

Energiapuun kosteuden ennustaminen

Miina Jahkonen, Jari Lindblad, Seija Sirkiä ja Ari Laurén

Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute
-sarjassa julkaistaan tutkimusten ennakkotuloksia ja ennakkotulosten
luonteisia selvityksiä. Sarjassa voidaan julkaista myös esitelmää ja
kokouskoosteita yms.

Sarjassa ei käytetä tieteellistä tarkastusmenettelyä.

Sarjan julkaisut ovat saatavissa pdf-muodossa sarjan Internet-sivuilta.

<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/>
ISSN 1795-150X

Toimitus

PL 18
01301 Vantaa
puh. 010 2111
faksi 010 211 2101
sähköposti julkaisutoimitus@metla.fi

Julkaisija

Metsäntutkimuslaitos
PL 18
01301 Vantaa
puh. 010 2111
faksi 010 211 2101
sähköposti info@metla.fi
<http://www.metla.fi/>

Tekijät Jahkonen, Miina, Lindblad, Jari, Sirkiä, Seija & Laurén, Ari			
Nimeke Energiapuun kosteuden ennustaminen			
Vuosi 2012	Sivumäärä 35	ISBN 978-951-40-2379-8 (PDF)	ISSN 1795-150X
Alueyksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet Itä-Suomen alueyksikkö / Bioenergiaa metsistä -tutkimus- ja kehittämisohjelma (BIO) / METKA – Metsäenergiaa kannattavasti 7335			
Hyväksynyt Antti Asikainen, professori, BIO-tutkimusohjelman johtaja, 7.9.2012			
Tiivistelmä Kosteus on merkittävä energiapuun laatutekijä. Kosteus vaikuttaa energiapuun teholliseen lämpöarvoon ja sitä kautta energiapuuerästä saatavaan energiasisältöön. Kosteuden suhteen oikea-aikaisella energiapuuerien toimittamisella ja käytöllä pystytään lisäämään puupolttoaineen tehollista energiasisältöä ja parantamaan koko energialiiketoiminnan kannattavuutta. Tämä edellyttää nykyistä parempia mahdollisuuksia arvioida energiapuuvarastojen kosteutta. Tämän tutkimuksen kenttäaineistot kerättiin Kanta-Hämeen ja Keski-Suomen alueilta. Aineistoista määritettiin eri energiapuutavaralajien kosteus tiensivastavarausta käyttöpaikkaan toimitettaessa. Ilmatieteen laitoksen tuottamista ilmastohavaintoaineistoista määritettiin varastointiaikaa ja -paikkaa vastaavat säätekijät, joita käytettiin energiapuuvarastojen loppukosteuden mallinnuksessa. Energiapuutavaralajien kosteudelle sovitettiin epälineaariset mallit käyttäen selittäjinä varastointiajan potentiaalisia haihduntaa erilaisilla interseptiokapasiteeteilla. Laajemmalla Kanta-Hämeestä kerätyllä aineistolla sovitettujen mallien selitysasteet jäivät mataliksi, mutta pienemmästä Keski-Suomesta kerätystä aineistosta sovitettujen mallien selitysasteet olivat hyviä. Kanta-Hämeen aineiston suuren hajonnan vuoksi malleja voidaan pitää vain suuntaa antavina. Keski-Suomen sinänsä lupaavia tuloksia ei voida yleistää aineiston määrällisen ja ajallisen suppeuden vuoksi. Energiapuuvarastojen kosteuden ennustamista voidaan parantaa varastointiajan sääolosuhteisiin perustuvalla mallinnuksella. Toteutuneisiin sääolosuhteisiin perustuvalla kosteuden ennustamisella voidaan ottaa huomioon kuivumisolosuhteiden paikalliset ja vuosien väliset erot.			
Asiasanat energiapuu, kosteus, kuivuminen, mallintaminen, lämpöarvo, sadanta, potentiaalinen haihdunta			
Julkaisun verkko-osoite http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp241.htm			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
Yhteydenotot Jari Lindblad, Metla, PL 68, 80101 Joensuu. Sähköposti: jari.lindblad@metla.fi			
Bibliografiset tiedot			
Muita tietoja Taitto: Maija Heino			

Sisällys

1 Johdanto.....	5
1.1 Kosteus energiapuun laatutekijänä	5
1.2 Tuoreen puun kosteus	6
1.3 Kosteuden vaihtelu ja kuivuminen	7
1.4 Kuivumisolosuhteisiin liittyvät käsitteet	8
1.5 Tutkimuksen tavoite	9
2 Aineisto ja menetelmät.....	9
2.1 Hämeen kosteusmittausaineisto.....	9
2.2 Keski-Suomen kosteusmittausaineisto	10
2.3 Säätietojen lisääminen aineistoon.....	10
2.4 Tilastollinen analyysi ja kosteuden mallinnus	13
3 Tulokset	13
3.1 Kosteuden vaihtelu vuodenajan ja varastointiajan suhteen	13
3.1.1 Hämeen kosteusmittausaineisto	13
3.1.2 Keski-Suomen kosteusmittausaineisto	15
3.2 Kosteuden vaihtelu sääolosuhteiden mukaan.....	16
3.2.1 Hämeen kosteusmittausaineisto	16
3.2.2 Keski-Suomen kosteusmittausaineisto	18
3.3 Kosteuden mallintaminen sääolosuhteiden avulla.....	19
3.3.1 Regressiomallien yleinen muoto	19
3.3.2 Hämeen kosteusmittausaineisto	20
3.3.3 Keski-Suomen kosteusmittausaineisto	22
4 Tulosten tarkastelu	25
4.1 Kosteuden vaihtelu varastointiajan ja sääolosuhteiden mukaan	25
4.1.1 Harvennusenergiapuun kosteus ja kuivuminen	25
4.1.2 Oksa- ja latvusmassan kuivuminen	26
4.1.3 Kantojen kuivuminen	28
4.1.4 Sääolosuhteiden vaikutus kuivumiseen	29
4.1.5 Lumen vaikutus	30
4.2 Kosteuden mallinnus	31
4.3 Johtopäätökset	32
Kirjallisuus	34

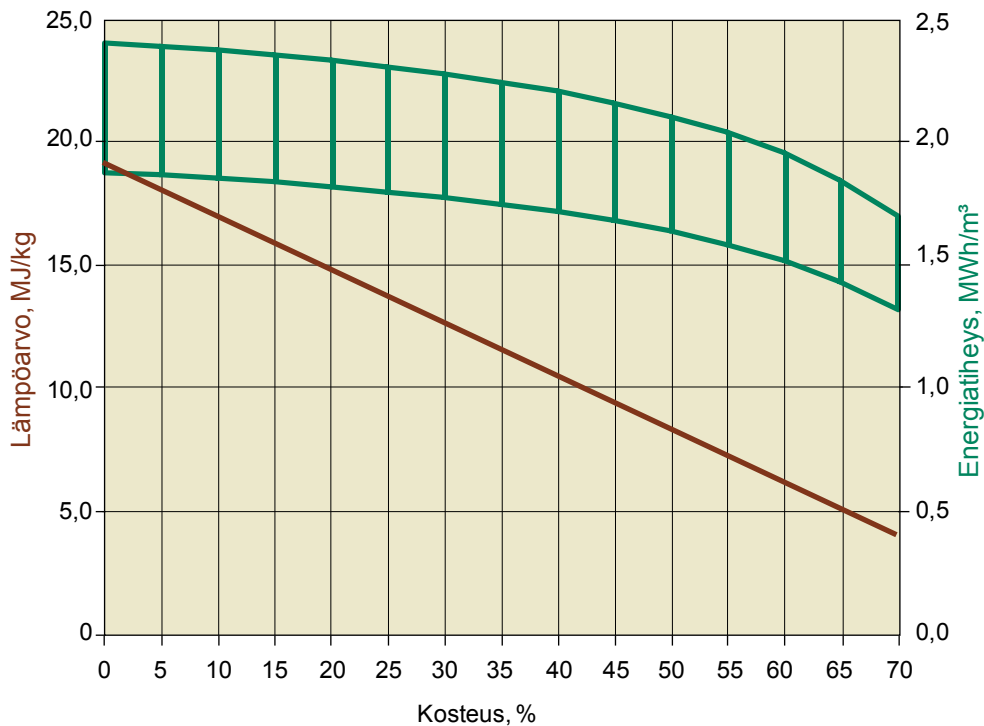
1 Johdanto

1.1 Kosteus energiapuun laatutekijänä

Kosteus on energiapuun tärkeimpiä laatutekijöitä. Se vaikuttaa oleellisesti energiapuun teholliseen lämpöarvoon ja sitä kautta energiapuuerien kokonaisenergiasisältöön. Lisäksi kosteus vaikuttaa merkittävästi lämpö- ja voimalaitosten polton hyötysuhteeseen. Ajatellen energiapuun käyttöä kokonaisuudessaan, kosteuden suhteen oikea-aikaisella energiapuuerien toimittamisella ja käytöllä pystytään parantamaan koko energialiiketoiminnan kannattavuutta. Lähtökohtaisesti tämä edellyttää nykyistä parempia mahdollisuuksia arvioida energiapuuvarastojen kosteutta.

Lämpöarvolla tarkoitetaan energiaa, joka saadaan polttamalla massayksikkö puuta (MJ/kg tai kWh/kg). *Tehollinen lämpöarvo* kertoo vapautuvan lämpöenergian määrän, kun puussa oleva vesi on ensin haihdutettu. Vettä on tuoreessa puussa noin 360 kg/m³ ja kuivuneessa 100–170 kg/m³. Veden höyrystämiseen tarvitaan energiaa 0,068 kWh/kg (Hakkila ja Fredriksson 1996).

Puun massayksikköä kohti ilmoitettu tehollinen lämpöarvo muuttuu lineaarisesti suhteessa puun kosteuteen. Tilavuusyksikköä kohti ilmoitettu tehollinen lämpöarvo – energiatiheys – laskee kosteuden kasvaessa epälineaarisesti siten, että muutos nopeutuu korkeissa kosteuksissa. Energiapuun kuivatuoretiheys (kg/m³), eli tilavuusyksikön sisältämä kuivan puuaineen määrä, vaikuttaa merkittävästi energiatihyyteen. Kuivatuoretiheyden vaikutus energiatihyyteen on samaa tasoa kuin kosteuden. Kuvassa 1 on esitetty energiatihyyden vaihtelu kosteuden suhteen, kun kuivatuoretiheys on 350–450 kg/m³. Vaihteluväli vastaa suuruusluokaltaan eri energiapuutavaralajien kuivatuoretiheyden vaihtelua.



Kuva 1. Puun tehollinen lämpöarvo (MJ/kg) ja energiatiheys (MWh/m³) kosteuden suhteen. Energiatiheyden laskennassa kuivatuoretiheyden vaihteluväli oli 350–450 kg/m³.

1.2 Tuoreen puun kosteus

Kaatotuoreen puun kosteus on yleensä liian korkea tehokasta energiakäyttöä varten etenkin pienemmille lämpölaitoksille (Hakkila 1989) ja kosteutta pyritäänkin alentamaan korjuun ja varastoinnin aikana. Pienillä lämpölaitoksilla hakkeen kosteus ei saisi ylittää 40 prosenttia (Erkkilä ym. 2011), mutta suuremmat lämpölaitokset pystyvät käyttämään kosteampaakin polttoainetta.

Tuoreen puun kosteus vaihtelee puulajin, puuaineen tiheyden ja puun iän mukaan. Tuoreen puun vuodenaajoittaiselle kosteusvaihtelulle on tyypillistä, että kosteus on talvella suurempi kuin kesällä. Vuodenaikojen väliset kosteuserot ovat lehtipuilla suurempia kuin havupuilla kesäajan suuremman haihdunnan vuoksi. Lisäksi lehtipuiden vuodenaajoittaiselle kosteusvaihtelulle on tyypillistä, että kosteus on korkeimmillaan keväällä maan sulettua ennen lehtien puhkeamista ja vastaavasti syksyllä lehtien pudottua ennen maan jäätymistä. Männyn kosteus on kotimaisista pääpuulajeista korkein (Hakkila 1962).

Kosteus vaihtelee metsiköiden ja puiden välillä ja puun sisällä sen eri osissa. Koko puuta tarkasteltaessa puuaineen kosteus on alimmillaan kannon korkeudella kohoten latvaa kohti ja edelleen oksiin ja oksan kärkiin päin. Samoin kosteus kasvaa kantopuussa kannosta juuren kärkiä kohti (esim. Hakkila 1962, Hakkila ym. 1995, Andersson ym. 2002, Kärkkäinen 2007).

Runkopuun kosteus kohoaa sekä havu- että lehtipuilla tyvestä latvaan päin. Havupuilla merkittävä tekijä on kuivan sydänpuun osuus. Sydänpuun osuus rungon tyvellä on suurempi kuin latvassa, mikä osaltaan selittää rungon pituussuuntaista kosteusvaihtelua. Kuusella sydänpuuosuus on suurempi kuin männyllä ja vastaavasti kuusen runkopuun kosteus on mäntyä alempi. Runkopuun tiheys on yhteydessä kosteuteen siten, että tiheyden kasvaessa kosteus tavallisesti alenee. Männyllä ja kuusella pintapuun tiheys laskee latvaa kohti ja vastaavasti pintapuun kosteus nousee tyvestä latvaan (Kärkkäinen 2007).

Männyllä kaatotuoreen energiapuun kosteus on 50–55 prosenttia. Kuusella kosteus on hieman tätä alempi. Koivun kosteus on keväällä ennen lehtien puhkeamista ja loppusyksyllä lehtien varisemisen jälkeen jopa 50 prosenttia. Heinä-syyskuussa haihduttavan lehtipinnan ollessa suurimmillaan koivun kosteus on noin 38 prosenttia (Hakkila 1962).

Oksa- ja latvusmassaa korjataan uudistusaloilta. Männyllä lähes puolet oksa- ja latvusmassasta on puuainetta, kuorta on noin kolmannes ja neulasia noin neljännes. Kuusella sekä puuainetta että neulasia on yli kolmannes ja kuorta noin viidennes. Oksien kuoriosuus on niiden pienestä läpimitasta johtuen runkopuuta suurempi. Puuaineen tiheys on oksissa runkopuuta suurempi ja myös kosteus on yleensä suurempi kuin runkopuussa (Hakkila ym. 1998, Kärkkäinen 2007). Männyllä kuolleiden oksien osuus on verraten suuri, ja niiden alhainen kosteus alentaa latvusmassan kosteutta. Koivulla kuolleita oksia on vähän eikä niiden kosteus eroa elävien oksien kosteudesta paljoa-kaan (Hakkila 1991). Tutkimusten mukaan havupuiden latvusmassan kosteus on 44–60 prosenttia (mm. Kärkkäinen 1976, Verkasalo 1987, Hakkila ym. 1995, Ronkainen 2010).

Kantopuun tiheys on havupuilla korkeampi ja lehtipuilla alempi kuin runkopuussa (Kärkkäinen 2007). Männyllä tiheys on korkein kannossa ja siitä haarautuvissa paksuissa juurenniskoissa. Kuusella tiheys on korkein ohuimmissa juurissa (Hakkila 1975 ja 1976). Laurilan ja Lauhasen tutkimuksen (2010) mukaan kuusen kantojen keskikosteus oli 53 prosenttia. Erkkilän ym. (2011) tutkimuksessa mäntykantojen kosteuden keskiarvo oli 43 prosenttia ja kuusikantojen 51 prosenttia.

1.3 Kosteuden vaihtelu ja kuivuminen

Puu on hygroskooppinen eli vettä imevä aine. Puu pystyy sitomaan vettä ympäristöstään ja toisaalta luovuttamaan ilmaan vettä. Puun kosteus muuttuu kohti lämpötilan ja kosteusolojen mukaista tasapainokosteutta, jolloin haihtuvan ja sitoutuvan veden määrä on yhtä suuri. Koska luonnossa olosuhteet muuttuvat, on myös puun kosteus jatkuvassa muutostilassa. Muutoksen nopeus ja suunta riippuvat paitsi olosuhteista, myös puussa vallitsevasta kosteustasosta (mm. Kärkkäinen 2007).

Eri puulajien ja puun eri osien vedensitomiskyky vaihtelee. Esimerkiksi männyn ja kuusen sisäkuori on hyvin hygroskooppista. Koivun ulkokuori taas on vain vähän hygroskooppista. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että syksyisin ilmankosteuden kohotessa kuusen ja männyn kosteus alkaa nousta voimakkaasti, mutta koivun kuoren kosteus kohoaa vain vähän (Kärkkäinen 2007). Havupuisilla energiapuutavaralajeilla kuoren suuri osuus edesauttaa nopeampaa kosteuden vaihtelua. Koivun hidas kuivuminen huonosti vettä läpäisevän kuoren takia aiheuttaa pitkällä varastointiajoilla lahoa (Hakkila 1963) ja lahonnut puu vettyy helposti.

Kosteuden vaihtelu lisääntyy ja nopeutuu väliaineeseen kosketuksissa olevan pinta-alan lisääntymisessä. Energiapuutavaralajien läpimitat kantoja lukuun ottamatta ovat tyypillisesti pieniä, jolloin vettä sitova ja luovuttava pinta-ala on tilavuuteen nähden suuri.

