

## Metsämaan vesitaseen muutokset Suomessa ilmaston muuttuessa

Metsäekologian pro gradu – tutkielma  
maatalous- ja metsätieteiden maisterin tutkintoa  
varten

Helsingin yliopisto  
Metsätieteiden laitos  
2011  
Leila Grönlund

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Metsätieteiden laitos	
Tekijä — Författare — Author Grönlund, Leila Henrietta			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Metsämaan vesitaseen muutokset Suomessa ilmaston muuttuessa			
Oppiaine — Läroämne — Subject Metsäekologia, metsien kasvun ekologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterin tutkielma	Aika — Datum — Month and year Huhtikuu 2011	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 89 sivua	
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p>Muuttuva ilmasto, erityisesti kohoava lämpötila ja hiilidioksidipitoisuus, ei voi olla vaikuttamatta metsien kasvuun Suomessa. Metsätalouden sopeutumistoimilla voidaan pyrkiä lisääntyvän tuotospotentiaalın hyödyntämiseen ja metsätuhoriskien pienentämiseen. Sopeutumistoimien suunnittelemiseksi tarvitaan kuitenkin ensin tietoa siitä, miten ilmasto muuttuu ja mitä vaikutuksia ilmastonmuutoksella on. Työni oli osa vuonna 2005 käynnistettyä Ilmastonmuutoksen sopeutumistutkimusohjelmaa (ISTO). ISTO, ja näin myös oma tutkimukseni, tuottaa siis tietoa, jonka avulla voidaan mukauttaa metsänhoitoa vastaamaan muuttuvia ilmasto-oloja. Työssä tarkasteltiin maan vesipitoisuutta menneessä, nykyisessä ja muuttuvassa ilmastossa. Tavoitteena oli ennustaa, miten kuivuuden esiintyminen muuttuu Suomessa. Lisäksi menneiden kuivien vuosien kasvuvaikutuksia tutkittiin lustomittausten avulla.</p> <p>Vesitasemuutoksia lähdettiin tutkimaan mallilaskelmilla. Laskelmat perustuivat yksinkertaiseen open bucket – tyyppiseen vesimalliin. Mallissa maaperä ajatellaan tilana, johon sadanta ja lumen sulaminen tuovat vettä. Haihdunta ja valunta päinvastaisesti vähentävät sitä. Mallia sovellettiin Metlan yhdeksällä provenienssikoalueella, joihin lukeutui sekä kuusikoita että männiköitä eri kasvupaikoilta. Mallin yksinkertaisuuden takia koealueilta tarvittiin ainaostaan päivittäiset tiedot lämpötilasta, sadannasta, säteilystä ja VPD:stä. Lisäksi tuli selvittää kasvupaikkojen savi- ja hiekkapitoisuudet maaperäparametrien laskemiseksi.</p> <p>Vesimallilla tehtiin kahdet laskelmat. Ensimmäisissä laskettiin päivittäistä vesitasetta vuosina 1961-2008 mitattua sääaineistoa käyttäen. Toisissa laskelmissa käytettiin mitatusta säädatasta modifioitua sääennustetta. Lämpötilaa ja sadantaa oli kasvatettu vastaamaan vuosisadan lopulle tehtyä ennustetta. Näiden kahden laskelman tuloksia vertailtiin keskenään kuivuuspäivien lukumäärän osalta. Malliin oli siis ohjelmoitu kuivuuspäiväindeksi. Indeksien perusteella kuivuutta katsottiin olleen päivänä, jolloin kasveille käyttökelpoisen veden määrä laski alle 4 prosentin ja haihdunta leikkaantui 90 prosentilla normaalitasoon nähden.</p> <p>Kuivuuspäivät lisääntyivät kaikilla provenienssikoalueilla. Suurin muutos olisi tulosten perusteella odotettavissa etelärannikolla ja männyn kasvupaikoilla, jotka jo entuudestaan olivat alueista kuivimpia. Vähäisin muutos olisi taas odotettavissa kuusen kasvupaikoilla, etenkin jos sijainti ei ole aivan eteläisimmässä Suomessa. Kasvuvaikutuksia koskevien tulosten perusteella maan vesipitoisuus ei ole ollut merkittävä lustojen kasvua rajoittava tekijä provenienssikoalueilla menneinä vuosikymmeninä.</p> <p>Kuivuuspäivien määriin ei tule suhtautua absoluuttisina totuuksina, sillä ne ovat määritelmänsä mukaisesti vain suuntaa antavia. Niiden avulla voidaan tehdä ainoastaan päätelmiä metsiköiden ja vuosien välisistä suhteellisista eroista ja kehityssuunnista. Suoria johtopäätöksiä puuston kasvusta tai elinvoimaisuudesta ei pystytä tekemään. Eikä myöskään pystytä arvioimaan, reagoivatko mänty ja kuusi ennustettuihin muutoksiin eri tavoin. Voidaan kuitenkin päätellä, että keskimääräisten vuotuisten kuivuuspäivien lukumäärän kasvu johtaa brutto- ja nettoprimäärituotoksen vähenemiseen. Tätä kautta kuivuuden lisääntyminen alentaa myös kasvua verrattuna tilanteeseen, jossa kuivuuspäivien määrä pysyisi muuttumattomana.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords maaperä, vesitase, kuivuus, kuivuuspäivä, vesimalli, ilmastonmuutos, sopeutumistutkimus			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Helsingin yliopisto, Viikin tiedekirjasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			

## Sisällysluettelo

1 Johdanto .....	5
2 Kirjallisuuskatsaus.....	7
2.1 Ilmastonmuutos .....	7
2.1.1 Miksi ilmasto muuttuu .....	7
2.1.2 Havaitut muutokset globaalitasolla .....	9
2.1.3 Havaitut muutokset Suomessa .....	10
2.1.4 IPCC:n päästöskenaariot .....	10
2.1.5 Ennustetut muutokset globaalitasolla .....	12
2.1.6 Ennustetut muutokset Suomessa .....	13
2.1.7 Vaikutukset metsien kasvuun Suomessa .....	15
2.2 Maaperän kuivuuden vaikutus puustoon .....	18
2.2.1 Maaperän hydrologiset ominaisuudet.....	18
2.2.2 Maaperän hydrologisten ominaisuuksien määrittäminen .....	22
2.2.3 Maaperän kuivuuden vaikutus haihduntaan ja haihdunnan määrittäminen....	24
2.2.4 Maaperän kuivuuden vaikutus yhteytystuotokseen .....	27
2.2.5 Maaperän kuivuuden vaikutus puuston kasvuun .....	28
2.3 Maaperän vesitaseen mallintaminen .....	29
2.4 Johtopäätökset ja työn tarkennetut tavoitteet .....	32
3 Aineisto .....	33
3.1 Tutkimuskohteet.....	33
3.2 Sääaineisto .....	34
3.3 Maaperäaineisto .....	35
3.4 Lustoaineisto.....	36
4 Menetelmät .....	37
4.1 Vesimallin toimintaperiaate .....	37
4.2 Maaperän ominaisuuksien parametrisointi vesimallissa .....	41
4.2.1 Parametrien laskenta .....	41
4.2.2 Lopulliset parametrit.....	42
4.2.3 Maan paksuus .....	47

4.3 Vesimallin kalibrointi .....	48
4.3.1 Kynnysarvon ja kuivuuspäivärajan valinta .....	48
4.3.2 Vakion lehtialan käyttö haihduntamallissa: SPP .....	52
4.3.3 Vakion lehtialan käyttö haihduntamallissa: mallinnetun ja mitatun haihdunnan vertailu .....	56
5 Aineiston analyysi .....	59
5.1 Tilastollinen testaus: lustoindexin ja kuivuuden välinen riippuvuus .....	59
6 Tulokset .....	61
6.1 Maaperän kuivuuden lisääntyminen ilmaston muuttuessa .....	61
6.2 Kuivuuden vaikutus lustojen kasvuun .....	72
7 Tulosten tarkastelu .....	73
7.1 Tutkimusmenetelmän luotettavuus .....	73
7.2 Kuivuuspäivät provenienssikoealueilla vuosina 1961–2008 .....	75
7.3 Kuivuuspäivät provenienssikoealueilla muuttuvassa ilmastossa .....	77
7.4 Kuivuuspäivien keskimäärissä tapahtuneet muutokset .....	78
7.5 Ennustetun kuivuuden lisäyksen vaikutukset .....	80
8 Johtopäätökset .....	81
Kiitokset .....	82
Lähteet .....	83

## 1 Johdanto

Viime vuosikymmenten nopeaa ilmaston lämpenemistä ei voida selittää pelkästään luonnollisilla tekijöillä, vaan ihminen on päästöin ja maankäytön muutoksin vaikuttanut ilmastoon. Suomessa vuonna 2006 käynnistetyn ACCLIM-hankkeen tehtävänä on vastata nykyistä ja tulevaa ilmasto koskevasta tietopalvelusta. Hankkeen vuonna 2009 julkaiseman raportin mukaan vuosikeskilämpötila on noussut Suomessa viimeisen 150 vuoden aikana reilun asteen (Jylhä ym. 2009). IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change) päästöskenaarioihin perustuen hankkeessa on lisäksi ennustettu, että talvilämpötilat nousevat vuosisadan loppuun mennessä noin kuusi astetta ja kesälämpötilat noin kolme astetta. Eikä ilmaston muuttuminen ilmene pelkästään lämpötilojen nousuna, vaan vaikutukset ovat huomattavasti monimuotoisemmat.

Muuttuva ilmasto, erityisesti kohoava lämpötila ja hiilidioksidipitoisuus, ei voi olla vaikuttamatta metsien kasvuun Suomessa. Tutkimukset osoittavatkin, että kasvu tulee kiihtymään ja tuotospotentiaali kohoamaan (Kellomäki ym. 2005). Mutta myös abioottisten ja bioottisten tuhojen odotetaan yleistyvän. Muun muassa maaperän kuivuus tulisi lisääntymään, ja tämä näkyisi esimerkiksi kuusen kasvun taantumisena Etelä-Suomessa. Tutkimukset osoittavatkin selvästi kuivuuden ja yhteytystuotoksen välisen negatiivisen korrelaation haihdunnan säätelyn kautta (Krishnan ym. 2006, Barr ym. 2007, Granier ym. 2007, Welp ym. 2007, Holst ym. 2008). Lisäksi on esitetty tutkimustuloksia, joiden mukaan kuivat vuodet pystytään paikantamaan lustojen kasvun kautta (Andreassen ym. 2006, Bigler ym. 2006, Pichler & Oberhuber 2007, Jyske ym. 2009, Thabeet ym. 2009).

Metsätalouden sopeutumistoimilla voidaan pyrkiä lisääntyvän tuotospotentiaalihin hyödyntämiseen ja metsätuhoriskien pienentämiseen. Sopeutumistoimien suunnittelemiseksi tarvitaan kuitenkin ensin tietoa siitä, miten ilmasto muuttuu ja mitä vaikutuksia ilmastonmuutoksella on. Tämän jälkeen voidaan vasta alkaa suunnitella, mitkä olisivat niitä konkreettisia toimia, joilla pienentää haittoja ja saavuttaa hyötyjä. Sopeutumistutkimus luo pohjan mukautuvalle metsänhoidolle, millä varmistetaan metsien hyvä kunto myös tulevaisuudessa sekä kiihtyneen kasvun hyödyntäminen

taloudellisesti. Tosin tulevaisuudessa metsänhoidolla tuskin voidaan pyrkiä pelkästään puuntuotoksen ja taloudellisen tuloksen maksimointiin. Mukautuvan metsänhoidon kehitystä ohjaavat lisäksi tavoitteet muun muassa hiilen sidonnassa ja monimuotoisuuden säilyttämisessä.

Työni on osa vuonna 2005 käynnistettyä Ilmastonmuutoksen sopeutumistutkimusohjelmaa (ISTO). Ohjelman tavoitteena on ollut tuottaa käytännön sopeutumistoimien suunnitteluun tarvittavaa tietoa. Yhtenä tutkimuksen kohteena on ollut metsätalous ja siihen liittyen metsikön kasvattaminen muuttuvassa ilmastossa. ISTO, ja näin myös oma tutkimukseni, tuottaa siis tietoa, jonka avulla voidaan mukauttaa metsänhoitoa vastaamaan muuttuvia ilmasto-oloja.

Työssäni tarkastellaan maan vesipitoisuudessa tapahtuvia muutoksia menneessä, nykyisessä ja muuttuvassa ilmastossa. Tarkoituksena on selvittää, onko kuivuuden esiintyminen Suomessa nykyistä todennäköisempää vuosisadan lopulla ja tulisiko tämä huomioida metsänhoidon suunnittelussa ja kasvun mallintamisessa. Erityisesti puulajisuhteissa ennustetaan tapahtuvan muutoksia lisääntyvän kuivuuden seurauksena, mikä vaikuttaa metsänhoitoketjussa puulajivalintaan (Carter 2007).

Vesitasemuutoksia lähdetään tutkimaan tekemällä mallilaskelmia. Mallit ja mallinnus ovat tärkeitä työvälineitä, kun pyritään saamaan tietoa metsien kasvusta ja kehityksestä muuttuvassa ilmastossa (Kellomäki ja Peltola 2005). Muuten ei ole mahdollista ennustaa tulevaa. Tutkimuskohteina ovat Metlan provenienssikoealueet, joihin lukeutuu männiköitä sekä kuusikoita eri puolilla Suomea. Tämä mahdollistaa tulosten vertailun eri alueiden kesken, jotka eroavat toisistaan sekä sääolosuhteiltaan että maaperän ominaisuuksiltaan. Tutkimuksessa arvioidaan myös menneinä vuosikymmeninä esiintyneiden kuivien vuosien näkymistä puuston paksuuskasvussa.

Tutkimuksen päätyttyä pystytään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

- 1) Mihin suuntaan kuivuuden esiintyminen tulee kehittymään provenienssikoealueilla muuttuvan ilmaston vaikutuksesta verrattuna nykyilmastoon?
- 2) Miten kehitys vaihtelee eri metsiköiden ja vuosien välillä?

- 3) Minkälaisia muutoksia keskimäärin on odotettavissa provenienssikoealueilla ja Suomessa?
- 4) Näkyvätkö nykyilmaston kuivat vuodet provenienssikoealueiden metsien paksuuskasvussa?

Seuraavaksi työn kirjallisuuskatsauksessa kerrotaan lyhyesti, miksi ilmastomme muuttuu, kuinka se on jo muuttunut ja kuinka muutoksen ennustetaan jatkuvan. Koska työssä tarkastellaan nimenomaan maan vesipitoisuuden muutoksia muuttuvassa ilmastossa, ovat maaperän hydrologiset ominaisuudet myös kattavasti esitelty. Viimeisenä kirjallisuuskatsauksessa linkitetään maaperä ja puusto yhteen sekä esitellään eri tapoja mallintaa maan vesitasetta. Näiden vesimallien joukossa on myös tähän tutkimukseen valittu malli, jota kirjallisuuskatsauksen ja aineiston esittelyn jälkeen kuvataan yksityiskohtaisemmin. Kun tutkimuksen menetelmä on käsitelty, päästään itse mallilaskelmien tuloksiin ja niiden tarkasteluun.

## **2 Kirjallisuuskatsaus**

### **2.1 Ilmastonmuutos**

#### **2.1.1 Miksi ilmasto muuttuu**

Ilmasto määräytyy perimmiltään maapallolle saapuvan ja pidättyvän auringon säteilyn määrän perusteella. Noin 70 % säteilystä heijastuu takaisin avaruuteen, kun taas jäljelle jäävä 30 % absorboituu maahan, merien pintavesiin sekä ilmakehään. Absorboitunut säteilyenergia muuttuu lämmöksi, minkä seurauksena pitkäaaltoista lämpösäteilyä alkaa emittoitua kohti avaruutta. Lämpösäteilyn sisältämä energia ei kuitenkaan läpäise ilmakehää yhtä helposti kuin auringon säteilyenergia. Ilmakehän kykyä pidättää lämpösäteilyä karkaamasta avaruuteen kutsutaan kasvihuoneilmiöksi. Kasvihuoneilmiön takia maapallon lämpötila on suotuisa elämiselle.

Historian kuluessa ilmastossa on esiintynyt paljon luonnollisista tekijöistä johtuvaa vaihtelua. Miljoonien vuosien aikaskaalassa muutoksia ovat aiheuttaneet merivirtoja ohjailevien mannerlaattojen liikkeet. Maapallon kiertoradan ja pyörimisakselin kallistuskulman pieniä heilahteluja pidetään puolestaan perimmäisenä syynä jääkausien esiintymiseen. Lyhyellä aikaskaalalla ilmastonvaihteluita ovat aiheuttaneet voimakkaat tulivuorenpurkaukset ja muutokset auringon toiminnassa. Viime vuosikymmenten nopeaa ilmaston lämpenemistä ei kuitenkaan enää voida selittää pelkästään luonnollisilla tekijöillä.

IPCC:n (The Intergovernmental Panel of Climate Change) vuonna 2007 julkaistussa neljännessä arviointiraportissa (AR4) on havaintoihin ja ilmaston mallitukseen perustuvan tutkimustiedon avulla estimoitu eri pakotetekijöiden merkitystä ilmaston nopeassa lämpenemisessä (Forster ym. 2007). Pakotetekijät pystyvät muuttamaan maapallolle saapuvan tai sieltä poistuvan säteilyenergian määrää eli toisin sanoen vaikuttamaan ilmastojärjestelmän lämpötasapainoon. Pakotetekijöihin luetaan kasvihuonekaasut, pienhiukkaset eli aerosolit, maanpinnan heijastuskyky ja auringon säteily. Vertailu on tehty teollistumista edeltävän ajan (aika ennen vuotta 1750) ja vuoden 2005 välillä. Merkittävimmiksi ilmastoa lämmittäviksi tekijöiksi nousevat hiilidioksidi, metaani, typpioksiduuli ja alailmakehän otsoni. Hiilidioksidipitoisuus on esimerkiksi kasvanut 280 ppm:stä 379 ppm:ään, metaanipitoisuus 715 ppb:stä 1774 ppb:hen ja typpioksiduuli 270 ppb:stä 319 ppb:hen (Forster ym. 2007). Hiilidioksidipäästöt ovat valtaosin peräisin fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja maankäytön muutoksista, kun taas metaani- ja typpioksiduulipäästöjen suurin aiheuttaja on maatalous (IPCC 2007). Troposfäärin otsonipitoisuuden lisääntyminen johtuu otsonin muodostumisesta edistävien kaasujen, kuten hiilivetyjen ja typen oksidien, päästöistä (IPCC 2007). IPCC:n arviointiraportissa (AR4) todetaan, että 1900-luvun puolivälin jälkeen havaittu maapallon keskilämpötilan nousu johtuu hyvin todennäköisesti valtaosin ihmiskunnan tuottamien päästöjen aiheuttamasta kasvihuonekaasujen pitoisuuksien lisääntymisestä.



### 2.1.2 Havaitut muutokset globaalitasolla

Ilmaston lämpeneminen on kiistaton tosiasia. Väitettä tukevat havainnot, jotka osoittavat että ilman ja merten keskimääräiset lämpötilat ovat nousseet. Lisäksi jää- ja lumipeitteet ovat sulaneet laajalti ja keskimääräinen merenpinnan taso on noussut (IPCC 2007).

Lämpötilan keskimääräinen nousu on ollut 0,74 °C vuosina 1906–2005 ja tähän satavuotiseen jaksoon verrattuna viimeisen viidenkymmenen vuoden nousunopeus on ollut lähes kaksinkertainen. Lämpötilan kohoaminen ei siis ole ollut tasaista, vaan on vaihdellut kausittain. Ensimmäinen selkeä nousu tapahtui välillä 1910–1940 (0,35 °C), jota seurasi lievä viileneminen (0,1 °C). 1970-luvulla alkoi taas nopea lämpötilan kasvu (0,55 °C), mikä kesti aina vuoden 2006 loppuun saakka (Trenberth ym. 2007).

Vuoden 1961 jälkeen tehdyt havainnot osoittavat, että ilman lämpenemisen lisäksi myös valtamerien keskimääräinen lämpötila on kohonnut. Välillä 1961–2003 nousu on ollut 0,1 C° syvyydellä 0-700 m ja 0,037 C° syvyydellä 0-3000 m (Bindoff ym. 2007).

Havainnot osoittavat, että lämpötilojen nousu on johtanut maailmanlaajuiseen jää- ja lumipeitteiden vähenemiseen. Erityisesti tämä on ollut havaittavissa 1980-luvulta lähtien ja viime vuosikymmenen aikana sulaminen on entisestään nopeutunut. Useimmat vuoristojäätiköt pienenevät ja lumiraja vetäytyy yhä aikaisemmin keväällä. Arktisen alueen merijää pienenee jatkuvasti, samoin Grönlannin ja läntisen Etelänapamantereen mannerjää. Jäätiköiden ja jääpeitteiden sulamisen on arvioitu nostaneen merenpinnan tasoa 1,2 mm vuodessa ajanjaksolla 1993–2003. Lisäksi ikeroudan, kausittain jäässä olevien maiden sekä jokien ja järvien jäiden on raportoitu vähentyneen (Lemke ym. 2007).

Ilmastonmuutoksen seurauksena myös merenpinnan taso nousee. On arvioitu, että 1900-luvulla pinnan taso nousi keskimäärin 1,7 mm vuodessa. 1990-luvun alusta saatavilla olevien satelliittihavaintojen perusteella merenpinta on noussut vuodesta 1993 lähtien noin 3 mm vuodessa, mikä on huomattavasti nopeammin kuin keskimäärin edellisen puolivuosisadan aikana. Kaksi suurinta syytä pinnan nousuun ovat merten lämpölaajeneminen sekä jo aiemmin mainittu jääpeitteiden ja jäätiköiden sulaminen (Bindoff ym. 2007).

### **2.1.3 Havaitut muutokset Suomessa**

Ilmatieteen laitos ja Suomen Tiedeseura aloittivat järjestelmälliset säähavainnot Suomessa vuonna 1846. Niiden perusteella keskilämpötilan vaihtelut tunnetaan melko tarkasti noin 150 vuoden ajalta. Ilmatieteen laitoksen ja Helsingin yliopiston yhteisen ACCLIM-hankkeen raportissa (Jylhä ym. 2009) kerrotaan vuosikeskilämpötilan kohonneen tänä aikana reilun asteen. Vuodenajoista eniten on lämmennyt kevät (noin 2 °C) ja vähiten syksy sekä kesä (noin 0,5 °C). Talven keskilämpötila on kohonnut asteen verran. FINSKEN-hankkeen, joka oli osa Suomen Globaalimuutoksen tutkimusohjelma FIGAREa, yhteydessä tehdyn katsauksen tulokset puolestaan osoittavat, että vuosittaiset keskilämpötilat ovat nousseet Suomessa noin 0,7 °C 1900-luvulla (Carter 2007). Tulos poikkeaa ACCLIM-hankkeen vastaavasta, mutta ajanjaksojen pituudessa on 50 vuotta eroa. Myös Carter raportoi, että voimakkain lämpeneminen on tapahtunut keväällä ja vähäisin syksyllä ja kesällä. Keskimääräiset päivän minimilämpötilat ovat nousseet vastaavia maksimilämpötiloja enemmän, minkä arvellaan johtuvan samanaikaisesta pilvisyyden lisääntymisestä (Carter 2007).

Pitkäaikaiset lämpötilamittaukset ja historialliset dokumentit Fennoskandiasta viimeisen 300 vuoden ajalta osoittavat, että talvet ja kevät ovat olleet 1990-luvulla poikkeuksellisen leutoja. Tämän uskotaan liittyvän epätavallisen voimakkaisiin läntisiin ilmvirtoihin talvikuukausien aikaan. Etelä-Suomessa on myös havaittu lumipeitteen keston sekä lumen määrän vähentyneen menneinä vuosikymmeninä. Päinvastoin kokonaissademäärien kehityksessä ei ole nähtävissä mitään vahvaa suuntaa 1900-luvun aikana. Myrskyindeksi, mikä perustuu voimakkaiden matalapaineiden esiintymisfrekvenssiin, on kohonnut jonkin verran 1960-luvulta lähtien (Carter 2007).

### **2.1.4 IPCC:n päästöskenaariot**

Kasvihuonekaasupäästöjen kehitystä ei voida varmasti tietää, vaan niiden suhteen voidaan antaa ainoastaan erilaisia arvioita. IPCC on julkaissut vuonna 2000 (Nakicenovic ym.) raportin, missä esitellään useita toisistaan poikkeavia skenaarioita päästöjen

kehityksestä. Raportin laatijoiden mukaan näitä päästöskenaarioita ei pidä ajatella ennusteina, vaan ennemminkin vaihtoehtoisina näkemyksinä siitä, mihin suuntaan pahimmillaan tai parhaimmillaan ollaan menossa. Skenaariot kattavat laajasti eri päästöjä ajavat tekijät: aina väestötieteellisistä tekijöistä teknologisiin ja taloudellisiin tekijöihin. Niissä pyritään mahdollisimman kattavasti huomioimaan kasvihuonekaasupäästöjen lähteissä ja nieluissa tapahtuvat muutokset, joita esimerkiksi tietyt maankäytön tai energian tuotannon muutokset voivat aiheuttaa.

Vaihtoehtoisia skenaarioita voisi luoda rajattomasti, mutta IPCC:n raportissa (Nakicenovic ym. 2000) ongelmaa on lähestytty muodostamalla alkuun neljä erilaista ns. skenaarioperhettä: A1, A2, B1 ja B2. Näistä A1 jakautuu vielä kolmeen alaryhmään. Jokainen kuudesta skenaarioperheestä sisältää tietynlaisen kuvauksen tulevasta kehityksestä. Tämän yleisen kuvauksen ympärille on edelleen mallintamalla luotu useampia tarkempia tulkintoja ja määrittämiä. Tämä monipuolinen joukko yhden ”kertomuksen” ympärillä muodostaa skenaarioperheen. Kuvaukset vaihtelevat nopeasta taloudellisesta kasvusta ja teknologisesta kehityksestä aina korkeaan ympäristön suojeluun, alhaisesta maapallon väkiluvusta korkeaan sekä vähäisistä kasvihuonekaasupäästöistä runsaisiin.

Nakicenovicin ym. mukaan A1-skenaarioperheen kuvaamaa tulevaisuutta leimaa nopea talouskasvu ja teknologinen kehitys sekä hidas väestön kasvu. A1 jakautuu kolmeen alaryhmään sen mukaan, kuinka energian tuotanto kehittyy (A1B, A1T ja A1F1). A2-skenaarioperheen kuvauksessa teollisuus- ja kehitysmaiden erot tulevat säilymään suurina, toisin kuin A1-skenaarioperheen kuvauksessa, jossa kehityserojen odotetaan kaventuvan ja tulonjaon tasaantuvan (IPCC 2007). Lisäksi A2:ssa väestön kasvu on nopeaa ja taloudellinen sekä teknologinen kehitys hitaampaa kuin A1:ssä. B1 kuvaa maailmaa, jossa väestön kasvu on hidasta ja kehitys etenee nopeasti kohti palvelu- ja informaatiotaloutta. B1:ssä korostuu globaali taloudellisen, sosiaalisen ja ekologisen kestävyden edistäminen. B2:ssa fokus on B1:n tavoin taloudellisessa, sosiaalisessa sekä ekologisessa kestävydessä, mutta siihen pyritään paikallisella tasolla. Väestön kasvu on maltillista, taloudellinen kehitys kohtalaista ja teknologinen kehitys monipuolista, mutta toisaalta hitaampaa kuin A1:ssä tai B1:ssä. Tiivistettynä voidaan sanoa, että A1:ssä päästöt ovat hyvin suuret, kun taas A2:ssa melko suuret (Jylhä ym. 2005). B1:ssä päästöt

ovat vuosisadan alkupuoliskolla kasvavat, mutta kääntyvät sitten laskuun, kun taas B2:ssa ne ovat jatkuvasti hitaasti lisääntyvät.

Päästöskenaarioilla on kolme tärkeää merkitystä (Nakicenovic ym. 2000). Ne tarjoavat ensinnäkin tietoa, minkä avulla voidaan arvioida eri päästötasojen ilmasto- ja ympäristövaikutuksia. Toiseksi, saman tiedon avulla voidaan selvittää ilmastonmuutoksen hillitsemis- ja sopeutumismahdollisuuksia ja niiden kustannuksia. Ja kolmanneksi, skenaarioiden tarjoama informaatio toimii apuna neuvotteluissa, joissa keskustellaan mahdollisista päästövähennystavoitteista.

### 2.1.5 Ennustetut muutokset globaalitasolla

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia koskevat ennusteet vaihtelevat sen mukaan, mitä päästöskenaariota käytetään tiedonlähteenä ennustuksia tehtäessä. Tämä nähdään seuraavassa taulukossa, jossa on kuvattu maapallon keskilämpötilan ja merenpinnan tason nousu tämän vuosisadan loppuun mennessä.

Taulukko 1. Maapallon pintalämpötilan ja merenpinnan tason keskimääräinen nousu (IPCC 2007).

	Lämpötilamuutos (C° vuosina 2090–2099 verrattuna vuosiin 1980–1999)		Merenpinnan tason nousu (m vuosina 2090–2099 verrattuna vuosiin 1980–1999)
Skenaario	Paras arvio	Epävarmuusväli	Epävarmuusväli
B1	1,8	1,1–2,9	0,18–0,38
A1T	2,4	1,4–3,8	0,20–0,45
B2	2,4	1,4–3,8	0,20–0,43
A1B	2,8	1,7–4,4	0,21–0,48
A2	3,4	2,0–5,4	0,23–0,51
A1F1	4	2,4–6,4	0,26–0,59

Lämpötilojen ja merenpinnan tason nousun lisäksi lumipeitteen ja merijään pinta-alan ennustetaan pienenevän ja ikiroudan sulavan entistä voimakkaammin kesäisin. Lisäksi IPCC:n raportissa (2007) pidetään todennäköisenä, että korkeat lämpötilat, helleaallot ja kovat rankkasateet yleistyvät. Trooppisten valtamerien pintalämpötilan kohoaminen saattaa puolestaan johtaa trooppisten hirmumyrskyjen voimistumiseen. Raportin mukaan sademäärien ennustetaan lisääntyvän korkeilla leveysasteilla, kun taas subtrooppisella alueella sademäärät tulevat todennäköisesti vähenemään.

### **2.1.6 Ennustetut muutokset Suomessa**

Ilmatieteen laitoksen (Ilmastonmuutoksen tutkimusyksikkö), Helsingin yliopiston (Fysiikan laitos, Ilmakehätieteiden ja geofysiikan osasto) sekä Suomen ympäristökeskuksen (Gloaalimuutoksen tutkimusohjelma) yhteisen ACCLIM-hankkeen tehtävänä on vastata Ilmastonmuutoksen sopeutumishjelman (ISTO) nykyistä ja tulevaa ilmastoa koskevasta tietopalvelusta (Jylhä ym. 2009). Hankkeen esittelyssä tarkennetaan vielä, että tarkoituksena on ollut päivittää Suomea koskevat ilmastonmuutosskenaariot IPCC:n 4. arviointiraporttia varten tehtyjen ilmastomallikokeiden tulosten avulla. ACCLIM-hankkeen tiimoilta julkaistiin vuonna 2009 raportti Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten (Jylhä ym.). Raportissa esitetyt arviot lämpötilojen sekä sademäärien kasvusta ovat olleet käytössä myös tässä tutkielmassa tehdyissä laskelmissa.

Suomessa lämpötilan ja sademäärän ennustetaan lisääntyvän sekä maan pohjois- että eteläosissa, tosin jonkin verran nopeammin pohjoisosissa. Maantieteellistä eroa suurempi on kuitenkin ero kesän ja talven välillä. Muutosten talvella arvioidaan olevan selvästi kesää voimakkaampia (Jylhä ym. 2009). Taulukossa 2 on esitetty Suomen keskilämpötilan ja sademäärän muutokset kuukausittain vuosina 2070–2099 verrattuna vuosiin 1971–2000. Jylhän ym. mukaan luvut perustuvat 19 maailmanlaajuisen ilmastomallin tuloksiin, ja niitä laadittaessa A1B-, A2- ja B1-päästöskenaariot on oletettu yhtä todennäköisiksi. Paras arvio vastaa mediaaniarvoa ja epävarmuusvälille arvio osuu 90 %:n varmuudella.

