on pienentänyt kasvien perustuotantoa (Yuan ym., 2019). Yleisellä tasolla 80–160 Pa kasvu VPD:ssä vaikuttaa metsien kokonaiskasvuun ja kasvien tuotantoon ja voi johtaa puustokuolleisuuteen.

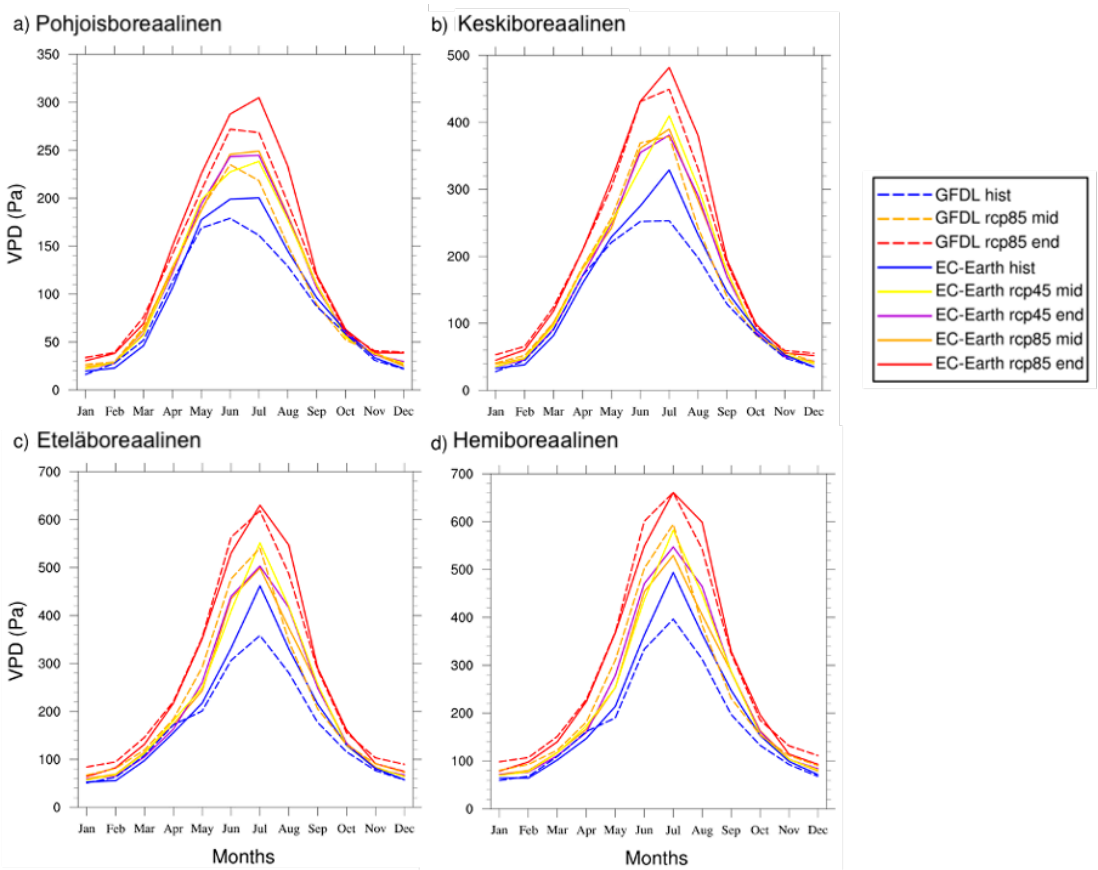
**Kuvio 6.** Kasvukauden aikaisen kuivuusindikaattorin muutos (VPD eli vesihöyryn osapaineen vajaus, yksikkö Pa) GFDL-NorCP-mallin mukaan ajanjaksoille a) 2040–2060 (vuosisadan puoliväli), b) 2080–2100 (vuosisadan loppu) verrattuna menneeseen jaksoon 1985–2005 RCP8.5-skenaarion mukaan.



**Kuvio 7.** Kasvukauden aikaisen kuivuusindikaattorin muutos (VPD eli vesihöyryn osapaineen vajaus, yksikkö Pa) EC-Earth-NorCP-mallin mukaan ajanjaksoille a, c) 2040–2060 (vuosisadan puoliväli), b, d) 2080–2100 (vuosisadan loppu) verrattuna menneeseen jaksoon 1985–2005 RCP4.5-skenaarion (ylärivi) ja RCP8.5-skenaarion (alarivi) mukaan.



**Kuvio 8.** Alueellisesti keskiarvoistettu kuivuusindikaattorin (VPD eli vesihöyryn osapaineen vajaus, yksikkö Pa) kuukausivaihtelu Suomen neljällä kasvillisuusvyöhykkeellä GFDL-NorCP-mallin (katkoviivat) ja EC-Earth-NorCP-mallin (yhtenäinen viiva) mukaan. Mennyttä ilmastoa (hist) kuvaa jakso 1985–2005 ja RCP-skenaariot on laskettu vuosisadan puoliväliin (mid, 2040–2060) ja vuosisadan loppuun (end, 2080–2100).




Yhteenvetona voidaan todeta, että RCP4.5-skenaarion mukaan vuosisadan loppuun mennessä kasvukausi pitenee, mutta kuivuuden lisääntyminen kaikilla alueilla rajoittaa pitenevän kasvukauden hyötyjä. Sopeutumistoimilla, kuten kasvivalinnoilla ja kastelulla, kuivuuden haittoja voidaan kuitenkin vähentää. RCP8.5-skenaariossa kasvukauden piteneminen ja kuivuuden lisääntyminen ovat merkittäviä. Kuivuuden lisääntyminen alkukeväästä ja loppusyksystä haittaa kasvien kasvua ja kesä-heinäkuun voimakkaasti lisääntyvä kuivuus lisää todennäköisesti kasvikuolemia ja metsäpaloja, erityisesti hemi- ja eteläboreaalisilla kasvillisuusvyöhykkeillä. Eritoten tulokset vahvistavat käsitystä kuusien kuivuusriskien kasvusta ja osoittavat kahden mallikokoonpanon avulla alueellisesti tarkemmin, missä näin voi tapahtua. Lisäksi olisi jatkossa tarkasteltava samanaikaista tuholaisriskiä, sillä pidempi ja kuivempi kasvukausi voi suosia tuholaisten leviämistä. Kasvien sairastuessa, riski tuholaisinvaasioille on yhä suurempi.

Aiempien tutkimusten perusteella äärevä kuivuus tulee Euroopassa lisääntymään sekä kuivuusjaksojen lukumäärän että kuivuuden voimakkuuden osalta. Esimerkiksi Rakovec ym. (2022) osoittivat, että tulevaisuudessa kuivuus voi Euroopassa kestää keskimäärin 3–6 kertaa pidempään kuin vuosien 2018–2020 kuivuustilanne (poikkeuksellinen kuivuus).

Pelkästään kahden eri mallikokoonpanon tuloksien perusteella ei tyypillisesti voida tehdä kovin luotettavia ilmastonmuutosennusteita. Vaikka useampia mallisimulaatioita ei tässä työssä ollut käytettävissä, lisäarvoa tuo kuitenkin NorCP-simulaatioiden erittäin korkea resoluutio, 3 km. Tällä tarkkuudella ei Suomelle ole ennen tuotettu ilmastonmuutos-arvioita. Lisäksi on tiedossa, että NorCP-simulaatiot kuvaavat erittäin hyvin veden kierto-kulkuun liittyviä muuttujia (Médus ym., 2021).

## 2.3 Talvikausien pakkassummat ja vesisateet

Talvikauden pakkasummien sekä vetenä tulevien sateiden muutoksia vuosisadan loppuun mennessä tutkittiin käyttäen maailmanlaajuisia CMIP6-ilmastomalleja (Eyring ym., 2016), joiden mukaisia perusskenaarioita Suomelle esiteltiin jo alaluvussa 2.1. Tuossa alaluvussa tarkasteltiin vain yhtä, mutta tässä alaluvussa kolmea eri SSP-ilmastonmuutosskenaariota (Riahi ym., 2017). Käytetyt ilmastonmuutosskenaariot olivat SSP1-2.6, SSP2-4.5 ja SSP5-8.5. Näistä ensimmäinen, eli SSP1-2.6. kuvaa erittäin tehokkaita päästörajoitustoimia. SSP2-4.5 kuvaa ilmastopolitiikan puolittaista onnistumista eli on melko lähellä tietä, missä todennäköisesti olemme tällä hetkellä. Viimeinen skenaario, eli SSP5-8.5, kuvaa erittäin voimakkaiden päästöjen tietä. Ilmastomallien simuloimista meteorologisista suureista tässä hyödynnettiin vuorokauden keskilämpötilaa ja sademäärää vuosilta 1961–2099.

Havaittuja pakkassummia ja talvisateita nykyilmastossa tutkittiin E-OBS-havaintoaineiston (Cornes ym., 2018) avulla. Ilmastomallien simuloimat vuorokauden keskilämpötilat korjattiin vastaamaan havaittua ilmastoa. Sademäärälle ei tehty korjauksia. Vesisateen osuus kokonaissademäärästä erotettiin vuorokauden keskilämpötilaan perustuvaa yksinkertaista menetelmää käyttäen: jos vuorokauden keskilämpötila on vähintään +0,5 °C, on sade vettä; muussa tapauksessa sade on lunta. Puolen asteen raja-arvo perustuu Vehviläisen (1992) ja Lehtosen ym. (2019) tutkimuksiin.

