

Terminen kasvukausi lämpenevässä ilmastossa

KIMMO RUOSTEENOJA¹, JOUNI RÄISÄNEN², ARI VENÄLÄINEN¹,
MATTI KÄMÄRÄINEN¹ & PENTTI PIRINEN¹

¹Ilmatieteen laitos

²Helsingin yliopiston Fysiikan laitos



Ruosteenoja, Kimmo, Jouni Räisänen, Ari Venäläinen, Matti Kämäräinen & Pentti Pirinen (2016). Terminen kasvukausi lämpenevässä ilmastossa (Thermal growing seasons in a warming climate). Terra 128: 1, 3–15.

■ In Finland, the annual mean temperature is projected to increase by 2–6 °C by the late 21st century. We have assessed how this projected warming is reflected in the length and growing degree day sum (GDD) of the thermal growing season. The analysis is based on simulations performed with more than 20 global climate models under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. To determine the onset, termination and GDD of the growing season, two methods have been used, one of them being suited for exploring long-term means and the other inter-annual variations. Under the RCP8.5 scenario, the growing season lengthens in the major part of Finland by the late 21st century by about two months and GDD increases by 800–1 000 °C days. Responses to RCP4.5 are qualitatively similar but smaller. In coming decades, years with a GDD below the recent past (1971–2000) mean become very uncommon. In the majority of years, GDD will exceed the 10- or even the 20- or 50-year return level derived from the recent past data.

Key words: climate change, effective temperature sum, growing degree days, Representative Concentration Pathways (RCPs), bias correction

Kimmo Ruosteenoja, Ari Venäläinen, Matti Kämäräinen, Pentti Pirinen, Finnish Meteorological Institute, P. O. Box 503, FI-00101 Helsinki. E-mail: <Kimmo.Ruosteenoja@fmi.fi>; <Ari.Venalainen@fmi.fi>; <Matti.Kamarainen@fmi.fi>; <Pentti.Pirinen@fmi.fi>

Jouni Räisänen, Department of Physics, University of Helsinki, P. O. Box 48, FI-00014 University of Helsinki. E-mail: <Jouni.Raisanen@helsinki.fi>

Ihmiskunnan tuottamat hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen päästöt lämmittävät maapalloa tulevaisuudessa yhä enemmän. Olemme tutkimuksissamme selvittäneet, miten paljon ilmaston lämpiäminen pidentää ja lämmittää kasvukausia. Näitä tutkimustuloksia on hiljattain esitelty koko Euroopan mittakaavassa (Ruosteenoja ym. 2015). Tämä artikkeli puolestaan keskittyy tarkastelemaan muutoksia Suomessa ja Suomen lähialueilla.

Termiseksi kasvukaudeksi määritellään se osa vuodesta, jolloin vuorokauden keskilämpötila on korkeampi kuin viisi astetta. Kasvukauden lämpiämisen mittarina käytetään *lämpösummaa* (tem-

perature sum, temperature accumulation, growing degree day sum), joka saadaan laskettua vähentämällä kasvukauden aikaisista vuorokauden keskilämpötiloista viisi astetta ja laskemalla saadut lämpötilajäännökset yhteen.

Kasvukauden pituutta ja lämpösummaa on käytetty maataloustuotannon edellytysten arvioimiseen, varsinkin viileän ilmaston alueella (Peltonen-Sainio ym. 2009). Esimerkiksi aikaisen kevätvehnän viljely on mielekästä sellaisilla alueilla, missä kasvukauden lämpösumma on vähintään 1 100 astepäivää (Rantanen & Solantie 1987). Pohjoismaissa lämpösummaa laskettaessa käytetty viiden

asteen rajalämpötila sopii hyvin kuvaamaan yleisimpien viljelykasviemme, kuten ohran, kauran ja rukiin kasvuedellytyksiä. Maisille, soijapavulle, auringonkukalle ja muille runsaammin lämpöä vaativille kasveille on käytettävä korkeampia rajalämpötiloja (Grigorieva ym. 2010; Qian ym. 2010). Esimerkiksi Kreikassa kasvukausien lämpösummia laskettaessa on käytetty kymmenen asteen kynnyslämpötilaa (Matzarakis ym. 2007).

Kasvukauden lämpösummaa viiden asteen rajalla käytetään myös tutkittaessa boreaalisten metsien kasvua (Kauppi ym. 2014). Kertyneen lämpösumman avulla voidaan niin ikään selittää luonnonkasvien kehityksen eri vaiheitten ajankohtia (Karlsen ym. 2007; Pudas ym. 2008).

Kasvukauden pituus ja lämpösumma vaihtelevat huomattavasti vuodesta toiseen. Esimerkiksi vuonna 1867 kasvukausi alkoi Pohjois-Euroopassa poikkeuksellisen myöhään (esimerkiksi Helsingin lämpötilatiedoista laskettuna vasta touko-kesäkuun taitteessa) (Jantunen & Ruosteenoja 2000). Onnettomuudeksi tuona vuonna Suomea koetteli vielä aikainen ja ankara syyshalla, joka katkaisi viljan kasvun ennen aikojaan. Seurauksena oli nälänhätä. Kolea kesä ja alhainen lämpösumma aiheuttivat osittaisen kadon myös esimerkiksi vuosina 1962 ja 1987. Tämän vuosituhannen puolella kasvukaudet ovat puolestaan olleet useimpina vuosina pitkiä ja lämpösummat korkeita. Tätä voidaan jo pitää merkinä orastavasta ilmastomuutoksesta.

Tarkastelemme artikkelimme aluksi lyhyesti ilmastomuutosmalleja ja niiden toimintaperiaatetta. Samalla käy ilmi, millaisia lämpötilan ja sademäärän muutoksia mallit Suomeen ennustavat. Lämpötilan nousu säätelee kasvukausien pituutta ja lämpöoloja tulevaisuudessa. Toisaalta kasvuolojen suotuisuus ei riipu pelkästään lämpötiloista, vaan ilmaston lämmetessä veden riittävyys käy yhä tärkeämmäksi.

Mallien esittelyn jälkeen esitämme, miten kasvukauden alkamis- ja päättymisajankohdat sekä lämpösummat saadaan selville lämpötilatietojen avulla. Tätä tarkoitusta varten on kehitetty kaksi menetelmää, joista toinen sopii pitkäaikaisten ilmastolisten keskiarvojen ja toinen yksittäisten vuosien sääolojen tarkasteluun. Mallitulosten perusteella on mahdollista arvioida, kuinka pitkiä kasvukausia ja millaisia lämpösummia tulevaisuudessa voidaan odottaa. Lopuksi vielä pohditaan, miten nopeasti nykyisten ilmastotilastojen perusteella viileiksi luokiteltavat kasvukaudet harvinaistuvat ja lämpimät yleistyvät tulevaisuudessa.

Kaikki artikkelissa esitetyt ilmastosuureitten muutokset on laskettu suhteessa jakson 1971–2000 ilmastollisiin keskiarvoihin.

Ilmastomallit ja niiden ennustamat lämpötilojen ja sademäärien muutokset

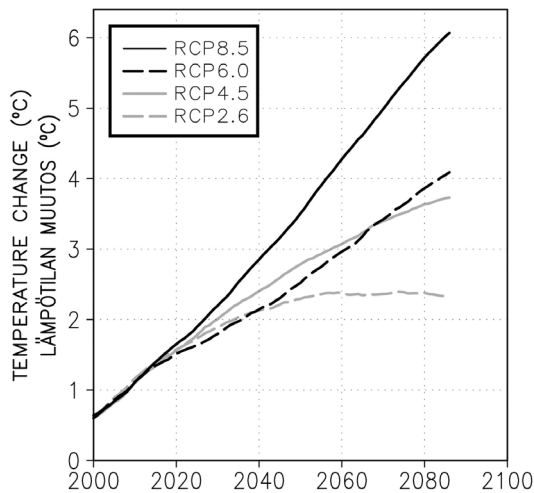
Tulevaa ilmastoa ennustetaan ilmastomallien avulla. Ilmastomalli kuvaa ilmakehän, merien ja maan pintakerroksen käyttäytymistä fysiikan lakien nojalla. Malleissa ovat mukana myös merivirrat ja merien jääpeite sekä hyvin yksinkertaistettu maa-alueitten kasvipeitteelle. Ilmastojärjestelmän käyttäytymistä joudutaan kuvaamaan malleissa melkoisesti yksinkertaistaen, sillä edes supertietokoneitten laskentateho ei riitä kaikkien yksityiskohtien käsittelemiseen. Eri maissa on kehitetty kymmeniä erilaisia ilmastomalleja, ja niiden antamien tulosten selvät erot johtuvat pääosin näistä välttämättömistä yksinkertaistuksista, jotka on toteutettu eri malleissa eri tavoin. Ilmastomallien toimintaperiaatteesta ja ilmastoa muuttavista pakotetekijöistä on kerrottu tarkemmin erillisessä oppikirja-artikkelissa (Ruosteenoja 2011: 69–91).