Hakkilan (1962 ja 1964) ja Heiskasen (1959) tutkimuksissa esitettiin seuraavia havaintoja energiapuun kuivumisesta:

- Kuorellisten rankojen kuivuminen tapahtuu katkaisusahauksen pinnasta ja kohdista, joista kuori on rikkoutunut (esimerkiksi oksien ympäristöistä). Lyhyet rangat kuivuvat pitkiä nopeammin.
- Koska ohuilla puilla oksia on yleensä enemmän ja niiden alkukosteus on paksuja puita korkeampi, ne kuivuvat aluksi nopeammin.
- Kuivuminen hidastuu läpimitan kasvaessa, mikä johtuu tilavuusyksikköä kohti pienemmästä haihduntapinnasta. Lisäksi pienissä läpimitoissa ohut kuori nopeuttaa kuivumista.
- Männyllä kuorettoman läpimitan ylittäessä 6–7 senttimetriä läpimitan kasvu ei enää merkittävästi vaikuta kuivumisnopeuteen.
- Koivulla läpimitan vaikutus rankapuun kuivumiseen on pienempi kuin havupuilla. Tiiviistä kuoresta johtuen koivu kuivuu rankana heikosti, ellei kuorta ole rikottu. Jos koivurangat aistaan, läpimitan vaikutus kuivumisnopeuteen tulee voimakkaammin esille.
- Männyllä ja kuusella pieniläpimittainen (alle viisi senttimetriä) rankapuu kuivuu yhtä hyvin kuin kokopuu.

Veden sitoutuminen puuaineeseen solutasolla vaikuttaa sen kuivumismekanismiin. Tuore puu sisältää soluseinämiin *sidottua vettä* ja soluväleissä ja soluontelossa on *vapaata vettä*. Puun kuivuessa siitä poistuu ensimmäisenä vapaa vesi, jota tuoreessa havupuussa on 2–3 kertaa enemmän kuin sidottua vettä (Hakkila 1964). Kun vapaa vesi on poistunut, saavutetaan noin 28–30 prosentin kosteudessa *puun syiden kyllästymispiste*. Puun syiden kyllästymispisteessä kosteuden haihtumiseen vaadittavan energian tarve lisääntyy merkittävästi, jolloin myös kuivumisnopeus hidastuu. Tämä puun syiden kyllästymispisteen vaikutus ilmenee myös Jalavan (1941) toteamuksessa, jonka mukaan 29–33 prosentin kosteus muodostaa ”jonkinlaisen tasapainotilan, jonka alle kosteus ei hevin voi mennä, mutta jonka yläpuolellekaan kosteus ei jää, jos vain kuivumisolosuhteet ja -edellytykset sen tekevät mahdolliseksi”. Puun kuivuminen ei ole lineaarista myöskään puun syi-

den kyllästymispisteen yläpuolella. Kuivumisen alussa haihtuu vapaa vesi puun pinnalta, minkä jälkeen kuivuminen edistyy sisäosiin. Mikäli vallitsevat kuivumisolosuhteet ovat hyvät ja haihtuminen nopeaa, puun pinnalle ei siirry vettä puun sisäosista yhtä nopeasti kuin siitä haihtuu, jolloin kuivuminen hidastuu.

1.4 Kuivumisolosuhteisiin liittyvät käsitteet

Nestemäisessä tai kiinteässä olomuodossa olevan veden siirtymistä vesihöyrynä ilmaan kutsutaan haihtumiseksi (Vakkilainen 1986), jonka määrää kuvataan suureella haihdunta (mm/vrk). Haihdunnan määrittäminen on sademäärään määrittämiseen nähden monimutkaisempaa; haihtumista kuvataan useilla eri käsitteillä (mm. potentiaalinen haihdunta, todellinen haihdunta) ja näiden laskennassa ja arvioimisessa käytetään useita eri menetelmiä.

Potentiaalinen haihdunta (potentiaalinen evaporaatio) kuvaa sitä veden määrää, joka vallitsevissa olosuhteissa haihtuu puhtaasta, vapaasta vedenpinnasta (Vakkilainen 1986). Potentiaalinen haihdunta ei kerro todellisen haihdunnan määrää, vaan sen hetkisiä olosuhteita vastaavan maksimaalisen haihdunnan, kun veden määrä ei rajoita haihtumista. *Todellinen haihdunta* (aktuaalinen evaporaatio) on pienempi kuin potentiaalinen haihdunta ja se kuvaa pinnasta tosiasiaassa tapahtuvan haihdunnan määrää (Vakkilainen 1986). Todellista haihduntaa kuvaava käsite on esimerkiksi maahaihdunta, jonka suuruus riippuu potentiaalisesta haihdunnasta (haihduntaolosuhteet) ja maan kosteudesta (haihdutettavissa oleva veden määrä). Maahaihdunnan alkamisen perusteella voidaan arvioida palstalla tai tienvarsivarastossa olevan energiapuun kuivumisjakson alkamista.

Ilma sisältää aina kosteutta, joka useimmin on näkymättömänä kaasuna, mutta toisinaan tiivistyneessä muodossa esimerkiksi sumuna, vetenä tai lumena (Kuusisto 1986). *Ilman kosteus* tarkoittaa ilmassa olevan veden määrää ja se voidaan määrittää eri tavoilla suhteellisina tai absoluuttisina arvoina. Ilman lämpötilan kasvaessa suurimman mahdollisen ilman sitoman vesihöyryn määrä kasvaa. Kun ilma sisältää enimmäismäärän vesihöyryä, puhutaan *kylläisen vesihöyryn paineesta*. Ilman *suhteellinen kosteus* voidaan määrittää ilmassa olevan vesihöyryn osapaineen suhteellisenä osuutena kylläisen vesihöyryn paineesta (Kuusisto 1986). Jos suhteellinen kosteus on 100 prosenttia, on ilma täysin veden kyllästämä, eikä ilmaan voi sitoutua enempää vettä. Tätä suuremmassa kosteudessa vesihöyry alkaa tiivistyä vedeksi. Ilman *absoluuttinen kosteus* kuvaa ilman todellista vesihöyryn määrää. Absoluuttinen kosteus voidaan laskea vesihöyrymäärän suhteena kuivailmamäärään (esimerkiksi Haikonen 2005).

Ilman kosteuteen vaikuttavat vuoden- ja vuorokaudenaika, mikroilmasto sekä paikalliset olosuhteet, kuten maanpinnanmuodot, kasvillisuus ja vesistöt. Talvella kylmässä ulkoilmassa suhteellinen kosteus on korkea, mutta ilman vedensitomiskyky matala, jolloin ilman sisältämä absoluuttinen vesimäärä on pieni. Vastaavasti lämpimässä ulkoilmassa ilman kyky sitoa vettä on suuri, jolloin sama määrä vettä aiheuttaa alemman suhteellisen kosteuden. Ilman kyky sitoa kuivattavan aineen kosteutta siis paranee lämpötilan noustessa ja suhteellisen kosteuden laskiessa (Hillebrand ym. 2004).

Heiskasen (1953) mukaan haihtuminen vapaasta vedenpinnasta on suoraan verrannollinen ilman lämpötilaan, kääntäen verrannollinen ilman paineeseen, suoraan verrannollinen vesihöyryn paineeseen ja suoraan verrannollinen tuulen nopeuden neliöjuureen. Kuivumista siis edesauttaa riittävä ilman virtaus. Mikäli ilman virtausta ei ole, kuivattavan aineen pinnalle voi muodostua ohut kostea ilmakerros, jolloin kosteuden siirtyminen kuivattavasta aineesta ilmaan tapahtuu heikommin.

Kuivumisolosuhtetietojen hyödyntäminen energiapuun kuivumisjaksojen ja kuivumisnopeuden määrittämisessä edellyttää tietoa siitä, miten todellinen haihdunta muuttuu potentiaalisen haihdunnan suhteen. Lisäksi on huomioitava olosuhteet, jolloin kuivumista ei tapahdu. Käytännössä vaihtelua energiapuuvarastoon pidättyvän sadeveden määrään aiheuttavat energiapuutavaralaji (pinnan osuus tilavuudesta), varastomuodostelman koko ja korkeus, energiapuun kosteusaste ja sademäärä.

1.5 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoitteena oli

- a) tutkia varastointiajan ja varastointiajankohdan vaikutusta energiapuun kosteuteen eri energiapuutavaralajeilla
- b) kehittää menetelmä säähavaintotietojen kohdentamiseksi energiapuuvarastoon
- c) tutkia varastointiajan säähavaintomuuttujien vaikutusta energiapuun kosteuteen sekä
- d) laatia ennustemallit eri energiapuutavaralajien kosteudelle.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Hämeen kosteusmittausaineisto

Tutkimuksen aineisto kerättiin Kanta-Hämeen ja Päijät-Hämeen metsänhoitoyhdistysten toiminta-alueilla vuosina 2006–2010 korjatuista, varastoiduista ja käyttöpaikkaan toimitetuista energiapuueristä. Aineistot koostuivat energiapuukohteiden sijaintia, hakkuu- ja metsäkuljetusajankohtaa, varastointiaikaa sekä toimituserien haketus- ja toimitusajankohtaa sekä toimituskosteutta koskevista tiedoista. Aineisto käsitti 152 harvennusmetsien energiapuun (jatkossa harvennusenergiapuu) toimituserää ja 408 oksa- ja latvusmassan toimituserää.

Harvennusenergiapuukohteilla korjuu oli keskittynyt kevääseen ja syksyyn; kesällä ja talvella korjuu oli ollut vähäisempää. Oksa- ja latvusmassan korjuu jakautui epätasaisemmin ja oli suurimmillaan syyskuussa. Vähäisintä oksa- ja latvusmassan korjuu oli kevättalvella. Harvennusenergiapuun haketus oli vilkkaimmillaan marraskuusta maaliskuuhun ja vähäisintä kesä-heinäkuussa. Oksa- ja latvusmassan haketus oli vilkkaimmillaan lokakuusta huhtikuuhun.

Energiapuuerät oli haketettu tienvarsivarastolla ja kuljetettu lämpölaitokselle. Kosteusnäytteet oli otettu hakkeesta lämpölaitoksella. Saman toimituserän kosteusnäytteistä muodostettiin kokoomanäyte, josta kosteus määritettiin uunimenetelmällä. Lämpölaitos toimitti kuukausittaiset tiedot toimitetuista hake-eristä ja niiden kosteusprosentista metsänhoitoyhdistykselle. Aineistossa oli määritetty toimitusajankohta kuukausitasolla.

Kesän 2010 aikana molemmat metsänhoitoyhdistykset koostivat takautuvasti kosteushavaintoaineistot, joihin sisältyivät energiapuutavaralajeittain ja hake-erittäin hakkuupäivä, metsäkuljetuspäivä, haketuspäivä ja kosteusprosentti toimitusajankohtana. Koska korjuun toimenpiteiden ajankohdan raportoinnissa oli eroavaisuuksia, määritettiin laskenta-aineiston yhdenmukaistamiseksi kaikkien erien hakkuu-, metsäkuljetus- ja toimituspäiväksi kuukauden 15. päivä. Tutkimusaineistot eivät sisältäneet tietoa harvennusenergiapuuerien puulajista tai puulajijakaumasta. Tiedossa ei ollut myöskään, oliko harvennusenergiapuu karsittua vai karsimatonta. Tieto varastojen peit-

tämisestä oli saatavilla vain osalle laskenta-aineiston havainnoista. Energiapuueriä varastoitiin palstalla pienkasoissa vaihtelevan pituisia aikoja ennen niiden kuljettamista tienvarsivarastoon.

Energiapuuerien varastointiaika tienvarressa vaihteli paljon. Varastointiajan keskiarvo (yhteensä palstalla tai tienvarsivarastossa) oli harvennusenergiapuulla 324 ja oksa- ja latvusmassalla 438 vuorokautta. Harvennusenergiapuulla yksi erä oli viety haketettavaksi suoraan hakkuun jälkeen. Oksa- ja latvusmassalla lyhin varastointiaika oli kuukausi. Molemmilla tavaralajeilla pisin varastointiaika oli yli kolme vuotta.

2.2 Keski-Suomen kosteusmittausaineisto

Metsäliitto Osuuskunnan (nykyinen Metsä Group) keräämässä kenttäkoeaineistossa seurattiin erityyppisten energiapuuvarastojen kosteuden muutosta kesällä 2010. Energiapuukohteet korjattiin huhtikuun lopun ja elokuun alun välisenä aikana. Energiapuun tienvarsivarastoja purettiin määrävälein (2–4 viikkoa) touko- ja lokakuun välisenä aikana kuljettamalla kuormia lämpö- ja voimalaitoksen terminaaliin. Haketuksen tai murskauksen jälkeen määritettiin eräkohtainen kosteus. Kosteusnäytteitä otettiin hake- tai murskekasasta kuudesta eri kohdasta noin metrin korkeudelta pintakerroksen alta. Kosteus määritettiin uunimenetelmällä. Määrävälein tehdyillä energiapuun toimituksilla ja kosteusmäärittelyillä pystyttiin tarkastelemaan kosteuden muutosta kussakin varastointikasassa kesän aikana.

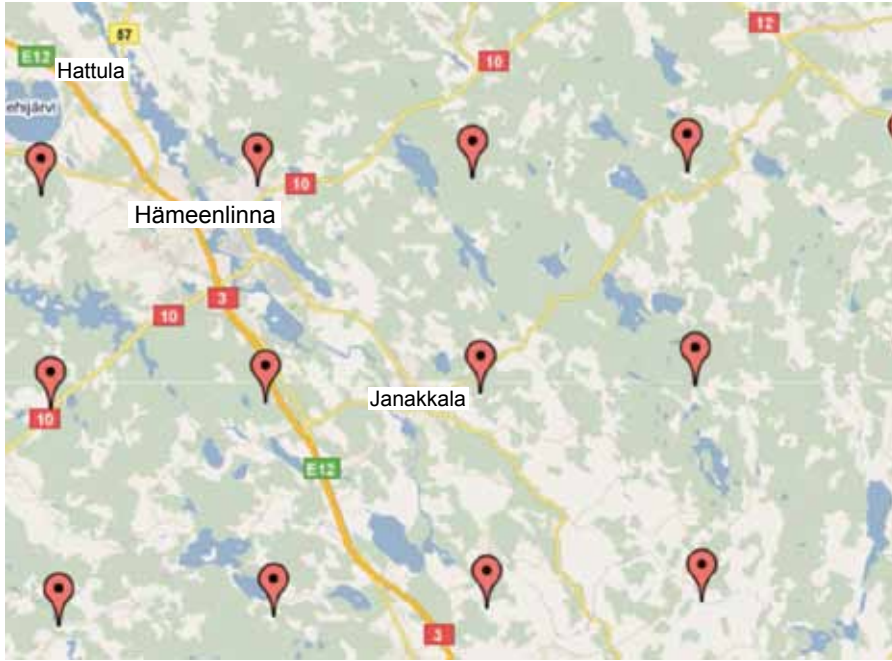
Kenttäkoeaineisto koostui neljästä tavaralajista. Näistä harvennusenergiapuu (karsittu ja karsimaton) oli mäntyvaltaista tai koivuvaltaista sekapuuta. Oksa- ja latvusmassa ja kantopuu olivat kuusta. Energiapuuerät oli varastoitu joko tienvarressa tai palstalla. Osassa tienvarsivarastoja käytettiin välipuita (ns. jolupuut).

Varastokasojä oli yhteensä 25, joista harvennusenergiapuuvarastoja oli 14 (karsittua ja karsimattontä), oksa- ja latvusmassavarastoja kuusi ja kantopuuvarastoja viisi. Varastokasojen koko oli 30–105 m³. Kustakin varastosta kuljetettiin lämpölaitokselle 1–7 toimituserää, joista määritettiin kosteus.

Harvennusenergiapuulla kosteushavaintojen kokonaismäärä oli 56 kappaletta, oksa- ja latvusmassalla 21 kappaletta ja kantopuulla 21 kappaletta. Koko aineistossa varastointiajan keskiarvo oli noin kaksi kuukautta. Kantopuuta varastoitiin ennen murskausta vähintään 11 vuorokautta ja oksa- ja latvusmassaa 12 vuorokautta. Harvennusenergiapuulla yksi erä haketettiin jo hakkuuta seuraavana päivänä. Kannoilla pisin varastointiaika oli 123 vuorokautta ja oksa- ja latvusmassalla sekä harvennusenergiapuulla hieman yli 130 vuorokautta. Varastopaikat oli jaettu kolmeen luokkaan tuulisuuden ja aurinkoisuuden mukaan. Kaikki varastokasat kantoja lukuun ottamatta oli peitetty.

2.3 Säätiötojen lisääminen aineistoon

Ilmatieteen laitos tuottaa soveltavan tutkimuksen tarpeisiin käytettävää säähavaintoaineistoa. Aineisto sisältää päiväkohtaiset havainnot sademäärästä, lämpötilasta, auringon säteilystä ja vesihöyryn paineesta. Aineisto tuotetaan koko maan kattavasti siten, että interpoloidut säähavainnot saadaan 10x10 kilometrin ruudukossa sijaitseville säähavaintopisteille (kuva 2) (Venäläinen ym. 2005). Säätiötoja käytettiin sekä Hämeen että Keski-Suomen kosteushavaintoaineiston varastoin-



Kuva 2. Ilmatieteen laitoksen säähavaintopisteet Hämeenlinnan lähistöllä (Karttatiedot Tele Atlas 2011, Geocentre Consulting).

tiajan sääolosuhteiden määrittämiseen. Energiapuuerien sijaintitiedon perusteella haettiin lähimmästä säähavaintopisteestä päiväkohtaiset säätiiedot varastointiajalle.