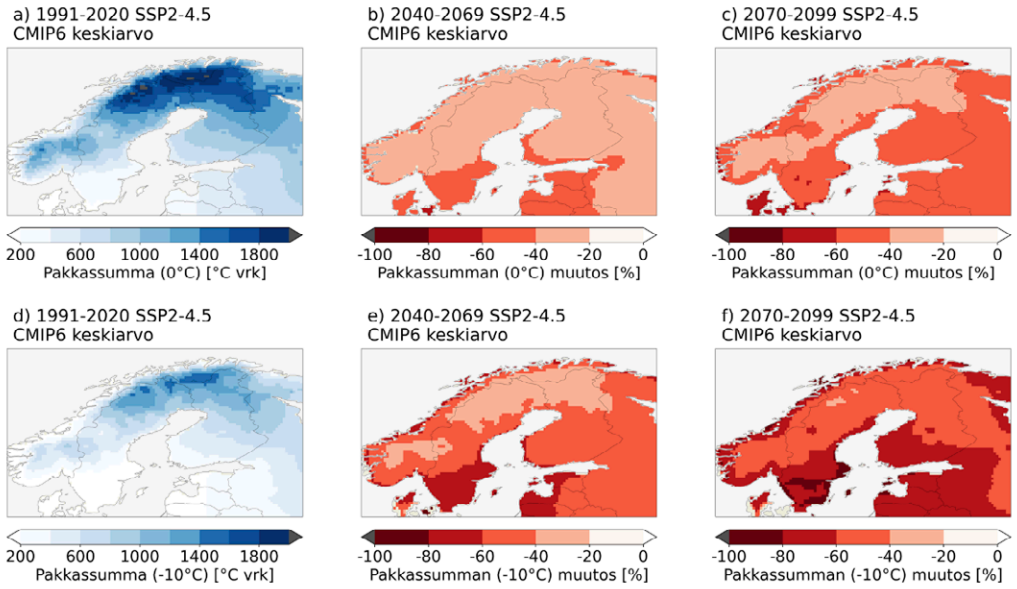
Talven pakkassumma kuvaa koko talven lämpöoloja yhdellä luvulla, joka ottaa huomioon sekä pakkasjakson pituuden että pakkasen kireyden. Tyypillisesti pakkassumma lasketaan nollan asteen raja-arvoa käyttäen, jolloin summa huomioi kaikki pakkasen puolella olevat päivät. Pakkassummia on mahdollista laskea myös alempia raja-arvoja käyttäen (esim. -10 °C), jolloin summa huomioi vain kylmät pakkaspäivät ja siten kuvaa kylmempiä olosuhteita. Kuviossa 9 on esitetty talven pakkassummia ja niiden muutoksia käyttäen kahta raja-arvoa: 0 °C ja -10 °C.

Suomessa talven pakkassumma nykyilmastossa 0 °C:n raja-arvoa käyttäen vaihtelee etelärannikon noin 400 astevuorokaudesta Pohjois-Lapin jopa 2000 astevuorokauteen (kuvio 9a). Sen sijaan kylmemmällä raja-arvolla (-10 °C) summa on Lapissa keskimäärin noin 1 400 astevuorokautta (kuvio 10d).

Vaikka tulevaisuudessa talvikauden pakkassummien absoluuttinen vähentyminen on suurinta Lapissa (liitteen Kuvio S4), niin niiden suhteellinen vähentyminen on voimakkainta eteläisessä ja läntisessä Suomessa (kuvio 8). SSP2-4.5 skenaarion mukaan vuosisadan puolivälissä pakkassumma 0 °C:n raja-arvoa käyttäen pienenee noin 30 % (kuvio 9b) ja -10 °C:n raja-arvolla 40 % (kuvio 9e) nykyilmastoon verrattuna. Vuosisadan lopussa vastaavat lukemat ovat noin 40 % ja 60 % (kuvio 9c ja 9f). Vähentyminen on suhteellisesti suurinta aivan rannikolla ja siten, että kireämmät pakkaset (-10 °C) vähenevät suhteellisesti enemmän kuin heikommat pakkaset (0 °C), koska kireämpiä pakkasia havaitaan nykyilmastossa harvemmin.

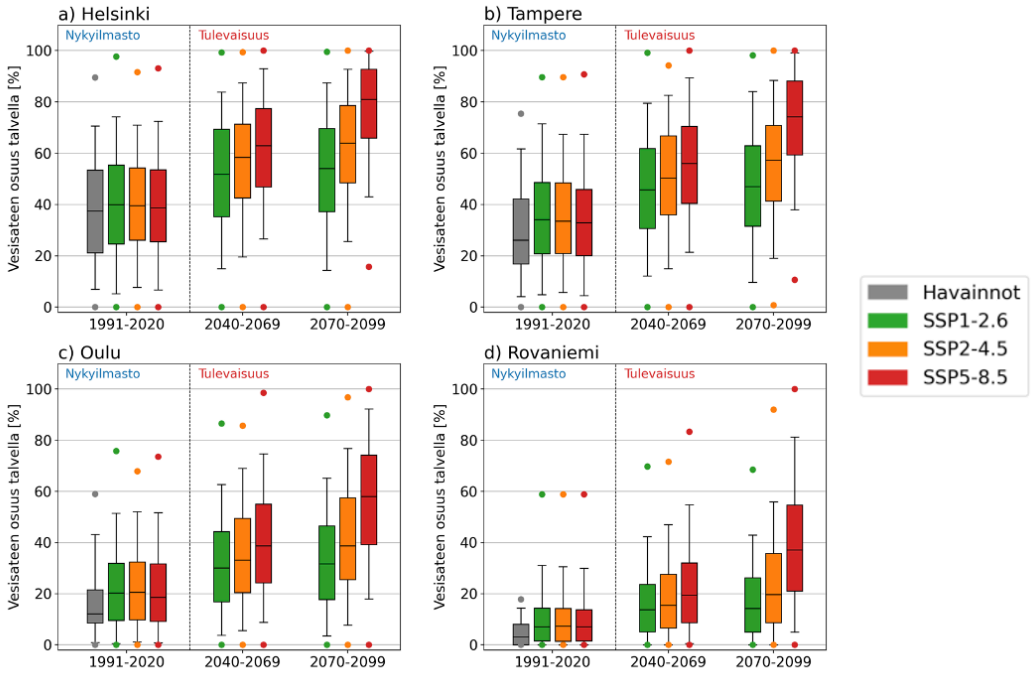
Optimistisemmassa päästöskenaariossa (SSP1-2.6) talvien leudontuminen vaikuttaisi pysähtyvän vuosisadan puoliväliin (liitteen Kuvio S5). Sen sijaan pessimistisimmässä skenaariossa (SSP5-8.5) talvet häviäisivät lähes kokonaan etelärannikolta vuosisadan lopussa (noin 80 %:n muutos, liitteen Kuvio S6c).

**Kuvio 9.** Talven pakkassummat 0 °C (ylärivi) ja -10 °C (alarivi) raja-arvoja käyttäen. Vasemmanpuoleinen sarake kuvaa nykyilmastoa (1991–2020), ja keskimmäinen ja oikeanpuoleinen sarake pakkassummien suhteellisia muutoksia vuosisadan puoliväliin (keskellä) ja vuosisadan loppuun mennessä (oikealla) SSP2-4.5-päästöskenaarion mukaan. Kuviot ovat CMIP6-ilmastomallien keskiarvoja.



Kuviossa 10 on esitetty vesisateiden osuus talven kokonaissademäärästä neljässä eri Suomen kaupungissa. Nykyilmastossa vesisateita (harmaat palkit) on etelä-pohjoissuunnassa havaittu siten, että Helsingissä (kuvio 9a) talviajan vesisateiden osuus on noin 40 %, kun taas Rovaniemellä vain muutaman prosentin (kuvio 10d). Tulevaisuudessa vesisateiden osuus riippuu päästöistä. SSP2-4.5-skenaarion mukaan (kuvio 10, oranssit palkit) vuosisadan lopussa Helsingissä jopa yli 60 % sateista tulisi vetenä (kuvio 10a) ja Rovaniemelläkin osuus nousisi 20 %:iin (kuvio 10d). Oulussa vesisateiden osuus talven sateista olisi vuosisadan lopussa 40 %, eli samaa suuruusluokkaa kuin Helsingissä nyt. Muutokset olisivat vieläkin suurempia äärimmäisimmässä päästöskenaariossa (SSP5-8.5), mutta tätä vaihtoehtoa ei pidetä todennäköisenä kehityskulkuna (Hausfather ja Peters, 2020).

**Kuvio 10.** Talvisten vesisateiden suhteellinen osuus talven (joulu-helmikuu) kokonaissademäärästä a) Helsingissä, b) Tampereella, c) Oulussa ja d) Rovaniemellä. Harmaa palkki kuvaa havaintoja nykyilmastossa (1991–2020) ja värilliset palkit ilmastomallisimulaatioita nykyilmastolle ja kahdelle tulevaisuuden ajanjaksolle (2040–2069 ja 2070–2099). Palkkien keskiviiva kuvaa jakaumien mediaania, palkkien ylä- ja alareuna kvartiiliväliä (25–75 %), ja palkeista lähtevät viivat kuvaavat 5–95 %:n prosenttipisteväliä. Jakaumien äärevimmät talvet on merkitty värillisillä ympyröillä.