Tässä työssä esitettävät Suomen lämpötilojen ja sademäärien muutosarviot perustuvat 28 mallin tuloksiin. Alun alkaen oli tarkasteltu 35 mallia, mutta niistä seitsemän jouduttiin eri syistä hylkäämään; muutamassa mallissa esimerkiksi simuloitu Euroopan ilmasto ei lainkaan vastannut havaittua. Hylkäämisperusteita on käsitelty yksityiskohtaisemmin Anna Luomarannan ja kumppanien (2014) tutkimuksessa. Tuossa työssä on myös esitetty taulukkotietoa seulan läpäisseistä 28 mallista. Kasvukausien pituuksia ja lämpösummia laskettaessa tarvitaan myös mallien simuloimia vuorokautisia keskilämpötiloja. Näitä oli tarjolla ainoastaan 23 mallista, jotka on lueteltu Ruosteenojan ja kumppanien (2015) taulukossa 1.

Ilmastomuutoksen ankaruus riippuu hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen päästöjen kehitymisestä, jota ei voida tietää etukäteen. Sen tähden on luotu useita vaihtoehtoisia kasvihuonekaasuskenaarioita, joissa kussakin on tehty erilaisia oletuksia maapallon väestömäärän ja elintason kehityksestä sekä tulevaisuuden energiantuotantotavoista. Nykyisiä ilmastomalleja ajettaessa pakotteena käytetään neljää RCP-skenaarioita (*Representative Concentration Pathways* eli pitoisuuksien kehityskulun skenaariot; van Vuuren ym. 2011). Näistä ympäristön ja ihmiskunnan kannalta pahimman vaihtoehdon, RCP8.5-skenaarion, mukaan hiilidioksidin päästöt kasvaisivat tämän vuosisadan kuluessa kolminkertaisiksi ja hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä olisi vuonna 2100 jo lähellä 1 000 ppm:ää (ppm = tilavuuden miljoonasosa), kun ennen teollistumisen aikaa pitoisuus oli 280 ppm. Muut kolme skenaariota, RCP6.0, RCP4.5

ja RCP2.6, olettavat maailmanlaajuisten päästöjen kääntyvän laskuun jossakin vaiheessa tämän vuosisadan aikana, esimerkiksi RCP4.5-skenaari-
on mukaan vuoden 2040 tienoilla. Myös muitten kasvihuonekaasujen, kuten metaanin päästöt ovat suurimmat RCP8.5-skenaariossa. RCP-skenaari-
oista on esitetty lyhyet luonnehdinnat Ilmatieteen laitoksen verkkoraportissa (SETUKLIM 2013a) ja seikkaperäisempää tietoa Hallitustenvälisen il-
mastonmuutospaneelin IPCC:n (Stocker ym. 2013: 147–150, 1045–1047) uusimmassa arviointirapor-
tissa.

Eri skenaarioihin perustuvia arvioita Suomen alueen vuotuisen keskilämpötilan muuttumisesta tämän vuosisadan aikana on esitetty kuvassa 1. Käyrät esittävät 28 mallin tulosten keskiarvoja. RCP2.6- ja RCP6.0-skenaariolle tietoa tosin oli käytettävissä vain osasta malleista, ja tällöin puut-



Kuva 1. Suomen vuotuisen keskilämpötilan muutos (°C) vuosina 2000–2085 verrattuna jakson 1971–2000 keskilämpötilaan; 28 ilmastomuutosmallin tulosten keskiarvoista laskettu 30 vuoden liukuva keskiarvo. Muutokset on annettu erikseen neljälle kasvihuonekaasuskenaariolle: RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 ja RCP2.6 (selitys kuvassa).

Figure 1. Projected changes in annual mean temperature in Finland (in °C) for the years 2000–2085, relative to the mean of the baseline period 1971–2000. Multi-model averaged 30 year running means are given for four greenhouse gas scenarios: RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 and RCP2.6 (see the legend).

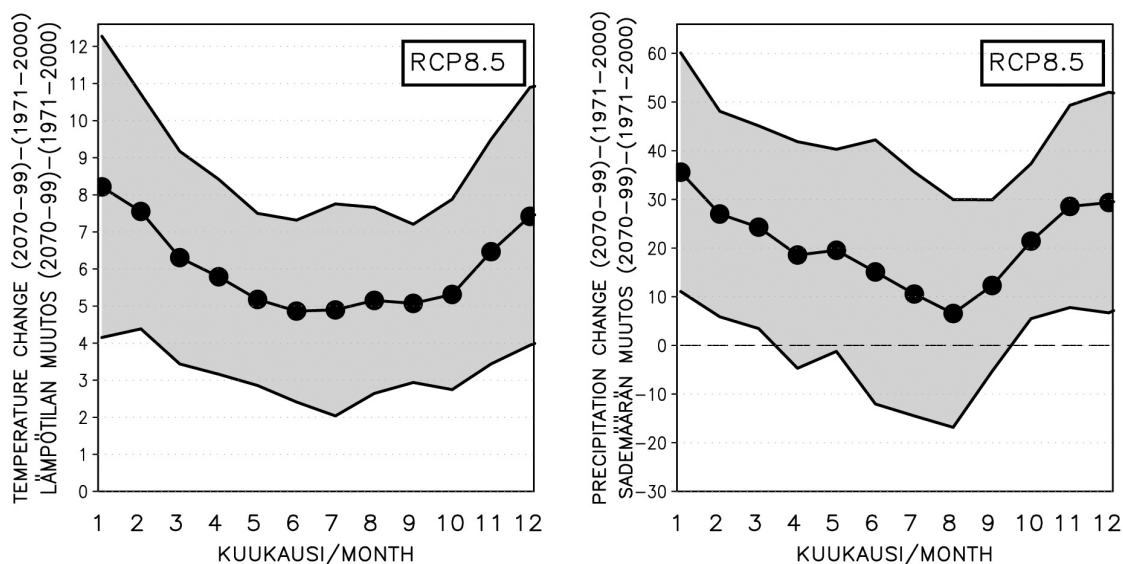
tuvat tiedot on laskettu skaalaamalla. Skaalaus perustui muilla RCP-skenaarioilla tehtyihin kyseisen mallin ajoihin.

Kaikkien tarkasteltujen skenaarioitten mukaan Suomen ilmasto lämpenee. Lämpötilojen arvioidaan nousevan maassamme 1,5–2 kertaa niin nopeasti kuin maapallolla keskimäärin. Kasvihuonekaasujen päästöjä rajoittamalla lämpenemistä voidaan hidastaa, mutta vaikutus näkyy kunnolla vasta muutaman vuosikymmenen viipeellä. Vuoden 2040 tienoilla heikoimman ja voimakkaimman kasvihuonekaasuskenaari-
on tuottamien lämpötilanmuutosten ero on kuvan 1 mukaan vasta vajaa aste, mutta 2080-luvulla jo lähes neljä astetta.

Lämpötilan nousu ei jakaudu tasaisesti eri vuodenojoille vaan on voimakkainta talvella. Jos tarkastellaan eri mallien antamien tulosten keskiarvoa, RCP8.5-skenaari-
on mukaan lämpötilat nousisivat meillä sadassa vuodessa talvisin noin kahdeksalla ja kesäisin viidellä asteella (kuva 2 vasemmalla). Eri mallien tulosten välillä on kuitenkin paljon eroa. Mallien väliset erot huomioon ottaen RCP8.5-skenaariota vastaava lämpeneminen osuu keskitalvella 90 prosentin todennäköisyydellä 4–12 asteen haarukkaan, kun sydänkesällä vastaava epävarmuusväli ulottuu kahdesta vajaaseen kahdeksaan asteeseen. Mikään malli ei tarjoa Suomelle nykyistä viileämpää ilmastoa.

Sademäärien muutosten ennustaminen on vieläkin epävarmempaa kuin lämpötilojen. RCP8.5-skenaari-
on toteutuessa mallit ennustavat jokseenkin takuuvarmasti nykyistä runsaampia sateita talvisin ja loppusyksystä. Esimerkiksi tammikuussa sademäärän kasvua kasvua olisi odotettavissa mallista riippuen 10–60 prosenttia (kuva 2, oikeanpuoleinen diagrammi). Lämpötilojen noustessa voimakkaasti ja sademäärien lisääntyessä sadetakki näyttäisikin olevan tulevaisuuden talvina soveliaampi vaatetus kuin turkikset tai toppatakki. Sen sijaan tulevien kesien sademäärien muutoksen suuntaa ei osata ennustaa varmasti. Useimmat mallit kyllä ennustavat sademäärien kasvavan kesälläkin, mutta todennäköisin arvio lisäykselle on vain kymmenen prosentin luokkaa.

Jos päästöjä saadaan leikattua, jäävät muutoksetkin pienemmiksi. Kuitenkin kaikilla skenaarioilla on nähtävissä, että niin lämpeneminen kuin sademäärän kasvukin ovat voimakkaimmillaan talvella. Ilmatieteen laitoksen julkaisemissa verkkoraportteissa (SETUKLIM 2013a, 2013b) on näytetty mallien tuottamia lämpötilan ja sademäärän muutoksia koko Euroopan alueella. Näissä raporteissa on esitetty tietoa myös muitten suureitten muutoksista, esimerkkeinä auringonsäteily, ilmanpaine ja tuulen voimakkuus.



