



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

RAPORTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2020:5

ILMASTONMUUTOKSEN VAIKUTUKSET SUOMESSA METSÄNHOIDON NÄKÖKULMASTA

ILARI LEHTONEN
ARI VENÄLÄINEN
HILPPA GREGOW



RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS

No. 2020:5

ILMASTONMUUTOKSEN VAIKUTUKSET SUOMESSA
METSÄNHOIDON NÄKÖKULMASTA

Ilari Lehtonen
Ari Venäläinen
Hilppa Gregow

Ilmatieteen laitos
Meteorologiska institutet
Finnish Meteorological Institute

Helsinki 2020

ISBN 978-952-336-126-3 (nide)

ISBN 978-952-336-127-0 (pdf)

ISSN 0782-6079

<https://doi.org/10.35614/isbn.9789523361270>

Edita Prima Oy

Helsinki, 2020



Julkaisija Ilmatieteen laitos <i>Erik Palménin aukio 1</i> PL 503 00101 Helsinki	Julkaisusarjan nimi ja numero Raportteja 2020:5	
	Julkaisuaika Syyskuu 2020	
Tekijät Ilari Lehtonen, Ari Venäläinen ja Hilppa Gregow	Toimeksiantaja Tapio Oy	
Nimeke Ilmastonmuutoksen vaikutukset Suomessa metsänhoidon näkökulmasta		
Tiivistelmä <p>Kasvat metsät sitovat hiiltä ilmakehästä, ja metsillä on siten tärkeä rooli ilmastonmuutoksen hillinnässä. Metsät ovat myös tärkeitä virkistysalueita, ja ennen kaikkea luonnontilaisia metsiä tarvitaan pyrittäessä suojelemaan luonnon monimuotoisuutta. Toisaalta metsäteollisuus on yksi Suomen tärkeimmistä teollisuudenaloista, joten myös metsien taloudellinen merkitys Suomessa on suuri.</p> <p>Ilmastonmuutoksen edetessä ja erilaisten metsien käyttöön liittyvien intressien ristipaineessa korostuu kysymys siitä, miten metsiä voidaan hyödyntää kestäväällä tavalla. Metsänhoidon suositusten uudistamisen pohjaksi tarvitaan tietoja niin ilmastonmuutoksen suuruudesta kuin sen vaikutuksista. Tässä raportissa esitetään tämänhetkisen tietämyksen mukaiset arviot ilmastonmuutoksesta Suomessa sekä siitä, millaisia vaikutuksia muutoksella on Suomen metsiin ja metsätaloudelle.</p> <p>Viimeisten noin 150 vuoden aikana keskilämpötila on Suomessa jo kohonnut pari astetta. Tällä hetkellä lämpötila nousee Suomessa vajaan puoli astetta vuosikymmenessä. Kuluva vuosisadan puoliväliin mennessä lämpötilan odotetaan kohoavan nykyisestä noin 1–1,5 astetta lisää. Kuinka paljon lämpötila nousee edelleen vuosisadan jälkipuoliskolla, riippuu suuresti kasvihuonekaasupäästöjen tulevasta maailmanlaajuisesta kehityksestä. Suomessa lämpötilan nousu on noin kaksi kertaa nopeampaa kuin maapallolla keskimäärin. Lämpenemisen lisäksi sateiden odotetaan lisääntyvän etenkin talvikuukausina. Toisaalta kesällä kuivuus voi vaivata aiempaa useammin.</p> <p>Lämpeneminen ja ilmakehän kohonnut hiilidioksidipitoisuus ovat jo omalta osaltaan kiihdyttäneet metsien kasvua, ja tulevaisuudessa metsiemme ennustetaan kasvavan yhä rivakammin. Toisaalta lisääntyvät metsätuhot voivat osittain neutralisoida tämän kehityksen. Erityisesti kuusikot ovat alttiita paitsi monille tuhoniheuttajille, niin Etelä-Suomessa myös lisääntyvälle kuivuudelle. Tuho-ohenteisista lämpeneminen hyödyttää muun muassa kaarnakuoriaisiin lukeutuvaa kirjanpainajaa. Talvella roudan väheneminen vaikeuttaa puiden korjuuolosuhteita, mikä lisää juuristovaurioiden riskiä korjuun yhteydessä ja haittaa puunkorjuun logistiikkaa. Myös tuulituhojen riski kasvaa roudan vähenyessä.</p> <p>Kansainvälisesti tavoitteeksi on asetettu lämpenemisen rajaaminen maailmanlaajuisesti alle kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan eli 1700-luvun puolivälin ilmastoon verrattuna. Tämä edellyttäisi nopeaa maailmanlaajuisesta kasvihuonekaasupäästöjen hillintää. Toistaiseksi kasvihuonekaasujen päästöjen kasvua ei ole pystytty rajoittamaan siinä määrin, että tavoitteen toteutuminen näyttäisi todennäköiseltä, joten on syytä varautua voimakkaampaan lämpenemiseen. Pahimman skenaarion toteutuessa lämpötila voi maailmanlaajuisesti kohota jopa yli neljä astetta kuluva vuosisadan aikana.</p> <p>Yksittäisen metsänomistajan kannalta keskeistä on huolehtia metsien kasvusta ja elinvoimasta sekä pyrkiä myös tunnistamaan metsiä uhkaavat riskit, puuston ja maaston vaihtelevuus huomioita. Riskien hallinnan tueksi verkossa on saatavilla runsaasti avoimia ilmaston vaihteluita ja sään ääri-ilmiöiden esiintymistä kuvaavia tietoaineistoja sekä ennustepalveluita.</p>		
Julkaisijayksikkö Sään ja ilmastonmuutoksen vaikutustutkimus		
Luokitus (UDK) 551.322, 551.521.11, 551.521.14, 551.524.3, 551.556.1, 551.577, 551.582, 551.583.1, 624.139.26, 630*431, 632.11	Asiasanat ilmasto, ilmastonmuutokseen sopeutuminen, metsänhoito	
ISSN ja avainnimeke ISSN 0782-6079 Raportteja		
ISBN 978-952-336-126-3 (nide) 978-952-336-127-0 (pdf)	Kieli suomi (tiivistelmä myös ruotsiksi ja englanniksi)	Sivumäärä 41

Utgivare Meteorologiska institutet <i>Erik Palméns plats 1</i> PB 503 00101 Helsingfors		Publikationens serie och nummer Rapporter 2020:5
		Datum September 2020
Författare Ilari Lehtonen, Ari Venäläinen och Hilppa Gregow		Uppdragsgivare Tapio Oy
Rubrik Klimatförändringarnas konsekvenser i Finland ur skogsförvaltningens perspektiv		
Sammandrag <p>Växande skogar binder kol från atmosfären och spelar därmed en viktig roll för att mildra klimatförändringarna. Skogar är också viktiga som rekreationsområden, och framför allt behövs naturskogar för att skydda den biologiska mångfalden. Å andra sidan är skogsindustrin en av Finlands viktigaste industribranscher och skogsbrukets ekonomiska betydelse är därmed också betydande.</p> <p>Pågående klimatförändringar, samt delvis till och med motstridiga intressen gentemot skogen som uttrycks från olika sektorer i samhället, gör det viktigt att studera hur skogen kan utnyttjas på ett hållbart sätt. Information om både omfattningen och konsekvenserna av klimatförändringarna behövs för att revidera skogsvårdsrekommendationerna. I denna rapport presenterar vi en bedömning av klimatförändringarna i Finland baserat på nuvarande information och beskriver de förväntade effekterna på skog och skogsbruk.</p> <p>Under de senaste 150 åren har medeltemperaturen i Finland redan stigit med cirka 2 °C. För närvarande stiger temperaturen i Finland med nästan 0,5 °C per årtionde. I mitten av 2000-talet förväntas temperaturerna vara cirka 1–1,5 °C högre än för närvarande. Uppvärmningshastigheten under den senare hälften av 2000-talet beror till stor del på den framtida utvecklingen av de globala utsläppen av växthusgaser. I Finland är uppvärmningen ungefär dubbelt så snabb som det globala genomsnittet. Förutom uppvärmningen förväntas nederbörden att öka i framtiden, särskilt på vintern. Å andra sidan kan torka förekomma på sommaren oftare än för nuförtiden.</p> <p>Högre temperaturer och stigande koldioxidkoncentration i atmosfären har redan bidragit till att förbättra skogstillväxten. I framtiden beräknas våra skogar växa ännu snabbare. Å andra sidan kan en ökande frekvens av skogsskador delvis radera denna utveckling. Det är särskilt granskogar som är sårbara för många skadedjur, men också för torka i södra Finland. Ett exempel på ett skadedjur som kan dra nytta av uppvärmningen är granbarkborren. På vintern komplicerar en minskning av tjäle logistiken för skogsavverkning och ökar risken för rotskador under avverkningen. Risken för vindskador ökar också när tjälen minskar.</p> <p>Internationellt har målet satts att begränsa den globala uppvärmningen till mindre än 2 °C jämfört med den förindustriella tiden, dvs mitten av 1700-talet. För att uppnå målet skulle det krävas en snabb minskning av de globala utsläppen av växthusgaser. Hittills har man inte lyckats begränsa ökningen av de globala utsläppen av växthusgaser i en sådan utsträckning att det skulle verka troligt att målet kan uppnås. Därför finns det ett behov av att förbereda sig för en större uppvärmning. I värsta fall kan den globala medeltemperaturen öka med mer än 4 °C till slutet av 2000-talet.</p> <p>Det är viktigt för den enskilda skogsägaren att ta hand om skogens tillväxt och livskraft, samt att försöka identifiera riskerna som hotar skogarna, med hänsyn till variationer i bestånd och terräng. För att stödja riskhanteringen finns det flera öppna datauppsättningar om klimatvariabilitet och förekomsten av extrema väderhändelser, såväl som prognostjänster.</p>		
Publikationsenhet Forskning av väder och klimatförändringens effekter		
Klassificering (UDK) 551.322, 551.521.11, 551.521.14, 551.524.3, 551.556.1, 551.577, 551.582, 551.583.1, 624.139.26, 630*431, 632.11		Nyckelord klimat, anpassning till klimatförändringen, skogsförvaltning
ISSN och serietitel ISSN 0782-6079 Rapporter		
ISBN 978-952-336-126-3 (volum) 978-952-336-127-0 (pdf)	Språk finska (sammandrag också på svenska och engelska)	Sidantal 41

Publisher Finnish Meteorological Institute <i>Erik Palménin aukio 1</i> P.O. Box 503 00101 Helsinki, Finland		Report name and number Reports 2020:5
		Date September 2020
Authors Ilari Lehtonen, Ari Venäläinen and Hilppa Gregow		Commissioned by Tapio Oy
Title The impacts of climate change in Finland from the forest management viewpoint		
Abstract <p> Growing forests sequester carbon from the atmosphere, and hence forests have an important role in mitigating climate change. Forests are also important as recreational areas, and natural forests are needed in maintaining biodiversity. On the other hand, the economic importance of forests is substantial in Finland as the forest industry is a major contributor to wellbeing in the country. </p> <p> Ongoing climate change and the multiple contradictory interests towards forests expressed from different sectors in society make it important to study how forests can be exploited in a sustainable way. Information on the magnitude and impacts of climate change are needed in revising the forest management recommendations. In this report, we present an assessment of climate change in Finland based on current knowledge and describe the expected effects of the change on forests and forestry. </p> <p> Over the last 150 years, the mean temperature in Finland has already risen by about 2 °C. Presently, the temperature continues to increase with a rate of almost 0.5 °C per decade, and by the mid-century, temperatures in Finland are expected to be approximately 1–1.5 °C higher than at present. The rate of warming during the latter half of the 21st century will largely depend on the future evolution of global greenhouse gas emissions. In Finland, the rate of warming is about twice as large as the global average. In addition to warming, precipitation levels, particularly in winter, are expected to increase in the future. On the other hand, drought may occur in summer more frequently than at present. </p> <p> Increasing temperature and rising atmospheric carbon dioxide concentration have already contributed to accelerating forest growth. In the future, our forests are projected to grow even more rapidly. On the other hand, an increasing frequency of forest damages may partly overrule this development. Particularly, spruce forests are vulnerable to many insect pests but in southern Finland also to drought. An example of a pest benefitting from the warming is the European spruce bark beetle. In winter, reduction of soil frost complicates the logistics of forest harvesting and increases the risk of root damage during the harvest. The risk of wind damage also increases as the soil frost decreases. </p> <p> Internationally, the goal is to limit global warming to less than 2 °C compared to pre-industrial era, i.e., the mid-18th century. This would require rapid global mitigation of greenhouse gas emissions. So far, limiting the increase in global greenhouse gas emissions has not been adequately successful so that reaching the target would seem likely. Thus, there is a need to be prepared for a more severe warming. In the worst case, the temperature could rise even by more than 4 °C globally by the end of the 21st century. </p> <p> From the forest owner viewpoint, it is important to take care of the growth and vitality of the forest stands and to identify the risks threatening the stands, taking into account the variability of the stands and the terrain. To support risk management, there are available several open data sets on climate variability and the occurrence of extreme weather events, as well as forecasting services. </p>		
Publishing unit Weather and Climate Change Impact Research		
Classification (UDK) 551.322, 551.521.11, 551.521.14, 551.524.3, 551.556.1, 551.577, 551.582, 551.583.1, 624.139.26, 630*431, 632.11		Keywords climate, adaptation to climate change, forest management
ISSN and series title ISSN 0782-6079 Reports		
ISBN 978-952-336-126-3 (print) 978-952-336-127-0 (pdf)	Language Finnish (abstract also in Swedish and English)	Pages 41

Esipuhe

Suomi on metsäinen maa, ja olemme oppineet hyödyntämään metsiämme monipuolisesti niin virkistyksessä, puukäytössä kuin ekologisten arvojen turvaamisessa. Ilmastonmuutos on haaste metsien elinvoimaisuudelle ja edellyttää koko metsäalalta uusia toimintatapoja.

Metsät toimivat merkittävänä hiilivarastona, ja niitä voidaan hyödyntää uusiutuvan raaka-aineen lähteenä. Puuta jalostetaan tuotteiksi monenlaisiin käyttötarkoituksiin, ja uusia tapoja kehitetään jatkuvasti lisää. Puuraaka-aineella pystytään korvaamaan fossiilisia raaka-aineita ja vähentämään siten kokonaishiilipäästöjä varsinkin pitkäkestoisissa tuotteissa. Metsäekosysteemien hyvinvoinnista ja metsien kasvusta huolehtiminen ovat tärkeitä tavoitteita, jotta voimme ylläpitää ja vahvistaa metsien kykyä hillitä ilmastonmuutosta.

Metsien kasvukunnon vahvistaminen ja tuhonkestävyyden parantaminen edellyttävät sopeutumista muuttuvaan ilmastoon ja muutoksen seurauksiin. Vaikka ilmastonmuutoksen ennustetaan lisäävän metsien kokonaiskasvua, niin tuhoriskien kasvu aiheuttaa epävarmuutta erityisesti kuusimetsien elinvoimaisuudelle. Metsänhoidossa tehtävillä valinnoilla voidaan vaikuttaa siihen, kuinka hyvin metsämme voivat ja kasvavat tulevaisuuden ilmastossa.

Tämä Ilmatieteen laitoksen tuottama selvitys on osa Ilmastokestävästä metsätalous -taustatiedon koontia, jota Tapio toteuttaa vuonna 2020 Metsänhoidon suositusten kehittämisessä. Tapion tavoitteena on muodostaa kokonaiskuva ilmastokestävydestä osana metsien käytön kokonaiskestävyyttä ja luoda pohja metsänhoidon suositusten laajaa uudistamista varten. Ilmatieteen laitoksen selvitys antaa arvion ilmasto-olosuhteiden pitkän aikavälin muutoksista ja muutoksiin liittyvistä epävarmuuksista. Tulevaisuuden metsiä kasvatetaan jo nyt, joten tieto tulevasta ilmastosta on tärkeää tämän päivän metsänhoidollisia päätöksiä tehtäessä.

Metsänhoidon suositukset kokoaa parhaat keinot suomalaisen metsän kestävään hoitoon. Se on kokoelma tutkimusnäyttöön ja käytännön kokemuksiin perustuvia riippumattomia suosituksia. Metsänhoidon suositukset on maa- ja metsätalousministeriön tarjoama palvelu suomalaiselle metsätaloudelle ja osa kansallisen metsästrategian tavoitteiden toteutusta.

Ilmastokestävyys tulee olemaan yhä kiinteämpi osa hyvän metsänhoidon kokonaisuutta ja metsänomistajien päätöksentekoa. Metsänhoidon suositusten tulee jatkossa pystyä tarjoamaan metsänomistajille ja metsäammattilaisille entistä tarkempaa tietoa metsänhoidon vaikutuksista ilmastoon ja ilmaston vaikutuksista metsäekosysteemiin sekä metsiä uhkaavista tuhoriskeistä.

Tämä selvitys antaa kuvan siitä, minkälaisiin sääolosuhteisiin metsät joutuvat sopeutumaan ja mitä se tarkoittaa metsien elinvoimaisuuden kannalta.

31. elokuuta 2020

Kalle Vanhatalo

Metsänhoidon suositusten koordinaattori, Tapio Oy

Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	8
2 Ilmastonmuutos ilmiönä ja ilmastonmuutoksen arviointi	9
2.1 Ilmaston vaihtelut ja kasvihuoneilmiön voimistuminen.....	9
2.2 Ilmastonmuutoksen arviointi.....	10
2.3 Epälineaaristen ja äärimmäisten ilmaston muutosten mahdollisuus	13
3 Ilmastonmuutos Suomessa	13
3.1 Lämpötila, termiset vuodenaajat ja lämpösumma	13
3.2 Sademäärä ja maaperän kosteus	18
3.3 Myrskyt ja rajuilmat	23
3.4 Routa ja maan kantavuus talvella.....	25
3.5 Lumen kertyminen puiden oksille ja lumituhojen mahdollisuus	27
3.6 Metsäpalovaara.....	28
3.7 Auringonsäteily ja albedo	29
4 Millainen Suomen metsien kannalta todennäköisin ja toisaalta pahin ilmastonmuutosskenaario voisi olla?	30
4.1 Todennäköisin ilmastonmuutos	30
4.2 Suomen metsien kannalta haitallisin ilmastonmuutosvaihtoehto	33
5 Tulevaisuuden mahdollisuudet riskien seurantaan ja ennakointiin eri tietolähteitä ja ennusteita käyttämällä.....	33
6 Tulosten tarkastelua.....	35
Kiitokset	36
Kirjallisuusluettelo	36

1 Johdanto

Ilmastonmuutos vaikuttaa Suomen metsiin monin tavoin. Ilmastomme on jo lämmennyt pari astetta 1800-luvun jälkeen, ja kuluvan vuosisadan aikana keskilämpötila voi nousta jopa useita asteita lisää. Lämpeneminen kiihdyttää metsien kasvua, mutta myös monet metsiin kohdistuvat riskit uhkaavat kasvaa (Venäläinen et al., 2020). Esimerkiksi tuohyönteiset pääsääntöisesti hyötyvät lämpimämmästä ilmastosta. Suomen pinta-alasta metsät peittävät noin kolme neljäsosaa, mikä tekee Suomesta Euroopan metsäisimmän maan (Forest Europe, 2015). Taloudellisesti Suomi on riippuvaisempi metsistä kuin mikään toinen maailman valtio (Metsäntutkimuslaitos, 2011). Metsillä on myös tärkeä tehtävä luonnon monimuotoisuuden suojelemisessa sekä ilmastonmuutoksen hillinnässä. Viime vuosina metsien kasvu on kiihtynyt ja hakkuumäärät kasvaneet. Metsien puuvaranto on kuitenkin kasvanut joka vuosi jo 50 vuoden ajan, ja Suomen metsät toimivat tällä hetkellä hiilinieluinä, eli metsien kasvu sitoo enemmän hiiltä kuin metsistä vapautuu hiiltä takaisin ilmakehään (Peltola et al., 2019). Metsien käyttöön kohdistuu erilaisia ja osin ristiriitaisia intressejä riippuen siitä painotetaanko esimerkiksi taloudellisia vai luonnonsuojellisia näkökulmia. Siksi on tärkeää tutkia, miten metsiä voidaan eri näkökulmat huomioiden hyödyntää kestäväällä tavalla (Ekholm, 2020). Parhaimmillaan puupohjaisilla tuotteilla voidaan korvata sellaisia materiaaleja ja tuotteita, joiden valmistaminen kuluttaa runsaasti energiaa ja fossiilisia polttoaineita ja jotka tuottavat huonosti hajoavaa jätettä. Pahimmillaan kestävä metsänkäyttö voi puolestaan johtaa luonnon monimuotoisuuden näivettymiseen sekä metsien hiilivarantojen kutistumiseen.

Euroopan Unionin (EU) tasolla metsien muodostama hiilinielu sitoo vuosittain noin 10 % koko EU-alueen kasvihuonekaasupäästöistä (Seppälä et al., 2015). Suomen kasvihuonekaasupäästöistä Suomen metsät sitovat jopa yli 40 % (Seppälä et al., 2015). EU:n ilmastotavoitteiden mukaan maankäyttösektori sisällytetään ilmastopolitiikkaan vuodesta 2021 eteenpäin. Maankäyttösektoriin viitataan usein englanninkielisellä termillä ”Land use, land-use change and forestry” (LULUCF). LULUCF-sektorin ilmastopolitiikkaa säätelee sektorin toiminnalle raamit luova LULUCF-asetus (Mutanen et al., 2019), jonka mukaan *Jäsenvaltion tulee varmistaa, että LULUCF-sektorista ei aiheudu laskennallisia päästöjä asetuksessa. Jos LULUCF-sektori on laskentasääntöjen noudattamisen jälkeen laskennallinen päästö, jäsenvaltion tulee korvata aiheutuva päästö joko taakanjakosektorin lisätoimilla tai hankkimalla LULUCF-yksiköitä toiselta jäsenvaltiolta.* Tämä EU:ssa asetettu tavoite konkretisoi sen, miten tärkeää Suomessa on huolehtia metsien hiilensidontakyvystä pyrittäessä hiilineutraaliuteen.

Ilmastonmuutoksen hillinnän kannalta parhaaksi metsäpolitiikaksi esitetään useita perusteltuja ja joskus keskenään ristiriitaisiakin vaihtoehtoja. Metsien hakkuita rajoittamalla voitaisiin lisätä metsien puu- ja hiilivarastoja. Tämä nostaisi aikaa myöten metsien keski-ikää, mikä alkaisi pikkuhiljaa hidastaa metsien kasvua ja hiilen sitoutumista. Samalla tuulituhojen mahdollisuus kasvaisi, kuten myös tuohyönteisten ja sienitautien aiheuttamien tuhojen todennäköisyys. Jos sen sijaan hakkuumääriä kasvatetaan, metsät pysyvät keski-ikänsä nuorempina ja kasvavat nopeasti, mutta lyhyellä tähtäimellä metsistä vapautuu hakkuiden myötä enemmän hiiltä. Usein myös esitetään, että jos Suomessa ei hyödynnetä metsiä, niin tarvittavat metsästä saataviin raaka-aineisiin pohjautuvat tuotteet todennäköisesti valmistetaan vähemmän kestävä metsätaloutta toteuttavien maiden puuvaroista. Laajat Keski-Euroopan ja Kanadan metsätuhot ovat myös osoittaneet, että pahan tuhon osuessa kohdalle metsien hiilivarastot voivat purkautua ilmakehään hyvin nopeasti ja täten mitätöidä hiilen varastointiin tähtäävän politiikan hyödyt. On siis tärkeää, että metsiämme hoidetaan ”ilmastoviisaasti” huomioiden metsien eri hoitomahdollisuudet (Verkerk et al., 2020). Koko maailman mittakaavassa ilmastonmuutoksen hillinnän kannalta tehokkaimman metsienhoitovaihtoehdon määrittäminen on vieläkin monimutkaisempaa (Popkin, 2019).