# 3 Kansalliset SSP-pohjaiset sosioekonomiset kehityspolut

Maailmanlaajuisia SSP-kehityspolkuja käytetään yhä enemmän pohjana kuvaamaan vaihtoehtoisia tulevaisuuden sosioekonomisia olosuhteita kansallisella ja alueellisella tasolla. Näin pystytään tarjoamaan tärkeää kontekstuaalista tietoa tulevien ilmastonmuutosriskien arvioimiseksi ja resilienssin rakentamiseksi sekä näihin riskeihin sopeutumiseksi. Luvussa 3.1 esitellään muutamia julkaistuja tutkimuksia, joiden tarkoituksena on kehittää kansallisen tason SSP-pohjaisia sosioekonomisia polkuja. Osa tällaisten polkujen rakentamiseen käytetyistä menetelmistä on lyhyesti tiivistetty luvussa 3.2., ja luku 3.3 kuvaa esimerkkejä rakennetuista sektorikohtaisten SSP-pohjaisten kehityspolkujen rakentamisesta Suomessa. Lopuksi luvussa 3.4 käsitellään viimeaikaisia osallistavia lähestymistapoja kansallisten ja alueellisten SSP-pohjaisten integroitujen sosioekonomisten ja ilmastoskenaarioiden rakentamiseksi keskittyen yksittäisten sektoreiden sijaan järjestelmätasolle Suomessa.

## 3.1 Esimerkkejä kansallisen tason SSP-pohjaisten sosioekonomisten kehityspolkujen hyödyntämisestä maailmalta

Yhä useammat maat ovat alkaneet sisällyttää ilmastoriskien arviointia ja sopeutumista kansalliseen lainsäädäntöön hillintäpolitiikan lisäksi. Tässä yhteydessä etsitään ja kehitetään menetelmiä kuvata tulevaisuuden vaihtoehtoisia sosioekonomisia kehityskulkuja ilmastoskenaarioiden rinnalla. Vaikka kirjallisuudessa on joitain esimerkkejä kansallisen mittakaavan sosioekonomisista skenaarioista, ne on tyypillisesti tuotettu pikemminkin tutkimusprojektien yhteydessä eikä niitä ole sovellettu laajemmin kansallisesti. Ne ovat myös usein toimialakohtaisesti tai alueellisesti rajattuja. Esimerkkejä kansallisista narratiiveista ja kvantitatiivista indikaattoreista löytyy esimerkiksi Skotlannista ja Unkarista (Kok ym., 2019), väestöön ja taloudelliseen kehitykseen keskittyneistä skenaarioista Japanista (Chen ym., 2020) sekä maatalous- ja elintarviketaloudelle tehdyistä skenaarioista Suomesta (Lehtonen ym., 2021).

Kattavimmat esimerkit kansallisista SSP-skenaarioista, joita on luotu yhdessä sidosryhmien kanssa ja jotka on yhdistetty ilmastoskenaarioihin, on toteutettu Uudessa-Seelannissa (Frame ym., 2018) ja Isossa-Britanniassa (Pedde ym., 2021). Jälkimmäiset, UK-SSP:t on

tarkoitettu yhdistettäväksi Ison-Britannian virallisiin ilmastoskenaarioihin, joita käytetään tukemaan ilmastonmuutoslain edellyttämiä arvioita ilmastonmuutoksen riskeistä Isossa-Britanniassa.

## 3.2 Menetelmät kansallisten SSP-kehityspolkujen tuottamiseksi

Yleisellä tasolla voidaan erottaa kolme lähestymistapaa SSP-skenaarioiden kehittämisessä: ylhäältä alas, alhaalta ylös sekä hybridilähestymistapa (ks. kuvio 2).

*Ylhäältä alas* -lähestymistapa tarkoittaa, että lähtökohtana käytetään globaaleja SSP-skenaarioita, joista tutkijat kehittävät alueellisia ja paikallisia skenaarioita. Usein tähän sisältyy sosioekonomisten muuttujien määrällinen pienentäminen. Tässä lähestymistavassa puuttuu yleensä sidosryhmien panos, mikä tarkoittaa, että skenaariot riippuvat tutkijoiden harkinnasta, eivätkä ne välttämättä sisällä paikallisesti tärkeitä tekijöitä ja indikaattoreita. Lähestymistapa kuitenkin varmistaa johdonmukaisuuden mittakaavojen välillä ja auttaa tarkastelemaan skenaarioiden rakenteellisia elementtejä yhdenmukaisesti.

*Alhaalta ylös* -lähestymistapa viittaa osallistavaan menetelmään, jossa sidosryhmien tehtävänä on kehittää paikallisia, laadullisia sosioekonomisia skenaarioita, jotka kuvaavat relevantteja indikaattoreita osallistujien kollektiivisen asiantuntemuksen perusteella (Absar ja Preston, 2015). Tämä lähestymistapa tarjoaa skenaarioille legitimiteettiä ja näkyvyyttä ottamalla huomioon sidosryhmien erilaiset arvot ja kokemukset (Frame ym., 2018). Toisaalta se voi johtaa epäjohdonmukaisuuksiin skenaarioiden välillä, koska sidosryhmillä on omat käsityksensä siitä, mikä on tärkeää, eivätkä osallistujat välttämättä tunne riittävästi maailmanlaajuisen SSP-kehyksen perusteita. Tämä lähestymistapa vaatii paljon aikaa ja työtä ja sidosryhmien pitkäaikaista sitoutumista useisiin skenaarioiden kommentointi- ja tarkastuskierroksiin (Priess ym., 2018).

Kolmas, *hybridilähestymistapa* on yleisimmin käytetty globaaleihin SSP-skenaarioihin perustuvassa skenaarioiden kehittämisessä. Siinä yhdistetään ylhäältä alas- ja alhaalta ylös -lähestymistavan elementtejä, jolloin voidaan välttää heikkouksia, joita seuraa, jos käytetään vain jompaakumpaa menetelmää (Pedde ym., 2021). Hybridilähestymistapaa soveltamalla voidaan varmistaa, että skenaariot ovat johdonmukaisia ja paikallisesti relevantteja.

Näiden kolmen kuvatun lähestymistavan sisällä käytetään erilaisia menetelmiä varsinaiseen skenaarioiden kehittämiseen. SSP-skenaarioiden yhteistuotannossa on oleellista toimijoiden ja ilmastonmuutostutkijoiden yhteistyö. Pääasiallinen sidosryhmien osallistumismuoto on työpajat, mutta osallistamiseen voi sisältyä myös haastatteluja ja kyselyitä.

Skenaarioiden yhteistuotantoprosessi koostuu yleensä useista työpajoista. Aluksi sidosryhmät tunnistavat olennaiset sosioekonomiset tekijät ja luovat laadullisia skenaarioita, joista tutkijat kehittävät ensimmäiset skenaarioluonnokset. Näitä työstetään eteenpäin iterointiprosessin kautta, joka voi sisältää haastatteluja ja kyselyitä sekä työpajan, jonka aikana skenaarioita muokataan edelleen.

Skenaarioiden laadun varmistamiseksi on useita menetelmiä, jotka yleensä integroidaan itse skenaarioiden kehitysprosessiin. Globaalien ja paikallisten SSP-skenaarioiden yhteensopivuus ja johdonmukaisuus sekä paikallisten SSP-skenaarioiden sisäinen johdonmukaisuus tulee varmistaa. (vertikaalinen ja horisontaalinen johdonmukaisuus; Rohat ym., 2018; Mitter ym., 2020). Skenaarioiden johdonmukaisuuden ja laadun varmistus voi olla myös iteratiivinen prosessi, jonka aikana skenaarioiden kuvaukset tarkistetaan, joskus useaan kertaan.

Alueellisten SSP-skenaarioiden tuottamisen haasteet liittyvät sosioekonomisten ja ilmastollisten skenaarioiden yhdistämiseen, erityisesti niiden mahdollisiin, uskottaviin yhdistelmiin. Haasteita liittyy myös muun muassa ilmastoskenaarioiden määrään, nimeämiseen ja aikahorisonttiin. Vuosisadan loppuun ulottuvaa aikahorisonttia pidetään yleensä liian pitkänä, jotta se olisi hyödyllinen käytännön sopeutumistoimien kannalta. Niinpä usein tuotetaan skenaarioita vuosisadan puoliväliin tai porrastetusti useammalle aikavälille.

## 3.3 Toimialakohtaiset SSP-kehityspolut Suomessa

Suomessa on muutamia esimerkkejä toimialakohtaisista SSP-skenaarioista, joita on kehitetty toimialan asiantuntijoiden ja ilmastonmuutostutkijoiden yhteistyönä. Suomen maatalous- ja elintarvikesektorille kehitettiin neljän SSP:n (SSP2 pois lukien) narratiivit vuoteen 2050 ja sen jälkeen (Lehtonen ym., 2021). Työpajaan osallistui noin 40 asiantuntijaa toimialalta. Kustakin SSP:stä käytiin fasilitoituja keskusteluja viidestä toimialaan liittyvästä teemasta kuluttajien, tuottajien ja päättäjien näkökulmasta käyttäen tausta-aineistona SSP-kuvauksia Euroopalle. Tulokset osoittivat mielenkiintoisia poikkeamia eurooppalaisista ja maailmanlaajuisista narratiiveista. Tällaisia olivat ympäristön tilan korostuminen, merkittävä viljellyn maa-alan väheneminen SSP-poluissa, joissa kotieläintuotanto vähenee ja kasviperäinen ruokavalio lisääntyy, maataloustukien tarve kaikissa SSP-poluissa sekä mahdollisuudet monipuolistaa kotimaista tuotantoa rajoitetun kaupan poluissa. Myös Suomen sosiaali- ja terveysalalle kehitettiin vastaavalla menetelmällä ohjatussa, myös noin 40 asiantuntijan työpajassa narratiiveja neljään SSP-skenaarioon vuoteen 2050 asti (Carter ym., 2020). Näissä tutkimuksessa käytettiin osallistavaa hybridilähestymistapaa skenaarioiden yhteiskehityksessä.

Terveysriskejä on tarkasteltu myös luomalla kuumarasitukselle altistumisen ja haavoittuvuuden skenaarioita postinumeroalueittain (Landreau ym., 2021). Tässä skenaariotyössä käytettiin pääasiassa ylhäältä alas -lähestymistapaa hyödyntäen kansainvälisistä ja kansallisista tietokannoista saatavia datoja sekä pääkaupunkiseudulla Delphi-analyysin avulla toteutettua haavoittuvuuden määrittelyitä.