Taulukko 2. Suomen keskilämpötilan ja sademäärän muutokset (Jylhä ym. 2009).

	Lämpötilamuutos (C° vuosina 2070–2099 verrattuna vuosiin 1971–2000)		Sademäärän muutos (% vuosina 2070–2099 verrattuna vuosiin 1971– 2000)	
Kuukausi	Paras arvio	Epävarmuusväli	Paras arvio	Epävarmuusväli
Tammikuu	6,4	3,5-9	22	9-39
Helmikuu	6	2,9–8,9	24	8-43
Maaliskuu	5	2,6–7,4	17	4-33
Huhtikuu	3,8	1,6–6,1	15	0-33
Toukokuu	3,4	1-5,9	14	1-28
Kesäkuu	3	1-5,4	12	0-27
Heinäkuu	2,9	0,6-5,3	10	0-22
Elokuu	2,8	0,3-5,4	9	-1-19
Syyskuu	3	1,2-5	10	-3-23
Lokakuu	3,4	1,8–5,2	13	4-23
Marraskuu	5	2,6–7,8	23	10–35
Joulukuu	6	2,8–9,1	24	10–41

Ennen Jylhän ym. julkaisemaa raporttia (2009), lämpötilan ja sademäärän muutosta koskevia arvioita on esitetty FINADAPT-hankkeen julkaisuissa. FINADAPT-hankkeen tarkoituksena oli tutkia Suomen sopeutumista ilmastonmuutoksen mahdollisiin vaikutuksiin (Carter 2007). Tutkimuksissa oli mukana 11 tutkimuslaitosta ja tutkimuksia tehtiin vuosina 2004–2005 (Carter 2007). Ruosteenojan ym. vuonna 2005 julkaistussa raportista on esimerkiksi luettavissa, että talven (joulukuu-helmikuu) keskilämpötila tulee olemaan vuosina 2070–2099 6° astetta korkeampi kuin vuosina 1971–2000. Vastaava arvio kesän (kesäkuu-elokuu) osalta on 3° astetta. Tulokset on saatu A2-päästöskenaariota käyttämällä, missä oletetaan että päästöt tulevat pysymään suurina. B1-skenaarion käyttö laskelmissa johti pari astetta alhaisempiin muutoksiin, mutta tässä päästöjen oletetaan olevan A1:tä pienemmät. Sen lisäksi että Ruosteenoja ym. ovat laskelmissa erotelleet skenaariot toisistaan, tulokset myös perustuvat suppeampaan ja osaksi vanhempaan ilmastomalliaineistoon kuin Jylhällä ym. Lämpötilaennusteet eivät siltikään poikkea ACCLIM-hankkeen tuloksista kovin paljon. Sademäärät kasvavat Ruosteenojan ym. raportissa A2-skenaariota käyttämällä talvella 20–25 % (Lounais-Suomessa 15 %) ja kesällä 0-5 % (Lounais-Suomessa sademäärät saattavat jopa vähentyä ja aivan pohjoisissa osissa lisääntyä 10 %). Eroa ACCLIM-hankkeen raporttiin syntyy kesän

osalta, sillä Jylhän ym. mukaan sademäärät kasvavat kesäkuukausina kymmenisen prosenttia, eivätkä suinkaan vähene tai pysy muuttumattomina. Jylhä ym. ovat myös tutkineet, ilmenevätkö kasvavat sademäärät lisääntyvinä sadepäivinä vai voimakkaampina sateina. Talvella sadepäivät yleistyvät sekä yksittäisten sadepäivien sateet voimistuvat. Samalla talven pisimmät sateettomat jaksot lyhenevät. Myös kesällä sateet voimistuvat, mutta epävarmaa on, lisääntyvätkö vai harventuvatko sadepäivät.

ACCLIM-hankkeen raportissa kerrotaan lisäksi ilmaston muutoksen vaikutuksista vuodenaikojen pituuteen Suomessa. Terminen talvi (vuorokauden keskilämpötila pysyy 0° asteen alapuolella) tulee lyhenemään voimakkaasti, Lounais-Suomessa jopa yli neljällä kuukaudella vuosisadan loppuun mennessä. Tämä näkyy myös siinä, että lumipeite tulee kutistumaan koko maassa. Kesä puolestaan pitenee lähes kaikkialla kuukaudesta puoleentoista kuukauteen ja samalla pitenee myös terminen kasvukausi (vuorokauden keskilämpötila yli +5° astetta). Esimerkiksi A1B-skenaarion (melko suuret päästöt) toteutuessa kasvukausi pitenisi Manner-Suomessa 1-1,5 kuukautta, lounaisaari-  
stossa jopa tätäkin enemmän.

### **2.1.7 Vaikutukset metsien kasvuun Suomessa**

Ilmastonmuutos on uhka metsäekosysteemien toiminnalle, minkä vuoksi muuttuvan ilmaston vaikutuksia on tutkittu viime vuosien aikana runsaasti. Metsät ovat kuitenkin haasteellinen tutkimuskohde pitkäikäisyytensä vuoksi: kokeellista tietoa ilmastonmuutoksen vaikutuksista puiden koko elinkierron ajalta on mahdotonta saada (Vapaavuori ym. 2005). Tutkimuksia esimerkiksi puiden fysiologisista vasteista hiilidioksidipitoisuuden nousuun on helppo toteuttaa, mutta kun halutaan yleistää näiden lyhytaikaisten kokeiden tuloksia laajoille alueille ja yli pitkien ajanjaksojen, mallinnus lienee ainoa käyttökelpoinen tapa (Kellomäki ja Peltola 2005). Kellomäki ym. (2005) ovat julkaisseet jo aiemmin mainitun FINADAPT-hankkeen yhteydessä kattavan raportin siitä, kuinka ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan Suomen metsiin ja metsäekosysteemeihin sekä niiden hoitoon. Tulokset perustuvat ekosysteemimallilla (Sima) tehtyihin laskentoihin.

Lämpösummalla kuvataan usein metsien kasvuolosuhteita ja Kellomäen ym. mukaan lämpösumma tulee kasvamaan vuosisadan loppuun mennessä (2070–2099) 50–90 % nykyiseen verrattuna. Kasvu tulee olemaan suurinta maan pohjoisosissa. Tämä jo ennakoiki positiivisia tuloksia metsien kasvun kiihtymisen suhteen ja Kellomäki ym. raportoivatkin, että kokonaiskasvu saattaa nousta Etelä-Suomessa 76 miljoonaan kuutioon vuodessa ja Pohjois-Suomessa 42 miljoonaan kuutioon vuodessa vuosisadan loppuun mennessä. Tämä tarkoittaisi 118 miljoonan kuution vuosikasvua, mikä on nykytilanteeseen verrattuna 36 miljoonaa kuutiota enemmän. Parempi kasvu indikoi tietenkin myös suurempia hakkuumääriä. Etelä-Suomessa potentiaaliset hakkuumäärät voivat kasvaa 56 prosentilla ja Pohjois-Suomessa jopa 170 prosentilla (Kellomäki ym. 2005). Vuosisadan lopulla Suomessa voitaisiin vuosittain hakata 83 miljoonaa kuutiota nykyistä enemmän.

Kasvun lisääntyminen johtuu ensinnäkin lämpötilan kohoamisesta. Tämä korostuu erityisesti Pohjois-Suomessa, missä lämpötila nykyisin rajoittaa selvästi puiden kasvua (Peltola ja Kellomäki 2005). Lämpötilan nousun seurauksena kasvukausi pitenee, ja etenkin keväällä kasvun odotetaan käynnistyvän nykyistä aiemmin. Keväällähän riittää valoa, mutta lämpötila rajoittaa pitkän aikaa fotosynteesiä. Lämpötila myös kasvattaa fotosynteesinopeutta. Toiseksi hiilidioksidipitoisuuden nousu kiihdyttää omalta osaltaan puuston fotosynteesiä, sillä nykyilmastossa hiilidioksidipitoisuus on yhteytystä rajoittava tekijä. Männyn fysiologisia vasteita hiilidioksidipitoisuuden sekä lämpötilan nousuun tutkittiin Kellomäen ja Peltolan vuonna 2005 Mekrijärvellä tehdyissä kokeissa. Tulokset osoittavat että hiilidioksidin ja lämpötilan samanaikainen kohottaminen vaikutti kokonaisfotosynteesin määrään kahdella tavalla: kasvukausi piteni ja fotosynteesinopeus kasvoi. Näiden kahden tekijän yhtäaikainen nosto kasvatti myös neulaspinna-alaa, mikä osaltaan vaikutti kokonaisfotosynteesiin. Kasvava hiilidioksidipitoisuus saattaa myös parantaa puiden veden käytön tehokkuutta, sillä konsentraatioero lehden ja ilman hiilidioksidipitoisuuden välillä kasvaa ja puut saavat yhteyttämiseen tarvitsemansa hiilidioksidin pienemmällä ilmarakojen aukioloasteella kuin aiemmin (Kellomäki ja Peltola 2005). Myös Kellomäen ym. (2005) ennustama typen määrän kasvu maaperässä voi lisätä metsien tuotosta tulevaisuudessa, sillä puut kasvattavat juuristoa typen saatavuuden mukaan ylläpitääkseen lehtien typpitasoa. Mitä enemmän typpeä maaperässä, sitä



enemmän fotosynteesituotosta voidaan ohjata rungon ja lehtien kasvuun (Helmisaari ym. 2007, Mäkelä ym. 2008).

Hiilidioksidipitoisuuden nousun veden käytön tehokkuutta parantavalla vaikutuksella voi olla merkitystä ilmastonmuutoksen myötä, sillä kasvukauden aikaisen kuivuuden ennustetaan lisääntyvän Suomessa (Kellomäki ym. 2005, Jylhä ym. 2009). ACCLIM-hankkeen raportissa (Jylhä ym. 2009) esitetään tuloksia, joiden mukaan Etelä-Suomessa (länsirannikkoa lukuun ottamatta) sateet voimistuvat, mutta samalla sadepäivät harvenevat. Tämä, yhdistettynä lämpötilojen kohoamiseen ja sen seurauksena kiihtyvään haihduntaan, saattaisi johtaa maaperän nykyistä voimakkaampaan kuivumiseen. Kesäisin saattaisivat siis tulevaisuudessa vuorotella kuivuus sekä rankkasateet, vaikka kokonaissademäärässä ei juuri tapahtuisi muutosta. Tätä tukevat Kellomäen ym. (2005) tutkimustulokset kasvukauden aikaisten kuivuuspäivien määrän kasvusta. Tuloksissa kuivuuspäivät tulisivat lisääntymään eteläisessä Suomessa jopa 90 % ja pohjoisessakin jopa useampia kymmeniä prosentteja (Kellomäki ym. 2005).

Kuivuuden vaikutukset näkyvät esimerkiksi puulajisuhteiden ennustetuissa muutoksissa (Kellomäki ym. 2005). Kuusen kasvu tulee Kellomäen ym. tutkimusten mukaan taantumaan voimakkaasti Etelä-Suomessa, kun taas mänty ja lehtipuut valtaavat nykyistä enemmän metsäalaa. Kuusen uskotaan tulevaisuudessa menestyvän eteläisessä Suomessa ainoastaan kaikkein rehevimmillä ja ravinteikkaimmilla alueilla. Etelä-Suomessa kuusen tulevat korvaamaan sekä mänty että koivu, kun taas Pohjois-Suomessa, jossa kuusen ennustetaan myös hieman taantuvan, lähinnä mänty. Vuosisadan lopussa puulajijakauma tulisi Suomessa olemaan mänty 68 %, kuusi 12 % ja koivu 20 %. Vastaavia tutkimustuloksia, joissa lehtipuut osoittavat parempaa kuivuuden sietokykyä kuin havupuut, on raportoitu myös esimerkiksi Sveitsissä ja Ruotsissa (Weber ym. 2007, Bolte ym. 2010). Sveitsissä tammi (*Quercus pubescens*) on alkanut valtaamaan kasvitilaa männyltä (*Pinus sylvestris*), kun taas Ruotsissa pyökki (*Fagus sylvatica*) kuuselta (*Picea abies*).

Suomessa kuivuutta esiintyy nykyilmastossa harvoin, koska vuotuinen sadanta on suurempi kuin vuotuinen haihdunta. Vuosisadan loppupuolella kuivuuden esiintyminen voi kuitenkin olla ylempää, erityisesti eteläisessä Suomessa. Sen lisäksi, että Kellomäen

ym. tutkimuksessa (2005) kuivuuden väitetään muuttavan puulajisuhteita, on sillä merkitystä myös puuston kasvun kannalta yleensä.

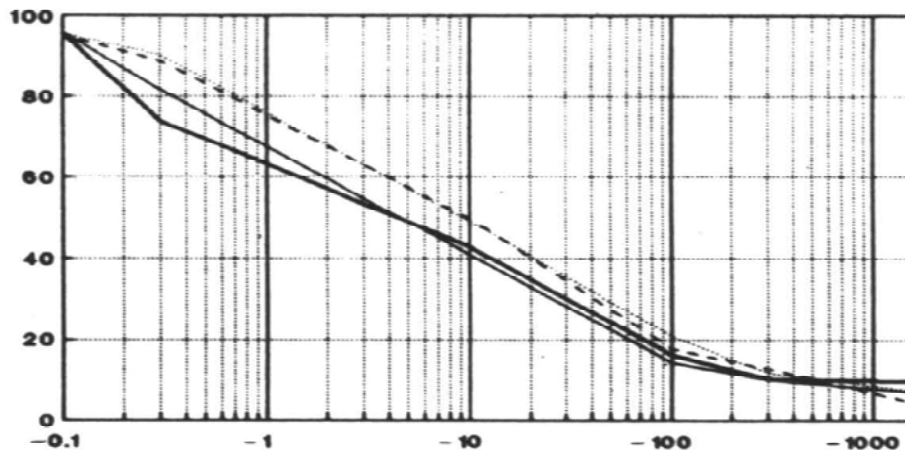
## **2.2 Maaperän kuivuuden vaikutus puustoon**

### **2.2.1 Maaperän hydrologiset ominaisuudet**

Puut ottavat kasvuun tarvitsemansa veden huokoisesta maaperästä, joten maaperän vesivarastoilla on suuri merkitys niiden kehityksessä. Lisäksi maaveden merkitys ravinteiden kuljettajana on ensisijainen. Sateet ja lumen sulamisvedet täyttävät vesivarastoja, kun taas kasvillisuuden haihdunta pienentää niitä. Suomessa sateet ovat jakautuneet suhteellisen tasaisesti koko vuodelle, mutta haihdunta vaihtelee vuodenajoin ja aiheuttaa näin ollen muutoksia vesivarastojen tilassa. Myöhään syksyllä ja talvella haihdunnan määrä on vähäistä, joten vesivarastot täyttyvät ennen kevään tuloa. Kesällä haihdunta puolestaan ylittää sademäärän, minkä seurauksena vesivarastot pienenevät. Etenkin tähän aikaan vuodesta maaperän hydrologiset ominaisuudet pääasiassa säätelevät veden liikettä maassa (Jauhiainen 2004). Tärkeimmät näistä puuston veden saannin kannalta ovat maaperän vedenpidätyskyky sekä vedenjohtavuus (Jauhiainen 2004).

Maaperän vedenpidätyskykyä voidaan ilmentää vedenpidätyskäyrällä (kuva 1), joka kuvaa volumetrisen vesipitoisuuden ja vesipotentialin välistä epälineaarista suhdetta (Dingman 2002). Vesipotentiali eli maaveden jännitys ilmaistaan negatiivisena paineena. Maaveden negatiivisen paineen aiheuttavat painovoima sekä painovoimaa vastustava, vettä maaperässä pidättävä, voima (Westman 1991). Vesipotentialin yksikkönä käytetään paineyksikkö Pascalia tai vesipatsaan korkeutta ja siitä johdettua kymmenkantaista logaritmia (pF). Vesipatsaan korkeudella tarkoitetaan veden kapillaarista nousukorkeutta: mitä ohuemmassa putkessa vesi on, sitä korkeammalle se nousee ja sitä tiukemmin se myös sitoutuu. Maahuokosten voidaan ajatella muodostavan maassa kapillaariputkia. Saturaatiopisteessä, missä veden tilavuus vastaa maan huokostilavuutta, vesipotentiali on nolla. Heti kun vesipitoisuus laskee saturaatiopisteen

alapuolelle, maaveden potentiaali pienenee eli jännitys kasvaa. Saturoituneen maaperän vesipitoisuus laskee alkuun painovoiman vaikutuksesta. Kun painovoimasta johtuva veden valuminen pysähtyy, maa on saavuttanut kenttäkapasiteetin. Kun maaveden määrä ja maaveden potentiaali jatkavat tästä tasosta laskuaan, aletaan lähestyä lakastumisrajaa. Lakastumisrajalla vesipotentiaalin arvo on laskenut jo -1500 kPa:iin ja puuston vedenotto tyrehtyy (Westman 1991). Kenttäkapasiteetin ja lakastumisrajan välille sitoutunutta vesimäärää nimitetään kasveille käyttökelpoiseksi vedeksi. Käsite on jossain määrin harhaanjohtava, sillä kasvien vedenotto vaikeutuu maaveden jännityksen kasvaessa jo ennen lakastumisrajaa (Westman 1991).



Kuva 1. Esimerkki vedenpidätyskäyrästä, mistä on nähtävissä kuinka maaveden negatiivinen paine kasvaa vesipitoisuuden laskiessa (Mannerkoski & Möttönen 1990). Kuvassa x-akselilla on maaveden potentiaali (kPa) ja y-akselilla maan vesipitoisuus (% tilavuudesta).

Toinen tärkeä maaperän hydrologinen ominaisuus vedenpidätyskyvyn lisäksi on vedenjohtavuus. Samanaikaisesti kun maaveden jännitys kasvaa lähestyttäessä lakastumisrajaa, vedenjohtavuus alenee. Vedenjohtavuus kuvaa maaperän kykyä kuljettaa vettä, kun se on jonkin tietyn hydraulisen gradientin alainen (Hillel 2004).

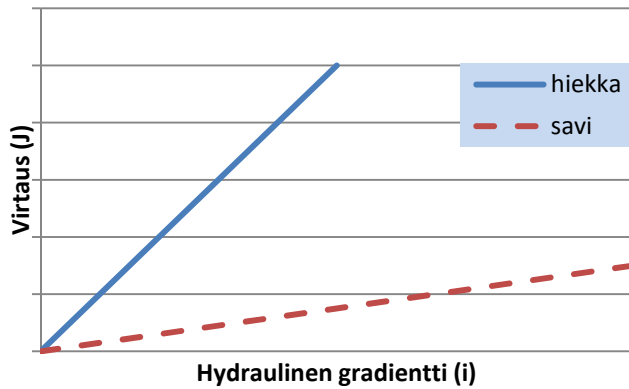
Hydraulinen gradientti ( $i$ ) on veden liikettä ajava voima eli vesipotentialiero kahden pisteen välillä ( $\Delta H$ ) suhteutettuna niiden väliseen etäisyyteen ( $l$ ) (Dingman 2002):

$$i = \Delta H/l. \quad (1)$$

Darcyn lain mukaan vedenjohtavuus ( $K$ ) määrittää lineaarista suhdetta veden virtauksen ( $J$ ) ja sitä ajavan voiman välillä ( $i$ ) (Dingman 2002):

$$J = Ki. \quad (2)$$

Vedenpidätyskyky sekä vedenjohtavuus riippuvat suoraan maan huokoskokojakaumasta (Heiskanen 2003, Hillel 2004). Huokoskokojakauma riippuu taas raekokojakaumasta, maan rakenteesta ja orgaanisen aineen määrästä (Heiskanen 2003). Raekokojakaumaan perustuu kivennäismaalajien luokittelu, missä hienojen ja karkeiden lajitteiden rajana pidetään 0,06 millimetriä. Hienoja lajitteita ovat savi ja hiesu ( $< 0,06$  mm), karkeita puolestaan hieta ja hiekka ( $> 0,06$  mm). Jako perustuu siihen, että monet fysikaaliset ominaisuudet muuttuvat suuresti 0,06 millimetrin raekoon paikkeilla (Heiskanen 2003). Raekokojakauma vaikuttaa huokoskokojakaumaan siten, että pienikokoisten huokosten osuus kokonaishuokoisuudesta kasvaa hienoaineksen määrän lisääntyessä (Westman 1991). Tämä kasvattaa maan kykyä pidättää vettä, mutta samalla veden liikkuvuus hidastuu. Näin on esimerkiksi savimailla. Hiekkamailla vedenpidätyskyky on puolestaan heikko hienojen ainesten vähyyden takia. Vedenjohtavuus on kuitenkin savimaita korkeampi (kuva 2). Tämä tarkoittaa sitä, että samalla hydraulisella gradientilla hiekkamaa liikuttaa enemmän vettä verrattuna savimaahan (Hillel 2004).



Kuva 2. Kuvassa havainnollistetaan vedenjohtavuuden eroavaisuutta hiekka- ja savimaalla (Hillel 1980). Vedenjohtavuus määrittää Darcyn lain mukaisesti lineaarista suhdetta veden virtauksen ja sitä ajavan voiman välillä (Dingman 2002).

Maan rakenne puolestaan vaikuttaa huokoskokojakaumaan maahiukkasten keskinäisen tilajärjestyksen kautta. Rakenteessa voi tapahtua muutoksia esimerkiksi vesipitoisuuden tai tiivistymisen vaikutuksesta (Heiskanen 2003). Näin ollen se poikkeaa raekokojakaumasta, joka on suhteellisen muuttumaton tunnus. Maahiukkasilla voidaan erottaa kolme rakennetyyppiä (Heiskanen 2003). Jyvä rakenne on karkeilla lajitteilla, joissa hiukkasiin vaikuttava painovoima on suurempi kuin hiukkasten välinen koheesio. Tiiviiksi pakkautuneella maa-aineksella on puolestaan massiivinen rakenne. Kolmantena rakennetyyppinä voidaan nähdä kahden edellä mainitun välimuoto, mururakenne. Mururakenteista voidaan pitää maaperän hydrologisten ominaisuuksien kannalta parhaimpana. Jyvä rakenteisen maan vedenpidätyskyky on heikko, kun taas massiivisen rakenteen vedenjohtavuus on huono. Lisäksi tiiviiseen maahan ei mahdu vettä suuria määriä alhaisen huokostilavuuden vuoksi.

Raekokojakauman ja maan rakenteen lisäksi orgaaninen aine vaikuttaa maaperän huokoisuuteen ja sitä kautta hydrologisiin ominaisuuksiin. Maan orgaanisella aineella tarkoitetaan kaikkien orgaanista hiiltä sisältävien aineiden yhteismäärää maassa (Smolander 2003). Orgaanisen aineen pitoisuus on suurin humuskerroksessa, kun taas kivennäismaassa määrä jää vähäiseksi. Kivennäismaan pintakerroksessa (0-30 cm) Etelä-Suomessa orgaanisen aineen suhteellinen osuus on keskimäärin 5,2 %, kun taas

humuskerroksessa vastaava luku on 70 % (Tamminen 1991). Orgaanisen aineksen määrän kasvu maaperässä yleensä parantaa maan vedenpidätyskykyä ja vedenjohtavuutta (Saxton & Rawls 2006). Orgaaninen aines voi nimittäin pidättää vettä jopa 20 kertaa oman massansa verran, ja vedenjohtavuutta se parantaa maan rakennetta muokkaamalla (Smolander 2003).

### **2.2.2 Maaperän hydrologisten ominaisuuksien määrittäminen**

Tietoa vedenpidätyskyvystä ja vedenjohtavuudesta maan vesipitoisuuden suhteen tarvitaan, jotta pystytään määrittämään kasveille käyttökelpoisen veden määrää ja mallintamaan veden liikettä maaperässä (Rawls ym. 1982).

Maaperän vedenpidätyskyvyn ja vedenjohtavuuden määrittämiseksi on kehitetty lukuisia erilaisia suoria menetelmiä. Näiden ongelmana on kuitenkin korkea hinta ja työläys. Tästä syystä huomio on kiinnitetty epäsuorien menetelmien kehitykseen, mitkä ennustavat maaperän hydrologisia ominaisuuksia helpommin mitattavien tunnusten avulla (Jauhiainen 2004). Epäsuorat menetelmät ovat huomattavasti nopeampia ja halvempia toteuttaa suoriin menetelmiin verrattuna. Ne myös antavat tarkkuudeltaan riittäviä estimaatteja useimpiin sovelluksiin (Jauhiainen 2004).

Vedenpidätyskykyä kuvaavan vedenpidätyskäyrän voi määrittää suoraan laboratoriossa, mutta prosessi on erityisesti hienojakoisten maiden kohdalla aikaa vievä. Monia menetelmiä onkin kehitetty vedenpidätyskyvyn estimoimiseksi helposti saatavilla olevasta aineistosta kuten raekokojakaumasta, orgaanisen aineksen pitoisuudesta, kuiva-ainetiheydestä ja savipitoisuudesta (Jauhiainen 2004). Näitä riippuvuussuhteita kuvaavia malleja kutsutaan pedotransferfunktioiksi (PT-funktiot) (Drews 2007). Metsämaatieteen kannalta ongelmana on, että PT-funktioiden kehittäminen on toistaiseksi keskittynyt peltomaille ja yleisiin maaperäaineistoihin. Niiden sovellettavuutta metsämaan vedenpidätysominaisuuksien määrittämiseen ei vielä tunneta kovin hyvin (Drews 2007).

PT-funktiot voidaan jakaa rakenteensa perusteella kolmeen ryhmään: pistemallit, käyrämallit ja semiempiiriset mallit (Drews 2007). Pistemalleissa vedenpidätyskäyrän

mittauspisteet suhteutetaan suoraan fysikaalisiin maaperätunnuksiin regressiomenetelmien avulla. Käyrämalleissa puolestaan mittauspisteisiin sovitetaan ensin valittu vedenpidätyskäyrän funktio, jonka parametrit suhteutetaan maaperätunnuksiin. Pistemallit ja käyrämallit eroavat toisistaan siinä, että pistemalleissa vedenpidätyskäyrän muodosta ei tehdä minkäänlaisia ennako-oletuksia (Jauhiainen 2004). Kolmannen ryhmän semiempiiriset mallit perustuvat raekokojakauman ja vedenpidätyskäyrän välisen riippuvuuden mallintamiseen. Tässä tutkielmassa tullaan myöhemmin käyttämään maaperän vedenpidätyskyvyn määrittämisessä Saxtonin ja Rawlsin vuonna 2006 julkaistussa artikkelissa esiteltyä pistemallia.

Saturoitumattoman maan vedenjohtavuus voidaan määrittää neljällä tavalla (Jauhiainen 2004). Ensimmäisenä vaihtoehtona ovat suorat laboratoriomenetelmät tai maastomittaukset, joiden ongelmana on kuitenkin korkea hinta ja työläisyys. Toisena vaihtoehtona ovat käänteiset menetelmät, joissa optimoidaan virtausta kuvaavan hydraulisen mallin analyyttinen tai numeerinen ratkaisu. Optimointiongelman ratkaisemissa hyödynnetään usein jotakin parametrien estimointimenetelmää. Kolmantena keinona vedenjohtavuuden määrittelemiseksi Jauhiainen (2004) esittelee empiiriset mallit, joiden etuna esimerkiksi käänteisiin menetelmiin verrattuna ovat kevyemmät laskennalliset vaatimukset. Viimeisenä vaihtoehtona on vedenjohtavuuden määrittäminen raekokojakauman ja/tai vedenpidätyskyvyn perusteella. Tästä esimerkkinä on muun muassa Campbellin vuonna 1974 julkaistussa artikkelissa esittelemä yhtälö vedenjohtavuuden laskemiseksi (Rawls ym. 1992). Campbellin yhtälö, samoin kuten tutkielmassa myöhemmin esiteltävä vesimalli, vaatii syöttötietona kuitenkin vedenjohtavuuden saturaatiossa. Tämä onkin yksi avainparametreista maaperän vedenkuljetusta käsittelevissä malleissa (Tietje ja Hennings 1996). Saturaatiopisteen vedenjohtavuutta voidaan ennustaa empiirisillä riippuvuussuhteilla, kapillaarisilla malleilla, tilastollisilla malleilla ja hydraulisilla sädeteorioilla (Chapuis & Aubertin 2003). Hyvin tunnetun riippuvuussuhteen permeabiliteetin ja huokosten ominaisuuksien välillä esitti Kozeny, jota myöhemmin modifioi Carman. Tämä yhtälö tunnetaan nimellä Kozeny-Carman ja siihen pohjautuu saturaatiopisteen

vedenjohtavuuden laskenta Saxtonin ja Rawlsin (2006) artikkelissa, johon vesimallin maaperäparametrien laskenta perustuu.

### **2.2.3 Maaperän kuivuuden vaikutus haihduntaan ja haihdunnan määrittäminen**

Yhteyttämiseen tarvittava hiilidioksidi kulkeutuu ilmakehästä puuhun lehtien pinnalla olevien ilmarakojen kautta, jolloin puu samanaikaisesti haihduttaa vettä juuri päinvastaiseen suuntaan. Tähän ilmarakojen kautta tapahtuvaan kaasujen vaihtoon liittyy optimointiongelma. Fotosynteesituotoksen maksimoimiseksi tarvitaan hiilidioksidia ilmakehästä, mikä vaatii ilmarakojen aukioloa. Haihdunta taas olisi edullisinta pitää aina mahdollisimman pienenä, mutta tämä vaatisi ilmarakojen kiinni pitämistä, jolloin hiilidioksidin kulku estyisi. Optimoinnissa on siis kyse fotosynteesituotoksen maksimoinnista ja haihdunnan minimoimisesta. Kun tarkastelee yksityiskohtaisemmin haihduntaa ajavia voimia, löytyy syy siihen, miksi puun on ylipäätänsä säädeltävä haihdunnan määrä.

Puun haihduttaessa vesi liikkuu maasta juuriin ja rungon vedenkuljetussolukkoa pitkin edelleen lehtiin eli alhaalta ylöspäin. Tätä ilmiötä selitetään koheesivoimateorian avulla (Hölttä ym. 2002). Haihtuminen taivuttaa lehden sisäiset vesipinnat kaarelle, jotka pintajännitys pyrkii palauttamaan. Jännitys välittyy puun sisällä olevassa yhtenäisessä vesipatsaassa aina maahan asti ja synnyttää puun sisälle negatiivisen paineen. Paine on aina negatiivisempi puun latvassa, jolloin vesi lähtee nousemaan korkeammasta paineesta kohti matalampaa. Mitä voimakkaampaa haihduttaminen on, sitä negatiivisemmaksi paine laskee ja sitä korkeamman jännityksen alainen vesi on. Tällöin kasvaa myös puulle haitallisen embolisaation riski, missä ilma tunkeutuu vettä kuljettaviin kovan jännityksen alaisiin soluihin (Hölttä ym. 2002). Kun ilma kerran pääsee tunkeutumaan kuljetussoluun, se leviää siellä niin kauan kunnes soluseinä tulee vastaan. Ilman täyttämä solu katkaisee vettä kuljettavan yhtenäisen vesipatsaan. Jos embolisaatio pääsee leviämään liian laajalle, voi se aiheuttaa puun kuoleman.



Puun on siis säädeltävä haihduntaa silloin, kun jännitys sen sisällä uhkaa nousta liian korkeaksi. Tätä vaaraa ei kuitenkaan ole maaperän vesipitoisuuden ollessa korkea, sillä silloin vesi irtoaa maasta jo pienelläkin jännityksellä. Haihdunta voi siis olla runsasta myös korkeammassa paineessa. Ongelmia syntyy silloin, kun maaveden määrä laskee kuivuuden seurauksena ja vesi on yhä tiukemmin sitoutuneena maahan. Tällöin veden nosto edellyttää jo huomattavasti suurempaa jännitystä ja puun on embolisaaation ehkäisemiseksi suljettava ilmarakojensa ja rajoitettava haihduntaa (Hölttä ym. 2002). Tämä tietenkin vaikuttaa hiilidioksidin kulkeutumiseen ilmakehästä lehtiin ja näin ollen myös fotosynteesituotokseen. Yhteyttämisnopeus ei tosin alene yhtäläisesti haihduntanopeuden kanssa, sillä ilmarakojen aukioloasteen laskiessa hiilidioksidipitoisuus lehdessä vähenee ja diffuusionopeus lehteen kasvaa (Gaastra 1959). Tästä johtuen maaveden määrän vähentyminen näkyy ensin haihdunnassa ja vasta vähän myöhemmin yhteyttämisessä.