Tässä raportissa pyritään esittämään tiivistetysti se, mitä tällä hetkellä tiedetään ilmastomuutoksen etenemisestä ja sen keskeisistä vaikutuksista Suomessa. Raportin tavoitteena on tarjota perustietoa valtakunnallisten metsänhoidon suositusten uudistamisen pohjaksi. Raportti soveltuu tietolähteeksi myös ilmastomuutoksesta kiinnostuneelle yksityiselle metsänomistajalle.

2 Ilmastomuutos ilmiönä ja ilmastomuutoksen arviointi

2.1 Ilmaston vaihtelut ja kasvihuoneilmiön voimistuminen

Maapallon ilmasto määräytyy pohjimmiltaan planeetan säteilytasapainon perusteella. Tasapainotilassa maapallolta karkaa avaruuteen lämpösäteilyä yhtä paljon kuin maapallolle imeytyy auringonsäteilyä, noin 235 W/m^2 . Koska ilmakehä imee suurimman osan maanpinnalta lähtevästä lämpösäteilystä ja lähettää siitä osan takaisin maanpinnalle, tasapainon saavuttamiseksi pitää maanpinnalta lähteä lämpösäteilyä noin 492 W/m^2 . Tätä ilmakehän kykyä imeä lämpösäteilyä itseensä kutsutaan kasvihuoneilmiöksi. Ilman kasvihuoneilmiötä maapallon keskilämpötila olisi noin $30 \text{ }^\circ\text{C}$ nykyistä alempi.

Maapallon elämälle elintärkeän kasvihuoneilmiön voimakkuutta säätelevät ilmakehän kasvihuonekaasut, jotka päästävät tehokkaasti läpi auringon lyhytaaltoista tulosäteilyä, mutta useimmilla aallonpituuksilla imevät itseensä maapallolta karkaavaa pitkäaaltoisäteilyä. Tärkeimpiä kasvihuonekaasuja ovat vesihöyry, hiilidioksidi, metaani, dityppioksidi ja otsoni. Kaikista tärkein kasvihuonekaasu on vesihöyry, joka selittää luonnollisen kasvihuoneilmiön aiheuttamasta lämmitysvaikutuksesta yli puolet. Vesihöyry on kuitenkin ilmakehässä hyvin lyhytikäinen kaasu esimerkiksi hiilidioksidiin ja metaaniin verrattuna, ja sen pitoisuus pikeminkin seuraa lämpötilaa kuin toisin päin.

Muutokset maapallon säteilytasapainossa aiheuttavat muutoksia maapallon keskilämpötilassa. Ihmiskunta on suhteellisen lyhyessä ajassa lisännyt voimakkaasti kasvihuonekaasujen määrää ilmakehässä, mikä on johtanut kasvihuoneilmiön voimistumiseen ja lämpötilan nousuun maapallolla.

Ihmiskunnan tuottamien kasvihuonekaasupäästöjen vaikutus maapallon säteilytasapainoon ja ilmaston lämpenemiseen tunnetaan melko tarkasti. Paljon suurempaa epävarmuutta liittyy esimerkiksi pienhiukkasten säteilypakotteeseen aiheuttamiin muutoksiin.

Sää vaihtelee päivästä ja vuodesta toiseen ilmakehän oman luontaisen dynamiikan takia. Perimmiltään sään vaihtelut aiheutuvat auringonsäteilyn epätasaisesta jakautumisesta maapallolle. Napaseuduille säteilyä saapuu keskimäärin vuodessa vain noin 55 W/m^2 , kun taas päiväntasaajan tienoilla sitä imeytyy noin 300 W/m^2 . Epätasainen lämmitys synnyttää ilmakehään ja meriin virtauksia, jotka tasaavat lämpötilaeroja maapallon eri osien välillä kuljettamalla lämpöä trooppikista kohti napoja. Sään vaihteluita ja keskimääräisiä oloja kuvaa alueella vallitseva ilmasto.

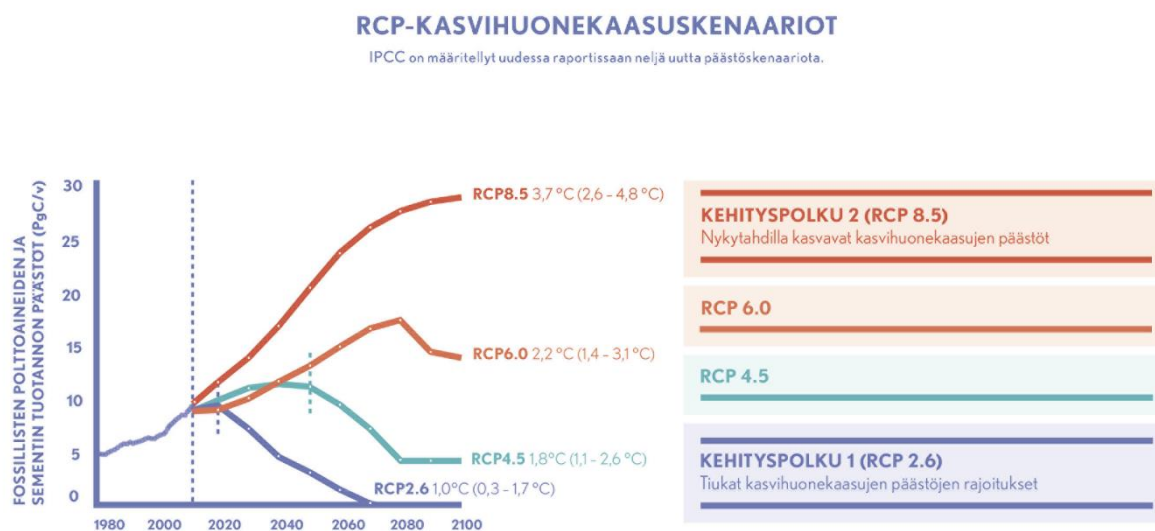
Ilmaston vaihteluita maapallolla säätelevät eri aikaskaaloissa lukuisat tekijät (Goosse, 2015). Miljoonien ja miljardien vuosien kuluessa ilmastoon vaikuttavat muun muassa mannerliikunnot ja hitaat muutokset auringon säteilytehossa. Maapallon kiertoradan vaihteluista aiheutuvat niin sanotut Milankovičín jaksot vaikuttavat ilmastoon tuhansien ja kymmenientuhansien vuosien sykleissä selittäen muun muassa jääkausien ja niiden välisten leutojen jaksojen esiintymisen (mm. Kerr, 1987; Eronen, 1991). Muutokset ilmakehän koostumuksessa voivat aiheuttaa niin hitaasti kuin nopeastikin tapahtuvia ilmastomuutoksia. Vuosien ja vuosikymmenten aikaskaalassa tapahtuvia ilmaston vaihteluita aiheutuu muun muassa ilmakehän ja valtamerien keskinäiseen vuorovaikutukseen liittyvistä ilmiöistä.

2.2 Ilmastonmuutoksen arviointi

Tulevien ilmastonmuutosten arvioimisessa keskeisimpiä työkaluja ovat ilmakehän ja valtameren käyttäytymistä virtausmekaniikan ja lämpöopin peruslakien avulla kuvaavat ilmastomallit, joiden avulla ilmaston tilaa voidaan arvioida vuosikymmenten päähän (Flato et al., 2013). Tällaisia tietokonemalleja kehitetään yliopistoissa ja tutkimuskeskuksissa eri puolilla maailmaa. Ilmakehän prosessien lisäksi ne pyrkivät mahdollisimman tehokkaasti ottamaan huomioon erilaiset ilmakehän, valtameren, maaperän ja kasvillisuuden väliset vuorovaikutukset.

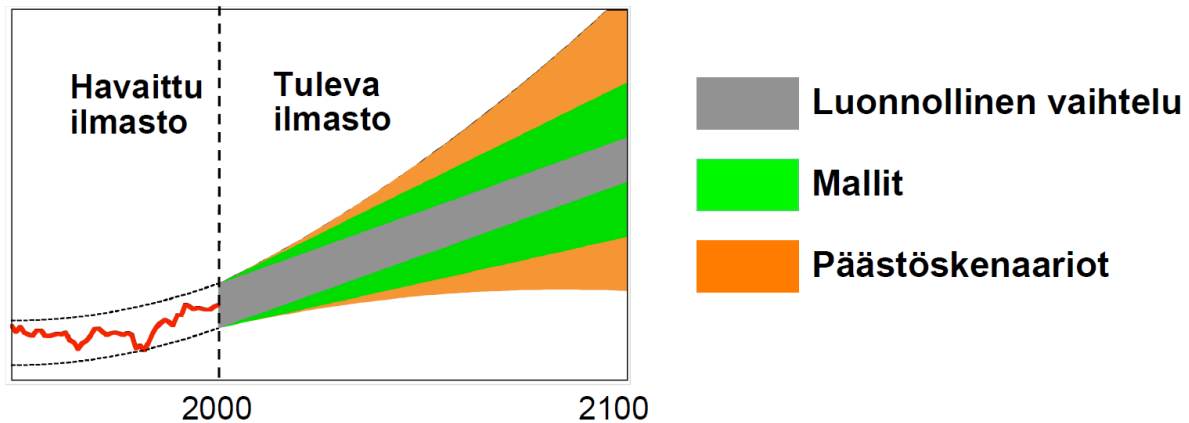
Ilmastonmuutosennusteiden pohjaksi tarvitaan arvioita ilmakehän kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten pitoisuuksien kehittymisestä tulevina vuosikymmeninä. Tätä varten on laadittu vaihtoehtoisia kehityskulkuja kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten päästöjen ja pitoisuuksien tulevasta muutoksista, niin sanottuja päästöskenaarioita. Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) vuosina 2013–2014 julkaisemassa viidennessä arviointiraportissa (IPCC, 2013) esitetyt arviot ilmastonmuutoksen tulevasta kehityksestä perustuivat niin kutsuttuihin RCP-skenaarioihin (Representative Concentration Pathways; van Vuuren et al., 2011).

RCP-skenaarioita on yhteensä neljä erilaista (kuva 1). Optimistisimmassa RCP2.6-skenaariossa maailmanlaajuisten hiilidioksidipäästöjen oletetaan kääntyvän nopeaan laskuun 2020-luvulla ja päästöjen painuvan nolllaan noin vuonna 2080. RCP4.5-skenaariossa päästöt nousevat aluksi vielä hieman, mutta kääntyvät laskuun vuosisadan puolivälissä, ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuus vakiintuu vuoden 2100 tienoilla. RCP6.0-skenaariossa hiilidioksidipäästöt pysyvät aluksi melko vakaina, kunnes ne lähtevät selvään kasvuun vuosisadan puolivälissä ennen kuin kääntyvät puolestaan laskuun vuosisadan lopulla. RCP8.5-skenaariossa hiilidioksidipäästöjen kasvu on nopeaa vielä useiden vuosikymmenten ajan ja vuosisadan lopulla ilmakehän hiilidioksidipitoisuus alkaa lähestyä jo 1000 ppm:n tasoa, kun tällä hetkellä ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on noin 410 ppm ja ennen teollistumista se oli noin 280 ppm.



Perustuu IPCC:n 5. arviointiraportin WG1-osareportin tietoihin.

Kuva 1. RCP-kasvihuonekaasuskenaarioiden mukaiset kasvihuonekaasujen päästöjen kehityskulut (lähde: ilmasto-opas.fi).



Kuva 2. Ilmastonmuutosennusteisiin liittyvä epävarmuus voidaan jakaa kolmeen tekijään. Lyhyellä aikavälillä ilmaston luonnolliseen vaihteluun liittyvä epävarmuus on merkittävin epävarmuuden lähde, keskipitkällä aikavälillä ilmastomallien tulosten väliset erot ja pitkällä aikavälillä epävarmuus ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuuksien tulevasta kehityksestä.

RCP-skenaarioihin liittyvät lukuarvot (2.6, 4.5, 6.0 ja 8.5) kuvaavat säteilypakotteen muutosta (lämmitysvaikutusta) watteina neliometriä kohti vuodesta 1750 vuoteen 2100. Yleisimmin käytetyt RCP-skenaariot ilmastonmuutostutkimuksessa ovat RCP4.5 ja RCP8.5. Jo RCP4.5-skenaariota toteutumisen vaatisi melko järeitä toimia kasvihuonekaasujen päästöjen leikkaamiseksi. Ilmastopolitiikassa lähtökohdaksi on asetettu kuitenkin vielä paljon kunnianhimoisemmat tavoitteet. Pariisin ilmastopöytäkirjan tiukimpien tavoitteiden saavuttaminen edellyttäisi käytännössä jopa RCP2.6-skenaariota nopeampaa kasvihuonekaasujen päästöjen leikkaamista (Sanderson et al., 2016).

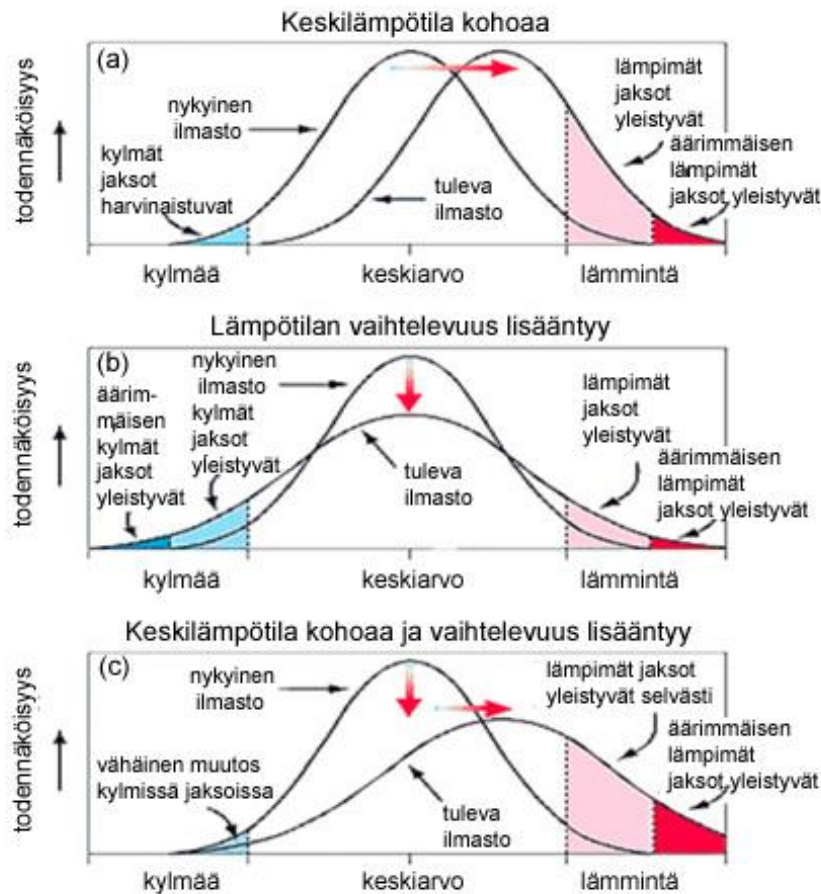
Kasvihuonekaasujen pitoisuuksien tulevaan kehitykseen liittyvä epävarmuus on suurin ilmastonmuutosennusteisiin liittyvä epävarmuuslähde, kun arvioidaan muutoksia tästä hetkestä useiden vuosikymmenten päähän (kuva 2). Muut epävarmuustekijät ilmastonmuutosennusteissa liittyvät ilmaston luonnolliseen vaihteluun ja eri ilmastomallien antamien tulosten välisiin eroihin. Eri ilmastomallit reagoivat samaan säteilypakotteen muutokseen tuottamalla erilaisia muutoksia ilmastossa, mikä johtuu ennen kaikkea siitä, että ilmastomalleilla ei kyetä kuvaamaan täydellisesti läheskään kaikkia pienen mittakaavan ilmiöitä. Lyhyellä aikavälillä ilmaston luonnolliseen vaihteluun liittyvä epävarmuus on suurin epävarmuustekijä, ja muiden

RCP-skenaarioiden yleistajuinen kuvaus hiilidioksidin (CO₂) suhteen (Ruosteenoja, 2013):

- **RCP2.6: Ilmastopolitiikan täydellinen onnistuminen.** CO₂:n maailmanlaajuiset päästöt kääntyvät jyrkkään laskuun jo vuoden 2020 jälkeen ja ovat tämän vuosisadan lopulla lähellä nollassa. CO₂:n pitoisuus on korkeimmillaan vuosisadan puolivälissä n. 440 ppm ja alkaa sen jälkeen hitaasti laskea.
- **RCP4.5: Ilmastopolitiikan osittainen onnistuminen.** CO₂:n päästöt kasvavat aluksi hieman, mutta kääntyvät laskuun vuoden 2040 tienoilla. Vuosisadan loppupuolella pitoisuuden kasvu taittuu, ja tuolloin CO₂:ta on ilmakehässä noin kaksinkertainen määrä teollistumista edeltävään tasoon verrattuna.
- **RCP6.0: Päästöt pysyvät aluksi suunnilleen nykyisellä tasollaan mutta ovat myöhemmin tällä vuosisadalla melko suuria.** Tällainen kehityskulku vaikuttaa epärealistiselta, joten tätä skenaariota ei tässä raportissa juurikaan tarkastella.
- **RCP8.5: Pyrkimys päästöjen rajoittamiseen kokee täydellisen haaksirikon.** CO₂:n päästöt kasvavat nopeasti ja kolminkertaistuvat vuoteen 2100 mennessä. CO₂:n pitoisuus kohoaisi tuolloin yli kolminkertaiseksi teollistumista edeltävään aikaan verrattuna. Pitoisuus kasvaisi nopeasti vielä vuoden 2100 jälkeenkin.

epävarmuuslähteiden merkitys kasvaa sitä enemmän mitä kauemmas tulevaisuuteen ulottuvia arvioita tehdään.

Ilmastonmuutoksen kielteiset seuraukset yhdistetään usein erilaisten äärevien sääilmiöiden yleistymiseen. Suhteellisen pienikin muutos keskimääräisissä olosuhteissa voi johtaa suureen muutokseen jonkin ilmastoa kuvaavan suureen, kuten lämpötilan, jakauman ääripäissä (kuva 3). Siten maltillinenkin keskilämpötilan nousu voi merkittävästi lisätä hyvin kuumien lämpötilojen esiintymistä ja vastaavasti hyvin kylmät lämpötilat voivat käydä nopeasti harvinaisiksi.



Kuva 3. Skemaattinen kuva lämpötilan nousun ja vaihtelevuuden lisääntymisen vaikutuksesta äärimmäisen lämpimien ja kylmien säätilanteiden esiintymiseen (Folland et al., 2001). Mikäli lämpötilan vaihtelevuus säilyy ennallaan, mutta keskilämpötila kohoaa, hyvin korkeat lämpötilat yleistyvät selvästi ja hyvin alhaiset lämpötilat vastaavasti harvinaistuvat yhtä selvästi (yläkuva). Mikäli lämpötilan vaihtelevuus lisääntyy, mutta keskilämpötila pysyy ennallaan, yleistyvät sekä hyvin kylmät että kuumat lämpötilat (keskikuva). Mikäli sekä keskilämpötila kohoaa että lämpötilan vaihtelevuus lisääntyy, yleistyvät kuumat sääjaksot hyvin paljon, mutta kylmät tilanteet eivät harvinaistu samassa suhteessa kuin ilman vaihtelevuuden lisääntymistä (alakuva). Skemaattisesti sama kuva pätee lämpötilan ohella mille tahansa muullekin sääsuurelle. Todellisuudessa lämpötilan, kuten muidenkaan suureiden, havaittu jakauma ei kuitenkaan noudata normaalijakaumaa, kuten kuvassa on yksinkertaisuuden vuoksi oletettu. Suomessa lämpötilan vaihtelun ei myöskään ennusteta kasvavan, vaan kesällä sen ennustetaan pysyvän suurin piirtein entisellään ja talvella pikemminkin vaimentuvan.

2.3 Epälineaaristen ja äärimmäisten ilmaston muutosten mahdollisuus

Ilmastomuutoksen arvioidaan tyypillisesti etenevän tasaisesti. On kuitenkin esitetty myös arvioita, että muutos voisi olla ennakoitua rajumpaa tai se voisi edetä pyrähdyksinä sitten, kun kriittinen kynnyksiarvo on saavutettu (Lenton et al., 2008). Lämpeneminen voisi käynnistää ilmastojärjestelmässä palauteilmiöitä, jotka edelleen kiihdyttäisivät lämpenemistä. Seurauksena olisi alueellisesti tai jopa globaalisti epälineaarisia, nopeita ja peruuttamattomia tai hitaasti palautuvia ilmaston muutoksia. Kynnyksiarvoa äärimmäisen muutoksen aikaansaavalle lämpenemiselle kutsutaan kirjallisuudessa usein englanninkielisellä käsitteellä “tipping point.” Suomeksi termi voitaisiin kääntää termiksi “käänneaste” tai “käännekohta.” Mitä vähäisemmäksi lämpeneminen saadaan rajoitettua, sitä pienemmäksi jää riski epälineaaristen ja äärimmäisten ilmaston muutosten laukeamisesta.

Pimenoff ym. (2008) kokosivat kirjallisuuteen pohjautuvan yhteenvedon mahdollisista äärimmäisistä ilmaston muutoksista ja niitä käynnistävästä ilmaston lämpenemisen kynnyksiarvoista. Arvioiden mukaan Pohjoisen jäämeren jääpeite voi jo lähivuosikymmeninä kadota keuhkain lämpenemisen ja sitä voimistavien palauteilmiöiden vaikutuksesta. Myöhemmin Pohjoisen jäämeri voi pysyä myös talvella enimmäkseen jäättömänä, mutta tämä on vielä kuluvan vuosisadan aikana hyvin epätodennäköistä. Grönlannin mannerjäätikön täydelliseen sulamiseen johtavan prosessin on arvioitu voivan käynnistyä, jos maapallon keskilämpötila kohoaa 1–2 astetta nykyisestä (Lenton et al., 2008). Church et al. (2013) arvioivat tämän rajan olevan noin 2 °C verrattuna esiteolliseen aikaan. Nopeimmillaan Grönlannin mannerjäätikön sulaminen voisi tapahtua Lentonin et al. (2008) arvion mukaan 300 vuodessa. Grönlannin mannerjäätikön sulaminen nostaisi merenpintaa enintään seitsemän metriä. Samoin Lenton et al. (2008) arvioivat, että Etelämantereen jäätikön läntinen osa voisi sulaa 300 vuodessa, mikäli maapallon keskilämpötila kohoaa 3–5 astetta nykyisestä. Amazonin sademetsien ja myös boreaalisten metsien laaja-alaiseen katoamiseen 50 vuoden sisällä arvioidaan päädyttävän, jos maapallon keskilämpötilan kohoaminen ylittää kolme astetta. Pohjois-Atlantin termohaliininen kiertoilmiö ja Golfvirta voivat kuluvan vuosisadan aikana heikentyä. Golfvirran pysähtymistä pidetään kuitenkin epätodennäköisenä (Bakker et al., 2016; Caesar et al., 2018). Golfvirran heikkeneminen hidastaa ilmaston lämpenemistä Pohjois-Atlantin alueella, mutta ei pysäytä sitä. Ilmaston lämpenemisen seurauksena ikeroudan sulaminen näyttää kiihtyvän niin subarktisisilla alueilla kuin vuoristoissakin. Ikeroudan sulaminen nopeuttaa maaperässä aikaisemmin jäätyneenä olleen orgaanisen aineen hajoamista ja vapauttaa ilmakehään suuria määriä kasvihuonekaasuja, mikä voimistaisi kasvihuoneilmiötä entisestään.