Säähavaintoaineiston perusteella energiapuuvarastoille laskettiin varastointiajan sade-, lämpö- ja säteilysummat, potentiaalinen haihduntasumma erilaisin lähtöoletuksin sekä lumen vesi-arvo varastoinnin päättymishetkellä. Lämpösumma laskettiin vuorokausien keskilämpötilojen $+5^{\circ}\text{C}$ ylitävän osan summana. Sadesumma määritettiin varastointiajan päiväkohtaisten sademäärien (mm/vrk) summana (mm). Säteilysumma on laskettu varastointiajan päiväkohtaisen kokonaissäteilyn ($\text{kJ/m}^2/\text{vrk}$) summana.

Potentiaalinen haihdunta laskettiin Penman-Monteith yhtälöllä (Monteith, 1965):

$$E_{IPo} = \frac{R_{no} + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_{ao}}{\lambda_v (\Delta + \gamma)} \quad (1)$$

E_{IPo} = potentiaalinen haihdunta (mm/h),

R_{no} = nettosäteily ($\text{kJ/m}^2/\text{h}$),

ρ_a = ilman tiheys (kg/m^3),

c_p = ilman ominaislämpökapasiteetti ($\text{kJ/(K}\times\text{kg)}$),

e_s = kyllästyneen vesihöyryn paine (kPa),

e_a = ilman vesihöyryn paine (kPa),

r_{ao} = aerodynaaminen resistanssi (h/m),

λ_v = veden höyrystymislämpö (kJ/kg),

Δ = kyllästyneen vesihöyrynpaineen ja lämpötilan gradientti ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$) ja

g = psykrometrivakio ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$).

Potentiaalinen haihdunta muutettiin yksikköön mm/vrk. Yhtälöt muuttujien ρ_a , c_p , e_s , e_a , Δ , ja g laskentaan on esitetty teoksissa Shuttleworth (1992) and Tarboton and Luce (1996).

Potentiaalista haihduntasumma määritettäessä otettiin huomioon sademäärä ja energiapuun pinnalle interseptiovarastoon pidättyvä sadevesi. Puun pinnalla olevan veden oletettiin haihtuvan kokonaisuudessaan ensin, jonka jälkeen puuaineeseen sitoutuneen veden haihtuminen oli mahdollista. Interseptiovaraston suuruus riippuu energiapuun ominaispinta-alasta ja pintamateriaalista. Siten kantopuulla, jolla vettä pidättävää pinta-alaa on tilavuuteen nähden vähän, interseptiokapasiteetti on pieni. Vastaavasti oksa- ja latvusmassan interseptiokapasiteetti on suuri.

Potentiaaliset haihduntasummat laskettiin eri interseptiokapasiteeteilla. Kapasiteetiltaan alimassa vaihtoehdossa (0 mm/vrk) potentiaaliset haihduntasummat laskettiin oletuksella, että energiapuuvarastoon ei pidäty lainkaan sadevettä. Muissa vaihtoehdoissa (2–300 mm/vrk) oletuksena oli, että energiapuuvarastoon pidättyy päivittäisestä sademäärästä kapasiteetin määräämä osa ja tämän yli menevä osuus läpäisee energiapuuvaraston. Suurilla interseptiokapasiteeteilla päädyttiin tilanteeseen, jossa vuorokauden aikana satanut vesimäärä jäi interseptiokapasiteettia alemmaksi ja kaikki sadevesi pidättyi energiapuun pinnalle.

Varastointiajalle laskettiin myös lumen kertymistä ja sulantaa astepäivätekijä-mallilla (Kokkonen ja Koivusalo, 2009). Mallissa kuvataan sateen olomuoto ilman lämpötilan funktiona, lumivarasto ja lumen pidättämä nestemuodossa oleva vesi. Sulanta ja jäätyminen lasketaan ilman lämpötilan funktiona. Laskennoissa käytetty lumen vesiarvo tarkoittaa haketushetkellä varastokasan päällä olevan lumen sisältämän veden määrää (mm).

Hämeen aineistossa säätiedot laskettiin energiapuuvaraston sijaintikunnan mukaan. Keski-Suomen aineistosta tunnettiin energiapuuvarastojen sijainnit koordinaattien perusteella, jolloin säätiedot laskettiin lähimmän ilmastohavaintopisteen mukaisesti. Hämeen kosteusmittausaineistolle, jonka varastointiajat olivat pitkiä, säätunnukset laskettiin koko varastointiajalle, viimeiselle puolelle vuodelle ja viimeiselle kuukaudelle. Keski-Suomen kosteusmittausaineistolle laskettiin sääolosuhteet koko varastointiajalle ja viimeisen kahden viikon ajalle (taulukko 1).

Koska sääohjelman tuottaa säätietoja 10x10 kilometrin ruudukon, jäävät paikalliset vaihtelut huomioimatta. Pienet alueelliset vaihtelut tasoittunevat pitemmän ajan kuluessa, mutta esimerkiksi vesistöt tai poikkeukselliset maanpinnanmuodot aiheuttavat suurtakin vaihtelua paikallisessa ilmastossa ja näitä sääohjelma ei voi huomioida. Lämpötilan arvioimisessa ohjelma toimii hyvin, mutta pitkän aikavälillä sateissa on raportoitu huomattavaa aliarviota (Venäläinen ym. 2005).

Taulukko 1. Ilmatieteen laitoksen säätiedoista lasketut säämuuttujat.

Hämeen aineisto	Keski-Suomen aineisto
1) koko varastointiajalle,	1) koko varastointiajalle ja
2) varastointiajan viimeisellä kuudelle kuukaudelle ja	2) varastointiajan viimeiselle kahdelle viikolle:
3) viimeiselle kuukaudelle:	
– lämpösumma	– lämpösumma
– säteilysumma	– säteilysumma
– sadesumma	– sadesumma
– lumen vesiarvo haketushetkellä	– lumen vesiarvo haketushetkellä
– potentiaalinen haihduntasumma 0–300 mm interseptiokapasiteetilla	– potentiaalinen haihduntasumma 0–50 mm interseptiokapasiteetilla
– sadanta vetenä	– sadanta vetenä

2.4 Tilastollinen analyysi ja kosteuden mallinnus

Molemmille kosteusmittausaineistoille laadittiin tavaralajikohtaiset epälineaariset mallit, joissa energiapuuerien kosteutta selitettiin varastointiajan sääolosuhteita kuvaavilla muuttujilla. Mallinnus tehtiin R-tilasto-ohjelmalla ja malli sovitettiin nls-funktiolla (nonlinear least squares), joka hakee epälineaarisen mallin parametrit pienimmän neliösumman menetelmällä. Lisäksi mallinnuksessa käytettiin SPSS-tilasto-ohjelmaa. Mallien yleiseksi muodoksi valittiin eksponenttifunktio, joka vastaa puulle tunnettua kuivumisilmiötä; kaatotuoreen puun kosteus alenee aluksi nopeasti, minkä jälkeen kuivuminen hidastuu ja tasaantuu lähestyen loppukosteutta.

Hämeen kosteusmittausaineistossa kosteusmalli laadittiin harvennusenergiapuulle ja oksa- ja latvusmassalle. Selittäjät valittiin potentiaalisista haihduntasummista (eri interseptiokapasiteeteilla) mallin selittävyys mukaan. Malleihin valittiin lisää selittäjiä varastointiajan viimeiselle kuukaudelle määritetyistä muuttujista (säteilysumma, lämpösumma, lumen vesiarvo tai vesisade). Selittäjien määrää rajoitettiin kuitenkin niin, että mukaan ei tullut selvästi toistensa kanssa korreloivia parametreja (esim. säteilysumma ja lämpösumma) ja kaikkien selittäjien parametrit olivat vielä merkitseviä.

Keski-Suomen kosteusmittausaineisto koostui useista energiapuutavaralajeista puulajeittain. Kantopuulle ja latvusmassalle tehtiin omat mallinsa. Harvennusenergiapuulla kosteusmallit tehtiin erikseen männylle ja koivuvaltaiselle sekapuustolle. Kosteusmallien selittäjinä käytettiin varastointiajan potentiaalista haihduntasummaa eri interseptiokapasiteeteilla.

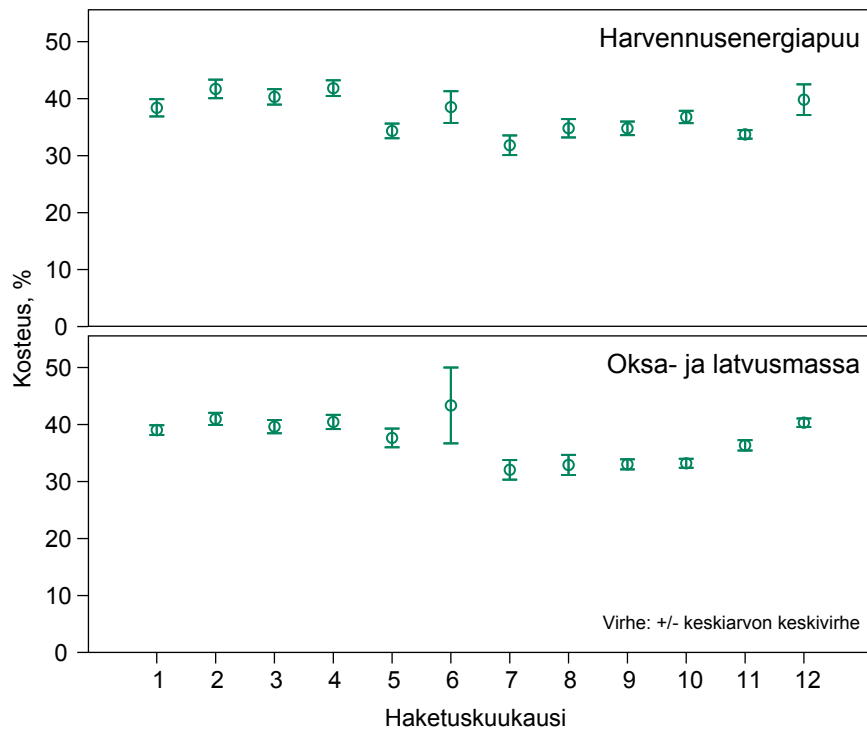
3 Tulokset

3.1 Kosteuden vaihtelu vuodenajan ja varastointiajan suhteen

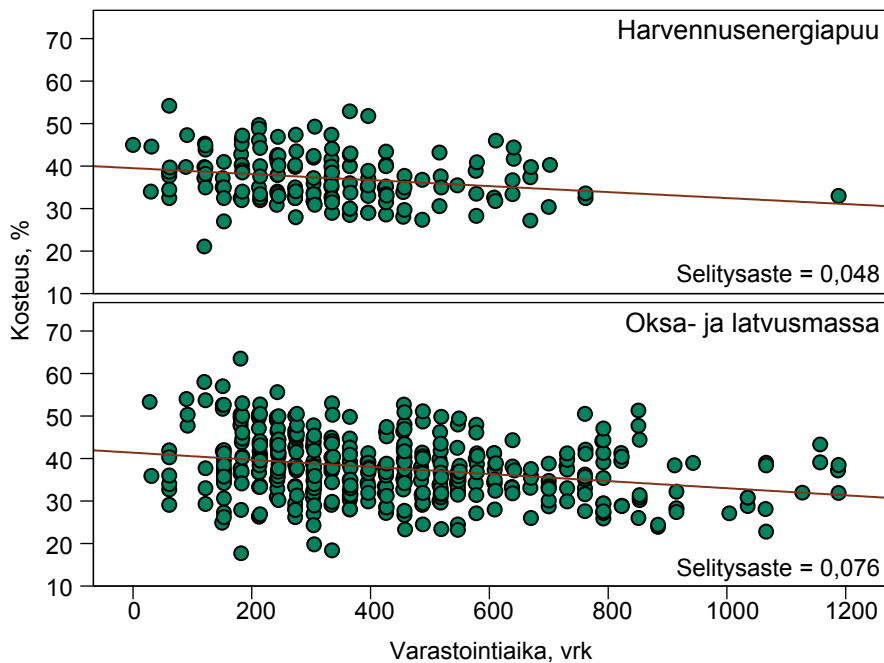
3.1.1 Hämeen kosteusmittausaineisto

Energiapuun kosteuden vaihteluväli käyttöpaikkaan toimitettaessa oli harvennusenergiapuulla 21–54 prosenttia ja latvusmassalla 18–64 prosenttia. Kosteuden keskiarvo oli alin loppukesällä ja korkein kevättalvella (kuva 3). Kuukausittaisen kosteuden keskiarvon keskivirhe oli sekä harvennusenergiapuulla että oksa- ja latvusmassalla korkein kesäkuussa ja kesäaikana keskiarvon keskivirhe ylipäättään oli suurempaa kuin talvella. Kosteuden vaihtelu oli suurta varsinkin oksa- ja latvusmassalla (kuvat 3 ja 4). Oksa- ja latvusmassan poikkeuksellisen suuri keskivirhe kesäkuussa johtui pienestä havaintomäärästä.

Varastointiajat olivat harvennusenergiapuulla enimmillään kaksi vuotta ja oksa- ja latvusmassalla jopa kolme vuotta (kuva 4). Yleisin varastointiaika (moodi) oli harvennusenergiapuulla noin kymmenen kuukautta ja oksa- ja latvusmassalla noin viisi kuukautta. Molempien energiapuutavaralajien kosteus laski hieman varastointiajan suhteen, mutta lineaarisen regressiomallin selitysasheet varastointiajan suhteen olivat matalia (kuva 4). Harvennusenergiapuulla selitysasote oli 0,048 (4,8 %) ja oksa- ja latvusmassalla 0,076 (7,6 %) (kuva 4).



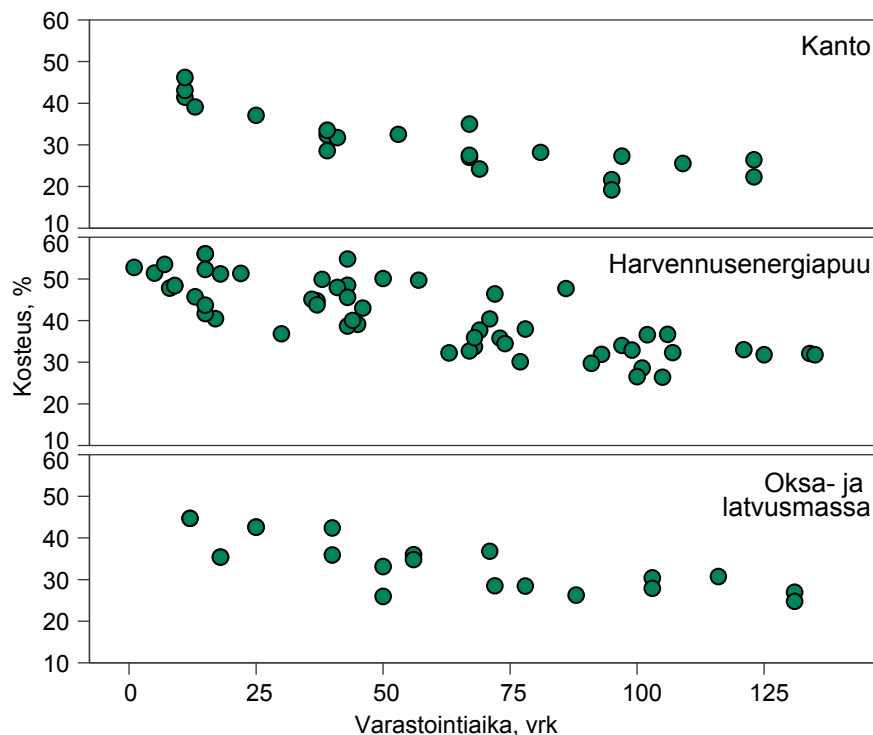
Kuva 3. Harvennusenergiapuun ja oksa- ja latvusmassan kosteuden keskiarvo ja keskiarvon keskivirhe haketuskuukausittain.