Haihdunnan määrittäminen vesitasetta käyttäen on periaatteeltaan selvä ja yksinkertainen (Vakkilainen 1986). Etenkin pitkäaikaisen haihdunnan määrittäminen käy suhteellisen helposti, sillä veden varastoituminen ( $\Delta S$ ) voidaan jättää huomioimatta (Vakkilainen 1986). Haihdunta ( $E$ ) saadaan näin ollen suoraan sadanta- ( $P$ ) ja valunta-arvojen ( $Q$ ) erotuksena:

$$E = P - Q \pm \Delta S. \quad (3)$$

Lyhytaikaisen haihdunnan määrittäminen on ongelmallisempaa, ja sitä vaikeampaa mitä lyhyemmästä jaksosta on kyse. Ensinnäkin sadannan luotettava määrittäminen hankaloituu ja toiseksi varastoituneen vesimäärän vaihtelu on otettava huomioon (Vakkilainen 1986). Vesitaseen käytön lisäksi haihduntaa voidaan mitata muun muassa lysimetrien, haihtumisastioiden ja eddy kovarianssi – menetelmän avulla (Fisher ym. 2004).

Eri mittausmenetelmien lisäksi on kehitetty useampia haihdunnan malleja: sekä potentiaalista että todellista haihduntaa estimoivia. Nämä eroavat toisistaan siten, että jälkimmäisissä huomioidaan maan vesipitoisuuden rajoittava vaikutus. Haihdunnan mallintaminen perustuu siihen lähtötietoon, että haihtumistapahtuma on energian ja vesihöyryn vaihtokauppaa (Monteith 1965). Haihdunnan edellytyksenä on, että

vesihöyryn osapaine ilman ja veden rajapinnan yläpuolella on alempi kuin rajapinnassa (Vakkilainen 1986). Paine-eron ylläpito vaatii energiaa sekä vesihöyryn kulkeutumista kauemmas ilmakehään. Energia tulee auringon säteilynä tai lämmön kulkeutumisena ilmasta, maasta tai vedestä. Vesihöyryä puolestaan kuljettaa molekylaarinen diffuusio sekä tuulen aikaan saama turbulenttinen diffuusio.

Esimerkkejä teoreettisista ja monimutkaisista haihduntamalleista ovat energiataseeseen perustuvat Penmanin (Penman 1948) ja Penman-Monteithin (Monteith 1965) yhtälöt. Penmanin yhtälö estimoii potentiaalista haihduntaa avoveden pinnalta ja vaatii syöttötietoina päivittäiset arvot ilman lämpötilasta, tuulen nopeudesta, ilman kosteudesta sekä auringon säteilystä (Allen ym. 1998). Penman-Monteithin yhtälö, joka on yksi monista Penmanin yhtälöstä kehitetyistä variaatioista, kuvaa todellista haihduntaa kasvillisuuden peittämältä pinnalta. Tästä syystä energia- ja ilmastotekijöiden lisäksi malliin on tuotu tiedot pintavastuksesta ja aerodynaamisesta vastuksesta. Pintavastuksella tarkoitetaan vastusta, jonka kasvusto aiheuttaa maasta ilmaan pyrkivälle vedelle, kun taas aerodynaamisella vastuksella tarkoitetaan vesihöyryn siirtovastusta kasvustosta ilmakehään (Vakkilainen 1986).

Yksinkertaisempia haihdunnan malleja ovat esimerkiksi Jensen-Haise (Jensen & Haise 1963) sekä Priestley-Taylor (Priestley & Taylor 1972). Priestley-Taylor on empiirinen haihdunnan malli, jonka perustana on Penmanin yhtälö, mutta siitä on jäänyt pois vaikeammin saatavilla olevat meteorologiset muuttujat kuten tuulen nopeus ja ilman suhteellinen kosteus (Utset ym. 2003). Näitä muuttujia ei myöskään tarvita Jensen-Haise – menetelmässä, joka lukeutuu yksinkertaisiin säteily-lämpötila -malleihin.

Helposti sovellettaviin haihduntamalleihin kuuluu myös Hyytiälässä SMEARII-aseman metsikössä kokeellisesti sovitettu malli (Linkosalo ym. 2009). Tässä vakioon lehtialaan perustuvassa mallissa haihdunnan estimoimiseksi tarvitaan ainoastaan tiedot säteilystä, vesihöyryn kyllästyspaineen vajauksesta, lämpötilasta ja maan vesipitoisuudesta.

## 2.2.4 Maaperän kuivuuden vaikutus yhteytystuotokseen

Vuonna 2003 Eurooppaa vaivasi sekä kestoltaan että voimakkuudeltaan erittäin paha kuivuus. Esimerkiksi Ranska ja Saksa kärsivät pahimmasta kuivuudesta viimeisen 50 vuoden aikana, ja se kesti yli 6 kuukautta. Tämä kuivuus tarjosi hyvän tilaisuuden tutkia metsäekosysteemin reaktiota sellaiseen äärimmäiseen sääilmiöön, minkä ennustetaan tulevaisuudessa vain yleistyvän. Granier ym. analysoivat vesi- ja hiilivirtoja kuivuuden aikana 12 eri alueella Euroopassa ja vertasivat näitä tuloksia vuoteen 2002, jolloin kuivuutta ei esiintynyt (Granier ym. 2007). Yksi tutkimuskohteista sijaitsi Suomessa, Hyytiälässä. Alueiden välillä oli eroja: esimerkiksi Hyytiälässä ekosysteemin hiilen nettovaihto (NEE) väheni 50–100 g C m<sup>-2</sup> vuosi<sup>-1</sup>, kun taas saksassa sijaitsevilla tutkimuskohteilla 150–300 g C m<sup>-2</sup> vuosi<sup>-1</sup>. NEE saadaan, kun metsikön bruttoprimäärituotoksesta (GPP) vähennetään ekosysteemin hengityksessä ilmakehään vapauttama hiili. Mutta yleisesti Granier ym. raportoivat tutkimuksen tuloksista, että haihdunta, GPP ja hengitys laskivat jyrkästi, kun kasveille käyttökelpoisen veden määrä laski alle 40 prosentin. Maaveden väheneminen näkyi selvästi myös hiilen nettovaihdon laskussa, vaikkei yhtä voimakkaasti kuin bruttoprimäärituotoksessa. Tämä johtui juuri siitä, että kuivuus vähensi myös ekosysteemin hengitystä.

Samansuuntaisia tuloksia on saatu Alaskassa 2000-luvun puolella tehdyissä kolmivuotisissa tutkimuksissa (2002–2004), missä mitattiin lehti- (*Populus tremuloides*) ja havupuumetsän (*Picea mariana*) nettohiilenvaihtoa (Welp ym. 2007). Vuonna 2004 maaveden määrä laski 50–55 % verrattuna vuoteen 2002, mikä johti GPP:n laskuun 9 %:lla havumetsässä ja 12 %:lla lehtipuumetsässä. Saman vuoden elokuussa nettohiilenvaihdon mitattiin laskeneen 56 % lehtimetsässä ja 38 % havumetsässä. Myös Reinin ylemmällä jokitasangolla on tehty kuivuustutkimuksia, sillä alueen ilmasto ja kasvuolosuhteet vastaavat niitä, joiksi Keski-Euroopan olojen ennustetaan ilmastonmuutoksen myötä laajalti muuttuvan. Vuonna 2006 maaveden määrä laski jokitasangolla alle lakastumisrajan, jolloin myös alueen männiköissä (*Pinus sylvestris*) mitattu nettohiilenvaihto laski 40 % (Holst ym. 2008). Kanadassa kuivina vuosina 2002 ja 2003 tehdyt mittaukset haapametsissä (*Populus tremuloides*) osoittivat myös, kuinka kuivuus laski ekosysteemin sitomaa hiilen määrää verrattuna noin kymmenen vuoden

ajanjaksolta saatuun keskiarvoon 20–40 % (Krishnan ym. 2006, Barr ym. 2007). Kanadan tutkimuksissa mielenkiintoista oli se, että vuosia 2002 ja 2003 edeltänyt hieman lievempi kuivuus vuonna 2001 johti päinvastaisesti keskimääräistä korkeampaan hiilensidontaan (Barr ym. 2007). Tämä johtui siitä, että kuivuus kerkesi vaikuttamaan vähentävästi ainoastaan hengitykseen mutta ei bruttoprimäärituotokseen.

### **2.2.5 Maaperän kuivuuden vaikutus puuston kasvuun**

Kuivuuden vaikutuksista eri puulajien elintoimintoihin ja kasvuun ei ole yhtä yksiselitteistä tutkimustietoa kuin kuivuuden vaikutuksista yhteytystuotokseen. Kuusen kasvun ennustetaan taantuvan Suomessa ilmastonmuutoksen myötä, sillä sen ei pinnallisen juuristonsa takia uskota kestävän kuivuutta männyn tavoin (Kellomäki ym. 2005). Kuusen sädekasvun ja puun ominaisuuksien muuttumista kuivuuden seurauksena onkin tutkittu tarkemmin kahdella Etelä-Suomen lannoituskoalueella (Sahalahti ja Heinola) aiheuttamalla keinotekoisesti kuivuutta (Jyske ym. 2009). Tutkimuksessa on sekä typpilannoitetussa että lannoittamattomassa kuusikossa rajattu alueet, joissa on latvuston alapuolelle rakennetuilla katoilla estetty sadeveden pääsy maahan. Kuivuus ajoitettiin kasvukauden alkuun ja sen annettiin kestää 60–75 päivää. Tämä toistettiin 4-5 peräkkäisenä vuotena. Pituuskasvu reagoi kuivuuteen vähentymällä 24–42 % Heinolassa ja 8-28 % Sahalahdessa. Lustojen leveyskasvu puolestaan väheni Heinolassa 17–21 % ja Sahalahdessa 11–19 %. Pituuskasvu ja paksuuskasvu reagoivat kuivuuteen hyvin samankaltaisesti sekä lannoitetuilla että lannoittamattomilla kohteilla. Puun anatomiasa Jysken ym. kuivuustutkimus aiheutti vain pieniä muutoksia. Soluseinän paksuus kasvoi jonkin verran kuivuuden seurauksena, erityisesti kesäpuussa. Soluseinän osuuden kasvu vuosirenkassa kasvatti edelleen jonkin verran puuaineksen tiheyttä.

Itävallan kuivassa vuoristoilmastossa on myös tutkittu havupuiden (*Pinus sylvestris* & *Picea abies*) sädekasvun reagointia kuivuuteen (Pichler & Oberhuber 2007). Tutkittavia puita oli valittu sekä pohjois- että etelärinteeltä ja eri kilpailuasemista (valtapuita, lisävaltapuita, alispuita). Tulosten perusteella vuosittainen kasvu oli vähentynyt molemmilla puulajeilla keskimäärin 35 % verrattuna aiempiin vuosiin (1998–2002).

Samoilla alueilla Sveitsin puolella taas vertailtiin säädatasta laskettua kuivuusindeksiä lustojen kasvuun männyllä (*Pinus sylvestris*) aina vuodesta 1864 eteenpäin ja useat kuivat vuodet sekä kuivuusjaksot pystyttiin erottamaan lustonäytteistä alentuneena kasvuna (Bigler ym. 2006). Negatiivinen korrelaatio lustojen leveyskasvun ja kuivuusindeksin välille löydettiin myös Norjassa, missä tutkittiin kuusen (*Picea abies*) kasvun ympäristövasteita (Andreassen ym. 2006).

Edellä mainittujen tutkimustulosten perusteella voidaan sanoa, että kuivuusvuodet vaikuttavat lustojen leveyskasvuun ainakin sinä vuotena kun kuivuutta esiintyy, sekä kuusella että männyllä. Yksittäisillä kuivuusvuosilla on kuitenkin havaittu olevan ainoastaan lyhytaikaisia kasvuvaikutuksia (Bigler ym. 2006, Jyske ym. 2009, Thabeet ym. 2009). Useina peräkkäisinä vuosina toistuvat kuivuudet voivat kuitenkin vaikuttaa kasvuun pidempiaikaisesti laskemalla lehtialaindeksiä ja latvuksen tiheyttä (Bigler ym. 2006, Thabeet ym. 2009).

### **2.3 Maaperän vesitaseen mallintaminen**

Lait, jotka kontrolloivat veden liikettä huokoisessa maaperässä, tunnetaan melko hyvin. Tämä on mahdollistanut useiden vesitasetta estimoivien prosessimallien laadinnan (Starr 1999). Mallien kirjo vaihtelee aina yksinkertaisista varastomalleista monimutkaisiin mekanistisiin malleihin (Vilhar ym. 2010). Monimutkaisissa malleissa etuna on, että ne voidaan tarkasti parametrizoida kuvaamaan maaperän horisontaalista ja vertikaalista rakennetta sekä muita maaperän ominaisuuksia. Parametrien suuri määrä johtaa myös siihen, ettei malli välttämättä ole yksittäisille parametreille niin herkkä (Vilhar ym. 2010). Huonona puolena on, että tarkka parametrizointi vaatii kattavat tiedot kohteesta, jossa mallia sovelletaan. Yksinkertaisemmat vesimallit ovat helpommin sovellettavissa eri alueille, sillä niiden parametrizointi ei edellytä yhtä yksityiskohtaisia syöttötietoja. Tämä kuitenkin vaikuttaa tulosten tarkkuuteen, ja yksinkertaisilla malleilla saavutetaankin karkeampia estimaatteja vesitaseesta kuin monimutkaisilla malleilla. Lisäksi herkkyys yksittäisten parametrien suhteen kasvaa.

Helsingin yliopiston metsämaatieteen lehtori Mike Starr on kehittänyt yksinkertaisen kuukausittaista vesitasetta laskevan WATBAL-mallin (Starr 1999). Malli laskee vesivaraston muutoksen ( $\Delta SM$ ) kuukauden sademäärän ( $P$ ), haihdunnan ( $E_T$ ) sekä valunnan ( $R$ ) perusteella:

$$\Delta SM = P - E_T - R. \quad (4)$$

WATBAL-mallissa haihdunta lasketaan auringonsäteilyyn perustuvalla Jensen-Haise – menetelmällä (Jensen & Haise 1963). Tuloksena saadaan potentiaalinen haihduntanopeus, millä sadannan ja lumensulamisen maaperään vapauttama vesi haihtuu. Latvuksen pidättämän veden evaporaatiota tai maaperän evapotranspiraatiota ei ole laskettu erikseen (Vilhar ym. 2010). Haihdunta säätelee maaperän paksuuden ja tekstuurin määrittämän vesivaraston tilaa sen mukaan, kuinka haihduntapaine vastaa sade- ja lumensulamisvesien määrää (Starr 1999). Esimerkiksi haihdunnan kuluttaessa vettä vähemmän kuin sitä vapautuu, vesivarasto täyttyy. Varaston kapasiteetin ylittävä vesimäärä poistuu valuntana. Lumen sulamisen aikaan voi esiintyä painovoiman säätelemän valunnan lisäksi myös horisontaalista pintavaluntaa (Starr 1999).

Edellä kuvattu WATBAL-malli käsittelee maaperää yhtenä kerroksena. Monimutkaisempiin vesitasemalleihin kuuluva BROOKS90 voidaan esimerkiksi ohjelmoida käsittämään jopa 25 maaperäkerrosta (Vilhar ym. 2010). Yksityiskohtaisemman mallista tekee WATBAL-malliin verrattuna kuitenkin jo se, että BROOKS90 mallintaa maaperän vesitasetta päivittäin. Lisäksi haihdunnassa estimoidaan erikseen latvuksen pidättämän veden ja maaperän evaporaatio. Haihdunnan monimuotoisempi mallintaminen näkyy heti kasvillisuutta kuvaavien muuttujien määrässä: WATBAL-mallissa niitä on neljä, kun taas BROOKS90-mallissa viisinkertainen määrä tähän verrattuna (Vilhar ym. 2010). Myös maaperämuuttujien määrä kasvaa BROOKS90-mallissa WATBAL-malliin verrattuna sitä mukaan, kun mukaan otettujen maahorisonttien määrä kasvaa.

Samanlaisen yksinkertaisen open bucket – tyyppisen vesimallin kuin WATBAL on kehittänyt myös tutkija Remko Duursma (2005). Sadanta sekä lumen sulamisvedet ( $P$ ) täyttävät maaperän vesivarastoa ( $SM$ ), kun taas haihdunta ( $E_T$ ) ja valunta ( $R$ ) tyhjentävät sitä:

$$\Delta SM = P - E_T - R. \quad (5)$$

Merkittävänä erona WATBAL-malliin on kuitenkin lyhyempi aika-askel, joka on kuukauden sijasta vuorokausi. Haihdunnan laskenta ei myöskään perustu Jensen-Haise – menetelmään, vaan päivittäinen haihdunta lasketaan seuraavalla yhtälöllä:

$$ET_k = ET_{max} * e^{-(k-ET_{mid})^2 / (2ET_{sd}^2)}, \quad (6)$$

jossa  $ET_{max}$  on haihdunnan päiväkohtainen maksimiarvo,  $k$  on vuodenvuorokauden järjestysnumero,  $ET_{mid}$  haihdunnan mediaanipäivä (sen vuodenvuorokauden järjestysnumero, jolloin haihdunnan maksimi on saavutettu) ja  $ET_{sd}$  on parametri, jonka avulla säädetään haihdunnan vuotuisen jakauman leveyttä (Yrjönen 2008). Haihdunnan laskennassa käytetyt arvot on selvitetty kokeellisesti Hyytiälän SMEARII-aseman referenssimetsikössä mitatulla aineistolla. Duursman vesimallin soveltaminen tällä haihduntamallilla tarkoittaisi, että haihdunta kuvattaisiin Hyytiälän referenssimetsikön keskimääräisten muuttujien avulla (Yrjönen 2008). Myös valunta perustuisi referenssimetsikössä mitattuun aineistoon ja ainoastaan sademäärä olisi tutkimuskohteella mitattu.

Aluespesifimpi vaihtoehto Duursman haihduntamallille olisi vakioon lehtialaan perustuva yksinkertainen haihduntamalli (Linkosalo ym. 2009). Malli on myös sovitettu Hyytiälässä, mutta siinä säteily, lämpötila, vesihöyryn kyllästyspaineen vaje ja maan vesipitoisuus ovat tutkimuskohteittain vaihtuvia:

$$E = \beta \phi f_s \min\{f_D, f_W\} + a_1 \phi + a_2, \quad (7)$$

missä  $\beta$ ,  $a_1$  ja  $a_2$  ovat Hyytiälässä kokeellisesti löydettyjä parametreja,  $\phi$  on päivän PAR-säteily ( $\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ),  $f_s$  on funktio, joka riippuu lämpötila-akklimaatiosta  $S$ , ja  $f_D$  ja  $f_W$  ovat vesihöyryn kyllästysvajeesta  $D$  ja vesipitoisuudesta  $W$  riippuvia funktioita. Säteily, lämpötila ja vesihöyryn kyllästyspaineen vaje (VPD) ovat yleensä helposti saatavilla olevia meteorologisia muuttujia. Maan vesipitoisuuden rajoittavan vaikutuksen laskemiseksi tulee tietää volumetriset vesipitoisuudet kolmessa eri pisteessä. Näiden laskeminen vaatii ainoastaan tiedot maaperän hiekka- ja savipitoisuuksista.

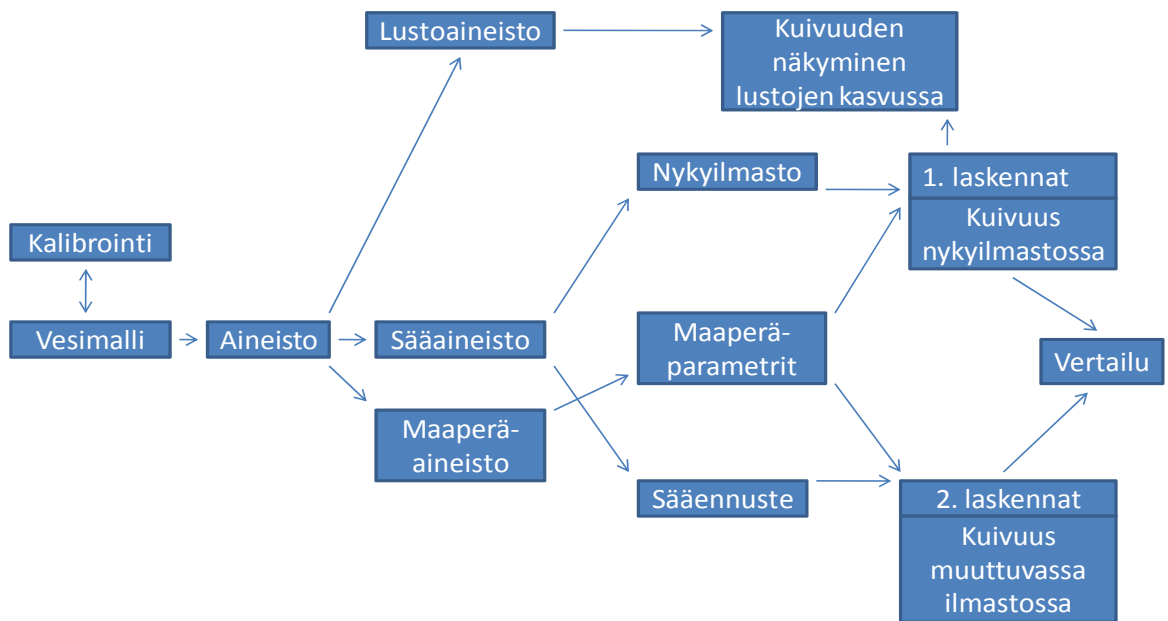
## 2.4 Johtopäätökset ja työn tarkennetut tavoitteet

Tässä työssä tavoitteeksi asetettiin tarkastella laskentamallin avulla maan vesipitoisuudessa tapahtuvia muutoksia menneessä, nykyisessä ja muuttuvassa ilmastossa sekä tutkia kuivuuden mahdollisia vaikutuksia puuston kasvuun. Työssä valitaan käytettäväksi edellä kuvattu Duursman (2005) vesimalli, koska se on yksinkertainen ja helposti sovellettavissa. Mallissa haihdunta lasketaan kokeellisesti sovitetulla mallilla, jossa haihdunnan ajavina voimina ovat säteily, lämpötila, vesihöyryn kyllästyspaineen vajoitus (VPD) ja maan vesipitoisuus (Linkosalo et al. 2009).

Mallin valinnan jälkeen on tutkimuskohteilta hankittava tarvittava aineisto. Maaperäaineiston, hiekka- ja savipitoisuuksien, avulla lasketaan tutkimuskohteille maan hydrologisia ominaisuuksia kuvaavat maaperäparametrit. Sääaineisto mahdollistaa lopulta itse mallilaskelmien tekemisen. Jotta vertailua nyky- ja muuttuvan ilmaston välillä pystytään tekemään, on mitatun sääaineiston lisäksi oltava käytössä sääennuste. Mitattu lustoaineisto mahdollistaa lopuksi kasvuvaikutusten tutkimisen nykyilmastossa.

Ennen kuin itse laskentoja lähdetään tekemään, tulee mallia kuitenkin kalibroida. Kalibroinnin kautta etsitään esimerkiksi järkeviä kynnyks- ja raja-arvoja, jotka määrittävät, milloin kuivuutta on ollut ja milloin ei.





Kuva 3. Vesimallin valinnan ja kalibroinnin jälkeen voidaan tutkimuskohteilta hankitun aineiston avulla edetä kohti varsinaisia mallilaskelmia.

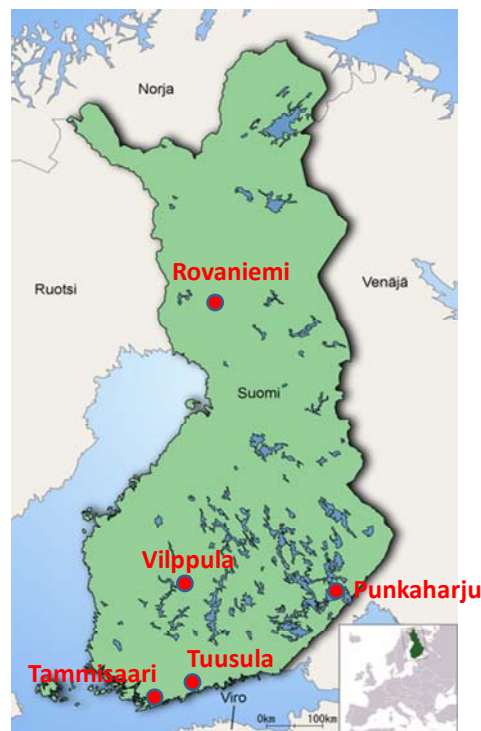
### 3 Aineisto

#### 3.1 Tutkimuskohteet

Tutkimuskohteena ovat Metsäntutkimuslaitoksen yhdeksän provenienssikoealuetta viidellä eri paikkakunnalla: Tuusulassa, Punkaharjulla, Tammisaarella, Vilppulassa ja Rovaniemellä. Ruotsinkylän (Tuusula), Solbölen (Tammisaari) ja Punkaharjun tutkimusalueilla sijaitsee jokaisella kaksi koemetsikköä, sekä männikkö että kuusikko. Kivalon tutkimusalueella (Rovaniemi) taas kasvaa kaksi kuusikkoa ja Vilppulan tutkimusalueella yksi. Koealueet on perustettu 1930-luvun alkupuolella tarkoituksena löytää männylle ja kuuselle eri maantieteellisiä alkuperiä vertailemalla

kasvuominaisuuksiltaan paras siemenalkuperä koepaikkakunnalle. Myöhemmin kohteet ovat osoittautuneet merkittäviksi perinnöllisyys- ja sopeutumistutkimuksessa.

Kohteisiin kuuluvat kuusi kuusikkoa on istutettu Etelä-Suomessa tuoreelle tai lehtomaiselle kankaalle ja Pohjois-Suomessa tuoreelle kankaalle. Kolmen männikön osalta metsätyyppi vaihtelee kuivahkosta kankaasta lehtomaiseen kankaaseen.



Kuva 4. Tutkimuskohteiden sijainti. (Kartta: Wikipedia, muokannut Grönlund 2011).

### 3.2 Sääaineisto

Ilmatieteen laitoksen hila-aineisto on laskettu useiden sääasemien mittauksista 10 x 10 kilometrin ruuduille (Venäläinen ym. 2005). Tutkimuskohteina oleville provenienssikoealueille sääaineisto on haettu aina lähimmästä hilapistestä, jossa dataa on. Aineisto sisältää päivittäiset arvot säteilystä, lämpötilasta, VPD:stä sekä sadannasta vuosilta 1961–2008. Sääaineistoa käytetään vesimallissa päivittäisen vesitaseen laskemiseksi.

Vesitase-ennusteet on laskettu muokkaamalla Ilmatieteen laitokselta saatua sääaineistoa ilmastonmuutosennusteisiin perustuen. Tuleva säteily on oletettu muuttumattomaksi eli ennustelaskelmissa on käytetty vuosien 1961–2008 mitattuja säteilyarvoja. Päivittäisiä lämpötila- ja sadanta-arvoja on kasvatettu vuodenajoittain ACCLIM-hankkeen raportissa esitettyjen ennusteiden mukaisesti (taulukko 3). VPD on laskettu uudelleen korotetuista lämpötiloista olettamalla, ettei ilman suhteellinen kosteus muutu (Dessler & Sherwood 2009, Ruosteenoja, henkilökohtainen tiedonanto). Tämä johtaa VPD:n lievään kasvuun muuttuvassa ilmastossa. Vesitase-ennusteet siis saadaan sijoittamalla ajanjakso 1961–2008 vuosisadan lopulle ilmastonmuutoksen muokkaamana ja toistamalla laskennat.

Taulukko 3. Taulukossa on esitetty vuodenajoittain ennustettu lämpötilan ja sademäärän muutos Suomessa vuosisadan loppuun mennessä (Jylhä ym. 2009). Vuodenajoittaiset ennustukset on laskettu keskiarvona kuukausikohtaisista ennustuksista.

	Lämpötilamuutos (C° vuosina 2070–2099 verrattuna vuosiin 1971–2000)	Sademäärän muutos (% vuosina 2070–2099 verrattuna vuosiin 1971–2000)
talvi	6	23
kevät	4	15
kesä	3	10
syksy	4	15

### 3.3 Maaperäaineisto

Provenienssikoalueilta tarvitaan tietoa saven ja hiekan osuuksista maaperässä, jotta pystytään laskemaan vesimalliin syötettäviä maaperäparametreja. Vilppulan, Solbölen (Tammisaari) ja Kivalon (Rovaniemi) tutkimusalueilta oli saatavissa raekokojakaumat syvyydeltä 20–40 cm. Saven prosenttiosuuteen luettiin kaikki raekooltaan alle 0,02 mm oleva kivennäismateriaali. Hiekan prosenttiosuuden muodostivat kaikki kooltaan yli 0,06 mm olevat partikkelit.

Muiden kohteiden osalta oli tyydyttävä tietoon metsätyypistä ja puulajista, joiden kautta voidaan myös estimoida kohteiden savi- ja hiekkapitoisuuksia (Tamminen 2009). Suomen kangasmaat inventoitiin vuosina 1986–1995 osana Metsäntutkimuslaitoksen tutkimusohjelmia. Inventointidata sisältää tiedot 488 koealalta kattavasti läpi koko Suomen (Tamminen 2009). Tähän dataan perustuen Helsingin yliopiston tutkija Mikko Peltoniemi on estimoinut regressioyhtälöitä käyttäen keskimääräisiä savi- ja hiekkapitoisuuksia metsätyypeittäin sekä puulajeittain. Estimoinneissa Etelä- ja Pohjois-Suomi on vielä eroteltu toisistaan. Savipitoisuus on estimoitu ensin, minkä jälkeen sitä on käytetty hiekkapitoisuuden arvioimiseen. Näiden kahden välillä on siis korrelaatio, mutta savi on maaperän vedenpidätysominaisuuksien kannalta hiekkaa merkittävämpi tekijä ja siksi estimoitu ensin.

### **3.4 Lustoaineisto**

Kuivuuden kasvuvaikutuksia arvioidaan vertailemalla vesimallilla kartoitettujen kuivien vuosien luston kasvua ns. normaalien vuosien luston kasvuun. Vertailun tekemiseksi käyttöön hankittiin provenienssikoealueilla mitattu lustoaineisto ja siitä laskettu lustoindeksi vuosilta 1939–1991. Ainoastaan Tammisaaren Solbölen tutkimusalueen männiköstä ei ollut lustoaineistoa saatavilla.

Aineisto on peräisin Punkaharjun Metlan arkistoista ja se on alun perin Marja-Leena Nykäsen metsänhoitotieteen syventävien opintojen tutkielmaa varten valmistelema aineisto. Myöhemmin sitä on hyödyntänyt Janne Yrjönen Metsäekologian laitokselle (nykyinen Metsätieteiden laitos) vuonna 2008 tekemässään Pro gradu-työssään. Yrjönen on tutkimustansa varten muodostanut lustoaineistosta lustoindeksin, mitä käytetään kuivuuden kasvuvaikutusta tutkittaessa. Lustoindeksi on laskettu, jotta eri puiden ja saman puun eri ikävaiheiden kasvua voitaisiin verrata keskenään. Puiden läpimitan kasvuun nimittäin vaikuttavat välittömien ympäristötekijöiden lisäksi muun muassa puun ikä, metsän tiheys ja kasvupaikka. Lustoindeksi on laskettu jakamalla mitattu luston leveys eksponentiaalisesti tasoitetulla liukuvalla keskiarvolla (EMA, exponential moving average)(Yrjönen 2008). Eksponentiaalisesti tasoitettu liukuva keskiarvo antaa keskiarvon

laskennassa suurimman painoarvon nykyhetkeä lähinnä oleville arvoille, mikä ajan kuluessa heikkenee.