Kuva 2. Lämpötilan (asteina, vasen kuva) ja sademäärän (prosentteina, oikea kuva) ennustetut muutokset Suomessa vuoden eri kuukausina (1 = tammikuu, 2 = helmikuu, jne.) siirryttäessä jaksosta 1971–2000 jaksoon 2070–2099. Mustat täplät yhdistävä käyrä kuvaa 28 ilmastomuutosmallin tulosten keskiarvoa ja harmaa varjostus mallitulosten perusteella arvioitua muutoksen 90 % todennäköisyysväliä. Muutosarviot perustuvat RCP8.5-skenaarioon (nopeasti kasvavat päästöt).

Figure 2. Projected changes in temperature (in °C, left panel) and precipitation (in per cent, right panel) in Finland for the period 2070–2099, relative to 1971–2000. The multi-model mean projections for the various months of the year (1 = January, 2 = February, ...), based on simulations performed with 28 climate models under the RCP8.5 scenario (rapidly increasing emissions), are denoted by black circles. Grey shading shows the 90 % uncertainty interval for the change.

Kasvukauden pituuden ja lämpösumman laskeminen mallien lämpötilatiedoista

Termisen kasvukauden sääoloja kuvaavien tunnuslukujen laskentamenetelmät esitellään artikkelissamme vain yleisellä tasolla. Yksityiskohtaisemmat kuvaukset matemaattisine kaavoineen on esitetty lähdeartikkeleissa (Ruosteenoja ym. 2011, 2015).

Tutkittaessa termisen kasvukauden olosuhteita ilmastomallien tulosten perusteella ongelmana on, että mallit eivät kykene kuvaamaan havaittua lämpötilailmastoa täsmälleen oikein. Tyypillisesti malleilla simuloidut lämpötilat poikkeavat havaituista muutamalla asteella. Tästä aiheutuu systemaattista virhettä niin nykyisen kuin tulevan ilmaston lämpösummiin, eikä lämpösumman muutoksellekaan voida saada oikeaa arvoa.

Systemaattista virhettä voidaan onneksi huomattavasti pienentää soveltamalla mallien simu-

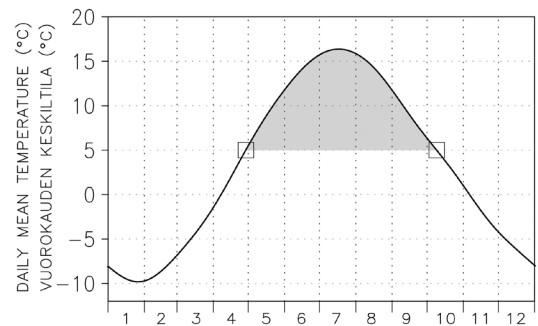
loimiin lämpötiloihin harhankorjausta. Kyseessä on nykyaikaisessa ilmastotutkimuksessa yleisesti käytetty menetelmä, ja korjauksen toteuttamiseksi on olemassa useita tapoja (Räisänen & Rätty 2013). Omassa tutkimuksessamme olemme käyttäneet korjausmenetelmää, jossa mallien simuloimia viime vuosikymmenien päivittäisiä vuorokauden keskilämpötiloja muokataan siten, että sekä pitkäaikaiset kuukausikeskilämpötilat että lämpötilojen ajallisen vaihtelun keskihajonnat saadaan vastaamaan havaittuja arvoja. Näitä erikseen joka kalenterikuukaudelle laskettuja korjauskertoimia sovelletaan tämän jälkeen myös mallien simuloimaan tulevaisuuden ilmastoon. Menetelmä ei vaikuta mitenkään keskilämpötilojen ennustettuihin muutoksiin nykyhetkestä tulevaisuuteen, vaan ne säilyvät korjausten jälkeenkin aivan samoina kuin kuvissa 1 ja 2.

Tarkasteltaessa termisen kasvukauden muutoksia vuosikymmenestä toiseen käytettiin kasvukauden määrittämiseen klimatologisiin aikakeskiarvoihin

perustuvaa menetelmää. Tätä menetelmää voidaan soveltaa ainoastaan pitkäaikaisiin ilmastollisiin keskilämpötiloihin, ei yksittäisten vuosien lämpötiloihin. Aluksi lasketaan 30-vuotisjakson (esimerkiksi 1971–2000) kuukausikeskilämpötilojen perusteella vuoden jokaiselle päivälle vuodenajalle tyypillinen vuorokauden keskilämpötila eli lämpötilan klimatologinen odotusarvo (näin laskettuja vuorokautisia lämpötiloja on esitetty muun muassa *Yliopiston almanakan* säätiö-osiossa). Kuvassa 3 on esitetty tällainen vuodenajan mukaan vaihteleva keskilämpötila Jyväskylän lähellä sijaitsevassa esimerkkipisteessä. Alhaisimmillaan pitkäaikainen keskilämpötila on siellä tammikuun lopussa noin $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, korkeimmillaan taas heinäkuun puolivälin tienoilla noin $+16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Menetelmää sovellettaessa seuraavaksi haetaan käyrältä ne päivät, joina pitkän ajan keskilämpötila leikkaa keväällä ja syksyllä viiden asteen rajan. Tällä tavalla saadaan määritettyä termisen kasvukauden keskimääräiset alkamis- ja päättymisajankohdat, jotka osuvat kuvassa 3 vapun aluspäiviin ja lokakuun alkuun. Kasvukauden lämpösumma saadaan selville laskemalla kasvukauden ajalta yhteen viisi astetta ylittävät lämpötilajäännökset (kuvan varjostettu alue).

Kasvukauden alkamisen määrittäminen yksittäisten vuosien lämpötilatietoihin tukeutuen on havainnollistettu kuvassa 4. Keväisin vuorokauden keskilämpötila tyypillisesti vaihtelee päivästä toiseen hyppien samalla viiden asteen rajalämpötilan molemmiin puolin. Kuvan esittämänä keväänä rajalämpötila ylittyi viidesti. Kasvukauden alkamisajankohdaksi valitaan näistä päivistä se, joka täyttää seuraavat kaksi ehtoa: (1) ennen kyseistä päivää on oltava enemmän yhteenlaskettua poikkeamaa rajalämpötilasta alas- kuin ylöspäin (eli kuvassa 4 tummanharmaata pinta-alaa enemmän kuin vaaleanharmaata); (2) tuon päivän jälkeen enemmän vaaleanharmaata poikkeamaa ylöspäin kuin tummanharmaata alaspäin. Käytännössä tämä ajanhetki saadaan selville laskemalla keskitalvesta alkaen päivä kerrallaan yhteen vuorokauden lämpötilan poikkeamia rajalämpötilasta ja etsimällä se ajanhetki, jolloin poikkeamien summa on ollut eniten negatiivinen (kuvan 4 alaosa). Tässä esimerkissä tuo summalausekkeen minimi saavutetaan 27. huhtikuuta. Termisen kasvukauden alkamispäiväksi valikoituu tätä seuraava päivä, 28. huhtikuuta.

Kasvukauden loppu saadaan selville vastaavalla tavalla, kun lasketaan yhteen poikkeamia kynnyslämpötilasta keskikesästä eteenpäin ja etsitään se päivä, jolloin poikkeamien summa saa suurimman arvonsa. Kasvukauden lämpösumma taas lasketaan ynnäämällä viiden asteen ylittäviä lämpötilajäännöksiä kasvukauden alkupäivästä loppupäivään; kasvukauden ajalle osuvia satunnaisia viiden as-



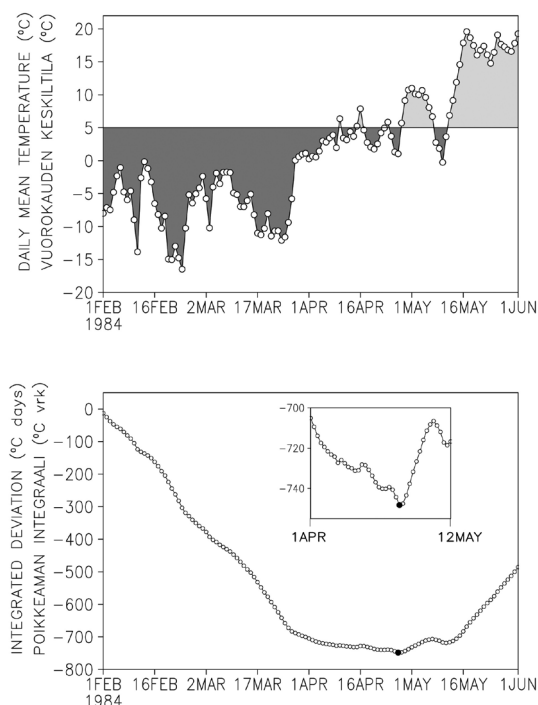
Kuva 3. Termisen kasvukauden alkamisen, päättymisen ja lämpösumman määrittäminen klimatologisen keskiarvomenetelmän avulla esimerkkipisteessä 62.125°N , 26.125°E jakson 1971–2000 lämpötilatietojen perusteella. Käyrä esittää kullekin vuoden päivälle (1.1.–31.12.) laskettua tuon ajanjakson ilmastoa kuvaavaa pitkäaikaisista keskilämpötilaa. Viiden asteen rajan ylitys keväällä ja alitus syksyllä (termisen kasvukauden alku ja päättyminen) on merkitty kuvaan neliöillä ja kasvukauden aikana kertynyt lämpösumma harmaalla varjostuksella.

