

Vulnerability assessment of ecosystem services for climate change
impacts and adaptation

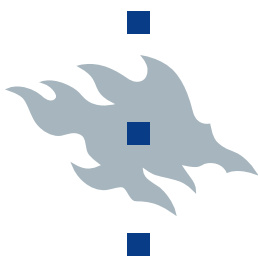
Action 7: Assessment of impacts and adaptation measures
for agricultural production

Deliverable 1: Review of warming impacts in boreal agriculture

Ilmastonmuutoksen vaikutukset Suomen maatalouteen

Torsti M. Schulz

December 27, 2009



HELSINGIN YLIOPISTO



Tiivistelmä

Ilmastonmuutos vaikuttaa koko maailman maataloustuotantoon, mutta sen vaikutukset Suomessa poikkeavat siitä, mitä muilla alueilla tullaan kokemaan. Maataloutta harjoitetaan Suomessa erityisissä oloissa maan pohjoisen sijainnin takia. Ilmastonmuutos tulee nostamaan Suomen keskilämpötilaa useilla asteilla tämän vuosisadan loppuun mennessä. Muutos on suurin talvisin ja talvemme tulevatkin leudommiksi. Myös sateet lisääntyvät syksyisin ja talvisin. Kesien sen sijaan odotetaan olevan kuivempia tulevaisuudessa. Lämpötilojen nousu johtaa kasvukauden pidentymiseen ja kasvukauden aikaisen tehoisan lämpötilan summan kasvamiseen. Tämä mahdollistaa sekä aikaisemmat kylvöt että uusien kasvilajien ja -lajikkeiden viljelyn Suomessa. Talvien leudontuminen tekee uusien syysviljojen viljelyn mahdolliseksi samalla, kun nykyisten kevätviljojen viljelyalue laajenee entistä pohjoisemmaksi. Kevättrypsi korvautuu nykyisellä viljelyalueellaan rapsilla tämän vuosisadan alkupuolella ja myöhemmin sekä rypsin että rapsin syyskylvöisiä lajikkeita voidaan ottaa viljelyyn. Myös eksoottisempien kasvien, kuten rehumaissin viljely tulee todennäköisesti mahdolliseksi eteläisessä Suomessa vuosisadan loppua kohti.

Suurempi kasvukauden aikana kertyvä tehoisan lämpötilan summa tekee huomattavasti nykyistä suuremmat sadot mahdollisiksi. Nykyään viljelyssä olevilla viljoilla ja öljykasveilla korkeammat lämpötilat kasvukauden aikana johtavat kuitenkin sadon alenemiseen. Lisäksi kasvitautien ja tuholaisongelmien odotetaan lisääntyvän. Ilmastonmuutos pahentaa maatalouden ympäristöongelmia Suomessa. Suurempi sadanta talvella lisää eroosiota ja ravinteiden huuhtoutumista. Lisäksi maatalous on itse kasvihuonekaasupäästöjen lähde.

Näihin haasteihin ja mahdollisuuksiin pitää sopeutua. Jotta korkeammat sadot saadaan toteutettua pitää kasvilajikkeita jalostaa tuleviin oloihin sopiviksi, viljelyn pitää olla intensiivisempää ja kastelua tarvitaan enemmän. Eroosion ehkäisemiseksi maan muokkaustoimenpiteitä pitää keventää ja siirtää kevääseen, lisäksi syyskylvöisten kasvien ja nurmien osuutta pitää lisätä eroosioaltille mailla. Toimintatapojen muutoksella voidaan myös vähentää maatalouden aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä. Maatalouden muutos tulee olemaan uhka maatalousympäristön monimuotoisuudelle myös tulevaisuudessa ja tulevassa ilmastotietoisessa maatalouspolitiikassa tulee ottaa huomioon tuotannon sopeuttamisen ja luonnon monimuotoisuuden maataloudelle asettamat ristiriitaiset vaatimukset. Vaikka tuotannon sopeutuminen tapahtuu viljelijöiden parissa, ohjaa ympäröivä yhteiskunta niitä olosuhteita, joissa viljelijät sopeutuvat muutokseen. Etenkin Euroopan unionin tulevalla maatalouspolitiikalla ja maailman poliittisen ja taloudellisen tilanteen kehittymisellä on suuri vaikutus siihen, mitä ilmastonmuutoksen vaikutukset Suomen maataloudelle merkitsevät.

Summary

Climate change will affect global agricultural production, but its effects in Finland will be different from most other regions. Finnish agricultural production faces special circumstances due to the northern location. The average temperatures in Finland will rise by several degrees by the end of this century. The change will be highest in winter and this will lead to milder winters in the future. Precipitation during fall and winter will increase, while summers are expected to dry. The increase in temperatures will lead to a lengthening of the growing season and an increase in the accumulated temperature sum during the growing season. This will allow earlier sowing of spring crops and the introduction of new crops and cultivars. Milder winters make it possible to cultivate new winter cereals, while the area suitable for spring cereals expands northward. Spring turnip rape will be replaced by oilseed rape in the current cultivation regions of turnip rape. Later on it will be possible to cultivate winter varieties of both turnip and oilseed rape. More exotic crops such as forage maize could be cultivated in southern Finland towards the end of the century.

The higher accumulated temperature sum during the growing season makes it possible to achieve much higher yields than before, but current spring cereal and oilseed crop cultivars suffer under higher temperatures and their yields will decline. Additionally pest and plant pathogen incidence will increase. Climate change will also aggravate the environmental problems caused by agriculture. Increased precipitation during winter will lead to higher erosion and leaching of nutrients. Agricultural production in itself is also a source of greenhouse gas emissions.

Agriculture in Finland must face these challenges and opportunities and adapt to them. To achieve the potentially much higher yields, new better adapted cultivars must be bred, agriculture must become more intensive and the use of irrigation must expand. To prevent erosion the soil should mainly be prepared in spring. Only autumn sown crops and grass should be grown on the most erosion prone fields. Changes in agricultural management practices can also help reduce greenhouse gas emissions. Agricultural change will continue to be a threat to biodiversity in agricultural landscapes and future agricultural climate policy should take into account the conflict between the drive to intensify production and the need to preserve viable and diverse agricultural landscapes. Even though adaptation in agricultural production is realised through the farmers, it is the societal context that determines the environment in which the farmers adapt or fail to adapt. Especially the future agricultural policies of the European Union and changes in the global political and economical situation will determine what consequences climate change in itself carries to Finnish agriculture.

Esipuhe

Tämä tutkielma on tehty osana Suomen ympäristökeskuksen koordinoiman *Luonnon tarjoamien palveluiden haavoittuvuusarviointi ja sopeutuminen muuttuvaan ilmastoon* -hankkeen (VACCIA) työpakettia 7, joka käsittelee ilmastonmuutoksen vaikutuksia ja siihen sopeutumista Suomen maataloustuotannossa. Projektia rahoittaa Euroopan unionin LIFE+ ohjelma, jolla myös tämän tutkielman teko on rahoitettu.

Professori Juha Helenius ja projektisuunnittelija Kati Komulainen Helsingin yliopiston maataloustieteiden laitokselta ovat ohjanneet tämän tutkielman toteutusta. Professori Pirjo Peltonen-Sainio ja vanhempi tutkija Kaija Hakala Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksesta ovat antaneet ILMASOPU-hankkeen osin julkaisemattomia aineistoja projektin käyttöön ja ovat olleet tukena tutkielman teossa.

Sisältö

1 Johdanto	1
1.1 Maatalous Pohjolassa	1
1.2 Ilmastonmuutos	2
2 Suomen muuttuva ilmasto	4
2.1 Suomen ilmasto	4
2.2 Tuleva ilmastonmuutos	6
3 Maataloustuotanto ilmaston muuttuessa	8
3.1 Kylvö aikaistuu	8
3.2 Viljelykasvien talvehtimisolot muuttuvat	9
3.3 Sadonmuodostus	9
3.4 Kasvien viljelyalueet laajenevat	11
3.5 Satopotentiali ja odotettavissa olevat sadot	12
3.6 Kasvitaudit, tuholaiset ja rikkakasvit	14
3.7 Eläintuotanto	15
4 Maatalouden ympäristövaikutukset ilmaston muuttuessa	16
4.1 Eroosio ja fosforikuormitus	16
4.2 Typen huuhtoutuminen ja torjunta-aineiden kulkeutuminen	16
4.3 Maatalouden kasvihuonekaasupäästöt	17
4.4 Maatalousympäristön lajiston monimuotoisuus	17
5 Sopeutumisen välttämättömyys	18
5.1 Tuotannon sopeuttaminen	19
5.2 Sopeutuminen ympäristömuutoksiin ja ilmastonmuutoksen lieventäminen	20
6 Ilmastonmuutos ja yhteiskunnalliset haasteet	22
Viitteet	33

1 Johdanto

Tässä tutkielmassa tarkastellaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia Suomen maatalouteen sekä niitä sopeutumistoimenpiteitä, joihin viljelijöiden ja yhteiskunnan pitäisi ryhtyä näiden muutosten johdosta.

Aihepiiri on hyvin laaja, joten kaikkia Suomen maatalouteen vaikuttavia tulevia yhteiskunnallisia ja maailmanlaajuisia muutoksia ei voida huomioida. Tämä on syytä pitää mielessä, sillä ilmastonmuutoksen suorat vaikutukset eivät aluksi merkitse läheskään yhtä suurta haastetta kuin maailmanlaajuinen ja alueellinen sosioekonominen kehitys tai ilmastonmuutoksen vaikutukset Suomen ulkopuolella (Kaivo-oja ym. 2004, Hildén ym. 2005b).

Tutkielman pohjana on kirjallisuuskatsaus, jossa kerrataan keskeinen aiheeseen liittyvä kirjallisuus. Suomessa on tehty laajempaa ilmastonmuutostutkimusta vasta 1990-luvulta, joten tutkielmassa hyödynnetään myös muita alueita koskevaa tutkimusta. Etenkin pohjoismainen ilmastonmuutos- ja maataloustutkimus ovat tässä suhteessa tärkeitä. Myös Kanadassa on jo pitkää tutkittu ilmastonmuutoksen vaikutuksia boreaalisen vyöhykkeen maatalouteen. Tätä kirjallisuutta hyödynnetään soveltavin osin tutkielmassa. On kuitenkin pidettävä mielessä Suomen ilmaston ja maatalouden erityispiirteet, kun käytetään muualle suunnattua tutkimusta vertailuaineistona. Tutkielman painopisteisiin vaikuttaa se, kuinka paljon tiettyä aihetta koskevaa tutkimusta on jo tehty.

Kun arvioidaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia kansallisesti ja maailmanlaajuisesti, käytetään tukena tiettyjä sosioekonomisia tulevaisuusskenaarioita, joiden pohjalta ilmastonmuutoksen laajuutta ja merkitystä tarkastellaan (Kaivo-oja ym. 2004, Hildén ym. 2005b). Suomessa käytetään yleensä FINSKEN-projektissa kehitettyjä skenaarioita, jotka pohjautuvat hallitustenvälisen ilmastopaneelin (IPCC) kehittämiin skenaarioihin (Jylhä ym. 2004, Kaivo-oja ym. 2004). Niitä hyödynnetään sellaisten alueellisten ja maailmanlaajuisten ilmastomallien kanssa, joilla tuotetaan ennusteita tulevasta ilmastosta Suomessa ja lähialueilla eri menetelmiä käyttäen (Carter 1996, Jylhä ym. 2004, Ruosteenoja ym. 2007).

Tutkielmassa esitettyihin arvioihin maatalouden tulevaisuudesta on syytä suhtautua tietyllä varauksella, sillä kirjallisuudessa käytettyjen skenaarioiden ja ilmastomallien väliset erot ovat huomattavia. Lisäksi samoillakin oletuksilla tehdyissä tutkimuksissa päästään hyvin erilaisiin tuloksiin Euroopan tulevasta maankäytöstä ja ilmastonmuutoksen taloudellisista vaikutuksista maataloudelle. (Audsley ym. 2006, Fronzek & Carter 2007, Olesen ym. 2007.)

1.1 Maatalous Pohjolassa

Suomen maataloutta kuvastaa sen pohjoinen ulottuvuus: suurin osa maatalousmaasta sijaitsee 60. ja 65. leveyspiiriin välillä. Suomella on siten erityinen asema maatalouden sallivan ilmaston pohjoisrajalla (Tike 2008). Ruotsissa vain pieni osa maataloustuotannosta on samoilla leveyksillä kuin Suomessa. Pohjois-Amerikassa tilanne on vastaavanlainen: maanviljely Alaskassa on vähäistä ja Kanadassa 60. leveyspiirin pohjoispuolella maataloustuotanto on lähes olematonta. Venäjän pohjoisalueilla ei myöskään ole kovin suurta maataloudellista merkitystä, tiettyjä Siperian osia lukuun ottamatta. Norjassa suuri osa maatalousmaasta sijaitsee samoilla leveyksillä kuin Suomessa, mutta siitäkin suuri osa on laidunmaata. (Statistics Norway 2001, USDA 2004, 2009, Statistics Canada 2007, Jordbruksverket 2008.)

Maatalouteen näin pohjoisessa liittyy monia haasteita. Lyhyt kasvukausi rajoittaa maataloustuotantoa. Maaperän viileys ja peltojen vettyminen lumen sulaessa viivästyttävät kylvöä ja kasvuun lähtöä (Peltonen-Sainio ym. 2009c). Viivästyvät kylvöt alentavat satoa muutenkin, koska kasvit altistuvat alkukesän kuivuudelle. Kevään vaikeiden olojen takia vain syysviljat ja nurmet pystyvät kunnolla kasvamaan kasvukauden alusta. (Mukula & Rantanen 1987, Peltonen-Sainio ym. 2009e.) Maan sisäosissa tuotantoa rajoittavat eniten hallat. Halla voi tappaa taimia ja myöhemmin kasvukaudella hallat alentavat satoja esimerkiksi kukintoja vahingoittamalla. Hallat sekä sadannan ja kasvukauden pituuden suuri vaihtelu rajoittavat useiden kasvien viljelyä, koska satovarmuus jää heikoksi. (Mukula & Rantanen 1987, Peltonen-Sainio ym. 2009e, 2010a.)

Syksyllä vähenevä valo, viileneminen, yöpakkaset ja kasvien nopea kehitys lyhentävät kasvukautta. Loppukesän ja syksyn runsaat sateet haittaavat viljan puintia ja aiheuttavat laadullisia tappioita. Lisäksi vilja pitää kuivata ja pellot voivat vettyä niin, että ne eivät kannu koneita. (Peltonen-Sainio ym. 2009e.). Vaikeat ja vaihtelevat talviolot taas haittaavat etenkin syysviljojen viljelyä (Mukula & Rantanen 1987, Rantanen & Solantie 1987, Peltonen-Sainio ym. 2009e) Sademäärien vaihtelu, lumen sulaminen keväisin ja runsaat syyssateet tekevät peltojen ojituksen tarpeelliseksi, mikä lisää tuotannon kustannuksia (Vainio-Mattila ym. 2005).

Suomessa viljeltävien lajikkeiden pitää olla ilmasto-oloihin sopivia. Lyhyen kasvukauden ja pitkien päivien takia viljakasvit kehittyvät nopeasti, mikä rajoittaa satopotentiaalia, mutta on välttämätöntä tuleentuneiden satojen saavuttamiseksi (Peltonen-Sainio ym. 2009e). Suomen kasvintuotannossa hehtaarisadot ovatkin pienempiä kuin esimerkiksi Ruotsissa tai Tanskassa (FAO 2009).

Suomessa viljellään etenkin nurmia, ohraa, rypsiä, rapsia, vehnää, kauraa, ruista, perunaa ja sokerijuurikasta. Lisäksi on huomattavasti puutarhakasvituotantoa. Ilmasto-oloista johtuen myöhään tuleentuvia viljoja, rapsia ja sokerijuurikasta viljellään vain etelässä, mutta nopeammin tuleentuvia viljoja ja perunaa pohjoisempanakin. (Tike 2009.)

Suomessa on käytössä noin 2,3 miljoonaa hehtaaria peltoa. Alasta noin puolella viljellään viljaa. Suuria muutoksia peltopinta-alassa ei viimeisten vuosikymmenien aikana ole tapahtunut. Eniten tiloja on Lounais- ja Länsi-Suomessa. Nämä alueet ovat tärkeimpiä viljantuotantoalueita. Maidontuotanto on keskittynyt etenkin Pohjois-Savoon ja Pohjanmaalle. (Tike 2008.)

Suomen maatalous on ylipäättänsä muuttunut huomattavasti 1900-luvun aikana suurten poliittisten ja taloudellisten muutosten takia. Sodat, jälleenasutus, yhteiskunnan rakenteellinen muutos ja liittyminen Euroopan unioniin ovat muuttaneet Suomen maataloutta huomattavasti nopeammin ja rajummin kuin mitä on nähty edellisten vuosisatojen aikana (Soininen 1974, Vainio-Mattila ym. 2005, Niemi & Ahlstedt 2009). Näkyviä esimerkkejä tästä ovat tilojen lukumäärän nopea lasku 1900-luvun loppupuolella, peltomaiseman yksinkertaistuminen, kotieläintuotannon keskittyminen sekä toisen maailmansodan jälkeen nopeasti edennyt maatalouden koneellistuminen (Mukula & Rantanen 1987, Niemi & Ahlstedt 2009). Suomen maataloutta kuvaavat kuitenkin yhä peltolohkojen pieni koko ja hajanainen tuotantorakenne (Hildén ym. 2005b). Ilmastotekijöiden lisäksi nämä rajoittavat maataloustuotannon kannattavuutta.