## 4 Menetelmät

### 4.1 Vesimallin toimintaperiaate

Gradutyöni maavesilaskennat perustuvat yksinkertaiseen open bucket – tyyppiseen vesimalliin (Duursma 2005, Linkosalo ym. 2009). Maaperä ajatellaan tilana, johon sadanta (P) sekä lumen sulaminen ( $S_M$ ) tuovat vettä. Valunta (D) ja haihdunta ( $E_T$ ) päinvastaisesti vähentävät sitä. Maaveden vesivarastoa (W) ajanhetkellä k+1 voidaan kuvata seuraavanlaisesti:

$$W(k+1) = W(k) + P(k) + S_M(k) - D(k) - E_T(k). \quad (8)$$

Sateen tullessa vetenä laskennoissa huomioidaan interseptio eli latvuspidentä:

$$I = I_0 + I_{\text{frac}} * P. \quad (9)$$

$I_0$  on vakio latvuspidentä. Tämän lisäksi vettä pidättyy  $I_{\text{frac}}$  parametrin määräämä osuus sadannasta. Näille parametreille on laskennoissa annettu arvot 0,33 ja 0,15 (Duursma 2005). Interseptiota ei kuitenkaan tapahdu, kun lämpötila on alle 0° astetta ja sade tulee lumena. Lämpötilan ollessa pakkasen puolella lumi ei myöskään sula, ja valunta sekä haihdunta ovat minimissään. Maaperän vesivarastossa ei näin ollen tapahdu suuria muutoksia, vaan ainoastaan maan pinnalla oleva lumen määrä ( $S_G$ ) ja sen sisältämä vesivarasto kasvavat:

$$S_G(k+1) = S_G(k) + S_N(k) - S_M(k) \quad (10)$$

jossa  $S_N$  tarkoittaa uutta lunta ja  $S_M$  lumen sulamista, mitä ei kuitenkaan voi tapahtua samanaikaisesti lumen kertymisen kanssa. Lumen sulamisen oletetaan olevan verrannollinen tietyn kynnyksarvon ylittävään lämpötilaan (Duursma 2005):

$$S_M = M_C * (T - T_0). \quad (11)$$

T on ilman lämpötila ja  $T_0$  on ennalta määrätty kynnysarvo, 0 °C.  $M_C$  on lumensulamiskerroin, jolle on laskennoissa annettu arvo 1,5 mm d<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup> (Duursma 2005).

Valunnan laskenta perustuu yhtälöihin, jotka mallintavat maan vesipitoisuuden ( $\theta$ ), vesipotentialin ( $\Psi$ ) ja vedenjohtavuuden (K) välisiä riippuvuuksia (Campbell & Norman 1998). Nämä puolestaan pohjautuvat edelleen Darcyn lakiin (kappale 2.2.1). Yhtälöt ovat seuraavanlaiset:

$$K(\theta) = K_S * (\theta/\theta_S)^{2B+3} \quad (12)$$

sekä

$$\Psi(\theta) = \Psi_S * (\theta/\theta_S)^{-B}. \quad (13)$$

Yhtälössä 10 vedenjohtavuus jossakin tietyssä vesipitoisuudessa ( $K(\theta)$ ) lasketaan saturaatiopisteen vedenjohtavuuden ( $K_S$ ), saturaatiopisteen vesipitoisuuden ( $\theta_S$ ) ja vedenpidätyskäyrän kulmakertoimen avulla (B). Yhtälössä 11 taas lasketaan vesipotentialia jossakin tietyssä vesipitoisuudessa ( $\Psi(\theta)$ ). Tähän tarvitaan saturaatiopisteen vesipitoisuuden ( $\theta_S$ ) ja kulmakertoimen (B) lisäksi tieto saturaatiopisteen vesipotentialista ( $\Psi_S$ ).

Laskettua valuntaa verrataan saman päivän haihduntaan, ja jos se on vesimäärältään suurempi, saadaan valunta haihdunnan ylittävästä osuudesta. Tämän jälkeen valunta vähennetään lasketusta maaveden määrästä, jossa on jo huomioitu sadanta, lumen sulaminen sekä haihdunta. Mutta lähtökohtaisesti kasvillisuus pyrkii hyödyntämään valuvan veden, eikä valuntaa näin ollen välttämättä esiinny, jos haihduntapaine on suuri.

Valunnan lisäksi maaveden määrää vähentää jo aikaisemmin mainittu haihdunta (E, mol m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>). Haihdunta lasketaan empiirisellä mallilla, jonka parametrit on estimoitu Hyytiälän SMEAR II – aseman aineistosta vuosilta 2005–2009 (Linkosalo ym. 2009). Malli on seuraava:

$$E = \beta \phi f_s \min\{f_D, f_W\} + a_1 \phi + a_2 \quad (14)$$

missä  $\beta$ ,  $a_1$  ja  $a_2$  ovat parametreja,  $\phi$  on päivän PAR-säteily ( $\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ),  $f_s$  on funktio, joka riippuu lämpötila-aklimaatiosta  $S$ , ja  $f_D$  ja  $f_W$  ovat vesihöyryn kyllästysvajeesta  $D$  ja vesipitoisuudesta  $W$  riippuvia funktioita. Lämpötila-aklimatio  $S$  lasketaan dynaamisen mallin avulla päivittäisistä lämpötiloista seuraavasti:

$$S(k+1) = S(k) + (T(k) - S(k)) / \tau \quad (15)$$

missä  $k$  on päivä,  $T(k)$  on päivän  $k$  keskilämpötila ja  $\tau$  on parametri (d). Funktiot  $f_s$ ,  $f_D$  ja  $f_W$  lasketaan seuraavasti:

$$f_s(S) = \max\{0, S - S_0\} \quad (16)$$

$$f_D(D) = e^{-\kappa D} \quad (17)$$

$$f_W = \min\{1, R_{EW}/R_{th}\}. \quad (18)$$

Edellä  $S_0$ ,  $\kappa$  ja  $R_{th}$  ovat parametreja ja  $R_{EW}$  suhteellinen käytettävissä oleva vesimäärä (Relative Extractable Water), joka määritellään maan volumetrisesta vesipitoisuudesta  $\theta_s$  suhteessa vesipitoisuuksiin kenttäkapasiteetissa ( $\theta_{33}$ ) ja lakastumisrajalla ( $\theta_{1500}$ ):

$$R_{EW} = (\theta_s - \theta_{1500}) / (\theta_{33} - \theta_{1500}). \quad (19)$$

Kun vesimäärä  $W(k)$  määritetään metsikön pinta-alayksikköä kohti, niin volumetriset vesipitoisuudet voidaan liittää vastaaviin vesimääriin jakamalla ne maaperän paksuudella. Vesimallin parametrit on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Vesimallin parametrit.

Parametri	Merkitys	Yksiköt	Arvo
$\beta$	haihduntamallin kerroin	$1 / ^\circ\text{C}$	$1,44737 \times 10^{-6}$
$a_1$	vakiohaihdunta	-	$6,048 \times 10^{-5}$
$a_2$	säteilyn vaikutus	$\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$	0,0837
$\tau$	lämpötilaviive	day	14,39305
$S_0$	kynnyslämpötila	$^\circ\text{C}$	-6,94684
$\kappa$	VPD-vaikutus	$\text{Pa}^{-1}$	-0,000263
$R_{\text{th}}$	kynnysvesipitoisuus	-	0,2 tai 0,4
$l_0$	vakio latvuspäntä	mm	0,33
$l_{\text{frac}}$	suhteellinen latvuspäntä	-	0,15
$M_c$	lumen sulaminen	$\text{mm d}^{-1}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	1,5
$T_0$	lumen sulamisen kynnyslämpötila	$^\circ\text{C}$	0
$\theta_{1500}$	lakastumisraja	-	riippuu maasta
$\theta_{33}$	kenttäkapasiteetti	-	riippuu maasta
$h$	maaperän paksuus	mm	riippuu maasta

Vesimalli on rakenteeltaan yleinen ja voi sopia kaikille tutkimuskohteille, jos taulukon 4 parametriarvot ovat tiedossa. Maaperän vaikutus tulee parametreista  $\theta_{33}$  ja  $\theta_{1500}$  sekä maaperän paksuudesta, joka vaikuttaa vesimäärän ja vesipitoisuuden väliseen suhteeseen. Myös nämä parametrit on tunnettava tutkimuskohteille.

Kasvustoa ei ole haihduntamallissa suoraan kuvattu, sillä parametrit on estimoitu vain yhden metsikön perusteella. Sama malli kuitenkin yleistetään tässä tutkimuksessa proveniensiikoealueiden eri kasvupaikoille ja puulajeille. Yleistyksen luotettavuutta tarkastellaan kuitenkin vielä erikseen kirjallisuuden, mallisimulointien ja Hyytiälän vertailuaineiston perusteella.



## 4.2 Maaperän ominaisuuksien parametrisointi vesimallissa

### 4.2.1 Parametrien laskenta

Mallissa täytyy kasveille käyttökelpoisen veden laskemiseksi ( $R_{EW}$ ) tietää volumetriset vesipitoisuudet kenttäkapasiteetissa ( $\theta_{33}$ ) ja lakastumisrajalla ( $\theta_{1500}$ ). Jotta vesipitoisuudesta päästään edelleen vesimäärään, tarvitaan tieto myös maan paksuudesta. Valunnan laskemiseksi taas tarvitaan seuraavat maaperäparametrit: saturaatiopisteen vesipitoisuus ( $\theta_s$ ), vedenjohtavuus ( $K_s$ ) ja vesipotentiali ( $\Psi_s$ ) sekä vedenpidätyskäyrän kulmakerroin ( $B$ ).

Maan paksuuden valintaa tarkastellaan myöhemmin omassa kappaleessaan, mutta muiden maaperäparametrien laskenta perustuu pääasiassa Saxtonin ja Rawlsin vuonna 2006 julkaistuun artikkeliin ja siinä esiteltyyn pistemalliin. Pistemallin regressioyhtälöt perustuvat puolestaan USDA:n laajaan maaperäaineistoon ja selittävinä muuttujina ovat yleisesti saatavilla olevat tiedot maaperän tekstuurstusta ja orgaanisen aineksen määrästä.

Kun tiedetään savi- ( $C$ ) ja hiekkapitoisuus ( $S$ ), voidaan regressioyhtälöillä laskea volumetriset vesipitoisuudet lakastumisrajalla ( $\theta_{1500}$ ), kenttäkapasiteetissa ( $\theta_{33}$ ), saturaatiopisteen ja kenttäkapasiteetin välillä ( $\theta_{(0-33)}$ ) sekä saturaatiopisteessä ( $\theta_s$ ). Volumetrisella vesipitoisuudella tarkoitetaan veden tilavuuden ja maan tilavuuden välistä suhdetta ( $m^3/m^3$ ). Näiden tietojen avulla pystytään edelleen laskemaan maaperän vedenpidätyskykyä kuvaava vedenpidätyskäyrän kulmakerroin ( $B$ ). Tätä tietoa tarvitaan seuraavaksi saturaatiopisteen vedenjohtavuuden määrittämiseen ( $K_s$ ).

Vesipotentiali saturaatiopisteessä ( $\Psi_s$ ) taas saadaan, kun tiedetään vedenpidätyskäyrän kulmakerroin sekä volumetriset vesipitoisuudet kenttäkapasiteetissa ja lakastumisrajalla (Campbell & Norman 1998).

Taulukko 5. Yhtälöt maaperäparametrien laskentaan (Campbell & Norman 1998, Saxton & Rawls 2006).

Volumetrinen vesipitoisuus lakastumisrajalla	$\theta_{1500} =$ $\theta_{1500t} =$	$\theta_{1500t} + (0.14 * \theta_{1500t} - 0.02)$ $-0.024S + 0.487C + 0.068(S * C) + 0.031$
Volumetrinen vesipitoisuus kenttäkapasiteetissa	$\theta_{33} =$ $\theta_{33t} =$	$\theta_{33t} + [1.283(\theta_{33t})^2 - 0.347(\theta_{33t}) - 0.015]$ $-0.251S + 0.195C + 0.452(S * C) + 0.299$
Volumetrinen vesipitoisuus saturaatiopisteen ja kenttäkapasiteetin välillä	$\theta_{(0-33)} =$ $\theta_{(0-33)t} =$	$\theta_{(0-33)t} + (0.636\theta_{(0-33)t} - 0.107)$ $0.278S + 0.034C - 0.584(S * C) + 0.078$
Volumetrinen vesipitoisuus saturaatiopisteessä	$\theta_s =$	$\theta_{33} + \theta_{(0-33)} - 0.097S + 0.043$
Vedenpidätyskäyrän kulmakerroin	$B =$	$[\ln(1500) - \ln(33)] / [\ln(\theta_{33}) - \ln(\theta_{1500})]$
Vedenjohtavuus saturaatiopisteessä	$K_s =$ $\lambda =$	$1930(\theta_s - \theta_{33})^{(3 - \lambda)}$ $1/B$
Vesipotentiaali saturaatiopisteessä	$\psi_s =$	$-33\ 000(\theta_{33}/\theta_s)^B$

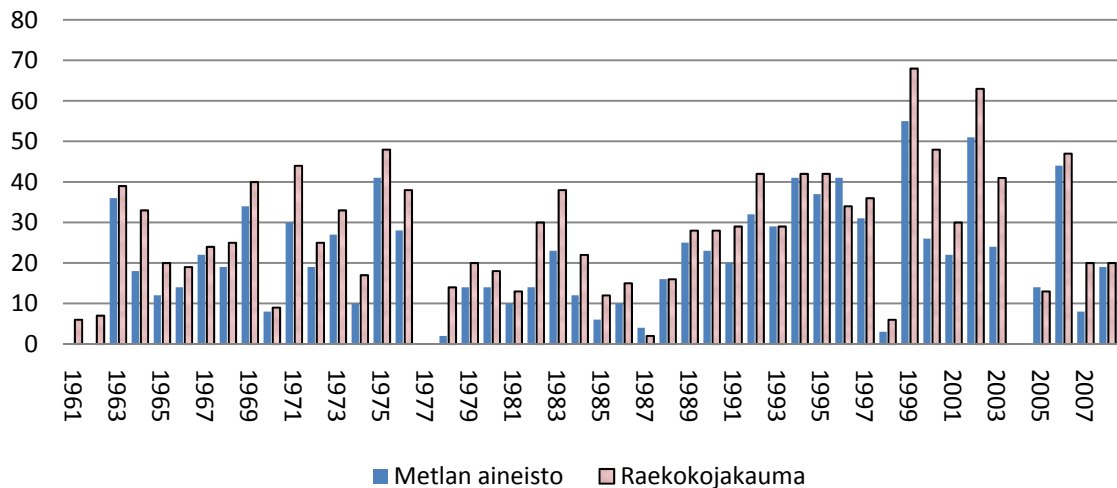
Saxtonin ja Rawlsin (2006) artikkelissa yhtälöt on esitetty muodossa, jossa orgaanisen aineksen pitoisuus on kolmantena selittävänä muuttujana savi- ja hiekkapitoisuuden lisäksi. Tutkielmani yhdeksän koealueen osalta ei ollut kuitenkaan mahdollista saada tietoa orgaanisen aineksen määrästä, joten parametrien laskennassa on tyydytty kahteen selittävään tekijään.

#### 4.2.2 Lopulliset parametrit

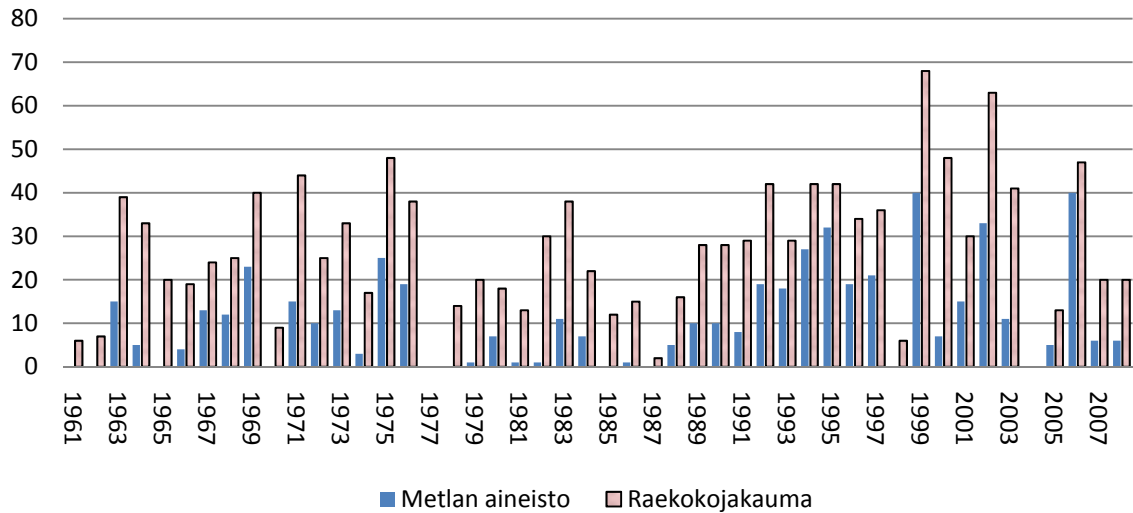
Vilppulan, Kivalon ja Solbölen tutkimusalueiden savi- ja hiekkaprosentit saatiin suoraan mitatuista raekokojakaumista. Kivalon ja Solbölen kohdalla ongelmana oli kuitenkin se,

ettei yhden mitatun raekokojakauman tarkempaa määrittämissä tiedetty ja koemetsikköjä oli näillä alueilla kaksi. Raekokojakauman sopivuutta Kivalon ja Solbölen koemetsäköihin testattiin laskemalla kuivuspäivät sekä raekokojakauman perusteella saaduilla parametreilla että Metlan aineiston perusteella saaduilla parametreilla. Metlan aineisto siis sisältää keskiarvoja savi- ja hiekkapitoisuuksista metsätuotteittain sekä puulajeittain. Näin ollen pystyttiin vertailemaan, vastaavatko metsätuottein ja puulajin mukaan lasketut tulokset lainkaan raekokojakauman mukaan laskettuja tuloksia.

Solbölen männikölle metsätuottein ja puulajin mukaan lasketut tulokset olivat melko hyvin yhteensopivat raekokojakauman perusteella saatuihin tuloksiin. Kuusikon tilanne oli kuitenkin toisenlainen. Metlan aineiston käyttö maaparametrien laskennassa johti kuusikossa huomattavasti selvemmin poikkeaviin tuloksiin raekokojakauman käyttöön verrattuna. Siksi Solbölen kuusikossa päädyttiin käyttämään Metlan aineistoa parametrien laskennassa, sillä raekokojakauma tuntuu kuvaavan paremmin Solbölen männikön maaperää.

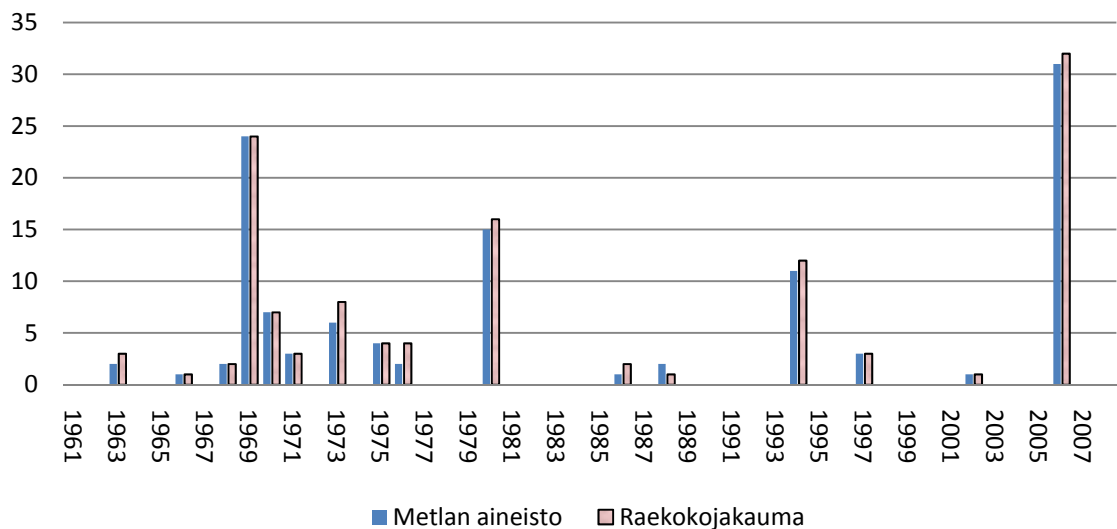


Kuva 5. Solbölen männikkö, Tammissaari. Kuvissa 5-7 on esitetty kuivuspäivilaskelmat kahta eri parametrisointia käyttäen. Ensimmäisissä laskelmissa parametrisoinnin taustalla on ollut Metlan aineisto, kun taas toisissa mitattu raekokojakauma. Kuvissa X-akselilla juoksevat vuodet ja y-akselilla kuivuspäivät.



Kuva 6. Solbölen kuusikko, Tammisaari.

Kivalon tutkimusalueen kuusikoiden sama metsätyyppi johti siihen, että Metlan aineisto antoi näille koemetsiköille identtiset maaperäparametrit. Samoin kävi tietenkin myös silloin, kun hyödynnettiin samaa raekokojakaumaa molemmissa kuusikoissa. Vertailua ei siis pystytty tekemään ja tästä syystä mitattua raekokojakaumaa päädyttiin käyttämään molemmissa koemetsiköissä. Raekokojakaumasta saatavia savi- ja hiekkaprosentteja voidaan kuitenkin pitää tarkempina kuin metsätyypeittäin ja puulajeittain laskettuja keskiarvoja.



Kuva 7. Kivalon kuusikot, Rovaniemi.

Lopulta savi- ja hiekkapitoisuudet saatiin Vilppulan, Solbölen ja Kivalon kuusikoille mitatuista raekokojakaumista. Muiden viiden koemetsikön kohdalla käytettiin Metlan aineistoa.

Taulukko 6. Vesimalliin syötettävät maaperäparametrit. C = savipitoisuus (%), S = hiekkapitoisuus (%),  $\theta_S$  = volumetrinen vesipitoisuus saturaatiossa,  $\theta_{33}$  = volumetrinen vesipitoisuus kenttäkapasiteetissa ja  $\theta_{1500}$  = volumetrinen vesipitoisuus lakastumisrajalla.

<b>Raekokojakauman perusteella:</b>					
<b>Koealue</b>	<b>C</b>	<b>S</b>	<b><math>\theta_S</math></b>	<b><math>\theta_{33}</math></b>	<b><math>\theta_{1500}</math></b>
Solböle, männikkö	2.36	92.7	0.4197	0.0440	0.0048
Vilppula, kuusikko	8.94	48.7	0.3788	0.1776	0.0550
Kivalo, kuusikot	2.21	72.4	0.3955	0.0869	0.0090
<b>Metlan aineiston perusteella:</b>					
<b>Koealue</b>	<b>C</b>	<b>S</b>	<b><math>\theta_S</math></b>	<b><math>\theta_{33}</math></b>	<b><math>\theta_{1500}</math></b>
Solböle, kuusikko	13.06	52.66	0.3824	0.1889	0.0788
Ruotsinkylä, männikkö	1.42	70.7	0.3947	0.087	0.0047
Ruotsinkylä, kuusikko	4.07	69.72	0.3907	0.1025	0.0211
Punkaharju, männikkö	10.26	52.66	0.3806	0.1745	0.0621
Punkaharju, kuusikko	13.06	52.66	0.3824	0.1889	0.0788

Myös orgaanisen aineksen vaikutusta parametreihin kolmantena selittävänä tekijänä testattiin, jotta osattaisiin arvioida sen pois jättämisen vaikutuksen suuruutta. Orgaanisen aineksen pitoisuudeksi laskelmissa valittiin 7 %. Tämä vastaa pitoisuutta, mikä enimmillään voi Etelä-Suomen mineraalimaassa olla (Smolander 2003). Humuskerroksessa pitoisuus voi nousta lähes 80 prosenttiin, mutta käytettävät yhtälöt ovat sovellettavissa ainoastaan mineraalimaahan, jossa pitoisuus ei nouse yli 8 prosentin. Tämä ehto määräytyy yhtälöiden laatimisen takana olevan USDA aineiston perusteella. Orgaanisen aineksen vaikutusta testattiin niiden koealueiden osalta, joilta oli saatavissa raekokojakauma.

Taulukko 7. Maaperäparametrit, joissa kolmantena selittävänä tekijänä on orgaaninen aines.

<b>Raekokojakauman perusteella:</b>					
<b>Koealue</b>	<b>C</b>	<b>S</b>	<b><math>\theta_S</math></b>	<b><math>\theta_{33}</math></b>	<b><math>\theta_{1500}</math></b>
Solböle, männikkö	2.36	92.7	0.4211	0.0449	0.0056
Vilppula, kuusikko	8.94	48.7	0.381	0.1785	0.0556
Kivalo, kuusikot	2.21	72.4	0.3975	0.0879	0.0098

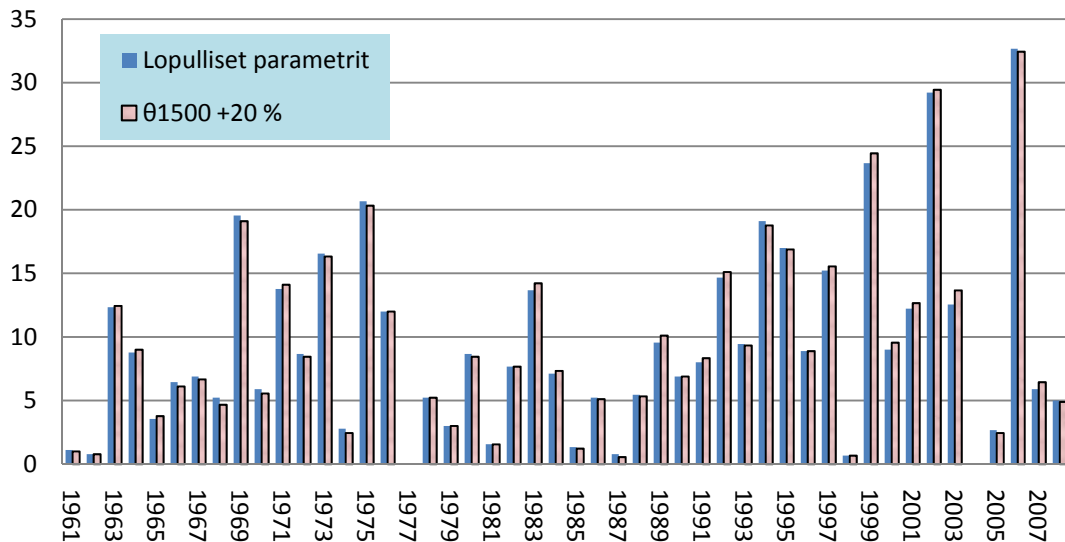
Taulukko 8. Orgaanisen aineksen aikaansaama vedenpidätyskyvyn kasvu (ilmaistuna parametreissa tapahtuneena prosentuaalisena muutoksena).

<b>Prosentuaalinen kasvu (%):</b>			
<b>Koealue</b>	<b><math>\theta_S</math></b>	<b><math>\theta_{33}</math></b>	<b><math>\theta_{1500}</math></b>
Solböle, männikkö	0.3	2.1	17.3
Vilppula, kuusikko	0.6	0.5	1.0
Kivalo, kuusikot	0.5	1.1	8.4

Orgaaninen aines näyttää vaikuttavan eniten vedenpidätyskykyyn lakastumisrajalla, sillä esimerkiksi Solbölen männikössä tätä kuvaavan parametrin arvo on noussut 17,3 % ja Kivalon kuusikoissa 8,4 %. Näitä kahta poikkeusta lukuun ottamatta orgaanisen aineksen vaikutusta maaperäparametreihin voidaan pitää pienenä. Saturaatiopisteen volumetrinen vesipitoisuutta kuvaavan parametrin kohdalla muutos on alle prosentin ja kenttäkapasiteetin volumetrinen vesipitoisuutta kuvaavan parametrin kohdalla enimmillään 2,1 %. Seuraavassa kuvassa on vielä esitetty, mikä vaikutus  $\theta_{1500}$ -parametrin (volumetrinen vesipitoisuus lakastumisrajalla) nostamisella 20 prosentilla olisi keskimääräisiin vuotuisiin kuivuspäiviin. Vuosikohtaiset kuivuspäivät on laskettu keskiarvona yhdeksän koemetsikön yli.

Taulukossa 8 esitettyjen tulosten perusteella voidaan siis sanoa, että orgaaninen aines näyttää vaikuttavan merkittäväällä tavalla ainoastaan  $\theta_{1500}$ -parametrin arvoon. Kuvasta 8 on kuitenkin nähtävissä, ettei vesimalli ole herkkä  $\theta_{1500}$ -parametrin nostamiselle, joten

parametrien laskennassa voidaan kolmen selittävän tekijän sijasta käyttää perustellusti vain kahta, savi- ja hiekkapitoisuutta.



Kuva 8. Keskimääräiset vuotuiset kuivauspäivät laskettuna todellisilla vesimalliin syötettäville koemetsikkökohtaisilla maaperäparametreilla sekä parametreilla, joissa jokaisen koemetsikön lakastumisrajan volumetrasta vesipitoisuutta kuvaavan parametrin arvoa on kasvatettu 20 %.

#### 4.2.3 Maan paksuus

Tutkielmassa käytetyssä vesimallissa maaperä koostuu yhdestä ainoasta tekstuurltaan homogeenisesta kerroksesta. Maaperän kerrostuneisuus ja kerrosten toisistaan poikkeavat vedenpidätysominaisuudet sekä juurien vedenoton jakautuminen epätasaisesti eri kerrosten välille on siis jätetty huomioimatta. Tämän sijaan puiden ajatellaan ottavan vettä tasaisesti koko maan paksuudelta. Lisäksi vedenottoa ajatellaan tapahtuvan myös juuristokerroksen alapuolella eli veden nousu maassa alemmista kerroksista kohti ylempiä kuivia kerroksia on mahdollista. Tästä syystä valittu maan paksuus on metri, vaikka hienojuuret ja mykorrhitsat joiden kautta puiden veden otto pääasiallisesti tapahtuu, sijaitsevat suurimmilta osin alle 30 senttimetrin syvyydessä

(Helmisaari ym. 2003). Maan paksuuden ollessa metri saadaan myös järkeviä vedenpidätyskykyjä eri tutkimuskohteilla (taulukko 9).

Taulukko 9. Taulukossa on esitetty maaveden määrä kenttäkapasiteetissa ( $\theta_{33}$ ) sekä lakastumisrajalla ( $\theta_{1500}$ ) lopullisilla parametreilla laskettuna maan paksuuden ollessa metri. Näiden erotus kertoo kasveille käyttökelpoisen veden määrän ja sen, mikä vedenpidätyskyky on. Vedenpidätyskyky vaihtelee provenienssikoalueilla välillä 39,2–122,5

Koalue	$\theta_{33}$ (mm)	$\theta_{1500}$ (mm)	$\theta_{33}-\theta_{1500}$ (mm)
Solböle, männikkö	44,0	4,8	39,2
Vilppula, kuusikko	177,6	55,0	122,5
Kivalo, kuusikot	86,9	9,0	77,9
Solböle, kuusikko	188,9	78,8	110,1
Ruotsinkylä, männikkö	87,0	4,7	82,3
Ruotsinkylä, kuusikko	102,5	21,1	81,4
Punkaharju, männikkö	174,5	62,1	112,4
Punkaharju, kuusikko	188,9	78,8	110,1

### 4.3 Vesimallin kalibrointi

#### 4.3.1 Kynnysarvon ja kuivuspäivärajan valinta

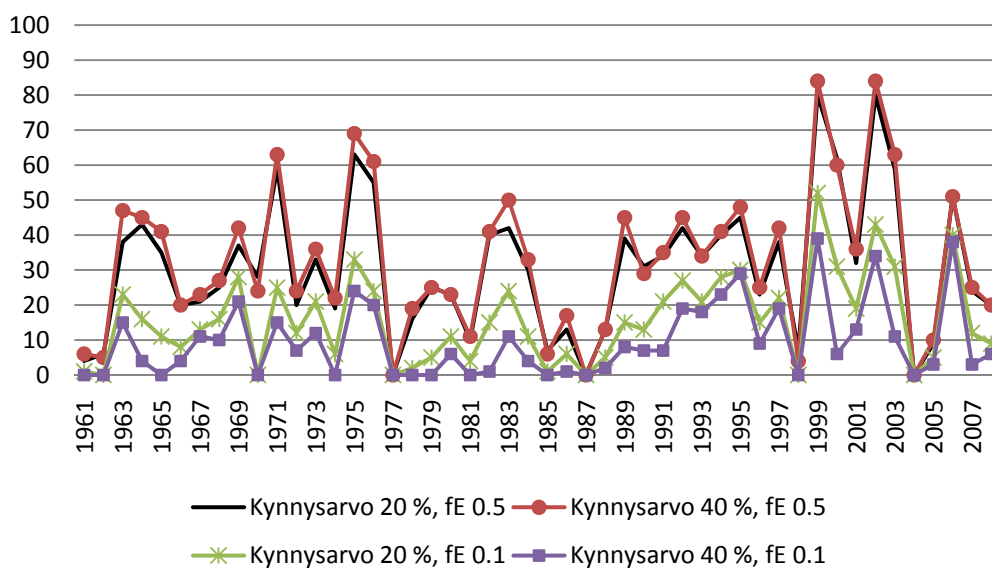
Vesimallissa maaveden määrä alkaa rajoittaa haihduntaa, kun kenttäkapasiteetin ja lakastumisrajan väliin jäävästä kasveille käyttökelpoisesta vedestä ( $R_{EW}$ , Relative Extractable Water) on jäljellä enää 40 prosenttia. Tämä kynnysarvo perustuu kirjallisuudessa esitettyyn (Sadras & Milroy 1996, Granier ym. 1999, Granier ym. 2007). Kun kasveille käyttökelpoisesta vedestä on jäljellä alle prosentti, lakkaa haihdunta kokonaan.