Figure 3. Determination of the onset and termination of the thermal growing season and the temperature sum at 62.125°N , 26.125°E using a method based on long-term climatological means. The curve indicates an expectation for the daily mean temperature for each day of the year, derived from the mean temperatures for the period 1971–2000. Crossing of the 5°C threshold temperature in spring and autumn (the start and the end of the growing season) are denoted by squares and the temperature accumulation during the growing season by grey shading.

teen vuorokausikeskilämpötilan alituksia ei vähennetä summasta.

Kuvan 4 mukaista lämpötilaerotuksiin perustuvaa menetelmää kasvukausien alkamis- ja päättymisajankohtien etsimiseksi käytetään muun muassa Ilmatieteen laitoksen operatiivisessa ilmastopalvelussa. Menetelmän alkuperäinen kehittäjä on meteorologi Seppo Sarkkula.

Suomen nykyisessä ilmastossa kasvukauden alku ja päättymisen kunakin vuonna saadaan helposti selville lämpötilaerotusmenetelmän avulla. Lämpimillä alueilla – ja ilmaston lämmetessä tulevaisuudessa myös muualla – menetelmän käyttöön kuitenkin liittyy ongelmia. Kasvukauden alkua ja loppua ei nimittäin ole mahdollista määrittää sellaisina lämmintalvisina vuosina, joina ei esiinny riittävän selväpiirteistä viileää vuodenaikaa kasvukausien välissä. Ja jos joltakin vuodelta tieto alkamis- tai päättymispäivästä puuttuu, ei alkamis- ja päättymisajankohdille voida laskea pitkän ajan keskiarvojakaan. Tästä syystä näitten ajankohtien



Kuva 4. Kasvukauden alkamisajankohdan määrittäminen lämpötilaerotusmenetelmää käyttäen. Ylempi kuva esittää lämpötilan vuorokausikeskiarvoja pisteessä 62.125°N, 26.125°E vuoden 1984 helmikuusta toukokuuhun. Lämpötilojen poikkeamat 5°C rajalämpötilasta alaspäin ja ylöspäin on varjostettu tummalla ja vaalealla harmaasävyillä. Alakuva: Kuhunkin päivään mennessä kertynyt vuorokausikeskilämpötilojen poikkeamien summa laskettuna helmikuun 1. päivästä lähtien. Tämän summalausekkeen minimiarvo, joka saavutettiin huhtikuun 27. päivänä, on merkitty käyrälle mustalla ympyrällä. Pikku kuva esittää suurennettuna lämpötilapoikkeamien summalausekkeen arvoja aikavälillä 1.4.–12.5.

Figure 4. Determining the onset of the thermal growing season using the temperature deviation integral method. Upper panel: daily mean temperatures at 62.125°N, 26.125°E in February – May 1984. Temperature anomalies below 5°C are marked by dark and those above that threshold by a light shading. Lower panel: the time integral of the temperature deviations from the threshold value, with the starting point on 1 February. The absolute minimum of the integral on 27 April is denoted by a black circle. The period from 1 April to 12 May is focused upon in the inset panel.

ja lämpösummien pitkäaikaiset keskiarvot laskeaan käyttäen klimatologisten aikakeskiarvojen menetelmää, joka ei ole herkkä yksittäisille hyvin leudoille talville. Toki aikakeskiarvoihin tukeutuva menetelmäkään ei anna kasvukaudelle alkamis- ja päättymisajankohtia kaikkein leudoimmilla alueilla

eteläisimmässä ja läntisimmässä Euroopassa, missä keskimääräinen lämpökäyrä pysyy ympäri vuoden viiden asteen rajan yläpuolella. Tulevaisuudessa tällainen hyvin lämpimien talvien alue ilmeisesti laajenee myös osaan Keski-Eurooppaa.

Kasvukauden lämpösumma sen sijaan on mahdollista laskea kaikkialla. Lämpimässä ilmastossa, jossa keskilämpötilat pysyttelevät viiden asteen yläpuolella kaikkina vuodenaikoina, lämpösummaa kertyy ympäri vuoden.

Niissä osissa Eurooppaa, missä kasvukauden alku ja loppu saadaan yksiselitteisesti selville joka vuosi, molemmat menetelmät tuottavat näille ajankohdille jokseenkin samat pitkäaikaiset keskiarvot. Kasvukauden lämpösummalle klimatologisiin aikakeskiarvoihin perustuva menetelmä (kuva 3) sen sijaan antaa pikkuisen alhaisempia arvoja kuin mitä saadaan ottamalla pitkän ajan keskiarvo lämpötilaerotusmenetelmän (kuva 4) tuottamista vuosittaisista lämpösummista. Tämä systemaattinen ero on kuitenkin suunnilleen samansuuruinen sekä vertailujakson että tulevaisuuden ilmastossa, ja lämpösumman muutokset ilmaston lämmetessä saadaan menetelmästä riippumatta lähes yhtä suuriksi.

Kasvukausilaskelmissa keskitymme jatkossa tarkastelemaan RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioita. Ainoastaan näille skenaarioille oli käytettävissä malliajoja kaikista tutkituista ilmastomalleista. Lisäksi muut vaihtoehdot eivät vaikuta ainakaan tällä hetkellä järin uskottavilta tulevaisuudenkuville. RCP2.6-skenaarion mukaan maailmanlaajuiset hiilidioksidipäästöt pitäisi saada käännettyä jyrkään laskuun jo vuoden 2020 vaiheilla. RCP6.0-skenaariossa päästöt taas pysyisivät lähivuosisikymmenet suunnilleen nykyisellä tasolla, mutta alkaisivat uudelleen kasvaa ennen vuosisadan puoliväliä. Tämä oletamus selittää myös RCP6.0-skenaarion mukaisen melko hitaan lämpötilan nousun ennen vuosisadan puoliväliä (kuva 1).

Pidempiä kasvukausia

Kuvissa 5–6 on esitetty termisen kasvukauden alkamisen ja päättymisen ajankohtia perusjakson ilmastossa sekä tulevaisuuden arvioita. 1900-luvun loppuvuosisikymmeninä kasvukausi alkoi Suomen eteläosissa keskimäärin huhtikuun lopussa, Pohjois-Pohjanmaalla ja Etelä-Lapissa toukokuun alkupuolella ja Tunturi-Lapissa toukokuun loppupuolella. Käsivarren nipukassa kasvukausi alkoi keskimäärin vasta kesäkuun puolella (kuva 5). Vastaavasti kasvukauden loppu ajoittui Suomen pohjoisessa puoliskossa pääosin syyskuun jälkipuolelle ja etelämpänä lokakuuhun, lounaisessa ulkoosaristossa kuitenkin vasta marraskuun alkuun (kuva 6).

Jo lähivuosisikymmeninä (jakso 2020–2049) kasvukausi pidentyy suurella osalla Suomea kymmenkunta päivää molemmista päistä, eli yhteensä noin kolme viikkoa. Rannikkoalueilla ja pohjoisimmassa Lapissa pidennystä on odotettavissa hiukan enemmän. Näin lyhyessä ajassa kasvihuonekaasupäästöjen mahdolliset rajoittamistoimet eivät juurikaan ehdi hidastaa ilmaston lämpenemistä, vaan sekä RCP4.5- että RCP8.5-skenaarion mukaan kasvukausi pitenee lähes yhtä paljon. Sen sijaan vuosisadan lopulla kasvukausi pidentyy huomattavasti enemmän, mikäli päästöt yhä jatkavat kasvuaan. Pienempipäästöisen skenaarion mukaan kasvukausi pidentyisi reilulla kuukaudella, mutta päästöjen jatkuvasti kasvaessa kasvukaudesta tulisi jopa kaksi kuukautta nykyistä pidempi.

Lappia lukuun ottamatta kasvukausi pidentyisi syksyisin hieman enemmän kuin keväisin. Lähivuosisikymmeninä kasvukausi käynnistyisi sääoloiltaan tyypillisenä keväänä Etelä-Suomessa jo ennen huhtikuun puoliväliä. Vuosisadan lopulla luonto vastaavasti heräisi RCP8.5-skenaarion toteutuessa jo maaliskuun loppupuolella, eli samoihin aikoihin kuin nykyisin Keski-Euroopassa. Tuossa vaiheessa terminen kasvukausi olisi venähtänyt esimerkiksi Tanskassa jo lähes ympärivuotiseksi (kuvat 5–6); viiden asteen rajalämpötila ylittyisi siellä jo helmikuussa ja alittuisi vasta joulutammikuussa.