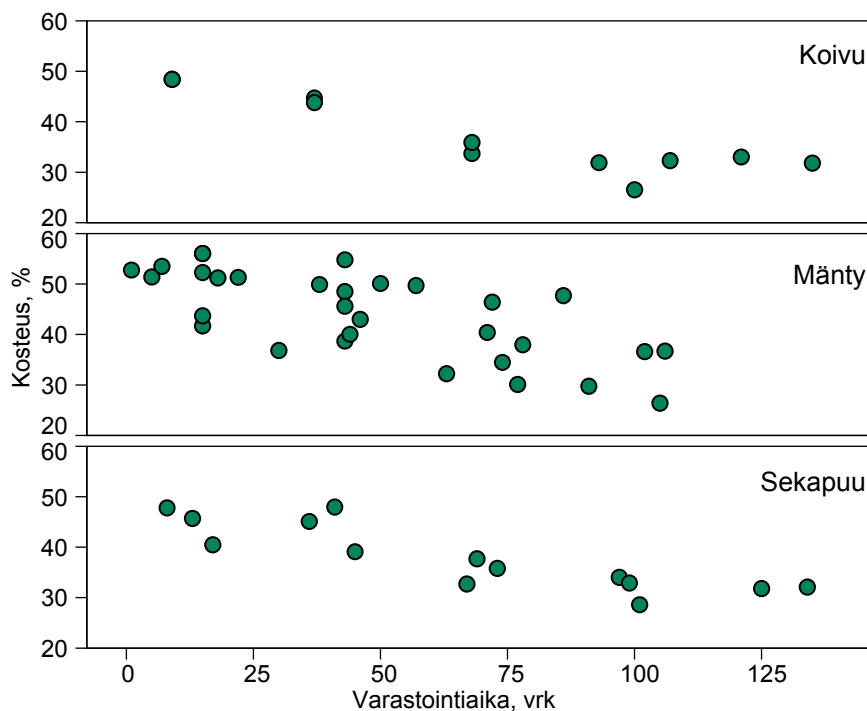
Kuva 4. Harvennusenergiapuun ja oksa- ja latvusmassan kosteus varastointiajan suhteen.

3.1.2 Keski-Suomen kosteusmittausaineisto

Kaikilla energiapuuvarannoilla kosteusprosentti oli hakkuuhetkellä suurin ja kosteus laski kesään ajoittuneen varastoinnin kuluessa (kuvat 5 ja 6). Kosteus alkoi uudelleen nousta muutamilla erillä varastointiajan jatkuessa pitkälle syksyyn. Loppukesällä ja alkusyksyllä korjatut erät eivät ehtineet kuivua juurikaan ennen kuin energiapuuvaraston kosteus syksyllä alkoi jälleen kohota kohonneen ilmankosteuden ja sateiden vuoksi.



Kuva 5. Eri energiapuutavaramateriaalien kosteus varastointiajan suhteen.

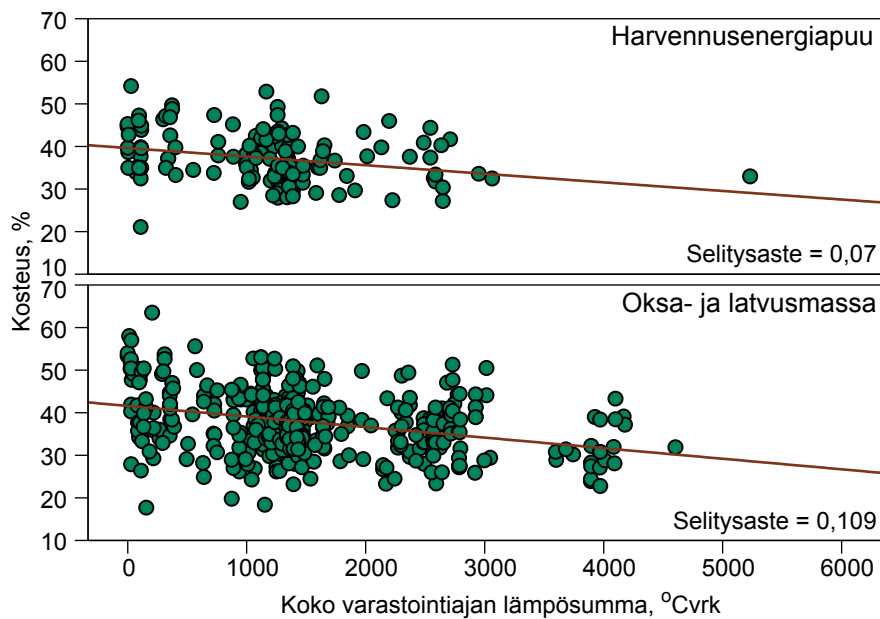


Kuva 6. Harvennusenergiapuun kosteus varastointiajan suhteen puulajeittain.

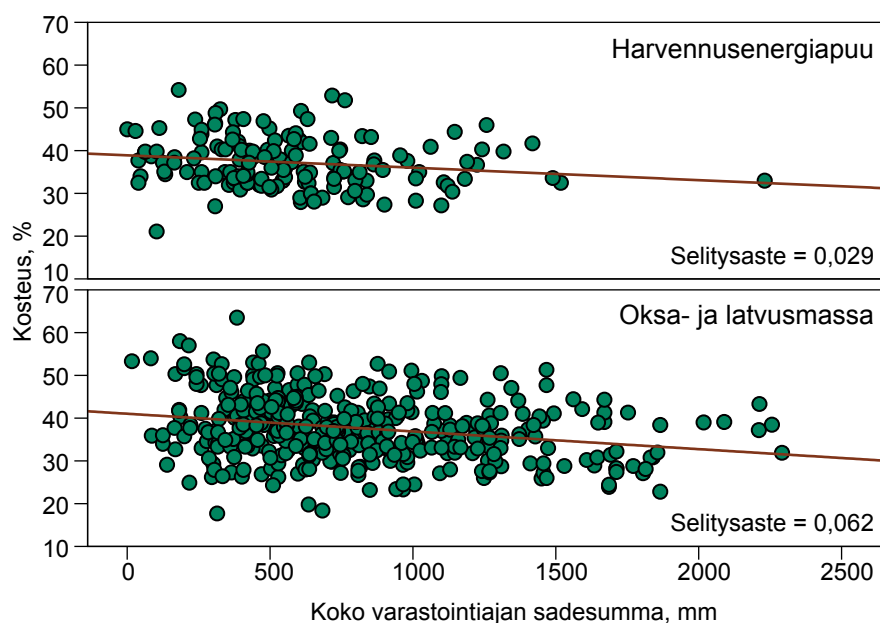
3.2 Kosteuden vaihtelu sääolosuhteiden mukaan

3.2.1 Hämeen kosteusmittausaineisto

Kosteuden vaihtelu oli kaikkien säämuuttujien suhteen varsin suurta (kuvat 7–10). Koko varastointiajalle lasketulla lämpösummalla pystyttiin selittämään noin kymmenesosa kosteuden vaihtelusta (kuva 7). Varastointiajalle lasketun sadesumman vaikutus energiapuun kosteuteen ei ollut muuttujan toiminnalliseen vaikutukseen nähden johdonmukainen, sillä energiapuun kosteus laski sadesumman lisääntyessä (kuva 8). Syynä tähän on sadesumman riippuvuus varastointiajasta ja tästä johtuvista muista tekijöistä (mm. lämpösumma), jotka korreloivat negatiivisesti energiapuun kosteuden suhteen.

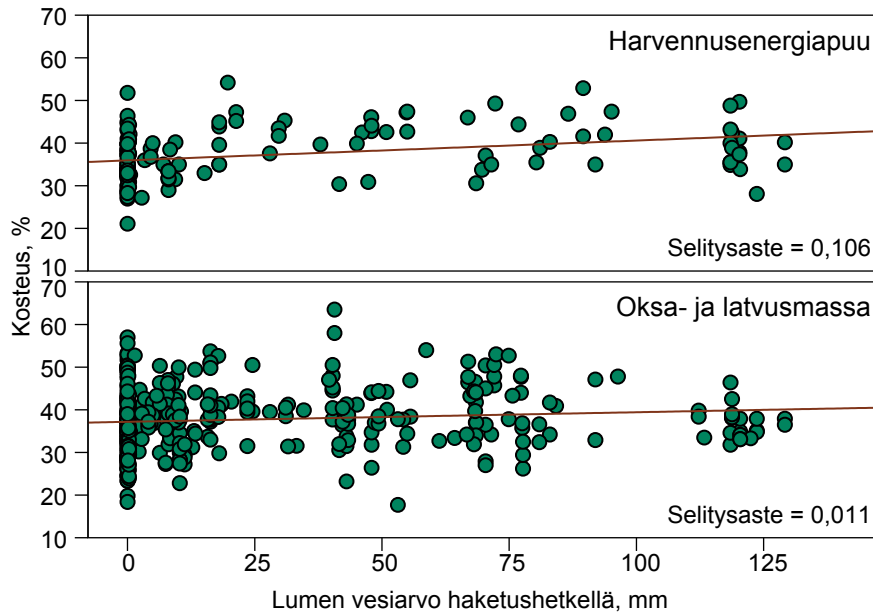


Kuva 7. Harvennusenergiapuun ja oksa- ja latvusmassan kosteus koko varastointiajan lämpösumman suhteen.

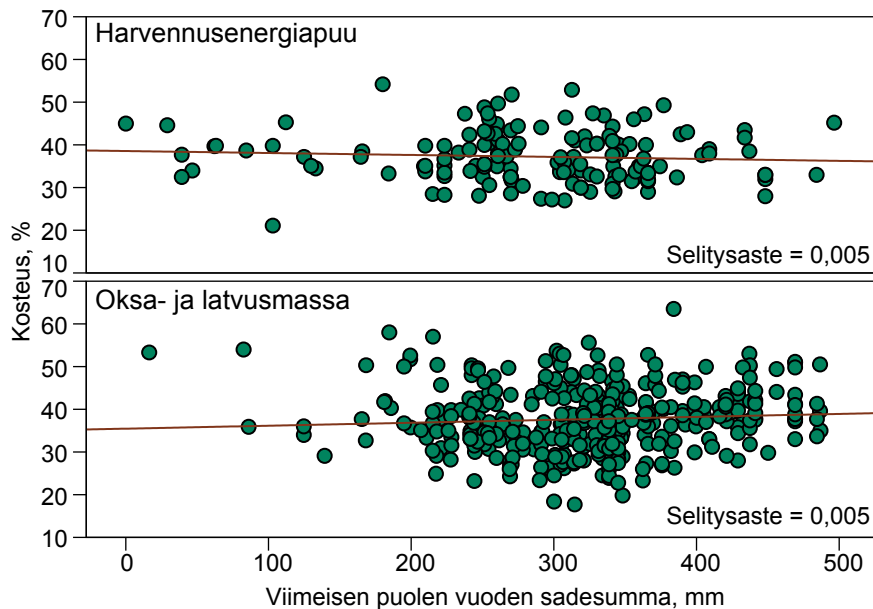


Kuva 8. Harvennusenergiapuun ja oksa- ja latvusmassan kosteus koko varastointiajan sadesumman suhteen.

Kosteus kasvoi hieman haketushetkellä varastokasan päällä olleen lumen vesiaron (mm) suhteen (kuva 9). Samoin viimeisen puolen vuoden sadesumman kasvaessa kosteus kasvoi hieman (kuva 10).



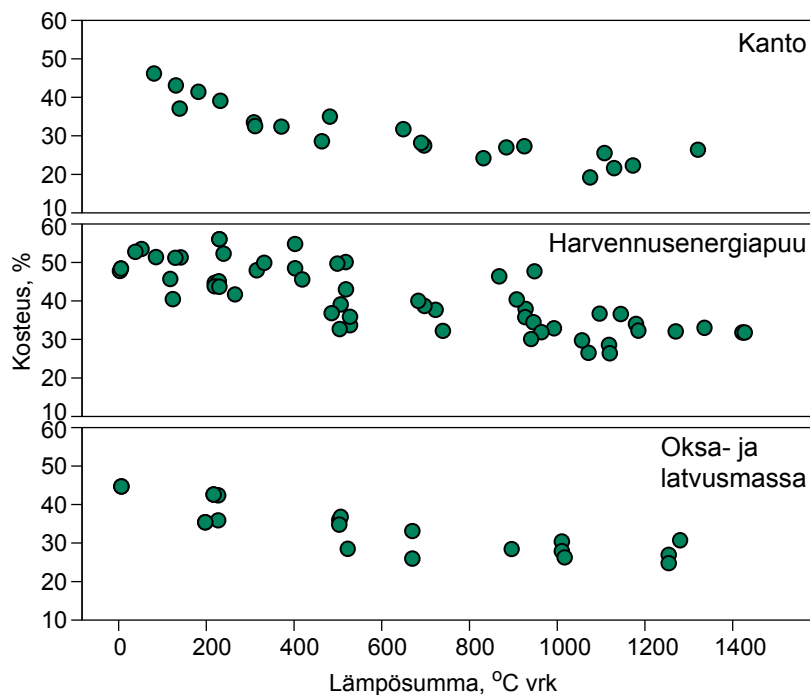
Kuva 9. Harvennusenergiapuun ja oksa- ja latvusmassan kosteus lumen vesiaron haketushetkellä suhteen.



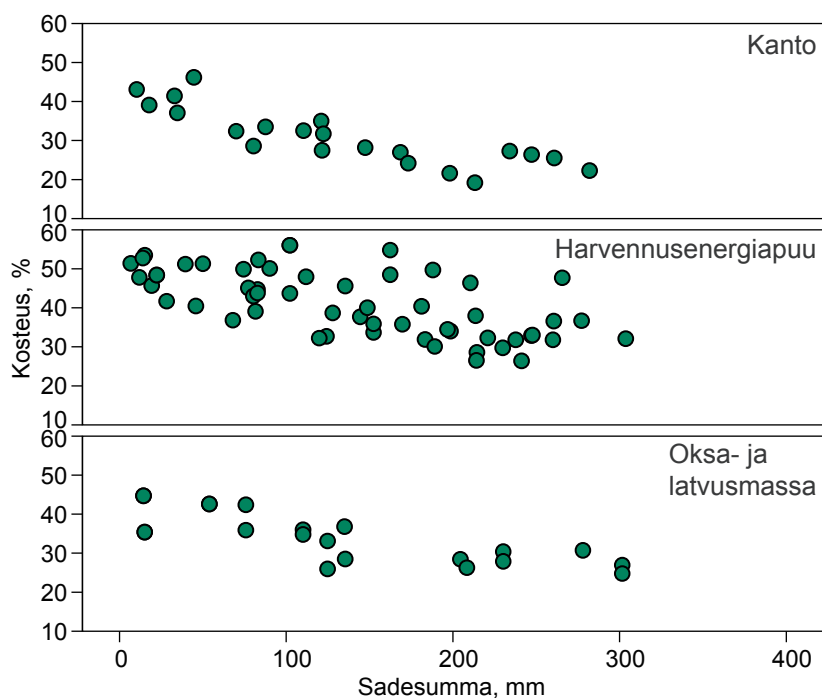
Kuva 10. Harvennusenergiapuun ja oksa- ja latvusmassan kosteus viimeisen puolen vuoden sadesumman suhteen.

3.2.2 Keski-Suomen kosteusmittausaineisto

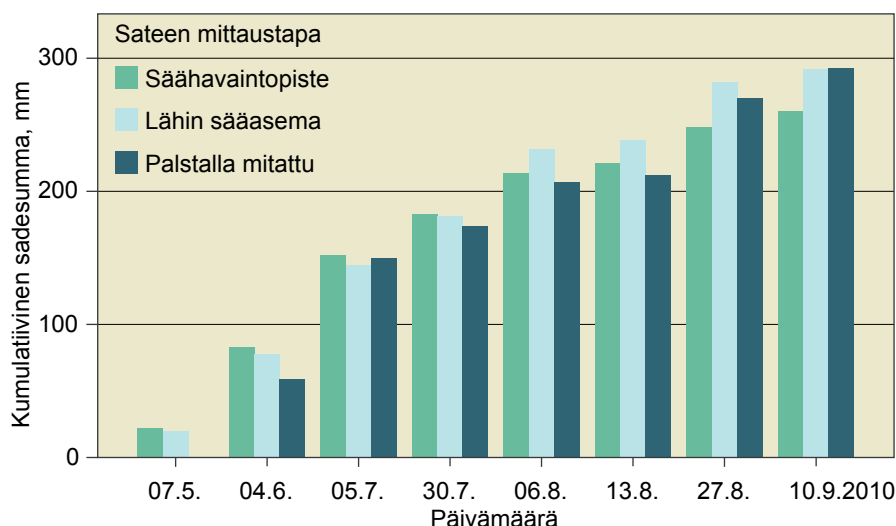
Energiapuuvarastojen kosteus laski kaikilla tavaralajeilla varastointiajan lämpösumman suhteen (kuva 11). Kosteus laski myös sadesumman suhteen (kuva 12). Syynä tähän oli sadesumman riippuvuus varastointiajasta ja tästä johtuvista muista tekijöistä (lämpösumma), jotka korreloivat negatiivisesti energiapuun kosteuden suhteen.



Kuva 11. Energiapuutavaralajien kosteus lämpösumman suhteen.



Kuva 12. Energiapuutavaralajien kosteus sadesumman suhteen.



Kuva 13. Eri menetelmillä mitatut sademäärät Keski-Suomessa (Härkölahden koealalla) kesällä 2010.

Keski-Suomessa sademäärät mitattiin kolmella eri menetelmällä. Ilmatieteen laitoksen lähimmältä sääasemalta mitatut sateet olivat keskimäärin hieman suurempia kuin muilla menetelmillä mitatut, mutta ero ilmastohavaintopisteille määritettyihin sademääriin oli melko pieni. Varastopai-
 kalla sademittarilla mitattu sademäärä oli kaikkina ajankohtina muita alempi (kuva 13). Tulosten laskennassa käytettiin ilmastohavaintopisteiden sademääriä.