Varsinaista kuivuutta katsotaan olleen silloin, kun haihduntaa alaspäin skaalaava funktio  $f_w$  saa arvon 0.1 tai vähemmän. Kuivuspäiväraja tulee näin ollen vastaan, kun kasveille

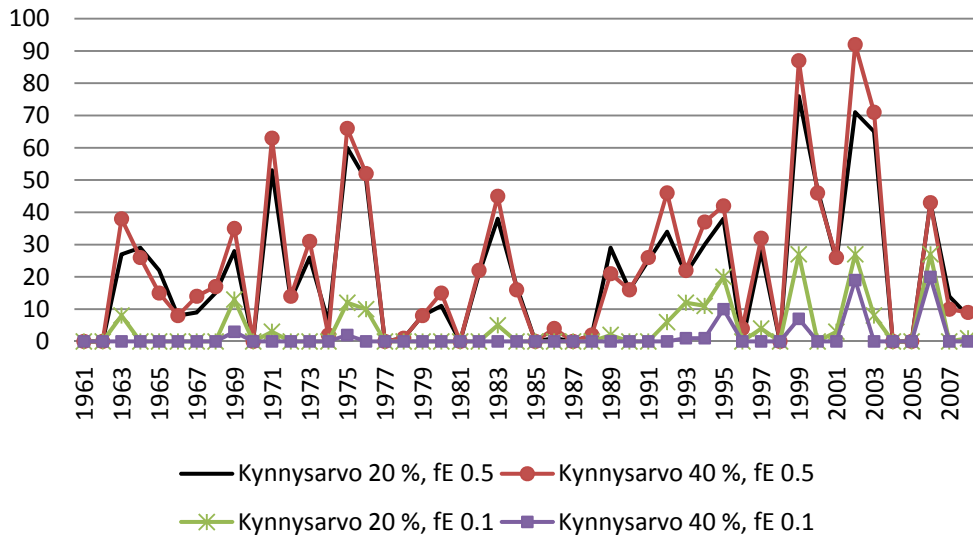


käyttökelpoisen veden määrä on neljä prosenttia tai vähemmän ja haihdunta leikkaantuu 90 prosentilla. Tässä vesimallissa maan vesipitoisuus ei koskaan laske lakastumisrajan alapuolelle, mikä poikkeaa monesti käytetystä kuivuuspäivämääritelmästä. Esimerkiksi Kellomäen (2005) laskelmissa kuivuuspäiviä ovat juuri ne, jolloin vesipitoisuus on lakastumisrajan alapuolella.

Vesimalliin on siis ohjelmoitu kuivuuspäiväindeksi. 40 prosentin kynnyksiarvo on valittu kirjallisuuteen perustuen, mutta laskelmia tehtiin myös 20 prosentilla kynnyksiarvon merkityksen testaamiseksi tulosten kannalta. Vertailua kynnyksiarvojen välillä tehtiin kahta eri kuivuuspäiväraja käyttäen: funktion  $f_w$  arvoilla 0.1 ja 0.5. Vertailua tehtiin jokaisen koemetsikön kohdalla ja tulokset olivat niissä samansuuntaiset. Kuvissa 9 ja 10 on esitetty vertailun tulokset Solbölen koemetsiköille.



Kuva 9. Solböle, männikkö.



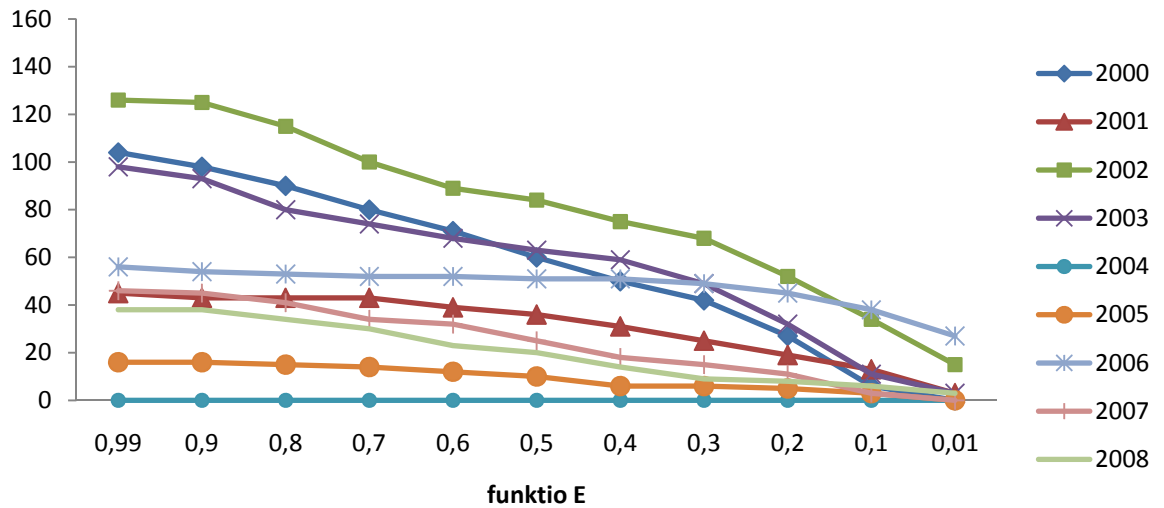
Kuva 10. Solböle, kuusikko.

Kun kuivuuspäivärajana on haihdunnan leikkaantuminen 50 prosentilla, 40 prosentin kynnysarvo antaa jonkin verran enemmän kuivuuspäiviä 20 prosenttiin verrattuna, mutta erot pysyvät pieninä. Tilanne kääntyy päinvastaiseksi ja erot kasvavat, kun kuivuuspäiväraja lasketaan vesipitoisuuteen, jossa haihdunta leikkaantuu 90 %. Vesimallin herkkyys kynnysarvolle siis kasvaa kuivuuspäivärajan madaltuessa.

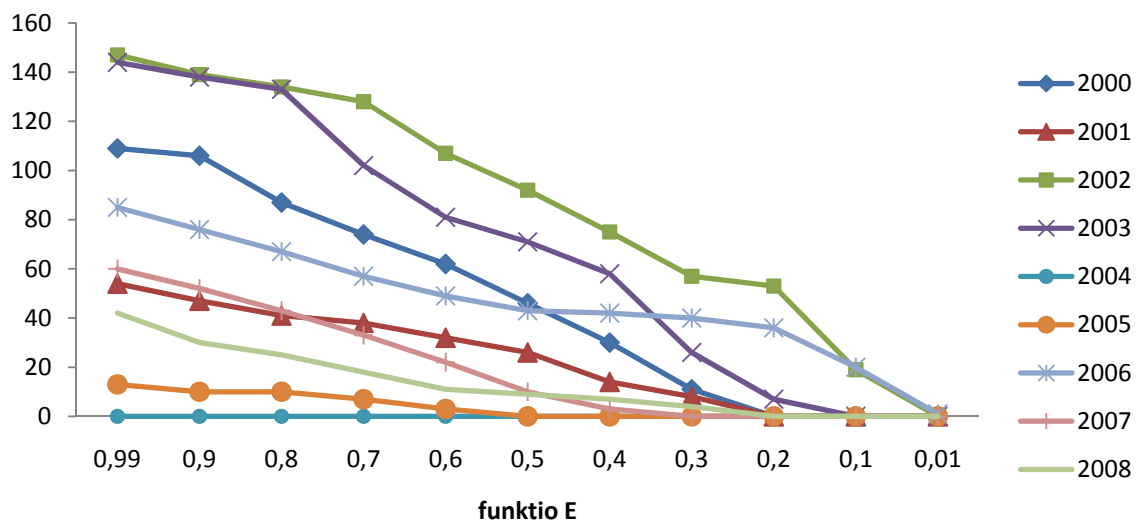
Erot kynnysarvojen välillä funktion  $f_w$  arvolla 0.5 selittyvät varmaankin sillä, että 40 prosentin arvolla kuivuuspäiväraja tulee jo korkeammassa vesipitoisuudessa vastaan verrattuna 20 prosenttiin ja näin kuivuuspäiviä kertyy helpommin. Sama selitys ei kuitenkaan enää päde, kun kuivuuspäivärajaa alennetaan ja sen saavuttamiseksi vesipitoisuuden maassa tulee laskea erittäin alhaiseksi. Haihdunnan aiemmin alkava leikkaantuminen 40 prosentin kynnysarvolla nimittäin estää tehokkaasti vesipitoisuutta tippumasta kuivuusrajan alapuolelle siitäkin huolimatta että se sijoittuu korkeammalle kuin 20 prosentin kynnysarvolla. Vettä on siis kuivina aikoina maaperässä enemmän kuin 20 prosentin kynnysarvolla.

Kuivuuspäivärajaa valittaessa laskentoja tehtiin siten, että funktion  $f_w$  arvo vaihteli välillä 0.99–0.01. Arvolla 0.99 kuivuuspäiväraja tulisi vastaan lähes heti vesipitoisuuden laskiessa valitun 40 prosentin kynnysarvon alapuolelle. Kasveille käyttökelpoista vettä

olisi jäljellä vielä 39,6 %. Pienimmällä arvolla 0.01, jolloin haihdunta olisi voimakkuudeltaan enää prosentin normaalista, todellista kuivuutta ilmenisi vasta, kun kasveille käyttökelpoisesta vedestä olisi jäljellä 0,4 prosenttia. Samoin kuin kynnsarvon kohdalla, laskennat tehtiin jokaiselle paikkakunnalle erikseen. Esimerkkikohteiksi on valittu Tammissaaren Solbölen tutkimusalueen koemetsiköt ja esimerkkivuosiksi vuodet välillä 2000–2008 (kuvat 11 ja 12).



Kuva 11. Solböle, männikkö.



Kuva 12. Solböle, kuusikko.

Kuvista 11 ja 12 nähdään kuinka funktion arvon pienentäminen ensinnäkin vähentää kuivuspäiviä, mutta toiseksi myös muuttaa vuosien keskinäistä järjestystä kuivuuden esiintymisen suhteen. Lisäksi kuivuspäivien määrät vähenevät vuosien välillä funktion arvoa laskettaessa toisistaan poikkeavasti. Esimerkiksi Solbölen männikössä vuonna 2006 kuivuspäivissä näkyy selvää vähenemistä vasta, kun funktion  $f_w$  arvo laskee 0,3:n alapuolelle. Toisin on vuoden 2002 kohdalla, jolloin laskua tapahtuu koko ajan. Nämä vuodet myös vaihtavat keskenään paikkaa kuivusrajan aletessa. Funktion  $f_w$  arvolla 0,99 vuonna 2002 kuivuspäiviä on yli kaksinkertainen määrä vuoteen 2006 verrattuna. Arvolla 0,01 päinvastaisesti vuonna 2006 on lähes kaksinkertainen määrä kuivuspäiviä vuoteen 2002 verrattuna. Vuonna 2002 maaperän vesipitoisuus on useasti ollut alemmalla tasolla kuin vuonna 2006, mistä syystä kuivuspäiviä tulee runsaammin rajan ollessa korkea. Vesipitoisuudeltaan erittäin alhaiset kuivuspäivät erottuvatkin vasta kun kuivuspäiväraja on asetettu riittävän matalaksi ja tästä syystä vesimallissa on päädytty funktion  $f_w$  arvoon 0,1. Näin tuloksista on nähtävissä ne päivät, jolloin kuivuus on lähes pysäyttänyt haihdunnan ja vaikuttaa jo merkittävästi puuston yhteytykseen.

#### **4.3.2 Vakion lehtialan käyttö haihduntamallissa: SPP**

Sun ym. (2008) vertailivat Yhdysvalloissa tekemässään tutkimuksessa haihduntaa kahdeksan eri metsäekosysteemin välillä. Tutkimuskohteet vaihtelivat varttuneista lehti- ja havumetsistä aina nuoriin taimikoihin. Mukana oli myös kaksi kulotettua metsikköä. Tulokset osoittivat, ettei lehtialaindeksillä (LAI) yksinään pystytä selittämään ekosysteemien välisiä eroja haihdunnassa. Esimerkiksi karuilla männiköllä, joilla LAI oli matala, haihdunta oli verrattavissa varttuneeseen kuusikkoon. Ainoastaan kulotetuilla kohteilla palon merkittävästi laskema lehtialaindeksi vähensi haihduntaa muihin kohteisiin verrattuna. Myös Monson ym. (2009) tekivät saman havainnon yrittäessään selvittää, mistä kahden eri metsäekosysteemin väliset erot vedenkäytön tehokkuudessa johtuivat (vedenkäytön tehokkuus kuvaa nettoekosysteemituotoksen ja haihdunnan välistä suhdetta). Vaikka eroja peilattiin lehtialaindeksin kanssa, ei tällä ollut minkäänlaista selitysvoimaa. Vakion lehtialan käytön järkevyyttä testattiin vielä erikseen SPP:llä (Stand Photosynthesis Program (Mäkelä ym. 2006)) sekä tekemällä vuosina 2000–

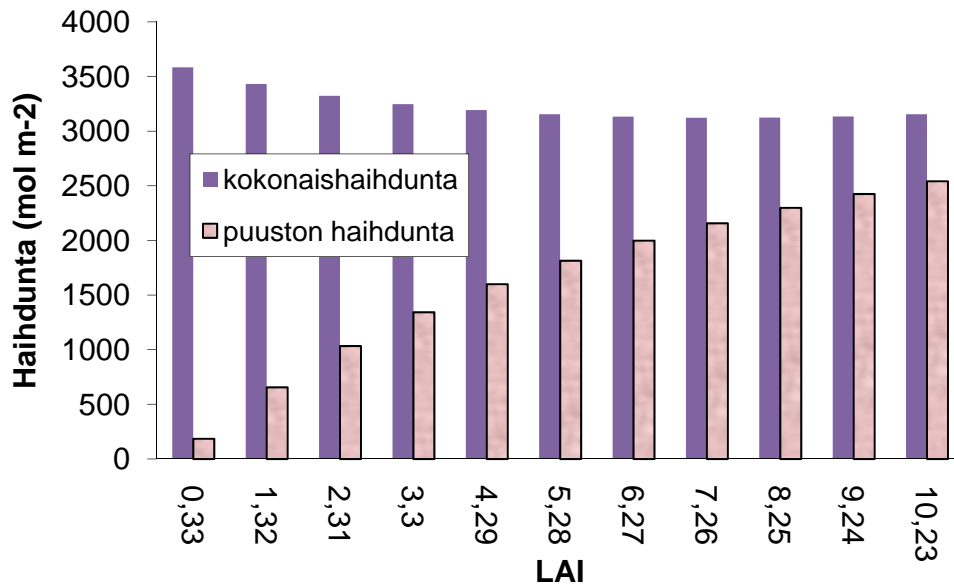
2002 vertailua haihduntamallin antamien tulosten ja kahden mitatun haihduntadatan välillä, joissa lehtialaindeksi oli erisuuruinen.

SPP:ssä metsikkö koostuu puuston erilaisista kokoluokista sekä aluskasvillisuudesta (Kolari ym. 2009). Yhden kokoluokan sisällä puut ovat aina identtiset ja sijaitsevat toisiinsa nähden satunnaisesti (Kolari ym. 2009). Tutkittaessa lehtialaindeksin vaikutusta metsikön haihduntaan, puusto kuvattiin ainoastaan yhdellä kokoluokalla. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikki puut olivat keskenään samanlaisia. Puustokokoluokan lisäksi laskennoissa oli omat kokoluokansa pintakasvillisuudelle ja maaperälle. SPP laskee metsikön lehtialaindeksin puustoa kuvaavan kokoluokan tietojen perusteella (Mäkelä ym. 2006, Kolari ym. 2009). Yhden puun lehtiala saadaan kertomalla puun lehtimassa sen spesifisellä lehtialalla (lehtiala per massayksikkö). Koko metsikön lehtialaan päästään kun yhden puun lehtiala kerrotaan vielä puuston tiheydellä. Esimerkiksi, jos puun lehtimassa on 3,3 kg ja spesifinen lehtiala  $10 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ , yhden puun lehtialaksi saadaan  $33 \text{ m}^2$ . Puuston tiheydellä 1000 puuta hehtaarilla, koko metsikön lehtiala on puolestaan  $33\,000 \text{ m}^2$ . Lehtialaindeksi on metsikön lehtiala ilmoitettuna  $\text{m}^2/\text{m}^2$  eli tässä tapauksessa 3,3.

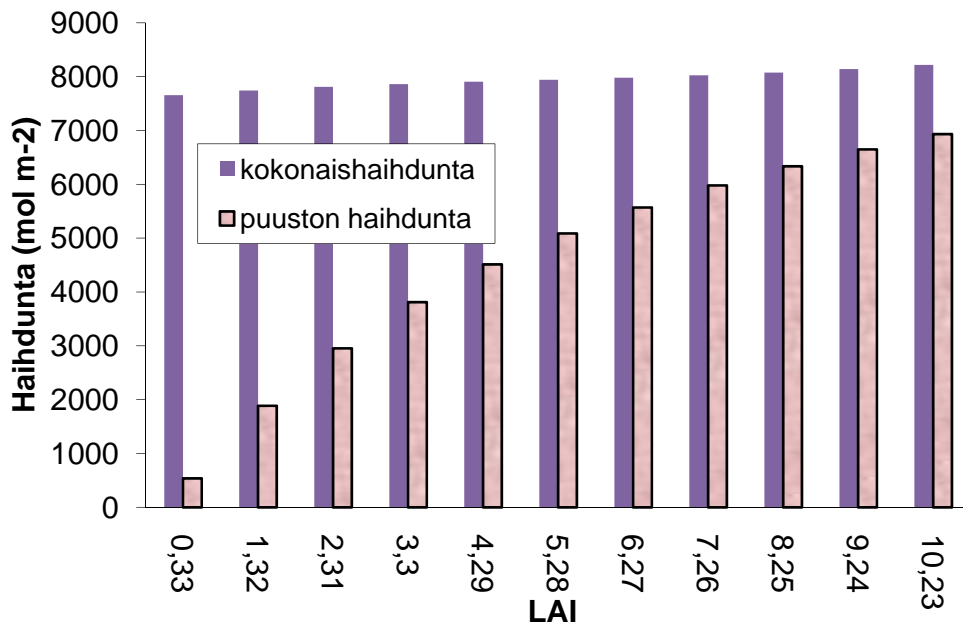
SPP:llä voidaan laskea sekä puuston haihdunta että metsänpohjahaihdunta, joka käsittää pintakasvillisuuden lisäksi myös maaperän. SPP:llä on näin ollen mahdollista tutkia lehtialaindeksin vaikutusta kokonaishaihduntaan. Metsänpohjahaihdunnan laskennan oletuksena on, ettei ilmarakosäätelyllä ole suurta merkitystä, vaan metsän pohjalle saapuva säteilyenergia selittää haihdunnan varsin hyvin (Kolari, henkilökohtainen tiedonanto). Metsänpohjahaihdunnan mallina on käytetty Priestley-Taylor – mallia (Priestley & Taylor 1972), jossa nettosäteily on korvattu latvuston läpäisseellä globaalisäteilyllä (Kolari, suullinen tieto).

Laskennoissa käytettiin Hyytiälässä sijaitsevasta männiköstä mitattua dataa. Säädata oli Hyytiälästä vuodelta 2005. Kevät ja kesä oli eroteltu ja näiden vuodenaikojen osalta haihdunnan muutoksia tarkasteltiin erikseen. Lisäksi puuston haihdunta ja kokonaishaihdunta oli eroteltu tuloksissa. Ensin laskennoissa muutettiin puuston tiheyttä siten, että lehtialaindeksi (LAI) vaihteli välillä 0.33–10.23. Lehtimassa ja spesifinen lehtiala olivat vakiot  $3.3 \text{ kg}$  ja  $10 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ . Laskentojen toisessa vaiheessa puuston tiheys puolestaan oli vakio (1300 puuta hehtaarilla), kun taas latvuksen koko ja lehtimassa

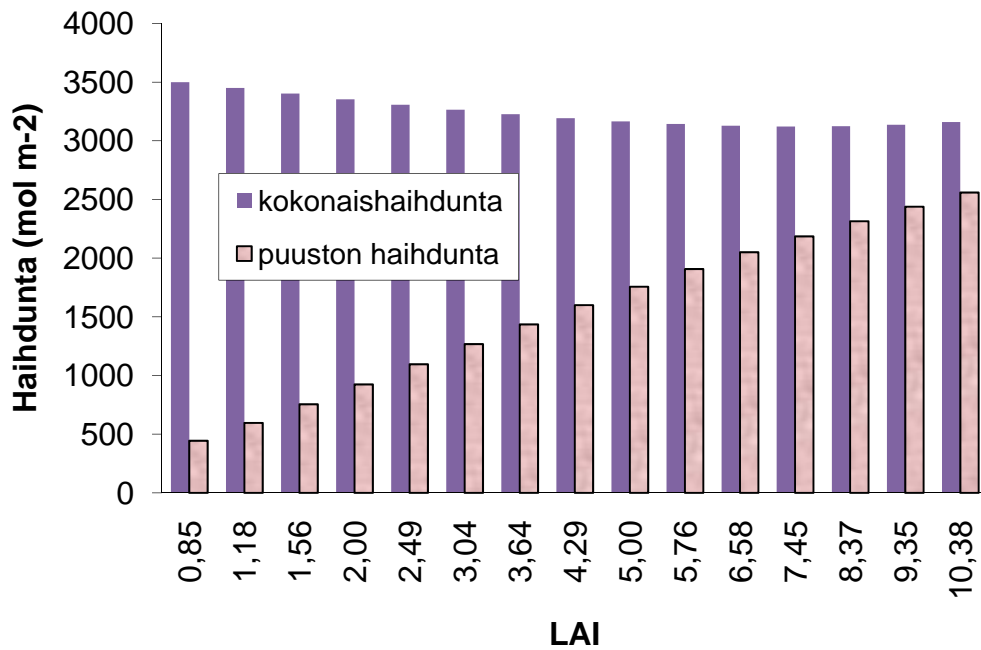
vaihtelivat. Latvuksen pituuden ja leveyden suhde pysyi vakiona ja lehtimassa laskettiin latvuksen piteuden neliöstä. Lehtialaindeksi vaihteli välillä 0.85–10.38.



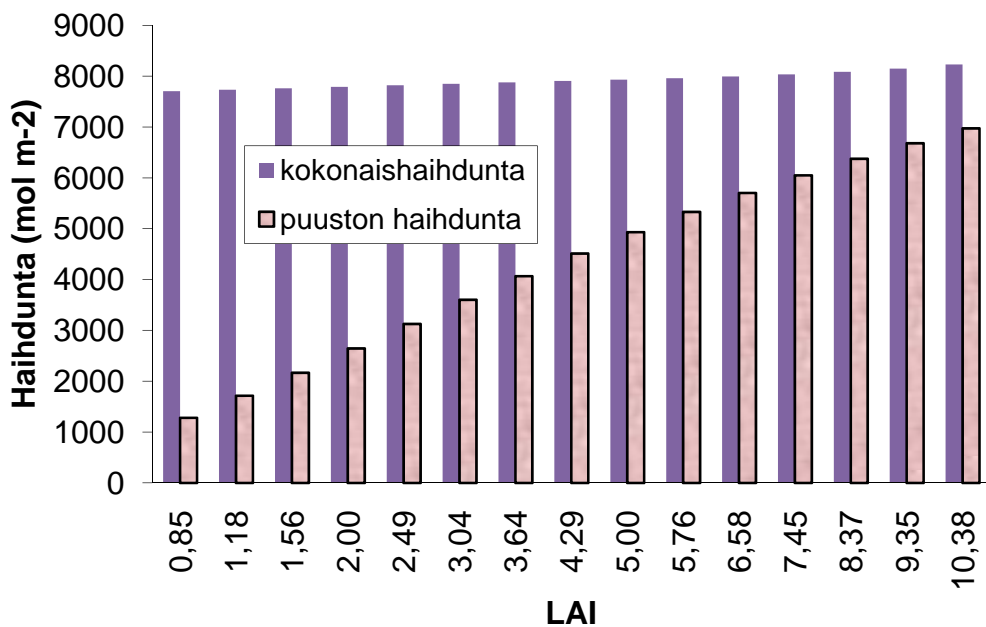
Kuva 13. Kokonaishaihdunnan ja puuston haihdunnan vaihtelu keväällä (päivät 60-160, maaliskuu-toukokuu), kun lehtialaindeksiä kasvatettiin lisäämällä puuston tiheyttä.



Kuva 14. Kokonaishaihdunnan ja puuston haihdunnan vaihtelu kesällä (päivät 160-260, kesäkuu-elokuu), kun lehtialaindeksiä kasvatettiin lisäämällä puuston tiheyttä.



Kuva 15. Muutokset kokonaishaihdunnassa ja puuston haihdunnassa keväällä, kun lehtialaindeksiä on kasvatettu suurettamalla latvuskokoa ja lehtimassaa.



Kuva 16. Muutokset kokonaishaihdunnassa ja puuston haihdunnassa kesällä, kun lehtialaindeksiä on kasvatettu suurettamalla latvuskokoa ja lehtimassaa.

Muutokset lehtialaindeksissä vaikuttivat erittäin vähän metsikön kokonaishaihduntaan. Puuston haihdunnassa LAI:n muutokset kuitenkin näkyivät selvästi ja tästä voidaankin päätellä, että pintakasvillisuus kompensoi erittäin hyvin puuston alhaista haihduntaa LAI:n ollessa pieni. Näiden tulosten valossa haihdunnan oletaminen riippumattomaksi lehtialasta on perusteltavissa.

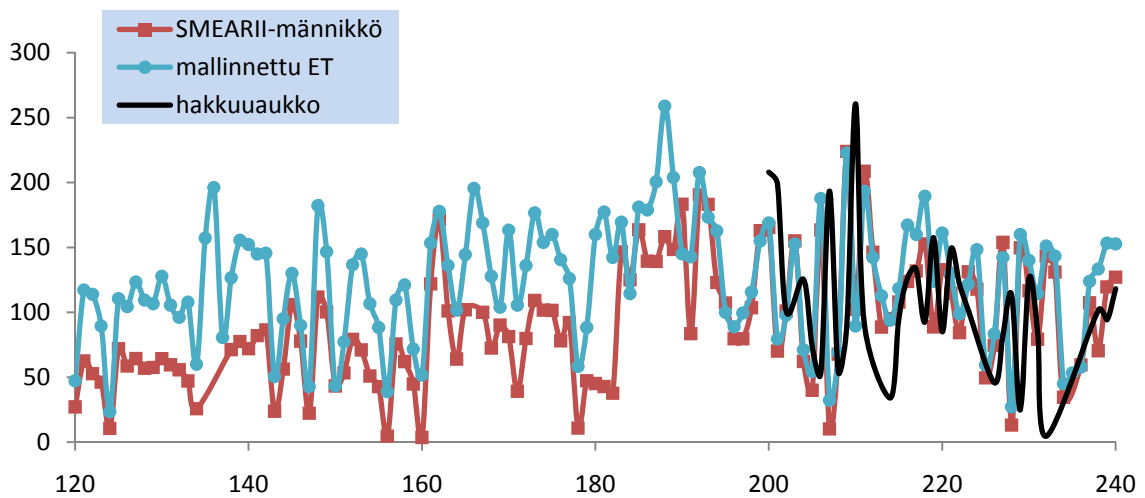
#### **4.3.3 Vakion lehtialan käyttö haihduntamallissa: mallinnetun ja mitatun haihdunnan vertailu**

SPP:llä tehtyjen ajojen lisäksi haihdunnan riippumattomuutta lehtialasta testattiin mallintamalla haihdunta vuosille 2000–2002 vesimallin sisältämää yksinkertaista haihduntamallia käyttäen. Mallintamiseen tarvittava säädata saatiin Hyytiälästä SMEARII-aseman mittauksista. Tämän jälkeen mallinnettua haihduntaa verrattiin kahteen mitattuun haihduntadataan. Ensimmäinen vertailukohde saatiin Hyytiälän SMEARII-aseman nuoresta männiköstä, josta oli saatavilla haihduntamittauksia vuosilta 2000–2002. Toinen vertailukohde saatiin Etelä-Suomessa sijaitsevista ns. CARBOAGE-metsiköistä (Kolari ym. 2004). Vuonna 2000 haihduntaa oli mitattu hakkuuaukolla, vuonna 2001 varttuneessa metsikössä ja vuonna 2002 nuoressa metsikössä. Vuosittain vertailtiin siis aina mallinnettua haihduntaa sekä mitattua haihduntaa kahdessa metsikössä, joissa lehtialaindeksi oli erisuuruinen.

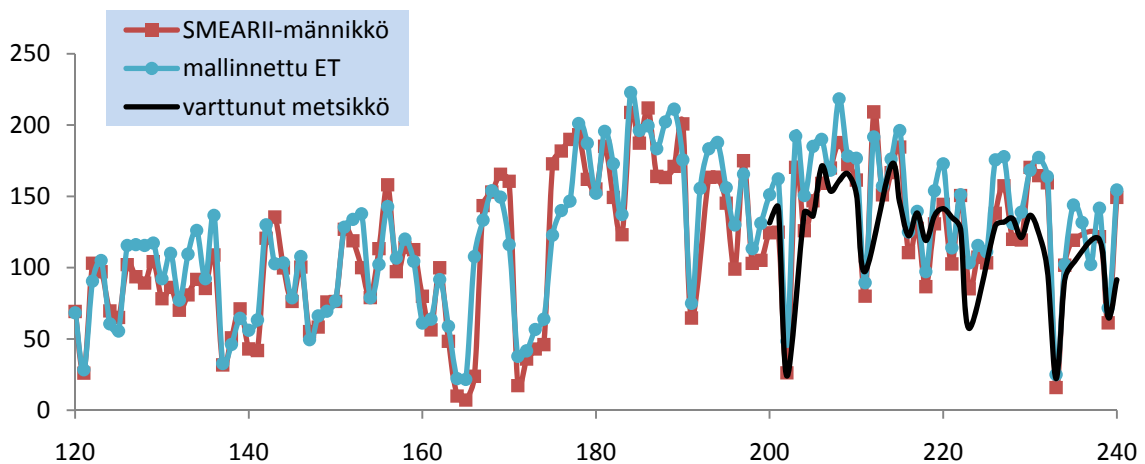
Hyytiälän SMEAR-aseman männikön lehtialaindeksi oli vuosina 2000 ja 2001 6,084. Vuonna 2002 LAI laski arvoon 5,720 harvennuksen seurauksena. CARBOAGE-kohteissa lehtialaindeksit olivat seuraavat: hakkuuaukko 0,065, varttunut metsikkö 5,46 ja nuori metsikkö 2,08.

Kuvissa 17–19 nähdään vertailun tulokset vuosittain. CARBOAGE-metsiköissä haihduntaa oli mitattu ainoastaan päivinä 200–240, kun taas mallinnettu ja SMEAR-asemalla mitattu aineisto alkaa jo vuoden päivästä 120.