1.2 Ilmastonmuutos

Maapallon ilmasto on aina vaihdellut. Viimeisen 250 vuoden aikana on ihminen kuitenkin toimillaan vaikuttanut maapallon ilmastoon entistä voimakkaammin ja on myötävaikut-

tanut ilmaston ennen kokemattoman nopeaan muutokseen. Sen selkeimpänä seurauksena maapallon keskilämpötila on noussut 0,76 °C viime vuosisadan aikana. Ilmasto jatkaa lämpenemistään kiihtyvällä tahdilla. (IPCC 2007a.)

Ilmaston lämpenemisen takana on etenkin ilmakehän alempien kerrosten hiilidioksidi-, metaani- ja typpioksiduulipitoisuuksien kohoaminen. Nämä kaasut muuttavat maapallon säteilytasetta, ja niiden pitoisuuksien viimeaikaisen kohoamisen tärkein aiheuttaja on ollut ihminen. Ihmiset ovat aiheuttaneet hiilidioksidipitoisuuden kasvun maankäytöllä ja etenkin käyttämällä fossiilisia polttoaineita energianlähteinä. Metaani- ja typpioksiduulipäästöt ovat pääosin maatalouden aiheuttamia. (IPCC 2007a.)

Havaitut muutokset ovat olleet laajimpia arktisilla alueilla. Keskilämpötilojen suuren nousun lisäksi tämä on näkynyt vähentyneenä lumipeitteenä, Pohjoisen jäämeren jääpeitteen pientymisenä ja ikijään lämpenemisenä. Lämpötilan muutosten lisäksi sadannan jakautuminen maapallolla on muuttunut. Tietyillä alueilla sademäärät ovat lisääntyneet kun toisaalla on koettu enemmän kuivuutta. Samalla sään ääri-ilmiöitä on esiintynyt enemmän – poikkeuksellisen kylmien lämpötilojen tosin harvinaistuuksena. (Trenberth ym. 2007: 317-318.)

Tulevaa ilmastoa tutkitaan pääasiassa ilmastomallien avulla. Niiden antamiin tuloksiin liittyy useita epävarmuutta aiheuttavia tekijöitä: Tulevien kasvihuonekaasupäästöjen määrää on vaikea ennustaa luotettavasti. Lisäksi itse ilmastomallien pohjalla oleviin fysikaalisiin oletuksiin ja ilmastollisiin tausta-aineistoihin liittyy epävarmuuksia. Esimerkiksi aerosolien määrän muutokset sekä vaikutukset ovat vielä osin epäselviä. Tämä vaikeuttaa niiden luotettavaa mallinnusta. (Jylhä ym. 2004, IPCC 2007a.)

Vaikka kasvihuonekaasupäästöjen tulevaa kehitystä on vaikea ennustaa, erilaisiin tulevaisuuskenaarioihin tukeutuen on arvioitu, että ilmasto tulee lämpenemään kuluvan vuosisadan loppuun mennessä 1,1–6,4 °C. Suuri vaihtelu liittyy niin eri mallien välisiin eroihin ja epävarmuuksiin kuin suureen vaihteluun arvioissa tulevista päästöistä. On kuitenkin selvää, että lämpeneminen tulee olemaan suurempaa arktisilla alueilla. (IPCC 2007a.)

Ilmaston lämpenemisellä on laajoja vaikutuksia maapallon hydrologiseen järjestelmään. Merenpinta nousee ja hiilidioksidipitoisuuden nousun takia merivesi happamoituu (IPCC 2007a). Samalla veden haihtuminen valtameristä ja sitä kautta sadanta kasvavat (Wang 2005, IPCC 2007a). Lämpötilan ja sadannan muutokset johtavat siihen, että ainakin keskisillä ja pohjoisilla leveysasteilla kesät ovat kuivempia ja talvet hieman kosteampia (Wang 2005). Epävarmuuksista huolimatta oletetaan, että kuivuus lisääntyy huomattavasti vuosisadan loppua kohden monilla alueilla, kuten Kaakkois-Aasiassa, Etelä-Euroopassa, Pohjois-Amerikassa ja Amatsoniassa (Wang 2005, Easterling ym. 2007, IPCC 2007b). Euroopan etelä- ja keskiosissa kesälämpötilojen arvioidaan kohoavan huomattavasti vuosisadan loppua kohden kesäsadannan vähentyessä merkittävästi (Ruosteenoja ym. 2007). Tämä tarkoittaisi, että suuret osat Eurooppaa kuivuisivat uhkaavasti, mikä rajoittaisi maataloustuotantoa (Olesen ym. 2007, 2010).

Ilmastonmuutos on jo vaikuttanut moniin ekosysteemeihin, etenkin arktisella ja boreaalisella vyöhykkeellä (IPCC 2007b, Lange 2008). Tuleva muutos vaikuttaa lähes kaikkiin ekosysteemeihin ja ihmisyhteisöihin jollain tavalla. Maataloustuotannon oletetaan ensin kasvavan, jos lämpeneminen jää pieneksi, mutta monilla alueilla tulvat ja kuivuus tulevat joka tapauksessa rajoittamaan tuotantoa huomattavasti (Easterling ym. 2007, IPCC 2007b). Epätavallisella sään vaihtelulla ja ääri-ilmiöillä voi olla huomattavia haittavaikutuksia maataloudelle. Maatalous on haavoittuvainen tämänkaltaisten ilmiöiden lisääntymiselle ilmastonmuutoksen seurauksena. (Easterling ym. 2007:277, 284.) Toisaalta juuri

Euroopan pohjois- ja keskiosien osalta ilmastonmuutoksen oletetaan vaikuttavan positiivisesti maataloustuotantoon ainakin seuraavien 50 vuoden aikana (Olesen & Bindi 2002, Olesen ym. 2007).

Ihmisen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt vaikuttavat ilmastoon vielä vuosikymmenien ja -satojen ajan. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, etteivätkö päästöjä ehkäisevät toimenpiteet lieventäisi tulevaa ilmastonmuutosta ja sen vaikutuksia. (IPCC 2007a.) Uusin yhteenveto tulevasta ilmastonmuutoksesta osoittaa, että kasvihuonekaasupäästöt ovat tällä hetkellä IPCC:n arvioiden yläpäässä ja että merenpinta nousee oletettua enemmän. Samalla todetaan, että rajuja päästövähennyksiä tarvitaan seuraavien vuosikymmenien aikana, jos halutaan ilmaston lämpenevän korkeintaan 2–3 °C vuosisadan loppuun mennessä. (The Copenhagen Diagnosis 2009.)

Jotta voi ymmärtää tulevan ilmastonmuutoksen vaikutukset maatalouteen, on tärkeää tuntea jo tapahtuneet ilmastolliset muutokset ja niiden seuraukset paikallisella tasolla (Perarnaud ym. 2005). Tältä osalta Suomea koskeva tutkimus on edennyt hyvin (Carter 1998, Jylhä ym. 2004, Karlson ym. 2007, Kaukoranta & Hakala 2008, Peltonen-Sainio ym. 2009b). Tulevaisuutta tutkittaessa ilmastomallit antavat tarkkojakin alueellisia ennusteita ilmastotekijöiden keskiarvoista, mutta myös ilmastollisten ääri-ilmiöiden ja ilmaston vaihtelevuuden ymmärtäminen ovat tärkeitä maataloudelle (Perarnaud ym. 2005). Tämä on kuitenkin vaikeaa, ja tarkka käsitys näistä muutoksista puuttuu (Tuomenvirta ym. 2000, Jylhä ym. 2004, Makkonen ym. 2007).

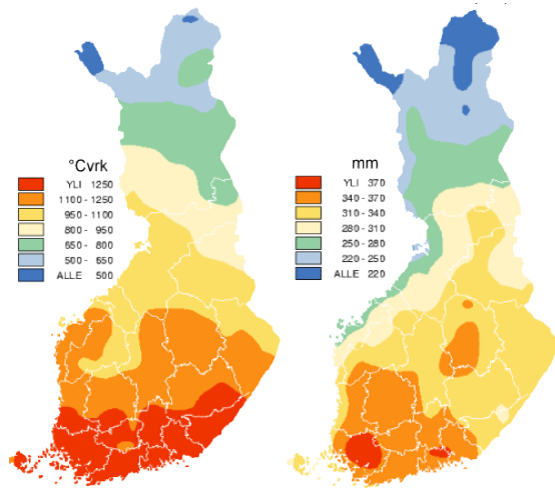
Maatalouden tuottamien päästöjen arvioidaan kasvavan lähitulevaisuudessa maailmanlaajuisesti. Syynä ovat etenkin lisääntyvä ruoan kysyntä ja ruokavalion muutos. Etenkin lihan kulutuksen kasvu lisää niin hiilidioksidi- kuin metaani- ja typpioksidulipäästöjä. Myös ilmasto-olojen muutos lisää päästöjä. (Smith ym. 2007: 503-504.) Maatalous voi kuitenkin myös tarjota keinoja ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi (Olesen & Bindi 2002, Lehtonen ym. 2006, Smith ym. 2007: 505-522). Esimerkkejä tästä ovat bioenergian tuotanto ja viljelymenetelmät, jotka sitovat hiiltä viljelysmaahan (Smith ym. 2007: 507).

2 Suomen muuttuva ilmasto

2.1 Suomen ilmasto

Suomen ilmastoon liittyy monia piirteitä, jotka tekevät siitä maatalouden näkökulmasta poikkeavan. Sijainti Atlantin valtameren ja Euraasian mannerlaatan rajavyöhykkeellä tuo Suomen ilmastoon sekä merellisiä että mantereisia piirteitä. Ilmasto on pohjoiseen sijaintiin nähden hyvin leuto, mutta mantereisen vaikutuksen takia talvisin ajoittain hyvinkin kylmä. Lisäksi Skandinavia vuoristoineen lieventää merellistä vaikutusta Suomessa, mistä johtuen kesät ovat kohtalaisen kuivia ja lämpimiä. (Karttunen ym. 2008, Ilmatieteen laitos 2009a.)

Luonnonmaantieteellisesti Suomi kuuluu pohjoiseen havumetsä- eli boreaaliseen vyöhykkeeseen (Ilmatieteen laitos 2009a). Köppen-Geigerin ilmastoluokittelussa Suomi kuuluu lumi- ja metsäilmaston kostea- ja kylmätalviseen tyyppiin, jossa kesät ovat pääosin viileitä. Ilmastovyöhyke on kuitenkin leudompi kuin muualla vastaavilla leveysasteilla. (Kottek ym. 2006.) Suomen ilmastollinen ja kasvimaantieteellinen jako on samankaltainen kuin Ruotsissa. Fennoskandiassa ainoat merkittävästi poikkeavat alueet ovatkin Atlantin rannikko ja eteläisin Ruotsi (Tveito ym. 2001, Juday ym. 2005: 794).



Kuva 1: Termisen kasvukauden keskimääräiset olot vertailukaudella 1971–2000. Vasemmassa tehoisan lämpötilan summa ($^{\circ}\text{Cvrk}$) ja oikealla sadesumma (mm) (Ilmatieteen laitos 2009b). © 2000 Ilmatieteen laitos.

Suomen vuoden keskilämpötila vaihtelee Lounais-Suomen noin $5,5^{\circ}\text{C}$:sta Luoteis-Lapin alle -2°C :een. Vuodenajoittain alueelliset erot ovat pienimmät kesällä ja suurimmat talvella. Talvi kestää noin 200 päivää Lapissa ja noin 100 lounaisimmassa Suomessa. (Ilmatieteen laitos 2009a.) Lämpötila määrittää kasvukauden, jonka katsotaan alkavan, kun lumipeite on hävinnyt ja päivien keskilämpötilat ovat yhtämittaisesti yli 5°C (Ilmatieteen laitos 2009b). Kasvukausi alkaa Suomen lounais- ja eteläosissa keskimäärin huhtikuun loppulla ja päättyy lokakuun loppupuolella. Pohjoisempina kasvukausi alkaa myöhemmin ja loppuu aikaisemmin. Kasvukauden pituus ja alkamisajankohta vaihtelevat huomattavasti (Tveito ym. 2001, Karlson ym. 2007.) Tehoisan lämpötilan summa, joka kuvaa kasvukauden aikaisten päivittäisten keskilämpötilojen summaa, on eteläisessä Suomessa yli 1200 vuorokausiastetta ($^{\circ}\text{Cvrk}$) ja pienenee pohjoista kohti. Kasvukauden aikaisen tehoisan lämpötilan summan vaihtelu on kohtalaisen suuri. (Mukula & Rantanen 1987, Tveito ym. 2001, Ilmatieteen laitos 2009b, Kuva 1.)

Sadanta Suomessa jakautuu koko vuodelle, ja vuosittainen vaihtelu niin sademäärissä kuin sateiden ajoittumisessa on suurta. Kasvukauden aikana sataa keskimäärin noin 250–350 millimetriä (Kuva 1). Kevättalvi ja alkukesä ovat yleensä kuivimpia ja sadanta lisääntyy kasvukauden loppua kohti (Ilmatieteen laitos 2009a, Peltonen-Sainio ym. 2010b).

Myös päivän pituus on tärkeä ilmastollinen piirre. Päivät ovat kesäisin hyvin pitkiä ja muuttuvat talvea kohti hyvin nopeasti lyhyemmiksi. Pohjoisempina päivät ovat kesäisin pidempiä ja talvisin lyhyempiä. Auringon säteilyintensiteetti on etelässä korkeampi, mutta pidempi päivä kompensoi eroa osittain pohjoisempina. (Mukula & Rantanen 1987, Tukiainen 2009.)

Suomen ilmasto on muuttunut 1900-luvun aikana havaittavasti. Vuoden keskilämpötila on nykyään $0,7^{\circ}\text{C}$ korkeampi kuin vuosisadan alussa (Jylhä ym. 2004). Eniten ovat nousseet kevään ja kesän keskilämpötilat: kesän osalta nousu on ollut noin $1,4^{\circ}\text{C}$ ja kevään osalta noin $0,7^{\circ}\text{C}$ (Tuomenvirta ym. 2000, Jylhä ym. 2004). Syksyt eivät sen sijaan ole lämmenneet merkittävästi ja talvilämpötiloja on kuvannut hyvin suuri vaihtelu. Tosin 1990-luvulta alkaen ovat talvilämpötilat olleet keskimääräistä korkeampia. (Jylhä ym. 2004.) Kasvukausi on pidentynyt 1900-luvulla koko Fennoskandian alueella (Carter

Taulukko 1: Ennusteet Suomen tulevasta vuosittaisesta keskilämpötilasta ja kokonais-sadannasta kolmella 30-vuotiskaudella. Vaihteluväli vastaa eri tulevaisuus-skenaarioiden ja mallien välistä vaihteluväliä. Mukautettu Jylhä ym. (2004) pohjalta.

Vuosi	Lämpötilan muutos (°C)	Sadannan muutos (%)
2010–39	1,3–3,1	2–16
2040–69	1,8–5,2	1–28
2070–99	2,4–7,4	6–37

1998, Linderholm ym. 2008, Heino ym. 2008). Myös pakkaspäivien määrä on vähentynyt 1900-luvulla (Heino ym. 2008).

Muutoksia selittää parhaiten ilmakehän kohonnut kasvihuonekaasupitoisuus, mutta myös ilmastoon liittyvä luontainen vaihtelu (Jylhä ym. 2004). 2000-luvun alussa kasvukauden lämpötilat ovat olleet jopa 2 °C korkeammalla kuin pitkän aikavälin keskiarvo Etelä- ja Keski-Suomessa, mutta vaihteluväli ei ole ollut poikkeava (Peltonen-Sainio ym. 2009b). Päivittäisten yö- ja päivälämpötilojen vaihteluväli on sen sijaan pienentynyt 1900-luvun loppua kohden (Tuomenvirta ym. 2000).

Sateisuus ei ole muuttunut selkeästi 1900-luvulla. Vain maan pohjoisosissa on sadanta lisääntynyt merkittävästi. Muualla Skandinaviassa on sadannan lisääntymisestä ollut selkeitä merkkejä. (Räisänen & Alexandersson 2003, Jylhä ym. 2004.) Rankat sateet ovat lisääntyneet Suomessa 1900-luvun loppupuolella (Heino ym. 2008).

2.2 Tuleva ilmastonmuutos

Suomen ilmaston odotetaan lämpenevän enemmän kuin maapallon keskimäärin (Jylhä ym. 2004, IPCC 2007a). Tämä ero tulee kuitenkin selkeästi esiin vasta vuosisadan loppua kohden (Räisänen & Ruokolainen 2006). Jylhä ym. (2004) arvioivat Suomen keskilämpötilojen nousevan 1,4–7,4 °C vuosisadan loppuun mennessä (Taulukko 1). Lämpötilat Fennoskandiassa nousevat eniten talvella ja vähiten kesällä. Kevään lämpötilat saattavat nousta hieman syksyä enemmän. (Hanssen-Bauer ym. 2003, Jylhä ym. 2004, Ruosteenoja ym. 2007, Lange 2008, Graham ym. 2008.)

Räisänen ja Ruokolaisen (2006) tekemissä mallinuksissa arvioidaan lämpötilojen nousun ja sateisuuden muutoksen Etelä-Suomessa olevan havaittavissa jo seuraavan vuosikymmenen aikana. Lyhyen aikavälin ilmastoennusteissa on kuitenkin suurta epävarmuutta suuren luontaisen vaihtelun takia, eivätkä erot eri vuodenaikojen muutoksissa tule malleissa näin lyhyellä aikavälillä esiin. Toisaalta mallien pohjana olevien ilmastoskenaarioiden väliset erot ovat pienet lähitulevaisuudessa ja kasvavat vasta vuosisadan loppua kohden. Tutkimus tukee muita tuloksia Suomen ja lähialueiden alueen ilmastonmuutoksesta tällä vuosisadalla. (Räisänen & Ruokolainen 2006.) Kuukausittaisten keskilämpötilojen kasvun lisäksi myös erot etenkin kesän päivä- ja yölämpötilojen välillä pienenevät entisestään öiden lämmitessä (Tuomenvirta ym. 2000, Trenberth ym. 2007: 309). Sillä saattaa olla vaikutusta kasvien fysiologisiin prosesseihin.