3.3 Kosteuden mallintaminen sääolosuhteiden avulla

3.3.1 Regressiomallien yleinen muoto

Kosteuden mallinnuksessa käytettiin sekä lineaarisia että epälineaarisia malleja. Hämeen aineis-
 toon sovitettiin myös useamman selittäjän epälineaarisia malleja.

Lineaariset mallit ovat muotoa:

$$w = b_0 \times E_i + b_1 \quad (2)$$

Yhden selittäjän epälineaariset mallit ovat muotoa:

$$w = b_0 \times \exp(-b_1 \times (E_i + 1)) + b_2 \quad (3)$$

Useamman selittäjän epälineaariset mallit ovat muotoa:

$$w = b_0 \times \exp(-b_1 \times (E_j + 1)) + b_2 + \sum (b_i \times I_i) \quad (4)$$

w = energiapuuvaraston kosteus, %

b_0 , b_1 , b_2 ja b_i = mallien parametreja

E_j = varastointiajan potentiaalinen haihduntasumma, kun varastoon

pidättyy i mm päivittäisestä sademäärästä (interseptiokapasiteetti), mm

I_i = mallikohtaisia säämuuttujia

Yhden muuttujan epälineaarisen mallin parametrit b_0 , b_1 ja b_2 kuvaavat energiapuun kuivumista. Parametri b_0 kuvaa varastointiaikana tapahtuvaa kosteuden kokonaismuutosta prosenttiyksiköissä. Parametri b_1 kuvaa nopeutta, jolla kosteus muuttuu selittävän muuttujan kasvaessa. Parametri b_2 kuvaa kosteustasoa, jolle tavaralajin kosteus asettuu, kun selittävä muuttuja kasvaa (loppukosteus). Parametrien b_0 ja b_2 summasta saadaan laskennallinen tuoreen energiapuun kosteus.

3.3.2 Hämeen kosteusmittausaineisto

Hämeen kosteusmittausaineiston harvennusenergiapuun kosteudelle sovitettiin sekä lineaarinen (5) että epälineaarinen malli (6) käyttämällä selittävänä muuttujana potentiaalista haihduntasummaa kuuden millimetrin interseptiokapasiteetilla (kuva 14). Selityksasteen parantamiseksi lisäselittäjänä käytettiin viimeisen kuukauden aikana sataneen lumen vesi-arvoa haketushetkellä (7).

Lineaarinen malli harvennusenergiapuulle:

$$w = b_0 \times E_6 + b_1 \quad (5)$$

Epälineaarinen malli harvennusenergiapuulle:

$$w = b_0 \times \exp(-b_1 \times (E_6 + 1)) + b_2 \quad (6)$$

Epälineaarinen usean selittäjän malli harvennusenergiapuulle:

$$w = b_0 \times \exp(-b_1 \times (E_6 + 1)) + b_2 \times S_{1kk} \quad (7)$$

w = energiapuuvaraston kosteus, %

E_6 = varastointiajan potentiaalinen haihduntasumma, kun varastoon pidättyy

kuusi millimetriä päivittäisestä sademäärästä (interseptiokapasiteetti), mm

S_{1kk} = viimeisen kuukauden aikana sataneen lumen vesi-arvo, mm

Hämeen kosteusmittausaineiston oksa- ja latvusmassan kosteudelle sovitettiin myös sekä lineaarinen (8) että epälineaarinen malli (9) käyttämällä selittävänä muuttujana potentiaalista haihduntasummaa yhden millimetrin interseptiokapasiteetilla (kuva 15). Selityksasteen parantamiseksi epälineaarisen mallin selittäjiksi lisättiin viimeisen kuukauden lämpösumma, viimeisen kuukauden aikana satanut vesi ja viimeisen kuukauden aikana sataneen lumen vesi-arvo (malli 10). Mallien 5–10 parametrit ja selityksasteet on esitetty taulukossa 2.

Lineaarinen malli oksa- ja latvusmassalle:

$$w = b_0 \times E_1 + b_1 \quad (8)$$

Epälineaarinen malli oksa- ja latvusmassalle:

$$w = b_0 \times \exp(-b_1 \times (E_1 + 1)) + b_2 \quad (9)$$

Epälineaarinen usean selittäjän malli oksa- ja latvusmassalle:

$$w = b_0 \times \exp(-b_1 \times (E_1 + 1)) + b_2 + b_3 \times T_{1kk} + b_4 \times P_{1kk} + b_5 \times S_{1kk} \quad (10)$$

w = energiapuuvaraston kosteus, %

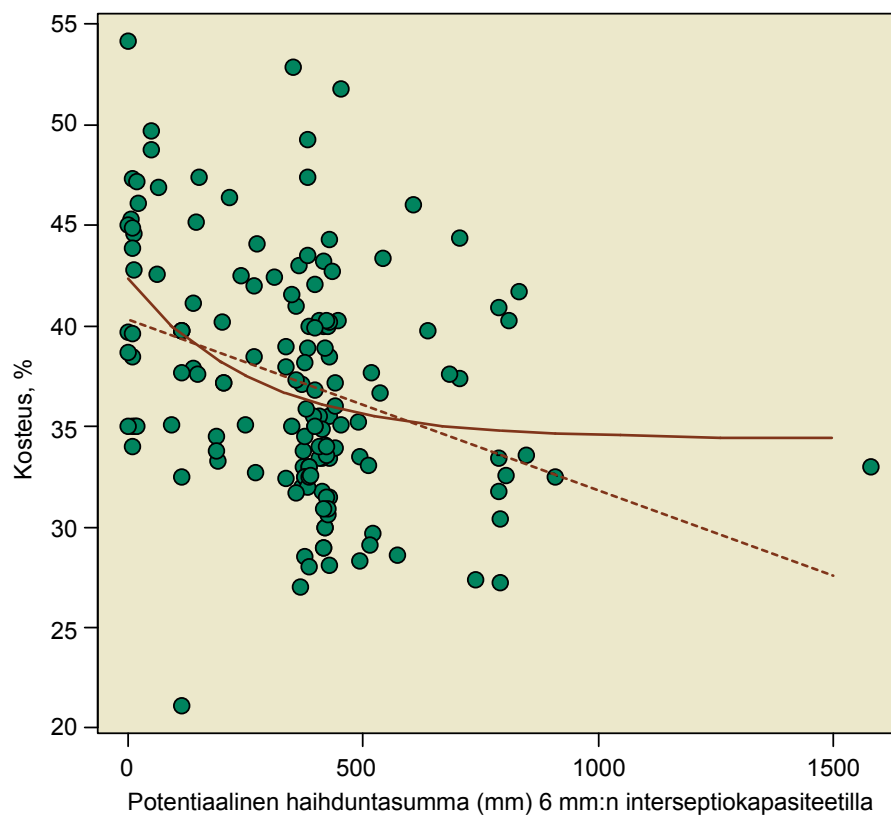
E_1 = varastointiajan potentiaalinen haihduntasumma, kun varastoon

pidättyy yksi millimetri päivittäisestä sademäärästä (interseptiokapasiteetti), mm

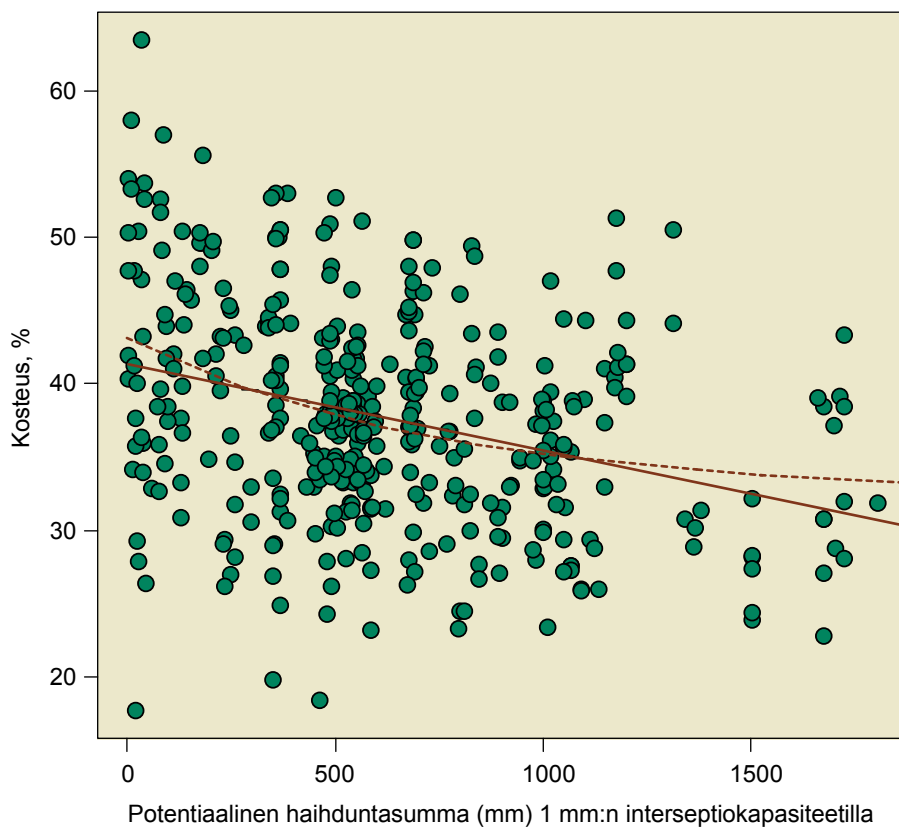
T_{1kk} = viimeisen kuukauden lämpösumma, °C

P_{1kk} = viimeisen kuukauden aikana sataneen veden sadesumma, mm

S_{1kk} = viimeisen kuukauden aikana sataneen lumen vesi-arvo, mm



Kuva 14. Harvennusenergiapuun kosteus potentiaalisen haihduntasumman (mm) suhteen kuuden millimetrin interseptiokapasiteetilla.



Kuva 15. Oksa- ja latvusmassan kosteus potentiaalisen haihduntasumman (mm) suhteen yhden millimetrin interseptiokapasiteetilla.

Taulukko 2. Hämeen aineistosta määritettyjen kosteusmallien parametrit ja selitysasteet (kaavat 5–10).

	kaava 5	kaava 6	kaava 7	kaava 8	kaava 9	kaava 10
parametri						
b_0	-0,0085	8,0037	7,7180	-0,0059	10,69	10,46
b_1	40,29	0,0038	0,0037	41,3	0,0014	0,0012
b_2		34,4	33,5		32,5	31,2
b_3			0,1008			-0,0209
b_4						0,0454
b_5						0,0574
selitysaste	0,11	0,15	0,21	0,10	0,11	0,19

3.3.3 Keski-Suomen kosteusmittausaineisto

Keski-Suomen aineistossa tehtiin kosteuden ennustemalli jokaiselle energiapuutavaralajille. Harvennusenergiapuulla tehtiin oma malli männylle, mutta pienen havaintomäärän vuoksi koivulle ja sekapuustolle tehtiin yhteinen malli. Kantopuulle ja oksa- ja latvusmassalle tehtiin erilliset mallit. Mäntyvaltaiselle harvennusenergiapuulle sovitettiin sekä lineaarinen (kaava 11) että epälineaarinen (kaava 12) malli, joissa selittäjänä käytettiin potentiaalista haihduntasummaa kuuden millimetrin interseptiokapasiteetilla (kuva 16). Vastaava epälineaarinen malli tehtiin koivuvaltaiselle harvennusenergiapuulle (kaava 13). Mäntyvaltaisella harvennusenergiapuulla epälineaarisen mallin (kaava 12) sovittaminen edellytti loppukosteuden (parametri b_2) asettamista, sillä energiapuun kosteustaso ei vakiintunut selittävän muuttujan vaihteluvälillä. Loppukosteus asetettiin tasolle, joka vastaa muiden energiapuutavaralajien malleilla määritettyä loppukosteutta.

Oksa- ja latvusmassan kosteudelle tehtiin epälineaarinen malli, jossa selittäjänä käytettiin potentiaalista haihduntasummaa kahden millimetrin interseptiokapasiteetilla (kuva 17, kaava 14). Kantopuulle tehtiin vastaava malli käyttäen selittäjänä potentiaalista haihduntasummaa interseptiokapasiteetin ollessa nolla (kaava 15, kuva 18). Mallien 11–15 parametrit ja selitysasteet on esitetty taulukossa 3.

Lineaarinen malli männylle ja mäntyvaltaiselle harvennusenergiapuulle:

$$w = b_0 \times E_6 + b_1 \quad (11)$$

Epälineaarinen malli männylle ja mäntyvaltaiselle harvennusenergiapuulle:

$$w = b_0 \times \exp(-b_1 \times (E_6 + 1)) + b_2 \quad (12)$$

Epälineaarinen malli koivulle ja koivuvaltaiselle harvennusenergiapuulle:

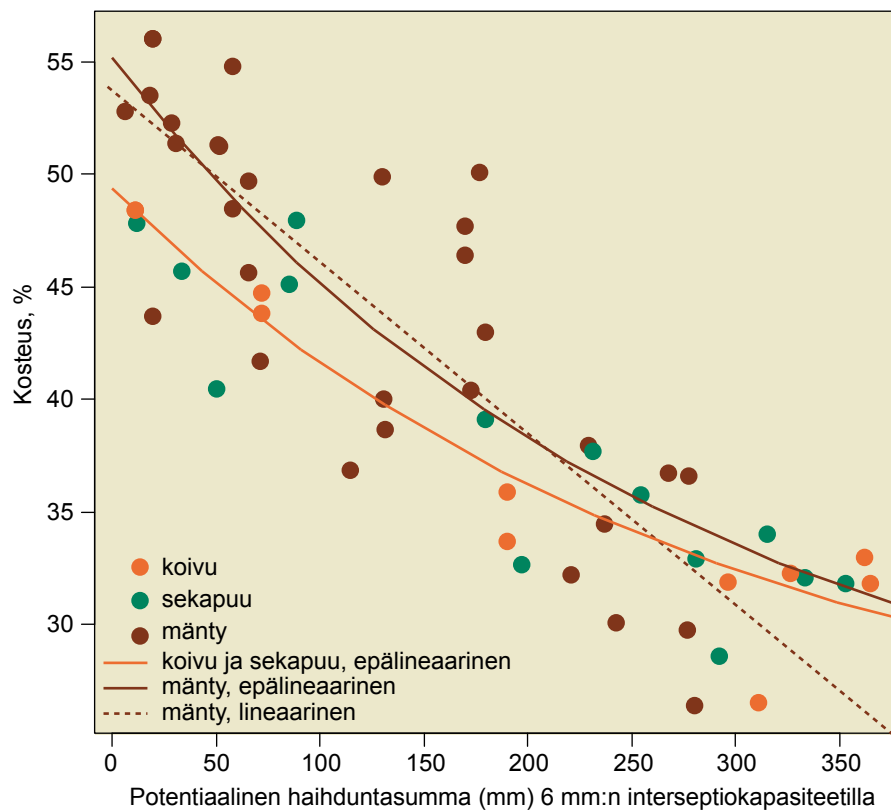
$$w = b_0 \times \exp(-b_1 \times (E_6 + 1)) + b_2 \quad (13)$$

Epälineaarinen malli oksa- ja latvusmassalle:

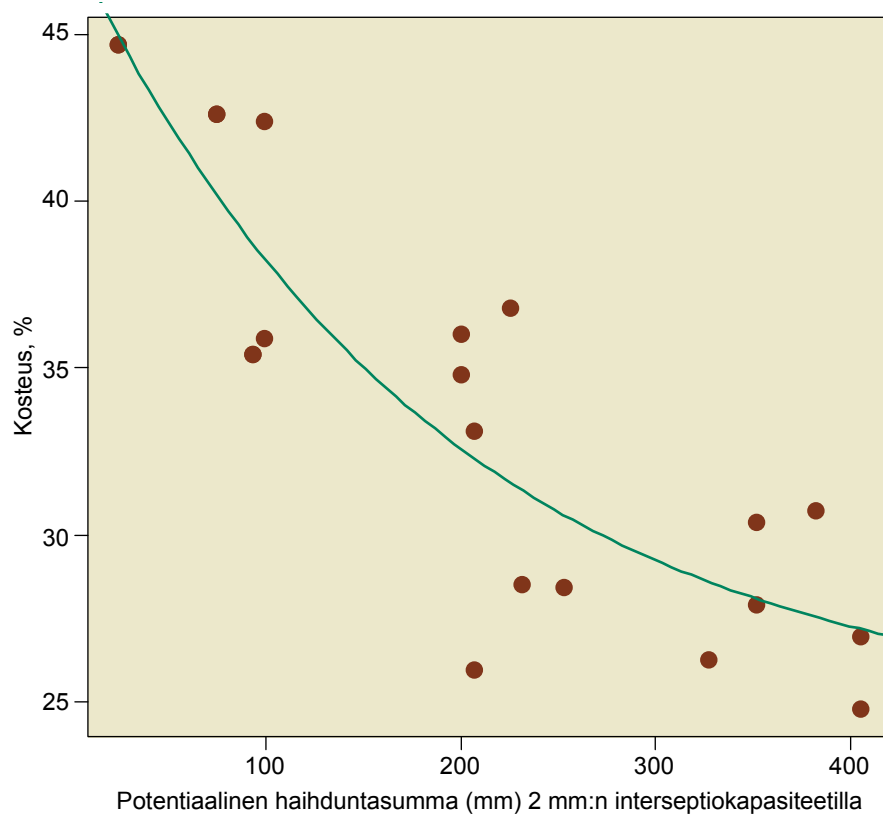
$$w = b_0 \times \exp(-b_1 \times (E_2 + 1)) + b_2 \quad (14)$$