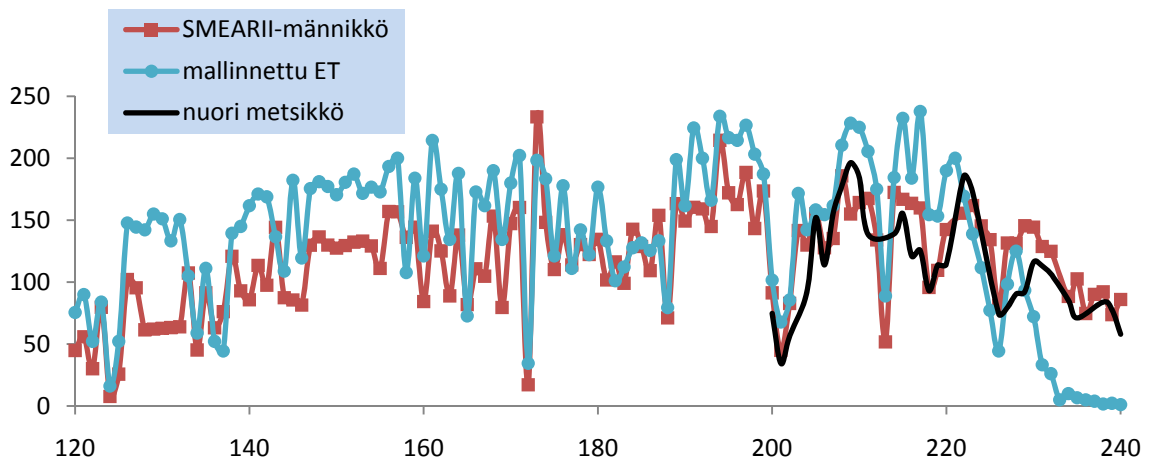




Kuva 17. Vuoden 2000 osalta mallinnettua haihduntaa verrattiin SMEAR-aseman männikössä ja hakkuuaukolla mitattuun haihduntaan. X-akselilla juoksevat vuoden päivät, y-akselilla on haihdunta ( $\text{mol/m}^2/\text{day}^{-1}$ ).



Kuva 18. Vuoden 2001 osalta mallinnettua haihduntaa verrattiin SMEAR-aseman männikössä ja varttuneessa metsikössä tehtyihin mittauksiin.



Kuva 19. Vuonna 2002 mallinnettua haihduntaa verrattiin SMEAR-aseman männikön lisäksi nuoressa metsikössä mitattuun haihduntaan.

Tarkastellun ajanjakson alussa, eli loppukevällä, mallinnetun ja SMEARin männikössä mitatun haihdunnan välillä on enemmänkin eroa vuosina 2000 ja 2002. Erot kuitenkin tasoittuvat, kun siirrytään kevästä kesään, ja vuoden 2001 osalta mallinnettu haihdunta vastaa koko tarkastelujakson ajan hyvin SMEARin mitattua haihduntaa. Kun CARBOAGE-metsiköt ottaa tarkasteluun mukaan, ei yhteensopivuus eri aineistojen välillä juurikaan muutu. CARBOAGE-paikoilla mitattu haihdunta vastaa melko hyvin mallinnettua sekä SMEAR-asemalla mitattua haihduntaa, jopa hakkuuaukolla, jossa haihdunta on pelkästään pintakasvillisuuden ja paljaan maan varassa.

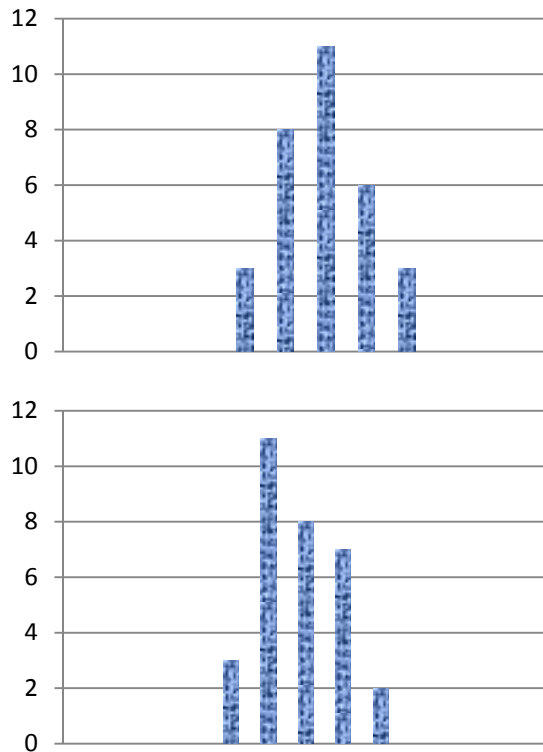
## 5 Aineiston analyysi

### 5.1 Tilastollinen testaus: lustoindeksin ja kuivuuden välinen riippuvuus

Kahden riippumattoman otoksen keskiarvotesti (t-testi) testaa kahden otoksen keskiarvojen välisen eron merkitsevyyttä. Tässä tapauksessa ensimmäisen otoksen muodostavat lustomittauksista lasketut lustoindeksit kuivina vuosina ja toisen otoksen lustoindeksit ns. normaaleina vuosina. Aineisto, josta otokset muodostetaan, kattaa lustomittauksista lasketut lustoindeksit 31 vuoden ajalta. Kuiviksi vuosiksi lasketaan ne vuodet, joiden aikana on esiintynyt vähintään yksi kuivuuspäivä. Normaaleista vuosista lasketaan pois edellä mainitut kuivat vuodet, mutta myös kuivien vuosien jälkeiset vuodet. Kasvukauden aikainen kuivuus voi nimittäin vaikuttaa puuston kasvuun vielä seuraavana kasvukautena.

Kuivat ja normaalit vuodet ovat toisistaan riippumattomia, sillä vesivarastot täyttyvät aina talvella, eikä edeltävän vuoden sää vaikuta millään lailla seuraavan vuoden säähän. Riippumattomuutta vahvistaa myös se, että normaaleista vuosista on jätetty pois kuivien vuosien jälkeiset vuodet. Mahdolliset kuivuuden kasvuaikutukset kahden vuoden päähän jätettiin huomioimatta.

Otosten riippumattomuuden lisäksi kyseinen keskiarvotesti olettaa, että aineisto on normaalijakautunut ja siitä laskettu keskiarvo pätevä. Koska lustoindeksi on suhdeasteikolla mitattava muuttuja, keskiarvon pätevyys ei ole ongelma. Normaalijakauma soveltuu useiden elävään luontoon liittyvien muuttujien kuvaamiseen, joihin ympäristö- ja perintötekijät samanaikaisesti vaikuttavat. Luston kasvun ja siitä muodostetun lustoindeksin uskoisi kuuluvan näiden muuttujien joukkoon. Normaalijakautuneisuutta kuitenkin testattiin ennalta. Ongelmana oli aineiston pieni koko, mutta silti tulokset antoivat tukea t-testin käytölle (kuva 20).



Kuva 20. Ruotsinkylän kuusikon ja Punkaharjun männikön lustoindeksiaineistoista piirretyt jakaumat.

T-testillä saadaan siis selville, johtuvatko lustoindeksilaskelmista saatujen otoskeskiarvojen erot todella kuivuudesta vai muista tekijöistä. Nollahypoteesina on, ettei lustojen kasvu kuivina vuosina poikkea muiden vuosien kasvusta. Vaihtoehdohypoteesina on, että kuivien ja normaalien vuosien väliselle kasvulle saadaan kuivuudesta johtuvaa eroa.

## 6 Tulokset

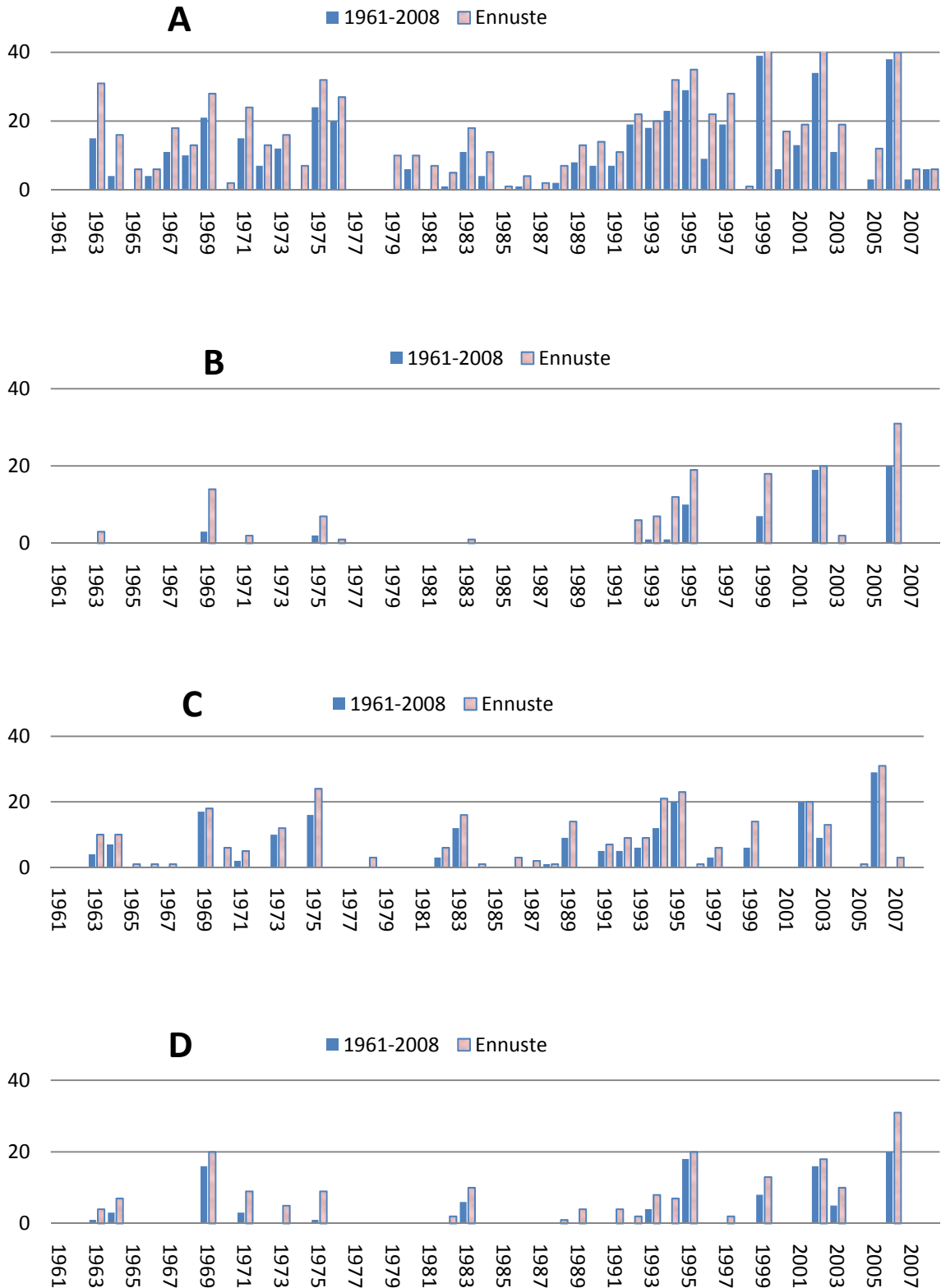
### 6.1 Maaperän kuivuuden lisääntyminen ilmaston muuttuessa

Vesimallilla on ensin laskettu kuivuuspäivät vuosille 1961–2008 provenienssikoealueittain mitattua sääaineistoa käyttäen. Tämän jälkeen laskennat on toistettu, mutta mitatun sääaineiston sijasta on käytetty sääennustetta. Laskennoissa on siis verrattu kahta identtistä ajanjaksoa toisiinsa, joista toista on modifioitu lämpötilan, sadannan ja VPD:n osalta vuosille 2071–2100 tehdyn ennusteen mukaisesti. Tuloksista voidaan toisin sanoen nähdä, kuinka kuivuuspäivien määrä muuttuisi, jos vuodet 1961–2008 esiintyisivät uudestaan ilmastonmuutoksen muokkaamina. Kuivuuspäivinä kasveille käyttökelpoisen veden määrä on laskenut alle neljän prosentin ja haihdunnan suuruus on maksimissaan 10 prosenttia normaalista.

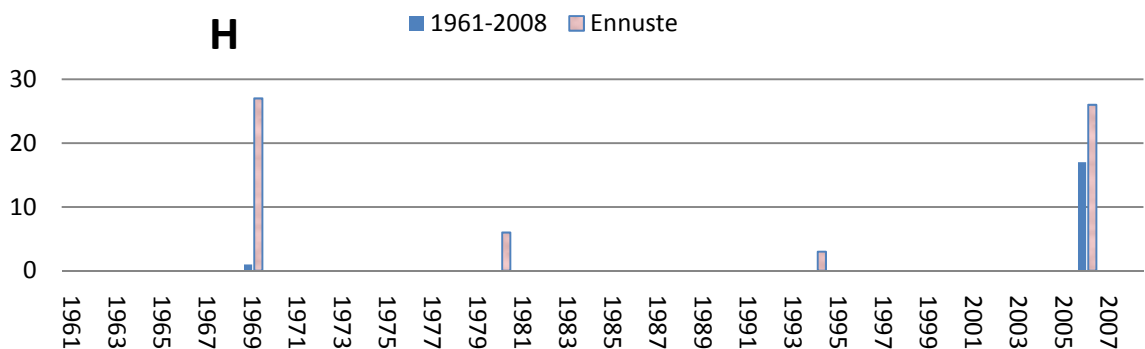
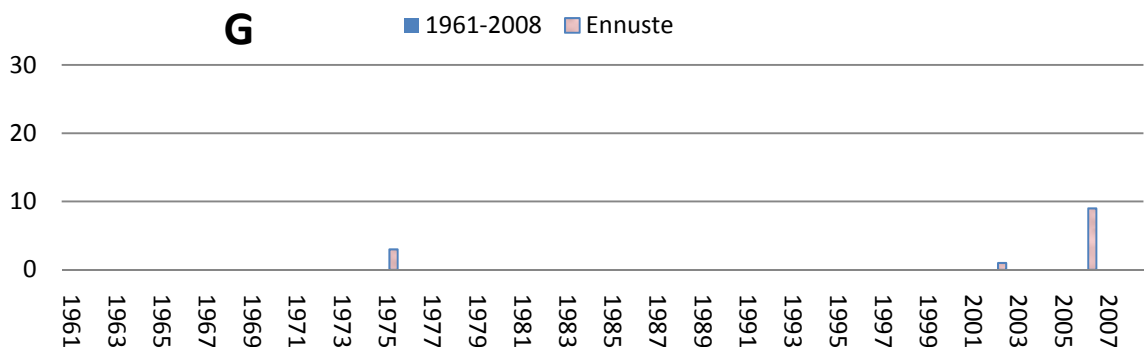
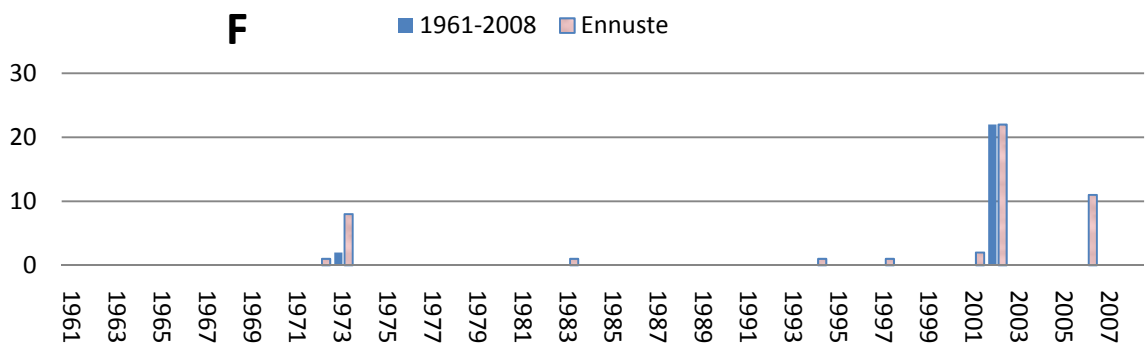
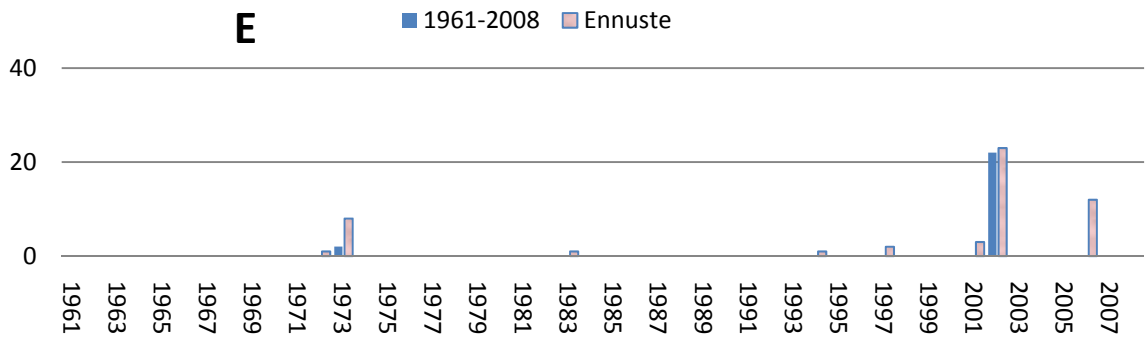
Kuvassa 21 esitetään laskentojen tulokset etelärannikolla sijaitsevien tutkimuskohteiden osalta. Solbölen (Tammisaari) ja Ruotsinkylän (Tuusula) kuivahkojen kankaiden männiköt (kuvan 21 A ja C) erottuvat vastaavien tutkimusalueiden kuusikoista (B ja D) kuivuuspäivien esiintymisessä. Myös kasvupaikka muuttuu ravinteikkaampaan suuntaan, kun siirrytään männiköstä kuusikkoon: Solbölen kuusikko kasvaa lehtomaisella kankaalla ja Ruotsinkylän kuusikko tuoreella kankaalla. Yhteistä näille neljälle kohteelle on kuitenkin se, että ilmaston muuttuminen kasvattaa kuivuuspäivien määrää.

Kuvassa 22 on puolestaan esitetty mantereisten kohteiden kuivuuspäivät nyky- ja muuttuvassa ilmastossa. Kivalon tutkimusalueen (Rovaniemi) kuusikoiden tulokset olivat identtiset, sillä laskentojen syöttötiedot olivat samat. Maaperäparametrien yhteneväisyys seurasi samoista hiekka- ja savipitoisuuksista. Kohteiden rinnakkainen sijainti taas oli syynä yhteiseen sääaineistoon. Kivalolle esitetään näin ollen ainoastaan yhden tulokset.

Huomattavaa on, että Punkaharjun, Vilppulan ja Kivalon kohteilla kuivuuspäivien esiintyminen on selvästi harvinaisempaa kuin etelärannikon kohteilla. Kasvua kuivuuspäivien määrässä tapahtuu kuitenkin näilläkin kohteilla ilmaston muuttuessa. Punkaharjun männikkö ja kuusikko kasvavat lehtomaisella kankaalla, Vilppulan ja Kivalon kuusikot tuoreella kankaalla.



Kuva 21. Diagrammeissa A-D on esitetty koemetsikkökohtaisesti, kuinka paljon kuivuuspäivät ovat lisääntyneet, kun ajanjakso 1961–2008 on toistettu laskennoissa sääennustetta käyttäen (A=Solböle, männikkö, B=Solböle, kuusikko, C=Ruotsinkylä, männikkö ja D=Ruotsinkylä, kuusikko).



Kuva 22. Diagrammeissa E-H on kuvan 21 tavoin esitetty kuivuspäivien määrässä tapahtuva muutos koemetsikkökohtaisesti, kun laskennoissa sovelletaan sääennustetta (E=Punkaharju, männikkö, F=Punkaharju, kuusikko, G=Vilppula, kuusikko ja H=Kivalo, kuusikot).

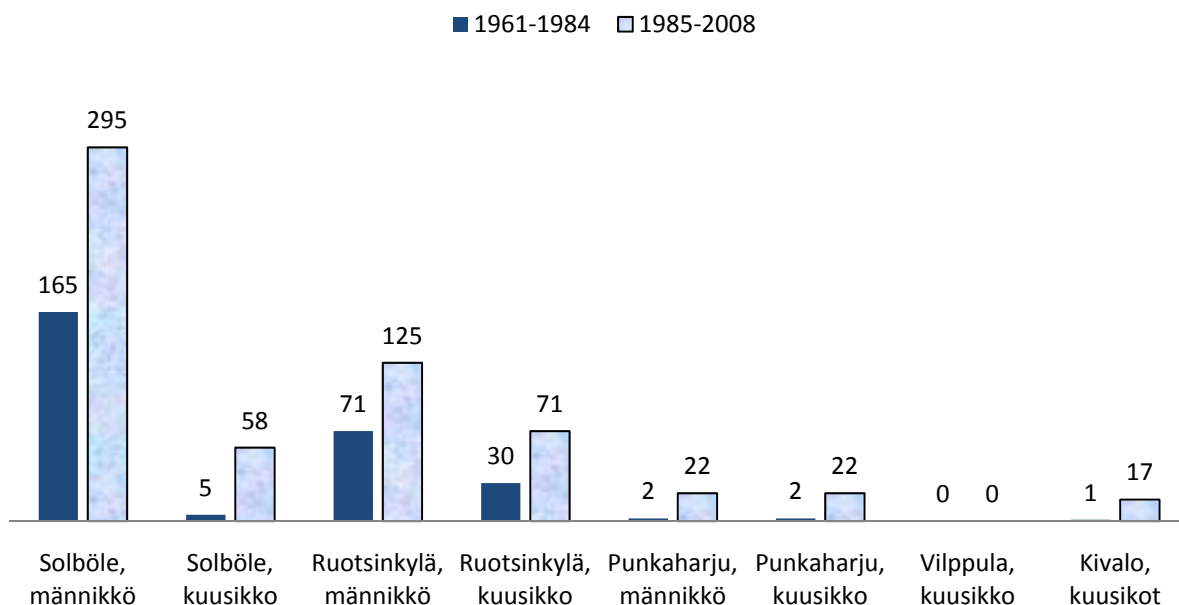
Taulukko 10. Taulukossa esitetään provenienssikoealueittain, minä vuosina ja kuukausina välillä 1961–2008 on esiintynyt vähintään kymmenen päivää kestäviä kuivuusjaksoja.

	Vähintään 10 päivää kestänyt kuivuusjakso		
	heinäkuu	elokuu	syyskuu
Solböle, männikkö	1973,1975,1992,1993,1994, 1997,1999,2006	1968,1969,1975,1976,1983, 1994,1995,2002,2006	1999,2002
Solböle, kuusikko		1995,2006	2002
Ruotsinkylä, männikkö	1973,1975,2006	1969,1994,1995,2002,2003, 2006	
Ruotsinkylä, kuusikko		1969,1995,2002,2006	
Punkaharju, männikkö		2002	
Punkaharju, kuusikko		2002	
Vilppula, kuusikko			
Kivalo, kuusikko		2006	

Solbölen männikössä vähintään kymmenen päivän mittaisia kuivuusjaksoja mahtuu vuosien 1961–2008 välille yhdeksäntoista, joista suurin osa ajoittuu heinä- tai elokuuhun. Myös Ruotsinkylän männikössä kuivuusjaksoja on lähes kymmenen, joista kaksi vuoden 2006 aikana. Muilla kohteilla pitkien kuivuusjaksojen määrä 48 vuoden tarkastelujaksolla jää alle viiden. Tulokset osoittivat, että ilmastonmuutos kasvattaa kuivuusjaksojen pituutta entisestään sekä lisää yksittäisten kuivuuspäivien esiintymisen todennäköisyyttä. Esimerkiksi Vilppulan kuusikossa kuivuuspäiviä ei ollut lainkaan vuosina 1961–2008, mutta vuosisadan lopun olosuhteissa niitä esiintyi kolmena vuotena 48 vuoden pituisella tarkastelujaksolla. Solbölen ja Ruotsinkylän männiköissä ilmaston muuttuminen nosti lisäksi kesäkuun kuivuuspäivien määrää, joita ajanjaksolla 1961–2008 oli vain muutama.

Jos tarkasteluun otetaan ainoastaan ajanjakso 1961–2008 ja unohdetaan vertailu nyky- ja tulevan ilmaston välillä, voidaan nähdä jo pelkästään tämän jakson aikana tapahtunut merkittävä muutos kuivuuspäivien esiintymisessä (kuva 23). Kuivuuspäivien kokonaismäärästä 64 % osuu tarkastelujakson jälkimmäiselle puoliskolle (vuosille 1985–2008) Solbölen ja Ruotsinkylän männiköissä. Ruotsinkylän kuusikossa vastaava luku on 70 %, Solbölen kuusikossa ja Punkaharjun molemmissa kohteissa 92 % ja Kivalon kuusikoissa 94 %.





Kuva 23. Kuivuuspäivien kokonaismäärän jakautuminen provenienssialueilla 48 vuoden tarkastelujaksolle, kun tämä on jaettu kahteen 24 vuoden jaksoon.

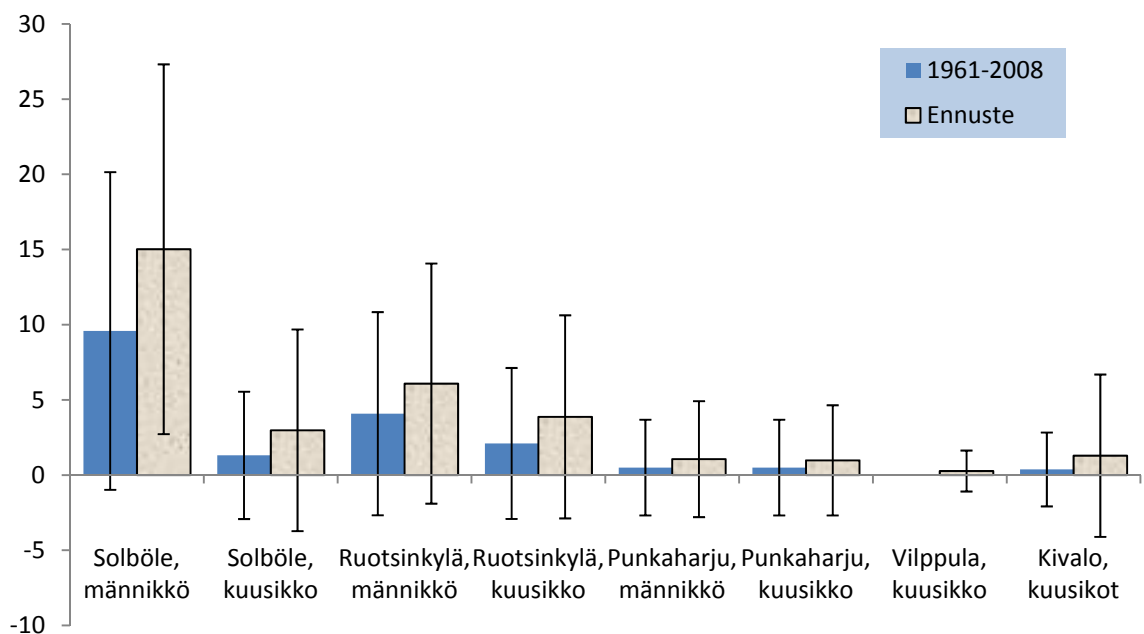
Kuvassa 24 on esitetty, montako kuivuuspäivää kullakin provenienssialueella on ollut keskimäärin vuodessa välillä 1961–2008 ja mikä on ennuste vuosisadan lopulle. Keskiarvon avulla on edelleen voitu laskea jokaiselle kohteelle keskihajonta (kuva 24), joka ilmaisee, paljonko vuosittainen kuivuuspäivien määrä keskimäärin poikkeaa keskiarvostaan. Keskihajonnan voidaan myös katsoa ilmaisevan vaihteluvälin, jolle 68 prosenttia vuosista osuu kuivuuspäivämäärältään. Korkeat keskihajontaluvut kertovat voimakkaasta vuosien välisestä vaihtelusta kuivuuden suhteen. Esimerkiksi Solbölen männikössä vuosien 1961–2008 välille mahtuu 21 vuotta, jolloin kuivuuspäivien määrä on jäänyt alle kuuden, mutta vain muutamat erittäin kuivat vuodet riittävät nostamaan keskihajontaa (taulukko 11).

Taulukko 11. Vuosien välinen vaihtelu kuivuuspäivien määrässä Solbölen männikössä.

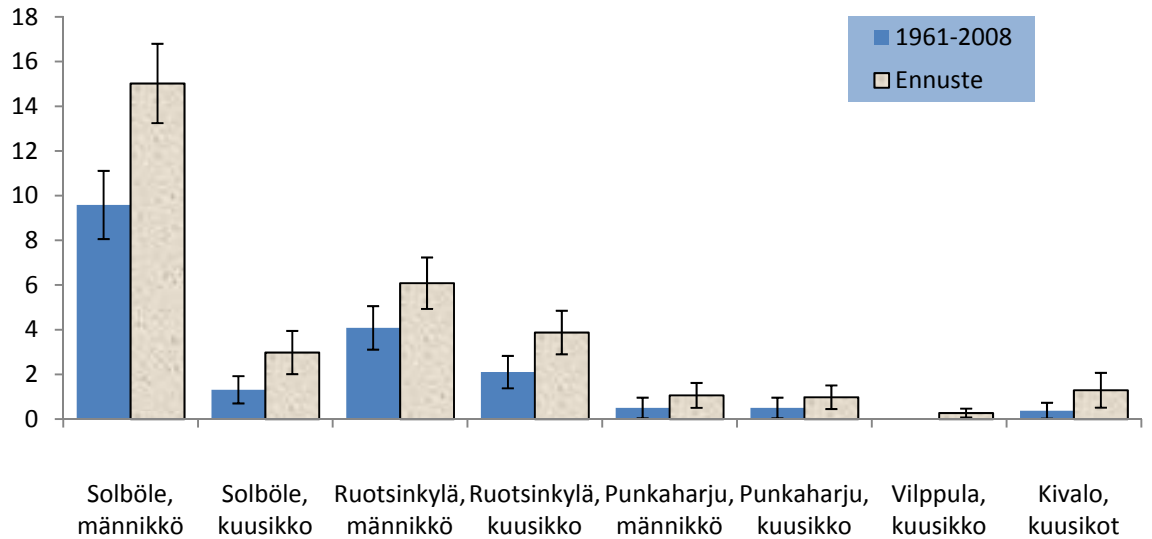
Kuivuuspäiviä vuodessa	0-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-35	36-40
Vuosia, kpl	21	9	7	4	3	1	1	2

Hajontaluvut ovat korkeita myös muilla etelärannikon kohteilla, joilla kuivuspäiviä on ylipäättänsä esiintynyt runsaammin (kuva 24). Mitä enemmän kuivuspäiviä, sitä todennäköisemmin myös vaihtelun määrä lisääntyy, sillä kuivuus ei jakaudu tasaisesti vuosien välille. Samasta syystä keskihajontaluvut ovat ennusteissa nykyilmastoa korkeammat.

Provenienssikoalueille lasketun keskiarvon tarkkuutta on vielä havainnollistettu kuvassa 25. Esimerkiksi Solbölen männikössä kuivuspäivien vuotuinen keskimäärä osuu 68 prosentin varmuudella nykyilmastossa välille 8,1–11,1 ja ennusteessa välille 13,2–16,8.