Energiasektorilla on kehitetty SSP-narratiiveja Suomen merituulivoimateollisuudelle virtuaalisessa, osallistavassa työpajassa. Näissä käytettiin neljää viidestä SSP:stä (pois lukien SSP2) kuvaamaan vaihtoehtoisia tulevaisuuden riskejä ja mahdollisuuksia kehittää offshore-energiaa Suomessa 2000-luvulla (Jenkins ym., 2022).

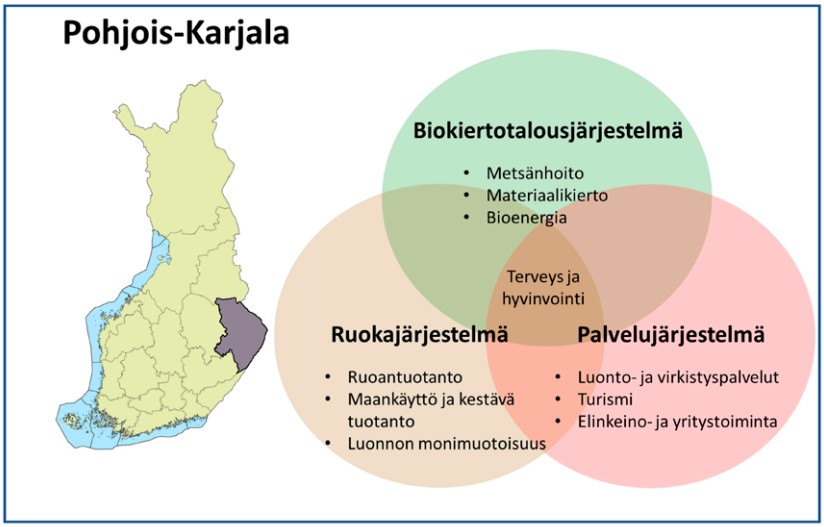
## 3.4 Alueelliset, järjestelmätason integroidut SSP-pohjaiset ilmasto- ja sosioekonomiset skenaariot Suomessa

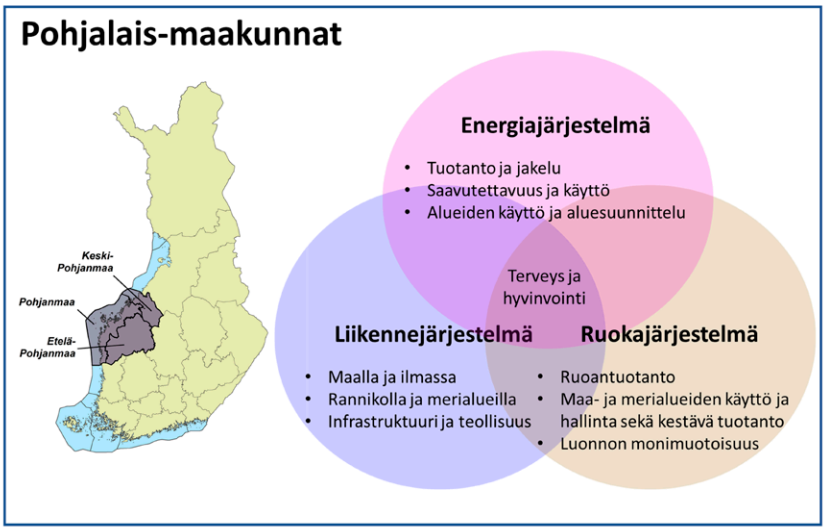
Ilmastonmuutoksen vaikutukset ja niihin vastaaminen eivät rajoitu yksittäisiin toimialoihin, vaan vaikutukset voivat levitä ja olla vuorovaikutuksessa eri toimialojen, sosiaalisten ryhmien ja hallinnollisten alueiden välillä. Näin ollen tehokkaat toimet edellyttävät kokonaisvaltaista ymmärrystä keskeisistä ilmastoriskeistä ja toimien kiireellisyydestä eri toimialoilla ja niiden välillä. Tämä koskee sopeutumis- ja hillintätoimia sekä laajemmin kestävää siirtymää. Järjestelmälähtöiset skenaariot voivat tarjota hyödyllisen kontekstin johdonmukaisille päätöksille.

Vuonna 2021 alkoi hanke, jossa luodaan alueellisia ja kansallisia, järjestelmätason integroituja SSP- ja ilmastoskenaariota Suomeen. Skenaarioiden kehittäminen poikkeaa jonkin verran edellä kuvatuista yhteiskehittämisen menetelmistä. Tässä painopiste on alueellisesti merkityksellisissä ilmastoherkissä järjestelmissä ja toimissa toimialakohtaisen lähestymistavan sijaan. Hankkeessa tuotetaan myös uusien ilmastomallitulosten pohjalta kansallisia ja alueellisia ilmastoskenaarioita, jotka tarjoavat uutta tietoa sään ääri-ilmiöistä ja eri sääilmiöiden yhteisvaikutuksista. Myös ilmastoskenaarioita havainnollistetaan laatimalla niistä sanallisia kuvauksia ja visualisointeja yhteistyössä potentiaalisten käyttäjien kanssa.

Alueellinen yhteistyö toteutetaan maakuntien ilmastoyhteistyöverkoston kanssa. Verkostolle toteutetun kyselyn ja keskusteluiden pohjalta päädyttiin kehittämään ensimmäiset alueelliset, systeemitason skenaariot Pohjois-Karjalaan sekä kolmen pohjalaismaakunnan alueelle (Pohjanmaa, Etelä-Pohjanmaa ja Keski-Pohjamaa). Tarkentavissa keskusteluissa priorisoitiin kummallekin alueelle kolme järjestelmää, joille luodaan SSP- ja ilmastoskenaarioita (Kuvio 11). Ensimmäisten työpajojen tuloksia analysoidaan vuoden 2022 aikana.

**Kuvio 11.** Työpajoissa katetut järjestelmät Pohjois-Karjalassa (yllä) ja Pohjalaismaakunnissa (alla). Lisäksi terveyttä ja hyvinvointia käsiteltiin erikseen osana kaikkia järjestelmiä.



# 4 Integroitujen ilmasto- ja sosioekonomisten skenaarioiden kehitystarpeet

Suomi kuuluu pieneen joukkoon edelläkävijämaita, joissa tutkijat ovat alkaneet luoda kansallisen tason SSP-skenaariota tulevaisuuden ilmastoriskien arviointia varten osana laajempaa globaalia SSP-kehystä. Tavoitteena on näin tukea johdonmukaista ilmastonmuutokseen sopeutumispolitiikkaa ja ilmastonmuutoksen hillintäpolitiikkaa jatkossa entistä paremmin. Skenaarioita tuotetaan myös alueellisella tasolla sekä järjestelmien ja sektoreiden sisällä ja niiden välillä. Työ on kuitenkin vasta alkuvaiheessa, ja osallistavia menetelmiä on tarpeen kehittää edelleen, jotta skenaarioista saadaan mahdollisimman käyttökelpoisia sekä tutkimukseen että ilmastonmuutokseen liittyvän päätöksenteon tueksi. Yleinen havainto sekä Suomesta että muualta on, että eri taustoista tulevien asiantuntijoiden ja ilmastonmuutostutkijoiden välisissä työpajakeskusteluissa saavutettu oppiminen ja tietoisuuden lisääntyminen on jo sinänsä arvokasta.

Skenaarioiden jatkokehittämisen kannalta on tarpeen pohtia muun muassa seuraavia kysymyksiä:

- Miten kattavasti Suomessa tulisi luoda alueellisesti ja useita toimialoja koskevia (järjestelmätason) integroituja SSP-pohjaisia skenaarioita?
- Miten kansallisten SSP-pohjaisten skenaarioiden rakentaminen tulisi toteuttaa?
- Tuovatko ilmastovaikutusten kerronnalliset kuvaukset tarvittavaa konkretiaa sopeutumistoimien suunnittelun tueksi?
- Mitä tietoja ja menetelmiä tarvitaan tulevan sosioekonomisen kehityksen määrällisten mittareiden kehittämiseen?
- Miten ilmastonmuutoksen kansainväliisiin ilmastollisiin ja sosioekonoimiisn heijastevaikutuksiin liittyvät tekijät tulisi sisällyttää uusiin skenaarioihin?
- Miten skenaarioiden muutokset ja päivitykset tulisi toteuttaa ja ottaa huomioon sopeutumisessa?
- Pitäisikö skenaarioissa olla varauksia ”villeille korteille”?
- Tarvitaanko skenaarioiden yhteiskehittämistä koskevia ohjeita?

Sosioekonomiset skenaariot tulisi yleensä sisällyttää kaikkeen ilmastonmuutokseen liittyvään skenaariotyöhön, jonka aikahorisontti on yli vuosikymmenen päähän tulevaisuuteen.

Skenaarioiden tulisi ulottua 2000-luvun puoliväliin ja joissakin tapauksissa 2000-luvun loppuun asti.

Keskeisiä sosioekonomisia indikaattoreita, joilla on merkitystä ilmastonmuutokseen sopeutumisen kannalta, olisi tarpeen määrittää osana osallistavaa skenaarioiden laatimista sekä kansallisella että alueellisella tasolla. Tällaisia indikaattoreita ovat muun muassa demografiset ja taloudelliset indikaattorit, terveydentila ja sosiaalinen asema, koulutustaso, maankäytön muutokset, teknologinen kehitys, infrastruktuurin sietokyky, valmius häiriötilanteisiin, institutionaalinen rakenne sekä kansainväliset yhteydet ja riippuvuudet.