Kevään ja kesän korkeammat lämpötilat tulevat kasvattamaan tehoisan lämpötilan summaa ja pidentämään kasvukautta. Ennusteisiin tehoisan lämpötilan summan kasvus-

ta liittyy vaihtelua, joka riippuu mallista, kasvukauden oletetusta alkamisajankohdasta ja tulevaisuusskenaariosta. (Fronzek & Carter 2007, Peltonen-Sainio ym. 2009a,c.) Tehoisan lämpötilan summa nousee 2025 mennessä 140–160 vuorokausiastetta, 2055 mennessä noin 230–335 vuorokausiastetta ja 2085 mennessä noin 300–560 vuorokausiastetta (Peltonen-Sainio ym. 2009a,c). Vuosisadan keskivaiheilla on etelässä odotettavissa oleva keskimääräinen kasvukauden tehoisan lämpötilan summa 1400–1500 vuorokausiastetta. Lähivuosisikymmeninä Keski-Suomessa lämpösumma vastaisi nykyistä etelän keskiarvoa. Myöhemmin tällä vuosisadalla sama saavutettaisiin Oulun korkeudella asti. (Peltonen-Sainio ym. 2009c.)

Ottaen huomioon kevään ja kesän keskilämpötilojen nousu sekä kylvö- ja sadonkorjuuolosuhteet voidaan arvioida, että maatalouden käytettävissä oleva keskimääräinen kasvukausi pitenee viikolla kaudella 2011–2040, kahdella viikolla kaudella 2041–2070 ja kolmella viikolla kaudella 2071–2100. Vuoteen 2025 mennessä Keski-Suomen kasvukausi olisi keskimäärin yhtä pitkä kuin nykyään etelässä. (Peltonen-Sainio ym. 2009c.) Karlsen ym. (2007) arvioivat, että kevään keskilämpötilojen nouseminen noin yhdellä asteella aikaistaa kasvukauden alkua noin viidellä päivällä, mikä sopii yhteen tämän arvion kanssa. Pohjois-Amerikassa on huomattu kevään aikaistumisen olevan yhteydessä viimeisten hallojen esiintymisen varhaistumiseen (Cutforth ym. 2004). Luotettavia arvioita hallojen esiintymisestä tulevaisuudessa Suomessa ei ole tehty. Voi kuitenkin olettaa että kevään ja kesän keskilämpötilojen nousu sekä yölämpötilojen kohoaminen tekevät myöhäisistä halloista nykyistä harvinaisempia.

Mallien perusteella voidaan arvioida sadannan kasvavan Suomessa vuosisadan loppuun mennessä 6–37 prosenttia (Jylhä ym. 2004, Taulukko 1). Sadanta kasvaa todennäköisesti eniten talvella ja vähiten kesällä, kuten muuallakin Fennoskandiassa (Jylhä ym. 2004, Kjellström & Ruosteenoja 2007, Ruosteenoja ym. 2007, Graham ym. 2008). Vuosien välisen keskisadannan vaihtelu kasvaa ilmastonmuutoksen edetessä (Kjellström Ruosteenoja 2007). On hyvä huomioida, että koko vuosisadan osalta arvioituun sadannan muutokseen liittyy suurempi epävarmuus kuin lämpötilojen muutokseen (Räisänen & Ruokolainen 2006, Kjellström & Ruosteenoja 2007). Yleisesti voi sanoa, että muutokset sadannassa ja lämpötiloissa tulevat lisäämään kesien kuivuutta (Vehviläinen & Huttunen 1997, Silander ym. 2006).

Lämpenemisen seurauksena talvet lyhenevät, leudontuvat ja muuttuvat oloiltaan vaihtelevimmiksi. Fennoskandiassa on vuosisadan lopussa odotettavissa keskimäärin viisikymmentä pakkaspäivää vähemmän kuin nykyään. Lumipeitteisten päivien määrä vähenee vielä enemmän. Syksyjen lämmitessä lumipeite tulee myöhemmin. Korkeampien talvilämpötilojen takia talvella sade tulee lisääntyvästi vetenä eikä lumena. (Jylhä ym. 2008.) Metsämaille kehitetyn mallin perusteella Venäläinen ym. (2001) arvioivat lumipeitteen ja roudan ohenevan huomattavasti koko maassa. Alueelliset ilmastomallit antavat vastaavia tuloksia (Graham ym. 2008). Eteläisimmässä Suomessa ohentunut lumipeite saattaa ajoittain johtaa maan syvempään jäätymiseen, vaikka jäätyneen maan jaksot lyhenevätkin (Venäläinen ym. 2001). Vastaava tutkimus Pohjois-Ruotsissa osoittaa, että maaperän keskilämpötila nousee merkittävästi (Mellander ym. 2007). Odotettavissa on useampia sulajaksoja ja hajanaisempia pakkasjaksoja (Mellander ym. 2007, Jylhä ym. 2008). Keskimäärin alle sadan pakkaspäivän talvia on 2025 mennessä odotettavissa vain lounais-saaristossa, mutta raja etenee 2055 mennessä jo sisämaahan, ja 2085 mennessä mahdollisesti aina Oulun seudulle asti. Kestää kuitenkin lähes koko vuosisadan ennen kuin Suomen talvet vastaavat tyypillisiä talvia Etelä-Ruotsissa tai Tanskassa. On myös

huomioitava, että vaihtelu eri skenaarioiden välillä on vuosisadan loppuun mennessä hyvin suurta. (Tveito ym. 2001, Jylhä ym. 2008, Peltonen-Sainio ym. 2009c.)

Ainakin Pohjois-Suomessa talvien lämpenemisen ja sadannan kasvun oletetaan johtavan pohjaveden nopeampaan kertymiseen talvisin. Samalla pintavalunnan odotetaan kasvavan ja kevättulvien aikaistuvan (Silander ym. 2006, Okkonen ym. 2009). Jokien virtaama kasvaa talvisin huomattavasti ilmastomuutoksen edetessä, samalla kun etenkin etelässä kevättulvat vähenevät (Vehviläinen & Huttunen 1997, Silander ym. 2006, Graham ym. 2008). Kesällä virtaaman oletetaan vähenevän, tosin joet voivat tulvia ajoittaisten epätavallisen voimakkaiden sateiden yhteydessä. Järvien osalta muutokset ovat vaihtelevia, mutta etenkin talvisin voi odottaa vedenpinnan tason olevan nykyistä korkeampi. (Vehviläinen & Huttunen 1997, Silander ym. 2006, Graham ym. 2008.)

Epätavallisen korkeat kesä- ja talvilämpötilat lisääntyvät tulevaisuudessa, samoin rankat ja pitkät sadejaksot (Makkonen ym. 2007, Graham ym. 2008). Vaikka lumimäärien oletetaan laskevan, niin yksittäisten lumisateiden aikana kertyvä lumimäärä voi kasvaa (Makkonen ym. 2007). Keskimääräisen tuulennopeuden odotetaan kasvavan talvella. Näin myös poikkeuksellisen kovien tuulien ja myrskyjen odotetaan lisääntyvän (Graham ym. 2008).

3 Maataloustuotanto ilmaston muuttuessa

Ilmastonmuutos on vaikuttanut maatalouteen jo viime vuosisadan aikana. 1900-luvulla tapahtunut lievä kevään lämpötilojen nousu ja siitä seurannut varhaisempi kasvukauden alku ovat johtaneet kylvöjen aikaistumiseen (Carter 1998, Kaukoranta & Hakala 2008). Kevätviljojen keskimääräinen kylvöpäivämäärä on aikaistunut 1980-luvulta jopa viikolla, perunan ja sokerijuurikkaan osalta vielä enemmän. Kylvöaikojen muuttumiseen vaikuttavat kuitenkin myös muut tekijät kuin kasvukauden alku ja kevään keskilämpötila. (Kaukoranta & Hakala 2008.)

Sadot ovat nousseet 1990-luvulle asti, pääosin tekniikan kehityksen ja jalostuksen ansiosta. Toisaalta myös satojen vaihtelu on lisääntynyt. (Peltonen-Sainio ym. 2009b.) Tuotanto ja sääolosuhteet ovat vaihdelleet huomattavasti 1960–2000-luvuilla, mutta yhteyttä ilmastomuutoksen ja satojen suuremman vaihtelun välillä ei ole voitu osoittaa (Peltonen-Sainio ym. 2009b). 1990- ja 2000-luvulla satojen kasvu on monilla viljelykasveilla laantunut, jopa pysähtynyt, koska viljely on Euroopan unionin maatalouspolitiikkaan liittyvän ympäristötukijärjestelmän ohjaamana ollut vähemmän intensiivistä (Peltonen-Sainio ym. 2007, Stoaate ym. 2009, Niemi & Ahlstedt 2009). Samalla satojen vaihtelu on vähentynyt (Peltonen-Sainio ym. 2007, 2009b).

3.1 Kylvö aikaistuu

Lämpösumman kasvu ja kasvukauden piteneminen tulevat mahdollistamaan vielä aikaisemmat kylvöt. Nykyisten kylvölämpötilojen perusteella arvioiden odotetaan, että kylvö aikaistuu keskimäärin viikolla kaudella 2011–2040, kahdella viikolla kaudella 2041–2070 ja kolmella viikolla kaudella 2071–2100 (Peltonen-Sainio ym. 2009c). Kylvöjen aloittaminen vielä aikaisemmin ei kasvattaisi merkittävästi kasvukauden tehoisan lämpötilan summaa (Peltonen-Sainio ym. 2009c, 2010c). Aikaisempiin kylvöihin voi liittyä myös riskejä, jos ne altistavat kasvit useammin halloille, vaikka hallat muuten vähenisivätkin. Hallojen merkitys tulee joka tapauksessa muuttumaan, sillä muuttuvat kasvuolosuhteet

vaikuttavat siihen, miten kasvit reagoivat mataliin lämpötiloihin. (Inouye 2000, Cutforth ym. 2004, Rochette ym. 2004.)

Sadonkorjuu ei sen sijaan todennäköisesti siirry paljoa nykyistä myöhemmäksi. Syyskuun puoliväli on Peltonen-Sainion ym. (2009c) mukaan keskimäärin viimeinen sopiva aika sadonkorjuulle. Yli viikon myöhäisempi sadonkorjuu kasvattaisi huomattavasti riskejä verrattuna todennäköisesti pieneen sadonlisään (Peltonen-Sainio ym. 2009a,c, 2010c). Etenkin lisääntyvät syyssateet ja niiden vaikutukset sadonkorjuuseen, sadon laatuun ja satotappioihin vähentäisivät myöhemmän sadonkorjuun hyötyjä siemenkasveilla ja viljoilla. Kasvava syyssadanta saattaa myös vaikeuttaa syyskylvöjä. (Peltonen-Sainio ym. 2009e,c.)

3.2 Viljelykasvien talvehtimisolot muuttuvat

Muuttuvat talviolot vaikuttavat viljelykasvien talvehtimisolosuhteisiin. Tämä on otettava huomioon syyskylvöisten ja monivuotisten kasvien viljelyssä. Talvehtimisen riskit syyskylvöisillä kasveilla lisääntyvät, kun kylmät talvet korvautuvat leudommilla (Jylhä ym. 2008, Peltonen-Sainio ym. 2009b, 2010a). Mataliin lämpötiloihin ja pakkaspäiviin liittyvät riskit vähenevät. Mutta samalla syysviljat kärsivät enemmän, kun talvien vaihtelevuus lisääntyy. Vaihtelevasta ja lämpimämmästä säästä johtuva heikompi kylmäkaraistuminen syksyllä sekä lisääntyvä lumipeitteen tulo sulaan maahan voivat johtaa korkeampiin lumihomevaurioihin talvella. (Jylhä ym. 2004, 2008, Serenius ym. 2005, Peltonen-Sainio ym. 2010a.) Lisäksi sula- ja pakkasjaksojen vuorottelu voivat altistaa talvehtivia kasveja jäätymiselle, kuivumiselle ja hapettomille oloille. Syysviljojen sadonvaihtelusta suurin osa selittyykin talvehtimisvaurioilla (Mukula & Rantanen 1987, Rantanen & Solantie 1987, Peltonen-Sainio ym. 2010a). Ohut lumipeitekin on riski, sillä aluksi se lisää vakavien pakkasvahinkojen mahdollisuutta, vaikka leudot talvet sinänsä ovat talvehtimisen edellytys monille syysviljoille. Aikaiset kevätpakkaset taas vaarantavat sadon, etenkin jos talvi on muuten ollut leuto. Talvehtimisvaurioiden määrä ei ole kuitenkaan vielä selkeästi muuttunut 1970-luvulta. (Peltonen-Sainio ym. 2010a.)

Syksyn, talven ja kevään olojen muuttuminen vaikuttaa myös hedelmäpuihin. Kanadassa syksyjen lämpenemisen arvioidaan vähentävän riskiä hedelmäpuiden vahingoittumiselle, sillä ensimmäiset syyspakkaset tulevat olemaan keskimäärin myöhäisempiä kuin nykyään. Talvien lämpeneminen lisää kuitenkin riskiä sille, että kylmäkaraistuminen purkautuu talven aikana. Samalla tämä kyllä vähentää ankarien pakkasien aiheuttamia vahinkoja. Vastaavasti talvipakkaset lumettomassa maassa lisäävät riskiä juuriston vahingoille. Kevään lämpeneminen sekä lisää että vähentää riskejä hedelmäpuille ja muille viljelykasveille: viimeisten hallojen odotetaan aikaistuvan, mutta samalla korkeammat kevätlämpötilat nopeuttavat etenkin silmujen kehitystä tehden ne alttiimmiksi kylmälle. (Rochette ym. 2004.)

3.3 Sadonmuodostus

Ilmastonmuutos muuttaa monia sadonmuodostukselle keskeisiä ympäristötekijöitä. Näistä tekijöistä tärkeimpiä ovat lämpötilojen kasvu ja siihen liittyvä kasvukauden piteneminen sekä tehoisan lämpötilan summan kasvu (Rötter & van De Geijn 1999). Lajikkeilla, jotka pystyvät hyödyntämään pidemmän kasvukauden keskeisten kasvuvaiheiden pitenemisen kautta, on mahdollisuus saavuttaa huomattavasti isompia satoja kuin nykyään (Carter ym. 1996, Peltonen-Sainio ym. 2009c, 2010c). Kasvukauden piteneminen syksyllä ei lisää

satoja paljoo, koska valon määrä laskee nopeasti samalla kun päivät lyhenevät. Tämä rajoittaa kasvua vaikka lämpötilat sen vielä sallisivat (Tukiainen 2009, Peltonen-Sainio ym. 2009c, 2010c).

Korkeammat lämpötilat sadonmuodostusvaiheessa voivat kiihdyttää eri kasvuvaiheita ja sadon kypsymistä, mikä mm. vähentää siemenaiheiden muodostumista alentaen satoa (Peltonen-Sainio ym. 2007, 2010b). Tämä ongelma koskee useita tällä hetkellä viljelyssä olevia viljalajikkeita. Niillä lämpötilan nousu jyvän täyttymisvaiheessa nopeuttaa tuleentumista ennenaikaiseksi (Carter & Saarikko 1996, Peltonen-Sainio ym. 2007). Peltonen-Sainio ym. (2010b) tutkivat Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen pitkäaikaisten lajikekokeiden tuloksia ja havaitsivat huomattavasti alempia satoja kevätiljoilla ja ryp-sillä tavallista lämpimämpinä vuosina. Myös 2000-luvun huomattavan matalia rypsisatoja selittää osin lajikkeiden sopeutumattomuus viimeaikojen tavanomaista lämpimämpiin kesiin (Peltonen-Sainio ym. 2007). Nykyisten lajikkeiden kasvuaajan oletetaan lyhenevän 8–16 päivällä siirryttäessä nykyisistä keskilämpötiloista aikavälin 2011–2040 odotettuun lämpötilaan (Peltonen-Sainio ym. 2010b).

Sateiden ajoittumisen muutokset vaikuttavat huomattavasti siihen miten kasvukauden piteneminen ja keväiden lämpeneminen tulevat kasvien hyödynnettäväksi (Rötter & van De Geijn 1999, Peltonen-Sainio ym. 2009c, 2010b). Kasvukauden alussa sadannan pitäisi kasvaa huomattavasti nykyisestä, jotta korkeamman satopotentiaalin saisi hyödynnettyä. Silloin kuivuus ei rajoittaisi satoja. Sateet lisääntyvät Suomessa pääasiallisesti kuitenkin vain kasvukauden loppupäässä, missä ne enneminkin saattavat alentaa satoja. (Peltonen-Sainio ym. 2010b,c.)

Myös hiilidioksidipitoisuuden nousu vaikuttaa viljelykasvien kasvuun. Sen odotetaan nostavan satoja, vaikka tutkimuksissa asiasta onkin saatu vaihtelevia tuloksia (Hakala 1998, Easterling ym. 2007: 282-283). Rötter & van De Geijn (1999) toteavat kirjallisuuskatsauksen pohjalta, että alueesta ja kasvista riippuen hiilidioksidipitoisuuden suunnilleen kaksinkertaistuksessa voisivat sadot nousta noin 30 prosenttia. Osa uudemmissa arviosta on huomattavasti varovaisempia (Easterling ym. 2007: 282-283, Brouder & Volenec 2008).