Lenton et al. (2019) esittävät, että ilmaston lämpeneminen on jo edennyt niin pitkälle, että joidenkin ilmastomuutoksen käänneasteiden saavuttaminen on lähes väistämätöntä. Heidän arvionsa mukaan maailman tulisi saavuttaa hiilineutraalius viimeistään 30 vuoden kuluessa. Tähän tavoitteeseen yltäminen vaikuttaa hyvin epätodennäköiseltä huomioiden nykyisten kasvihuonekaasupäästöjen rajoitustoimien ponnettomuus.

3 Ilmastomuutos Suomessa

3.1 Lämpötila, termiset vuodenaajat ja lämpösusma

Selkeimmin ilmastomuutos ilmenee Suomessa lämpötilan kohoamisena. 1800-luvun puolivälin jälkeen ilmasto on jo lämmennyt Suomessa parilla asteella (Mikkonen et al., 2015), kun keskimäärin maapallolla lämpötila on noussut samaan aikaan osapuilleen asteen verran (Hartmann et al., 2013). Tästä lämpenemisestä noin puolet on tapahtunut viimeisten 30–40 vuoden aikana, ja tällä hetkellä ilmasto lämpenee Suomessa vajaat puoli astetta vuosikymmenessä.

Merkittävimmin 1800-luvun ilmastoon verrattuna Suomessa ovat lämmenneet kevään kylmät sääjaksot.

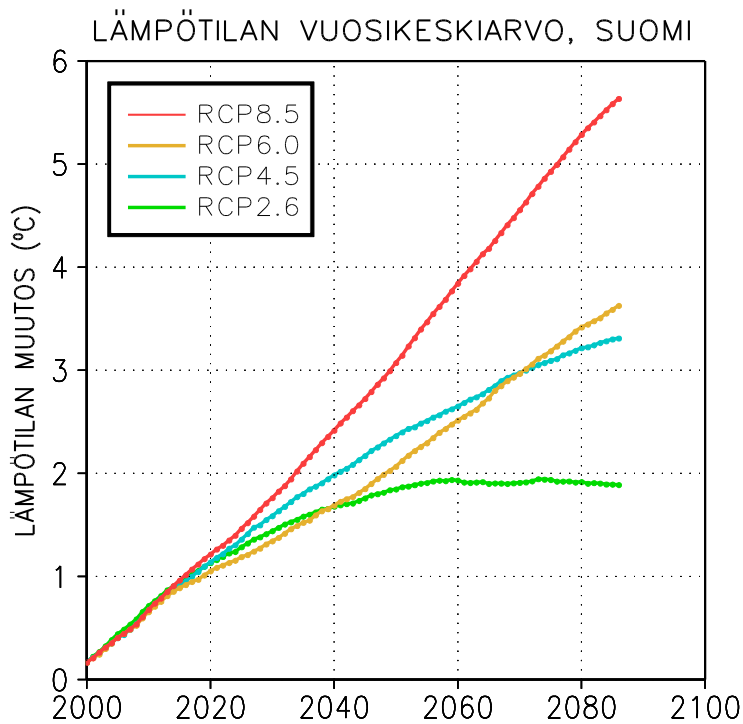
Lämpenemisen seurauksena ilmasto on nykyään maan keskiosissa – suurin piirtein Joensuun, Kuopion, Jyväskylän ja Kokkolan seuduilla – likimain yhtä lämmin kuin se oli etelärannikolla 1800-luvulla. Esimerkiksi Ahvenanmaan 1800-luvun ilmasto taas on vastaavasti siirtynyt Merenkurkun saaristoon ja Vaasan seudulle. Vuositasolla keskilämpötila vaihtelee Suomessa pari astetta pitkän ajan keskiarvon molemmin puolin, joten 1800-luvun lämpimimmät vuodet olivat suurin piirtein yhtä lämpimiä kuin keskimääräiset vuodet ovat olleet 2000-luvun alussa ja vastaavasti viime aikojen kylmimmät vuodet ovat olleet suunnilleen samanlämpöisiä kuin keskimääräiset vuodet 1800-luvulla.

Myös jatkossa lämpenemisen ennakoidaan olevan Suomessa, kuten muuallakin korkeilla pohjoisilla leveysasteilla, voimakkaampaa kuin maapallolla keskimäärin. Tähän vaikuttavat muun muassa maa-merijakauman erot maapallon eri osien välillä ja lämpenevän ilmakemän lisääntyvä vesihöyrypitoisuus, mutta ennen kaikkea napa-alueiden lumi- ja jääpeitteen väheneminen (Serreze ja Barry, 2011; Dai et al., 2019).

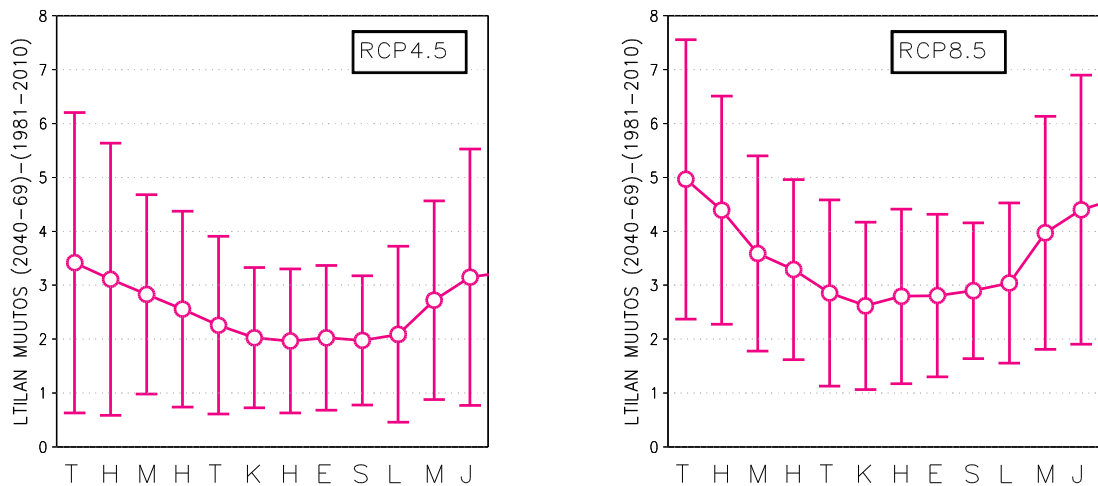
Lähimpinä tulevina vuosikymmeninä ilmaston odotetaan lämpenevän suunnilleen samaa vauhtia kuin se on lämmennyt edellisten vuosikymmenten aikana. Seuraavien noin 20 vuoden aikana vuoden keskilämpötilan odotetaan siten kohoavan Suomessa todennäköisimmin 0,5–1,5 asteella (kuva 4). Suurten kasvihuonekaasupäästöjen RCP8.5-skenaariossa lämpenemisvauhti kuitenkin vielä jonkin verran kiihtyy. Vuosisadan puolivälin jälkeen päästöskenaarioiden väliset erot kasvavat merkittävimmin. RCP2.6-skenaariossa lämpeneminen käytännössä pysähtyy vuosisadan puolivälissä ja myös RCP4.5-skenaariossa lämpenemisvauhti alkaa vähitellen hidastua. Sen sijaan RCP8.5-skenaariossa toteutuessa lämpeneminen jatkuu jopa kiihtyvällä vauhdilla edelleen kuluvan vuosisadan loppupuolella. Tällöin Suomen ilmasto voisi vuoteen 2100 mennessä lämmentä yli viisikin astetta lisää nykyisestä. Toisaalta RCP4.5- ja myös RCP6.0-skenaarioissa vuosisadan lopun ilmasto vastaa melko hyvin RCP8.5-skenaariossa ilmasto vuosisadan puolivälissä.

Lämpötilan nousu ei kuitenkaan todennäköisesti ole yhtä tasaista kuin kuvan 4 perusteella voisi uumoilla. Esimerkiksi meriveden tiheyseroihin liittyvän Atlantin termohaliinisen kierto liikkeen hidastempoisen vaihtelun tiedetään vaikuttavan Euroopan ilmastoon noin 60–100 vuoden sykleissä (Gray et al., 2004; Sutton ja Hodson, 2005; Knight et al., 2006). Suomessa tämä AMO-vaihtelu (Atlantic Multidecadal Oscillation) vaikuttaa ennen kaikkea loppukesän lämpötiloihin, jotka tapaavat AMO:n lämpimän vaiheen aikana olla keskimäärin hieman korkeampia kuin viileän vaiheen aikana. AMO on ollut lämpimässä vaiheessaan 1990-luvun lopulta lähtien, ja AMO:n siirtyminen viileään vaiheeseen voi väliaikaisesti jonkin verran hidastaa lämpenemistä tulevina vuosikymmeninä.

Lämpeneminen ei ole tasaista myöskään eri vuodenaikojen välillä (kuva 5). Talvella lämpötilojen ennustetaan nousevan noin 1,5–2-kertaisesti sen mitä kesällä. Suurten päästöjen RCP8.5-skenaariossa tämä tarkoittaisi kesällä todennäköisimmin vajaan kolmen asteen ja talvella noin 3–6 asteen lämpenemistä vuosisadan puoliväliin mennessä jakson 1981–2010 olosuhteisiin verrattuna. Pienempien päästöjen RCP4.5-skenaariossa vastaavat lämpötilat saavutettaisiin vasta vuosisadan lopulla, ja vuosisadan puoliväliin mennessä lämpötilan nousu olisi kesällä pari astetta sekä talvella kolmisen astetta. On hyvä muistaa, että tällä hetkellä ilmasto on jo lämmennyt arviolta noin asteen verran jakson 1981–2010 tilanteesta. Talvien kesiin verrattuna voimakkaampi lämpeneminen sopii yhteen myös tähän mennessä jo havaitun lämpenemiskehityksen kanssa (mm. Räisänen, 2019). Lisäksi talvella kaikkein kovimpien pakkasten odotetaan lauhtuvan enemmän kuin leutojen säätilanteiden, kun taas kesällä sekä korkeat että matalat lämpötilat noussevat yhtä paljon. Kesällä hellepäivien lukumäärän odotetaan jo parin asteen lämpenemisen seurauksena vähintään kaksinkertaistuvan vuosisadan puoliväliin mennessä 1900-luvun lopun tilanteeseen verrattuna (Kim et al., 2018).



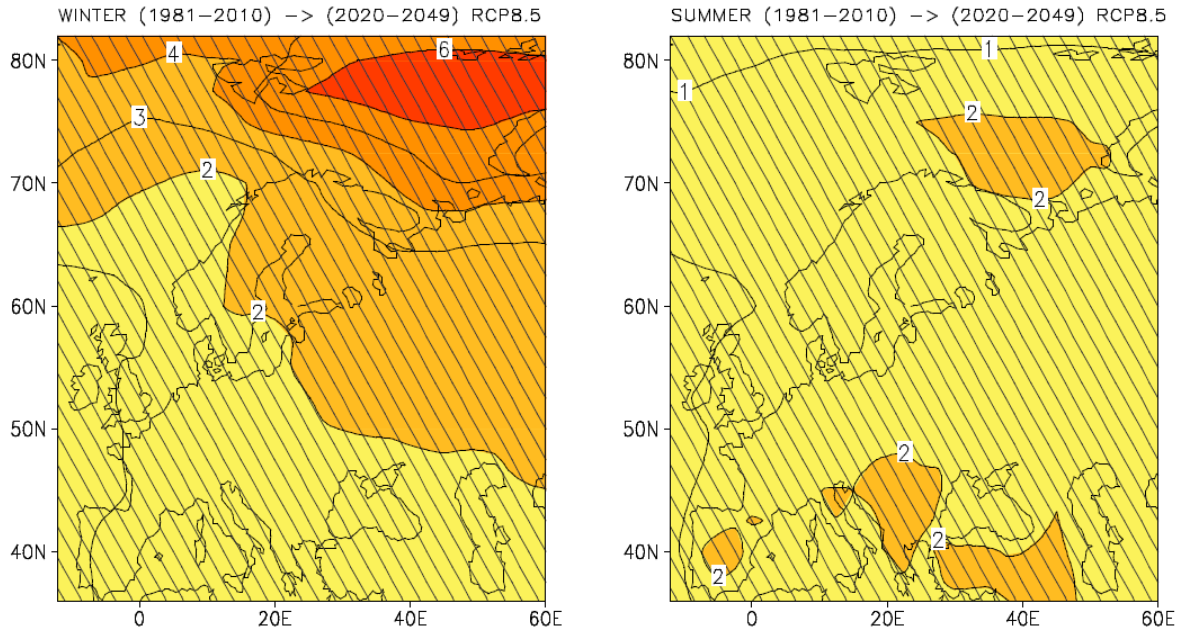
Kuva 4. Vuoden keskilämpötilan ennustettu muutos Suomessa vuosina 2000–2085 verrattuna jakson 1981–2010 keskimääräisiin arvoihin. Käyrät esittävät 28 maailmanlaajuisen ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvoa neljälle eri RCP-kasvihuonekaasuskenaariolle (RCP8.5, hyvin suuret päästöt; RCP6.0, melko suuret päästöt; RCP4.5, melko pienet päästöt; RCP2.6, hyvin pienet päästöt).



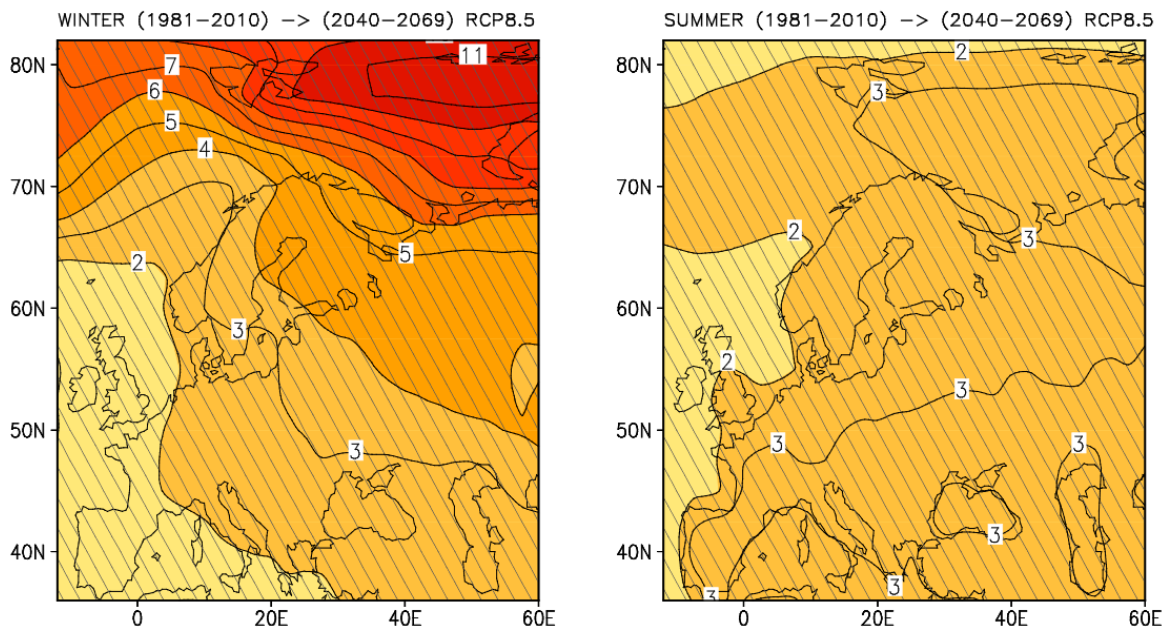
Kuva 5. Keskilämpötilan muutos Suomessa vuoden eri kuukausina siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2040–2069. Käyrä esittää 28 maailmanlaajuisen ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvoa ja pystyjanat muutoksen 90 % todennäköisyysväliä. Vasemmanpuoleinen kuva edustaa RCP4.5-skenaariota (melko pienet päästöt) ja oikeanpuoleinen RCP8.5-skenaariota (hyvin suuret päästöt). Kaikki luvut ovat koko Suomen alueen keskiarvoja.

Alueellisesti tarkasteltuna erot lämpenemisen voimakkuudessa Suomen eri osien välillä eivät ole kovin suuria (kuvat 6 ja 7). Pohjois-Suomessa lämpeneminen on kuitenkin hieman voimakkaampaa kuin etelässä. Erityisesti tämä pätee talvella, jolloin lämpötila voi Lapissa nousta asteen pari enemmän kuin Etelä-Suomessa. Kesällä erot lämpenemisen voimakkuudessa maan eri osien välillä ovat pieniä.

Lämpenemisen seurauksena termiset vuodenaajat siirtyvät ja kasvukauden lämpösummat kasvavat. Termisellä talvella tarkoitetaan sitä ajanjaksoa vuodesta, jolloin lämpötila on keskimäärin pakkasen puolella ja termisen kesän aikana vuorokauden keskilämpötila on puolestaan yli 10 °C. Terminen kevät ja syksy sijoittuvat näiden väliin. Terminen kasvukausi alkaa,



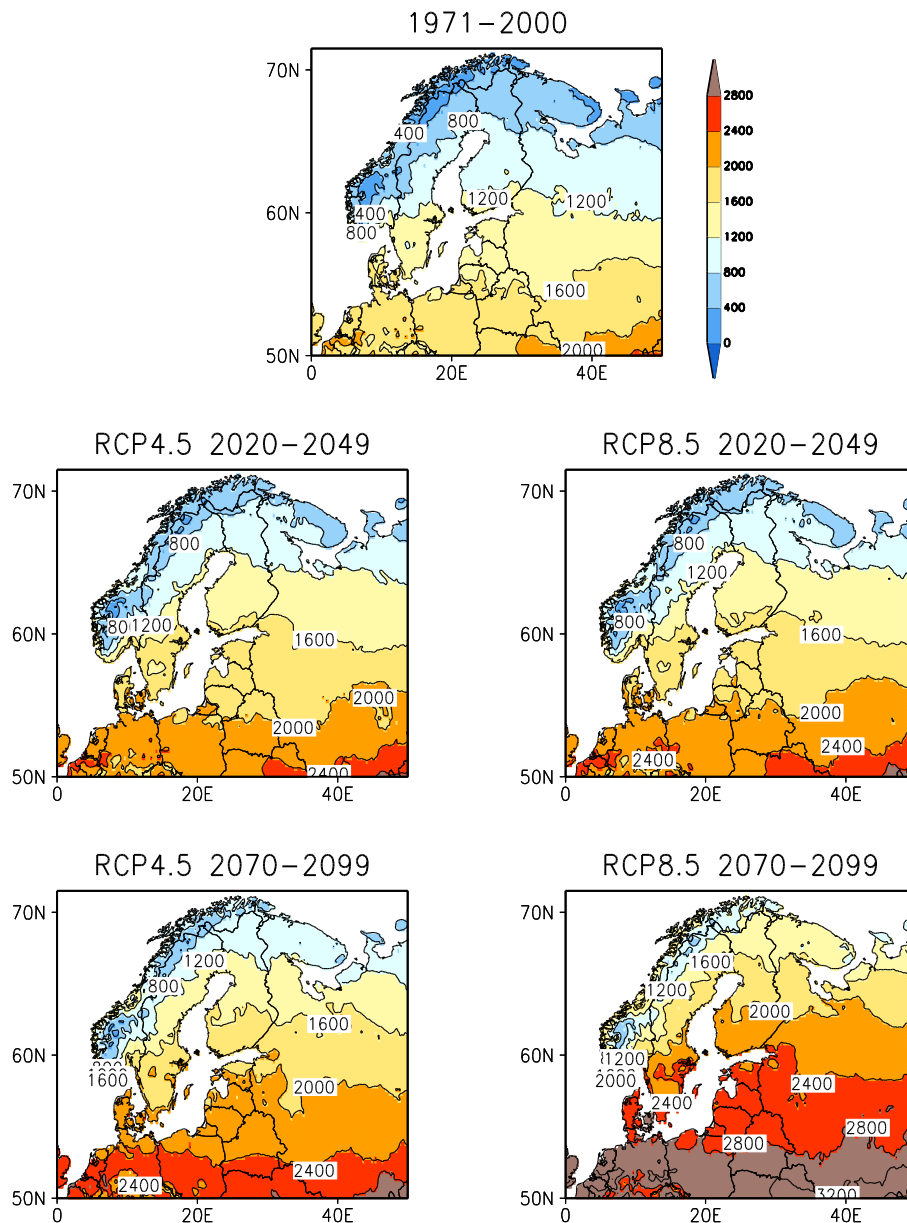
Kuva 6. Ennustettu lämpötilan muutos (°C) Euroopassa talvella (joulu-helmikuu; vas.) ja kesällä (kesä-elokuu; oik.) siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2020–2049 RCP8.5-skenaariossa. RCP4.5-skenaariossa samat lämpötilat saavutetaan noin 10–20 vuotta myöhemmin. Kuvassa esitetään 28 ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvo. Varjostetuilla alueilla vähintään 22 mallia 28:sta ennustaa samansuuntaista muutosta (Ruosteenoja et al., 2016a).



Kuva 7. Ennustettu lämpötilan muutos (°C) Euroopassa talvella (joulu-helmikuu; vas.) ja kesällä (kesä-elokuu; oik.) siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2040–2069 RCP8.5-skenaariossa. RCP4.5-skenaariossa samat lämpötilat saavutetaan vuosisadan lopulla. Kuvassa esitetään 28 ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvo (Ruosteenoja et al., 2016a).

kun vuorokauden keskilämpötila nousee keväällä yli 5 °C:n ja lumi on sulanut aukeilta. Syksyllä kasvukausi vastaavasti päättyy vuorokauden keskilämpötilojen laskiessa pysyvästi 5 °C:n alapuolelle. Kasvukauden lämpösomma saadaan laskemalla yhteen kasvukauden ajalta vuorokauden keskilämpötilat 5 °C:n ylittävältä osalta. Esimerkiksi päivä, jolloin vuorokauden keskilämpötila on 10 °C, kartuttaa lämpösommaa viidellä astepäivällä.

RCP4.5-skenaarion toteutuessa kevään tulo arvioidaan siirryttäessä jaksosta 1971–2000 jaksoon 2040–2069 aikaistuvan parilla kolmella viikolla, Lounais-Suomen saaristossa enemmänkin (Ruosteenoja et al., 2019a). Kesä pitenee molemmista päistä arviolta vajaat kaksi viikkoa ja talven tulo viivästyy todennäköisesti kolmisen viikkoa.