Suomen ilmastopaneelin raportissa "Ilmastonmuutokseen sopeutumisen ohjauskeinot, kustannukset ja alueelliset ulottuvuudet" (Gregow ym., 2021) käsiteltiin alueellisia näkökohtia maakunnittain. Työtä voisi edelleen syventää SSP-skenaarioiden ja räätälöityjen ilmastotietojen avulla. Skenaarioita voidaan luoda ja tarkentaa myös alueen spesifin käyttötarkoituksen mukaan (esim. kaupungit, kunnat, kansallispuistot, vesistöalueet). Ilmastovaikutusten kuvaukset sopivat erityisen hyvin erilaisten SSP-kehityspolkujen havainnollistamiseen. Myös yksityinen sektori etsii yhä enemmän lähestymistapoja ilmastonmuutoksen torjumiseen ja kestävään kehitykseen siirtymiseen (esim. Auer ym., 2021).

Ilmastonmuutostiedon konkretisoimiseksi kansainvälinen tiedeyhteisö on alkanut tuottaa ilmastonmuutokseen ja sen vaikutuksiin liittyviä kuvauksia ja narratiiveja. Tarinalliset ilmasto- ja ilmastovaikutuskuvaukset erilaisista keskeisistä aiheista voivat auttaa käytännön sopeutumistoimien suunnittelussa. Toteutuneista tapahtumista voi ottaa oppia ja niiden avulla voi myös viestiä helpommin tulevaisuuden mahdollisista skenaarioista.

Käytännön sopeutumistoimien suunnittelussa meteorologisten tekijöiden yhdistelmät voivat jatkossa osoittautua hyödyllisemmiksi kuin arviot muutoksista yksittäisissä tekijöissä (kuten lämpötilassa), jotka ovat olleet jo pitkään tiedossa. Tässä hankkeessa tuotettiin ilmastodatasta muutamia meteorologisten tekijöiden yhdistelmäskenaarioita. Ilmastotutkijoilla ei kuitenkaan ole riittävän hyvin tiedossa, millaiset tiedot olisivat oleellisia eri toimialoilla. Niitä tulisikin suunnitella ilmastotutkijoiden ja eri toimialojen asiantuntijoiden yhteistyönä. Tässä on muutamia esimerkkejä jatkossa mahdollisesti tuotettavaksi.

- Matkailun ja terveyden ja hyvinvoinnin aloilla voitaisiin hyödyntää ihmisen kokeman termisen ilmaston muutosskenaarioita. Yleisesti käytössä olevat termiset mukavuusindeksit, UTCI (Universal Thermal Climate Index) ja PET, (Physiologially Equivalent Temperature) lasketaan ihmisen energiatasapainoon perustuen käyttäen neljää meteorologista tekijää: lämpötila, kosteus, tuulennopeus ja auringonsäteily.

- Uusiutuvan energian tuotantopotentiaalin ja energian kysynnän tueksi voitaisiin tuottaa muun muassa seuraavia yhdistelmiä:
  - pitkät pakkasjaksot ja tuulisuus talvisin
  - auringonsäteily ja tuulisuus
  - pitkät hellejaksot, auringonsäteily ja tuulisuus kesäisin
- Infrastruktuurin ylläpitämisessä ja rakentamisessa sekä maa- ja metsätaloudessa voidaan hyödyntää tietoja maaperän olosuhteiden kehittymisestä eri skenaarioissa. Näitä varten voidaan luoda yhdistelmäskenaarioita esimerkiksi lämpötilasta, maaperän kosteudesta, lumesta, roudasta ja tuulisuudesta.

Eräissä hankkeissa on toteutettu vaativia pilotteja mm. metsien ilmastoriskien hallintapalveluiden kehityksen tueksi. Säähän liittyvät pilotit voitaisiin laajentaa kattamaan myös tulevaisuuden ilmastoriskejä kytkemällä nykyiset tarkastelut ja pilottipalvelut uusiin ilmastoskenaarioihin. Etenkin ne tulisi kytkeä yhdistelmäriskeihin, kuten kuumuus ja kuivuus, talven nollan asteen ylitykset ja vesisateet, joita tässä raportissa käsiteltiin. Näin pääsisimme käsiksi riskiketjuihin, joita on jo nyt ja tulevaisuudessa.

Ilmastonmuutoksen edetessä kysyntä innovatiivisille ja uusille paikkatietopalveluille ja monien tekijöiden yhdistelmätarkastelulle ja mallituksille voi kasvaa muun muassa kaupunkien kaavoituksessa sekä uudis-, korjaus-, ja viherrakentamisessa. Ilmiökohtaista tutkimusta tarvitaan lisää myös rannikko- ja merialueiden ilmastoriskien hallintaan.

Jotta sopeutumista ja sitä tukevaa vaikutustutkimusta ja -palveluita voitaisiin kohdentaa aiempaa paremmin myös alueellisesti, tarvitaan lisää korkearesoluutioista dataa ja mallinnusta. Pohjoismainen yhteistyö tarjoaa mahdollisuuksia tällaiseen tutkimukseen, josta NorCP-simulaatioon perustuvat, kasvukauteen liittyvä skenaariot ovat esimerkkinä tässä raportissa.

# 5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Ilmastonmuutoksen edetessä sen vaikutukset alkavat näkyä entistä selvemmin. Samalla kasvaa ymmärrys siitä, miten monin eri tavoin sää ja ilmasto vaikuttavat yhteiskunnan eri aloilla, miten mutkikkaita vaikutusketjut voivat olla, ja miten tärkeää on ymmärtää laajempien, useita toimialoja kattavien järjestelmien sää- ja ilmastoriippuvuudet.

Sopeutumissuunnitelmia tehtäessä aiemman CMIP5-mallisukupolven ilmastonmuutosarvioihin pohjautuva vaikutus- ja sopeutumistutkimus on edelleen käyttökelpoista. Näiden tutkimusten tuloksia on kuitenkin hyvä tarkastella myös uusimpien ilmastoskenaarioiden valossa.

Erityisesti sosiaali- ja terveysalalla, alueidenkäytön ja luonnon monimuotoisuustoimien suunnittelussa sekä uudis- ja korjausrakentamisessa tulisi ottaa huomioon, että uusimpien laskelmien mukaan tulevaisuuden kesät lämpenevät enemmän ja muuttuvat aurinkoisemmiksi kuin aiemmissa arvioissa. Aiempiin Suomen ilmastonmuutosskenaarioihin verrattuna uusimmat mallit ennustavat lähes asteen verran voimakkaampaa lämpenemistä kesäkuukausina vuosisadan lopulla. Lisäksi edellisen mallisukupolven tuloksista auringonsäteilyn muutoksen arviot poikkeavat läpi vuoden 1–4 prosenttiyksikköä valoisampaan suuntaan.

Etenkin maa- ja metsätalouden sopeutumistoimissa tulisi ottaa huomioon, että tulevaisuudessa kasvukaudet pitenevät ja kuivuus lisääntyy, mutta auringon korkeuskulmaan kytkeytyvä valoisa aika ei muutu. Vuosisadan loppuun mennessä kasvukausi pitenee kohtalaisesti tai merkittävästi skenaariosta riippuen, mutta pitenemisestä saatavia hyötyjä rajoittaa kuivuuden lisääntyminen kaikilla alueilla. Kuivuus lisääntyy alkukeväällä ja syksyllä, mikä haittaa kasvien kasvua. Lisäksi kuivuus lisääntyy voimakkaasti keskikesällä (kesä-heinäkuussa), mikä todennäköisesti lisää kasvikuolemia ja metsäpaloja.

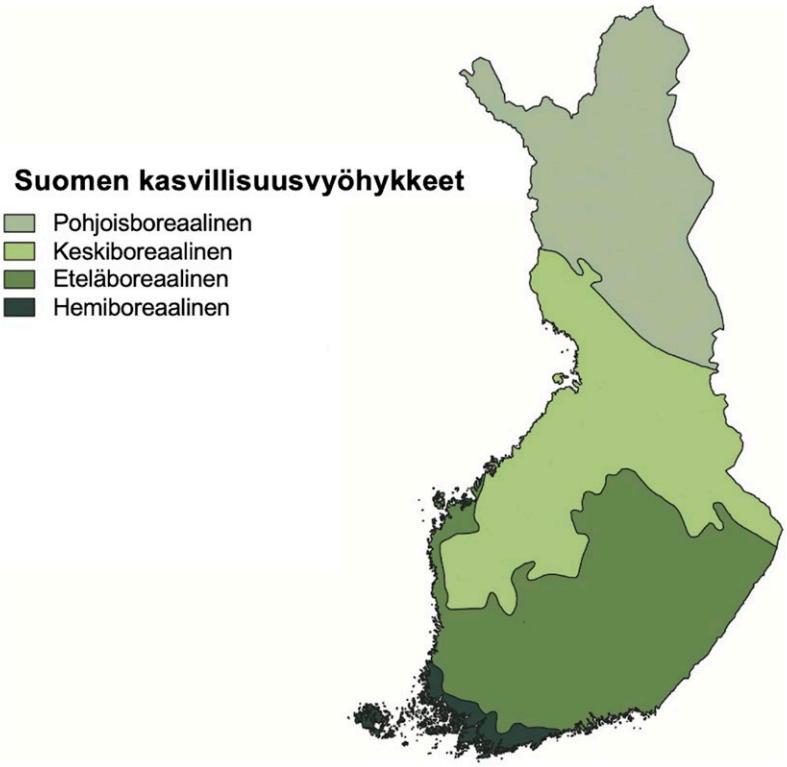
Esimerkiksi liikenteessä, rakentamisessa, energia-alalla, terveys- ja sosiaalialalla, matkailussa sekä maa- ja metsätaloudessa tulisi ottaa huomioon, että tulevaisuudessa pakkassummat vähenevät ja talviset vesisateet lisääntyvät. Pakkassummat vähenevät absoluuttisesti eniten Lapissa mutta suhteellisesti eniten Etelä- ja Länsi-Suomessa. Vähentyminen on suhteellisesti suurinta aivan rannikolla ja siten, että kireämmät pakkaset (-10 °C) vähenevät suhteellisesti enemmän kuin heikommat pakkaset (0 °C), koska kireämpiä pakkasia havaitaan nykyilmastossa harvemmin. SSP2-4.5-skenaarion mukaan Helsingissä jopa yli 60 %