Hiilidioksidipitoisuuden kasvu tehostaa kasvien yhteyttämistä. Hiilidioksidipitoisuuden muutokset vaikuttavat kuitenkin eri tavalla C3- ja C4-kasveihin. Jälkimmäiset ovat pääsääntöisesti trooppisia kasvilajeja, mutta esimerkiksi maissi, jota saatetaan tulevaisuudessa viljellä myös Suomessa, on C4-kasvi. C3- ja C4-kasvit eroavat toisistaan siinä, millä tavalla ne sitovat hiilidioksidia ilmasta yhteyttämistä varten. Siksi C4-kasveilla odotetaan hiilidioksidipitoisuuden kasvun vaikutusten yhteyttämiseen jäävän pienemmäksi kuin C3-kasveilla. (Rötter & van De Geijn 1999, Brouder & Volenec 2008.) Korkeammassa hiilidioksidipitoisuudessa kasvit haihduttavat vähemmän suhteessa kasvuun, mikä tehostaa vedenkäyttöä (Hakala ym. 1999, Rötter & van De Geijn 1999, Brouder & Volenec 2008). Hiilidioksidipitoisuus myös osittain kompensoi korkeiden lämpötilojen satoja madaltavaa vaikutusta (Carter ym. 1996, Hakala 1998).

Hiilidioksidin vaikutukset riippuvat yleensä muista tekijöistä, kuten veden sekä ravinteiden saatavuudesta ja lämpötilasta. Tämä selittää osin ristiriitaisia tuloksia. Valon määrän lisääntyminen ja lämpötilan kasvu yleensä nostavat satoja entisestään hiilidioksidipitoisuuden ollessa korkea (Easterling ym. 2007: 282-283).

Kasvit eivät aina pysty hyödyntämään näitä tehostuneita prosesseja siten, että sadot kasvaisivat. Tässä on kasvialostuksella tärkeä tehtävä

Suomalaisissa kenttä- ja kasvihuonekokeissa hiilidioksidipitoisuuden kasvu on vaikuttanut enemmän kokonaisbiomassan määrään kuin satoon (Hakala 1998). Useammassa

tutkimuksissa on havaittu, että etenkin juurten biomassa kasvaa, kun hiilidioksidipitoisuus on korkeampi. Ilmiö on todettu etenkin nurmikasveilla. (Hakala & Mela 1996, Jones & Jongen 1996, Rötter & van De Geijn 1999.) Lisäksi hiilidioksidipitoisuus vaikuttaa hiilihydraattien, kuten tärkkelyksen, pitoisuuksiin eri kasvinosissa (Brouder & Volenec 2008).

Ilmastonmuutos vaikuttaa myös suorasti ja epäsuorasti ravinteiden saatavuuteen, sillä korkeammat lämpötilat, sadannan muutokset ja hiilidioksidipitoisuus vaikuttavat niin maaperän kemiaan kuin mikrobiologiaankin, sekä kasvien juuriston vuorovaikutuksiin sen kanssa. Vaikka muutosten tarkka merkitys on epäselvä, ajatellaan lämpötilan nousun sinällään tehostavan ravinteiden ottoa ja kuivuuden heikentävän sitä. (Brouder & Volenec 2008.)

Alailmakehän otsonipitoisuudet ovat kasvaneet pohjoisella pallonpuoliskolla, mikä saattaa vaikuttaa satoja alentavasti. Samalla stratosfäärin otsonipitoisuuden lasku on lisännyt kasvien altistumista UV-B säteilylle. (Rötter Van de Geijn 1999.) Näiden muutosten tarkkaa merkitystä on kuitenkin vaikea arvioida. Otsonin oletetaan alentavan satoa merkittävästi useilla viljelykasveilla, mikä pienentää hiilidioksidipitoisuuden kasvun edullista vaikutusta. (Easterling ym. 2007: 278, 283, Booker ym. 2009.)

3.4 Kasvien viljelyalueet laajenevat

Kasvukauden pidetessä ja lämpösumman kasvaessa monet viljelykasvit voivat levitä sellaisille alueille, joissa kasvukausi ja lämpötila ennen rajoittivat niiden viljelyä. Ilmastonmuutoksen mukanaan tuoma lämpeneminen mahdollistaa myös uusien tai vähemmän viljeltyjen kasvien yleistymisen Suomessa. (Peltonen-Sainio ym. 2009c.)

Nykyisiä tärkeimpiä viljelykasveja, kuten kevätiljoja, pystytään ilmastonmuutoksen tuoman lämpenemisen ja kasvukauden pitenemisen seurauksena kasvattamaan entistä pohjoisempana (Carter ym. 1996, Peltonen-Sainio ym. 2009c). Syysvehnän viljelyalue voi ilmaston kehityksestä riippuen levitä Oulun seudulle asti ja rukiin viljely tulee vuosisadan puolessa välissä onnistumaan lähes koko maassa. Nykyään vain vähän viljelty ruisvehnä voisi muuttua tärkeäksi syysviljäksi. Kasvukauden piteneminen ja talviolojen muuttuminen tulevat mahdollistamaan uusien syyskylvöisten viljojen kuten, syysohran ja syyskauran, viljelyn. Syyskylvöiset viljat tulevat yleisimmiksi niillä alueilla, joilla talvehtiminen muuttuu riittävän varmaksi. Lajien välillä on kuitenkin eroa tässä suhteessa. (Peltonen-Sainio ym. 2009c.)

Rypsin viljely tulee leviämään pohjoisemmaksi tehoisan lämpötilan summan kasvaessa. Samalla rypsin nykyisillä viljelyalueilla tulee rypsin viljely kannattavammaksi, sillä rapsi hyötyy korkeammista kasvukauden lämpötiloista vielä silloinkin, kun rypsin sato jo kärsii niistä. (Peltonen-Sainio ym. 2007, 2009a.) Ilmaston lämpenemisen ja talviolojen muutosten edetessä tulevat syyskylvöiset rypsin ja rypsin lajikkeet todennäköisesti korvaamaan kevätkylvöisiä. Ruotsissa Etelä-Suomen korkeudella on syyskylvöisiä lajikkeita jo viljelyssä. Kevätrypsin viljely onkin katoamassa Ruotsista verraten huonon satoisuutensa takia. Vuosisadan loppuun mennessä Suomessakin kevätrypsin viljelyllä tulee olemaan merkitystä enää vain maan pohjoisosissa. (Peltonen-Sainio ym. 2009a,c.)

Myös maissista odotetaan uutta viljelykasvia Suomeen (Carter ym. 1996, Peltonen-Sainio ym. 2009c). Maissin kasvua kylmässä ilmastossa rajoittavat pieni tehoisan lämpötilan summa, matalat kevätlämpötilat sekä kevään ja loppukesän hallat (Kwabiah ym. 2003, Peltonen-Sainio ym. 2009c). Peltonen-Sainio ym. (2009c) tekemien mallinnusten perusteella ei vaikuta siltä, että jyvämaissin viljelystä tulee yleisesti kannattavaa Suomessa tämän vuosisadan aikana. Maissin viljely rehuksi sen sijaan on mahdollista silloin, kun

Taulukko 2: Eri viljelykasviemme keskimääräinen satopotentiaali Etelä-Suomessa ilmaston muuttuessa. Laskelmat eivät ota huomioon kohonneen hiilidioksidipitoisuuden vaikutusta, ja olettavat jalostuksen vaikuttavan satoihin samoin kuin kaudella 1971–2000. Mukautettu Peltonen-Sainion ym. (2009c) pohjalta.

Kasvi	Satopotentiaali ($t \cdot ha^{-1}$)		
	1985	2025	2055
Kevätohra	3,5	5,0	6,4–6,7
Kevätkaura	4,4	6,4–6,5	8,2–8,9
Kevätvehnä	2,9	4,9	7,1–7,4
Syysvehnä	5,2	7,1–7,2	9,0–9,2
Ruis	4,3	6,6	9,1–9,2
Herne	4,4	6,3	7,9–8,4
Kevättrypsi	1,6	3,1	4,7–5,3
Kevättrapsi	1,0	2,9–3,0	5,7–6,5

edellä mainitut rajoittavat tekijät eivät enää ole merkittävä uhka tai aikaisempia lajikkeita saadaan viljelyyn. Ilmastoskenaariosta riippuen tämä tapahtuisi vuosisadan puolen välin jälkeen tai myöhemmin. Viljely tulee silloinkin olemaan yleistä vain suotuisimmilla alueilla. (Carter ym. 1996, Peltonen-Sainio ym. 2009c.) Muissa koko Eurooppaa koskevissa tutkimuksissa tosin esitetään, että myös jyvämaissi voisi pärjätä Suomessa vuosisadan loppupuolella. Tuloksiin liittyy tosin suurta vaihtelua. (Fronzek & Carter 2007, Olesen ym. 2007.)

Käsitystä, että rehumaisin viljely tulee kannattamaan Suomessa, tukee vertailu Kanadaan, jossa rehumaisin viljely on itärannikolla edennyt jo huomattavan pohjoiseen, aina Newfoundlandiin asti (Drapeau ym. 2002, Kwabiah ym. 2003) – alueelle jota myös kuvaavat lyhyt kasvukausi ja alhaiset lämpötilat. Ainoat pääasiallisesti merkittävät ilmastolliset erot Etelä-Suomeen ovat päivän pituus, hieman korkeampi tehoisan lämpötilan summa ja suurempi sadanta (Energy, Mines and Resources Canada 1981, Kottek ym. 2006, Tukiainen 2009, Environment Canada 2009).

Harvinaisemmista kasveista esimerkiksi tattaria, pellavaa, hampppua ja auringonkukkaa, joita nykyisin vähän viljellään Etelä-Suomessa, pystyttäisiin jo ennen vuosisadan puoltaväliä viljelemään Oulun korkeudella asti (Peltonen-Sainio ym. 2009c). Muita kasveja, jotka voisivat yleistyä, ovat muun muassa lupiinit ja sinimailanen (Stoddard ym. 2009). Nämä todennäköisesti hyötyisivät ilmaston lämpenemisen tuomista muutoksista (Peltonen-Sainio ym. 2009c). Suomessa tutkitaan myös edellytyksiä monien kasvien, kuten maissin ja hampun käyttöön bioenergian tuotannossa (Stoddard ym. 2007). Näidenkin kasvien käyttömahdollisuudet paranevat ilmaston lämmitessä (Peltonen-Sainio ym. 2009c). Myös hedelmäpuiden viljelyalueet laajenevat, kun talviolosuhteet muuttuvat (Rochette ym. 2004). Tämä mahdollistaisi myös uusien lajien viljelyn Suomessa.

3.5 Satopotentiaali ja odotettavissa olevat sadot

Lämpenevä ilmasto mahdollistaa huomattavasti suuremmat sadot, mutta vain jos viljely sopeutetaan tuleviin olosuhteisiin (Audsley ym. 2006, Peltonen-Sainio ym. 2009c, 2010b).

Kevätviljojen satopotentiaali voisi kasvaa lajista ja alueesta riippuen jopa 4–8 tonnia hehtaarilta. Satopotentiaali kuvaa satoa, jonka viljelyssä voisi saavuttaa, jos ravinteet tai vesi eivät rajoittaisi kasvien kasvua ja tautien, tuholaisten sekä rikkakasvien vaikutukset pidettäisiin pieninä. Etelä-Suomessakin useimmilla lajikkeilla satopotentiaali mahdollisesti jopa yli kaksinkertaistuu vuosisadan puoleen väliin mennessä (Taulukko 2). Esimerkiksi ohran satopotentiaali 64. ja 66. leveyspiirin välillä tulisi ennen vuosisadan puolta väliä olemaan korkeampi kuin nykyinen satopotentiaali Etelä-Suomessa. (Peltonen-Sainio ym. 2009c.) Joillain kevätiljoilla korkeampien lämpötilojen on havaittu myös nostavan jyvän valkuaisainepitoisuutta (Peltonen-Sainio ym. 2010b).

Palkokasvit, pääasiassa herne ja härkäpapu, hyötyvät huomattavasti kasvukauden pitenemisestä ja lämpenemisestä. Tämä ilmenee jo pelkästään vertaamalla nykyisiä satoja eri alueilla Suomessa. Ilmastonmuutoksen edetessä voidaan olettaa, että nykyinen herneen satotaso eteläisimmässä Suomessa saavutettaisiin jo ennen vuosisadan puoltaväliä Oulun korkeudella. Vuosisadan puolenvälin paikkeilla satotasot 66. leveyspiirillä ylittäisivät nykyiset Etelä-Suomen sadot. Etelä-Suomessa herneen potentiaaliset sadot voisivat 2055 mennessä nousta jopa 8 tonniin hehtaarilta. (Peltonen-Sainio ym. 2009c, Taulukko 2.)

Myös eri lajien väliset satosuhteet tulevat muuttumaan, sillä uudet kasvuolosuhteet suosivat eri viljelykasveja. Ilmaston lämpeneminen ja jalostus nostavat kevätropsin keskisadot korkeammiksi kuin kevätropsin sadot jo parin seuraavan vuosikymmenen aikana. Kasvukauden piteneminen hyödyttää rapsia enemmän ja sen sadot ovat vuosisadan loppupuolella todennäköisesti korkeammat lähes koko maassa. (Peltonen-Sainio ym. 2009a,c.) Rapsin viljelyn yleistymistä edesauttaa myös lämpötilan kasvaessa aleneva siementen klorofyllipitoisuus. Tämä tekee rapsista tulevaisuudessa entistä houkuttelevamman rypsiin nähden. Korkea siementen klorofyllipitoisuus on kuitenkin tekijä, joka hidastaa satoisampien lajikkeiden viljelyä, vaikka kasvukausi muuten olisikin tarpeeksi pitkä. (Peltonen-Sainio ym. 2009d.)

Siirtyminen syyskylvöisiin rypsi- ja rapsilajikkeisiin nostaa mahdollisia satoja. Ruotsissa syyskylvöisten lajikkeiden sadot ovat noin 1000 kiloa suuremmat hehtaarilta kuin kevätkylvöisillä lajikkeilla. Ruotsissa satotaso syysrypsillä on noin 2500 ja syysrapsilla noin 3500 kiloa hehtaarilta. Etelä-Ruotsissa ja Tanskassa on tosin saavutettu jopa 4000 kilon hehtaarisatoja. (Jordbruksverket 2009, Peltonen-Sainio ym. 2009c.) Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että Suomessa saavutettaisiin lähitulevaisuudessa vastaavia satoja.

Myös syysvehnän sadot kasvavat nopeasti kevätvehnän satoja korkeammiksi, vaikka talviolosuhteet aluksi muuttuvat haasteellisemmiksi. Syysvehnä, jonka potentiaalinen sato on jo muutenkin korkeampi kuin kevätvehnällä, ei kärsi samalla tavalla alkukesän kuivuudesta, vaan voi hyödyntää koko lämpimämmän kevään ja saavuttaa suuremmat sadot. (Peltonen-Sainio ym. 2009c.) Kevätvehnän sadot sen sijaan voivat kuivuuden takia jopa pienentyä (Peltonen-Sainio ym. 2010b). Satopotentiaaliltaan syysvehnä ja -ruis hyötyvät huomattavasti ilmaston lämpenemisestä. Vuosisadan puolella välissä niiden potentiaaliset sadot olisivat jopa 9 tonnia hehtaarilta etelässä ja noin 8 tonnia hehtaarilta pohjoisessa. (Peltonen-Sainio ym. 2009c.)

Uusien syysviljojen suuremmista sadoista saa myös osviittaa vertaamalla muiden maiden satoeroihin kevät- ja syyskylvöisten lajikkeiden välillä. Ruotsissa ja Tanskassa syysohran sadot voivat olla jopa puolitoista tonnia hehtaarilta suurempia kuin kevätohralta. Samansuuruinen ero on Irlannissa kevätkauran ja syyskauran välillä. (Jordbruksverket 2009, Statistics Denmark 2009, Central Statistics Office Ireland 2009.)

Myös ruisvehnällä on kohtalaisen suuri satopotentiaali. Tanskassa ruisvehnällä voi saavuttaa jopa viiden tonnin hehtaarisadot (Statistics Denmark 2009). Alaru ym. (2009) saavuttivat viljelykokeissa Virossa korkeita satoja ruisvehnällä, syysvehnällä ja rukiilla. Tavallista lämpimämpänä vuotena (2004) oli ruisvehnän hehtaarisato 7,8 tonnia. Tavanomaista kylmempänä vuotena (2003), jonka kasvukauden lämpötilat muistuttavat Etelä-Suomea, oli sato 4,5 tonnia hehtaarilta. Syysvehnän sadot olivat vuonna 2004 5,8 tonnia hehtaarilta ja vuonna 2003 4,3 tonnia hehtaarilta, kun rukiilla sadot olivat 6,6 ja 4,7 tonnia hehtaarilta mainittuina vuosina. (Alaru ym. 2009.)

Viileillä alueilla Kanadassa rehumaisin kuiva-ainesadot vaihtelivat viljelykokeissa alueesta, vuodesta ja lajikkeesta riippuen 8,5 tonnista 16 tonniin hehtaarilta (Drapeau ym. 2002, Kwabiah ym. 2003). Näistä arvoista ei kuitenkaan voi suoraan päätellä satoja Suomen tulevissa oloissa. Audsley ym. (2006) arvioivat Euroopan laajuisen mallin perusteella, että maissilla saavutettaisiin 9,1 tonnin hehtaarisato Etelä-Suomessa vuoden 2050 paikkeilla. Samassa tutkimuksessa arvioidaan auringonkukan saavuttavan noin neljän tonnin sadon hehtaarilta. Tutkimuksessa tosin kehoitetaan suhtautumaan tuloksiin suurella varauksella, sillä tietyillä alueilla tämä malli mallintaa nykyisetkin sadot liian suuriksi. (Audsley ym. 2006.)

3.6 Kasvitaudit, tuholaiset ja rikkakasvit

Ilmastonmuutos tulee muuttamaan kasvitauti- ja tuholaislajistoa sekä nykyisten lajien ekologiaa tavalla, joka on otettava huomioon ilmastonmuutokseen sopeutumisessa (Patterson ym. 1999, Boland ym. 2004, Tiilikkala ym. 2008). Kasvitautilien vakavuuteen ja ilmenemiseen liittyvät tietyt ilmastotekijät rajoittavat tai edesauttavat tautien leviämistä ja tartuntaa. Muun muassa leudommat talvet, korkeammat lämpötilat ja muuttuva sadanta lisäävät tautiriskiä monilla viljelykasveilla. (Patterson ym. 1999, Anderson ym. 2004, Olesen ym. 2010.)