Epälineaarinen malli kantopuulle:

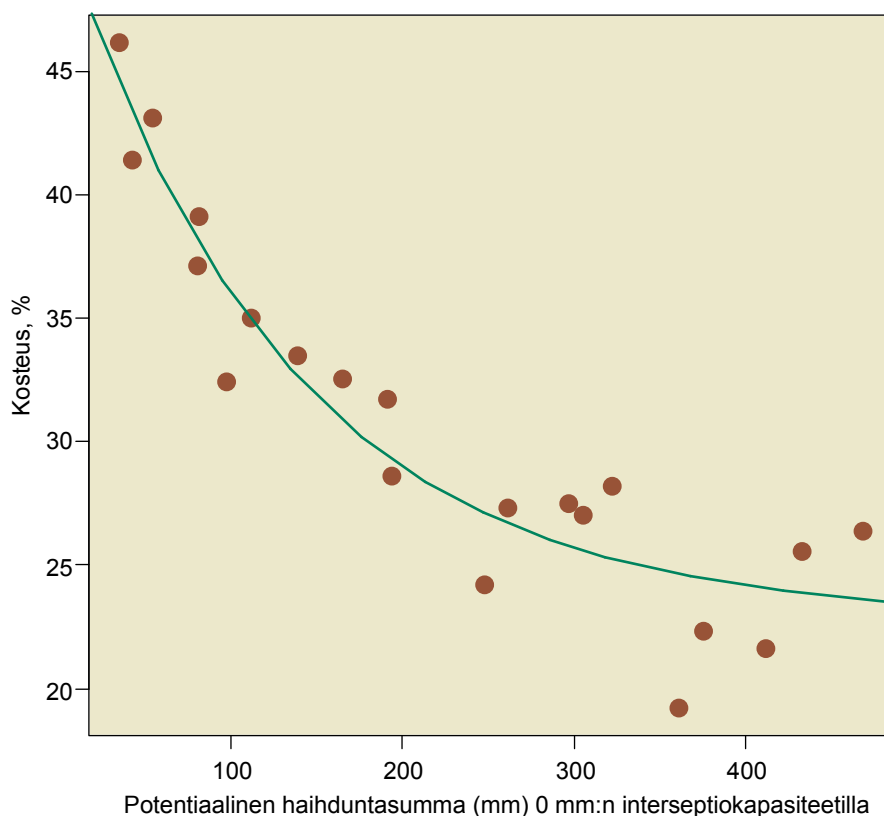
$$w = b_0 \times \exp(-b_1 \times (E_0 + 1)) + b_2 \quad (15)$$



Kuva 16. Harvennusenergiapuun kosteus potentiaalisen haihduntasumman (mm) suhteen kuuden millimetrin interseptiokapasiteetilla.



Kuva 17. Oksa- ja latvusmassan kosteus potentiaalisen haihduntasumman (mm) suhteen kahden millimetrin interseptiokapasiteetilla.



Kuva 18. Kantopuun kosteus potentiaalisen haihduntasumman suhteen (mm), kun varasto ei pidätä vettä (interseptiokapasiteetti on 0 mm).

Keski-Suomen kosteusmittausaineistossa eri energiapuutavaralajien malleilla laskettu kosteus tuoreena (parametrien b_0 ja b_2 summa) oli kantopuulla noin 51 prosenttia, latvusmassalla noin 48 prosenttia, mäntyvaltaisella harvennusenergiapuulla noin 55 prosenttia ja koivuvaltaisella harvennusenergiapuulla noin 50 prosenttia. Eri energiapuutavaralajien kosteuden muutos varastointiaikana (parametri b_0) oli 24–32 prosenttiyksikköä. Männyn harvennusenergiapuurangat kuivui- vat eniten ja kosteuden muutos (b_0) oli yli 30 prosenttiyksikköä. Kantojen kosteuden muutos oli noin 29 prosenttiyksikköä ja koivuvaltaisten sekapuurankojen noin 26 prosenttiyksikköä. Oksa- ja latvusmassa kuivui muita tavaralajeja vähemmän; kosteuden muutos oli noin 24 prosenttiyksikköä. Energiapuutavaralajien loppukosteus (parametri b_2) oli kantopuulla noin 23 prosenttia, latvusmassalla noin 24 prosenttia ja koivun harvennusenergiapuulla noin 24 prosenttia. Mänty- harvennusenergiapuurankojen loppukosteus asetettiin muiden tavaralajien perusteella 23 prosent- tiin, koska malli ei estimoitunut vapaalla loppukosteudella.

Taulukko 3. Keski-Suomen aineistosta määritettyjen kosteusmallien parametrit ja selitysasteet (mallit 11–15).

	kaava 11	kaava 12	kaava 13	kaava 14	kaava 15
parametri					
b_0	-0,0765	32,28	25,84	23,55	28,56
b_1	53,85	0,0037	0,0036	0,0048	0,0076
b_2		23	23,62	24,30	22,81
selitysaste	0,70	0,68	0,86	0,79	0,90

4 Tulosten tarkastelu

4.1 Kosteuden vaihtelu varastointiajan ja sääolosuhteiden mukaan

4.1.1 Harvennusenergiapuun kosteus ja kuivuminen

Lindbladin (2008) mukaan männyllä tuoreen puun kosteus aleni selvästi läpimitan kasvaessa, mikä johtui kuivan sydänpuuosuuden lisääntymisestä. Alle kahdeksan senttimetrin läpimittaluokassa kosteus oli noin 60 prosenttia. Kosteus ei eronnut metsikön kehitysluokkien tai vuoden-aikojen välillä. Kuusella kosteuden tasoerot läpimitta- ja kehitysluokkien välillä olivat samankaltaisia männyin kanssa. Alle kahdeksan senttimetrin läpimittaluokassa kosteuden keskiarvo oli 58–60 prosenttia. Sekä männyllä että kuusella kosteus oli alle kahdeksan senttimetrin läpimittaluokassa aina korkeampi kuin suuremmissa läpimittaluokissa.

Hakkilan ym. (1995) tutkimuksessa ensiharvennusmännyin kuorellisen runkopuun kosteus oli lumettomana aikana 57–60 prosenttia. Rungon pituussuunnassa kosteus kasvoi latvaa kohti ollen rungon tyvellä keskimäärin 59 prosenttia ja latvassa 63 prosenttia. Hakkilan (1962) tutkimuksessa määritettiin pienikokoisen kaatotuoreen harvennusenergiapuun kosteuden vaihtelua vuodenajoittain. Kuukausittainen kosteus oli männyllä 50–55, kuusella 47–53, koivulla 38–50 ja lepällä 45–53 prosenttia.

Tässä tutkimuksessa Keski-Suomen aineistolla sovitetuilla kosteuden ennustemalleilla saadut laskennalliset kosteudet tuoreena olivat mäntyvaltaisella harvennusenergiapuulla 55 prosenttia ja koivuvaltaisella harvennusenergiapuulla 50 prosenttia. Kosteudet vastasivat tasoltaan verraten hyvin aiemmissa tutkimuksissa kokeellisista aineistoista määritettyjä kosteuksia (esim. Hakkila 1962, 1964 ja 1995). Hämeen aineistoon sovitettujen mallien käyttöalueen ulkopuolella. Toisaalta myöskään harvennusenergiapuutarastojen puulajia tai puulajisuhdetta ei tunnettu, jolloin vertailut aiempiin tutkimustuloksiin eivät olisi olleet mahdollisia.

Harvennusenergiapuun kuivumiskausi alkaa tyypillisesti toukokuun alussa ja päättyy elokuun loppuun (Hakkila 1962, Nurmi ja Hillebrand 2007). Kuivuminen on nopeinta keväällä alhaisen ilman suhteellisen kosteuden aikana, jolloin puu kuivuu nopeasti sekä lehdistä että kuoren vauriokohdista. Kuivuminen hidastuu keskikesästä kohti syksyä suhteellisen ilmankosteuden noustessa ja lämpötilan laskiessa. Hämeen aineiston harvennusenergiapuun kosteusprosentissa oli varastointiajasta riippumatta suurta vaihtelua, eikä eroja voitu selittää puulajilla tai varastointiolosuhteilla. Myöskään selvää vuodenaikaisvaihtelua kuivumisessa ei suuren hajonnan vuoksi voitu havaita. Sen sijaan kuvan 3 harvennusenergiapuun keskimääräinen kosteusprosentti haketuskuukausittain näyttää jokseenkin odotetulta vaihtelusta huolimatta, sillä kosteus on loppukesällä alimmillaan, kohoaa syksyllä sateiden ja kohonneen ilmankosteuden vuoksi ja on korkeimmillaan kevättälvelä ennen kuivumisen alkamista.

Pieniläpimittaisen harvennusenergiapuun on havaittu kuivuvan hyvissä oloissa 40 prosentin kosteuteen jopa 2–4 viikossa (Hakkila 1962). Keski-Suomen aineiston varastointiajat olivat lyhyemmät kuin Hämeen aineiston ja varastointi tapahtui kesäaikana, jolloin kuivumisolosuhteet olivat hyvät. Keski-Suomen kenttäkokeet tehtiin kesällä 2010, jolloin kuivumisolosuhteet olivat tavanomaista paremmat, mutta Hakkilan (1962) tutkimusta vastaaviin kuivumisnopeuksiin ei kuitenkaan päästy. Nurmen ja Lehtimäen (2011) tutkimuksessa karsittu mäntyranka saavutti ensimmä-

mäisen kuivumiskauden aikana 30 prosentin kosteuden kuorimistavasta ja korjuuajankohdasta riippumatta. Vastaavanlaista kuivumista kaatoa seuranneena kesänä ovat raportoineet myös muun muassa Nurmi ja Hillebrand (2007), joiden tutkimuksessa harvennusenergiapuun kosteus saavutti alimman arvonsa ($< 30\%$) ensimmäisenä kesänä elokuussa, kohosi syyskuun aikana 35 prosenttiin ja pysyi tässä kosteudessa talven yli varastoitaessa. Samassa tutkimuksessa keväällä kaadetulla harvennusenergiapuulla saavutettiin noin kahdessa kuukaudessa hakkuusta 40 prosentin kosteus ja noin neljässä kuukaudessa hakkuusta 30 prosentin kosteus. Tässä tutkimuksessa Keski-Suomen aineiston koivut ja koivuvaltaiset sekapuut saavuttivat noin 40 prosentin kosteuden kahdessa kuukaudessa, mutta männyt kuivuivat hieman hitaammin. Koko kuivumisjakson aikana harvennusenergiapuu saavutti noin 30 prosentin kosteuden. Karsitun ja karsimattoman harvennusenergiapuun eroa kuivumisessa ei tässä tutkimuksessa tarkasteltu Keski-Suomen aineiston pienen havaintomäärän vuoksi.

Hillebrandin ja Nurmen (2004), Nikulan (2006) ja Lindbladin (2010) tutkimusten tuloksista koko- ja rankapuun kuivumiselle ja Lindbladin (2010) tuloksista kuitupuun kuivumiselle arvioitiin näillä tavaralajeilla saavutettavaa keskimääräistä kuivumisnopeutta (prosenttiyksikköä/vrk). Tutkimuksissa kuivumisnopeus kevästä keskikesään oli kuitupuulla 0,1–0,2 prosenttiyksikköä vuorokaudessa ja koko- ja rankapuulla 0,2–0,35 prosenttiyksikköä vuorokaudessa. Kuivumisen alkuvaiheessa saavutettiin suurempia kuivumisnopeuksia. Lindbladin (2010) tutkimuksessa tuoretiheyden muutos oli nopeinta ensimmäisten kolmen viikon aikana, minkä jälkeen kuivuminen hidastui. Tuoretiheyden muutos oli alku- ja keskikesällä korjatuilla palstakasoilla nopeampaa kuin loppukesällä korjatuilla. Tuoretiheyden muutos oli selvästi nopeampaa runkojen karsimattomissa latvaosissa kuin tyviosissa. Tässä tutkimuksessa Keski-Suomen aineiston kuivumisnopeudessa oli selvä piikki heinäkuun lopulla, jolloin oli sekä hyvin lämmintä että kuivaa. Muutoin kuivuminen oli hakkuuta seuraavina viikkoina nopeampaa alku- ja keskikesällä kuin myöhään syksyllä.

Kasojen peittämisen vaikutuksesta kuivumiseen on osin ristiriitaisia tutkimustuloksia ja peittämisen merkitys näyttää aikaisempien tutkimusten mukaan riippuvan tavaralajista. Harvennusenergiapuukasojen peittämisen on todettu alentavan hakkeen kosteutta, tasoittavan erän kosteusvaihteluita, parantavan hakkeen laatu- ja poltto-ominaisuuksia ja helpottavan haketusta (Uusivaara 1984). Kasojen peittämisellä oli suotuisa vaikutus kuivumiseen (kosteus aleni keskimäärin 3–6 prosenttiyksikköä) myös Nurmen ja Hillebrandin (2007) tutkimuksessa, jossa peittämisen nähtiin suojaavan energiapuuvarastoa erityisesti sulavalta lumelta. Myös Röserin ym. (2011) mukaan harvennusenergiapuukasan peittäminen syksyllä pienentää Suomen ja Skotlannin ilmastossa talven aikaista kasan uudelleen kostumista ja kosteusvaihteluita kasan sisällä. Tämän tutkimuksen kummastakaan harvennusenergiapuuaineistosta ei voitu tutkia kasojen peittämisen vaikutuksia, koska Hämeen aineistosta tieto peittämisestä puuttui suurimmalta osalta havaintoja ja Keski-Suomen aineistossa kaikki harvennusenergiapuut oli peitetty.

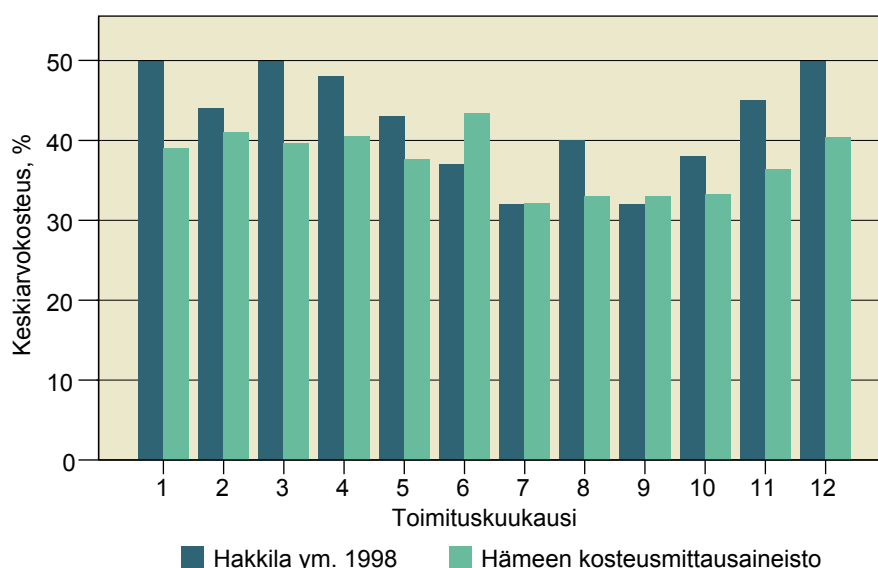
4.1.2 Oksa- ja latvusmassan kuivuminen

Oksa- ja latvusmassan kosteus on yleensä suurin kaatotuoreena, mutta joskus talviajan kosteus saattaa ylittää kaatotuoreen oksa- ja latvusmassan kosteuden lähinnä syksyllä siihen imeytyneen kosteuden, ei niinkään lumen ja jään vuoksi. Latvusmassan kosteus on suurin lehdissä ja ohuiden oksien kuoreissa. Havupuilla latvusmassan kosteus on 50–60 prosenttia ja lehtipuiden lehtien kosteus 60–65 prosenttia (Hakkila 1989). Simolan (1977) mukaan nuorten koivujen, haavan ja harmaalepän lehtien kosteus voi olla jopa 65–70 prosenttia. Lehtien suuri osuus biomassasta nostaa oksa- ja latvusmassan keskimääräistä kosteutta. Havupuilla kuolleiden oksien keskikosteus oli Hakkilan (1991) tutkimuksessa havupuilla keskimäärin 20 prosenttia ja koivulla 48 prosenttia,

joten myös kuolleiden oksien osuudella on merkitystä oksa- ja latvusmassahakkeen loppukosteuden kannalta.