Kuva 8. Keskimääräinen kasvukauden lämpösomma (astepäivinä) vuosina 1971–2000 (yläkuva) sekä mallitulosten keskiarvoon perustuvat arviot jaksoille 2020–2049 (keskimmäinen rivi) ja 2070–2099 (alarivi), erikseen RCP4.5- (vasemmalla) ja RCP8.5-skenaarioille (oikealla). Vastaava kuva koko Euroopan alueelle esitetään julkaisussa Ruosteenoja et al. (2016b).

Termisten vuodenaikojen siirtyessä myös kasvukausi pitenee ja lämpenee. Kasvukauden lämpösommien ennustetaan kasvavan siten, että jo jaksolla 2020–2049 lämpösommaa kertyy eteläisimmässä Suomessa tyypillisenä kesänä yhtä paljon kuin Baltian eteläosissa jaksolla 1971–2000 (kuva 8). Vastaavasti Etelä-Suomen 1900-luvun lopun olosuhteet siirtyisivät maan keskivaiheille ja maan keskiosien olosuhteet Lapin eteläosiin. Mikäli ilmaston lämpeneminen jatkuu edelleen vuosisadan loppupuolella, eli päästökehityksessä ei päästä erittäin optimistisen RCP2.6-skenaarion uralle, alkaisivat Etelä-Suomen olosuhteet kuluvan vuosisadan loppuun mennessä muistuttaa jo Puolan ja Ukrainan 1900-luvun lopun olosuhteita. Tyypilliset 1900-luvun lopun Etelä-Suomen kasvukaudet puolestaan siirtyisivät lämpenemisen voimakkuudesta riippuen jonnekin Oulun ja jopa Pohjois-Lapin välille. Esimakua ennusteiden mukaisesta vuosisadan lopun tyypillisestä kesästä saatiin vuonna 2018, jolloin lämpösommaa kertyi Etelä-Suomessa enimmillään reilut 1900 astepäivää (Lehtonen ja Pirinen, 2019).

Kasvukausien lämmitessä 1900-luvun lopun ilmaston mukaiset harvinaisen lämpimät kasvukaudet muuttuvat nopeasti yleisiksi ja viileät kasvukaudet puolestaan hyvin harvinaisiksi. Jakson 1971–2000 tilastoihin verrattuna on esimerkiksi Helsingissä kasvukauden lämpösommaa jäänyt 2000-luvulla toistaiseksi vain yhtenä vuotena ja Sodankylässä kahtena keskiarvoa pienemmäksi. Vastaavasti noin joka toisena kasvukautena lämpösommaa on kertynyt enemmän kuin jaksolla 1971–2000 keskimäärin kerran kymmenessä vuodessa. Näin lämpimien kasvukausien todennäköisyys on siis kasvanut lyhyessä ajassa noin viisinkertaiseksi.

3.2 Sademäärä ja maaperän kosteus

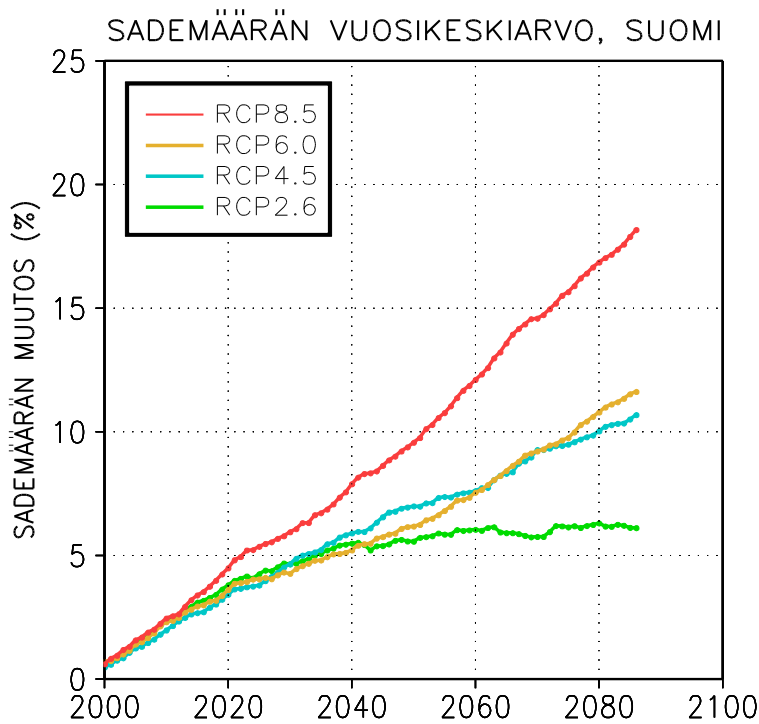
Suomessa sataa keskimääräisenä vuotena noin 500–700 mm, Perämeren rannikolla ja Pohjois-Lapissa hieman vähemmän ja paikoin maan etelä- ja itäosissa vuorostaan hieman enemmän. Ilmaston lämmitessä sademäärien ennakoitaan Suomessa hieman kasvavan (kuva 9). Suurten päästöjen RCP8.5-skenaarion toteutuessa vuoden kokonaissademäärä kasvaisi kuluvan vuosisadan aikana noin 20 %, mutta muissa päästöskenaarioissa sademäärän kasvu jää kymmenen prosentin tuntumaan tai pienemmäksi. Verrattuna lämpötilan ennustettuun nousuun ennusteet sademäärän kasvamisesta ovat epävarmimmalla pohjalla, mikä johtuu ennen kaikkea siitä, että sademäärän vuosienvälinen vaihtelu on paljon suurempaa kuin sademäärän ennustettu kasvu.

Sademäärän ennakoitu kasvu on suurelta osin seurausta lisääntyvistä sateista talvella (kuva 10). Kesällä ilmastomallit ennustavat keskimäärin sademäärän kasvavan vain vähän ja osa malleista ennakoit sademäärän jopa pienenevän.

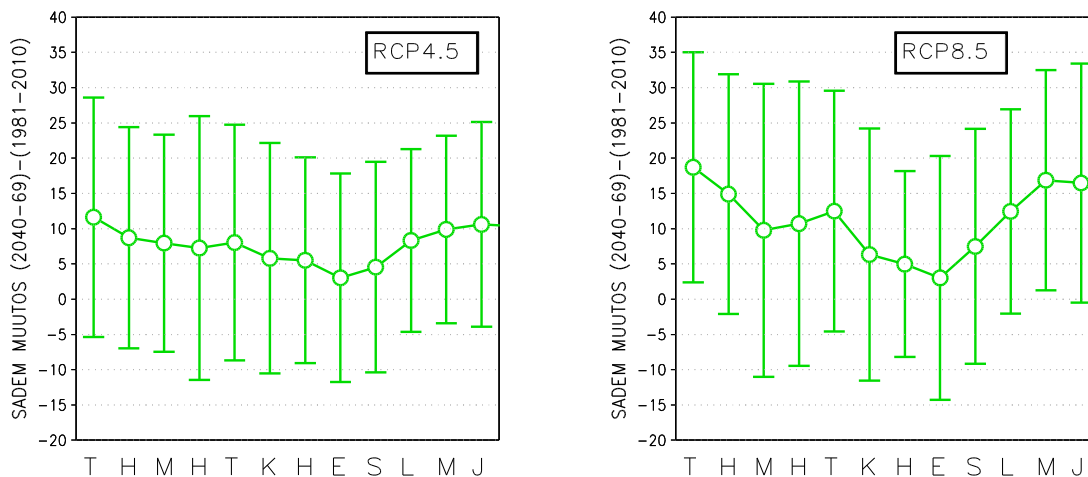
Euroopassa sademäärien ennakoitaan yleisesti ottaen kasvavan pohjoisessa ja pienenevän etelässä (kuvat 11 ja 12). Suomessa sademäärän ennakoitu kasvu on hieman suurempaa maan pohjois- kuin eteläosassa.

Lämpeneminen näyttäisi jonkin verran voimistavan rankimpia sateita kaikkina vuodenaikoina. Tämä johtuu ennen kaikkea siitä, että lämpimämpi ilma pystyy pitämään sisällään enemmän vesihöyryä. Kesällä mahdollinen sademäärän kasvu aiheutuukin nimenomaan rankkasateiden voimistumisesta. Samaan aikaan myös poutajaksot voivat jonkin verran pidentyä eli kesien sateet näyttäisivät jossain määrin muuttuvan entistäkin oikukkaammiksi (Jylhä et al., 2012; Lehtonen et al., 2014a). Rankkasateiden esiintymisen satunnaisuuden takia niiden voimakkuuksissa tapahtuvia muutoksia on kuitenkin vaikea todentaa. Saku et al. (2016) päivittivät hiljattain arviot rankkasateiden toistuvuusajoista Suomessa ja totesivat, että Katajiston (1969) puoli vuosisataa aiemmin tekemät arviot kuvaavat edelleen varsin hyvin rankkasateiden toistuvuusajoja Suomessa. Ainakaan toistaiseksi rankkasateiden esiintymisessä ei siis ole voitu havaita tapahtuneen mitään merkittäviä muutoksia.

Suomessa sadanta ylittää haihdunnan vuositason koko maassa ja pitkittyneet kuivuusjaksot ovat melko harvinaisia. Lämpötilan nousu kiihdyttää haihduntaa, eikä ennusteiden

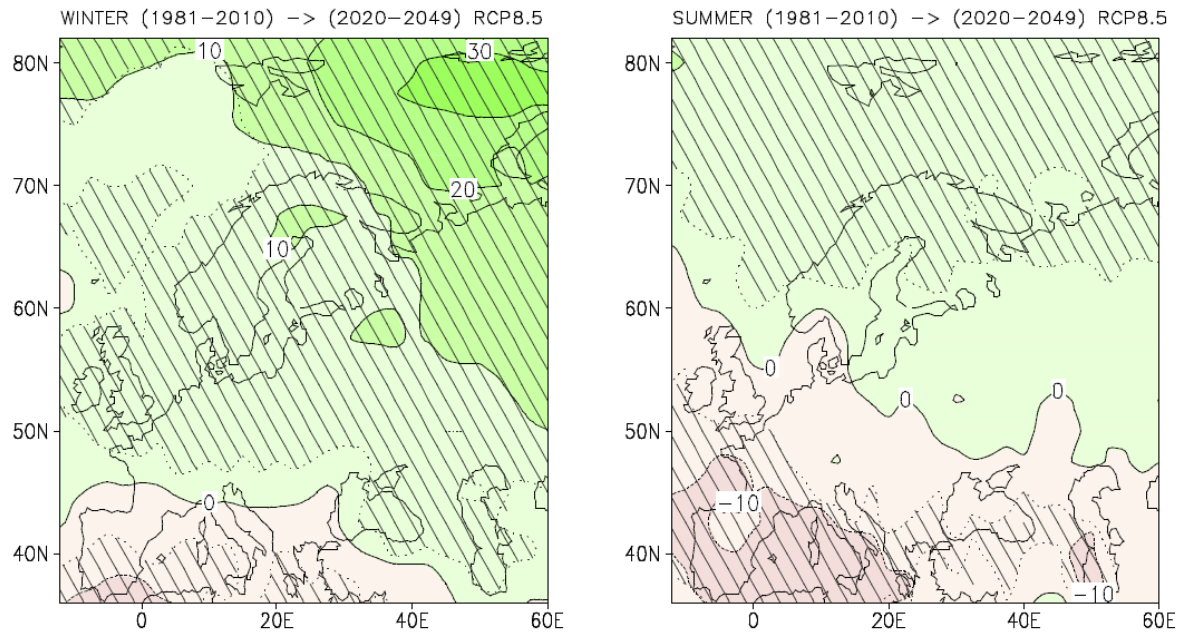


Kuva 9. Vuotuisen sademäärän ennustettu muutos Suomessa vuosina 2000–2085 verrattuna jakson 1981–2010 keskiarvoon (prosentteina). Muutokset ovat 28 maailmanlaajuisen ilmastomallin tulosten keskiarvoja, jotka on esitetty erikseen neljälle kasvihuonekaasuskenaariolle.

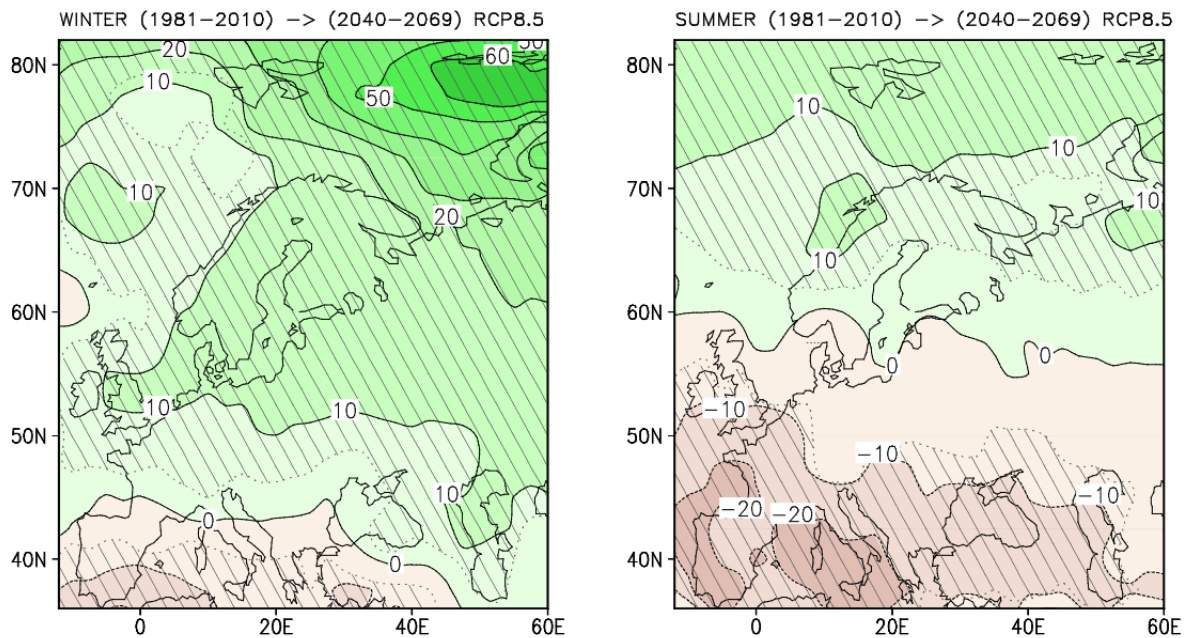


Kuva 10. Sademäärien prosentteina ilmaistu muutos Suomessa eri kuukausina verrattaessa jaksoja 1981–2010 ja 2040–2069. Käyrä esittää 28 maailmanlaajuisen ilmastomallin laskelmien keskiarvoa, pystypylväät muutokselle laskettua 90 %:n todennäköisyysväliä. Vasemmanpuoleinen kuva esittää melko pienten päästöjen RCP4.5-skenaariota, oikeanpuoleinen hyvin suurten päästöjen RCP8.5-skenaariota. Kaikki luvut ovat koko Suomen alueen keskiarvoja.

mukaan kasvava sademäärä riittää täysin kompensoimaan tästä aiheutuvaa maaperän kuivumista. Kuivuuden ennakoitaankin meillä jonkin verran lisääntyvän. 1900-luvun lopun ilmaston mittapuun mukaan harvinaisen kuivan maaperän tilanteiden ennakoitaan yleistyvän kaikkina vuodenaikoina, eniten keväällä ja Pohjois-Suomessa myös kesällä (kuva 13). Suurten päästöjen RCP8.5-skenaariota toteutuessa 1900-luvun lopulla kerran kymmenessä vuodessa toistunut kuivuus vaivaisi vuosisadan lopulla keväällä ja Pohjois-Suomessa myös kesällä 3–5 vuotena kymmenestä. Maaperän kuivuminen kasvukauden aikana vaikuttaa muun muassa metsäpalo-riskiin, jota käsitellään tarkemmin luvussa 3.6. Lähivuosikymmeninä näin voimakasta kuivuuden lisääntymistä ei kuitenkaan ole vielä odotettavissa. Kuvassa 14 on vielä esitetty esimerkinomaisesti pinnanläheisen ylimmän 10 cm:n maakerroksen kosteussisällön ennustettu muutos



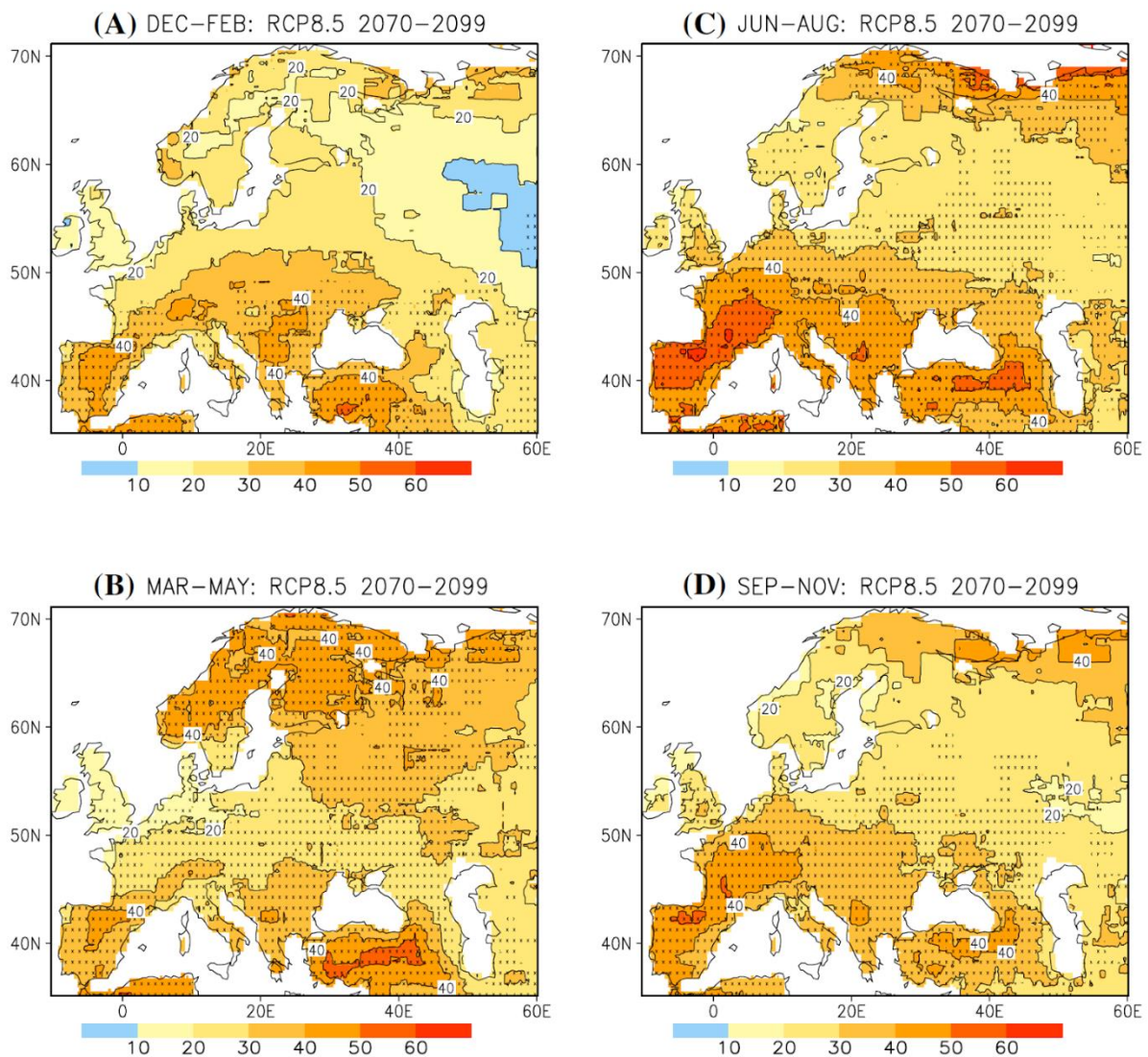
Kuva 11. Ennustettu sademäärän muutos (%) Euroopassa talvella (joulu-helmikuu; vas.) ja kesällä (kesä-elokuu; oik.) siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2020–2049 RCP8.5-skenaariossa. RCP4.5-skenaariossa likimain vastaava muutos tapahtuu noin 10–20 vuotta myöhemmin. Kuvassa esitetään 28 ilmastomuutosmallin tulosten keskiarvo. Varjostetuilla alueilla vähintään 22 mallia 28:sta ennustaa samansuuntaista muutosta (Ruosteenoja et al., 2016a).



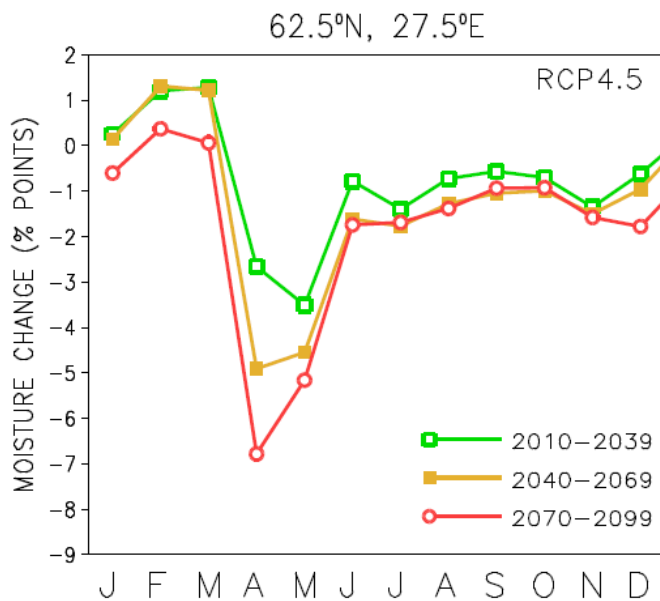
Kuva 12. Ennustettu sademäärän muutos (%) Euroopassa talvella (joulu-helmikuu; vas.) ja kesällä (kesä-elokuu; oik.) siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2040–2069 RCP8.5-skenaariossa. RCP4.5-skenaariossa likimain vastaava muutos tapahtuu vuosisadan loppuun mennessä. Kuvassa esitetään 28 ilmastomuutosmallin tulosten keskiarvo. Varjostetuilla alueilla vähintään 22 mallia 28:sta ennustaa samansuuntaista muutosta (Ruosteenoja et al., 2016a).

kuukausittain Pohjois-Savon eteläosassa sijaitsevassa hilaruudussa eri ajanjaksoille RCP4.5-skenaariossa. Mallitulosten keskiarvon mukaan pinnanläheisen maaperän kosteussisältö pienee kesällä ja syksyllä noin 1–2 %-yksikköä, joten mistään valtavan suuresta muutoksesta ei keskimäärin ole kyse. Kuten kuvasta 3 voidaan päätellä, pienikin muutos keskiarvossa voi kuitenkin johtaa suureen muutokseen erityisen kuivien tilanteiden yleisyydessä, kuten on jo nähty esimerkiksi korkeiden kasvukauden lämpösummien yleistymisessä. Eniten maaperä kuivuu huhti-toukokuussa, mikä johtuu pitkälti lumen sulamisen aikaistumisesta. Kevättalven kuukausina helmi-maaliskuussa maaperän kosteussisältö näyttäisi puolestaan hiukan kasvavan.