Boland ym. (2004) arvioivat, että Ontariossa, jossa ilmasto muuttuu samankaltaisesti kuin Suomessa, leudommat talvet edesauttavat kasvijätteissä ja isäntäkasveissa talvehtivia tauteja selviämään talvesta. Myös sellaiset taudit, jotka eivät ennen pystyneet talvehtimaan, saattavat jäädä pysyviksi. Taudit, joilla on useampi elinkierto kesällä voivat hyötyä pidentyvistä kasvukaudesta. Kesäisin taudit, jotka vaativat korkeaa ilmankosteutta aiheuttaakseen tartunnan, saattavat menettää merkitystään. Samalla kuivissa oloissa lisääntyvät ja leviävät taudit tulevat haitallisemmiksi. Juuristoon vaikuttavat taudit voivat pahentua kuivuuden rajoittaessa kasveja. Syksyisin kosteampi ja lämpimämpi sää edistää tautien etenemistä. (Boland ym. 2004.)

On hyvä huomata, että kasvitautilien ja hyönteisten aiheuttamat haitat eivät ole riippumattomia toisistaan. Hyönteisten parempi talvehtiminen voi lisätä tauteja, jotka leviävät hyönteisten kuljettamina (Boland ym. 2004). Lisäksi uudet viljelykasvit voivat toimia väli-isäntinä uusille taudeille ja hyönteisille. (Anderson ym. 2004.)

Suomessa lämpenemisen odotetaan pidentävän aikaa, jona perunarutto on aktiivinen, ja lisäävän epidemioiden määrää ja vakavuutta. Perunarutto myös ilmaantuu todennäköisesti aikaisemmin. (Carter ym. 1996, Kaukoranta 1996.) Hannukkala ym. (2007) havaitsivat, että kaudella 1983–2002 perunaruttoepidemian aikaistunut alku selittyy osin korkeamman sadannan ja lämpötilojen kautta, vaikka myös uusilla tautikannoilla on ollut erittäin suuri merkitys. Myös peruna-ankeroisten oletetaan leviävän pohjoisemmaksi ilmaston lämmetessä (Carter ym. 1996).

Hiilidioksidipitoisuuskin vaikuttaa kasvitauteihin. Vaikutus riippuu kasvista ja taudista, mutta ainakin tietyissä oloissa kohonnut hiilidioksidipitoisuus tekee taudista vakavamman. Selittäviä tekijöitä voivat olla muuttunut mikroilmasto kasvustoissa ja kasvien lehtien muuttunut morfologia. (Lake & Wade 2009.)

Ilmaston lämpeneminen laajentaa myös monien hyönteisten elinalueita pohjoisemmaksi (Patterson ym. 1999, Easterling ym. 2007: 283). Silloin uusia tuholaisia saapuisi myös Suomeen. Vanhanen ym. (2008a,b) esittävät mallien perusteella, että ilmaston lämpeneminen laajentaa monien puille haitallisten hyönteisten mahdollista elinpiiriä satoja – jopa tuhat – kilometriä pohjoiseen. Onkin syytä olettaa, että tuleva ilmasto Suomessa olisi sopiva monille uusille maataloudelle haitallisille hyönteisille. Esimerkiksi koloradonkuoriaisen odotetaan tulevan tärkeämmäksi kasvintuhoajaksi Suomessa (Tiilikkala ym. 2008).

Muutoksia tulee myös loispetojen ja niiden isäntien suhteisiin, mm. jos niiden elinkaaren eri vaiheiden ajoittuminen muuttuu. Syytä voivat olla keskilämpötilojen muutokset, äärevät sääolot ja ilmaston vaihtelevuus. Muutokset lajien välisissä suhteissa voivat johtaa joidenkin hyönteislajien populaatioiden rajuun kasvuun tai romahtamiseen. Tällä on merkitystä lajiston monimuotoisuudelle, mutta se voi myös vaikuttaa tuholaispopulaatioiden kokoon ja biologiseen torjuntaan. (Hance ym. 2007.)

Tarkempi riskinarviointi vaatii parempia malleja ja enemmän kerättyä tietoa, joita voi yhdistää kasvu- ja epidemiologiin malleihin (Perarnaud ym. 2005). Isossa-Britanniassa on mallinnettu useilla alueilla kaalikasveille hyvin haitallisen sienitaudin, *Leptosphaeria maculansin*, esiintymistä ja vakavuutta rapsilla ilmaston muuttuessa. Tulokset osoittavat, että ilmaston lämmitessä taudin esiintyminen aikaistuu ja että epidemiat ovat huomattavasti vakavampia. (Evans ym. 2008.)

Kuten viljelykasveilla, mahdollistaa lämpeneminen myös rikkakasvien leviämisen uusille alueille ja luo niillekin otollisemmat olosuhteet. Hiilidioksidipitoisuuden kasvu hyödyttää myös rikkakasveja ja voi vaikuttaa rikkakasvien ja viljelykasvien väliseen kilpailuun. (Patterson ym. 1999.) Muuttuvat syksyn ja talven olot sekä viljelytoimenpiteiden ja kylvön muutokset vaikuttavat rikkakasvilajistoon ja sen kehitysrytmiin. Viljelijöiden pitää ottaa nämä muutokset huomioon esimerkiksi siirryttäessä syyskylvöisiin lajikkeisiin tai kevennettyyn kevätkuokkaukseen syyskynnön sijasta. Samalla tavoin kevään lämpeneminen ja sateisuuden muutokset vaikuttavat rikkakasvien kasvuun ja itämiseen. Nämä muutokset voivat olla erityisen merkittäviä kasveilla, jotka pystyvät itämään sekä keväisin että syksyisin. (Cici & Van Acker 2009.)

3.7 Eläintuotanto

Ilmastonmuutos vaikuttaa eläimiin mm. lämpötilan muutosten kautta. Lämpimillä alueilla vaikutus on haitallinen, kun tuotantoeläimet altistuvat liian korkeille lämpötiloille (Rötter & van De Geijn 1999). Suomen oloissa tämä on tuskin vaarana. Pidentynyt kasvukausi parantaa rehuntuotannon edellytyksiä ja mahdollistaa pidemmän laidunkauden. Lisäksi eläinten fysiologinen energiankulutus ja tuotantorakennuksiin liittyvä energiankulutus laskevat lämpötilojen noustessa. (Rötter & van De Geijn 1999, Hildén ym. 2005b.) Suurimmat vaikutukset ovat todennäköisesti epäsuoria ja liittyvät hinnanmuutoksiin niin lopputuotteiden kuin rehunkin osalta. Nämä seikat todennäköisesti määräävät sen mitä ja missä kannattaa tuottaa (Olesen & Bindi 2002). Myös maatalouden päästövähennystavoitteet tulevat vaikuttamaan eläintuotantoon (Regina ym. 2009).

4 Maatalouden ympäristövaikutukset ilmaston muuttuessa

Maatalousympäristön muutoksiin ovat 1900-luvun loppupuolella pääasiallisesti vaikuttaneet muut tekijät kuin ilmastonmuutos. Maatalouspoliittiset ohjauskeinot, viljelyn tehostuminen ja maatalouden rakennemuutos ovat muuttaneet maaseutua enemmän kuin hie-
man aikaistuneet kylvöt ja pidempi kasvukausi. Viime vuosikymmeninä määrävänä tekijänä on ollut Euroopan unionin maatalouspolitiikka: etenkin tuki- ja kauppapolitiikka ovat määrittäneet, miten maatalouden tuotantorakenne Euroopassa ja Suomessa on kehittynyt ja kehittyy. (Lehtonen ym. 2006, Stoate ym. 2009.) Ilmastonmuutos ja sen takia tehtävät toimet tulevat edelleenkin riippumaan hyvin voimakkaasti muista tekijöistä. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia ei kaikilta osin edes voi mielekkäästi tarkastella erossa muista muutostekijöistä ja ohjaavista prosesseista (de Chazal & Rounsevell 2009, Stoate ym. 2009).

4.1 Eroosio ja fosforikuormitus

Suurin osa maatalousmaan eroosiosta tapahtuu kasvukauden ulkopuolella ja eroosion määrä riippuu sekä vuosittaisista sääoloista että pellonkäytöstä (Puustinen ym. 2007). Puustisen ym. (2007) tutkimuksen mukaan vuosina, joina syksy on sateinen ja talvi lämmin, eroosio ja sen mukana kulkeutuva maa-ainekseen sitoutuneen fosforin määrä ovat huomattavasti suurempia kuin vuosina, joina syksy on kuivempi ja talvi luminen. Erot erilaisten vuosien välillä riippuvat kuitenkin myös pellonkäytöstä: kevyemmällä muokkauksella, pysyvällä kasvipeitteellä ja syysviljoilla lumisten ja lämpimien talvien väliset erot ja kokonaiseroosio ovat pienempiä. Lumisia talvia seuraa suurempi valunta. Tämä tutkimus ja odotus rankkasateiden runsastumisesta tukevat käsitystä siitä, että ilmastonmuutoksen takia eroosio ja valunta lisääntyvät huomattavasti, jos pellonkäyttöä ei tila- ja valuma-
aluetasolla muuteta. (Michael ym. 2005, Silander ym. 2006, Puustinen ym. 2007, Heino ym. 2008.) Eroosion ja valunnan tarkempi mallintaminen vaatii kuitenkin tietoja siitä, miten sateiden intensiteetti ja määrä tarkkaan ottaen muuttuvat (Michael ym. 2005). Liuennut fosfori ei vaihtele yhtä paljon ilmastollisten tekijöiden mukaan, joten muutoksia sen suhteen on odotettavissa ennemminkin lannoituksen ja maankäytön muutoksien kautta (Puustinen ym. 2007, Ulén & Johansson 2009).

4.2 Typen huuhtoutuminen ja torjunta-aineiden kulkeutuminen

Pintavalunnan ja veden maaperään imeytymisen lisääntyminen talvisin voi lisätä myös ravinteiden ja muiden maatalouskemikaalien päätymistä pohjaveteen ja vesistöihin (Silander ym. 2006, Okkonen ym. 2009). Typen huuhtoutumisen odotetaan lisääntyvän. Näihin muutoksiin tulevat kuitenkin vaikuttamaan tulevaisuuden kasvivalikoimat ja viljelykäytännöt. Typen huuhtoutumista selittävät etenkin suurempi sadanta ja korkeammista lämpötiloista johtuva nopeampi maaperän orgaanisen aineksen hajoaminen, jonka seurauksena vapautuu typpiyhdisteitä. (Kallio ym. 1997) Kovien rankkasateiden lisääntyminen lisää myös ravinteiden huuhtoutumista. Lisääntyvän sadannan ja valunnan takia virtaama ja ravinnepestöt Itämereen voivat kasvaa, mikä pahentaa Itämeren tilaa entisestään (Silander ym. 2006.)

Kasvitauti- ja tuholaisongelmien lisääntyminen sekä muuttuvat viljelykäytännöt tulevat todennäköisesti lisäämään tarvetta torjuntaruiskutuksille (Bloomfield ym. 2006, Hannukkala ym. 2007, Tiilikkala ym. 2008). Muuttuva sadanta, lisääntyvät rankkasateet ja lämpötilan nouseminen tulevat vaikuttamaan torjunta-aineiden kulkeutumiseen ja reaktioihin maaperässä sekä vedessä. Ei kuitenkaan ole varmaa, että tämä johtaa kaikissa oloissa kohonneisiin pitoisuuksiin pohja- tai pintavesissä. (Bloomfield ym. 2006.)

4.3 Maatalouden kasvihuonekaasupäästöt

Maatalous aiheuttaa niin hiilidioksidi-, typpioksiduuli- kuin metaanipäästöjä. Hiilidioksidipäästöt liittyvät pääosalta maaperän hiilen vapautumiseen, kun taas metaanipäästöt aiheutuvat pääosin eläintuotannosta (Smith ym. 2007: 503-505). Typpioksiduulipäästöjä aiheuttavat etenkin lannoitteet ja maaperän orgaanisen aineksen hajoaminen. Näihin päästöihin vaikuttavat monet ilmastotekijät. Lämpötilan muutos ja lumipeitteen katoaminen voivat lisätä typpioksiduulipäästöjä (Maljanen ym. 2007).

Maataloustuotannon, sekä siihen liittyvän maankäytön ja energiankulutuksen kasvihuonekaasupäästöt vastasivat vuonna 2007 18 prosenttia Suomen kokonaispäästöistä. Niistä suurin osa johtuu maatalousmaan typpioksiduulipäästöistä, loput pääasiassa kotieläinten ruoansulatuksesta ja lannan käsittelystä. Maatalouden aiheuttamat päästöt ovat vähentyneet viime vuosikymmenien aikana, sillä kotieläintilat ovat vähentyneet ja lannoitusmääriä on pienennetty. (Tilastokeskus 2009.) Turvepellot ovat tärkein hiilidioksidin päästölähde kasvintuotannossa, kun taas typpioksiduulipäästöjä syntyy paljon koko viljelyalalla. Talvien lämpeneminen todennäköisesti lisää talven aikana tapahtuvia päästöjä. (Martikainen ym. 2002.)

On arvioitu, että hiilidioksidipitoisuuden kasvu voi myös lisätä maatalousmaihin varastoituvan orgaanisen hiilen määrää. Vaikutuksen merkitys riippuu kuitenkin muista tekijöistä, kuten maankäyttötavoista (Easterling ym. 2007: 283). Toisaalta korkeammat lämpötilat lisäävät orgaanisen aineksen hapettumista maaperässä nopeuttaen hiilen vapautumista ilmakehään. Tämä seikka monimutkaistaa kokonaiskuvaa. (Vanhala ym. 2007, Brouder & Volenec 2008.)

4.4 Maatalousympäristön lajiston monimuotoisuus

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia luonnon monimuotoisuuteen ei ole mielekästä tarkastella erillään siitä, miten maankäyttö ja muu ihmistoiminta vaikuttavat monimuotoisuuteen (de Chazal & Rounsevell 2009). Kun pohditaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia maatalousympäristön monimuotoisuuteen, onkin syytä huomioida muuttuvat tuotantotavat, tuotannon keskittyminen ja tilojen lukumäärän väheneminen. Tämä toisaalta vaikeuttaa luotettavien arvioiden tekemistä.

Muutokset toimintatavoissa, kuten peltojen muokkauksessa, torjunta-aineiden käytössä ja viljelytoimenpiteiden ajoituksessa, voivat olla epäsuoraa seurausta ilmastonmuutoksesta. Niiden aiheuttama muutos voi olla suurempi tai ainakin nopeampi kuin ilmastonmuutoksen suorat vaikutukset maatalousympäristön lajistoon. Esimerkiksi siirtyminen kevätkylvöisistä lajikkeista syyskylvöisiin muuttaa peltoekosysteemin lajistoa monella tapaa. (Stoate ym. 2009, Cici & Van Acker 2009.) Voikin olettaa, että suurin osa sopeutumistoimenpiteistä vaikuttaa myös maatalousympäristön lajistoon jollain tavalla (Hildén ym. 2005b).

Ilmaston lämpenemisellä on muitakin vaikutuksia lajistoon. Uusien hyönteisten ja tautien leviäminen voi vaikuttaa maatalousympäristöissä elävien lajien määrään ja kantoihin. Tämä voi tapahtua joko suorasti tai välillisesti säätelevien lajien, kuten luontaisten vihollisten tai tautien kautta. (Anderson ym. 2004.)

Maatalousmaiseman hyvin arvokkaat luontokohteet kuten karut niityt ja laitumet sekä kosteikot saattavat kärsiä ilmastonmuutoksen seurauksena. Tämä voi vaarantaa useita lajeja ainakin alueellisesti. (Berghäll & Pesu 2008.) Uhkana ovat niin rehevöityminen kuin tulokaslajit. Suurin uhka on kuitenkin yhä näiden alueiden hoidon loppuminen, mikä on riippuvaista ohjaustoimista ja maatalouden kannattavuudesta (Hildén ym. 2005a, Berghäll & Pesu 2008). Maataloustuotannon tehostuminen uhkaa myös muita maatalousympäristössä eläviä sellaisia lajeja, jotka ovat samalla riippuvaisia tuotannon jatkumisesta. Muuttuva maatalous onkin johtanut maatalousympäristöjen lajiston köyhtymiseen 1900-luvun loppupuolella. (Hildén ym. 2005a.) Ilmastonmuutos tuskin on lähivuosikymmeninä suurin suoraan maatalousympäristön monimuotoisuuteen vaikuttava tekijä, vaikka vuoden keskilämpötila onkin yhteydessä nykyään havaittavan lajiston monimuotoisuuteen (Kivinen ym. 2006).

5 Sopeutumisen välttämättömyys

Sopeutuminen ja muutos ovat aina olleet osa maataloustuotantoa: ulkoiset tekijät ja maatalouden sisäinen kehitys ovat tuoneet suuria muutospaineita maataloudelle, ja maatalouden on aina pitänyt vastata näihin. (Soininen 1974, Hildén ym. 2005b.) Sopeutumista tapahtuu niin lyhyellä kuin pitkällä aikavälillä – sekä ohjatusti että itsenäisesti (Olesen & Bindi 2002). Kun olosuhteiden muutos havaitaan, yrittävät viljelijät annetuissa puitteissa ensimmäiseksi sopeuttaa tuotantoaan yksinkertaisilla toimenpiteillä. Pidemmällä tähtäimellä viljelijät muuttavat tuotantorakenteita. Tämä voi myös olla osoitus poliittisten ja taloudellisten olosuhteiden muutoksesta. (Olesen & Bindi 2002, Olesen ym. 2010.)