Hakkilan ym. (1995) tutkimuksessa ensiharvennusmännyn elävän latvusmassan kosteus oli 55 prosenttia ja koko rungon ja latvusmassan kosteus 57 prosenttia. Kärkkäisen (1976) tutkimuksessa kuusen oksien kosteus oli 46 prosenttia ja männyn 53 prosenttia. Hakkilan (1991) tutkimuksessa kaatotuoreen latvusmassan kosteus Etelä-Suomessa oli kuusella 51 prosenttia ja männyllä 52 prosenttia. Ronkaisen (2010) tutkimuksessa kaatotuoreen latvusmassan kosteus oli kahdella hakkuutyömaalla 44–46 prosenttia. Verkasalon (1987) tutkimuksen mukaan latvusmassahakkeen kosteus oli talvella 60 prosenttia ja kesällä 49 prosenttia. Keski-Suomen aineistoon sovitetuilla malleilla määritetty tuoreen latvusmassan kosteus (48 %) vastasi hyvin aiempien tutkimusten tuloksia. Latvusmassan kosteus toimitusajankohtana oli Hämeen aineistossa hieman alempi kuin Hakkilan ym. (1998) tutkimuksessa, jossa tarkasteltiin neljän suuren toimittajan keskiarvokosteus toimituskuukausittain (kuva 19), mikä saattoi johtua Hämeen aineiston pitkistä varastointiajoista.

Latvusmassan kosteus muuttuu nopeasti vallitsevien olosuhteiden mukaan oksien pienten läpimittojen ja suuren neulas- ja lehtipinta-alan vuoksi. Nurmen (1994) tutkimuksessa palstakasoille hakatun latvusmassan kosteus oli syyskuussa 1994 56 prosenttia, maaliskuussa 1995 61 prosenttia, kesäkuussa 1995 47 prosenttia ja syyskuussa 1995 28 prosenttia. Thörnqvistin (1985) mukaan latvusmassan kosteus laski huhtikuusta elokuuhun noin 50 prosentista 25 prosenttiin ja syksyllä kosteus kohosi jälleen noin 45 prosenttiin. Seuraavana keväänä toukokuussa kosteus oli yhä noin 45 prosenttia, mutta laski elokuuhun mennessä 30 prosenttiin. Saman tutkimuksen mukaan yhden talven ja kesän yli varastoiminen kuivattaa latvusmassaa 50 prosentista 40 prosenttiin, jos latvusmassa varastoidaan pienissä kasoissa. Suuressa kasassa kosteus sen sijaan vaihtelee kasan eri osissa, mutta keskimäärin kuivuminen on samaa luokkaa kuin pienemmissä kasoissa. Hakkilan ym. (1998) mukaan latvusmassa saavuttaa alle 30 prosentin kosteuden vain edullisissa olosuhteissa. Myös Kärkkäinen (2007) korostaa kesän pitkien poutajaksojen merkitystä pieniläpimittaisten havupuiden kuivumiselle niiden suuresta kuoripitoisuudesta johtuen. Keski-Suomen aineistossa suurin osa oksa- ja latvusmassaeristä saavutti alle 30 prosentin kosteuden kesän 2010 aikana.



Kuva 19. Hämeen kosteusmittausaineiston oksa- ja latvusmassan keskimääräinen kosteus haketuskuukausittain ja hakkuutähdehakkeen kosteus neljän toimittajan keskiarvona Hakkilan ym. (1998) mukaan.

Hillebrand ja Nurmi (2001) tutkivat latvusmassan kosteuden muutosta palstalla sekä peitetyissä ja peittämättömissä tienvarsivarastoissa. Palstalla tapahtuneen parin viikon pituisen varastoinnin jälkeen kuivuminen oli nopeampaa tienvarsivarastossa kuin palstalla ja saavutettu kosteustaso pystyttiin säilyttämään parhaiten peitetyssä tienvarsivarastossa. Myös Jirjis havaitsi (1995) peittämisen alentavan latvusmassan kosteutta kymmenellä prosenttiyksiköllä peittämättömiin kasoihin verrattuna. Sen sijaan Nurmen (1999) tutkimuksessa latvusmassakasan peittämällä ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta kasojen kuivumiseen. Peittämisen vaikutusta oksa- ja latvusmassan kuivumiseen ei tässä tutkimuksessa voitu tarkastella, mutta aiempien tutkimusten tulokset ovat osin ristiriitaisia ja lisätieto aiheesta olisi tarpeen.

4.1.3 Kantojen kuivuminen

Kannot eroavat muista energiapuutavaralajeista suuren läpimitan, pienen kuoriprosentin ja massaan nähden pienen pinta-alan suhteen, jolloin kosteuden vaihtelu poikkeaa muista energiapuutavaralajeista. Vettä haihduttavaa pintaa on vähän, mutta myös absorboivaa pintaa on vähän. Kantojen noston yhteydessä tapahtuva kantojen pilkkominen lisää haihduttavan pinnan määrää ja nopeuttaa kantojen kuivumista. Havupuissa veden siirtyminen trakeidista toiseen tapahtuu pääosin rengashuokosten kautta. Puun kuivuessa rengashuokoksen vedenläpäisykyky heikkenee huomattavasti (Kärkkäinen 2007), mikä estää kosteuden palautumista. Havupuiden kuori muuttuu kuivuessaan huonosti vettä läpäiseväksi (Hakkila 1964), mikä edesauttaa sitä, että kerran kuivunut kanto ei helposti kastu uudelleen. Myös Laurila ja Lauhanen (2010) raportoivat, että kuivutuaan kerran kunnolla kuusen kantopuun absorptio heikkenee ja kosteus kohoa syksyllä vain vähän. Jos kannot korjataan keväällä tai aikaisin kesällä, ehtivät ne kuivua syksyyn mennessä polttokelpoisiksi. Tämä helpottaa huomattavasti kuivan polttoaineen saamista myös talvikuukausina.

Laurilan ja Lauhasen tutkimuksessa (2010) kuusen kantojen kosteuden keskiarvo oli heti noston jälkeen 53 prosenttia. Kuivuminen oli aluksi nopeaa ja kuukauden kuluttua korjuusta kosteuden keskiarvo oli 31 prosenttia. VTT:n vuosina 2009 ja 2010 toteuttamassa mäntykantojen korjuu- ja kuljetustutkimuksessa kuusen ja männyn kantojen kosteus mitattiin heti noston jälkeen, yhden ja kolmen viikon kuluttua ja yli vuoden varastoinnin jälkeen (Erkkilä ym. 2011). Vastanostettujen kantojen kosteuden keskiarvo oli männyllä 43 prosenttia ja kuusella 51,5 prosenttia. Viikon kuivumisen jälkeen kantojen kosteus oli laskenut männyllä 32,3 prosenttiin ja kuusella 46,6 prosenttiin. Kolmen viikon kuivumisen jälkeen kantopuun kosteus oli molemmilla puolajaeilla 24,2 prosenttia. Viikon kuivumisajan todettiin olevan liian lyhyt sekä kuivumisen että epäpuhtauksien irtoamiseen kannalta. Yli vuoden varastoinnin jälkeen kantojen kosteudet olivat 20–26 prosenttia. Samassa Erkkilän ym. raportissa on myös toinen kantojen kuivumistutkimus, jonka mukaan lokakuussa nostettujen kantojen kosteus seuraavan kesäkuun alussa oli laskenut 35 prosenttiin, mutta vaihtelu kasan eri osissa oli suurta: kasan eteläosan kosteus oli noin 31 prosenttia ja pohjoisosan noin 38 prosenttia. Syksyyn mennessä kasan kosteus laski noin 26 prosenttiin ja syksyllä kosteus kohosi taas hieman. Kokeessa mitattiin myös kosteus heti noston jälkeen ja se oli noin 46 prosenttia. Kesän palstakasoissa kuivumisen jälkeen kantojen kosteus oli syyskuussa noin 26 prosenttia.

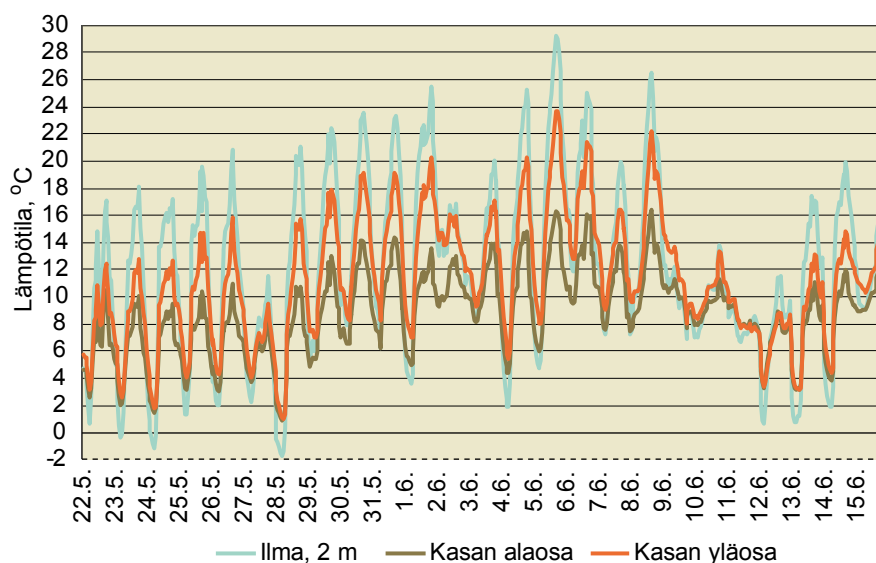
Ruotsissa tehdyssä kokeessa kolmella eri menetelmällä korjattujen kantojen kosteus (Anerud ja Jirjis 2011) erosi heti noston jälkeen merkittävästi toisistaan (41–47 %). Menetelmien väliset erot säilyivät samansuuntaisina ja kolmen kuukauden varastoinnin jälkeen kosteus oli 21–31 prosenttia. Hakkuu oli tehty kolme kuukautta kantojen nostoa aikaisemmin. Erilaiset kannonnostolaitteet rikkovat kantojen rakennetta eri tavalla ja esimerkiksi kantoharvesterin nostolaite monesti myös murskaa kantoa, jolloin puuaineen rakenne rikkoontuu ja kuivuminen nopeutuu.

Tässä tutkimuksessa kantojen kosteutta tarkasteltiin ainoastaan Keski-Suomen aineistosta eikä kantojen nostotapaa huomioitu. Kosteutta ei määritetty heti noston jälkeen, mutta kuivumismalleilla määritetyt alkukosteudet vastasivat hyvin aiempien tutkimusten tuloksia. Kosteus mitattiin ensimmäisen kerran 11 päivän kuluttua nostosta ja keskimääräinen kosteus oli tuolloin noin 44 prosenttia. Kannot kuivuivat nopeasti ja kaikki erät elokuun alussa korjattuja kantoja lukuun ottamatta saavuttivat kesän loppuun mennessä alle 30 prosentin kosteuden.

4.1.4 Sääolosuhteiden vaikutus kuivumiseen

Sääolosuhteet vaikuttavat merkittävästi energiapuun kuivumiseen. Kuivumiseen vaikuttavat myös varastopaikka ja energiapuupinon koko sekä tavaralaji muodostelman tiiviynen kannalta. Kooltaan pieneen varastonpinoon kohdistuu tilavuuteen nähden suuri määrä auringonsäteilyä. Toisaalta suureen ja korkeaan pinoon kohdistuva sadanta on tilavuuteen nähden pienempi.

Olosuhteet vaihtelevat myös samassa varastopinossa. Energiapuutaraston pintakerros saa suuremman määrän auringonsäteilyä ja auringon paistaessa pintalämpötila nousee korkeammaksi kuin lämpötila pinon pohjalla. Metsäntutkimuslaitoksessa tehdyssä kokeessa (Lindblad 2008, julkaisematon) kantopuun tienvarsivaraston sisään asetettiin neljä lämpötila-anturia, joista kaksi oli noin yhden metrin korkeudella ja kaksi noin 2,5 metrin korkeudella maanpinnasta. Vertailulämpötila mitattiin ilmasta kahden metrin korkeudelta. Lämpötilat rekisteröitiin yhden tunnin välein. Kuvassa 20 on esitetty lämpötilat 25 päivän pituiselta seurantajaksolta touko-kesäkuussa. Ilman lämpötilan keskiarvo oli 12,3°C. Lämpötilan keskiarvo oli kasan yläosassa yhden asteen ja alaosassa 3,4 astetta alempi. Lämpötilan vaihtelu oli pienintä kasan alaosassa. Lämpötilan keskihajonnat olivat ilmassa 6,3, kasan yläosassa 4,4 ja kasan alaosassa 3,1°C. Thörnqvistin (1985) tutkimuksessa havaittiin, että hakkuutähteillä pienten varastokasojen lämpötila seuraa ilman lämpötiloja, mutta suurissa varastokasoissa (600 m³) kasan sisäosien lämpötila on 10–30 astetta ympäröivän ilman lämpötilaa suurempi. Lämpötilan lisäksi ilmankosteus ja tuulen nopeuskin vaihtelevat jopa samassa pinossa, jolloin oikeastaan ainoa koko varastointipaikalla vakiona pysyvä kuivumiseen vaikuttava tekijä on ilmanpaine (Heiskanen 1953 ja Kokkola 1993). Tämä vaikeuttaa energiapuun kosteuden ennustamista ja energiapuun kuivumisen ja säätekijöiden välisen yhteyden löytämistä.



Kuva 20. Lämpötila kantopuutaraston alaosassa, yläosassa ja ilmassa 25 päivän pituisella seurantajaksolla.

Hämeen aineistolla säätekijöiden vaikutusta energiapuun kosteuteen arvioitiin hajontakuviotar-kastelulla (kuvat 7–10). Kosteuden suuren hajonnan vuoksi tulokset ovat korkeintaan suuntaa an-tavia. Kosteuden riippuvuus koko varastointiajan lämpösummasta oli hieman suurempi oksa- ja latvusmassalla kuin harvennusenergiapuulla, mikä voi johtua oksa- ja latvusmassan suuremmas-ta pinta-alasta vastaanottaa säteilyä ja haihduttaa vettä. Pitkillä varastointijaksoilla energiapuu-varaston kosteus laskee myös sadesumman suhteen. Sadesumma kasvaa varastointiajan kulues-sa, mutta varastointiaikaan sisältyy myös sateettomia ajanjaksoja, jolloin varastokasat kuivuvat. Kosteuden riippuvuus koko varastointiajan sadesummasta oli heikko molemmilla tavaralajeilla, joten sadesumma on riittämätön selittämään kuivumista. Oksa- ja latvusmassan kosteus kasvoi viimeisen puolen vuoden sadesumman suhteen. Harvennusenergiapuulla vastaavaa ei ollut ha-vaittavissa. Kosteus kasvoi loivasti myös lumen vesi-arvon kasvaessa.

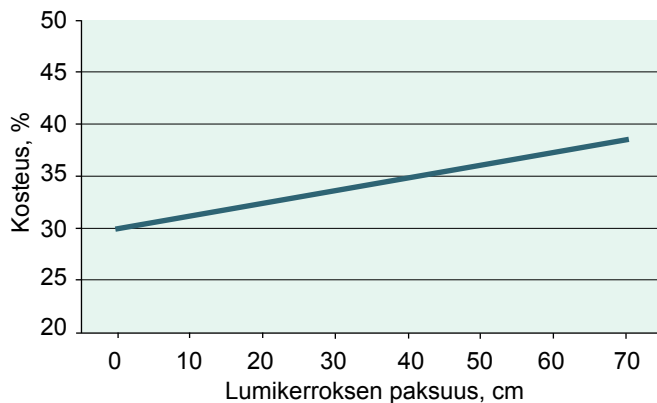
Keski-Suomen aineisto kerättiin keväällä ja kesällä 2010, jolloin oli poikkeuksellisen lämmintä ja kuivumisolosuhteet olivat poikkeuksellisen hyvät. Kaikki tavaralajit kuivuivat kesän aikana hy-vin ja kosteuden hajonta oli pientä (kuva 5). Harvennusenergiapuurangoista männyllä kosteuden hajonta oli suurinta (kuva 6) ja kosteus haketushetkellä oli usein vielä melko suuri. Mänty kuivui myös hitaammin, minkä vuoksi myöhemmin kesällä korjatut rangat eivät ehtineet kuivua loppu-kesän aikana hyvistä kuivumisolosuhteista huolimatta.

Keski-Suomessa sateita mitattiin kolmella eri menetelmällä. Ilmatieteen laitoksen ilmastohavain-topisteiden ja lähimmän sääaseman sadannat olivat lähellä toisiaan (kuva 13), koska ilmastoha-vaintopisteiden tiedot interpoloidaan todellisten mitattujen säähavaintojen perusteella. Ilmastohavaintopisteille mallinnetut sateet ovat aluksi lähimmän sääaseman sateita hieman suurempia, mutta kesän kuluessa mallinnetut sateet jäävät mitattuja alemmiksi, kuten mallin kuvauksessakin (Venäläinen ym. 2005) ennakoidaan. Sademittareilla mitatut sademäärät olivat kaikissa tapauk-sissa Ilmatieteen laitoksen sademääriä pienemmät. Tulokset eivät kuitenkaan ole täysin vertailu-kelpoisia, sillä sademittarit sijaitsivat varastopaikoilla. Tällöin sääolosuhteiden paikallinen vaih-telu aiheuttaa eroa eri menetelmillä määritettyihin sademääriin.