sateista tulisi vuosisadan lopussa vetenä ja Rovaniemellä 20 %.Tällaisten meteorologisten tekijöiden yhdistelmäskenaarioiden avulla on helpompi seurata ilmaston ja sään vaikutuksia, ja määrittää suojaavia ja sopeutumista edistäviä toimenpiteitä aiempaa selkeämmin operatiiviseen tutkimustietoon pohjautuen. On tarpeen arvioida myös sitä, miten yhteiskunnan altistuminen, haavoittuvuus ja sopeutumiskyky voivat muuttua tulevaisuudessa. Arvioita tarvitaan, jotta voidaan ymmärtää ilmastonmuutoksen vaikutuksia ja riskejä sekä parantaa yhteiskunnan ilmastokestävyyttä. Skenaarioiden kehittäminen integroimalla vaihtoehtoiset sosioekonomiset ja ilmaston tulevaisuudet samaan kehykseen voi auttaa sopeutumispolitiikan ja -toimien suunnittelussa.

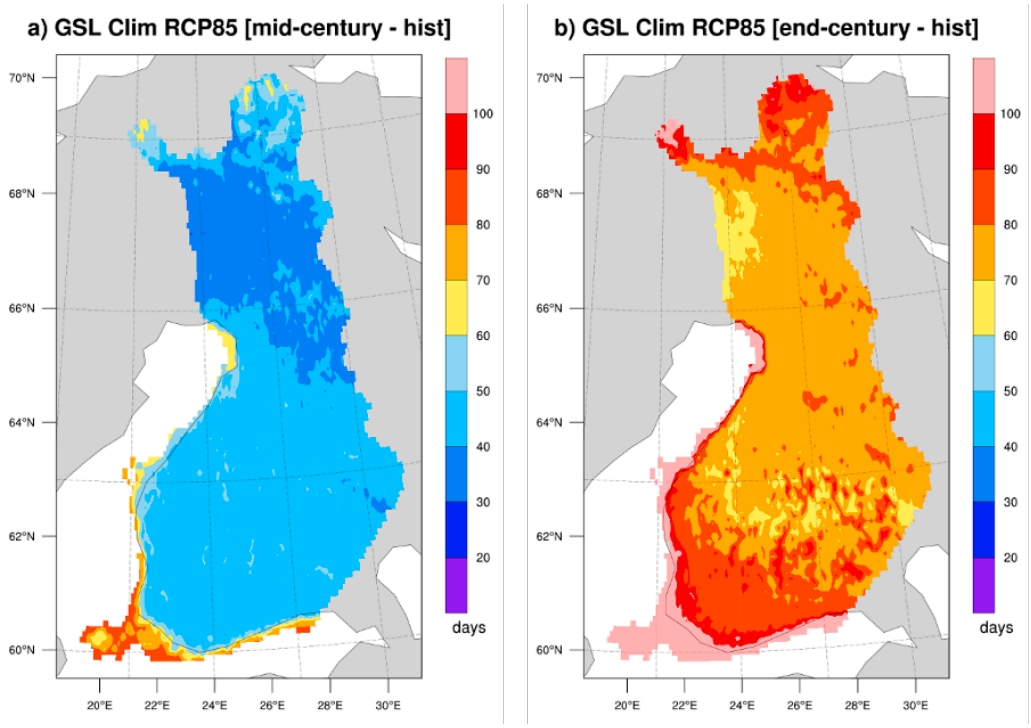
Skenaarioihin pohjautuva näkemys voi auttaa tuomaan konkretiaa käytännön sopeutumistoimien tunnistamiseksi erilaisten tulevaisuuksien varalta. Lisäksi käyttämällä kansainvälistä, laajaan tutkimustyöhön perustuvaa viitekehystä, voidaan skenaariotyön vaikuttavuutta ja tunnistettavuutta lisätä.

# Liitekuviot

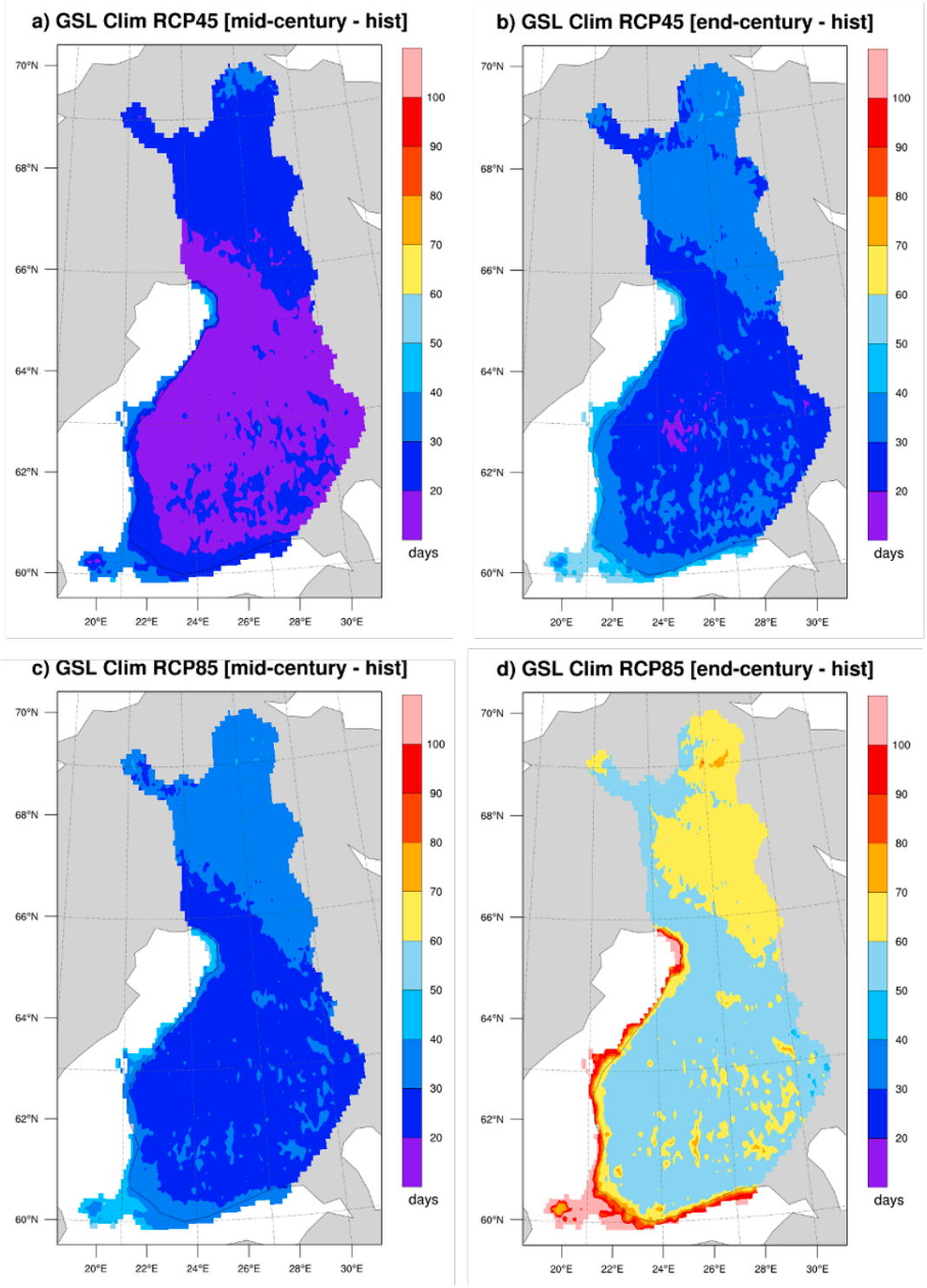
**Kuvio S1.** Suomen kasvillisyysvyöhykkeet



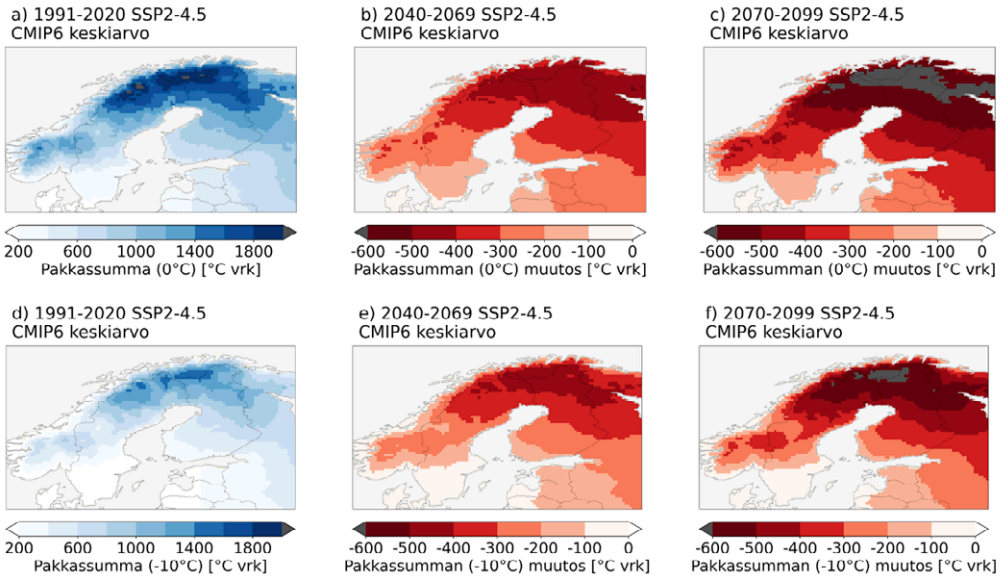
**Kuvio S2.** Kasvukauden pituuden muutos (yksikkö päiviä) GFDL-NorCP-mallin mukaan ajanjaksoille a) 2040–2060 (vuosisadan puoliväli) ja b) 2080–2100 (vuosisadan loppu) verrattuna menneeseen jaksoon 1985–2005 RCP8.5-skenaarion mukaan.