Osa sopeutumistoimenpiteistä, kuten kasvinjalostus, poliittiset linjaukset tai kastelujärjestelmät, vaativat suunnitelmallisempaa toimintaa. Lisäksi viljelijöiden toimenpiteet ovat riippuvaisia tiedosta, jota heillä on saatavilla. On siis tärkeää saada tuottajia ja muita toimijoita osallistumaan ja tiedostamaan ilmastonmuutoksen merkitys. (Olesen & Bindi 2002, Hildén ym. 2005b, Olesen ym. 2010.) Suunnitellun sopeutumisen ja poliittisten ohjauskeinojen pitää ottaa huomioon maatalousalan omien toimijoiden spontaani sopeutuminen ja tukea sitä, sen sijaan että ne asettaisivat liian tiukkoja tai kapea-alaisia ohjeita. Kapeat ja jäykät toimintapuitteet haittaavat viljelijöitä ja siten myös sopeutumista kokonaisuutena. (Hildén ym. 2005b.)

Monet maataloustuotantoa, ja siten sopeutumista, rajaavat tekijät, kuten tukijärjestelmän kehitys ja maataloustuotteiden maailmanmarkkinahintojen muutokset, ovat osin Suomesta riippumattomia. Ne vaikuttavat silti voimakkaasti viljelijöiden päätöksiin. (Hildén ym. 2005b, Stoate ym. 2009.) Tästä huolimatta voidaan esittää tiettyjä toimenpiteitä ja kysymyksiä, jotka ovat edellytyksenä ilmastonmuutokseen sopeutumiselle juuri Suomessa.

Tuotannon nopean muutoksen ja onnistuneen sopeutumisen taustalla on usein monta suotuisaa tekijää: esimerkiksi jos jonkin tuotteen hinta on korkealla ja maatalouspolitiikka on myönteistä, viljelijällä voi olla suurempi kiinnostus tehostaa ja sopeuttaa tuotantoaan, kuin tilanteessa, jossa esimerkiksi suurempi sato ei ole taloudellisesti kannattavampi. (Hildén ym. 2005b.) Tuotannon monipuolistaminen on yksi ratkaisu odottamat-

tomia muutoksia ja ilmiöitä vastaan varautuessa, koska monipuoliset tilat voivat sopeutua muutokseen usein eri tavoilla (Olesen & Bindi 2002, Peltonen-Sainio ym. 2009c).

5.1 Tuotannon sopeuttaminen

Ilmastonmuutos mahdollistaa suuremmat sadot, mutta vain jos nykyiset lajikkeet ja tuotantomenetelmät sopeutetaan tuleviin olosuhteisiin. Lämpötilan ja kasvukauden pituuden muutos vaikuttaa kasvien kehitykseen, ja kasvien tarvitsee sopeutua uudella tavalla. (Carter & Saarikko 1996, Peltonen-Sainio ym. 2009c.) Tässä on jalostuksella tärkeä tehtävä, sillä viljelykasvien pitää sopia tuleviin olosuhteisiin, joissa lämpötila ja sen vaihtelut muuttuvat, mutta valojakso ei (Junntila 1996, Peltonen-Sainio ym. 2010c).

Suomessa on pitkään jalostettu nopeasti kehittyviä ja aikaisin tuleentuvia lajikkeita, jotka sopivat viljelyolosuhteisiimme (Peltonen-Sainio ym. 2009e). Ilmastonmuutokseen sopeutumiseen tarvitaan kuitenkin myös uusia tavoitteita. Kasvien eri kehitysvaiheiden kestoa pitää sovittaa paremmin kasvukauden pitenemiseen ja lämpötilan nousuun. Silloin näistä muutoksista voidaan hyötyä sen sijaan, että sadot kärsisivät korkeista lämpötiloista ja liian nopeasta kehityksestä. Vedenkäyttöä pitää parantaa, jotta kasvit pysyvät tuottavina, kun kohoavat keskilämpötilat nostavat kasvien haihduttaman veden määrää. (Peltonen-Sainio ym. 2010c.) Myös taudin- ja tuholaiskestävyys on tulevaisuudessa entistä tärkeämpää. On kuitenkin huomioitava, että sopeutumisvaatimukset ovat eri kasveilla hyvin erilaisia, joten jalostus ilmastonmuutoksen varalta pitää sovittaa eri tarpeisiin. (Peltonen-Sainio ym. 2009c.)

Mahdollisuus uusien kasvien viljelyyn tuo uusien vaihtoehtojen lisäksi uusia haasteita ja riskejä. Syysviljojen viljely kannattaa, koska niillä on korkeampi satopotentiaali ja mahdollisuus päästä hyvään kasvuun ennen alkukesän kuivuutta (Peltonen-Sainio ym. 2009c, 2010b). Syysviljat myös pitävät pellot talvisin kasvipeitteisinä vähentäen eroosiota ja ravinteiden huuhtoutumista. Syysviljojen lisääntyvään viljelyyn liittyy kuitenkin riskejä, joita muuttuva ilmasto saattaa myös pahentaa, vaikka tulevaisuudessa olot keskimäärin paranisivatkin. (Peltonen-Sainio ym. 2009c, Olesen ym. 2010.) Jos talveen liittyviä haasteita ei oteta huomioon, hidastavat ne syyskylvöisten lajikkeiden käyttöönottoa. Riskit johtuvat pääasiassa talviolojen voimakkaista vaihteluista eri vuosina (Peltonen-Sainio ym. 2009c). Esimerkiksi runsaat talvehtimisvauriot vaikuttavat negatiivisesti lajikkeiden viljelyyn seuraavana vuonna (Peltonen-Sainio ym. 2010a). Syyskylvöisistä lajikkeista pitäisi näin ollen tuoda markkinoille vain niitä, jotka varmimmin pärjäävät tulevissa talvioloissa. Lisäksi on syytä jalostaa tuleviin talviimme soveltuvia syyslajikkeita. (Peltonen-Sainio ym. 2009c.)

Maissin viljely viljelyalueensa äärirajoilla tulee tarkoittamaan sitä, että satotaso vaihtelee huomattavasti. Lajikkeiden väliset erot eri vuosina voivat olla suuria ja vaihtelevia (Drapeau ym. 2002, Kwabiah ym. 2003). Tämä on syytä ottaa huomioon myös Suomessa.

Lajikevalintojen lisäksi myös viljelytoimenpiteitä on syytä muuttaa. Tämä tuo sekä mahdollisuuksia että haasteita. Kylvöajan aikaistuminen mahdollistaa pidempään kasvavien lajikkeiden viljelyn. Samalla muiden viljelytoimenpiteiden ajoitus muuttuu. (Peltonen-Sainio ym. 2009c, Olesen ym. 2010.)

Viljelijöiden tulee varautua suurempaan kasvitautilien uhkaan (Carter ym. 1996, Kaukoranta 1996, Hannukkala ym. 2007, Tiilikkala ym. 2008, Peltonen-Sainio ym. 2009c). Lisääntyvät tuholais- ja tautiongelmat vaativatkin kasvinjalostuksen lisäksi eri torjunta-, seuranta- ja valvontamenetelmien kehitystä (Marttila ym. 2005, Peltonen-Sainio ym. 2009c, Olesen ym. 2010). Esimerkiksi perunaruton kasvavan uhan takia torjunta-aineiden

käyttö on lisääntynyt. Toisaalta monipuolisemman viljelykierron käyttö auttaa vähentämään perunaruton esiintymistä ja vakavuutta. (Hannukkala ym. 2007.)

Ilmaston muuttuminen muuttaa myös olosuhteita, joissa kasvinsuojelutoimenpiteitä, kuten torjuntaruiskutuksia, tehdään sekä torjunta-aineiden vaikutuksia rikkakasveihin (Patterson ym. 1999, Bloomfield ym. 2006). Muuttuva rikkakasvilajisto vaatii toimenpiteiden uutta ajoittamista rikkakasvien kasvun estämiseksi ja ennaltaehkäisemiseksi (Cici & Van Acker 2009). Kasvitautilienkin uhkaa voi ennaltaehkäistä, sillä monet kasvitaudit leviävät kansainvälisen kaupan ja matkailun mukana. Lisääntynyt tiedottaminen ja valvonta kansainvälisellä tasolla voi auttaa säätelemään monien uhkaavien kasvitautilien leviämistä. (Anderson ym. 2004.)

Jotta suuremmat satopotentiaalit saadaan muuttumaan suuremmiksi sadoiksi, saattaa olla tarpeen lisätä viljelyn intensiteettiä, esimerkiksi nostamalla lannoitusmääriä (Peltonen-Sainio ym. 2009c, Olesen ym. 2010). Kasvuolojen muuttuessa ravinteiden saatavuuden on vastattava uutta tilannetta, jotta kasvit voivat kasvaa tehokkaasti (Brouder & Volenec 2008). Viljelytilanteesta riippuen korkea typpilannoitus voi kuitenkin lisätä tuotannon suhteellisia kasvihuonekaasupäästöjä. Silloin viljelykiertojen kehittäminen palkokasvien avulla sekä lannoituksen tarkentaminen voivat olla ympäristön kannalta parempia tapoja kasvattaa maataloustuotantoa (Khakbazan ym. 2009, Stoddard ym. 2009).

Satopotentiaalinen kasvu ja paheneva alkukesän kuivuus voivat myös tehdä kastelun tarpeelliseksi, jotta suurempia satoja voitaisiin saavuttaa (Silander ym. 2006, Peltonen-Sainio ym. 2010c). Kastelu vähentää sateiden vaihteluun liittyviä satotappioita, ja se myös tehostaa ravinteiden käyttöä takaamalla mahdollisuuden voimakkaaseen kasvuun (Peltonen-Sainio ym. 2009e, Reidsma ym. 2009). Mahdollisuuksia ja tarvetta kasteluun tuleekin tutkia. Samalla pitää ottaa käyttöön vettä säästäviä kastelumenetelmiä sekä kartoittaa tarvetta veden säätely- ja varastorakenteille, joilla laajamittaisempi kastelu olisi mahdollista. (Silander ym. 2006.)

Myös peltojen ojitusta tulee ylläpitää. Ilmastonmuutos tulee ottaa ojitussuunnitelmissa huomioon, sillä eteläisessä Suomessa lumen sulamishetki ei enää aina tule olemaan suurimman vesimäärän tuoja. Ojituksen pitääkin soveltua myös ottamaan vastaan poikkeuksellisen suuria sademääriä. Salaojituksen pitää myös mahdollistaa koneilla tehtävät syystyöt, kun syksyjen sadanta lisääntyy. Lisääntyvät rankkasateet voivat aiheuttaa suurempaa ravinteiden huuhtoutumista, jolloin ojitus pitää suunnitella siten, että kovallakaan sateella eivät kaikki ravinteet päädy suoraan luonnonvesistöihin. (Silander ym. 2006.)

5.2 Sopeutuminen ympäristömuutoksiin ja ilmastonmuutoksen lieventäminen

Ilmastonmuutoksen maatalousympäristölle haitallisten vaikutusten ehkäiseminen ja maatalouden ilmastovaikutusten vähentäminen ovat jo epäsuorasti mukana Euroopan unionin ympäristötukijärjestelmän toimenpiteissä. On tärkeää, että nämä tavoitteet otetaan selkeästi mukaan osaksi maatalouden ympäristöpolitiikkaa. Lisäksi ilmastonmuutoksen yhteisvaikutukset muiden maatalousympäristölle haitallisten muutosten kanssa pitää huomioida maatalouden ympäristöpolitiikassa. ((Stoate ym. 2009.)

Ravinnepäästöjen vähentäminen on tavoitteena Euroopan unionin ympäristötukipolitiikassa, vaikka Suomen ympäristötukiohjelma ei vielä olekaan saavuttanut selkeästi näkyviä vähennyksiä ravinteiden huuhtoutumisessa (Ekholm ym. 2007). Ilmastonmuu-

toksen aiheuttaman lisääntyvän valunnan takia on syytä tehostaa näitä toimia entisestään.

Maa-ainekseen sitoutuneen fosforin huuhtoutumista voidaan vähentää ennaltaehkäisemällä eroosiota. On tärkeää kohdentaa nämä toimenpiteet eroosioalttiimmille peltolohkoille. Muutoksia tarvitaan laajoilla alueilla, jos valuma-alueen tasolla halutaan nähdä positiivista kehitystä. (Puustinen ym. 2007.) Lisääntyvä syysviljojen viljely vähentää eroosiota syyskyntöön nähden (Silander ym. 2006, Peltonen-Sainio ym. 2010a). Puustisen ym. (2007) mukaan tehokkaimpia tapoja estää eroosiota peltolohkoilta ovat kuitenkin kevennetty kevätkuokkaus, suorakylvö ja pysyvä nurmipeite. Nämä toimenpiteet voivat kuitenkin samalla lisätä liuenneen fosforin huuhtoutumista. Tätä voidaan vähentää pienentämällä fosforilannoitusta peltolohkoilla, joiden fosforitaso on hyvä. (Puustinen ym. 2007.) Sen lisäksi puskurivyöhykkeistä ja kosteikoista ojaverkoston yhteydessä saattaa olla hyötyä.

Typen huuhtoutuminen on pienempää, kun lannan levittää vain keväisin tai kun käytetään teollisia typpilannoitteita. Lisäksi aluskasvien kylväminen syksyisin vähentää typen huuhtoutumista. Nämä toimenpiteet ovat tehokkaimpia, jos ne toteutetaan yhdessä. (Rankinen ym. 2009.) Myös pellon muokkaus keväisin syksyn sijasta voi vähentää typen huuhtoutumista (Ulén & Johansson 2009). Vaikka Rankisen ym. (2009) tutkimuksessa havaittiin, että teollisten lannoitteiden käyttö vähentää typen huuhtoutumista lantaan nähden, ei lannan käytön lopettaminen ole ratkaisu sinällään: intensiivisen eläintuotannon tuottama lanta pitää hyödyntää jollain tavalla joka tapauksessa. Lisäksi typpilannoitteiden valmistus aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä (Khakbazan ym. 2009). Palkokasvien laajempi käyttö viljelykierrossa voi varmistaa kasvien typensaannin, jolloin typpilannoitteiden käytön vähentäminen on helpompaa (Stoddard ym. 2009). Myös eläintuotannossa palkokasvien käyttö nurmissa voi vähentää päästöjä (Stewart ym. 2009).

Pelkkä lannoituksen vähentäminen sen sijaan voi tuotannon pienentymisen kautta aiheuttaa päästöjen kohoamista tuotettua yksikköä kohti. Kanadalaisessa tutkimuksessa (Stewart ym. 2009) arvioitiin, että monet toimenpiteet, joiden tarkoitus on vähentää kotieläintuotannon päästöjä, johtavat juuri tähän. Samassa tutkimuksessa osoitettiin myös, että eri hoito- ja tuotantotapojen yhdistelmät vaikuttivat eri alueilla hyvin eri tavoin. Tämä korostaa alueellisesti sovitettujen ratkaisujen tärkeyttä silloin, kun kasvihuonekaasupäästöjä halutaan vähentää. (Stewart ym. 2009.) Usein jonkin tekijän muuttaminen vähentää päästöjä yhden kaasun osalta samalla kun toinen kasvaa (Lehtonen ym. 2006, Stewart ym. 2009).

Lannan säilytystavat ja levitysaika vaikuttavat lannankäytön aiheuttamiin päästöihin. Esimerkiksi lannan kompostointi, kuivien ja nestemäisten osien erottelu ja lannan käyttö bioenergiaksi voivat vähentää kokonaispäästöjä. (Smith ym. 2007: 507, 510-511, Sommer ym. 2009.) Toimintatavoista riippumatta Suomen maatalouden päästöt laskevat todennäköisesti hieman vielä jonkin aikaa. Syynä on se, että kotieläintuotanto keskittyy harvemmille tiloille ja mahdollisesti vähenee. (Tike 2008, Tilastokeskus 2009, Regina ym. 2009.) Kotieläintuotannon alasajo ei kuitenkaan ole maatalousympäristön kannaltakaan paras ratkaisu, sillä muutoksella on myös haittavaikutuksia. Monet maatalousmaisemat ja lajit ovat riippuvaisia kotieläintuotannosta (Hildén ym. 2005a, Kivinen ym. 2006). Toisaalta vain pieni osa kotieläintuotannosta ylläpitää kaikkein lajirikkaimpia ympäristöjä (Olsson & Berg 2008, Berghäll & Pesu 2008). Keskittynyt ja tuotannollisesti tehokas eläintuotanto ei siis ole suora edellytys maatalousympäristön monimuotoisuuden säilymiselle.

Muu tapa vähentää kasvihuonekaasupäästöjä on rajoittaa turvemaiden viljelyskäyt-

töä. Tällöin on syytä huomioida tämänkaltaisten rajoitusten erityiset seuraukset Pohjois-Suomessa, jossa turvepeltoja on ylivoimaisesti eniten. (Lehtonen ym. 2006.)

Viljelytekniikalla on merkitystä maaperään sitoutuvan ja maaperästä vapautuvan hiilen määrään. Perssonin ym. (2008) tutkimuksessa Ruotsissa todettiin, että parivuotisten nurmien lisääminen syys- ja kevätkylvöisiin viljoihin ja öljykasveihin perustuvaan viljelykiertoon voi hidastaa hiilen vapautumista viljelymaasta. Osalla tutkimusasemista tätä tulosta ei kuitenkaan ole saatu vahvistettua (Persson ym. 2008). Tutkiessaan Tanskassa maanmuokkauksen vaikutusta syyskylvöisten kasvien viljelyn aiheuttamiin päästöihin Chatskikh ym. (2008) havaitsivat, että kevennetyllä muokkauksella ja suorakylvöllä maaperään jäi enemmän hiiltä, eivätkä typpioksiduulipäästötkään olleet selkeästi isompia kuin tavallisessa kynnössä.