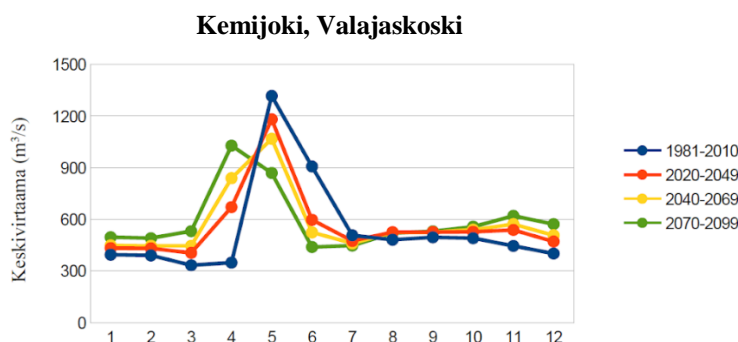
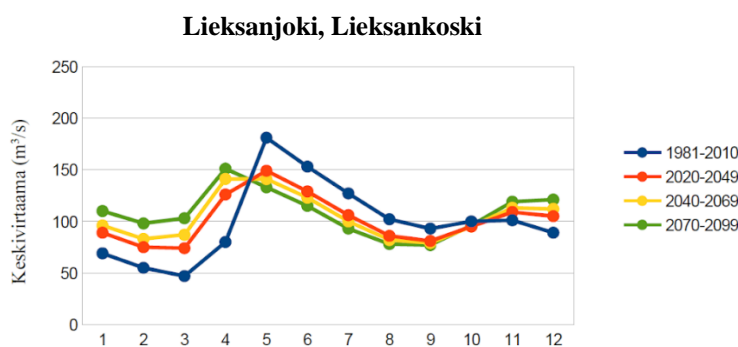
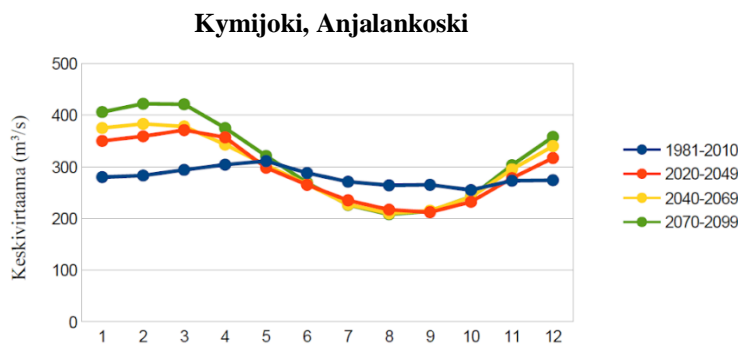
Lämpenemisen seurauksena talvipuolella vuotta entistä suurempi osuus sateesta saadaan vetenä. Vesisateiden osuus kasvaa etenkin alku- ja loppupalvesta, mutta vuosisadan loppulla voi tammi-helmikuussakin tulla eteläisimmässä Suomessa yli puolet sateesta vetenä (Räisänen, 2016). Tämä johtaa lumisateiden kokonaismäärän pienenemiseen, vaikka talvella



Kuva 13. Jakson 1961–2005 ilmastossa kerran kymmenessä vuodessa esiintyvän harvinaisen alhaisen pinnanläheisen maaperän (ylin 10 cm) kosteuden esiintymistodennäköisyys yksittäisenä vuotena jaksolla 2070–2099 RCP8.5-skenaariossa: (a) talvella, (b) keuhällä, (c) kesällä ja (d) syksyllä. Kuvassa esitetään 26 ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvo. Pisteytyksellä esitetään alueet, joilla vähintään 23 mallia 26:sta ennustaa samansuuntaista muutosta (Ruosteenoja et al., 2018).



Kuva 14. Pinnanläheisen maaperän (ylin 10 cm) kosteuden ennustettu muutos (%-yksikköä) Pohjois-Savon eteläosassa sijaitsevassa hilapisteessä (62,5 °N, 27,5 °E) RCP4.5-skenaariossa jakson 1971–2000 keskimääräisiin arvoihin verrattuna. Vihreä käyrä: vuodet 2010–2039, kellanoranssi käyrä: vuodet 2040–2069 ja punainen käyrä: vuodet 2070–2099 (Venäläinen et al., 2019).



Kuva 15. Simuloidut kuukausittaiset keskvirtaamat Kymijoen Anjalankoskessa, Lieksanjoen Lieksankoskessa ja Kemijoen Valajaskoskessa jaksoilla 1981–2010, 2020–2049, 2040–2069 ja 2070–2099 RCP4.5-skenaariossa. Piirretty Veijalaisen et al. (2018) taulukon L2 lukujen mukaisesti.

sademäärä jonkin verran kasvaakin. Lounaisaari-
saaristossa lumisateet vähenevät Räisäsen (2016)
tulosten mukaan jo vuosisadan puoliväliin mennessä kolmanneksella ja vuosisadan loppuun
mennessä alle puoleen, kun taas Lapissa muutos on selvästi pienempi, vuosisadan loppuun
mennessäkin todennäköisesti alle 20 %.

Sademäärien kasvaminen ja muutokset sateen olomuodossa sekä lumipeitteessä vaikut-
tavat oleellisesti jokien virtaamiin ja tulvien esiintymiseen. Sademäärän kasvu pyrkii kasvatta-
maan virtaamia, mutta toisaalta lumipeitteen hupeneminen vaimentaa lumen sulamisesta ai-
heutuvia kevättulvia. Siten ilmastonmuutoksen vaikutus tulviin vaihtelee vesistöalueen sijain-
nin ja sen ilmastollisten sekä hydrologisten ominaisuuksien mukaan. Pääsääntöisesti kevättul-
vat pienentyvät, mutta talvitulvat yleistyvät. Pohjois-Suomessa muutokset ovat kuitenkin vä-
häisiä, koska siellä lämpeneminen ei uhkaa talvista lumipeitettä. Uusikiven et al. (2014) mu-
kaan vähäinen lämpeneminen ei vielä juuri vaikuta Kemijoen tulviin. Veijalainen et al. (2018)
tutkivat ilmastonmuutoksen vaikutusta Kemijoen, Lieksanjoen ja Kymijoen virtaamiin (kuva
15). Tulosten mukaan Kemijoella keväinen tulvahuippu siirtyy lämpenemisen myötä aikaisem-
maksi ja keskimäärin ehkä hiukan madaltuu. Syyskesällä virtaamat säilyvät ennallaan ja syys-
talvella jonkin verran kasvavat. Pohjois-Suomen joissa virtaamat ovat joka tapauksessa jatkos-
sakin suurimmillaan kevättulvien aikaan. Lieksanjoen alueella keskimääräiset kevättulvat
näyttäisivät vaimenevan jo selvemmin. Myös kesällä virtaamat pienenevät, mutta talvella ne
kasvavat selvästi. Kymijoen alueella virtaamien odotetaan samoin pienenevän kesällä ja kas-
vavan talvella. Etelä- ja Lounais-Suomen joissa keskimääräisen virtaamahuipun odotetaan
asettuvan jatkossa nimenomaan talveen. Vuotuisen tulvahuipun keskimääräisen ajankohdan on
jo havaittu aikaistuneen Suomessa, selvimmin lounaisrannikolla (Blöschl et al., 2017).

3.3 Myrskyt ja rajuilmat

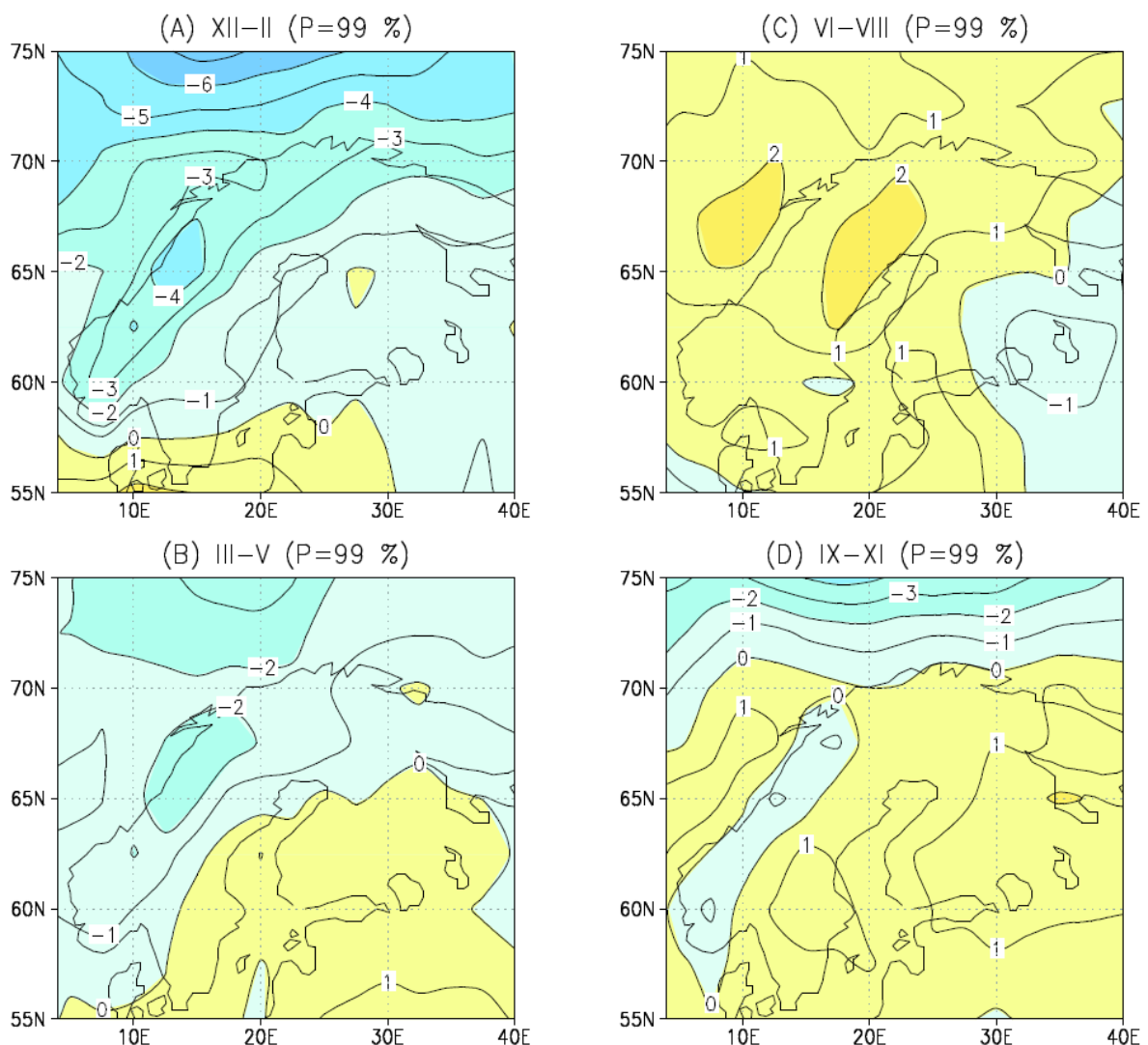
Matalapainemyrskyt ja kesäiset ukkosrajuilmat ovat merkittävimpiä metsätuhoja Suomessa ai-
heuttavia sääilmiöitä. Viime vuosien laajimmat metsätuhot tuottanut myrsky, Tapani, tuhosi
noin 3 miljoonaa kuutiota puuta joulukuussa 2011. Kymmenen vuotta aiemmin marraskuussa
2001 kaksi myrskyä, Pyry ja Janika, aiheuttivat yhteensä noin 7,3 miljoonan kuution tuhot.
Voimakkaimmissa kesäisissä rajuilmoissa, joiden esiintyminen painottuu heinäkuuhun ja elo-
kuun alkuun, tuhot ovat olleet samaa suuruusluokkaa. Kesän 2010 voimakkaat rajuilmat Asta,
Veera, Lahja ja Sylvi aiheuttivat yhteensä noin 8,1 miljoonan kuution metsätuhot. Vastaavan
kaltaisia hyvin laaja-alaisia tuhoja aiheuttaneita voimakkaita ukkosmyröitä meillä on sattun-
nut keskimäärin noin 10–15 vuoden välein. Aiemmilta vuosikymmeniltä muistetaan muun mu-
assa rajuilmat Unto (5.7.2002), Sanna (10.8.1985), niin sanottu Puumalan rajuilma (8.7.1972)
ja Maire (1.8.1961).

Myrskytuhojen esiintymistä luonnehtii suuri vuosien ja vuosikymmenten välinen sa-
tunnainen vaihtelu, mutta merkittäviä pitkän aikavälin muutoksia ei tuulituhon riskissä ole
viimeisten vuosikymmenten aikana meillä havaittu (Bärring ja Fortuniak, 2009; Jokinen et al.,
2015). Usein vain yksi tai enintään muutama myrsky aiheuttaa merkittävän osan tietyn alueen
pitkän aikavälin myrskytuhoista. Esimerkiksi Ruotsissa tammikuussa 2005 raivonnut Gudrun-
myrsky aiheutti yksistään enemmän metsätuhoja (noin 70 miljoonaa kuutiota) kuin kaikki muut
Ruotsin myrskyt edellisten 40 vuoden aikana yhteensä (Bengtsson ja Nilsson, 2007). Tämä
johtuu pitkälti siitä, että myrskyn tuhovoima kasvaa nopeasti tuulen nopeuden voimistuessa.
Suomessa on arvioitu, että sulan maan aikana tyypillinen laaja-alainen myrsky, jossa tuulen
suunta on lännen tai luoteen puolelta, aiheuttaa karkeasti noin 0,3 miljoonan kuution metsätu-
hot, jos maa-alueiden voimakkaimmat tuulen puuskat ovat 25 m/s, mutta jos voimakkaimmat
puuskat puhaltavatkin 30 m/s, puustotuhoja tulee jo noin 1,9 miljoonaa kuutiota ja 35 m/s tuu-
len puuskilla tuhot kasvavat noin 8,7 miljoonaan kuution (Valta et al., 2019). Esimerkiksi

hieman Tapania voimakkaampi, mutta selvästi mittavammat metsätuhot aiheuttava myrsky on meillä ilmastonmuutoksesta riippumatta täysin mahdollinen.

Keskileveysasteiden matalapainemyrskyt saavat voimansa ennen kaikkea ilmassojen välisestä lämpötilaeroista. Koska pohjoisilla napa-alueilla ilmaston lämpeneminen on voimakkaampaa kuin maapallolla keskimäärin, pienenee lämpötilaero napa-alueiden ja eteläisempien leveysasteiden välillä. Tällä on siten periaatteessa myrskyjä heikentävä vaikutus. Toisaalta ylempänä ilmakehässä lämpötilaero napa-alueiden ja eteläisempien leveysasteiden välillä päinvastoin kasvaa, mikä voisi voimistaa myrskyjä (Shaw et al., 2016). Lisäksi myrskyratojen ennakoidaan keskimäärin siirtyvän kohti napoja (Tamarin ja Kaspi, 2017; Sinclair et al., 2020). Sinclairin et al. (2020) mukaan keskileveysasteiden matalapainemyrskyjen lukumäärä ei koko maapallon mitassa suuresti muutu ilmaston lämmetessä, mutta voimakkaiden myrskyjen suhteellinen osuus kasvaa ja matalapaineisiin liittyvät sateet voimistuvat.

Suomen alueella kovien tuulten voimakkuuksissa ei näyttäisi olevan odotettavissa suuria muutoksia (Ruosteenoja et al., 2019b). Kuvassa 16 on esitetty kovien geostrofisten tuulten



Kuva 16. Kovien tuulten voimakkuuden ennustettu muutos (prosentteina) Pohjois-Euroopassa siirryttäessä jaksosta 1961–2005 jaksoon 2040–2069 RCP8.5-skenaarion mukaan: (a) talvi, (b) kevät, (c) kesä ja (d) syksy (geostrofisen tuulen voimakkuuden todennäköisyysjakauman 99. prosenttipistearvon muutos 21 ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvona; Lehtonen et al., 2019a).

nopeuksien ennustettu muutos siirryttäessä jaksosta 1961–2005 jaksoon 2040–2069 suurten kasvihuonekaasupäästöjen RCP8.5-skenaarion mukaan 21 ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvona. Geostrofinen tuuli on paine-eron aiheuttama ilmavirtaus, joka puhaltaa ilmanpaineen samanarvonkäyrien suuntaisesti ja kuvaa keskimäärin hyvin tuuliolosuhteita muutaman kilometrin korkeudella, missä maanpinnan aiheuttaman kitkan vaikutus ei tunnu. Myös pinnanläheisen tuulen voimakkuus on varsin hyvin verrannollinen geostrofisen tuulen nopeuteen, ja geostrofisen tuulen nopeuden perusteella voidaan siten arvioida laaja-alaisten matalapainemyrskyjen voimakkuutta. Kuvan 16 mukaan edes suurten kasvihuonekaasupäästöjen RCP8.5-skenaarion toteutuessa kovien tuulten voimakkuudet eivät vuosisadan puoliväliin mennessä kasvaisi mallitulosten keskiarvon mukaan kuin enintään noin 0–3 %. Talvella ja Pohjois-Suomessa myös keväällä kovat tuulet näyttäisivät hieman heikentyvän. Eri ilmastonmuutosmallien antamat tulokset tuulten nopeuksien muutoksista kuitenkin poikkeavat merkittävästi toisistaan. Osa malleista ennakoivat tuulten voimistuvan, osa heikentyvän. Jonkin verran yksimielisempiä ilmastonmuutosmallit ovat siitä, että lännenpuoleisten tuulten osuus kasvaa entisestään.

Ukkosia ja kesäisiä rajuilmoja suosivat olosuhteet näyttäisivät ilmastomallitulosten perusteella yleistyvän (Rädler et al., 2019). Tämän myötä ennakoitaan rajuilmoihin liittyvien kovien tuulenpuuskien yleistyvän ja suuria rakeita satavan aiempaa useammin. Tämänkaltaisesta kehityskulusta ei kuitenkaan ainakaan toistaiseksi ole havaittu merkkejä. Ukkospäivien määrä on Suomessa 1800-luvun lopulta lähtien vaihdellut vuosikymmenten välillä ilman selkeää trendiä, ja salamoinnin määrä puolestaan on 1970-luvun jälkeen vähentynyt selvästi (Laurila ja Mäkelä, 2019), mikä tosin saattaa vielä selittyä vuosikymmenten välisellä satunnaisella vaihtelulla.

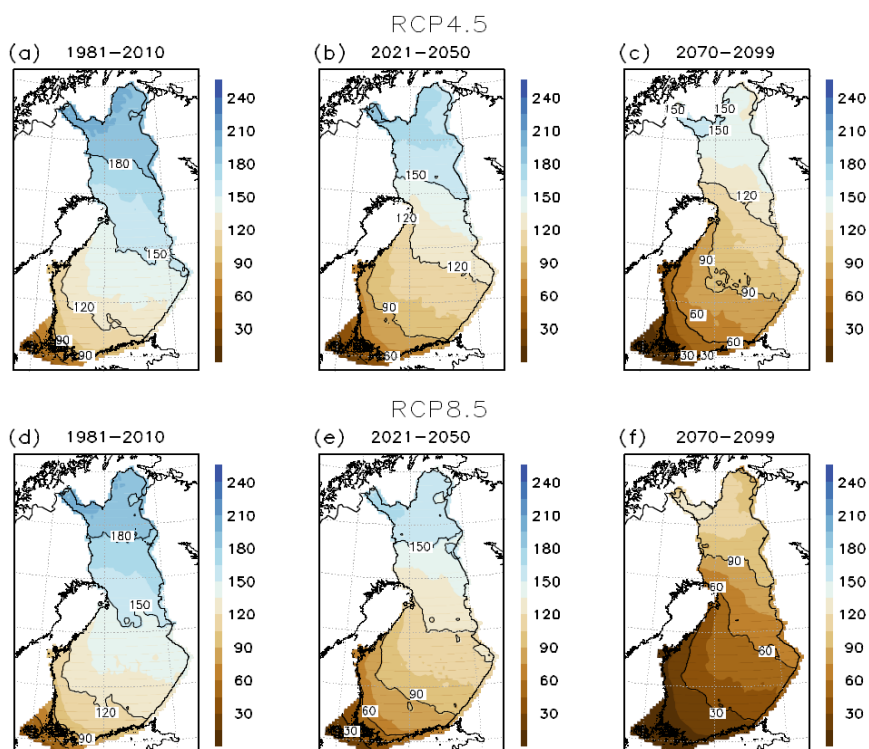
3.4 Routa ja maan kantavuus talvella

Ilman lämpötila ja lumipeite sekä muun muassa maaperän kosteus vaikuttavat oleellisesti maan routaantumiseen. Talvien lauhtuessa roudan syvyyden ennakoitaan pienenevän ja maan olevan roudassa keskimäärin aiempaa lyhyemmän ajan.

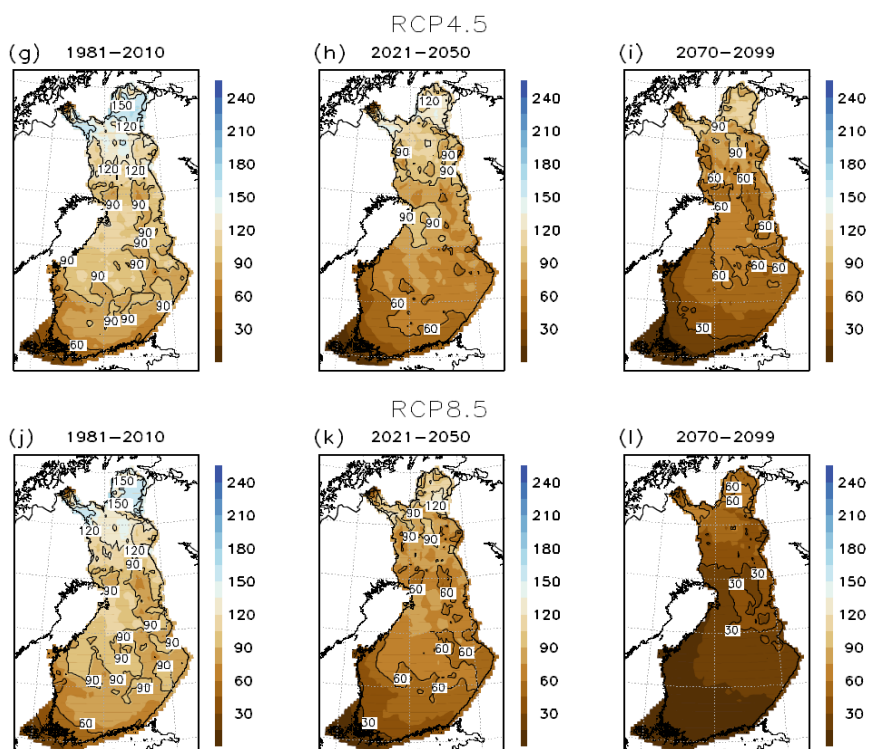
Viimeksi ilmastonmuutoksen vaikutusta routaan ja maan kantavuuteen talvella ovat tutkineet Lehtonen et al. (2019b). Kuvassa 17 esitetään Lehtosen et al. (2019b) tutkimuksen tulosten mukaisesti kolmella eri 30-vuotisjaksolla sellaisten päivien keskimääräinen lukumäärä talvea kohden, jolloin mallinnettu roudan syvyys on vähintään 20 cm. Tällöin maan oletetaan kykenevän kantamaan raskaita metsätyökoneita (Kokkila, 2013). Tulokset esitetään erikseen kivennäismailla ja turvemaille, samoin kuin RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioille. Kivennäismailla routaisen maan ajan keston arvioidaan lyhenevän noin kuukaudella siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2021–2050. RCP4.5-skenaarion toteutuessa routakausi lyhenisi vuosisadan loppuun mennessä vielä toisella kuukaudella ja RCP8.5-skenaariossa kahdella kuukaudella lisää, siis yhteensä noin kolme kuukautta jaksoon 1981–2010 verrattuna. Lounais-Suomessa kantavaa routaa olisi tällöin keskimääräisenä talvena alle kaksi viikkoa. Turvemaille routa ei yleensä ulotu kovin syvälle, ja vuosisadan lopulla ei tulosten mukaan maan etelä- ja keskiosissa turvapohjaisilla mailla kantavaa routaa olisi useimpina talvina juuri lainkaan. Etenkin huonosti kantavilla kohteilla roudan väheneminen voi siten muodostua merkittäväksi ongelmaksi puunkorjuun näkökulmasta. Lisäksi talviaikaisten kelirikottilanteiden arvioidaan yleistyvän alemmalla tieverkolla.