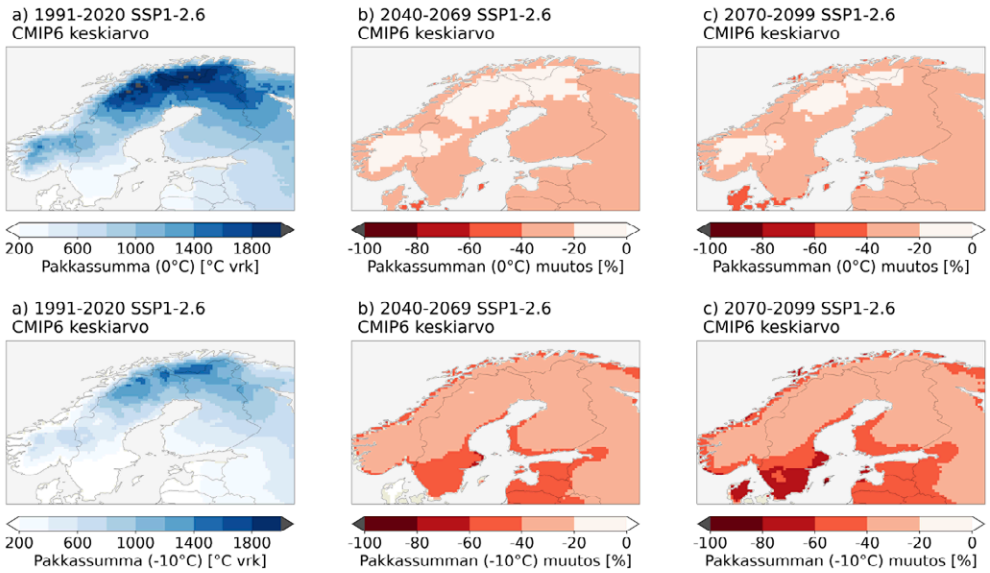
**Kuvio S3.** Kasvukauden pituuden muutos (yksikkö päiviä) EC-Earth-NorCP-mallin mukaan ajanjaksoille a,c) 2040–2060 (vuosisadan puoliväli), b,d) 2080–2100 (vuosisadan loppu) verrattuna menneeseen jaksoon 1985–2005 RCP4.5-skenaarion (ylärivi) ja RCP8.5-skenaarion (alarivi) mukaan.



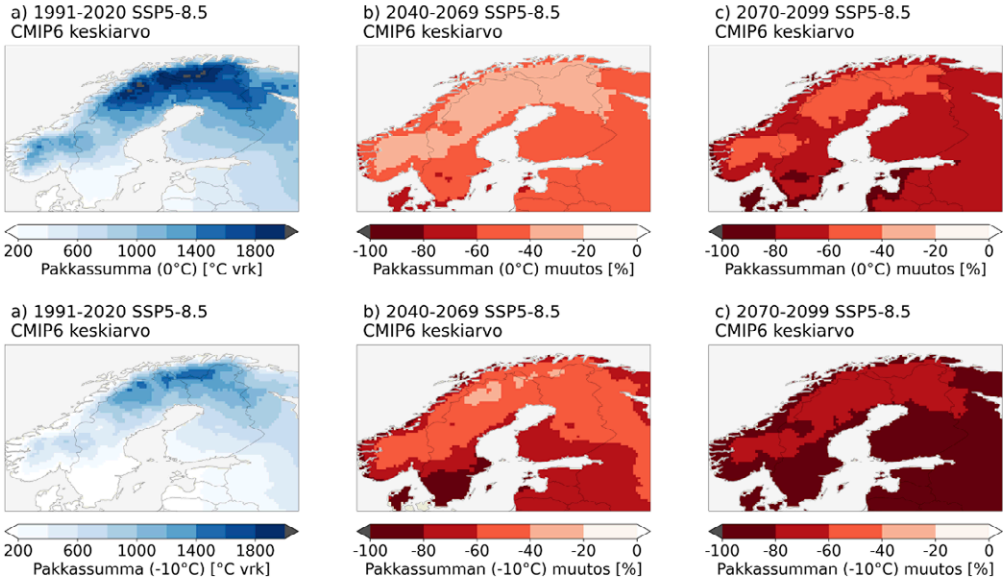
**Kuvio S4.** Sama kuin raportissa oleva kuvio 9, mutta muutokset ovat absoluuttisissa yksiköissä (astevuorokausia).




**Kuvio S5.** Sama kuin raportissa oleva kuvio 9, mutta SSP1-2.6-skenaariolle.



**Kuvio S6.** Sama kuin raportissa oleva kuvio 9, mutta SSP5-8.5-skenaariolle.



# LÄHTEET


Absar, S.M., Preston, B.L., 2015. Extending the Shared Socioeconomic Pathways for sub-national impacts, adaptation, and vulnerability studies. Global Environmental Change 33, 83-96, 10.1016/j.gloenvcha.2015.04.004.

Auer, C., Kriegler, E., Carlsen, H., Kok, K., Pedde, S., Krey, V. Müller, B., 2021. Climate change scenario services: From science to facilitating action. One Earth, 4, 1074–1082, doi:10.1016/j.oneear.2021.07.015.

Carter, T.R., Lipsanen, A., Ruuhela, R., 2020. Socioeconomic scenarios for health and social welfare in a changing climate, CHAMPS Information Sheet No. 1, p. 4, https://bit.ly/3ivTzRm.

Chen, D., M. Rojas, B.H. Samset et al., 2021. Framing, Context, and Methods. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V. et al., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 147–286, doi:10.1017/9781009157896.003.

Chen, H., Matsuhashi, K., Takahashi, K., Fujimori, S., Honjo, K., et al., 2020. Adapting global shared socio-economic pathways for national scenarios in Japan. Sustainability Science 15, 985-1000, https://doi.org/10.1007/s11625-019-00780-y.

Cornes, R. C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E. J., Jones, P. D., 2018. An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123(17), 9391-9409. https://doi.org/10.1029/2017JD028200

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., Taylor, K. E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development, 9(5), 1937-1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016, 2016

Frame, B., Lawrence, J., Ausseil, A.-G., Reisinger, A., Daigneault, A., 2018. Adapting global shared socio-economic pathways for national and local scenarios. Climate Risk Management 21, 39-51, https://doi.org/10.1016/j.crm.2018.05.001.

Gregow, H., Peltola, H., Laapas, M., Saku, S., Venäläinen, A. 2011. Combined occurrence of wind, snow loading and soil frost with implications for risks to forestry in Finland under the current and changing climatic conditions. Silva Fennica, 45(1): 35-54.

Gregow, H., Rantanen, M., Laurila, T.K., Mäkelä, A., 2020. Review on winds, extratropical cyclones and their impacts in Northern Europe and Finland. Ilmatieteen laitoksen raportteja. Raportteja – Rappoerter – Reports 2020:3. http://hdl.handle.net/10138/320298

Gregow, H., Mäkelä, A., Tuomenvirta, H., Juhola, S., Käyhkö, J., Perrels, A., Kuntsi-Reunanen, E., Mettiäinen, I., Näkkäläjärvi, K., Sorvali, J., Lehtonen, H., Hildén, M., Veijalainen, N., Kuosa, H., Sihvonen, M., Johansson, M., Leijala, U., Ahonen, S., Haapala, J., Korhonen, H., Ollikainen, M., Lilja, S., Ruuhela, R., Särkkä, J., Siiriä, S-M., 2021. Ilmastonmuutokseen sopeutumisen ohjauskeinot, kustannukset ja alueelliset ulottuvuudet. Suomen ilmastopaneelin raportti 2/2021. https://doi.org/10.31885/9789527457047

Groenemeier, P., Vajda, A., Lehtonen, I., Kämäräinen, M., Venäläinen, A., Gregow, H., Becker, N., Ulbrich., U, Napoles, O. M., Parotny, D., Pucik, T. 2016. Present and future probability of meteorological and hydrological hazards in Europe. http://rain-project.eu/wp-content/uploads/2016/09/D2.

Hausfather, Z., Peters, G. P., 2020. Emissions–the 'business as usual' story is misleading. Nature. 577, 618-620. doi: https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3

Holman, I., Audsley, E., Berry, P., Brown, C., Bugmann, H., et al., 2017. Modelling Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability in Europe, IMPRESSIONS Deliverable D3B.2, Impacts and Risks from High-End Scenarios: Strategies for Innovative Solutions (IMPRESSIONS) project (www.impressions-project.eu), Seventh Framework Programme, European Commission, p. 100

IPCC, 2019. Climate Change and Land, in: Shukla, P.R., et al. (Eds.). An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems. Special Report, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, p. 93-96, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2021/02/210202-IPCCJ7230-SRCCL-Complete-BOOK-HRES.pdf.