Kohti suurempia lämpösummia

1900-luvun loppuvuosisikymmeninä lämpösummaa kertyi kasvukauden aikana eteläisimmässä Suomessa keskimäärin noin 1 300 astepäivää ja Pohjois-Lapissa 400–600 astepäivää (kuva 7 ylhäällä). Ilmaston lämmetessä lämpösummat kasvavat nopeasti; lämpökäyrän siirtymässä ylöspäin (ks. kuvaa 3) lämpösummaa kasvattaa sekä kasvukauden pidentyminen molemmista päistä että viiden asteen ylittävien lämpötilaerotusten suurentuminen pitkin kasvukautta.

Jo jakson 2020–2049 aikana lämpösumma kohoaa Etelä-Suomessa 1 600 astepäivän vaiheille (kuva 7 keskellä). Perusjakson (vuodet 1971–2000) ilmastossa vastaavia lukemia mitataan Itämeren etelärannikolla. Etelä-Lapissa lämpösummat nousevat ennusteissa samoihin lukemiin, joihin on totuttu 1900-luvun lopulla Tampereen korkeudella. Napapiirin vaiheilla kiemurteleva 800 astepäivän samanarvonkäyrä siirtyy vastaavasti kolmisensataa kilometriä pohjoiseen.

Vuosisadan loppua tarkasteltaessa muutokset ovat jo todella hurjia (kuva 7 alhaalla), varsinkin RCP8.5-skenaarion toteutuessa. Etelä- ja Keski-Suomeen ennakoituja yli 2 000 astepäivän lämpö-

summia tavattiin 1900-luvun lopulla Ranskassa ja Ukrainan eteläosissa. Napapiirin korkeudellakin lämpösummat kohoaisivat 1 600 astepäivän tienoille, mikä on 300 astepäivää enemmän kuin lähtötilanteessa etelärannikolla. Nykyiset Tampereen–Porin tienoon lämpösummat siirtyisivät Käsivarren Lappiin.

Jos päästöjä onnistutaan hillitsemään (RCP4.5-skenaario), muutokset eivät ole aivan näin rajuja. Tuossakin tapauksessa Suomen eteläosissa kuitenkin yllettäisiin vuosisadan lopulla yli 1 800 astepäivään. Tällaisia lukemia tavataan perusjakson ilmastossa Puolan–Itä-Saksan vaiheilla.

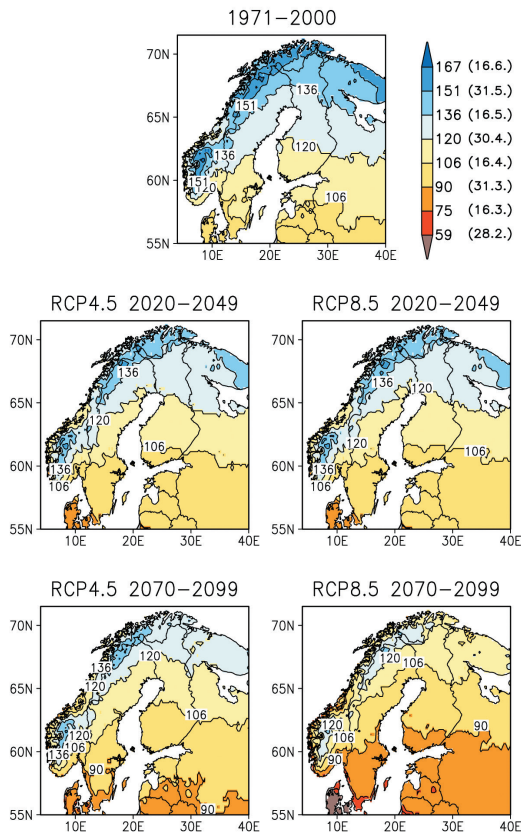
Absoluuttisissa yksiköissä mitattuina lämpösummat lisääntyisivät RCP8.5-skenaarion toteutuessa Suomessa 800–1 000 astepäivällä, mutta Etelä-Euroopassa lisää lämpöä saataisiin paikoin jopa 2 000 astepäivän verran. Ero selittyy sillä, että etelässä lämpötilan kohoaminen kerryttää lämpösummaa ympäri vuoden, Suomessa vain lämpimänä vuodenaikana. Suhteellisesti laskettuna muutos on kuitenkin suurin pohjoisessa.

Kaikki kuvissa 5–7 esitetyt muutosarvot perustuvat mallitulosten keskiarvoihin. Todellisuudessa eri mallien tuottamien lämpenemisenusteitten välillä on kuitenkin aika paljon eroa (kuva 2). Kun nämä erot otetaan huomioon, on lämpösumman muutoksen ennusteisiin syytä lisätä 30–40 prosentin suuruinen (yhden keskihajonnan) epävarmuushaarukka.

Lämpimät kasvukaudet yleistyvät ja viileät harvinaistuvat

Kasvukausien sääolot vaihtelevat vuodesta toiseen, niin nykyisessä kuin tulevaisuudenkin ilmastossa. Maatalouden katovuodet liittyvät usein nimenomaan poikkeuksellisen alhaisiin lämpösummiin. Siksi on kiintoisaa tutkia, koetaanko tulevaisuudessa vielä koleita kasvukausia, ja toisaalta miten nopeasti nykyisen käsityksen mukaan epätavallisen lämpimät kasvukaudet yleistyvät.

Kuvassa 8 on havainnollistettu vuosittaisten lämpösummien tilastollista jakaumaa Keski-Suomessa jakson 1971–2000 ilmastossa. Tiedot ovat peräisin samasta esimerkkipisteestä kuin kuvissa 3–4. Jakauma perustuu isoon otokseen, joka on saatu ottamalla mukaan kaikki käytettävissä olleet malliajot ja käymällä kustakin ajosta läpi ajanjakson 1971–2000 kaikki vuodet. Lämpösummien tilastollinen jakauma noudattaa varsin kauniisti normaalijakaumaa. Alhaisimmillaan lämpösumma voi jäädä tuolla alueella alle 800 astepäivään, mikä vastaa sääsuhteiltaan tavanomaisen vuoden oloja napapiirin vaiheilla. Kaikkein lämpimimpinä kasvukausina

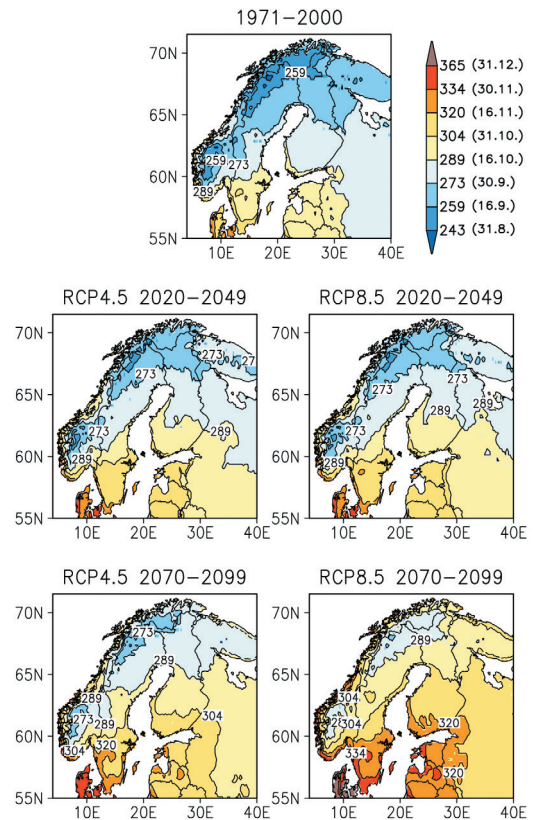


Kuva 5. Termisen kasvukauden keskimääräinen alkamispäivä Pohjois-Euroopassa vuosina 1971–2000 (yläkuva) sekä mallitulosten keskiarvoon perustuvat arviot alkamisajankohdalle jaksojen 2020–2049 (keskimmäinen rivi) ja 2070–2099 (alarivi) aikana; arviot on annettu erikseen RCP4.5- (vasemmalla) ja RCP8.5-skenaarioille (oikealla). Väritys ja samanarvonkäyrät ilmaisevat alkamishetken juoksevana päivämääränä vuoden alusta; esimerkiksi päivä numero 120 vastaa huhtikuun 30. päivää (ks. väriasteikon vieressä olevaa selitystä).

Figure 5. Baseline values (years 1971–2000; at the top) and future projections (periods 2020–2049 and 2070–2099; rows 2–3) for the onset of the thermal growing season. Left panels show the multimodel-mean projections for the RCP4.5 scenario and right panels for RCP8.5. Contours show Julian days; e.g., day 120 denotes 30 April (see the legend).

taas ylletään yli 1 500 astepäivään. Tämä on tyypillinen lukema Etelä-Ruotsissa ja Liettuaissa. Vuodet eivät siis tosiaankaan ole veljeksiä.