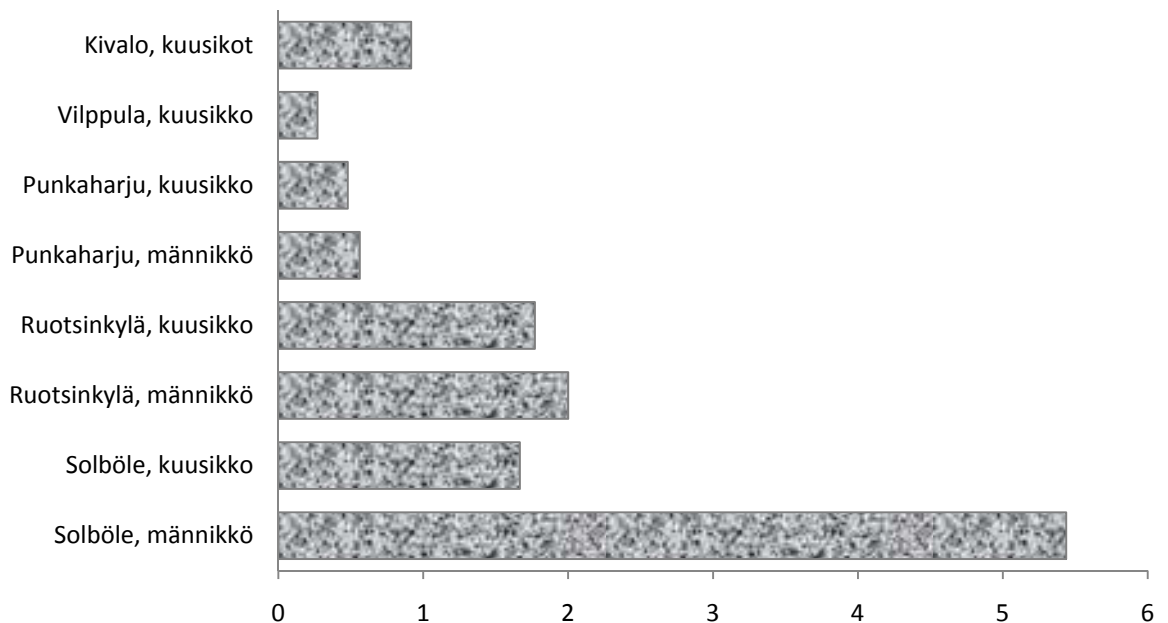


Kuva 24. Kuivuspäivien vuotuiset keskimäärät provenienssikoalueittain ja niiden avulla lasketut keskihajonnat.



Kuva 25. Kuivuuspäivien vuotuiset keskimäärät provenienssikoalueittain ja niiden avulla lasketut keskiarvon keskivirheet.

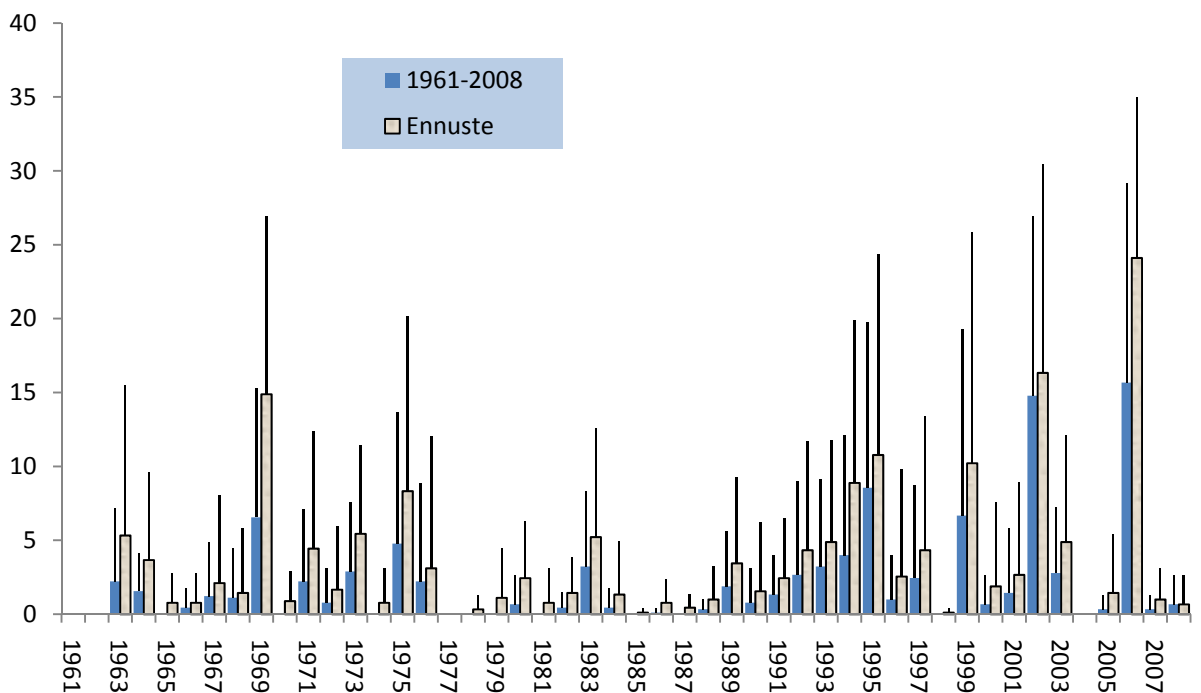
Eniten kuivuuspäivien määrä tulee lisääntymään etelärannikon kohteilla, jotka jo entuudestaan ovat tutkimusalueista kuivimpia (kuva 26).



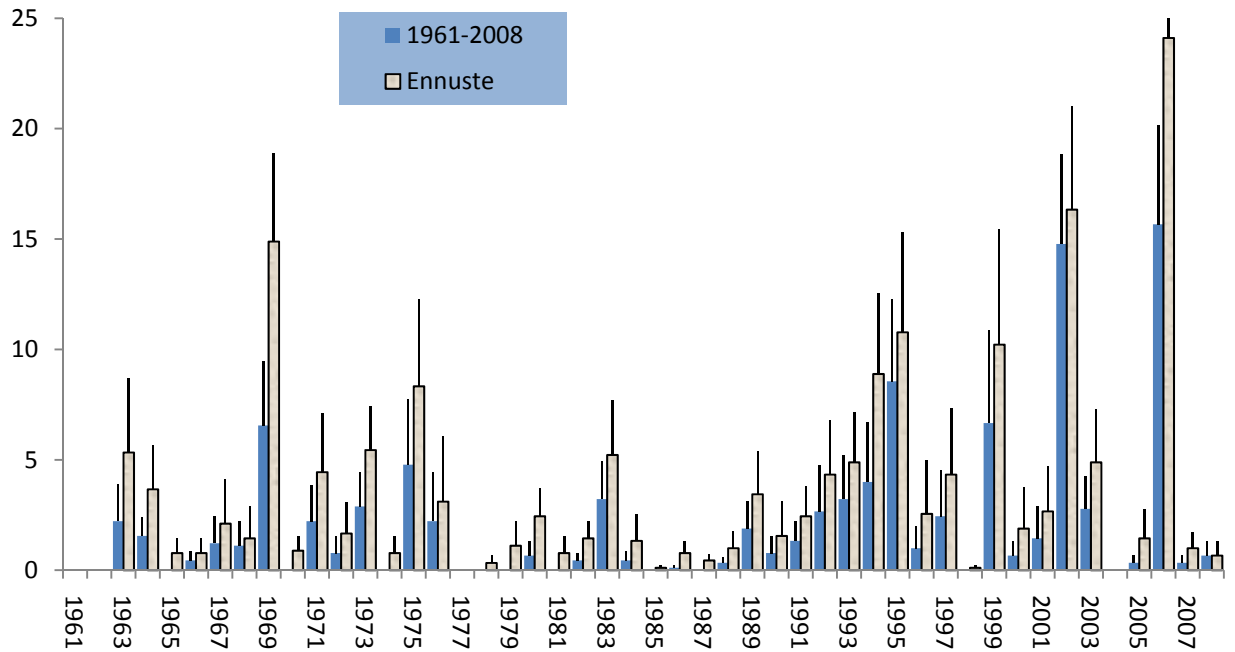
Kuva 26. Vuotuisten kuivuuspäivien keskimäärässä tapahtunut muutos.

Tähän asti tuloksia on esitetty provenienssikoealueittain, mutta niitä voidaan tarkastella myös vuosikohtaisesti. Koska kaikilla provenienssikoealueilla kuivuspäivien määrä kasvoi ilmaston muuttuessa, näkyy sama trendi myös tässä tarkastelussa. Jokaiselle vuodelle välillä 1961–2008 on laskettu kuivuspäiväkeskiarvo yhdeksän provenienssikoealueen perusteella (kuva 27). Ennuste puolestaan kertoo, kuinka paljon keskiarvo muuttuisi, jos vuodet koettaisiin uudelleen ilmastonmuutoksen muuttamassa ilmastossa (kuva 27). Samoin kuten koealakohtaisessa tarkastelussa, tuloksille on laskettu keskihajonnat (kuva 27), jotka nyt kuvaavat vuosien sijasta provenienssikoealojen välistä vaihtelua. Keskihajontaluvut ovat korkeimmillaan kuivina vuosina, sillä silloin erot tutkimusalueiden välillä kasvavat.

Keskiarvojen tarkkuudesta kertovat keskivirheet on esitetty kuvassa 28. Luvuista nähdään, ettei vuosikohtainen keskiarvotarkastelu yllä tarkkuudessa provenienssikoealuekohtaisen tarkastelun tasolle. Tämä johtuu huomattavasti pienemmästä otoskoosta. Tutkimusalueille keskiarvo laskettiin 48 vuoden yli, kun taas vuosille yhdeksän kohteen perusteella.



Kuva 27. Vuosikohtaiset kuivuspäivät ja keskihajonnat.



Kuva 28. Vuosikohtaiset kuivuuspäivät ja keskiarvon keskivirheet.

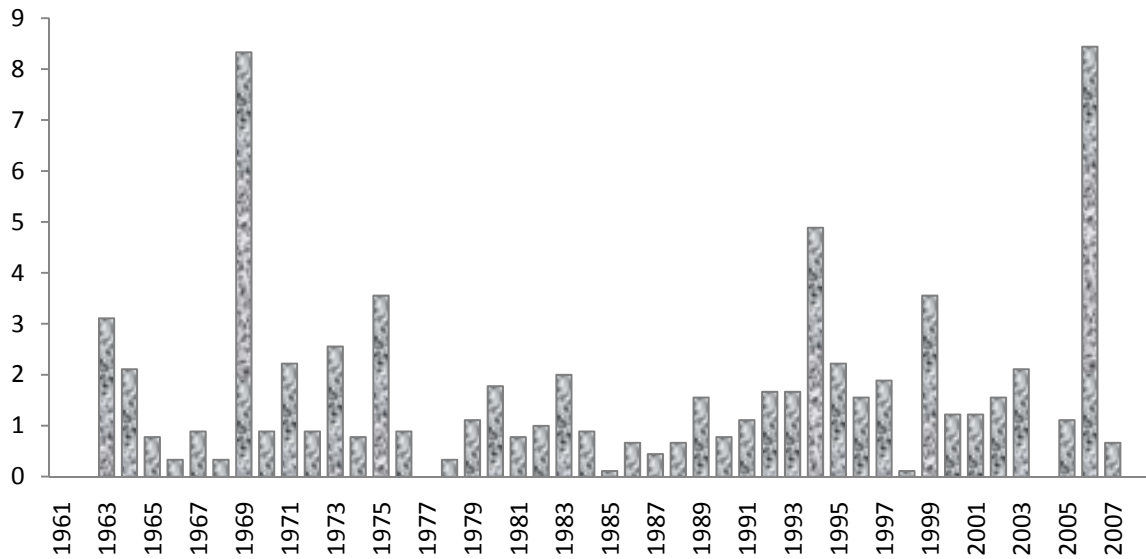
Kun tarkastellaan vuosia 1961–2008, kymmenen kuivinta vuotta ovat olleet 2006, 2002, 1995, 1999, 1969, 1975, 1994, 1983, 1993 ja 1973. Näistä neljä kärkisijaa menee 1990- ja 2000-luvulle. Mutta muutoksesta, mikä menneen viidenkymmenen vuoden aikana on tapahtunut, kertoo enemmänkin tarkastelu, jossa tutkittava ajanjakso jaetaan kahteen osaan (kuten tehtiin jo kuvassa 23). Näin havaitaan, että kuivuuspäivien kokonaismäärästä 70 % osuu vuosille 1985–2008.

Kymmenestä kuivimmasta vuodesta seitsemän löytyy myös niiden vuosien joukosta, joiden kuivuuspäivien keskimäärä kasvaa eniten ilmaston muuttuessa (taulukko 12). Kuivuuspäivien keskimäärässä tapahtuva muutos nähdään koko ajanjakson osalta kuvassa 29.

Taulukko 12. Kymmenen kuivinta vuotta välillä 1961–2008 ja vuodet, joiden kuivuuspäivien keskimäärä kasvaa eniten ilmaston muuttuessa.

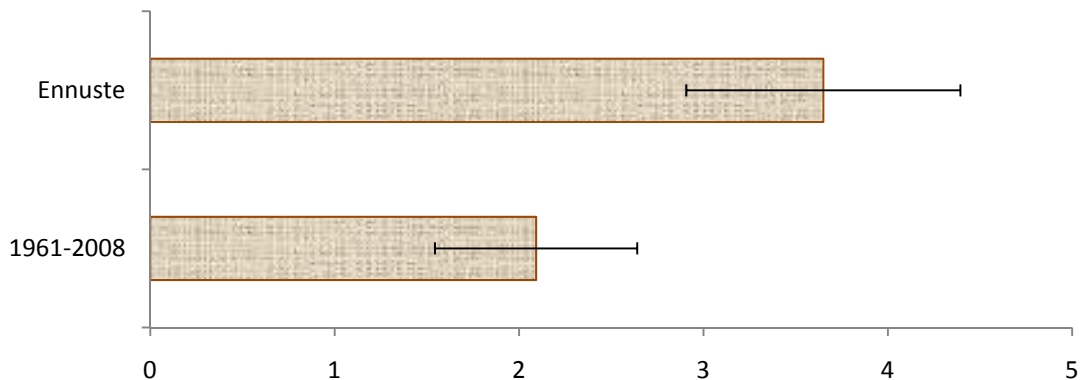
Vuosi	2006	2002	1995	1999	1969	1975	1994	1983	1993	1973
<b>Kuivuuspäivät</b>	141	133	77	60	59	43	36	29	29	26

Vuosi	2006	1969	1994	1975	1999	1963	1973	1995	1971	2003
<b>Kuivuuspäiviä lisää</b>	8	8	5	4	4	3	3	2	2	2



Kuva 29. Vuosikohtaisten kuivuspäivien määrässä tapahtunut muutos.

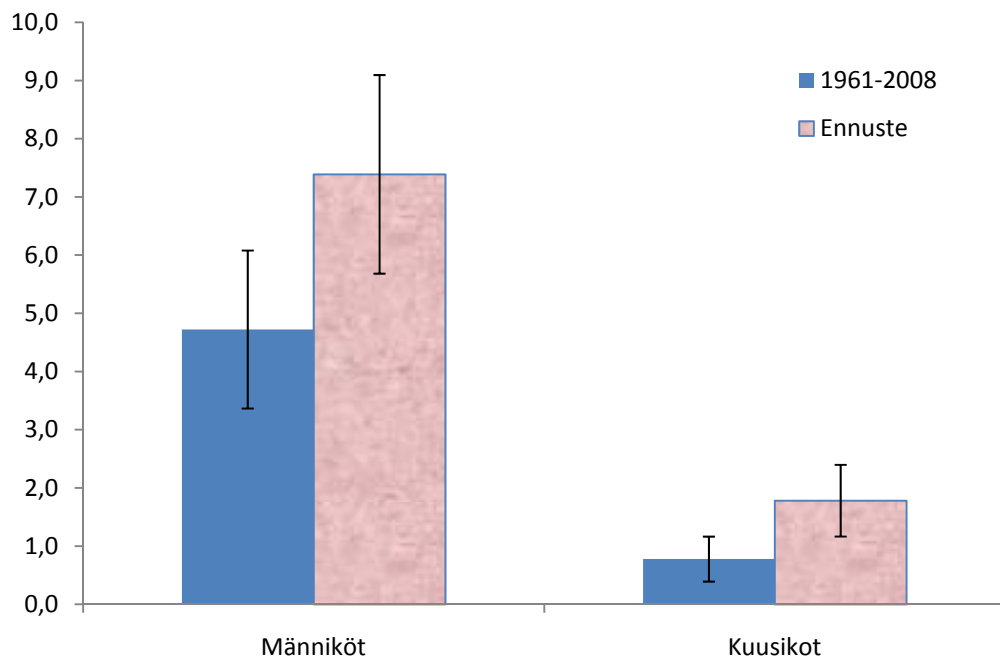
Koko aineistosta lasketut keskiluvut kertovat, että ajanjaksolla 1961–2008 on ollut keskimäärin 2,1 kuivuspäivää vuodessa (kuva 30). Keskiarvolle laskettu 95 %:n luottamusväli on 1,5–2,6. Vuosisadan loppuun mennessä vuotuisten kuivuspäivien keskimäärä nousee tulosten perusteella 3,7:ään (kuva 30). 95 %:n luottamusväli keskiarvolle on 2,9–4,4. Keskihajontaluvut ovat aineistossa korkeat sekä vuosien että provenienssikoealueiden välisen vaihtelun takia, joten luottamusvälit venähtävät pitkiksi. Toki tähän vaikuttaa myös otoskoko.



Kuva 30. Vuotuisten kuivuspäivien keskimäärä vuosina 1961–2008 ja vuosisadan lopun ennusteessa, sekä näille lasketut 95 %:n luottamusvälit.

Tuloksista on jo aiemmin voinut nähdä, että etelärannikon kohteilla kuivuutta on esiintynyt runsaimmin vuosina 1961–2008. Näillä kohteilla kuivuuspäivien määrän ennustetaan myös kasvavan eniten. Kuvassa 31 on vielä eroteltu männiköt ja kuusikot toisistaan, mistä nähdään, että männiköt kasvavat kuivemmillä kohteilla kuin kuusikot. Männyn kasvupaikoilla kuivuuden odotetaan myös laskentojen perusteella lisääntyvän eniten.

Männikkökohteita oli aineistossa vain kolme, joista Punkaharjun männikkö kasvoi vielä lehtomaisella kankaalla ja poikkesi näin ollen kahdesta muusta kuivuutensa suhteen. Tämä vaihtelu ja pieni otoskoko vaikuttavat luottamusväleihin siten, että nykyilmaston yläraja ja ennusteen alaraja menevät jo osittain päällekkäin (kuva 31). Kuusikossa nykyilmaston yläraja on samalla tasolla ennusteen alarajan kanssa.



Kuva 31. Vuotuisten kuivuuspäivien keskimäärä männikkö- ja kuusikkokohteilla sekä nyky- että tulevassa ilmastossa, ja keskiarvoille lasketut 95 %:n luottamusvälit.

## 6.2 Kuivuuden vaikutus lustojen kasvuun

Solbölen männikköä lukuun ottamatta lustoaineistoa oli saatavilla kaikilta tutkimuskohteilta vuodesta 1939 vuoteen 1991 saakka. Kuivuuden kasvuvaikutuksia ei kuitenkaan voitu tutkia Vilppulan kuusikossa, sillä kuivuuspäiviä ei esiintynyt lainkaan vuosina 1961–2008. Näin ollen lustojen kasvua kuivien ja normaalien vuosien välillä on vertailtu seitsemässä koemetsikössä vuodesta 1961 vuoteen 1991. Vertailu alkaa sääaineiston saatavuudesta johtuen vasta vuodesta 1961.

Vuodet on jaettu tutkimuskohteittain kolmeen ryhmään: kuivat vuodet, kuivien vuosien jälkeiset vuodet ja normaalit vuodet. Kuivien vuosien jälkeiset vuodet on eroteltu omaksi ryhmäkseen, jotta kuivien ja normaalien vuosien keskinäinen riippumattomuus säilyisi. Normaaleiksi lasketaan siis vuodet, joiden aikana kuivuuspäiviä ei ole esiintynyt, eikä niitä myöskään ole ollut edeltävänä vuotena. Kuivien vuosien joukossa puolestaan ovat kaikki ne vuodet, joihin on osunut vähintään yksi kuivuuspäivä.

Jokaiselle ryhmälle on laskettu koemetsiköittäin lustoindexikeskiarvot, jotka esitetään kuivien ja normaalien vuosien osalta taulukossa 13. Solbölen kuusikossa, Ruotsinkylän männikössä ja Punkaharjun kuusikossa kuivien vuosien lustoindexikeskiarvo on normaalien vuosien vastaavaa alhaisempi. T-testin tulokset osoittivat, että Punkaharjun kuusikossa ero on myös tilastollisesti merkitsevä (taulukko 14).

Taulukko 13. Kuiville ja normaaleille vuosille lasketut lustoindexikeskiarvot koemetsiköittäin.

	Lustoindexikeskiarvo: kuivat vuodet	Lustoindexikeskiarvo: normaalit vuodet	Kuivien vuosien indeksi %:na normaalien vuosien indeksistä
Solböle, kuusikko	0,8571	1,0051	<b>85,3</b>
Ruotsinkylä, männikkö	0,9803	1,0297	<b>95,2</b>
Ruotsinkylä, kuusikko	1,0022	0,9791	102,4
Punkaharju, männikkö	1,0445	0,9711	107,6
Punkaharju, kuusikko	0,7250	0,9670	<b>75,0</b>
Kivalo, kuusikko	1,1734	0,9953	117,9
Kivalo, kuusikko	1,1272	1,0070	111,9



Taulukko 14. T-testin tulokset Solbölen kuusikossa, Ruotsinkylän männikössä ja Punkaharjun kuusikossa.

	Lustoindeksikeskiarvo: kuivat vuodet	Lustoindeksikeskiarvo: normaalit vuodet	p-arvo
Solböle, kuusikko	0,8571	1,0051	0,137
Ruotsinkylä, männikkö	0,9803	1,0297	0,132
Punkaharju, kuusikko	0,7250	0,9670	<b>0,041</b>

T-testin nollahypoteesina oli, ettei lustojen kasvu poikkea kuivina vuosina normaalien vuosien kasvusta. Vaihtoehdohypoteesi väitti, että kuivien ja normaalien vuosien välillä on kuivuudesta johtuvaa eroa. Käytettynä merkitsevyytasona oli 0,05, jonka alle jäi ainoastaan Punkaharjun kuusikko. Punkaharjun kuusikossa nollahypoteesin hylkäämiseen liittyvä riski on siis erittäin pieni.

## 7 Tulosten tarkastelu

### 7.1 Tutkimusmenetelmän luotettavuus

Tässä tutkimuksessa käytetty vesimalli on ns. yksinkertainen varastomalli. Tämän vuoksi malli on ollut helposti sovellettavissa työn tutkimuskohteilla, Metlan proveniessikoealueilla. Kohteista on täytynyt olla saatavilla ainoastaan sää- ja maaperäaineisto. Maaperäaineistokin kattaa kaikessa yksinkertaisuudessaan vain hiekka- ja savipitoisuuden. Hiekka- ja savipitoisuudet perustuvat suoriin mittauksiin kuitenkin vain osittain, niin kuin aiemmin on jo mainittu. Useimmilla kohteilla ne on estimoitu metsätyypin perusteella. Tämä on mahdollisesti tuonut jonkin verran virhettä proveniessikoealueille laskettuihin maaperäparametreihin. Lisäksi yhtälöt, joilla maaperäparametrit on laskettu, perustuvat pitkälti peltomailta kerättyyn aineistoon. Ne eivät myöskään huomioi humuskerroksen vaikutuksia vedenpidätysominaisuuksissa, vaan laskennat tehdään tekstuuriltaan homogeeniselle mineraalimaalle. Toisaalta käytetyssä

vesimallissakin maaperän kerroksellisuus on jätetty huomioimatta ja maaperää käsitellään yhtenä homogeenisena metrin paksuisena kerroksena.

Homogeeninen maakerros on huomattava yksinkertaistus, sillä todellisuudessa maaperä on kerroksellinen ja jokaisella kerroksella on toisistaan poikkeavat vedenpidätysominaisuudet. Vettä ottavat hienojuuret ja mykorritsat ovat jakautuneet maan kerrokseen epätasaisesti, joten myöskään veden otto ei tapahdu tasaisesti. Vesimallissa tämä on kuitenkin oletuksena.

Maaperän homogeenisuuden ja veden oton tasaisuuden olettamisen lisäksi tuloksiin tuo epävarmuutta kivisyyden huomiotta jättäminen. Kivisyys kuitenkin heikentää merkittävästi vedenpidätysominaisuuksia ja on Suomen maaperälle ominaista. Kivisyydestä ei ollut kuitenkaan saatavissa tietoa koemetsiköiden osalta.

Maaperän suhteen tehtyjen yksinkertaistusten lisäksi haihdunnan olettaminen riippumattomaksi lehtialasta tuo epävarmuutta tuloksiin. Kirjallisuuden (Sun ym. 2008, Monson ym. 2009) ja mallisimulointien (kappaleet 4.3.2 ja 4.3.3) perusteella lehtialan vaikutus metsikön kokonaishaihduntaan on vähäinen, mutta tähän kannattaa suhtautua kriittisesti. Haihdunnan mallintamisessa ei ole myöskään huomioitu mahdollisia puulajien välisiä eroavaisuuksia.

Tuloksia tarkasteltaessa pitää lisäksi muistaa, että yhteys maan veden, haihdunnan ja fotosynteesin välillä on epävarma. Maaveden haihduntaa vähentävä vaikutus 40 prosentin vesipitoisuudessa (kasveille käyttökelpoisesta vedestä) on kirjallisuuteen (Sadras & Milroy 1996, Granier ym. 1999, Granier ym. 2007) ja Hyytiälässä tehtyihin mittauksiin perustuva oletus. Oletuksiin perustuu myös maaveden ja fotosynteesin välinen yhteys, sillä fotosynteesinopeus ei edes alene samanaikaisesti haihduntanopeuden kanssa (Gaastra 1959). Epävarmuuksista johtuen kuivuuspäivämääritelmä on vain suuntaa antava.

Vesimalli, sekä siihen linkitetty haihduntamalli, on estimoitu Hyytiälän kuivahkon kankaan männikössä, jossa mallin tarkkuuden voidaan olettaa olevan paras. Mitä erilaisemmalle metsikölle mallia sovelletaan, sitä enemmän tuloksiin liittyvä epävarmuus kasvaa. Laskettu kuivuuspäivien määrä voidaan kuitenkin tulkita myös indeksiksi, jonka

avulla voidaan tehdä päätelmiä vuosien ja kasvupaikkojen välisistä eroista ja muutoksen suunnasta.

## **7.2 Kuivuuspäivät provenienssikoalueilla vuosina 1961–2008**

Vesimallilla tehdyt laskelmat osoittavat, että etelärannikolla sijaitsevat provenienssikoalueet ovat tutkimuskohteista kuivimpia (kuvat 21 ja 22). Välillä 1961–2008 Solbölen männikössä kuivuuspäiviä on ollut yhteensä 460 ja Solbölen kuusikossa 63. Vastaavat luvut Ruotsinkylän männikössä ja kuusikossa ovat 196 ja 101. Ero on huomattava, kun siirytään rannikolta pois: Punkaharjun ja Kivalon kohteilla kuivuuspäivien määrä jää alle viidenkymmenen, Vilppulassa niitä ei ole lainkaan (kuva 22). Kuivuuden alueellisesta jakautumisesta Suomessa on aiemminkin saatu samansuuntaisia tuloksia (Hohenthal 2009). Hohenthal (2009) on Pro gradu-työnsä tuloksissa osoittanut kuivuutta esiintyvän eniten Ahvenanmaalla ja Etelä-Suomen rannikkoseudulla. Harvinaisinta kuivuus on Pohjois-Suomessa. Kuivuusanalyysit ovat Hohenthalin tutkimuksissa perustuneet maankosteusindeksiin, jota perinteisesti on käytetty metsäpalariskin arvioimiseen. Maankosteusindeksi määritetään yleensä 60 mm:n paksuiselle pintamaakerrokselle sadannan, lämpötilan, suhteellisen ilmankosteuden, tuulennopeuden ja auringonsäteilyn perusteella (Hohenthal 2009). Lisäksi potentiaalisen evaporaation laskemiseksi tarvitaan tiedot nettosäteilystä ja maaperän lämpövirrasta.

Kuivahkolla kankaalla kasvava Solbölen männikkö on kuivuuden suhteen ihan omassa luokassaan. Pelkkä kasvupaikkatyyppi ei yksinään selitä runsasta kuivuuspäivien määrää, vaan selkeämpi syy löytyy raekokojakaumasta (taulukko 6). Solbölen männikön hiekkapitoisuus on yli 90 prosenttia (92,7 %). Myös Ruotsinkylän männikkö kasvaa kuivahkolla kankaalla, mutta hiekkapitoisuus on noin parikymmentä prosenttiyksikköä alhaisempi kuin Solbölessä (70,7 %). Kuivuuspäivien määrä on myös suunnilleen puolet pienempi. Korkea hiekkapitoisuus selittää molempien kohteiden kuivuuden (Westman 1991). Tämän lisäksi vedenpidätysominaisuuksia parantava savipitoisuus jää molemmilla kohteilla matalaksi (Westman 1991): Solbölen männikössä 2,4 prosenttiin ja Ruotsinkylän männikössä 1,4 prosenttiin.

Etelärannikon kuusikot kasvavatkin sitten jo lehtomaisella (Solböle) ja tuoreella (Ruotsinkylä) kankaalla. Solbölen kuusikossa hiekkapitoisuus on laskenut noin 50 prosenttiin (52,7 %) ja savipitoisuus on noussut yli kymmenen prosentin (13,1 %). Samanaikaisesti kuivuuspäivien määrä on tipahtanut 460:stä 64:ään. Ruotsinkylässä muutos ei ole näin suuri. Kuivuuspäivien määrä laskee 196:sta ainoastaan 101:een. Mutta raekokojakauma paljastaa, että paremmasta kasvupaikkatyypistä huolimatta hiekkapitoisuus on edelleen korkea (69,7 %), eikä savipitoisuuskaan ole noussut kovin paljon (4,1 %).

Miksi kuivuuspäivien määrä jää muilla kohteilla etelärannikkoa matalammaksi? Punkaharjun, Vilppulan ja Kivalon tutkimusmetsiköt kasvavat joko tuoreella tai lehtomaisella kankaalla. Punkaharjun ja Vilppulan kohteilla hiekkaprosentti vaihtelee 48,7–52,7 prosentin välillä, savipitoisuus 8,9 ja 13,1 prosentin välillä. Etelärannikon kohteista Solbölen kuusikko on tosin maaperäominaisuuksiltaan samankaltainen, mutta täytyykin muistaa, etteivät maaperätekijät yksistään selitä kuivuuspäivien esiintymistä. Säätekijät vaikuttavat myös. Esimerkiksi haihdunta on ollut Solbölen kuusikossa voimakkaampaa kasvukausina kuin Punkaharjun ja Vilppulan metsiköissä. Kivalo on tutkimuskohteiden joukossa kummajainen. Raekokojakaumamittausten perusteella hiekkapitoisuus on yli 70 prosenttia (72,4 %) ja savipitoisuus ainoastaan 2,2 prosenttia. Kasvupaikkatyyppi on kuitenkin tuore kangas ja kuivuuspäivien määrä 48 vuoden aikana ainoastaan 18. Kivalo tosin poikkeaa muista kohteista jo pohjoisen sijaintinsa puolesta, mikä näkyy metsikön vähäisempänä haihduntana (Mäkitalo 2009).

Pelkästään kasvupaikkatyyppin perusteella voi jo arvioida kohdemetsikön kuivuutta. Kasvupaikkatyyppi määräytyy maaperätekijöiden perusteella, joten mitä karummalla kasvupaikalla ollaan, sitä heikommat ovat vedenpidätysominaisuudet. Mutta kasvupaikkatyyppinkin sisältä löytyy paljon variaatiota, joten raekokojakauma mahdollistaa tarkemman tarkastelun. Edellä esitettyjä hiekka- ja savipitoisuuksia ei kuitenkaan tule pitää ehdottomina totuuksina, sillä osa niistä perustuu Metsäntutkimuslaitoksen aineistosta laskettuihin metsätyyppikohtaisiin keskiarvoihin. Osa puolestaan perustuu mittauksiin, mutta niissäkin on huomioitava erityisesti otantavirheen mahdollisuus. Maaperässä on paljon horisontaalista vaihtelua, kun taas

metsikön raekokojakauma voi huonoimmillaan perustua vain yhdestä pisteestä otettuun näytteeseen.