Roudan väheneminen ja myös maaperän kosteussisällön kasvaminen syystalvella voivat samalla lisätä myrskytuhoja, vaikka myrskyjen esiintyminen ei suuresti muuttuisikaan. Toki nykyäänkin suuri osa Etelä- ja Länsi-Suomen syystalven myrskyistä esiintyy sulan maan aikana tai routakerroksen ollessa hyvin ohut.

Kivennäismaat



Turvemaat

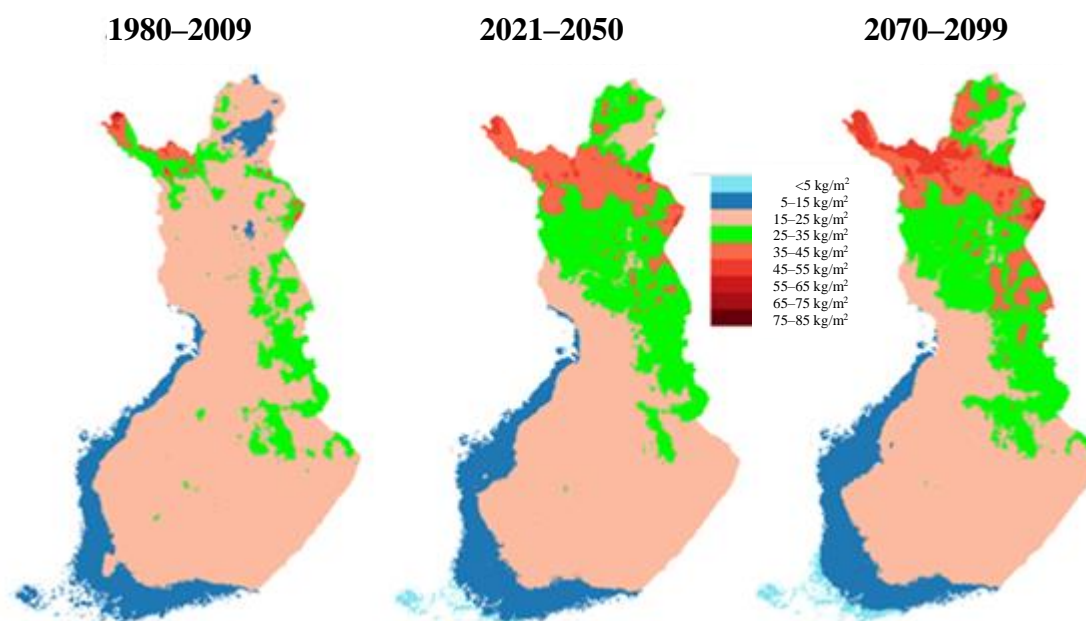


Kuva 17. Talven keskimääräinen kunnolla kantavien routapäivien lukumäärä (roudan syvyys yli 20 cm) kuuden ilmastomallin tulosten pohjalta arvioituna savi- tai silttipohjaisilla kivennäismailla sekä turvemailla jaksoilla 1981–2010, 2021–2050 ja 2070–2099 RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioiden mukaan (Lehtonen et al., 2019a).

3.5 Lumen kertyminen puiden oksille ja lumituhojen mahdollisuus

Lumen aiheuttamat vauriot ovat tuulituhojen ohella yleisimpiä metsissämme esiintyviä sään aiheuttamia puustovaurioita. Solantien (1994) mukaan merkittäviä lumituhoja esiintyy Suomen metsissä alueesta riippuen keskimäärin noin 3–17 vuoden välein. Lumituhojen esiintyminen on hyvin riippuvaista paikallisista maastonmuodoista, sillä ympäristöään korkeammilla maastonkohdilla olevat metsät keräävät suurimmat lumikuormat. Altteimpia lumituhoille ovat runsaasti tykkyä keräävät Itä- ja Pohjois-Suomen vaarojen lakiosien metsät. Jalkasen ja Konôpkan (1998) mukaan puiden kantaman lumikuorman paino kasvaa likimain lineaarisesti maaston korkeuden kasvaessa. Heikinheimo (1920) osoitti jo sata vuotta sitten, että Suomessa lumituhoja esiintyy eniten metsissä, jotka sijaitsevat yli 300 metrin korkeudessa merenpinnasta. Lumituhot alkavat kuitenkin yleistyä jo yli 100 metrin korkeudessa sijaitsevissa metsissä (Nykänen, 1997). Lisäksi oleellista on maaston suhteellinen korkeus ympäristöön verrattuna. Tuulen suunnasta katsoen ylöspäin viettävä maasto kasvattaa sademääriä, ja esimerkiksi Lohjanharjulla vaikutus voi olla jopa 50 %, mikä lisää selvästi lumituhojen riskiä paikallisesti (Solantie, 1994).

Ilmaston lämpenemisen seurauksena talven keskimäärin suurimpien lumikuormien puiden oksilla ennakoitaan kasvavan Pohjois-Karjalan ja Kainuun vaaraseuduilta Lappiin ulottuvalla alueella, kun taas Etelä- ja Länsi-Suomessa raskaat puiden lumikuormat kevenevät (kuva 18). Lehtosen et al. (2016b) tulosten mukaan lumikuormien kasvuun itärajan pinnassa ja Pohjois-Suomessa vaikuttavat sekä lisääntyvä huurteen kertyminen että voimakkaiden märän lumisateen tilanteiden yleistyminen.



Kuva 18. Keskimääräinen talven suurin puiden lumikuorma kuuden ilmastomallin tulosten keskiarvona jaksoilla 1980–2009, 2021–2050 ja 2070–2099 RCP4.5-skenaarion mukaan (Asikainen et al., 2019).

3.6 Metsäpalovaara

Metsäpalojen määrä Suomessa vaihtelee vuosien välillä paljon. Sääolosuhteiden vaihtelut selettävät valtaosan palojen esiintymisen vaihtelusta, vaikka suurin osa metsäpaloista onkin seurausta ihmistoiminnasta. Vaikeimpia metsäpalokesiä ovat lämpimät ja kuivat kesät. Metsäpalojen sammuttaminen on Suomessa ollut viime vuosikymmeninä erittäin tehokasta ja palojen merkitys metsätalouden kannalta on siten melko vähäinen. Sitä vastoin luonnon monimuotoisuuden suojelemisen näkökulmasta palojen sammuttaminen on ollut jopa aivan liian tehokasta (Parviainen, 1996; Virkkala ja Toivonen, 1999).

Ilmastonmuutoksen vaikutusta metsäpalovaaraan Suomessa ovat tutkineet Kilpeläinen et al. (2010), Mäkelä et al. (2014), Lehtonen et al. (2014b, 2016a) sekä Lehtonen ja Venäläinen (2020). Kaikissa näissä tutkimuksissa on saatu tulokseksi, että maaperän kosteussisällön enustettu pieneneminen kesällä johtaa metsäpalovaaran kasvuun. Olettamalla sääolojen ja metsäpalojen esiintymisen välisen yhteyden pysyvän ennallaan Lehtonen et al. (2016a) arvioivat, että suurehkojen, yli 10 hehtaarin laajuisten, metsäpalojen lukumäärä voisi kuluvan vuosisadan aikana Suomessa jopa kaksin-kolminkertaistua.

Viime aikojen vaikeimmat metsäpalokesät Suomessa on koettu vuosina 2006 ja 2018. Molempina kesinä sääolosuhteiden perusteella arvioitu metsäpaloriski oli osassa maata niin korkea, että vastaavaa sattuu harvemmin kuin kerran 50 vuodessa (Lehtonen ja Venäläinen, 2020). Lehtosen ja Venäläisen (2020) arvion mukaan näin vaikeat metsäpalokesät säilyvät harvinaisina vielä lähivuosikymmeninä, mutta mikäli kaikkein voimakkaimmat lämpenemisskenaariot toteutuvat, voi vastaavan kaltaisia kesiä vuosisadan lopulla esiintyä jopa useampia jokaisena vuosikymmenenä. On kuitenkin epävarmaa, kuinka paljon ilmaston lämpeneminen kasvattaa metsäpaloriskiä Suomessa. Tähän mennessä tapahtuneen lämpenemisen ei ole havaittu sen enempää kasvattaneen kuin pienentäneenkään riskiä (Mäkelä et al., 2012).

Metsäpalojen keskikoko kasvaa nopeasti sen mukaan mitä kauemmin palon havaitsemisesta kuluu aikaa palokunnan saapumiseen palopaikalle (Sjöström ja Granström, 2020). Suomessa kesän 2018 laajimmille paloille oli tyypillistä, että ne havaittiin alun perin epämääräisinä savuhavaintoina, ja palot tapahtuivat syrjäisten alueiden laajoilla yhtenäisillä metsäalueilla kaukana lähimmästä vesilähteestä sekä paloautoilla ajettavista teistä (Ketola, 2018). Metsäpalojen sammuttaminen on sitä helpompaa mitä nopeammin palot kyetään sammuttamaan niiden syttyttyä. Palojen torjunnan näkökulmasta keskeistä onkin siten pystyä ylläpitämään korkealla tasolla oleva valmius palojen torjunnassa ja sammuttamisessa.

Suomessa metsäpalojen sammuttaminen on haja-asutusalueilla pitkälti paikallisten vaapaalokuntien vastuulla, ja mikäli maaseudun autioituminen johtaa heikentyvään valmiuteen palojen torjunnassa, voi tällä olla paljon ilmastonmuutosta merkittävämpi paloaloja kasvattava vaikutus. Jo Ruotsissa suuria metsäpaloja esiintyy paljon enemmän kuin Suomessa, vaikka ilmastolliset ja ekologiset erot maiden välillä ovat pieniä. Merkittävänä tekijänä eron taustalla arvellaan olevan maiden välisten erojen viranomaistoimintojen organisoimisessa. Ruotsissa palojen sammuttaminen on keskitetty suuremmille yksiköille.

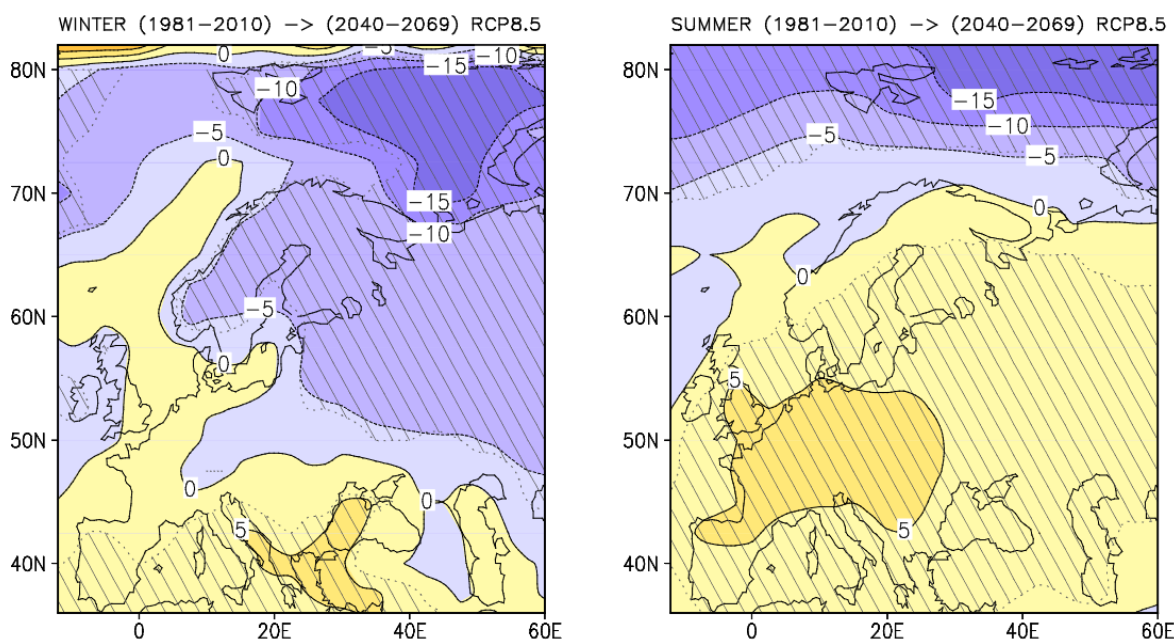
Vaikka metsäpalojen merkitys onkin Suomen metsätaloudelle melko vähäinen, aiheuttavat metsäpalot kuitenkin taloudellisia menetyksiä. Metsäpalojen torjunnan kustannuksiksi on arvioitu noin 7000 euroa palanutta hehtaaria kohti (Kosenius et al., 2014; Venäläinen et al., 2016). Ruotsissa puolestaan metsäkonetöissä aiheutuneiden kipinöiden sytyttämät palot ovat olleet vastuussa noin 40 %:sta kaikesta metsäpaloissa viimeisten reilun 20 vuoden aikana palaneesta alueesta (Sjöström et al., 2019). Erityisen paljon metsäkonetöissä syttyy paloja kivisessä maastossa. Metsäkonetöistä pidättäytyminen kuivimpaan aikaan kesällä voisi siis tehokkaasti ehkäistä metsäpalojen syttymistä (Nieminen, 2020).

3.7 Auringonsäteily ja albedo

Talvella länsituulten ennakoitu lisääntyminen muuttaisi toteutuessaan ilmastoamme aiempaa atlanttisemmaksi. Tämä tarkoittaisi entistäkin pilvisempää säätä marraskuun ja maaliskuun välisenä aikana. Suurten kasvihuonekaasupäästöjen RCP8.5-skenaariossa auringonsäteilyn määrä vähenee talvella vuosisadan alkupuolella koko maassa todennäköisimmin noin 5–10 % (kuva 19). Sitä vastoin kesällä paisteen ennakoitaan hieman lisääntyvän, etenkin maamme eteläosissa. Auringonsäteilyn määrässä ennustettu lisäys on suurten päästöjen RCP8.5-skenaariosakin kesällä keskimäärin alle 5 %. Eniten paisteen ennustetaan lisääntyvän elo-syyskuussa. Kaiken kaikkiaan auringonpaistetuntien määrä todennäköisesti siis hieman kasvaa, koska harvojen talvisten auringonpaistehetkien väheneminen ei montaa tuntia auringonpaisteen kestosta vie, kun taas muutamankin prosentin lisäys auringonsäteilyn määrässä kesällä tuo heti runsaasti lisää paistetunteja.

Ilmastonmuutosmallit ovat melko yksimielisiä auringonsäteilyn vähenemisestä talvella ja Etelä-Suomessa myös paisteen lisääntymisestä kesällä. Jonkin verran eri mallien antamat tulokset kuitenkin poikkeavat toisistaan. Yhteenvetona voisi sanoa, että talvella auringonsäteilyn määrä joko pysyy likimain ennallaan tai vähenee hieman ja kesällä se joko pysyy likimain ennallaan tai kasvaa hieman.

Saapuvasta auringonsäteilyn energiasta osa heijastuu maan pinnalta takaisin ilmakehään. Tätä heijastuvan säteilyn osuutta kuvaa pinnan albedo. Metsän albedo vaihtelee muun muassa puulajin, metsän rakenteen ja lumipeitteen mukaan. Tarkasteltaessa metsien merkitystä ilmastonmuutoksen torjunnassa on kokonaiskuvan muodostamiseksi tärkeää huomioida myös metsien vaikutus pinnan albedoon (Naudts et al., 2016; Luysaert et al., 2018; Rautiainen et al., 2020). Suomen oloissa kuusimetsien albedo on yleensä kaikkein pienin, mäntymetsien vähän suurempi ja lehtimetsien suurin (Kuusinen et al., 2014b). Lumipeite kasvattaa metsien albedoa, mutta ei kuitenkaan yhtä paljon kuin avoimilla alueilla. Kevättalvella tummat metsät



Kuva 19. Ennustettu auringonsäteilyn määrän muutos (%) Euroopassa talvella (joulu-helmikuu; vas.) ja kesällä (kesä-elokuu; oik.) siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2040–2069 RCP8.5-skenaariossa. Kuvassa esitetään 28 ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvo. Varjostetuilla alueilla vähintään 22 mallia 28:sta ennustaa samansuuntaista muutosta (Ruosteenoja et al., 2016a).

imevätkin itseensä merkittävästi enemmän auringonsäteilyä kuin lumen peittämät suot, pellot ja niityt (Kuusinen et al., 2012). Kasvukauden aikana metsien albedo vaihtelee vain vähän, joskin lehtimetsissä puiden lehtien puhkeaminen hieman kasvattaa albedoa. Havumetsien albedo pienenee metsien ikääntyessä (Kuusinen et al., 2014a).

Globaalisti tarkasteltuna maapallon albedo on hieman kasvanut esiteolliseen aikaan verrattuna maankäytön muutosten seurauksena (Forster et al., 2007). Ennen kaikkea tähän on vaikuttanut metsien vähentyminen. Maankäytön muutoksista aiheutuneen albedon kasvun arvioidaan pieneltä osin hidastaneen maapallon lämpenemistä. Toisaalta kasvavat metsät sitovat hiilidioksidia, millä on ilmaston lämpenemistä hidastava vaikutus. On arvioitu, että lähinnä korkeilla leveysasteilla aukeiden alueiden metsittymisen nettovaikutus voi olla pikemminkin ilmastomuutosta kiihdyttävä kuin hidastava (Betts, 2000).

Suomen metsien albedon muutoksia voidaan arvioida satelliittikuvien perusteella 1980-luvun alusta eteenpäin. Tänä aikana Suomen metsien puuston tilavuus on kasvanut lähes 50 %, vaikka metsäpinta-ala on pysynyt lähes ennallaan (Vaahtera et al., 2018). Metsiemme albedon on todettu kesäisin kasvaneen kuitenkin vain aavistuksenomaisesti (Lukeš et al., 2016). Etelä-Lapin, Pohjois-Pohjanmaan, Kainuun ja Pohjois-Karjalan metsät ovat lisäksi muuttuneet tummemmiksi juuri ennen lumien sulamista, mikä voi johtua puuston runkotilavuuden kasvusta (Manninen et al., 2019). Kaiken kaikkiaan näyttää siltä, että puuston tilavuuden kasvulla on viime vuosikymmeninä ollut vain vähäinen vaikutus metsiemme albedoon (Rautiainen et al., 2020).

Metsien albedon ilmastollisiin vaikutuksiin liittyy vielä useita avoimia kysymyksiä. Tähän mennessä saatavilla olleiden satelliittikuviin perustuvien pinnan albedo kuvaavien tietoa-aineistojen alueellinen tarkkuus on ollut huomattavasti tyypillistä suomalaisten metsien kuviokokoa karkeampi, ja monet analyysit metsän rakenteen ja albedon välisistä suhteista ovat siten toistaiseksi vain suuntaa antavia (Rautiainen et al., 2020).

Luysaert et al. (2018) arvioivat miten hiilen sidonnan maksimointiin tähtäävä metsänhoito ja toisaalta ilmaston lämpenemisen hillinnän maksimointiin tähtäävä metsänhoito poikkeaisivat eri Euroopan alueilla perinteisestä metsänhoidosta. Heidän tulosten mukaan hiilen sidonnan maksimointiin tähtäävä metsänhoito edellyttäisi Pohjois-Euroopassa hoitamattomien metsien määrän kolminkertaistamista ja lehtimetsien osuuden hienoista lisäämistä. Sen sijaan jos tavoitteena olisi metsänhoidon avulla hillitä ilmaston lämpenemistä, pitäisi puolet talousmetsistä korvata lehtiputaimikoilla.

4 Millainen Suomen metsien kannalta todennäköisin ja toisaalta pahin ilmastomuutosskenaario voisi olla?

4.1 Todennäköisin ilmastomuutos

Ilmastomuutoksen voimakkuutta ja vaikutuksia arvioitaessa hyödynnetään skenaarioita, joissa kuvataan maapallon kehitysvaihtoehdot, kuten luvun 2.2 kuvassa 1 on esitetty. Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoitteena on rajoittaa maapallonlaajuinen lämpeneminen 2 °C:een. Kasvihuonekaasujen päästöjen tulisi tuolloin seurata likipitään RCP2.6-skenaariota. On myös esitetty arvioita, että lämpeneminen tulisi saada rajattua 1,5 °C:een (IPCC, 2018). Tämä edellyttäisi, että globaalit nettopäästöt laskevat nollaan vuosisadan puoliväliin mennessä. Tällä hetkellä eri maiden toteuttamat päästöjen hillintätoimet eivät lähimainkaan riitä siihen, että näin kunnianhimoinen tavoite saavutettaisiin (<https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019>). Taulukkoon 1 on tiivistetysti koottu eri skenaarioihin pohjautuvia keskeisiä muutoksia ja niiden muutamia suurimpia vaikutuksia.