IPCC, 2021. Summary for policymakers, in: Masson-Delmotte, V., et al. (Eds.), 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. In Press., https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf.
IPCC, 2022a. Summary for policymakers, in: Shukla, P.R., et al. (Eds.), Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, In Press, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SPM.pdf.
IPCC, 2022b. Summary for policymakers, in: Pörtner, H.-O., et al. (Eds.), Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. In Press, https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf.
IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press
Jenkins, J., Malho, M., Hyytiäinen, K., 2022. Regionally extended shared socioeconomic pathways for the offshore wind industry in Finland. Energy, Ecol and Environ 7, 533–545. https://doi.org/10.1007/s40974-022-00252-7.
Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Böök, H., Lindfors, A., Pirinen, P, Laapas, M., Mäkelä A., 2020. Nykyisen ja tulevan ilmaston säätietoja rakennusfysikaalisia laskelmia ja energialaskennan testivuotta 2020 varten. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2020:6. https://doi.org/10.35614/isbn.9789523361287
Kok, K., Pedde, S., Gramberger, M., Harrison, P.A., Holman, I.P., 2019. New European socio-economic scenarios for climate change research: operationalising concepts to extend the shared socio-economic pathways. Regional Environmental Change 19, 643-654, https://doi.org/10.1007/s10113-018-1400-0.
Kriegler, E., Edmonds, J., Hallegatte, S., Ebi, K.L., Kram, T., et al., 2014. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared climate policy assumptions. Climatic Change 122, 401-414, https://doi.org/10.1007/s10584-013-0971-5
Kämäräinen, M., Hyvärinen, O.,Vajda, A., Nikulin, G., van Meijgaard, E.,Teichmann, C., et al., 2018. Estimatesof present-day and futureclimatologies of freezing rain in europebased on CORDEX regional climatemodels. Journal of GeophysicalResearch: Atmospheres,123, 13,291–13,304. https://doi.org/10.1029/2018JD029131
Landreau, A., Juhola, S., Jurgilevich, A., Räsänen, A., 2021. Combining socio-economic and climate projections to assess heat risk. Climatic Change 167, 12, https://doi.org/10.1007/s10584-021-03148-3.
Lehtonen, H.S., Aakkula, J., Fronzek, S., Helin, J., Hildén, M., et al., 2021. Shared socioeconomic pathways for climate change research in Finland: co-developing extended SSP narratives for agriculture. Regional Environmental Change 21, 7, https://doi.org/10.1007/s10113-020-01734-2.
Lehtonen, I., Kämäräinen, M., Gregow, H., Venäläinen, A., Peltola, H., 2016. Heavy snow loads in Finnish forests respond regionally asymmetrically to projected climate change. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 16 (10), 2259. https://doi.org/10.5194/nhess-16-2259-2016
Lehtonen, I., Venäläinen, A., Kämäräinen, M., Asikainen, A., Laitila, J., Anttila, P., Peltola, H., 2019. Projected decrease in wintertime bearing capacity on different forest and soil types in Finland under a warming climate. Hydrology and Earth System Sciences, 23(3), 1611-1631. https://doi.org/10.5194/hess-23-1611-2019
Lehtonen, I., Venäläinen, A. and Gregow, H. 2020 Ilmastonmuutoksen vaikutukset Suomessa metsänhoidon näkökulmasta. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2020:5. https://doi.org/10.35614/isbn.9789523361270
Liu, L., Gudmundsson, L., Hauser, M. et al., 2020. Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally. Nat Commun 11, 4892. https://doi.org/10.1038/s41467-020-18631-1
Médus, E., Thomasson, E. D., Belušić, D., Lind, P., Berg, P., Christensen, J. H., Christensen, O. B., Dobler, A., Kjellström, E., Olsson, J., Yang, W., 2021. Characteristics of precipitation extremes over the Nordic region: added value of convection-permitting modeling. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, December, 1–28. https://doi.org/10.5194/nhess-2021-347
Mitter, H., Techen, A.-K., Sinabell, F., et al., 2020. Shared Socio-economic Pathways for European agriculture and food systems: The Eur-Agri-SSPs. Global Environmental Change, 65, 102159. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102159
Nurmi, V., Pilli-Sihvola, K., Gregow, H., Perrels, A., 2019. Over-adaptation to Climate Change? The case of the 2013 Finnish Electricity Market Act, Economics of Disasters and Climate Change, Vol.3, forthcoming. DOI: 10.1007/s41885-018-0038-1.
O'Neill, B.C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K.L., Hallegatte, S., et al., 2014. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. Climatic Change 122, 387-400, https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2
O'Neill, B.C., Kriegler, E., Ebi, K.L., Kemp-Benedict, E., Riahi K., Rothman, D.S., van Ruijven, B.J. et al., 2017. The Roads Ahead: Narratives for Shared Socioeconomic Pathways Describing World Futures in the 21st Century. Global Environmental Change 42: 169–80. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.00

O'Neill, B.C., Carter, T.R., Ebi, K., Harrison, P.A., Kemp-Benedict, E., et al., 2020. Achievements and needs for the climate change scenario framework. Nature Climate Change, https://doi.org/10.1038/s41558-020-00952-0

Pedde, S., Harrison, P.A., Holman, I.P., Powney, G.D., Lofts, S., et al., 2021. Enriching the Shared Socioeconomic Pathways to co-create consistent multi-sector scenarios for the UK. Science of The Total Environment 756, 143172, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143172

Peltonen-Sainio, P., Juvonen, J., Korhonen, N., Parkkila, P., Filapovic, S., Sorvali, J., Mäkelä, A., Gregow, H., 2021. Climate Change, precipitation shifts and early summer drought: Irrigation tipping point for Finnish farmers? Climate Risk Management. https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100334

Priess, J.A., Hauck, J., Haines-Young, R., Alkemade, R., Mandryk, M., et al., 2018. New EU-scale environmental scenarios until 2050 – Scenario process and initial scenario applications. Ecosystem Services 29, 542-551, 10.1016/j.ecoser.2017.08.006.

Rakovec, O., Samaniego, L., Hari, V., Markonis, Y., Moravec, V., Thober, S., Hanel, M., Kumar, R., 2022. The 2018–2020 Multi-Year Drought Sets a New Benchmark in Europe, https://doi.org/10.1029/2021EF002394

Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., et al., 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. Global Environmental Change 42, 153-168, https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

Rohat, G., Flacke, J., Dao, H., van Maarseveen, M., 2018. Co-use of existing scenario sets to extend and quantify the shared socioeconomic pathways. Climatic Change 151, 619-636, 10.1007/s10584-018-2318-8.

Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A. and Kämäräinen, M., 2016. Projections for the duration and degree days of the thermal growing season in Europe derived from CMIP5 model output. International Journal of Climatology, 36: 3039-3055. https://doi.org/10.1002/joc.4535

Ruosteenoja, K., 2021. Applicability of CMIP6 models for building climate projections for northern Europe. Reports 2021:7, Finnish Meteorological Institute, doi:10.35614/isbn.9789523361416.

Ruosteenoja, K., Jylhä, K., 2021. Projected climate change in Finland during the 21st century calculated from CMIP6 model simulations. Geophysica 56, 39-69, https://www.geophysica.fi/pdf/geophysica_2021_56_1_039_ruosteenoja.pdf

Ruuhela, R., Votsis, A., Kukkonen, J., Jylhä, K., Kankaanpää, S., Perrels, A., 2021. Temperature-Related Mortality in Helsinki Compared to Its Surrounding Region Over Two Decades, with Special Emphasis on Intensive Heatwaves. Atmosphere, 12, 46, doi:10.3390/atmos12010046.

Uusitalo, R., Siljander, M., Culverwell, C.L., Hendrickx, G., Linden, A., Dub, T., Aalto, J., Sane, J., Cedric Marsboom, C., Suvanto, M. T., Vajda, A., Gregow, H., Korhonen, E.M., Huhtamo, E., Pellikka, P., Vapalahti, O., 2021. Predicting spatial patterns of Sindbis virus (SINV) infection risk in Finland using vector, host and environmental data. International Journal of Environmental Research and Public Health Int. J. Environ. Res. Public Health, 18(13), 7064; https://doi.org/10.3390/ijerph18137064

van Vuuren, D. P., Kriegler, E., O'Neill, B. C., Ebi, K. L., Riahi, K., Carter, T. R., Edmonds, J., Hallegatte, S., Kram, T., Mathur, R., & Winkler, H., 2014. A new scenario framework for Climate Change Research: Scenario matrix architecture. Climatic Change, 122(3), 373–386. https://doi.org/10.1007/s10584-013-0906-1

Vehviläinen, B., 1992. Snow cover models in operational watershed forecasting. National Board of Waters and the Environment. Vesi-ja ympäristöhallitus. http://hdl.handle.net/10138/25706

Venäläinen, A., Lehtonen, I., Laapas, M., et al., 2020.Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: A literature review. Glob Change Biol. 2020; 26: 4178– 4196. https://doi.org/10.1111/gcb.15183

Ylhäisi, J.S., Garrè, L., Daron, J., Räisänen J., 2015. Quantifying sources of climate uncertainty to inform risk analysis for climate change decision-making, Local Environment, 20:7, 811-835, DOI: 10.1080/13549839.2013.874987

Yuan, W., Zheng, Y., Ciais, P., et al., 2019. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth, Science Advances 5, 8, doi: 10.1126/sciadv.aax1396.

Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K., & Väisänen, P. (Eds.), (2019). Metsänhoidon suositukset [Forestry Recommendations]. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja. Retrieved from https://tapio.fi/wp-content/uploads/2015/06/Metsanhoidon_suositukset_ver3_netti_1709141.pdf

**Maa- ja metsätalousministeriö**

Hallituskatu 3 A, Helsinki
PL 30, 00023 Valtioneuvosto

mmm.fi

ISBN: 978-952-366-867-6 PDF

ISSN: 1797-397X PDF