Yksi mahdollisesti tehokkaampi – tosin vielä laajassa mittakaavassa testaamaton – menetelmä sitoa hiiltä maaperään on biomassan pyrolyysistä jäljelle jäävän hiilen muokkaaminen maaperään. Biomassaksi kelpaavat niin peltojätteet, puuhake kuin bioenergiakasvitkin. Pyrolyysissä, eli kuivatuslauksessa orgaanista ainesta kuumennetaan hapettomassa tilassa, jolloin se kaasuuntuu jättäen jälkeensä biohiilen kaasutustahteen. Tämä jäämä voidaan muokata peltoon. Hiilen sitomisen lisäksi myös maaperän ominaisuudet saattavat parantua. Menetelmän käyttöönotto ei vaadi runsaasti uutta tutkimusta, mutta se on riippuvainen taloudellisista ja poliittisista tekijöistä, jotka ohjaavat ilmastonmuutosta ehkäisevien toimenpiteiden taloudellista kannattavuutta. (Lehmann 2007.)

Bionenergian tuotanto on myös tapa vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Yksi esimerkki on ruokohelpi, joka on yksi eniten viljellyistä energiakasveistamme (Tike 2009). Sen viljelyllä voidaan korvata fossiilisia polttoaineita ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Lisäksi oikeissa taloudellisissa olosuhteissa se parantaa viljelyn kannattavuutta edistäten maatalouden toimintaedellytyksiä. (Lankoski & Ollikainen 2008.)

6 Ilmastonmuutos ja yhteiskunnalliset haasteet

Maa- ja metsätalousministeriö on valmistellut Ilmastonmuutoksen kansallisen sopeutumisstrategian. Siinä painotetaan tutkimuksen ja hallinnollisen yhteistyön tärkeyttä (Marttila ym. 2005). Sopeutumisstrategiassa ei käsitellä laajasti maataloutta, vaan esitellään ainoastaan keskeisimmät tuotannolliset toimenpiteet ja korostetaan seurantajärjestelmien tärkeyttä. Strategian seurantaraportissa todetaan, että joitakin sopeutumistoimenpiteitä ja tutkimusprojekteja on aloitettu, mutta etenkin sosioekonominen kehitys Suomessa ja muualla pitää ottaa paremmin huomioon ilmastonmuutosstrategiassa (Maa- ja metsätalousministeriö 2009).

Euroopan unionin yhteinen maatalouspolitiikka tulee ohjaamaan Suomen maataloutta myös tulevaisuudessa. Näin ollen Euroopan unionin tasolla tehdyt päätökset siitä, miten maatalouspolitiikkaa ja maataloutta tulee sopeuttaa ilmastonmuutokseen, vaikuttavat vahvasti Suomessa (Hildén ym. 2005b). Euroopan unionin maatalouspolitiikassa pitäisi ottaa huomioon niin ilmastonmuutokseen vaikutukset, niihin sopeutuminen ja sen ehkäisy kuin maataloustuotannon yhteiskunnallinen ja ympäristöllinen merkitys (Olesen ym. 2010).

Suomen maatalouspolitiikan pitää tukea viljelijöitä ja maanomistusta siten, että sopeutuminen ja omaan tuotantoon investointi ovat kannattavia. Muuten pääomaa vaativat pitkäaikaiset toimenpiteet, kuten ojitus tai kastelujärjestelmien kehittäminen, saattavat jäädä tekemättä (Hildén ym. 2005b). Osa vaadituista sopeutumistoimenpiteistä on

viljelijöiden ja neuvojien kokemusten ulkopuolella ja edellyttävät suurta muutosta kasvin-
tuotannon käytännöissä. Suunniteltu sopeutuminen ja institutionaaliset turvaverkot aut-
tavat kohtaamaan haasteita, etenkin kun sään ääri-ilmiöt yleistyvät. Myös ilmastonmuu-
toksen kasvintuotannolle suomien mahdollisuuksien hyödyntäminen edellyttää aktiivista
ja suunniteltua toimintaa. (Peltonen-Sainio ym. 2009b, Olesen ym. 2010.)

Suomen maatalouden sopeutumiskyvyn koetaan olevan suuri (Hildén ym. 2005b). Se
ei kuitenkaan tarkoita sitä, että tulevaisuudessa maatalous säilyttäisi elinvoimaisuutensa
kaikkialla (Lehtonen ym. 2006). Maatalous on hyvin riippuvainen poliittisista ja taloudel-
lisista ohjaustekijöistä, eikä ole varmaa, että nämä säilyvät maataloudelle edullisina tule-
vaisuudessa (Audsley ym. 2006). Lisäksi ristiriita suuremman tuotantopotentiaalin ja ym-
päristötavoitteiden välillä on merkittävä: ilmastonmuutos pahentaa maatalousympäristön
ongelmia, samalla kun houkutus tuotannon tehostamiseen merkitsee suurempien ym-
päristöongelmien uhkaa. Tuotantoa pitäisi siis kehittää siten, että maataloustuotanto on
kestävä osa ympäristöä ja maaseutuelinkeinoa (Marttila ym. 2005).

Vaikka kansallisella tasolla sopeutumiseen löytyy mahdollisuuksia, voi alueellisesti ja
tuotantosuunnittain olla suurtakin vaihtelua. Sekä ilmastonmuutoksen suorat vaikutuk-
set että sopeutumis- ja lievennystoimenpiteet vaikuttavat epätasaisesti. Eri alueet ovat
eri tavoin haavoittuvaisia ja niiden kyky sopeutua vaihtelee huomattavasti. (O'Brien ym.
2006, Lehtonen ym. 2006, Reidsma ym. 2009.) Oikeissa olosuhteissa mahdollisuus kas-
vattaa maataloustuotantoa Suomessa voi merkitä maataloussektorin merkityksen huo-
mattavaa kasvua kansallisesti ja kansainvälisesti, mutta Suomi tuskin ainakaan lähi-
aikoina pystyy kilpailemaan Keski-Euroopan suurien tuottajien kanssa tuotannon kan-
nattavuudella tai tuotantomäärillä (Olesen & Bindi 2002, Hildén ym. 2005b, Audsley
ym. 2006). Vaikka Suomen maatalous hyötyy tietystä näkökulmasta ilmastonmuutok-
sesta, tulee häviäjiäkin löytymään. Kokonaiskustannusten ja päästövähennysten lisäk-
si on huomioitava politiikan ja säännösten aiheuttamat alueelliset seuraukset (Lehto-
nen ym. 2006). Maatalouden rakenteen muutoksella on vaikutuksia koko maaseudulla ja
sopeutuminen Suomessa on riippuvaista Euroopan unionista ja koko maailmasta. Näiden
huomioiden pitää olla keskeinen näkökulma maatalouspolitiikassa ja ilmastonmuutokseen
sopeutumisessa.

Viitteet

- Alaru, M., Laur, U., Eremeev, V., Reintam, E., Selge, A. ja Noormets, M. 2009. Winter triticale yield formation and quality affected by N rate, timing and splitting. *Agricultural and Food Science* 18: 76–90.
- Anderson, P. K., Cunningham, A. A., Patel, N. G., Morales, F. J., Epstein, P. R. ja Daszak, P. 2004. Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology & Evolution* 19: 535–544.
- Audsley, E., Pearn, K., Simota, C., Cojocar, G., Koutsidou, E., Rounsevell, M., Trnka, M. ja Alexandrov, V. 2006. What can scenario modelling tell us about future European scale agricultural land use, and what not? *Environmental Science & Policy* 9: 148–162.
- Berghäll, J. ja Pesu, M. 2008. Ilmastonmuutos ja kulttuuriympäristö: Tunnistetut vaikutukset ja haasteet Suomessa. *Suomen ympäristö* 44/2008 63 s.
- Bloomfield, J. P., Williams, R. J., Gooddy, D. C., Cape, J. N. ja Guha, P. 2006. Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater—A UK perspective. *The Science of the Total Environment* 369: 163–177.
- Boland, G. J., Melzer, M. S., Hopkin, A., Higgins, V. ja Nassuth, A. 2004. Climate change and plant diseases in Ontario. *Canadian Journal of Plant Pathology* 26: 335–350.
- Booker, F., Muntifer, R., McGrath, M., Burkey, K., Decoteau, D., Fiscus, E., Manning, W., Krupa, S., Chappelka, A. ja Grantz, D. 2009. The ozone component of global change: Potential effects on agricultural and horticultural plant yield, product quality and interactions with invasive species. *Journal of Integrative Plant Biology* 51: 337–351.
- Brouder, S. M. ja Volenec, J. J. 2008. Impact of climate change on crop nutrient and water use efficiencies. *Physiologia plantarum* 133: 705–24.
- Carter, T. R. 1996. Developing scenarios of atmosphere, weather and climate for northern regions. *Agricultural and Food Science in Finland* 5: 235–249.
- Carter, T. R. 1998. Changes in the thermal growing season in Nordic countries during the past century and prospects for the future. *Agricultural and Food Science in Finland* 7: 161–179.
- Carter, T. R. ja Saarikko, R. A. 1996. Estimating regional crop potential in Finland under a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology* 79: 301–313.
- Carter, T. R., Saarikko, R. A. ja Niemi, K. J. 1996. Assessing the risks and uncertainties of regional crop potential under a changing climate in Finland. *Agricultural and Food Science in Finland* 5: 329–350.
- Central Statistics Office Ireland 2009. Area, Yield and Production of Crops 2008. <http://www.cso.ie/releasespublications/documents/agriculture/current/aypcrop.pdf>; viitattu: 22.12.2009.
- Chatskikh, D., Olesen, J. r. E., Hansen, E. M., Elsgaard, L. ja Petersen, B. r. M. 2008. Effects of reduced tillage on net greenhouse gas fluxes from loamy sand soil under winter crops in Denmark. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 128: 117–126.

- Cici, S. Z. H. ja Van Acker, R. C. 2009. A review of the recruitment biology of winter annual weeds in Canada. *Canadian Journal of Plant Science* 89: 575–589.
- Cutforth, H., Tuchelt, J. ja Rickwood, R. 2004. Long-term changes in the frost-free season on the Canadian prairies. *Canadian Journal of Plant Science* 84: 1085–1091.
- de Chazal, J. ja Rounsevell, M. D. A. 2009. Land-use and climate change within assessments of biodiversity change: A review. *Global Environmental Change* 19: 306–315.
- Drapeau, R., Tremblay, G. F., Bélanger, G. ja Michaud, R. 2002. Récoltes tardives du maïs fourrager en régions à faibles unités thermiques. *Canadian Journal of Plant Science* 82: 319–327.
- Easterling, W. E., Aggarwal, P. K., Batima, P., Brander, K. M., Erda, L., Howden, S. M., Kirilenko, A., Morton, J., Soussana, J.-F., Schmidhuber, J. ja Tubiello, F. N. 2007. Food, fibre and forest products. Teoksessa: M. L. Parry, P. J. van Der Linden, O. F. Canziani, J. P. Palutikof ja C. E. Hanson (toim.) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, luku 5, 273–313.
- Ekholm, P., Granlund, K., Kauppila, P., Mitikka, S., Niemi, J., Rankinen, K., Räike, A. ja Räsänen, J. 2007. Influence of EU policy on agricultural nutrient losses and the state of receiving surface waters in Finland. *Agricultural and Food Science* 16: 282–300.
- Energy, Mines and Resources Canada 1981. Canada - Growing degree-days. <http://atlas.nrcan.gc.ca/site/english/maps/archives/5thedition/environment/climate/mcr4034/>; viitattu: 22.12.2009.
- Environment Canada 2009. Canadian Climate Normals. http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/index_e.html; viitattu 22.12.2009.
- Evans, N., Baierl, A., Semenov, M. A., Gladders, P. ja Fitt, B. D. L. 2008. Range and severity of a plant disease increased by global warming. *Journal of the Royal Society, Interface* 5: 525–531.
- FAO 2009. FAOSTAT - Crops. <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>; viitattu 21.12.2009.
- Fronzek, S. ja Carter, T. R. 2007. Assessing uncertainties in climate change impacts on resource potential for Europe based on projections from RCMs and GCMs. *Climatic Change* 81: 357–371.
- Graham, L. P., Chen, D., Christensen, O. B. s., Kjellström, E., Krysanova, V., Meier, H. E. M., Radziejewski, M., Räsänen, J., Rockel, B. ja Ruosteenoja, K. 2008. Projections of Future Anthropogenic Climate Change. Teoksessa: The BACC Author Team (toim.) *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Springer-Verlag, Berlin, luku 3, 133–219.
- Hakala, K. 1998. Growth and yield potential of spring wheat in a simulated changed climate with increased CO₂ and higher temperature. *European Journal of Agronomy* 9: 41–52.

- Hakala, K., Heliö, R., Tuhkanen, E. ja Kaukoranta, T. 1999. Photosynthesis and Rubisco kinetics in spring wheat and meadow fescue under conditions of simulated climate change with elevated CO₂ and increased temperatures. *Agricultural and Food Science in Finland* 8: 441–457.
- Hakala, K. ja Mela, T. 1996. The effects of prolonged exposure to elevated temperatures and elevated CO₂ levels on the growth, yield and dry matter partitioning of field-sown meadow fescue. *Agricultural and Food Science in Finland* 5: 285–298.
- Hance, T., van Baaren, J., Vernon, P. ja Boivin, G. 2007. Impact of extreme temperatures on parasitoids in a climate change perspective. *Annual Review of Entomology* 52: 107–126.
- Hannukkala, A. O., Kaukoranta, T., Lehtinen, A. ja Rahkonen, A. 2007. Late-blight epidemics on potato in Finland, 1933-2002; increased and earlier occurrence of epidemics associated with climate change and lack of rotation. *Plant Pathology* 56: 167–176.
- Hanssen-Bauer, I., F, E. J., Haugen, J. E. ja Tveito, O. E. 2003. Temperature and precipitation scenarios for Norway: comparison of results from dynamical and empirical down-scaling. *DNMI Klima Report* 25: 22 s.
- Heino, R., Tuomenvirta, H., Vuglinsky, V. S., Gustafsson, B. G., Alexandersson, H., Barring, L., Briede, A., Cappelen, J., Chen, D., Falarz, M., Fø rland, E. J., Haapala, J., Jaagus, J., Kitaev, L., Kont, A., Kuusisto, E., Lindström, G., Meier, H. E. M., Mietus, M., Moberg, A., Myrberg, K., Niedźwiedź, T., Nordli, O. y., Omstedt, A., Orviku, K., Pruszek, Z., Rimkus, E., Russak, V., Schrum, C., Suursaar, U., Vihma, T., Weisse, R. ja Wibig, J. 2008. Past and Current Climate Change. Teoksessa: The BACC Author Team (toim.) *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Springer-Verlag, Berlin, luku 2, 35–131.
- Hildén, M., Auvinen, A.-P. ja Primmer, E. 2005a. Suomen biodiversiteettiohjelman arviointi. *Suomen ympäristö 770*: 63 s.
- Hildén, M., Lehtonen, H., Bärlund, I., Hakala, K., Kaukoranta, T. ja Tattari, S. 2005b. The practice and process of adaptation in Finnish agriculture. *Finnish Environment Institute Mimeographs* 335: 1–28.
- Ilmatieteen laitos 2009a. Ilmastomuutos - Muutos Suomessa. <http://www.fmi.fi/ilmastonmuutos/suomessa.html>; viitattu 21.12.2009.
- Ilmatieteen laitos 2009b. Terminen kasvikausi ja sen ilmastoseuranta. http://www.fmi.fi/saa/tilastot_72.html; viitattu 21.12.2009.
- Inouye, D. W. 2000. The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change. *Ecology Letters* 3: 457–463.
- IPCC 2007a. Summary for Policymakers. Teoksessa: S. Solomon, H. L. Miller, Jr., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt ja M. M. B. Tignor (toim.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 1–18, <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-spm.pdf>.

- IPCC 2007b. Summary for Policymakers. Teoksessa: M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van Der Linden ja C. E. Hanson (toim.) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, April 2007. Cambridge University Press, Cambridge, 7–22.
- Jones, M. B. ja Jongen, M. 1996. Sensitivity of temperate grassland species to elevated atmospheric CO₂ and the interaction With temperature and water stress. *Agricultural and Food Science in Finland* 5: 271–283.
- Jordbruksverket 2008. Jordbruksmarkens användning. <http://statistik.sjv.se/Database/Jordbruksverket/Markanvandning/Markanvandning.asp>; viitattu: 21.12.2009.
- Jordbruksverket 2009. Normskördar för skördeområden, län och riket 2009. *Statistiska meddelanden JO 15 SM 0901* 66 s.
- Juday, G. P., Barber, V., Duffy, P., Linderholm, H., Rupp, S., Sparrow, S., Vaganov, E. ja Yarie, J. 2005. *Forests, Land Management, and Agriculture. Teoksessa: ACIA (toim.) Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, luku 14, 781–862.
- Junttila, O. 1996. Plant adaptation to temperature and photoperiod. *Agricultural and Food Science in Finland* 5: 251–260.
- Jylhä, K., Fronzek, S., Tuomenvirta, H., Carter, T. R. ja Ruosteenoja, K. 2008. Changes in frost, snow and Baltic sea ice by the end of the twenty-first century based on climate model projections for Europe. *Climatic Change* 86: 441–462.
- Jylhä, K., Tuomenvirta, H. ja Ruosteenoja, K. 2004. Climate change projections for Finland during the 21st century. *Boreal Environment Research* 9: 127–152.
- Kaivo-oja, J., Luukkanen, J. ja Wilenius, M. 2004. Defining alternative national-scale socio-economic and technological futures up to 2100: SRES scenarios for the case of Finland. *Boreal Environment Research* 9: 109–125.
- Kallio, K., Rekolainen, S., Ekholm, P., Granlund, K., Laine, Y., Johnsson, H. ja Hoffman, M. 1997. Impacts of climatic change on agricultural nutrient losses in Finland. *Boreal Environment Research* 2: 33–52.
- Karlsen, S. R., Solheim, I., Beck, P. S. A., H, K. A., Wielgolaski, F. E. ja T, H. 2007. Variability of the start of the growing season in Fennoscandia, 1982-2002. *International Journal of Biometeorology* 51: 513–24.
- Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E. ja Manner, O. 2008. Ilmakehä, sää ja ilmasto. *Tähtitieteellinen yhdistys URSA ry*, Helsinki, 505 s.
- Kaukoranta, T. 1996. Impact of global warming on potato late blight: risk, yield loss and control. *Agricultural and Food Science in Finland* 5: 311–327.
- Kaukoranta, T. ja Hakala, K. 2008. Impact of spring warming on sowing times of cereal, potato and sugar beet in Finland. *Agricultural and Food Science* 17: 165–176.