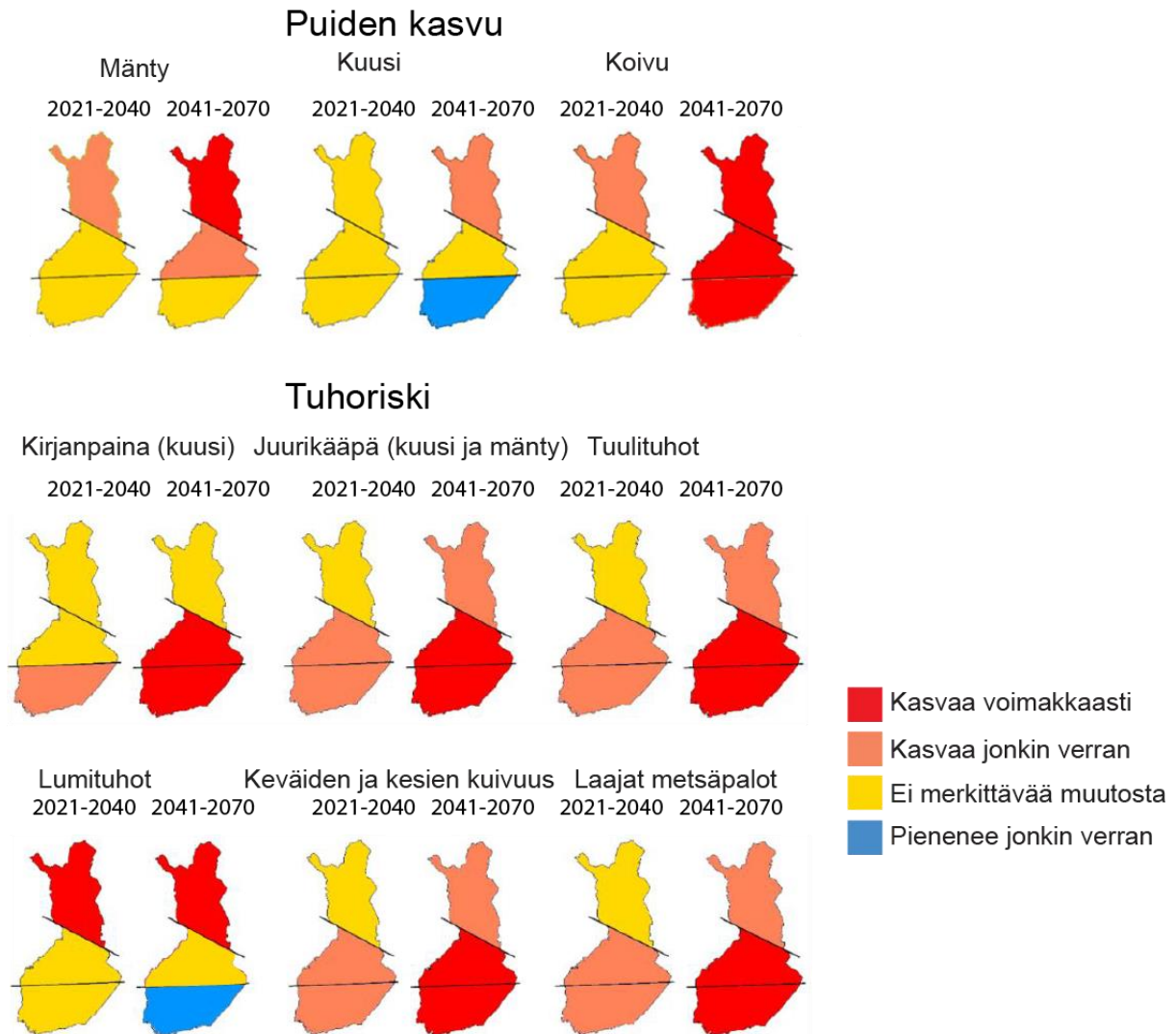
Taulukko 1. Ilmastonmuutoksen suuruus ja vaikutuksia kolmen eri kasvihuonekaasupitoisuus vaihtoehdon toteutuessa (muokattu julkaisusta Venäläinen et al., 2019).

	<i>RCP8.5</i>	<i>RCP4.5</i>	<i>RCP2.6</i>
<i>Lämpötilan kohoaminen maailmanlaajuisesti</i>	2,7 °C vuoteen 2050 4,2 °C vuoteen 2080	2,1 °C vuoteen 2050 2,6 °C vuoteen 2080	1,7 °C vuoteen 2050 1,8 °C vuoteen 2080
<i>Valtamerien pinnan kohoaminen vuodesta 1990 vuoteen 2090. Suluissa on arvioiden vaihteluväli [1]</i>	63 cm (45 cm – 82 cm)	47 cm (32 cm – 63 cm)	40 cm (26 cm – 55 cm)
<i>Maailmanlaajuisia vaikutuksia</i>	<i>Merkittävä määrä nykyisiä kasvi- ja eläinlajeja katoaa sukupuuttoon. Elinolot etenkin monissa matalatuloisissa maissa huononevat merkittävästi johtaen rikkaampiin maihin suuntautuvaan laajaan pakolaisuuteen.</i>	<i>Kasvi- ja eläinlajeja katoaa sukupuuttoon mutta vähemmän kuin RCP8.5-skenaarion toteutuessa. Elinolot etenkin monissa matalatuloisissa maissa huononevat lisäten rikkaampiin maihin kohdistuvaa pakolaisuutta.</i>	<i>Paikallisia häiriöitä ekosysteemissä. Elinolot joissakin matalatuloisissa maissa heikkenevät ja voivat lisätä pakolaisuutta.</i>
<i>Mahdollisia nopeita ja peruuttamattomia muutoksia</i>	<i>Grönlannin ja Etelämantereen jäätiköt pienenevät. Pohjoisen napa-alueen jääpeite supistuu nopeasti kesäisin. Amazonin alueen sademetsät ja myös pohjoiset havumetsät kärsivät muutoksesta.</i>	<i>Grönlannin ja Etelämantereen jäätiköt pienenevät. Pohjoisen napa-alueen jääpeite supistuu usein kesäisin.</i>	<i>Pohjoisen napa-alueen jääpeite supistuu joidenkin kesinä.</i>
<i>Vaikutuksia Suomen metsiin (katso myös kuva 20)</i>	<i>Kuusimetsät kärsivät voimakkaasti kuivuudesta Etelä- ja Keski-Suomessa. Metsäpaloaara moninkertaistuu nykyiseen verrattuna. Lumituhojen riski kasvaa Itä- ja Pohjois-Suomessa ja pienenee maamme lounais- ja eteläosissa. Bioottisten tuhojen [2] riski kasvaa voimakkaasti etenkin Etelä- ja Keski-Suomessa. Lyhentynyt routa-aika ja vähentynyt roudan paksuus vaikeuttaa puiden korjuuta huonosti kantavilta alueilta.</i>	<i>Kuusimetsät kärsivät kuivuudesta Etelä- ja Keski-Suomessa. Metsäpaloaara ja bioottisten tuhojen riski kasvavat nykyiseen verrattuna etenkin Etelä- ja Keski-Suomessa. Koivu ja mänty hyötyvät muutoksesta. Lyhentynyt routa-aika ja vähentynyt roudan paksuus vaikeuttaa puiden korjuuta huonosti kantavilta alueilta.</i>	<i>Muut puulajit paitsi kuusi hyötyvät kohonneesta ilmakehän hiilidioksidipitoisuudesta ja pidentyneestä kasvukaudesta. Metsäpaloaara ja bioottisten tuhojen riski kasvavat jonkin verran nykyiseen verrattuna.</i>

[1] Arviot pohjautuvat IPCC:n esittämiin tuloksiin; paljon korkeampia arvioita on esitetty toisissa viitteissä. Äskettäin julkaistun IPCC:n erikoisraportin mukaan valtamerien pinta kohoaa RCP8.5-skenaarion toteutuessa noin 20 cm aiemmin arvioitua enemmän, kun taas RCP2.6-skenaarion mukainen arvio valtamerien pinnannoususta on säilynyt suunnilleen ennallaan (IPCC, 2019).

[2] Esimerkiksi kaarnakuoriaiset ja maannousema.

Kuten taulukkoon 1 kootuista arvioista sekä luvun 2.3 johtopäätöksistä liittyen äärimmäisten ilmastonmuutoksen mahdollisuuksiin nähdään, on välttämätöntä, että ihmiskunta pystyy rajaamaan päästöt pienemmiksi kuin RCP8.5-skenaariossa tapahtuisi. Yhteenvetona voimme sanoa, että RCP2.6 on hyvin vaikeasti saavutettava vaihtoehto ja toisaalta RCP8.5



Kuva 20. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia puiden kasvuun ja metsiä uhkaaviin keskeisiin riskitekijöihin RCP4.5-ilmastonmuutosskenaarion toteutuessa. Vertailujakso on 1981–2010. Karttaan on merkitty kasvukauden lämpösumman pohjalta arvioidut etelä-, keski- ja pohjois-boreaalisten vyöhykkeiden rajat (1000 ja 1200 astepäivää). Kartta on muokattu Äijälän et al. (2019) ja Venäläinen et al. (2020) tutkimusten pohjalta.

edustaa katastrofaalista tulevaisuudenkuvaa. Tuleva kehitys jää kuitenkin aina jossain määrin arvaamattomaksi. Tätä arvaamattomuutta havainnollistaa alkuvuoden 2020 pandemia, jonka seurauksena kasvihuonekaasupäästöt laskivat muutaman kuukauden aikana vuoden 2006 tasolle (Le Quéré et al., 2020). Vastaavia odottamattomia tapahtumia voi tulla vastaan muitakin, ja kaikkiin niihin emme voi varautua.

Suomen metsien kannalta todennäköisin ilmastonmuutosvaihtoehto lienee sellainen, missä männyn kasvu lisääntyy etenkin Pohjois-Suomessa ja koivun koko maassa. Ilmastonmuutoksen edetessä lämpeneminen vaikuttaa haitallisesti kuusen kasvuun etenkin Etelä-Suomessa. Muutos myös voimistaa ja luo uusia metsiin kohdistuvia riskejä. Tuulituhojen mahdollisuus kasvaa maan routaisuuden vähenemisen seurauksena, lumituhot lisääntyvät Pohjois-Suomessa, ja kuivuusjaksot vaikeuttavat etenkin kuusimetsien kasvua eteläisessä Suomessa. Kuivuus myös altistaa metsiä palamiselle. Lämpenevän ilmaston myötä tuhohyönteisten esiintymisedellytykset paranevat ja bioottisten metsätuhojen mahdollisuus kasvaa etenkin Etelä- ja Keski-Suomessa (kuva 20).

4.2 Suomen metsien kannalta haitallisin ilmastonmuutosvaihtoehto

Ilmastonmuutoskenaarioihin pohjautuen voidaan myös esittää arvioita siitä, millainen olisi Suomen metsien kannalta erityisen haitallinen ilmastonmuutokseen liittyvä kehityskulku. Yksi tällainen ilmastonmuutoksen seurauksena mahdolliseksi tuleva suuria haitallisia vaikutuksia aiheuttava tapahtumaketju on Venäläisen et al. (2020) kuvaama tilanne:

1. Voimakkaan myrskyn seurauksena syntyy paljon tuulituhoja. Karkeasti arvioiden noin kerran 10 vuodessa Suomessa esiintyy tuulen nopeuksia, joiden seurauksena syntyy suuruusluokaltaan 2–3 miljoonan kuutiometrin tuhot. Roudan vähentyessä talvimyrskyjen aiheuttamien tuhojen määrän arvioidaan kasvavan. Roudattomuus myös vaikeuttaa myrskyn vaurioittamien puiden korjuuta metsistä. Voimakkaan myrskyn jäljiltä suuri määrä tuoretta puuta jää metsiin korjaamatta kesän ylitse ja altistuu hyönteistuholaisille sekä lahottajasienille. Puun jalostusarvo heikkenee koska se ei kelpaa tukiksi, vaikka saataisiinkin korjattua myöhemmin.
2. Kaarnakuoriaisiin lukeutuva kirjanpainaja (*Ips typographus*) voi tuottaa kaksi sukupolvea kesän aikana, jos kesän lämpösumma ylittää 1500 astepäivää. Tällaisten kesien todennäköisyys on ollut pieni, mutta jo tämän vuosisadan puolivälissä se on suhteellisen maltillisen RCP4.5-skenaarionkin mukaan Etelä-Suomessa yli 80 %, Keski-Suomessa yli 50 % ja Pohjois-Suomessa 20–30 %. Kesien yleistyvä kuivuus altistaa etenkin kuusimetsiä kirjanpainajatuhoille, ja jos metsissä on edeltäneen myrskyn jäljiltä jo runsaasti vioittuneita puita, seurauksena ovat ihanteelliset olosuhteet kirjanpainajan massaesiintymiselle ja runsaille tuhoille. Venäläisen et al. (2020) esittämän arvion mukaan ilmastonmuutos tulee moninkertaistamaan tällaisen tapahtumaketjun esiintymisen mahdollisuuden.

Keski-Euroopassa on kärsitty hyvin laajoista kuusikoiden kirjanpainajatuhoista, jotka ovat vaikuttaneet sikäläiseen metsätalouteen suuresti. Lämpenemisen seurauksena vastaavat olosuhteet tulevat siis yleistymään myös Suomessa. Samanaikaisesti yleistyvään kuivuuteen liittyy kasvava laajojen metsäpalojen mahdollisuus. Jos metsissä olisi runsaasti myrskyjen ja kaarnakuoriaisten vioittamia ja kuolleita havupuita, niin sillä saattaa olla vaikutusta metsäpalojen syttymisriskiin ja palojen leviämiseen. Metsien rakenne, kuten puulaji ja potentiaalisen paloaineksen määrä vaikuttavat oleellisesti tuhojen mahdollisuuteen. Vanhat kuusimetsät ovat altteimpia tuuli- ja kirjanpainajatuhoille, ja niiden mahdollisesti yleistyessä tuhojen mahdollisuus kasvaa. Esimerkiksi Yli-Kojolan (2004) tutkimuksen mukaan vuosina 1986–2004 tuulen vaurioittamien kuusimetsien keski-ikä oli Etelä-Suomessa 86 ja Pohjois-Suomessa 168 vuotta. Koko maan keskiarvo oli 108 vuotta. Kanadan metsätuhot ovat osoittaneet, että pahimmissa tapauksissa metsien hiilivarastot voivat purkautua ilmakehään ja mitätöidä tavoitellun hiilen varastoitumisen metsiin (Walker et al., 2019).

5 Tulevaisuuden mahdollisuudet riskien seurantaan ja ennakointiin eri tietolähteitä ja ennusteita käyttämällä

Metsiä uhkaaviin riskeihin varautumiseksi tarvitaan laajat taustatiedot riskien esiintymismahdollisuuksista ja niiden alueellisista eroista. Esimerkiksi tuuli- tai lumituhoja aiheuttavia tilanteita emme pysty estämään, mutta niiden vaikutusta voidaan pyrkiä pienentämään metsänhoidon keinoin. Kattavat riskianalyysit ovat tärkeä keino ennakoida, ennaltaehkäistä ja torjua metsätuhoja. Riskianalyysillä tulee olla hyvä alueellinen tarkkuus, ja joissakin tapauksissa olisi

hyvä, että ne olisivat jopa metsikkökohtaisia. Esimerkki tällaisesta tuotteesta on Luonnonvarakeskuksen ja Ilmatieteen laitoksen julkaisema tuulituhoriskikartta (<https://metsa-info.luke.fi/fi/tuulituhoriskikartta>). Palvelussa esitetään tuulituhoriski 16 × 16 metrin ruudussa. Tulos kuvaa seuraavan viiden vuoden aikana tapahtuvien tuulituhojen todennäköisyyttä. Parhailtaan Maa- ja metsätalousministeriön rahoittamassa Säätyö-hankkeessa (9/2018–12/2020, <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/saatyo>) valmistellaan vastaavaa karttapalvelua, missä esitetään puiden lumituhoriski. Riskikarttojen avulla voidaan esimerkiksi arvioida, millä alueilla metsien lannoittaminen altistaa metsiä entisestään tuhoille.

Riskikartat kuvaavat tilannetta pohjautuen pitkiin havaintoaikasarjoihin tai ennusteisiin tulevasta ilmastosta. Ilmatieteen laitoksella on tarjolla myös palvelu, missä seurataan puiden lumikuorman kertymistä talven kuluessa ja kertymän ennustetta. Tällainen palvelu hyödyttää ehkä enemmän sähkölinjojen ylläpitäjiä kuin metsänomistajia. Reaaliaikainen seuranta mahdollistaa tietenkin myös lumituhoualueiden paikantamisen. Myös myrskytilanteiden jälkeisten tuulituhoualueiden paikantaminen on tärkeää kattavan tilannekuvan luomiseksi. Oikea, nopeasti luotu tilannekuva auttaa suuntaamaan tuhopuiden korjuun kiireisimpiä toimenpiteitä vaativiin kohteisiin. Ilmatieteen laitoksella on aiemmin mainitun Säätyö-hankkeen yhteydessä testattu alueellista interpolointimenetelmää, jonka avulla sääasemilla mitatut voimakkaimmat tuulen nopeudet voidaan interpoloida maaston ominaisuudet huomioiden halutulla alueellisella tarkkuudella. Rinnakkainen lähestymistapa on hyödyntää sään ennustamisessa käytettäviä malleja. Uusimmissa ja alueellisesti tarkimmissa malleissa on olosuhteet kuvattu noin 1 km:n alueellisella tarkkuudella. Tätä lähestymistapaa kehitetään ja testataan Maa- ja metsätalousministeriön rahoittamassa Puun ja kuoren välissä – varautuminen ilmastomuutoksen moninkertaistamiin kirjanpainajatuhoihin (MONITUHO) -hankkeessa (4/1019–12/2022, <https://researchportal.helsinki.fi/fi/projects/puun-ja-kuoren-v%C3%A4liss%C3%A4-varautuminen-ilmastomuutoksen-moninkertais>). Tavoitteena on luoda palvelu, jonka avulla välittömästi myrskyn jälkeen saadaan yksityiskohtainen arvio sille, missä metsätuhoja todennäköisimmin on tapahtunut.

Puiden korjuuolosuhteiden arvioidaan vaikeutuvan roudan vähentyessä. Kuinka talvi-korjuuolosuhteet tulevat muuttumaan, on arvioinut esimerkiksi Lehtonen et al. (2019b). Kesäisin korjuuolosuhteet riippuvat maan kosteudesta. Säätyö-hankkeessa on testattu palvelua, jossa annetaan ennuste 28 cm paksun maan pintakerroksen kosteudelle. Ennuste annetaan kymmenen vuorokauden mittaiselle jaksolle. Lisäksi on testattu ns. vuodenaikaisennustetta, missä esitetään arvio, kuinka pintakerroksen kosteus tulee poikkeamaan keskimääräisestä tulevien kuukausien aikana (Hyvärinen et al., 2020). Valmisteilla on myös sellainen palvelu, jossa maan kosteuden poikkeamaa pyritään ennustamaan kuuden viikon mittaiselle jaksolle. Toinen keväällä 2020 avattu puiden korjuuolosuhteita kuvaava ennustepalvelu on Harvest season -palvelu (<https://harvesterseasons.com/>). Palvelussa esitetään 51 eri ennustemallin pohjalta laskettu arvio maan lämpötilan ja maan kosteuden kehitykselle kuuden kuukauden ajalle kullekin jakson päivälle. Kosteuden, lämpötilan ja lumen syvyyden avulla korjuuolosuhteet on luokiteltu edelleen kuuteen luokkaan. Palvelu on kehitetty EU:n tukemana, ja sitä voi käyttää ilmaiseksi vuoden kestävä koekauden ajan.

Lumi- ja tuulituhon sekä korjuukelpoisuus -palvelut liittyvät abioottisiin tekijöihin. Bioottiset tuhojen aiheuttajat, kuten kirjanpainaja, muodostavat myös erittäin suuren riskin metsien hyvinvoinnille ja metsätaloudessa tarvitaan bioottisia tuhoriskejä kuvaavia karttoja tai malleja. Erityisen otolliset olosuhteet kirjanpainajatuhoille ovat niillä alueilla, joilla metsissä on esimerkiksi myrskyn jäljiltä paljon vioittuneita tai kaatuneita kuusia ja kasvukauden lämpösusma kohoaa yli 1500 astepäivän. Aiemmin mainitussa MONITUHO-hankkeessa päätavoitteena onkin kehittää kirjanpainajalle Suomen oloihin soveltuva metsätuhojen ennakointi- ja riskinhallintajärjestelmä.

Runsaasti hilamuotoisia perustietoja ilmastosta ja ilmastomuutoksesta on vapaasti saatavilla esimerkiksi paikkatietoaineistojen Paituli-latauspalvelusta (<https://avaa.tdata.fi/web/>

[paituli/metadata](#)). Ilmatieteen laitoksen aineistot sisältävät hilaruudukkoon interpoloituja tietoja vuodesta 1961 eteenpäin. Palvelussa on myös vuoteen 2100 ulottuvia arvioita tulevasta ilmastosta. Aineistojen alueellinen tarkkuus on joko 10×10 km tai 1×1 km. Tarjolla on tietoja lämpötilasta, sademäärästä, tuulen nopeudesta, suhteellisesta kosteudesta ja auringon säteilystä. Kestävään metsäbiotalouteen keskittyvän “Kestävä, ilmastoneutraali ja resurssitehokas metsäbiotalous (FORBIO)” -hankkeen yhteydessä Paituliin ladattiin joukko ilmastomuuttujia, joita voidaan hyödyntää erityisesti maa- ja metsätaloudellisessa tutkimuksessa ja sovellutuksissa. Nämä aineistot sisältävät tietoja puiden lumikuormasta, puiden korjuuolosuhteista ja metsäpaloaavasta. Mukana on myös tietoja voimakkaiden tuulten toistuvuustasoista.

Ilmatieteen laitoksen säähavainnot ja -ennusteet ovat pääasiassa kaikki avoimesti saatavilla. Avointen palveluiden ohella laitos tarjoaa myös maksullista sääpalvelua osoitteessa Ilmanet.fi, jossa voidaan seurata vaikkapa metsien syttymisherkkyyttä kuvaavan metsäpaloindeksin muuttumista jopa kuntakohtaisesti.

6 Tulosten tarkastelua

Metsien kasvu Suomessa on nopeutunut, ja sen myös ennustetaan edelleen nopeutuvan tulevina vuosikymmeninä lämpenevän ilmaston ja kohoavan ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden seurauksena. Tämä myönteinen kehitys voi ainakin osittain jäädä toteutumatta lisääntyvien metsätuhojen takia. Etenkin kuivuus vaikuttaa haitallisesti Etelä- ja Keski-Suomen kuusimetsiin. Kuivuus lisää myös metsäpalojen mahdollisuutta. Lisäksi lämpenevä ilmasto suosii tuhohyönteisten, kuten kirjanpajain esiintymistä. Myös muut aiemmin erittäin harvinaiset tuhohyönteiset voivat yleistyä lämpenemisen seurauksena. Puiden korjuuolosuhteet vaikeutuvat roudan vähentyessä.

Metsillä on tärkeä tehtävä sitoa hiiltä ilmakehästä ja siten hillitä ilmastomuutosta. Toisaalta metsäteollisuus on tärkeää Suomen taloudelliselle hyvinvoinnille ja tuottaa hyödykkeitä uusiutuvasta raaka-aineesta. Keskeinen kysymys onkin, kuinka metsiä voidaan hyödyntää kestäväällä tavalla ylläpitäen metsien puuston ja maaperän hiilivarastoa ja puuston hiilensidontakykyä. Keskustelu tästä aiheesta jatkuu vilkkaana niin Suomessa, Euroopassa kuin muullakin maailmassa. Metsänomistajien kannalta keskeistä on huolehtia siitä, että metsät kasvavat hyvin ja ovat elinvoimaisia, ja pyrkiä myöskin huomioimaan metsiä uhkaavat riskit. Riskiarvioiden tueksi on saatavilla runsaasti avoimia ilmaston vaihteluita ja sään ääri-ilmiöiden esiintymistä kuvaavia tietoaineistoja. Paikkatietoaineistojen avulla on myös mahdollista arvioida riskien, kuten lumi- tai tuulituhojen, alueellista vaihtelua. Olemassa ja kehitteillä olevat ennustepalvelut auttavat esimerkiksi myrskyn jälkeisten alueiden kartoittamisessa ja vaikkapa puunkorjuulojen arvioinnissa.