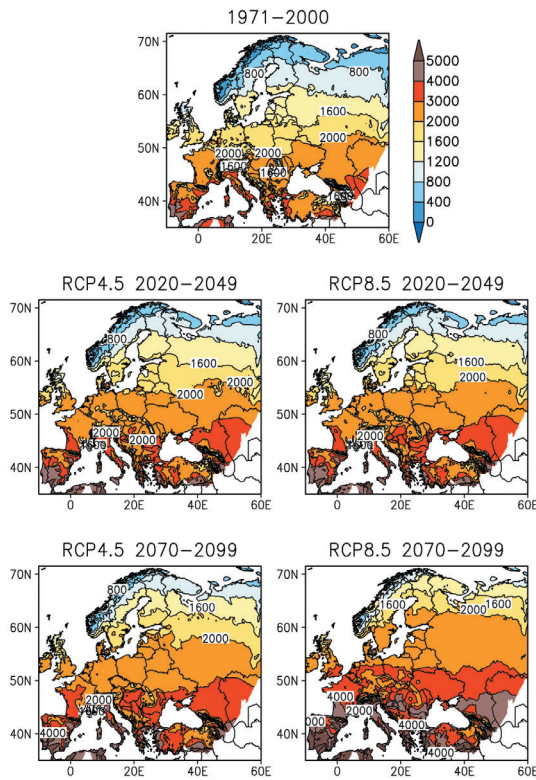
Normaalijakaumaa hyödyntäen voidaan helposti laskea perusjakson lämpösumman todennäköisyysjakaumalle prosenttipisteitä. Näistä nähdään pari esimerkkiä kuvassa 9. Vasemmanpuoleinen



Kuva 6. Termisen kasvukauden keskimääräinen päättymisajankohta vuosina 1971–2000 (yläkuva) sekä mallitulosten keskiarvoon perustuvat arviot jaksoille 2020–2049 (keskimmäinen rivi) ja 2070–2099 (alarivi). Numerot ovat juoksevia päivämääriä vuoden alusta; esimerkiksi päivä numero 304 vastaa lokakuun 31. päivää (ks. selityspalkkia).

Figure 6. Baseline values (years 1971–2000; at the top) and future projections (periods 2020–2049 and 2070–2099; rows 2–3) for the termination of the thermal growing season. Contours show Julian days; e.g., day 304 denotes 31 October (see the legend).

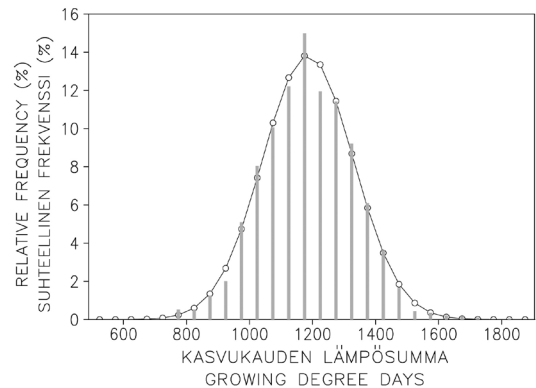
kartta esittää hyvin viileää kasvukautta, jonka kylmemmälle puolelle jäädaan kerran 20 vuodessa (jakauman 5. prosenttipiste). Tällaisena koleana kasvukautena ei edes Suomen eteläosissa ylletä kuin hiukan yli 1 000 astepäivään, ja Keski-Lapissa jäädaan noin 600 astepäivään. Poikkeuksellisen lämpimänä, niin ikään suunnilleen kerran 20 vuodessa esiintyvänä perusjakson kasvukautena (95. prosenttipiste; kuvan 9 oikeanpuoleinen kartta) lämpösumma taas kipuaa aivan etelässä 1 600:aan ja Keski-Lapissakin 1 000 astepäivään.



Kuva 7. Keskimääräinen kasvukauden lämpösomma (astepäivinä) Euroopassa 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). Samanarvonkäyrien väli on 2 000 astepäivään asti 400, suuremmilla arvoilla 1 000.

Figure 7. Baseline values (years 1971–2000; at the top) and future projections (periods 2020–2049 and 2070–2099; rows 2–3) for the temperature sum of the growing season. Left panels show the multimodel-mean projections for RCP4.5 and right panels for RCP8.5. Contour interval is 400 up to 2 000 degree days, and 1 000 for values higher than 2000.

Kuvassa 10 on esitetty, miten käy perusjakson mittapuun mukaan kylmille ja lämpimille kasvukausille tulevaisuudessa. Näissä todennäköisyyslaskelmissa on otettu huomioon sekä eri mallien ennustama erisuuruinen ilmaston lämpiäminen (kuva 2) että lämpösommien vaihtelu vuodesta toiseen. Jo 2020-luvulla yli 90 prosenttia kaikista kasvukausista on 1900-luvun lopun ilmastotilastoihin suhteutettuina normaalia lämpimämpiä ja alle kym-

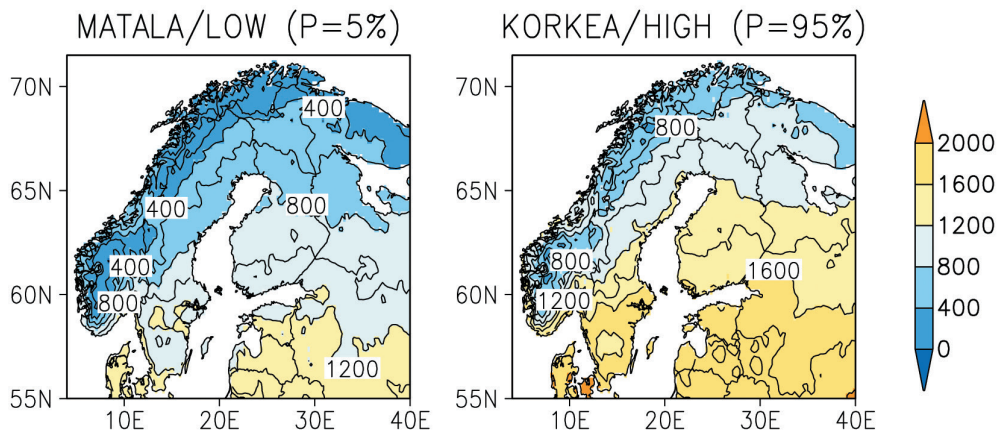


Kuva 8. Kasvukauden lämpösommen frekvenssijakauma pisteessä 62.125°N, 26.125°E jakson 1971–2000 ilmastossa (harmaat pylväät) sekä jakaumaan sovitettu normaalijakauma (musta käyrä). Jakauman keskiarvo on 1 186 ja keskihajonta 144 astepäivää. Frekvenssijakauma on muodostettu käymällä läpi kunkin 30 vuoden lämpösommat kaikista malliajoista.

Figure 8. Grey bars: a frequency histogram of the annual temperature sum at 62.125°N, 26.125°E during 1971–2000, derived from the entire model ensemble. Black curve: a Gaussian distribution fitted to the data (mean 1 186 and standard deviation 144 °C days).

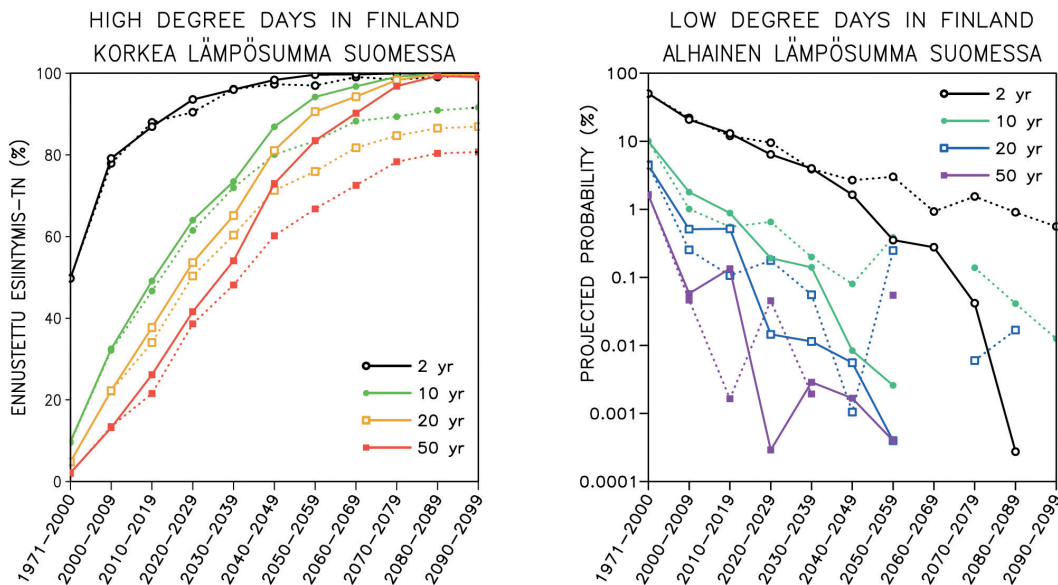
menen prosenttia jää tavanomaista viileämmiksi (kuvan 10 mustat käyrät). Vuosisadan lopulla ”keskimääräistä viileämpien” kasvukausien todennäköisyys pienentyy RCP4.5-skenaarion perusteella yhden prosentin vaiheille, eikä niitä esiintyisi enää käytännössä lainkaan RCP8.5-skenaarion mukaan eletäessä.