- Khakbazan, M., Mohr, R. M., Derksen, D. A., Monreal, M. A., Grant, C. A., Zentner, R. P., Moulin, A. P., McLaren, D. L., Irvine, R. B. ja Nagy, C. N. 2009. Effects of alternative management practices on the economics, energy and GHG emissions of a wheat-pea cropping system in the Canadian prairies. *Soil and Tillage Research* 104: 30–38.
- Kivinen, S., Luoto, M., Kuussaari, M. ja Helenius, J. 2006. Multi-species richness of boreal agricultural landscapes: effects of climate, biotope, soil and geographical location. *Journal of Biogeography* 33: 862–875.
- Kjellström, E. ja Ruosteenoja, K. 2007. Present-day and future precipitation in the Baltic Sea region as simulated in a suite of regional climate models. *Climatic Change* 81: 281–291.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. ja Rubel, F. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification. <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>; viitattu 21.12.2009.
- Kwabiah, A. B., MacPherson, M. ja McKenzie, D. B. 2003. Corn heat unit variability and potential of corn (*Zea mays* L.) production in a cool climate ecosystem. *Canadian Journal of Plant Science* 83: 689–698.
- Lake, J. A. ja Wade, R. N. 2009. Plant-pathogen interactions and elevated CO₂: morphological changes in favour of pathogens. *Journal of Experimental Botany* 60: 3123–3131.
- Lange, M. A. 2008. Assessing climate change impacts in the European north. *Climatic Change* 87: 7–34.
- Lankoski, J. ja Ollikainen, M. 2008. Bioenergy crop production and climate policies: a von Thunen model and the case of reed canary grass in Finland. *European Review of Agricultural Economics* 35: 519–546.
- Lehmann, J. 2007. A handful of carbon. *Nature* 447: 143–144.
- Lehtonen, H., Peltola, J. ja Sinkkonen, M. 2006. Co-effects of climate policy and agricultural policy on regional agricultural viability in Finland. *Agricultural Systems* 88: 472–493.
- Linderholm, H. W., Walther, A. ja Chen, D. 2008. Twentieth-century trends in the thermal growing season in the Greater Baltic Area. *Climatic Change* 87: 405–419.
- Maa- ja metsätalousministeriö 2009. Ilmastonmuutoksen kansallisen sopeutumis- strategian toimeenpanon arviointi 2009.
- Makkonen, L., Ruokolainen, L., Räisänen, J. ja Tikanmäki, M. 2007. Regional Climate Model Estimates for Changes in Nordic Extreme Events. *Geophysica* 43: 25–48.
- Maljanen, M., Kohonen, A.-R., Virkajärvi, P. ja Martikainen, P. J. 2007. Fluxes and production of N₂O, CO₂ and CH₄ in boreal agricultural soil during winter as affected by snow cover. *Tellus B* 59: 853–859.
- Martikainen, P. J., Regina, K., Syväsalu, E., Laurila, T., Lohila, A., Aurela, M., Silvola, J., Kettunen, R., Saarnio, R., Koponen, S., Jaakkola, H., Pärnä, T., Silvennoinen, A., Lehtonen, H., Peltola, J., Sinkkonen, M. ja Esala, M. 2002. Agricultural soils as a sink and source of greenhouse gases: A research consortium (AGRIGAS). Teoksessa: J. Käyhkö

- ja L. Talve (toim.) *Understanding the Global system. The Finnish Perspective*. Finnish Global Research Programme FIGARE, Turku, 55–68.
- Marttila, V., Granholm, H., Laanikari, J., Yrjölä, T., Aalto, A., Heikinheimo, P., Honkatuki, J., Järvinen, H., Liski, J., Merivirta, R. ja Paunio, M. 2005. Ilmastonmuutoksen kansallinen sopeutumisstrategia.
- Mellander, P.-E., Löfvenius, M. O. ja Laudon, H. 2007. Climate change impact on snow and soil temperature in boreal Scots pine stands. *Climatic Change* 85: 179–193.
- Michael, A., Schmidt, J., Enke, W., Deuschländer, T. ja Malitz, G. 2005. Impact of expected increase in precipitation intensities on soil loss—results of comparative model simulations. *Catena* 61: 155–164.
- Mukula, J. ja Rantanen, O. 1987. Climatic risks to the yield and quality of field crops in Finland: I. Basic facts about Finnish field crops production. *Annales Agriculturae Fenniae* 26: 1–18.
- Niemi, J. ja Ahlstedt, J. 2009. *Finnish Agriculture and Rural Industries 2009*. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskusten julkaisuja 109a.
- O'Brien, K., Eriksen, S., Sygna, L. ja Naess, L. O. 2006. Questioning complacency: climate change impacts, vulnerability, and adaptation in Norway. *Ambio* 35: 50–56.
- Okkonen, J., Jyrkama, M. ja Kløve, B. r. 2009. A conceptual approach for assessing the impact of climate change on groundwater and related surface waters in cold regions (Finland). *Hydrogeology Journal*.
- Olesen, J. r. E. ja Bindi, M. 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy* 16: 239–262.
- Olesen, J. r. E., Carter, T. R., Díaz-Ambrona, C. H., Fronzek, S., Heidmann, T., Hickler, T., Holt, T., Minguéz, M. I., Morales, P., Palutikof, J. P., Quemada, M., Ruiz-Ramos, M., Rubæk, G. H., Sau, F., Smith, B. ja Sykes, M. T. 2007. Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models. *Climatic Change* 81: 123–143.
- Olesen, J. r. E., Trnka, M., Kersebaum, K. C., Skejvåg, A. O., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J. ja Micale, F. 2010. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, submitted.
- Olsson, R. ja Berg, A. k. (toim.) 2008. *Mångfaldsmarker. Naturbetesmarker - en värdefull resurs*. Centrum för biologisk mångfald, Uppsala, 240 s.
- Patterson, D. T., Westbrook, J. K., Joyce, R. J. V., Lingren, P. D. ja Rogasik, J. 1999. Weeds, insects and diseases. *Climatic Change* 43: 711–727.
- Peltonen-Sainio, P., Hakala, K. ja Jauhiainen, L. 2010a. Climate induced overwintering challenges for wheat and rye in northern agriculture. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B Soil and Plant Science*, In press.

- Peltonen-Sainio, P., Hakala, K., Jauhiainen, L. ja Ruosteenoja, K. 2009a. Comparing regional risks in producing turnip rape and oilseed rape - Impacts of climate change and breeding. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Plant Soil Science* 59: 129–138.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L. ja Hakala, K. 2009b. Are there indications of climate change induced increases in variability of major field crops in the northernmost European conditions? *Agricultural and Food Science* 18: 206–222.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L. ja Hakala, K. 2010b. Crop responses to precipitation and elevated temperatures in cool growing conditions at high latitudes according to long-term multi-location trials. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, submitted.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Hakala, K. ja Ojanen, H. 2009c. Climate change and prolongation of growing season: changes in regional potential for field crop production in Finland. *Agricultural and Food Science* 18: 171–190.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Hakala, K. ja Ruosteenoja, K. 2010c. Growth duration and phasing, distribution of precipitation and yielding capacity of spring cereals and rapeseed in a changing climate at high latitudes. *Field Crops Research*, submitted.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L. ja Hannukkala, A. 2007. Declining rapeseed yields in Finland: how, why and what next? *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 145: 587–598.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L. ja Venäläinen, A. 2009d. Comparing regional risks in producing turnip rape and oilseed rape - Today in light of long-term datasets. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Plant Soil Science* 59: 118–128.
- Peltonen-Sainio, P., Rajala, A., Känkkänen, H. ja Hakala, K. 2009e. Improving Farming Systems in Northern European Conditions. Teoksessa: V. Sadras ja D. Calderini (toim.) *Crop Physiology : Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. Academic Press, London, UK, luku 4, 71–97.
- Perarnaud, V., Seguin, B., Malezieux, E., Deque, M. ja Loustau, D. 2005. Agrometeorological Research and Applications Needed to Prepare Agriculture and Forestry to 21st Century Climate Change. *Climatic Change* 70: 319–340.
- Persson, T., Bergkvist, G. ja Kätterer, T. 2008. Long-term effects of crop rotations with and without perennial leys on soil carbon stocks and grain yields of winter wheat. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 81: 193–202.
- Puustinen, M., Tattari, S., Koskiaho, J. ja Linjama, J. 2007. Influence of seasonal and annual hydrological variations on erosion and phosphorus transport from arable areas in Finland. *Soil and Tillage Research* 93: 44–55.
- Räisänen, J. ja Alexandersson, H. 2003. A probabilistic view on recent and near future climate change in Sweden. *Tellus A* 55: 113–125.
- Räisänen, J. ja Ruokolainen, L. 2006. Probabilistic forecasts of near-term climate change based on a resampling ensemble technique. *Tellus A* 58: 461–472.

- Rankinen, K., Valpasvuo-Jaatinen, P., Karhunen, A., Kenttämies, K., Nenonen, S. ja Bär-lund, I. 2009. Simulated nitrogen leaching patterns and adaptation to climate change in two Finnish river basins with contrasting land use and climatic conditions. *Hydrology Research* 40: 177–186.
- Rantanen, O. ja Solantie, R. 1987. Climatic risks to the yield and quality of field crops in Finland: II. Cultivation zones and sub-divisions. *Annales Agriculturae Fenniae* 26: 19–35.
- Regina, K., Lehtonen, H., Nousiainen, J. ja Esala, M. 2009. Modelled impacts of mitigation measures on greenhouse gas emissions from Finnish agriculture up to 2020. *Agricultural and Food Science* 18: 477–493.
- Reidsma, P., Ewert, F., Oude Lansink, A. ja Leemans, R. 2009. Vulnerability and adaptation of European farmers: a multi-level analysis of yield and income responses to climate variability. *Regional Environmental Change* 9: 25–40.
- Rochette, P., Bélanger, G., Castonguay, Y., Bootsma, A. ja Mongrain, D. 2004. Climate change and winter damage to fruit trees in eastern Canada. *Canadian Journal of Plant Science* 84: 1113–1125.
- Rötter, R. ja van De Geijn, S. C. 1999. Climate change effects on plant growth, crop yield and livestock. *Climatic Change* 43: 651–681.
- Ruosteenoja, K., Tuomenvirta, H. ja Jylhä, K. 2007. GCM-based regional temperature and precipitation change estimates for Europe under four SRES scenarios applying a super-ensemble pattern-scaling method. *Climatic Change* 81: 193–208.
- Serenius, M., Huusela-Veistola, E., Avikainen, H. ja Pahkala, K. 2005. Effects of sowing time on pink snow mould, leaf rust and winter damage in winter rye varieties in Finland. *Agricultural and Food Science* 14: 362–376.
- Silander, J., Vehviläinen, B., Niemi, J., Arosilta, A., Dubrovin, T., Jormola, J., Keskisarja, V., Keto, A., Lepistö, A., Ollila, M., Pajula, H., Pitkänen, H., Sammalkorpi, I., Suomalainen, M. ja Veijalainen, N. 2006. Climate change adaptation for hydrology and water resources.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B. ja Sirotenko, O. 2007. Agriculture. Teoksessa: B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave ja L. A. Mayer (toim.) *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, luku 8, 497–540.
- Soininen, A. M. 1974. Vanha maataloutemme : maatalous ja maatalousväestö Suomes-sa perinnäisen maatalouden loppukaudella 1720-luvulta 1870-luvulle. Historiallisia tutkimuksia. Suomen historiallinen seura, Helsinki, 1–459 s.
- Sommer, S. G., Olesen, J. r. E., Petersen, S. r. O., Weisbjerg, M. R., Valli, L., Rodhe, L. ja Béline, F. 2009. Region-specific assessment of greenhouse gas mitigation with different manure management strategies in four agroecological zones. *Global Change Biology* 15: 2825–2837.

- Statistics Canada 2007. Farms in the Territories. <http://www.statcan.gc.ca/pub/95-629-x/2/4182406-eng.htm>; viitattu 21.12.2009.
- Statistics Denmark 2009. Crop production of cereals, rape and pulses (provisional figures). http://www.dst.dk/HomeUK/Statistics/focus_on/focus_on_show.aspx?sci=601; viitattu 21.12.2009.
- Statistics Norway 2001. Census of Agriculture 1999. http://www.ssb.no/english/subjects/10/04/10/jt1999_en/; viitattu 21.12.2009.
- Stewart, A. A., Little, S. M., Ominski, K. H., Wittenberg, K. M. ja Janzen, H. H. 2009. Evaluating greenhouse gas mitigation practices in livestock systems: an illustration of a whole-farm approach. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 147: 367–382.
- Stoate, C., Báldi, A., Beja, P., Boatman, N. D., Herzog, I., van Doorn, A., de Snoo, G. R., Rakosy, L. ja Ramwell, C. 2009. Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe—a review. *Journal of environmental management* 91: 22–46.
- Stoddard, F. L., Helenius, J., Mäkelä, P., Niemi, E., Seppänen, M. ja Turakainen, M. 2007. The role of legumes in bioenergy production. *NJF Report* 3: 26–27.
- Stoddard, F. L., Hovinen, S., Kontturi, M., Lindström, K. ja Nykänen, A. 2009. Legumes in Finnish agriculture: history, present status and future prospects. *Agricultural and Food Science* 18: 191–205.
- The Copenhagen Diagnosis 2009. Updating the World on the Latest Climate Science 2009. The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, 60 s.
- Tiilikkala, K., Hannukkala, A. ja Ooperi, S. 2008. Ilmastonmuutos lisää kasvinsuojelun riskejä. *Maataloustieteen päivät 2008*. http://www.smts.fi/mpol2008/index_tiedostot/Esitelmat/es055.pdf; viitattu 21.12.2009.
- Tike 2008. Maatilarekisteri. <http://www.matilda.fi/>; viitattu 21.12.2009.
- Tike 2009. Käytössä oleva maatalousmaa vuonna 2009 työvoima- ja elinkeinokeskuksittain. <http://www.matilda.fi/>; viitattu 21.12.2009.
- Tilastokeskus 2009. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990–2007. *Katsauksia* 2009/2.
- Trenberth, K. E., Jones, P. D., Ambenje, P., Bojariu, R., Tank, A. K., Easterling, D., Klein Tank, A., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J. A., Rusticucci, M., Soden, B., Zhai, P., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B. ja Tignor, M. 2007. Observations: Surface and Atmospheric Climate. Teoksessa: S. Solomon, H. L. Miller, Jr., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt ja M. M. B. Tignor (toim.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, luku 3, 235–336.
- Tukiainen, M. 2009. Sunrise, sunset, dawn and dusk times around the World! <http://www.gaisma.com/>; viitattu 21.12.2009.

- Tuomenvirta, H., Alexandersson, H., Drebs, A., Frich, P. ja Nordli, P. O. 2000. Trends in Nordic and Arctic Temperature Extremes and Ranges. *Journal of Climate* 13: 977–990.
- Tveito, O. E., Førland, E. J., Alexandersson, H., Drebs, A., Jonsson, T., Tuomenvirta, H. ja Vaarby-Laursen, E. 2001. Nordic climate maps.
- Ulén, B. ja Johansson, G. 2009. Long-term nutrient leaching from a Swedish arable field with intensified crop production against a background of climate change. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Plant Soil Science* 59: 157–169.
- USDA 2004. Russia: Estimated Area of Major Crops. http://www.fas.usda.gov/remote/soviet/crop_area_2004/Russia/rs_areatable.htm; viitattu 21.12.2009.
- USDA 2009. 2007 Census of Agriculture. http://www.agcensus.usda.gov/Publications/2007/Full_Report/.
- Vainio-Mattila, B., Gingström, T., Haaranen, T., Luomanperä, S., Lähde-
tie, P., Oravuo, M., Pietola, K., Suojanen, M., Virolainen, J., Knuuti-
la, K. ja Ovaska, S. 2005. Peltoviljelyn tulevaisuuden linjaukset Suomessa. http://wwwb.mmm.fi/tiedoteliitteet/trm2005_15.pdf; viitattu 21.12.2009.
- Vanhala, P., Karhu, K., Tuomi, M., Sonninen, E., Jungner, H., Fritze, H. ja Liski, J. 2007. Old soil carbon is more temperature sensitive than the young in an agricultural field. *Soil Biology and Biochemistry* 39: 2967–2970.
- Vanhanen, H., Veteli, T. ja Niemelä, P. 2008a. Potential distribution ranges in Europe for *Ips hauseri*, *Ips subelongatus* and *Scolytus morawitzi*, a CLIMEX analysis. *EPPPO Bulletin* 38: 249–258.
- Vanhanen, H., Veteli, T. O. ja Niemelä, P. 2008b. Potential distribution ranges in Europe for *Aeolesthes sarta*, *Tetropium gracilicorne* and *Xylotrechus altaicus*, a CLIMEX analysis. *EPPPO Bulletin* 38: 239–248.
- Vehviläinen, B. ja Huttunen, M. 1997. Climate change and water resources in Finland. *Boreal Environment Research* 2: 3–18.
- Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Heikinheimo, M., Kellomäki, S., Peltola, H., Strandman, H. ja Väisänen, H. 2001. Impact of climate change on soil frost under snow cover in a forested landscape. *Climate Research* 17: 63–72.
- Wang, G. 2005. Agricultural drought in a future climate: results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment. *Climate Dynamics* 25: 739–753.