Ilmastomuutoksen vaikutukset metsiin riippuvat muutoksen suuruudesta. Muutoksen voimakkuuteen vaikuttavat oleellisesti kasvihuonekaasujen päästöt. Kansainvälisesti tavoitteeksi on asetettu lämpenemisen rajaaminen kahteen asteeseen, ja tämä edellyttäisi nopeaa maailmanlaajuisista kasvihuonekaasujen päästöjen hillintää. Päästöjen kasvua ei toistaiseksi ole pystytty rajoittamaan tavoitteiden mukaisesti, ja lämpenemisen rajaaminen kahteen asteeseen vaikuttaakin hyvin vaikeasti saavutettavalta tavoitteelta. Tulevaisuuteen liittyy kuitenkin aina suuria epävarmuuksia, kuten vuoden 2020 pandemia on osoittanut. Pandemian seurauksena kasvihuonekaasujen päästöt tilapäisesti vähenivät merkittävästi.

Metsillä arvioidaan olevan tärkeä tehtävä ilmastomuutoksen hillinnässä. Siitä kuinka tuo hillintätavoite parhaiten saavutetaan, käydään maailman laajuisesti vilkasta keskustelua (Popkin, 2019). On myös esitetty arvioita, että keskeisintä Euroopan metsien suhteen on varmistaa, että metsät säilyvät myös tulevina vuosikymmeninä niin taloudellisen kuin henkisenkin hyvinvoinnin lähteinä (Luysaert et al., 2018).

Kiitokset

Kiitämme Kimmo Ruosteenojaa Ilmatieteen laitokselta kuvasta 8 sekä raportin sisällön tarkistamisesta ja Jouni Räisästä Helsingin yliopistosta kuvan 2 tuottamisesta. Antti Mäkelää Ilmatieteen laitokselta kiitämme avusta työn suuntaviivojen määrittämisessä raportin kirjoitustyön alkuvaiheessa. Suuri osa raportissa esitetyistä tuloksista pohjautuu työhön, joka on tehty Suomen Akatemian yhteydessä toimivan Strategisen tutkimuksen neuvoston rahoittamassa FOR-BIO-hankkeessa (päättös 314224). Raportin tekemistä ovat edistäneet myös Maa- ja metsätalousministeriön rahoittamat Säätö- ja MONITUHO-hankkeet.

Kirjallisuusluettelo

- Asikainen, A., Viiri, H., Neuvonen, S., Nevalainen, S., Lintunen, J., Laturi, J., Uusivuori, J., Venäläinen, A., Lehtonen, I. ja Ruosteenoja, K., 2019. Ilmastonmuutos ja metsätuhot – analyysi ilmaston lämpenemisen seurauksista Suomessa. Suomen ilmastopaneeli, Raportti 1/2019, Helsinki, 11 s.
- Bakker, P., Schmittner, A., Lenaerts, J. T. M., Abe-Ouchi, A., Bi, D., van den Broeke, M. R., Chan, W.-L., Hu, A., Beadling, R. L., Marsland, S. J., Mernild, S. H., Saenko, O. A., Swingedouw, D., Sullivan, A. ja Yin, J., 2016. Fate of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: Strong decline under continued warming and Greenland melting, *Geophysical Research Letters*, 43: 12252–12260.
- Bengtsson, A. ja Nilsson, C., 2007. Extreme value modelling of storm damage in Swedish forests. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7: 515–521.
- Betts, R. A., 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature*, 408: 187–190.
- Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kohnová, S., Koskela, J. J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Redevski, I., Rogger, M., Salinas, J. L., Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Viglione, A., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K. ja Živković, N., 2017. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357: 588–590.
- Bärring, L. ja Fortuniak, K., 2009. Multi-indices analysis of southern Scandinavian storminess 1780–2015 and links to interdecadal variations in the NW Europe–North Sea region. *International Journal of Climatology*, 29: 373–384.
- Caesar, L., Rahmstorf, S., Robinson, A., Feulner, G. ja Saba, V., 2018. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature*, 556: 191–196.
- Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M. A., Milne, G. A., Nerem, R. S., Nunn, P. D., Payne, A. J., Pfeffer, W. T., Stammer, D. ja Unnikrishnan, A. S., 2013. Sea level change. Teoksessa: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. ja Midgley, P. M. (toim.)]. Cambridge University Press, New York, 1137–1216.
- Dai, A., Luo, D., Song, M. ja Liu, J., 2019. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO₂. *Nature Communications*, 10: 121
- Ekholm, T., 2020. Optimal forest rotation under carbon pricing and forest damage risk. *Forest Policy and Economics* 115: 102131.

- Eronen, M., 1991. Jääkausien jäljillä. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa, Helsinki, 271 s.
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C. ja Rummukainen, M., 2013. Evaluation of Climate Models. Teoksessa: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. ja Midgley, P. M. (toim.)]. Cambridge University Press, New York, 741–866.
- Folland, C. K., Karl, T. R., Christy, J. R., Clarke, R. A., Gruza, G. V., Jouzel, J., Mann, M. E., Oerlemans, J., Salinger, M. J. ja Wang, S.-W., 2001. Observed Climate Variability and Change. Teoksessa: Climate Change 2001: The Scientific Basis. [Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K. ja Johnson, C. A. (toim.)]. University Press, New York, 99–182.
- Forest Europe, 2015. State of Europe's Forests 2015. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, Madrid, 312 s.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M. ja Van Dorland, R., 2007: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Teoksessa: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. ja Miller, H. L. (toim.)]. Cambridge University Press, New York, 129–134.
- Goosse, H., 2015. Climate System Dynamics and Modelling. Cambridge University Press, New York, 358 s.
- Gray, S. T., Graumlich, L. J., Betancourt, J. L. ja Pederson, G. T., 2004. A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1567 A.D. *Geophysical Research Letters*, 31: L12205.
- Hartmann, D. L., Klein Tank, A. M. G., Rusticucci, M., Alexander, L. V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F. J., Dlugokencky, E. J., Easterling, D. R., Kaplan, A., Soden, B. J., Thorne, P. W., Wild, M. ja Zhai, P. M., 2013. Observations: Atmosphere and Surface. Teoksessa: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. ja Miller, H. L. (toim.)]. Cambridge University Press, New York, 159–254.
- Heikinheimo, O., 1920. Suomen lumituhoalueet ja niiden metsät. Metsätieteellisen koelaitoksen julkaisuja 3.
- Hyvärinen, O., Venäläinen, A. ja Vajda, A., 2020. Bias-adjusted seasonal forecasts of soil moisture for forestry applications in Finland. *Advances in Science and Research*, 17: 23–27.
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York, 1535 s.
- IPCC, 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M. ja Waterfield, T. (toim.)]. IPCC, 616 s.
- IPCC, 2019. The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. A Special Report of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change [Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B. ja Weyer, N. M. (toim.)]. IPCC, 755 s.
- Jalkanen, R. ja Konôpka, B., 1998. Snow-packing as a potential harmful factor on *Picea abies*, *Pinus sylvestris* and *Betula pubescens* at high altitude in northern Finland. *European Journal of Forest Pathology*, 28: 373–382.
- Jokinen, P., Vajda, A. ja Gregow, H., 2015. The benefits of emergency rescue and reanalysis data in decadal storm damage assessment studies. *Advances in Science and Research*, 12: 97–101.
- Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J. ja Fronzek, S., 2012. Ilmasto. Teoksessa: Ruuhela, R. (toim.) Miten väistämättömään ilmastonmuutokseen voidaan varautua? – yhteenveto suomalaisesta sopeutumistutkimuksesta eri toimialoilla. Maa- ja metsätalousministeriö, Helsinki, MMM:n julkaisuja 6/2011: 16–23.
- Katajisto, R., 1969. Rankkasateiden voimakkuus ja toistumistiheys Suomessa. Tiedotuksia, Rakennushallitus, Helsinki.
- Kerr, R. A., 1987. Milankovitch climate cycles through the ages. *Science*, 235: 973–974.
- Kilpeläinen, A., Kellomäki, S., Strandman, H. ja Venäläinen, A., 2010. Climate change impacts on forest fire potential in boreal conditions in Finland. *Climatic Change*, 103: 383–398.
- Kim, S., Sinclair, V. A., Räisänen, J. ja Ruuhela, R., 2018. Heat waves in Finland: present and projected summertime extreme temperatures and their associated circulation patterns. *International Journal of Climatology*, 38: 1393–1408.
- Knight, J. R., Folland, C. K., ja Scaife, A. A., 2006. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 33: L17706.
- Kokkila, M., 2013. Ilmastonmuutoksen vaikutus puunkorjuun talvikauden korjuuoloihin hienojakoisella kivennäismaalla. *Metsätieteen aikakauskirja*, 1/2013, 5–18.
- Kosenius, A.-K., Tulla, T., Horne, P., Vanha-Majamaa, I. ja Kerkelä, L., 2014. Metsäpalojen torjunnan talous ja ekosysteemipalvelut – Kustannusanalyysi Pohjois-Karjalasta. PTT Työpapereita 165, Helsinki, 54 s.
- Kuusinen, N., Tomppo, E., Shuai, Y. ja Berninger, F., 2014a. Effects of forest age on albedo in boreal forests estimated from MODIS and Landsat albedo retrievals. *Remote Sensing of Environment*, 145: 145–153.
- Kuusinen, N., Lukeš, P., Stenberg, P., Levula, J., Nikinmaa, E. ja Berninger, F., 2014b. Measured and modelled albedos in Finnish boreal forest stands of different species, structure and understory. *Ecological Modelling*, 284: 10–18.
- Kuusinen, N., Kolari, P., Levula, J., Porcar-Castell, A., Stenberg, P. ja Berninger, F., 2012. Seasonal variation in boreal pine forest albedo and effects of canopy snow on forest reflectance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 164: 53–60.
- Laurila, T. K. ja Mäkelä, A., 2019. Thunderstorm observations in Finland – historical observations since 1887. *FMI's Climate Bulletin: Research Letters*, 1(2): 4.
- Lehtonen, I. ja Pirinen, P., 2019. 2018: an exceptionally warm thermal growing season in Finland. *FMI's Climate Bulletin: Research Letters*, 1(1): 5.
- Lehtonen, I. ja Venäläinen, A., 2020. Metsäpalokesä 2018 muuttuvassa ilmastossa – poikkeuksellinen vuosi vai uusi normaali? *Ilmatieteen laitos, Raportteja 2020/2*, Helsinki, 26 s.
- Lehtonen, I., Ruosteenoja, K. ja Jylhä, K., 2014a. Projected changes in European precipitation indices on the basis of global and regional climate model ensembles. *International Journal of Climatology*, 34: 1208–1222.
- Lehtonen, I., Ruosteenoja, K. ja Mäkelä, A., 2019a. Suomen muuttuva ilmasto – tietoa sähkönsiirtojärjestelmän riskien arviointia varten. *Ilmatieteen laitos, Raportteja 2019/2*, Helsinki, 34 s.

- Lehtonen, I., Ruosteenoja, K., Venäläinen, A. ja Gregow, H., 2014b. The projected 21st century forest fire risk in Finland under different greenhouse gas scenarios. *Boreal Environment Research*, 19: 127–139.
- Lehtonen, I., Venäläinen, A., Kämäräinen, M., Peltola, H. ja Gregow, H., 2016a. Risk of large-scale fires in boreal forests of Finland under changing climate. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16: 239–253.
- Lehtonen, I., Kämäräinen, M., Gregow, H., Venäläinen, A. ja Peltola, H., 2016b. Heavy snow loads in Finnish forests respond regionally asymmetrically to projected climate change. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16: 2259–2271.
- Lehtonen, I., Venäläinen, A., Kämäräinen, M., Asikainen, A., Laitila, J., Anttila, P. ja Peltola, H., 2019b. Projected decrease in wintertime bearing capacity on different forest and soil types in Finland under a warming climate. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23: 1611–1631.
- Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S. ja Schellnhuber, H. J., 2008. Tipping elements in the Earth system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105: 1786–1793.
- Lenton, T., Rockström, J., Gaffney, O., Rahmstorf, S., Richardson, K., Steffen, W. ja Schellnhuber, H. 2019. Climate tipping points—too risky to bet against. *Nature* 575: 592–595.
- Le Quéré, C., Jackson, R. B., Jones, M. W., Smith, A. J. P., Abernethy, S., Andrew, R. M., De-Gol, A. J., Willis, D. R., Shan, Y., Canadell, J. G., Friedlingstein, P., Creutzig, F. ja Peters, G. P., 2020. Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change* 10: 647–653.
- Lukeš P., Stenberg P., Möttöus M., Manninen T. ja Rautiainen M., 2016. Multidecadal analysis of forest growth and albedo in boreal Finland. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52: 296–305.
- Luysaert, S., Marie, G., Valade, A., Chen, Y.-Y., Njakou Djomo, S., Ryder, J., Otto, J., Naudts, K., Lansø, A. S., Ghattas, J. ja McGrath, M. J., 2018. Trade-offs in using European forests to meet climate objectives. *Nature*, 562: 259–262.
- Manninen T., Aalto T., Markkanen T., Peltoniemi M., Böttcher K., Metsämäki S., Anttila K., Pirinen P., Leppänen A. ja Arslan A., 2019. Monitoring changes in forestry and seasonal snow using surface albedo during 1982–2016 as an indicator. *Biogeosciences*, 16: 223–240.
- Metsäntutkimuslaitos, 2011. State of Finland's Forests 2011. Based on the Criteria and Indicators of Sustainable Forest Management. Maa- ja metsätalousministeriö ja Metsäntutkimuslaitos 5a/2011. Suomen Graafiset Palvelut Oy, Kuopio, 96 s.
- Mikkonen, S., Laine, M., Mäkelä, H. M., Gregow, H., Tuomenvirta, H., Lahtinen, M. ja Laaksonen, A., 2015. Trends in the average temperature in Finland, 1847–2013. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29: 1521–1529.
- Mutanen, A., Vauhkonen, J., Packalen, T. ja Asikainen, A., 2019. LULUCF-asetus ja metsien vertailutaso. Suomen ilmastopaneeli, Raportti 4/2019, Helsinki, 25 s.
- Mäkelä, H. M., Laapas, M. ja Venäläinen, A., 2012. Long-term temporal changes in the occurrence of high forest fire danger in Finland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12: 2591–2601.
- Mäkelä, H. M., Venäläinen, A., Jylhä, K., Lehtonen, I. ja Gregow, H., 2014. Probabilistic projections of climatological forest fire danger in Finland. *Climate Research*, 60: 73–85.
- Naudts, K., Chen, Y., McGrath, M. J., Ryder, J., Valade, A., Otto, J. ja Luysaert, S., 2016. Europe's forest management did not mitigate climate warming. *Science*, 351: 597–600.
- Nieminen, A. (toim.), 2020. Metsäpaloariskin ennakointi metsätöissä. Tapion julkaisu. Tapio Palvelut Oy, 36 s.
- Nykänen, M.-L., Peltola, H., Quine, C. P., Kellomäki, S. ja Broadgate, M., 1997. Factors

- affecting snow damage of trees with particular reference to European conditions. *Silva Fennica*, 31: 193–213.
- Parviainen, J., 1996. Impact of fire on Finnish forests in the past and today. *Silva Fennica*, 30: 353–359.
- Peltola, A., Ihalainen, A., Mäki-Simola, E., Sauvula-Seppälä, T., Torvelainen, J., Uotila, E., Vaahtera, E. ja Ylitalo, E., 2019. Suomen metsätilastot. Luonnonvarakeskus, Helsinki, 200 s.
- Pimenoff, N., Venäläinen, A., Pilli-Sihvola, K., Tuomenvirta, H., Järvinen, H., Ruosteenoja, K., Haapala, J. ja Räisänen, J., 2008. Epälineaariset ja äärimmäiset ilmaston muutokset: selvitys Vanhasen II hallituksen tulevaisuusselontekoa varten. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja 14/2008, Yliopistopaino, Helsinki, 61 s.
- Popkin, G., 2019. How much can forests fight climate change? *Nature* 565: 280–282.
- Rautiainen, M., Kuusinen, N., Hovi, A. ja Majasalmi, T., 2020. Boreaalisten metsien albedosta. *Metsätieteen aikakauskirja*, artikkeli 10323.
- Robinson, A., Calov, R. ja Ganopolski, A., 2012. Multistability and critical thresholds of the Greenland Ice Sheet. *Nature Climate Change*. 2: 429–432.
- Ruosteenoja, K., 2013. Ilmastonmuutos pääkaupunkiseudulla – vuoden 2013 loppuun mennessä tehtyihin arvioihin perustuvia arvioita. *Ilmatieteen laitos*, Helsinki, 11 s.
- Ruosteenoja, K., Jylhä, K. ja Kämäräinen, M., 2016a. Climate projections for Finland under the RCP forcing scenarios. *Geophysica*, 51: 17–50.
- Ruosteenoja, K., Markkanen, T. ja Räisänen, J., 2019a. Thermal seasons in northern Europe in projected future climate. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.6466.
- Ruosteenoja, K., Vihma, T. ja Venäläinen, A., 2019b. Projected changes in European and North Atlantic seasonal wind climate derived from CMIP5 simulations. *Journal of Climate*, 32: 6467–6490.
- Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Kämäräinen, M. ja Pirinen, P., 2016b. Terminen kasvukausi lämpenevässä ilmastossa. *Terra*, 128: 3–15.
- Ruosteenoja, K., Markkanen, T., Venäläinen, A., Räisänen, P., ja Peltola, H., 2018. Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21st century. *Climate Dynamics*, 50: 1177–1192.
- Rädler, A. T., Groenemeijer, P. H., Faust, E., Sausen, R. ja Púčik, T., 2019. Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21st century due to rising instability. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2: 30.
- Räisänen, J., 2019. Effect of atmospheric circulation on recent temperature changes in Finland. *Climate Dynamics*, 53: 5675–5687.
- Saku, S., Mäkelä, A., Jylhä, K. ja Niinimäki, N., 2016. Lyhytkestoisten sateiden rankkuus ja toistuvuus aika Suomessa. *Ilmatieteen laitos*, Helsinki, 15 s.
- Sanderson, B. M., O'Neill, B. C. ja Tebaldi, C., 2016. What would it take to achieve the Paris temperature targets? *Geophysical Research Letters*, 43: 7133–7142.
- Seppälä, J., Kanninen, M., Vesala, T., Uusivuori, J., Kalliokoski, T., Lintunen, J., Saikku, L., Korhonen, R. ja Repo, A., 2015. Metsien hyödyntämisen ilmastovaikutukset ja hiilinielujen kehittyminen. Suomen Ilmastopaneeli, Raportti 3/2015, Helsinki, 43 s.
- Serreze, M. C. ja Barry, R. G., 2011. Processes and impacts of Arctic amplification: a research synthesis. *Global and Planetary Change*, 77: 85–96.
- Shaw, T. A., Baldwin, M., Barnes, E. A., Caballero, R., Garfinkel, C. I., Hwang, Y.-T., Li, C., O’Gorman, P. A., Rivière, G., Simpson, I. R. ja Voigt, A., 2016. Storm track processes and opposing influences of climate change. *Nature Geoscience*, 9: 656–664.
- Sinclair, V. A., Rantanen, M., Haapanala, P., Räisänen, J. ja Järvinen, H., 2020. The characteristics and structure of extra-tropical cyclones in a warmer climate. *Weather and Climate Dynamics*, 1: 1–25.

- Sjöström, J., Plather, F. V. ja Granström, A., 2019. Wildfire ignition from forestry machines in boreal Sweden. *International Journal of Wildland Fire*, 28: 666–677.
- Solantie, R., 1994. Effect of weather and climatological background on snow damage of forests in Southern Finland in November 1991. *Silva Fennica*, 28: 203–211.
- Sutton, R. T. ja Hodson, D. L. R., 2005. Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate. *Science*, 309: 115–118.
- Tamarin, T. ja Kaspi, Y., 2017. The poleward shift of storm tracks under global warming: A Lagrangian perspective. *Geophysical Research Letters*, 44: 10666–10674.
- Uusikivi, J., Veijalainen, N. ja Vehviläinen, B., 2014. Selvitys ilmastonmuutoksen vaikutuksista Kemijärven ja Rovaniemen tulviin. Julkaisematon raportti Lapin ELY-keskukselle.
- Vaahtera E., Aarne M., Ihalainen A., Mäki-Simola E., Peltola A., Torvelainen J., Uotila E. ja Ylitalo E., 2018. Suomen metsätilastot. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 188 s.
- Valta, H., Lehtonen, I., Laurila, T. K., Venäläinen, A., Laapas, M. ja Gregow, H., 2019. Communicating the amount of windstorm induced forest damage by the maximum wind gust speed in Finland. *Advances in Science and Research*, 16: 31–37.
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J. ja Rose, S. K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109: 5–31.
- Veijalainen, N., Ruosteenoja, K., Uusikivi, A., Mäkelä, A. ja Vehviläinen, B., 2018. Ilmastonmuutos ja virtaamien muuttuminen Kemi-, Kymi- ja Lieksanjoen alueilla. Suomen Ympäristökeskuksen Raportteja 27/2018, Helsinki, 44 s.
- Venäläinen, A., Lehtonen, I. ja Mäkelä, A., 2016. Laaja-alaisia metsäpaloja mahdollistavat säätilanteet Suomen ilmastossa. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2016:3, Helsinki, 30 s.
- Venäläinen, A., Ruosteenoja, K. ja Lehtonen, I., 2019. Projections of future climate for Europe, Uruguay and China with implications on forestry. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2019:3, Helsinki, 67 s.
- Venäläinen, A., Lehtonen, I., Laapas, M., Ruosteenoja, K., Tikkanen, O.-P., Viiri, H., Ikonen, V.-P., ja Peltola, H., 2020. Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: a literature review. *Global Change Biology*, 8: 4178–4196.
- Verkerk, P., Costanza, R., Hetemäki, L., Kubiszewski, I., Leskinen, P., Nabuurs, G., Potočnik, J. ja Palahi, M., 2020. Climate-Smart Forestry: the missing link. *Forest Policy and Economics*, 115: 102164.
- Virkkala, R. ja Toivonen, H., 1999. Maintaining biological diversity in Finnish forests. Suomen Ympäristökeskus, Helsinki, 56 s.
- Walker, X. J., Baltzer, J. L., Cumming, S. G., Day, N. J., Ebert, C., Goetz, S., Johnstone, J. F., Potter, S., Rogers, B. M., Schuur, E. A. G., Turetsky, M. R. ja Mack, M. C. 2019. Increasing wildfires threaten historic carbon sink of boreal forest soils. *Nature*, 572: 520–523.
- Yli-Kojola H., 2004. Tuulituhojen esiintyminen Suomen metsissä 1986–94. Metsätieteen aikakauskirja 2004, No 1, artikkeli id 6081, <https://doi.org/10.14214/ma.6081>.
- Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. ja Väisänen, P. (toim.), 2019. Metsänhoidon suosituksset. Tapion julkaisuja, Tapio Oy, 253 s.



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

Erik Palménin aukio 1
P.O. Box 503
FI-00560 HELSINKI
tel. +358 29 539 1000

WWW.FMI.FI

FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

REPORTS 2020:5

ISSN 0782-6079

ISBN 978-952-336-127-0 (pdf)

<https://doi.org/10.35614/isbn.9789523361270>

Helsinki 2020