Epätavallisen kylmät, ennen ilmaston lämpenemistä arviolta kerran kymmenessä, 20 tai 50 vuodessa toistuneet kasvukaudet harvinaistuvat vieläkin nopeammin ja käytännössä katoavat tyystin vuosisadan puolivälissä (kuvan 10 oikeanpuoleinen kaavio). Jo sitä ennen tällaiset kasvukaudet käyvät niin harvinaisiksi, että niitten esiintyminen vaihtelee malliajoissa satunnaisesti vuosikymmenestä toiseen. Vastaavasti lämpimät kasvukaudet käyvät koko ajan yhä yleisemmiksi (kuva 10 vasemmalla). Jo 2020-luvulla äärimmäisen korkean lämpösommen (toteutuu perusjakson ilmastossa kerran 50 vuodessa) todennäköisyys on kivunnut 40 prosenttiin ja harvinaisen lämpimien kasvukausien (perusjaksolla kerran 20 vuodessa) todennäköisyys yli 50 prosenttiin. Vuosisadan lopulla RCP8.5-skenaarion toteutuessa käytännössä jokainen kasvukausi olisi viime vuosikymmenen tilastoihin suhteutettuna



Kuva 9. Perusjakson 1971–2000 frekvenssijakaumaan sovitetun normaalijakauman (esimerkki kuvassa 8) perusteella laskettu kerran 20 vuodessa esiintyvä harvinaisen alhainen (vasen kuva) ja harvinaisen korkea (oikea kuva) kasvukauden lämpösума.

Figure 9. Exceptionally low (left panel) and high (right panel) temperature sums, occurring once in 20 years in the baseline period 1971–2000 climate (derived from the normal distribution, see Fig. 8).



Kuva 10. Korkeitten ja alhaisten lämpösummien esiintymisen todennäköisyyksiä jakson 1971–2000 aikana sekä erikseen kullekin kymmenvuotiskaksolle 2000–2009, ..., 2090–2099. Vasemmassa kuvassa on annettu mallituloksiin perustuvat todennäköisyyssarviot korkeitten, perusjakson tilastojen mukaan kerran 2, 10, 20 tai 50 vuodessa havaittavien lämpösummien esiintymiselle. Vastaavat todennäköisyydet näin usein havaittaville alhaisille lämpösummille nähdään oikeanpuoleisessa kuvassa (logaritmisella asteikolla). Lukuarvot ovat alueen 60–70°N, 20–30°E maa-alueitten keskiarvoja. RCP8.5-skenaariota vastaavat todennäköisyydet on merkitty kuviin yhtenäisillä viivoilla ja RCP4.5-skenaariota vastaavat katkoviivoilla.

Figure 10. Model-based probabilities for anomalous growing seasons during the baseline period 1971–2000 and in consecutive decades from the 2000s to the 2090s. The left panel shows probabilities for high temperature sums exceeding the 2-, 10-, 20- and 50-year return levels determined from the baseline-period climate. Probabilities of low GDDs below the corresponding return levels are depicted in the right panel; note the logarithmic vertical scale in this diagram. All values are spatial means over the land grid points of the area 60 to 70°N and 20 to 30°E. The probabilities for the RCP8.5 scenario are marked by solid and those for RCP4.5 by dotted curves.

äärimmäisen lämmin, ja RCP4.5-skenaarionkin mukaan näin lämpimien vuosien todennäköisyys lähentelisi 80 prosenttia.

Johtopäätökset

Ilmaston lämpeneminen pidentää kasvukausia ja kasvattaa lämpösummia. Odotettavissa oleva muutos on varsin huomattava, varsinkin silloin jos kasvihuonekaasujen päästöjä ei onnistuta hillitsemään. Siinä tapauksessa Etelä-Suomessa kasvukausien arvioidaan olevan kuluva vuosisadan lopulla lämpöoloiltaan samanlaisia kuin mitä viime vuosikymmeninä on totuttu näkemään Keski-Euroopan eteläosien alavilla alueilla. Samalla Suomen 1900-luvun lopun havaintotietojen mukaan viileiksi luokiteltavat kasvukaudet harvinaistuvat nopeasti. Jo lähivuosikymmeninä enemmistö kasvukausista näyttäisi olevan tuon jakson tilastoihin suhteutettuna harvinaisen lämpimiä. Näin viljelijöitten kokemustieto siitä, millaisia kasvukaudet tyypillisesti tapaavat olla, vanhenee nopeasti.

Vaikka ilmastonmuutos on vasta aluillaan, kasvukausien lämpiäminen on jo nähtävissä havaintotilastoista. Vuoden 2000 jälkeen lämpösummat ovat olleet Suomessa miltei kaikkina vuosina jakson 1971–2000 keskiarvojen yläpuolella. Esimerkiksi vuosina 2006, 2011 ja 2013 kasvukausi oli harvinaisen lämmin; suuressa osassa Suomea lämpösummaa kertyi yli 300 astepäivän verran yli normaalin. Ainostaan vuonna 2008 lämpösumma jäi valtaosassa Suomea (eteläisimpiä osia lukuun ottamatta) pitkäaikaista keskiarvoa alhaisemmaksi. Vuonna 2015 taas kesän suosituin loma-aika oli kyllä koea, mutta varhainen lauha kevät ja toisaalta lämmin loppukesä ja alkusyksy nostivat lämpösumman suurin piirtein tavanomaisiin lukemiin.

Odotettavissa oleva kasvukausien pidentyminen ja lämpeneminen mahdollistaa uusien entistä enemmän lämpöä vaativien kasvilajien ja -lajikkeitten ottamisen viljelyyn (Uleberg ym. 2014). Kuitenkin on syytä pitää mielessä, että viileitä kasvukausia voi esiintyä satunnaisesti vielä tulevaisuudessakin (kuva 10). Maanviljelijät voivat vähentää kasvukausien vaihteluista johtuvia riskejä varaamalla jonkin osan peltolohkoistaan varhaisille tai muutoin vähemmän lämpöä vaativille lajikkeille.

Koko Eurooppaa tarkasteltaessa ilmastonmuutos siirtää maatalouden painopistettä kohti pohjoista (Olesen & Bindi 2002). Pohjois-Eurooppa hyötyy pidentyvistä kasvukausista ja lisääntyvästä lämmöstä, varsinkin kun kesän sademäärien odotetaan pysyvän pohjoisessa ennallaan tai jopa hieman lisääntyvän (kuva 2). Eteläisessä Euroopassa liiallinen kuumuus sen sijaan aiheuttaa ongelmia. Samalla

Etelä-Euroopan sateitten ennustetaan vähentyvän, kaikkein voimakkaimmin Välimeren ympäristössä (SETUKLIM 2013a: 12; Stocker ym. 2013: 1078).

Kuitenkin muutokseen sopeutuminen tuo mukanaan haasteita myös pohjoisessa. Nykyisin käytössä olevat viljalajikkeet on mukautettu vallitseviin ilmasto-oloihin. Sen sijaan vuosisadan lopulle ennustettuja olosuhteita, hyvin korkeitten kesälämpötilojen ja pitkän päivän yhdistelmää, ei tavata tällä hetkellä missään maapallolla. Ei ole olemassa noihin oloihin jalostettuja viljalajikkeitakaan. Nykyisillä lajikkeilla korkea lämpötila yhdistettynä runsaaseen valoon lyhentää kasvin elonkierrossa jyvien muodostumisvaiheen kestoa, mikä johtaa alhaiseen satoon (Peltonen-Sainio ym. 2009). Pohjoilaan ennustettu lämmin ilmasto edellyttää siis aivan uudentyyppisten viljakasvilajikkeitten jalostamista. Syysviljojen kasvua voi haitata myös leutojen talvien yleistyminen. Lämpötilan sahatessa talvella nollan molemmin puolin lumi ensin sulaa ja sitten taas jäätyy pellolle. Pellon pinnalle muodostuva jääkerros saa puolestaan aikaan oraita vahingoittavan jääpoltteen.

Ilmaston lämpeneminen myös helpottaa erilaisten kasvituholaisten elämää. Kylmä talvi ei enää nitistä tuhohyönteisiä entiseen malliin, ja pitkän kesän aikana ennättää kehittyä useampia sukupolvia. Tuholaisten, kasvitautien ja rikkaruohojen kurissapito luo painetta lisätä torjunta-aineitten käyttöä. Tämä puolestaan vaarantaa Suomen maineen puhtaan ravinnon tuottajana.