### **7.3 Kuivuuspäivät provenienssikoealueilla muuttuvassa ilmastossa**

Etelärannikon kohteilla, yhtä poikkeusta lukuun ottamatta (Ruotsinkylän männikkö vuonna 2002), kuivuuspäivien määrä kasvaa vuosina, joiden aikana kuivuutta on esiintynyt jo välillä 1961–2008 (kuva 21). Kuivia vuosia osuu 48 vuoden tarkastelujaksolle myös aiempaa enemmän, mikä nostaa niiden esiintymisen todennäköisyyttä. Kuivaksi vuodeksi lasketaan siis vuosi, jonka aikana maaperän vesitase on vähintään kerran laskenut kuivuusrajan alapuolelle. Tällä ratkaisulla on pyritty selkeyttämään tulosten tarkastelua ja yksi kuivuuspäivä riittää paljastamaan jo hieman pidemmän jakson, minkä aikana maan vesipitoisuus on ollut alhaisella tasolla. Jotta kuivuuspäivärajan alle päästään, maan on täytynyt kuivua jo muutaman päivä ajan ennen tätä. Solbölen männikössä kuivien vuosien esiintymistodennäköisyys nousee 73 prosentista 90 prosenttiin eli 17 prosenttiyksikön verran. Solbölen kuusikossa nousu on 10 prosenttiyksikköä (17 -> 27), Ruotsinkylän männikössä 23 (42 -> 65) ja kuusikossa 17 (25 -> 42). Sekä yksittäisten kuivuuspäivien määrä että kuivuusjaksojen pituudet kasvavat.

Muilla kohteilla muutos on hyvin samankaltainen (kuva 22). Aikavälin 1961–2008 kuivia vuosia vastaavat vuodet kuivuvat entisestään muuttuvassa ilmastossa ja kuivat vuodet yleistyvät tutkimusmetsiköissä. Punkaharjun männikössä sekä kuusikossa kuivien vuosien esiintymistodennäköisyys nousee 4 prosentista 17 prosenttiin. Vilppulassa todennäköisyys kasvaa 6 prosenttiyksikköä (0 -> 6) ja Kivalossa 4 (4 -> 8). Näilläkin kohteilla lähinnä yksittäisiä kuivuuspäiviä tulee lisää ja kuivuusjaksot saattavat pidentyä parilla päivällä. Tuloksista voisi kuitenkin nostaa erikseen esille Kivalon kuusikon ja vuoden 1969 (kuva 22, diagrammi H). Kuivuuspäiviä oli tuolloin vesimallilla tehtyjen laskentojen perusteella vain yksi. Jos kyseinen vuosi koettaisiin uudestaan vuosisadan lopun ilmasto-olosuhteissa, sitä leimaisi noin kolme viikkoa kestävä kuivuusjakso. Näin suuri muutos johtuu siitä, että vuoden 1969 kasvukaudella ollaan useamman päivän ajan

jo oltu lähellä kuivuuspäivärajaa, mikä sitten muuttuvan ilmaston vaikutuksesta on ylittynyt.

Tähänastisen tarkastelun perusteella voisi sanoa, että sademäärässä ennustettu kasvu ei riitä kompensoimaan lämpötilan nousun johdosta voimistuvaa haihduntaa. Haihdunnan lisääntyminen johtaa kuivuuspäivien määrän nousuun jokaisella tutkimuskohteella. Vuosien välinen vaihtelu on kuitenkin runsasta, joten keskilukujen avulla tuloksista on paremmin yritetty nähdä voimakkuus, millä kuivuus lisääntyy.

#### **7.4 Kuivuuspäivien keskimäärissä tapahtuneet muutokset**

Vuosisadan lopulla Solbölen männikössä kuivuuspäiviä on keskimäärin vuodessa 15 (kuva 24). Muutosta vuosiin 1961–2008 verrattuna on 5,4 päivää. Ruotsinkylän männikkö ylittää keskiarvojen vertailussa toiseksi: vuotuisten kuivuuspäivien keskimäärä nousee 4,1:sta 6,1:een. Etelärannikon kuusikoissa muutos nykyisen ja tulevan ilmaston välillä on 1,7 (Solböle) ja 1,8 (Ruotsinkylä) päivää. Vuosisadan lopussa Solbölen kuusikossa voimakasta kuivuutta on keskimäärin kolmena päivänä ja Ruotsinkylässä neljänä (3,9). Etelärannikon kohteilla muutos on suurin. Muilla provenienssikoealueilla muuttuvan ilmaston vaikutuksesta kuivuuspäiviä osuu keskimäärin yksi vuoteen. Vilppulassa jääetään tosin tästäkin melko kauas.

Kuivuuspäiväkeskiarvo provenienssikoealueille on laskettu lähes viidenkymmenen vuoden yli, minkä valossa tulosten voisi nähdä melko luotettavasti osoittavan, kuinka kuivuuden esiintyminen tutkimuskohteilla muuttuu. Vuosien välinen voimakas vaihtelu aiheuttaa kuitenkin sen, että tuloksille lasketut keskihajontaluvut ovat erittäin korkeat (kuva 24). Näin ollen keskiarvojen tarkkuutta ilmaisevat keskivirheetkin pysyvät korkeina (kuva 25). Keskivirheitä tarkastelemalla ainoastaan Solbölen männikössä vuotuisten kuivuuspäivien keskimäärä melko suurella varmuudella nousee.

Tuloksissa kuivuuspäivien keskimäärissä tapahtuneet muutokset on esitetty myös vuosikohtaisina (kuva 27). Näin nähdään, kuinka paljon jonkin tietyn vuoden kuivuuspäiväkeskiarvo muuttuisi ilmastonmuutoksen vaikutuksesta. Tämä tarkastelu ei

tarkkuudessaan kuitenkin yllä edes provenienssikohtaisen tarkastelun tasolle, sillä vuodelle laskettu keskiarvo perustuu ainoastaan yhdeksän metsikön kuivuuspäivälaskelmiin. Kun näitä tuloksia tarkastelee keskivirheen kautta, ainoastaan kahden vuoden (1969 ja 2006) voisi sanoa ”kuivuvan” ilmaston muuttuessa (kuva 28). Keskivirheiden suuruuteen vaikuttaa sekä pieni otoskoko (yhdeksän tutkimuskohdetta) että voimakas hajonta otoksen sisällä.

Kuivuuspäivälaskelmista on muodostettu myös keskiluvut, jotka kattavat kaikki yhdeksän koealuetta. Niiden tarkkuutta on arvioitu 95 %:n luottamusvälin avulla (kuva 30). Vuosina 1961–2008 Suomessa on kuivuuspäiviä ollut keskimäärin 2,1 vuodessa. 95 %:n luottamusväli tälle keskiarvolle on 1,5–2,6. Vuosisadan loppuun mennessä keskiarvo nousee 3,7 luottamusvälin ollessa 2,9–4,4.

Kun kuivuuspäivien määrissä tapahtuvia muutoksia on nyt tarkasteltu provenienssikoalueilla sekä vuosi vuodelta että keskilukujen avulla, näyttäisi siltä että jo vuosina 1961–2008 kuivimmiksi osoittautuneet kohteet kuivuvat myös ilmaston muuttuessa eniten. Tähän suuntaan viittaavat muutokset kuivien vuosien esiintymistodennäköisyyksissä sekä kuivuuspäivien vuotuisissa keskimäärissä. Näin ollen muuttuvalla ilmastolla olisi suurimmat vaikutukset männylle tyypillisillä kasvupaikoilla, kuivahkoilla kankailla ja sitä karummilla. Kuusen kasvupaikoilla vaikutukset ovat vähäisemmät, etenkin jos ei olla aivan eteläisimmässä Suomessa. Kasvupaikan lisäksi maantieteellisellä sijainnillakin näyttäisi siis olevan vaikutusta. Tutkimustulokset mukailevat Kellomäen vuonna 2005 esittämiä tuloksia kuivuuden lisääntymisestä. Kellomäen mukaan kuivuuspäivien määrät nousevat erityisesti eteläisessä Suomessa. Lisäksi kuusi tulisi menestymään eteläisessä Suomessa ainoastaan rehevämmillä kasvupaikoilla (Kellomäki ym. 2005). Kuivahkot kankaat ja hieman kuivemmat tuoret kankaat kuivuisivat Kellomäen mukaan siinä määrin, ettei kuusi pärjäisi näillä alueilla männylle kilpailussa.

Kellomäki (2005) ennustaa melko voimakasta kuivumista eteläiseen Suomeen, eikä ole mahdotonta, ettei tämä vaikuttaisi jo männynkin menestymiseen. Tutkimukset Itävallan ja Sveitsin entisestään kuivemmiksi muuttuvilla vuoristoalueilla osoittavat kuivuuden heikentävän myös männyn kasvua (Bigler ym. 2006, Pichler & Oberhuber 2007).

## 7.5 Ennustetun kuivuuden lisäyksen vaikutukset

Lisääntykö kuivuus vesimallilla tehtyjen laskentojen perusteella sitten niin paljon, että mäntykin jo kärsisi eteläisimmässä Suomessa kuivuudesta? Tai muuttaako ennustettu kuivuus ylipäättänsä puulajisuhteita Kellomäen (2005) tulosten mukaiseen suuntaan? Ensinnäkin kuivuuspäivien määrät ovat määritelmänsä mukaisesti vain suuntaa antavia, eikä niihin tule suhtautua absoluuttisina totuuksina. Niiden avulla saadaan tietoa ainoastaan metsiköiden ja vuosien välisistä suhteellisista eroista ja kehityssuunnista. Kuivuuspäivien määrän perusteella ei voida tehdä suoria johtopäätöksiä puuston kasvusta tai elinvoimaisuudesta. Tulosten perusteella ei myöskään pystytä arvioimaan, reagoivatko mänty ja kuusi ennustettuihin muutoksiin eri tavoin. Voidaan kuitenkin todeta, että kuivuuden lisäys johtaa brutto- ja nettoprimäärituotoksen vähenemiseen verrattuna tilanteeseen, jossa kuivuuden esiintyminen säilyisi ennallaan. Tätä kautta kuivuus alentaa myös kasvua.

Tässä työssä kuivuuden kasvuvaikutuksia yritettiin havaita saatavilla olevan lustoaineiston avulla. Kuivuusvuodet eivät kuitenkaan selkeästi näkyneet lustojen leveyskasvussa provenienssikoealueilla vuosina 1961–1991. Ainoastaan kolmessa tutkimusmetsikössä kuivien vuosien lustoindexikeskiarvo jäi normaalien vuosien vastaavaa alhaisemmaksi (taulukko 13). Tilastollisesti ainoastaan yksi näistä eroista oli merkittävä (taulukko 14). Kuivuuden ja lustojen leveyskasvun välille on kuitenkin useammassa tutkimuksessa löydetty yhteys (Andreassen ym. 2006, Bigler ym. 2006, Pichler & Oberhuber 2007, Jyske ym. 2009). Provenienssikoealueilla kuivuus ei ilmeisesti ole ollut niin voimakasta, että se selittävien tekijöiden joukossa olisi vahva.

Lustojen leveyskasvun tarkasteluun tulee kuitenkin suhtautua tässä tutkimuksessa kriittisesti. Molempia sekä sääaineistoa että lustomittauksia oli saatavilla ainoastaan 31 vuoden ajalta. Kun nämä 31 vuotta vielä kattoivat 48 vuoden tarkastelujaksossa ensimmäisen puoliskon (1961–1984), jolloin kuivuutta oli jälkimmäiseen (1985–2008) verrattuna huomattavasti vähemmän, kuivien vuosien otos jäi hyvin pieneksi. Vertailu jo itsessään on kyseenalaista suppean aineiston vuoksi, mutta suurempi vaikutus sillä on tilastollisen testauksen järkevyyteen. Kuivia vuosia saattoi pahimmillaan osua ajanjaksolle 1961–1991 vain kaksi, jolloin tilastollinen testaus on jo merkityksetöntä.



Janne Yrjönen (2008) on tarkastellut samoilla tutkimuskohteilla kuivuuden kasvuvaikutuksia. Käytössä on ollut tähän tutkimukseen verrattuna laajempi aineisto ja tuloksissa raportoidaan, kuinka ero lustojen kasvussa kuivien ja normaalien vuosien välillä oli tilastollisesti merkitsevä seitsemällä provenienssikoealueella. Pidempi tarkastelujakso selittänee osittain, miksi Yrjösen tutkimuksessa kasvuvaikutukset olivat selvemmat, mutta myös kuivuuden määrittäminen oli erilainen. Yrjösen vesitaselaskennat perustuivat myös Duursman (2005) malliin, mutta silloin malli poikkesi esimerkiksi valunnan laskennan osalta huomattavasti nykyisestäään. Lisäksi mallia sovellettiin provenienssikoealueilla siten, että ainoa muuttuva syöttötieto oli sadanta. Haihdunta ja valunta kuvattiin Hyytiälässä sijaitsevan SMEARII-aseman referenssimetsikön muuttujien avulla. Toisin sanoen Duursman mallilla saatu vesitase oli indeksiluku, joka kertoi maan päivittäisen vesitaseen, jos SMEAR-aseman metsikkö olisi siirretty provenienssikoepaikkakunnalle ja sademäärä vastaisi koepaikkakunnan sademäärää (Yrjönen 2008). Kuivuuspäiväksi laskettiin päivä, jolloin maan vesipitoisuus laski alle ¼ maksimiarvostaan (maksimiarvoksi oli oletettu 200 mm).

## 8 Johtopäätökset

Vuosisadan lopulla kuivuutta esiintyy Suomessa nykyistä enemmän. Kuivuuden esiintyminen näyttäisi yleistyvän erityisesti etelärannikolla ja männyn kasvupaikoilla, jotka jo entuudestaan ovat alueista kuivimpia. Vähäisin muutos on odotettavissa kuusen kasvupaikoilla, etenkin jos sijainti ei ole aivan eteläisimmässä Suomessa. Kuivuus lisääntyy siis eteläisessä Suomessa ja männyn kasvupaikoilla pohjoista ja kuusen kasvupaikkoja enemmän.

Keskimääräisten vuotuisten kuivuuspäivien lukumäärän kasvu johtaa brutto- ja nettoprimäärituotoksen vähenemiseen. Tätä kautta kuivuuden lisääntyminen alentaa myös kasvua verrattuna tilanteeseen, jossa kuivuuspäivien määrä pysyisi muuttumattomana. Vesipitoisuuden linkittäminen fotosynteesituotosta ennustaviin malleihin on keino arvioida kuivuuden tuotosta alentavan vaikutuksen voimakkuutta.

Suomessa ei ole esiintynyt poikkeuksellista kuivuutta 1940-luvun alun jälkeen vasta kuin 2000-luvulla. Kuivuuden kasvuvaikutukset ovatkin todennäköisesti jääneet hyvin vähäisiksi 1900-luvun jälkimmäisellä puoliskolla. Jos vuosien 2002, 2006 ja 2010 kaltaiset kuivuudet yleistyvät, voi tilanne muuttua. Kuivuuden kasvuvaikutuksista ja tähän liittyvistä puulajien välisistä eroista tulisi saada lisätietoa. Tätä kautta pystyttäisiin arvioimaan, tulisiko kuivuus huomioida mukautettaessa metsänhoitoa vastaamaan muuttuvia ilmasto-oloja. Mahdollista kuitenkin on, että kuivuus tulee muuttamaan puulajeille sopivia kasvupaikkoja ja puulajisuhteita. Puulajivalinnan onnistuminen on yksi edellytys sille, että varmistetaan metsien hyvä kunto tulevaisuudessa sekä kiihtyneen kasvun hyödyntäminen taloudellisesti.

## **Kiitokset**

Olen kiitollinen saamastani mahdollisuudesta kuulua ohjaajani professori Annikki Mäkelän vetämään tutkimusryhmään (Forest Modelling Group). Ryhmään kuulumisen kautta pääsin näkemään läheltä, millaista tutkimusta laitoksellamme tehdään ekologisen mallinnuksen parissa ja opin tutkittavista aihepiireistä paljon. Ennen kaikkea sain ryhmän jäseniltä tukea graduni tekoon: erityiskiitokset avusta Pasi Kolarille, Mikko Peltoniemelle ja Teemu Höltälle.

Suurin kiitos kuuluu kuitenkin ohjaajalleni Annikille, joka auttoi saattamaan työn päätökseen. Lisäksi tahdon kiittää graduklinikkaa, sekä sen jäseniä että toimintaa. Myös klinikan ulkopuolisten ystävien, lähimmäisten sekä toisen kerroksen naapurin tuki on ollut tärkeää.

## Lähteet

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56.
- Andreassen, K., Solberg, S., Tveito, O.E. & Lystad, S.L. 2006. Regional differences in climatic responses of Norway spruce growth in Norway. *Forest ecology and Management* 222: 211-221.
- Barr, A.G., Black, T.A., Hogg, E.H., Griffis, T.J., Morgenstern, K., Kljun, N., Theede, A. & Nesic, Z. 2007. Climatic controls on the carbon and water balances of a boreal aspen forest, 1994-2003. *Global Change Biology* 13: 561-576.
- Bigler, C., Bräker, O.U., Bugmann, H., Dobbertin, M. & Rigling, A. 2006. Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems* 9: 330-343. Springer Science+Business Media.
- Bindoff, N.L., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J., Gulev, S., Hanawa, K., Le Quéré, C., Levitus, S., Nojiri, Y., Shum, C.K., Talley, L.D. & Unnikrishnan, A. 2007. Observations: Oceanic climate change and sea level. In: *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (toim.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Bolte, A., Hilbrig, L., Grundmann, B., Kampf, F., Brunet, J. & Roloff, A. 2010. Climate change impacts on stand structure and competitive interactions in southern Swedish spruce-beech forest. *European Journal of Forest Research* 129: 261-276.
- Campbell, G.S. & Norman, J.M. 1998. *Introduction to environmental biophysics*. Springer Science+Business Media, Inc. NY, USA. 291 s.
- Carter, T.R. 2007. *Assessing the adaptive capacity of the Finnish environment and society under a changing climate: FINADAPT – Summary for Policy Makers*. Finnish Environment Institute, Helsinki. 76 s.
- Chapuis, R. & Aubertin, M. 2003. On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Can. Geotech. J.* 40: 616-628. Canada.
- Dessler, A.E. & Sherwood, S.C. 2009. A matter of humidity. *Science* 323: 1020-1021.
- Dingman, S.L. 2002. *Physical hydrology*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NY. 646 s.
- Drews, P. 2007. PT-funktiot vedenpidätysominaisuuksien määrittämisessä podsolimaannoksilla. *Metsäekologian laitoksen Pro gradu – työ*, Helsingin yliopisto. 76 s.
- Duursma, R.A. 2005. Equations for water balance calculations in SPP. *Forest Modelling Group Working Papers* 1. University of Helsinki, Department of Forest Ecology.

- Fisher, J.B., DeBiase, T.A., Qi, Y., Xu, M. & Goldstein, A.H. 2004. Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem. *Environmental Modelling & Software* 20: 783-796.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M. & Van Dorland, R. 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (toim.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Gaastra, P. 1959. Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature, and stomatal diffusion resistances. *Meded. Landbouwhogeschool Wageningen* 59: 1-68.
- Granier, A., Bréda, N., Birom, P. & Villetto, S. 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling* 116: 269-283.
- Granier, A., Reichstein, M., Bréda, N., Janssens, I.A., Falge, E., Ciais, P., Grünwald, T., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Facini, O., Grassi, G., Heinesch, B., Ilvesniemi, H., Keronen, P., Knohl, A., Köstner, B., Lagergren, F., Lindroth, A., Longdoz, B., Loustau, D., Mateus, J., Montagnani, L., Nys, C., Moors, E., Papale, D., Peiffer, M., Pilegaard, K., Pita, G., Pumpanen, J., Rambal, S., Rebmann, C., Rodrigues, A., Seufert, G., Tenhunen, J., Vesala, T. & Wang, Q. 2007. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology* 143: 123-145.
- Heiskanen, J. 2003. Fysikaaliset ominaisuudet. Julkaisussa: Mälkönen, E. (toim.). *Metsämaa ja sen hoito*. Metsäntutkimuslaitos, Kustannusosakeyhtiö Metsälehti, Hämeenlinna. s. 39-62.
- Helmisaari, H-S., Lehto, T. & Makkonen, K. 2003. Hienojuurit ja mykorritsat. Julkaisussa: Mälkönen, E. (toim.). *Metsämaa ja sen hoito*. Metsäntutkimuslaitos, Kustannusosakeyhtiö Metsälehti, Hämeenlinna. s. 115-128.
- Helmisaari, H-S., Derome, J., Nöjd, P. & Kukkola, M. 2007. Fine root biomass in relation to site and stand characteristics in Norway spruce and Scots pine stands. *Tree Physiology* 27: 1493-1504.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of soil physics*. Academic Press. New York, NY.
- Hillel, D. 2004. *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier Science, USA. 494 s.
- Hohenthal, J. 2009. Meteorologisen kuivuuden esiintyminen Pohjois-Euroopassa. Maantieteen laitoksen Pro gradu-työ, Turun yliopisto.
- Holst, J., Barnard, R., Brandes, E., Buchmann, N., Gessler, A. & Jaeger, L. 2008. Impacts of summer water limitation on the carbon balance of a Scots pine forest in the southern upper Rhine plain. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 1815-1826.
- Hölttä T., Vesala T., Perämäki M. & Nikinmaa E. 2002. Relationships between embolism, stem water tension, and diameter changes. *Journal of Theoretical Biology* 215: 23-38.

IPCC. 2007. Summary for policymakers. In: Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (toim.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jauhiainen, M. 2004. Relationships of particle size distribution curve, soil water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity and their implications on water balance of forested and agricultural hillslopes. Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja ympäristötekniikan osasto, Espoo. Teknillisen korkeakoulun vesitalouden ja vesirakennuksen julkaisuja. 144 s.

Jensen, M.E. & Haise, H.R. 1963. Estimation of evapotranspiration from solar radiation. Journal of Irrigation and Drainage Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers 89: 15-41.

Jylhä, K., Ruosteenoja, K. & Tuomenvirta, H. 2005. Ilmastonmuutoskenaarioita Suomelle. Julkaisussa: Riikonen, J. & Vapaavuori, E. (toim.). Ilmasto muuttuu – mukautuvatko metsät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944. Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoki. s. 21–29.

Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. & Seitola, T. 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten, ACCLIM-hankkeen raportti 2009. Ilmatieteen laitos, Yliopistopaino, Helsinki. 102 s.

Jyske, T., Hölttä, T., Mäkinen, H., Nöjd, P., Lumme, I. & Spiecker, H. 2009. The effect of artificially induced drought on radial increment and wood properties of Norway spruce. Tree Physiology 30: 103-115. Oxford Univeristy Press.

Kellomäki, S. & Peltola, H. 2005. Metsäpuiden kasvu ja ilmastonmuutos – männyn fysiologisia ja ekologisia vasteita kohoavaan ilman lämpötilaan ja hiilidioksidipitoisuuteen. Julkaisussa: Riikonen, J. & Vapaavuori, E. (toim.). Ilmasto muuttuu –mukautuvatko metsät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944. 128 s. Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoki.

Kellomäki, S., Strandman, H., Nuutinen, T., Peltola, H., Korhonen, K.T. & Väisänen, H. 2005. Adaptation of forest ecosystems, forests and forestry to climate change. FINADAPT Working Paper 4, Finnish Environment Institute Mineographs 334, Helsinki, 44 s.

Kolari, P., Pumpanen, J., Rannik, Ü., Ilvesniemi, H., Hari, P. & Berninger, F. 2004. Carbon balance of different aged Scots pine forests in Southern Finland. Global Change Biology 10: 1106-1119.

Kolari, P., Perämäki, M., Nikinmaa, E., Hari, P., Delzon, S. & Duursma, R. 2008. Predicting the decline in daily maximum transpiration rate of two pine stands during drought based on constant minimum leaf water potential and plant hydraulic conductance. Tree Physiology 28: 265-276. Heron Publishing, Victoria, Canada.

Kolari, P., Kulmala, L., Pumpanen, J., Launiainen, S., Ilvesniemi, H., Pertti, H. & Nikinmaa, E. 2009. CO<sub>2</sub> exchange and component CO<sub>2</sub> fluxes of a boreal Scots pine forest. Boreal Environment Research 14: 761-783.

Krishnan, P., Black, T.A., Grant, N.J., Barr, A.G., Hogg, E.H., Jassal, R.S. & Morgenstern, K. 2006. Impact of changing soil moisture distribution on net ecosystem productivity of a boreal aspen forest during and following drought. Agricultural and Forest Meteorology 139: 208-223.

Lemke, P., Ren, J., Alley, R.B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R.H. & Zhang, T. 2007. Observations: Changes in snow, ice and frozen ground. In: Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (toim.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Mannerkoski, H. & Möttönen, V. 1990. Maan vesitalous ja ilmatila metsäaurausalueilla. Summary: Soil water conditions and air-filled porosity on ploughed reforestation areas. *Silva Fennica* 24: 279-301.

Monson, R.K., Prater, M.R., Hu, J., Burns, S.P., Sparks, J.P., Sparks, K.L. & Scott-Denton, L.E. 2009. Tree species effects on ecosystem water-use efficiency in a high-elevation, subalpine forest. *Oecologia* 162: 491-504.

Monteith, J.L. 1965. Evaporation and environment. In Fogg, G.E. (ed.). Symposium of the Society for Experimental Biology. The State and Movement of Water in Living Organisms 19: 205-234. Academic Press, Inc., NY.

Mäkelä, A., Valentine, H. & Helmisaari, H-S. 2008a. Steady state solutions of forest stand foliage and fine root biomass as trade-offs between nitrogen uptake and use. *New Phytologist* 180.

Mäkelä, A., Kolari, P., Karimäki, J., Nikinmaa, E., Perämäki, M. & Hari, P. 2006. Modelling five years of weather-driven variation of GPP in a boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 139: 382-398.

Mäkelä, A., Pulkkinen, M., Kolari, P., Lagergren, F., Berbigier, B., Lindroth, A., Loustau, D., Nikinmaa, E., Vesala, T. & Hari, P. 2008b. Developing an empirical model of stand GPP with the LUE approach: analysis of eddy covariance data at five contrasting conifer sites in Europe. *Global Change Biology* 14: 98-108.

Mäkitalo, K. 2009. Soil hydrological properties and conditions, site preparation, and the long-term performance of planted Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on upland forest sites in Finnish Lapland. *Dissertationes Forestales* 80. 70 s.

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N. & Dadi, Z. 2000. Emissions scenarios. Nakicenovic, N. & Swart, R. (toim.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Peltola, H. & Kellomäki, S. 2005. Ilmastonmuutoksen vaikutukset metsäekosysteemin toimintaan ja rakenteeseen sekä metsien hoitoon ja ainespuun tuotantoon. Julkaisussa: Riikonen, J. & Vapaavuori, E. (toim.). Ilmasto muuttuu – mukautuvatko metsät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944. Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoki. s. 99–113.

Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society* 193: 120-146.

Pichler, P. & Oberhuber, W. 2007. Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. *Forest Ecology and Management* 242: 688-699.

- Priestley, C.H.B. & Taylor, R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100: 81-82.
- Rawls, W.J., Ahuja, L.R. & Brakensiek, D.L. 1992. Estimating soil hydraulic properties from soils data. Workshop on indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. Riverside, CA. s. 329-341.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. & Saxton, K.E. 1982. Estimation of soil water properties. *The American Society of Agricultural Engineers* 25: 1316-1320 & 1328. Michigan, USA.
- Ruosteenoja, K., Jylhä, K. & Tuomenvirta, H. 2005. Climate scenarios for FINADAPT studies of climate change adaptation. FINADAPT Working Paper 15, Finnish Environment Institute Mimeographs 345, Helsinki, 32 s.
- Sadras, V.O. & Milroy, S.P. 1996. Soil-water thresholds for the response of leaf expansion and gas exchange; a review. *Field Crops Research* 47: 253-266.
- Saxton, K.E. & Rawls, W.J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America* 70: 1569-1578. USA.
- Smolander, A. 2003. Metsämaan orgaaninen aine. Julkaisussa: Mälkönen, E. (toim.). *Metsämaa ja sen hoito*. Metsäntutkimuslaitos, Kustannusosakeyhtiö Metsälehti, Hämeenlinna. s. 81–90.
- Starr, M. 1999. WATBAL: A model for estimating monthly water balance components, including soil water fluxes. In: Kleemola, S. & Forsius, M. (eds.). 8<sup>th</sup> Annual Report 1999. UN ECE ICP Integrated Monitoring. Finnish Environment Institute, Helsinki, Finland. *The Finnish Environment* 325: 21-25.
- Sun, G., Noormets, A., Chen, J. & McNulty, S.G. 2008. Evapotranspiration estimates from eddy covariance towers and hydrologic modeling in managed forests in Northern Wisconsin, USA. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 257-267.
- Tamminen, P. 1991. Kangasmaan ravinnetunnusten ilmaiseminen ja viljavuuden alueellinen vaihtelu Etelä-Suomessa. *Folia For.* 777. 40 s.
- Tamminen, P. 2009. Kangasmaiden ominaisuudet valtakunnan metsien 8. inventoinnin pysyvillä koaloilla 1986-1995. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2009: 69–73.
- Thabeet, A., Vennetier, M., Gadbin-Henry, C., Denelle, N., Roux, M., Caraglio, Y. & Vila, B. 2009. Response of *Pinus sylvestris* L. to recent climatic events in the French Mediterranean region. *Trees* 23: 843-853.
- Tietje, O. & Hennings, V. 1996. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Elsevier Science. Geoderma* 69: 71-84.

- Trenberth, K.E., Jones, P.D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J.A., Rusticucci, M., Soden, B. & Zhai, P. 2007. Observations: Surface and atmospheric climate change. In: Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (toim.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Utset, A., Farré, I., Martínez-Cop, A. & Caveró, J. 2003. Comparing Penman-Monteith and Priestley-Taylor approaches as reference-evapotranspiration inputs for modeling maize water-use under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management* 66: 205-219.
- Vakkilainen, P. 1986. Haihdunta. Julkaisussa: Mustonen, S. (toim.). *Sovellettu hydrologia. Vesiyhdistys ry, Helsinki*. 503 s.
- Vapaavuori, E., Riikonen, J., Peltonen, P., Kasurinen, A., Holopainen, J., Oksanen, E. & Holopainen, T. 2005. Lehtipuut –menestyjiä tulevaisuuden ilmastossa? Tuloksia Suonenjoen kenttäkoikeesta rauduskoivulla. Julkaisussa: Riikonen, J. & Vapaavuori, E. (toim.). *Ilmasto muuttuu – mukautuvatko metsät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944. Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoki*. s. 68–81.
- Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Pirinen, P. & Drebs, A. 2005. A basic Finnish climate data set 1961-2000 –descriptions and illustrations. *Meteorological Reports 2005: 5. Finnish Meteorological Institute*. 27 s.
- Vilhar, U., Starr, M., Katzensteiner, K., Simončič, P., Kajfež-Bogataj, L. & Diaci, J. 2010. Modelling drainage fluxes in managed and natural forests in the Dinaric karst: a model comparison study. *European Journal of Forest Research* 129: 729-740.
- Weber, P., Bugmann, H. & Rigling, A. 2007. Radial growth responses to drought of *Pinus sylvestris* and *Quercus pubescens* in an inner-Alpine dry valley. *Journal of Vegetation Science* 18: 777-792. Opulus Press Uppsala.
- Welp, L.R., Randerson, J.T. & Liu, H.P. 2007. The sensitivity of carbon fluxes to spring warming and summer drought depends on plant functional type in boreal forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* 147: 172-185.
- Westman, C.J. 1991. Maaperä ja sen toiminta kasvualustana. Helsingin yliopiston metsänhoitotieteen tiedonantoja N:o 67. Helsingin yliopisto.
- Yrjönen, J. 2008. Mitä provenienssikokeet kertovat puiden sopeutumisesta ilmastonmuutokseen? *Metsäekologian laitoksen Pro gradu – työ, Helsingin yliopisto*.



## **Internet-lähteet**

Linkosalo, T., Duursma, R.A., Pumpanen, J., Mäkipää, R. & Mäkelä, A. 2009. Predicting the probability of severe droughts and changes in potential GPP under changing climate. 6th International Symposium on Ecosystem Behavior BIOGEOMON 2009, June 29-July 3, 2009, Helsinki, Finland (viitattu 17.11.2010). Saatavilla www-muodossa:

[http://www.metla.fi/hanke/3422/Linkosalo\\_Tapio\\_upd.pdf](http://www.metla.fi/hanke/3422/Linkosalo_Tapio_upd.pdf).

## **Henkilökohtaiset tiedonannot**

Kolari, Pasi, tutkijatohtori, Helsingin yliopisto. Henkilökohtainen tiedonanto, 19.11.2010, Helsinki.

Ruosteenoja, Kimmo, tutkija, Ilmatieteen laitos. Henkilökohtainen tiedonanto, 1.4.2010, Helsinki.