Kasvukausien aikaisempi käynnistyminen keväällä hyödyttää silti viljelijöitä. Sitä vastoin terminen kasvukauden venymisestä myöhäiseen syksyyn ei ole yhtä suurta iloa. Loppusyksystä valoa on tarjolla kitsaasti, joten kasvien yhteyttäminen on suotuisasta lämpötilasta huolimatta tehontonta. Viljakasvien sadonkorjuuta ei myöskään ole mahdollista lykätä kovin myöhäiseksi, sillä kosteassa ilmassa ja niukassa auringonvalossa kasvustot eivät kuivu korjattavaan kuntoon.

Metsissä kasvukauden lämpösummien suurentamisen on havaittu kiihdyttävän kasvua. Tähän voi osaltaan vaikuttaa karikkeen nopeampi maatumisen ja sitoutuneitten ravinteitten joutuksampi vapautuminen kasvien käyttöön (Kauppi ym. 2014). Toisaalta karikkeen entistä nopeampi hajoaminen lämpiminä syksyinä, mistä on jo nähty merkkejä (Vesala ym. 2010), saattaa vähentää eloperäisen aineksen määrää metsien ja peltojen maaperässä. Pidemmällä tähtäimellä metsien kasvua uhkaa rajoittaa myös kuivuus, jos sademäärän lisääntyminen ei riitä korvaamaan korkeamman lämpötilan aiheuttamaa voimistuvaa veden haihduntaa. Suurimassa vaarassa lienevät Etelä-Suomen kuusikot (Kellomäki ym. 2008).

Suomen elolliselle luonnolle ilmastomuutos merkinnee pahimmassa tapauksessa perinpohjaista mullistusta. Jos tänne Pohjolaan saadaan vaikkapa Ranskan tai Ukrainan kasvukaudet, voidaan myös noille alueille ominaisen eliömaailman otaksua aikaa myöten levittäytyvän maahamme. Samalla suuri joukko nykyisiä viileään ilmastoon sopeutuneita kasvi- ja eläinlajeja taantuu tai katoaa luonostamme tyytien.

Kaikkiin ilmastomuutosennusteisiin liittyy vielä melkoisesti epävarmuutta, joka johtuu osaksi kasvihuonekaasupäästöjen tulevasta kehityksestä, osaksi mallitulosten välisistä eroista. Ennusteitten välistä hajontaa on havainnollistettu kuvissa 1–2. Päästöjen rajoituksiin ja ilmastomuutokseen sopeutumiseen liittyvät päätökset joudutaan siten tekemään melko epävarman tiedon pohjalta. Muutoksen suunta kohti lämpimämpää ilmastoa on kuitenkin selvä.

Maanviljelyksen ja joittenkin muitten yhteiskunnan alojen ilmastomuutoksesta mahdollisesti saamia hyötyjä punnittaessa on syytä pitää mielessä, että Suomi ei ole erillinen saareke maailmassa. Ilmastomuutos koettelee suurinta osaa kehitysmaista ja eteläistä Eurooppaa kovin kourin. Jos ja kun näissä maissa elämisen ehdot heikkenevät, ihmisten houkutus etsiä uusia elinsijoja ilmastomuutoksen hellemmin kohteilemilta alueilta varmasti lisääntyy. Elinolojen heikkeneminen voi toimia myös väkivaltaisten konfliktien käyteaineena. Tällöin Suomeakin uhkaisivat entistä pahemmat pakolais- ja siirtolaiskriisit. Pahimmassa tapauksessa edessä saattaa olla taistelu elintilasta pallomme edullisina säilyvillä asuinalueilla. Vaikka ilmaston muuttuminen näyttäisi suppeasta näkökulmasta olevan ainakin alkuvaiheessa Suomelle hyödyksi, kannattaa myös suomalaisten olla mukana ihmiskunnan yhteisissä ponnisteluissa muutosten hillitsemiseksi.

Kiitokset

Tutkimukseen on saatu rahoitusta maa- ja metsätalousministeriöltä (Ilmapuskuri-hanke) ja Suomen Akatemialta (Plumes-hanke 278067 ja Huippuyksikkörahoitus 272041). Kuvassa 4 esitelty lämpötilaerotusmenetelmä kasvukauden alkamisen ja päättymisen ajankohdan määrittämiseksi on peräisin meteorologi Seppo Sarkkualta. Ilmastomallien tulostiedot on saatu kansainvälisestä Earth System Grid Federation data archive-tietopankista (pcmdi9.llnl.gov/projects/cmip5). Käsikirjoituksen arvioitsijoilta saatu palaute on monissa kohdissa auttanut selvittämään tekstiä.

KIRJALLISUUS

Grigorieva E. A., A. Matzarakis & C. R. de Freitas (2010). Analysis of growing degree-days as a climate impact indicator in a region with extreme annual air

temperature amplitude. *Climate Research* 42: 2, 143–154.

Jantunen, J. & K. Ruosteenoja (2000). Weather conditions in northern Europe in the exceptionally cold spring season of the famine year 1867. *Geophysica* 36: 1–2, 69–84.

Karlsen S. R., I. Solheim, P. S. A. Beck, K. A. Høgda, F. E. Wielgolaski & H. Tømmervik (2007). Variability of the start of the growing season in Fennoscandia, 1982–2002. *International Journal of Biometeorology* 51: 6, 513–524.

Kauppi P. E., M. Posch & P. Pirinen (2014). Large impacts of climatic warming on growth of boreal forests since 1960. *PLoS ONE* 9: 11, e111340.

Kellomäki S., H. Peltola, T. Nuutinen, K. T. Korhonen & H. Strandman (2008). Sensitivity of managed boreal forests in Finland to climate change, with implications for adaptive management. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363: 1501, 2341–2351.

Luomaranta A., K. Ruosteenoja, K. Jylhä, H. Gregow, J. Haapala & A. Laaksonen (2014). Multimodel estimates of the changes in the Baltic Sea ice cover during the present century. *Tellus A* 66, 22617.

Matzarakis A., D. Ivanova, C. Balafoutis & T. Makrogiannis (2007). Climatology of growing degree days in Greece. *Climate Research* 34: 3, 233–240.

Olesen, J. E. & M. Bindi (2002). Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy* 16: 4, 239–262.

Peltonen-Sainio P., L. Jauhiainen, K. Hakala & H. Ojanen (2009). Climate change and prolongation of growing season: changes in regional potential for field crop production in Finland. *Agricultural and Food Science* 18: 3–4, 171–190.

Pudas, E., M. Leppälä, A. Tolvanen, J. Poikolainen, A. Venäläinen & E. Kubin (2008). Trends in phenology of *Betula pubescens* across the boreal zone in Finland. *International Journal of Biometeorology* 52: 4, 251–259.

Qian B., X. Zhang, K. Chen, Y. Feng & T. O'Brien (2010). Observed long-term trends for agroclimatic conditions in Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49: 4, 604–618.

Rantanen, O. & R. Solanta (1987). Climatic risks to the yield and quality of field crops in Finland. II. Cultivation zones and sub-divisions. *Annales agriculturae Fenniae* 26: 83, 19–37.

Ruosteenoja K. (2011). Miten ja miksi ilmasto muuttuu? Teoksessa Virtanen A. & L. Rohweder (toim.): *Ilmastomuutos käytännössä*, 69–108. Gaudeamus, Helsinki.

Ruosteenoja K., J. Räisänen & P. Pirinen (2011). Projected changes in thermal seasons and the growing season in Finland. *International Journal of Climatology* 31: 10, 1473–1487.

- Ruosteenoja K., J. Räisänen, A. Venäläinen & M. Kämäräinen (2015; *painossa*). Projections for the duration and degree days of the thermal growing season in Europe derived from CMIP5 model output. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.4535.
- Räisänen J. & O. Räty (2013). Projections of daily mean temperature variability in the future: cross-validation tests with ENSEMBLES regional climate simulations. *Climate Dynamics* 41: 5–6, 1553–1568.
- SETUKLIM (2013a). Maailmanlaajuisiin ilmastomalleihin perustuvia lämpötila- ja sademääräskenaarioita. Verkkoraportti. 29.10.2015. <ilmatieteenlaitos.fi/setuklim>
- SETUKLIM (2013b). Ilmastomalleihin perustuvia arvioita tuulen keskimääräisen nopeuden muuttumisesta – ei selvää muutossignaalia Suomen lähialueilla. Verkkoraportti. 29.10.2015. <ilmatieteenlaitos.fi/setuklim>
- Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley (2013; toim.). *Climate Change 2013*. 1535 s. Cambridge University Press, Cambridge.
- Uleberg E., I. Hanssen-Bauer, B. van Oort & S. Dalmannsdottir (2014). Impact of climate change on agriculture in Northern Norway and potential strategies for adaptation. *Climatic Change* 122: 1–2, 27–39.
- Vesala T., S. Launiainen, P. Kolari, J. Pumpanen, S. Sevanto, P. Hari, E. Nikinmaa, P. Kaski, H. Mannila, E. Ukkonen, S. L. Piao & P. Ciais (2010). Autumn temperature and carbon balance of a boreal Scots pine forest in Southern Finland. *Biogeosciences* 7: 1, 163–176.
- van Vuuren D. P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J. F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S. J. Smith & S. K. Rose (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109: 1–2, 5–31.