4.1.5 Lumen vaikutus

Energiapuun sisältämä kosteus, olipa se sitten vettä, jäätä tai lunta, laskee puun tehollista läm-pöarvoa. Talvien välillä on huomattavia eroja sekä lumipeitteen paksuuden, että sulamis- ja jää-tymiskausien määrässä. Nurmen (1999) mukaan kevättalvella auringonsäteilyn sulattama lumi jäätyy oksien ja neulasten ympärille, jolloin kosteus voi nousta jopa 60 prosenttiin. Jää ei täl-löin useinkaan irtoa, vaan se jää energiapuuvarastoon pysyväksi kosteudenlisäksi. Lumikerrok-sen paksuus korreloi suoraan puuaineen kosteuden kanssa. Kuvassa 21 on esitetty arvio lumiker-roksen paksuuden vaikutuksesta energiapuun kosteuteen, kun lumikerros sulaa varaston päällä ja energiapuun lähtökosteus on 30 prosenttia. Arvion laskennassa lumen vesi-arvona on tässä käytet-ty 20 prosenttia, energiapuuvarastoon pidätyvänä veden osuutena 70 prosenttia, pinon korkeute-na viittä metriä ja pinon kiintotilavuusprosenttina 30. Tämän mukaan noin 40 senttimetrin lumi-kerros nostaisi energiapuun kosteutta noin viidellä prosenttiyksiköllä.

Käytännön toiminnassa olosuhteet ja toimintatavat määrittävät sen, kuinka suuri osa kasojen päällä olevasta lumesta päätyy hakkeen sekaan. Peittämättömissä kasoissa varsinkin oksa- ja lat-vusmassan kohdalla talvet, joihin on vuoronperään suoja- ja pakkasjaksoja, ovat lumen ja jään kertymisen kannalta ongelmallisia. Tässä tutkimuksessa lumen vaikutus otettiin huomioon mää-rittämällä lumen kertyminen, sateen olomuoto ja lumen sisältämä vesimäärä laskennallisesti as-tepäivätekijämallilla (Kokkonen ja Koivusalo 2009). Hämeen aineistossa varastointiajat olivat



Kuva 21. Lumen vaikutus energiapuuvaramon kosteuteen.

pitkiä ja sekä harvennusenergiapuuja että oksa- ja latvusmassa varastoitiin yleensä yhden tai useamman talven yli. Lumen vaikutusta pohdittiin yhtenä Hämeen aineiston suuren vaihtelun tekijänä, mutta lumen vesiarvon huomioiminen ei parantanut merkittävästi selitystasetta.

4.2 Kosteuden mallinnus

Kosteuden mallinnuksessa käytettiin lineaarista ja epälineaarista regressioanalyysia. Epälineaarisen mallin muoto vastaa puun kuivumista, joka tyypillisesti hidastuu kuivumisajan kuluessa ja laskee kosteutta selittävien muuttujien suhteen. Lineaaristen mallien käyttöalue rajautuu siten vain osalle selittävän muuttujan lukualueesta. Lineaarisia malleja käytettiin silloin, kun aineiston perusteella niiden käyttö oli perusteltua.

Hämeen aineiston säämuuttujista parhaiten harvennusenergiapuun kosteutta selittävä muuttuja oli koko varastointiajan potentiaalinen haihduntasumma kuuden millimetrin interseptiokapasiteetilla. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että ennen kuin energiapuu alkoi kuivua, oli haihdutettava päivittäisestä sateesta energiapuuhun pidähtynyt kuuden millimetrin vesimäärä. Aineisto ei mahdollistanut karsimattoman ja karsitun harvennusenergiapuun kuivumisen erojen tutkimista.

Hämeen aineistossa oksa- ja latvusmassan kosteusmallissa käytettiin useampaa selittäjää, koska parhaallakin yksittäisellä selittäjällä selitystaste oli vain 0,11. Parhaiten oksa- ja latvusmassan kosteutta selitti potentiaalinen haihduntasumma yhden millimetrin interseptiokapasiteetilla. Ohuista ainesosista ja niihin liittyvistä nopeista kosteudenvaihteluista johtuen viimeisen kuukauden aikaisilla säämuuttujilla saatiin kasvatettua selitystasetta jonkin verran.

Keski-Suomen aineistossa harvennusenergiapuun mallinnuksessa kaikki erät koostuivat eri puulajien sekoituksista ja myös yhden puun erissä oli noin 30 prosenttia muuta kuin pääpuulajia, joten puulajien väliset erot kuivumisessa tasoittuivat hieman. Kaikkien harvennusenergiapuiden kosteus selittyi parhaiten potentiaalisella haihduntasummalla kuuden millimetrin interseptiokapasiteetilla. Koivut ja koivuvaltaiset sekapuut asettuivat malliin hyvin ja selitystaste oli korkea. Sen sijaan mäntyvaltaisella sekapuustolla epälineaarisen mallin sovittaminen aineistoon oli ongelmallista, koska kuivumisajat eivät olleet riittävän pitkiä vakiintuvan loppukosteuden saavuttamiseksi tai vaihtoehtoisesti hajonta oli niin suuri (kuva 16). Männyllä mallin mukainen alkukosteus ($b_0 + b_2$) oli kaikista tavara- ja puulajeista suurin, mikä vastaa aiempien tutkimusten tuloksia (esim. Hakkila 1962). Keski-Suomen aineiston kantojen epälineaarisen mallin parhaaksi selittäjäksi tuli

potentiaalinen haihduntasumma, kun satanutta vettä ei pidähtynyt kantoihin yhtään. Oksa- ja latvusmassan parhaaksi selittäjäksi tuli potentiaalinen haihduntasumma kahden millimetrin interseptiokapasiteetilla.

Kuivumisnopeus oli Hämeen aineistossa keskimäärin Keski-Suomen aineistoa alempi. Erityisen hidasta kuivuminen oli Hämeen oksa- ja latvusmassalla (taulukko 2). Keski-Suomen aineistossa mallin mukainen kuivumisnopeus (b_1) mäntyvaltaisella sekapuustolla oli samaa luokkaa kuin koivuvaltaisella sekapuustolla. Keski-Suomen aineiston kannot kuivuivat nopeimmin ja oksa- ja latvusmassa kuivui hieman harvennusenergiapuurunkoja nopeammin (taulukko 3). Kantojen nopeaa kuivumista selittävät mm. kantojen halkaisun ja käsittelyn takia kantoihin muodostuvat suuret haihduttavat pinnat. Lisäksi suuret ja tummat pinnat absorboivat hyvin auringon säteilyä eivätkä kasat kantojen muodon vuoksi ole tiiviitä, jolloin ilma pääsee liikkumaan kasan sisemmissäkin osissa ja kuivuminen kasan eri osissa on tasaisempaa.

Vertailukohtia energiapuun kosteuden mallinnukseen on vain vähän. Sää tietojen avulla laadittu kosteusmalli löytyy esim. Erkkilän ym. 2011 tutkimuksesta, jossa kehitettiin malli kantojen kuivumiselle palsta- ja varastokasoissa. Molemmissa malleissa otettiin huomioon lähtökosteus, haihduntasumma ja sadesumma.

4.3 Johtopäätökset

Hämeen kosteusmittausaineistoon liittyvien epävarmuuksien ja suuren hajonnan vuoksi tulokset ja johtopäätökset ovat vain suuntaa antavia. Sekä hakkuu että haketus jakaantuivat vuoden mittaan epätasaisesti ja oksa- ja latvusmassan poikkeuksellisen suuri hajonta kesäkuussa (kuva 3) johtui kyseisen kuukauden havaintojen pienestä määrästä (vain 2 havaintoa).

Hämeen aineiston suuri vaihtelu johtui osittain erilaisista varastointiajoista, -paikoista ja olosuhteista. Koska aineisto koottiin takautuvasti, ei tarkkoja hakkuu- ja haketusajankohtia ollut saatavilla. Sekä hakkuu- että kosteusraportit lämpölaitokselta saatiin kerran tai kaksi kuukaudessa, jolloin molemmissa päivämäärissä jouduttiin käyttämään kuukauden tarkkuutta. Varsinkin lyhyillä varastointiajoilla tällä saattaisi olla vaikutusta tuloksiin, mutta koska lyhyen aikaa varastoituja eräiä oli Hämeen aineistossa vain muutamia, jäi päivämäärien pyöristämisen vaikutus kokonaisuudessaan pieneksi. Kuivumisajan olosuhteilla on enemmän vaikutusta kuin kuivumisajan pituudella (Filbakk ym. 2011); kesän yli varastoidut puut kuivuvat kun taas talven yli varastoitujen puiden kosteus ei juuri muutu tai kosteus jopa nousee. Käytettäessä sää tietoja, eikä varastointiajan pituutta, pystytään ottamaan huomioon nimenomaan puun kuivumiseen vaikuttavat olosuhteet varastointiajankohdasta riippumatta.

Varastointipaikan ollessa aurinkoisessa ja tuulisessa paikassa hyvin kuivuvalla maaperällä, on kuivuminen hyvinkin nopeaa ja vastaavasti varjoisessa ja kosteassa paikassa hidasta, mutta Hämeen aineiston varastointipaikkatietojen puuttuessa näitä vaihteluita ei voitu ottaa huomioon. Kuivumisolosuhteet varastossa riippuvat myös kasan koosta ja muodosta (mm. Hakkila ym. 1998). Kuivuminen on aluksi nopeaa pienkasoissa etenkin kesällä otollisten kuivumisolosuhteiden aikaan, mutta vastaavasti talvella pieni kasa ehtii kastua pohjaa myöten (mm. Jirjis 1995 ja Hakkila ym. 1998). Hämeen kosteusmittausaineiston kasojen koosta tai muodosta tiedettiin vain haketettavan erän koko ja on mahdollista, että samasta suuremmasta kasasta on otettu useampia toimituseriä eri ajankohtina. Mitä suurempi varastokasa on ollut, sitä vaihtelevammat kuivumisolosuhteet kasan pinta- ja sisäosien välillä ovat olleet (vrt. Filbakk ym. 2011 ja Röser ym. 2011).

Lisäksi Hämeen aineiston pienkasat kuljetettiin varastotilan rajallisuuden takia palstalta tienvar-sivarastoon yleensä vasta sen jälkeen, kun puutavara oli kuljetettu pois, jolloin puita on varastoitu vaihtelevia aikoja pienkasoissa palstalla. Tämä on varastointiajan olosuhteista ja kestosta riippu-en joko nopeuttanut tai hidastanut puutavaran kuivumista. Keski-Suomen osalta tiedossa oli sekä varaston koko että varastointipaikan laatu, jotka voitiin ottaa huomioon tuloksia tarkastellessa.

Yksi Hämeen aineistossa vaihtelua aiheuttanut tekijä on ollut näytteenotto. Kosteusnäytteen läm-pölaitoksella, joko siilosta tai kentälle kaadetusta kuormasta, otti hakkeen kuljettaja. Näytteen-otossa on eri kuljettajista, näytteenoton olosuhteista tai ohjeistuksista johtuvaa vaihtelua. Kes-ki-Suomen aineistossa samat henkilöt tekivät näytteiden oton ja kosteusmääritykset. Näytteiden ottaminen tehtiin johdonmukaisella tavalla ja normaaleihin käytäntöihin nähden tarkennetuilla menetelmillä. Näytteenotosta johtuva kosteuden vaihtelu aineistossa oli oletettavasti pientä.

Hämeen aineistossa vain pienen erän osalta tiedettiin oliko puut karsittu, eikä karsimisen vaiku-tuksia pystytty tutkimaan. Keski-Suomen aineisto oli puolestaan niin pieni, ettei karsimisen vai-kutusta voitu huomioida. Karsimisen on todettu toisaalta nopeuttavan puiden kuivumista kuoren rikkoutumisen takia ja toisaalta karsimattomien oksien lehdet haihduttavat kosteutta tehokkaasti etenkin lehtipuilla. Hämeen aineiston näytteenoton epävarmuustekijöiden lisäksi hajontaa aiheut-tanee puulajisuhteiden puuttuminen. Lehti- ja havupuiden erilainen rakenne ja kemiallinen koos-tumus aiheuttavat eroja puun kosteudessa ja kuivumisnopeudessa.

Kosteusmittausaineistoon yhdistetyt ilmastohavainnot on tuotettu mallintamalla sääasemilla mi-tattujen havaintojen ja tutkahavaintojen perusteella. Siten myös ilmastohavaintoihin liittyy mal-lien käytöstä aiheutuvaa epävarmuutta. Lisäksi ilmastohavaintojen määrittämisessä ei voitu huo-mioida paikallista sääolosuhteiden vaihtelua.

Myös varastointipaikan olosuhteista ja kasan koosta ja muodosta riippuu, miten nopeaa kuivu-minen on. Varastointipaikan vaikutusta muiden kuin mallinnettujen säätietojen avulla ei Hämeen aineistossa voitu huomioida ja Keski-Suomen aineisto oli niin pieni, ettei kattavia johtopäätelmiä varastointipaikan olosuhteiden vaikutuksista voitu tehdä.

Keski-Suomen aineisto oli huolellisesti kerätty ja dokumentoitu, mutta pienen kokonsa vuoksi suppea laajemmin yleistettäväksi. Varastointi päättyi kaikilla erillä viimeistään lokakuun alussa ja varastointiajat olivat Hämeen aineistoon verrattuna lyhyitä. Pieni havaintomäärä, lyhyt varas-tointiaika, poikkeuksellisen lämmin kesä ja kevään, syksyn ja talven puuttuminen varastointiajas-ta, tekevät aineistosta huonosti yleistettävän, vaikka selityssasteet useammallakin säämuuttujalla olivat hyviä.

Yhteenvetona voidaan sanoa, että energiapuun kosteuden mallintaminen varastointiajan ja -pai-kan sääolosuhteiden avulla vaikuttaa lupaavalta. Sääolosuhteisiin perustuvalla kosteuden ennus-tamisella on saavutettavissa huomattavasti parempi tarkkuus kuin nykyisin eri yhteyksissä käy-tettävillä, lähinnä pitkäaikaisiin säähavaintoihin tai energiapuun kosteudesta eri vuodenaikoina saatuihin havaintoihin perustuvalla arvioinnilla. Toteutuneisiin sääolosuhteisiin perustuvalla kos-teuden arvioinnilla pystyttäisiin ottamaan huomioon kuivumisolosuhteiden paikalliset vaihtelut ja myös vuosien väliset erot. Toteutukseen tarvitaan tutkimuksia, jossa on riittävässä laajuudessa otettu huomioon puu- ja tavaralajit ja niiden ominaisuuksien vaihtelut, varastopaikan olosuhteiden vaikutukset, varastomuodostelmien koon vaikutukset ja sääolosuhteiden riittävä vaihtelu.

Kirjallisuus

- Andersson, G., Asikainen, A., Björheden, R., Hall, P.W., Hudson, J.B., Jirjis, R., Mead, D.J., Nurmi, J. & Weetman, G.F. 2002. Production of Forest Energy. Bioenergy from Sustainable Forestry, Guiding Principles and Practices. Kluwer Academic Publishers. s. 49–123.
- Anerud, E. & Jirjis, R. 2011. Fuel quality of Norway spruce stumps – influence of harvesting technique and storage method. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26: 257–266.
- Erkkilä, A., Hillebrand, K., Raitila, J., Virkkunen, M., Heikkinen, A., Tiihonen, I. & Kaipainen, H. 2011. Kokopuun ja mäntykantojen korjuuketjun sekä varastoinnin kehittäminen. Tutkimusraportti, VTT. 52 s.
- Filbakk, T., Høibø, O.A., Dibdiakova, J. & Nurmi, J. 2011. Modelling moisture content and dry matter loss during storage of logging residues for energy. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26: 267–277.
- Haikonen, T. 2005. Tutkimus biopolttoaineen aumakuivauksesta. Diplomityö. TKK. 73 s.
- Hakkila, P. 1962. Polttohakepuun kuivuminen metsässä. Summary: Forest seasoning of wood intended for fuel chips. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 54(4). 82 s.
- Hakkila, P. 1963. Koivujen kuivuminen rasissa ja niistä tehtyjen pinotavarapölkkyjen vettyminen uitossa. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 57(3). 32 s.
- Hakkila, P. 1964. Kesäaikana valmistettujen paperipuitten ja sahatukkien kuivuminen ja varastoviat. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 58(4). 108 s.
- Hakkila, P. 1989. Utilization of Residual Forest Biomass. Springer Series on Wood Science, Springer Verlag. 568 s.
- Hakkila, P. 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. *Folia Forestalia* 773. 24 s.
- Hakkila, P. & Fredriksson, T. 1996. Metsämme bioenergian lähteenä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 613. 92 s.
- Hakkila, P., Kalaja, H. & Saranpää, P. 1995. Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköt kuitu- ja energialähteenä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 582. 99 s.
- Hakkila, P., Nousiainen, I. & Kalaja, H. 2001. Metsähakkeen käyttö Suomessa – Tilannekatsaus vuodesta 1999. *VTT Tiedotteita* 2087. 39 s.
- Hakkila, P., Nurmi, J. & Kalaja, H. 1998. Metsänuudistusalojen hakkuutähde energialähteenä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 684. 68 s.
- Heiskanen, V. 1953. Polttopuiden kuivamisesta ja sen huomioonottamisesta varastoinnissa. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 41.4. 48 s.
- Heiskanen, V. 1959. Halkaistun aisatun ja kuoreellisen koivupuutavaran kuivuminen ja säilyminen metsävarastossa. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 50(7). 63 s.
- Hillebrand, K. & Nurmi, J. 2001. Hakkuutähteiden laadunhallinta. *VTT Energian raportteja*.
- Hillebrand, K. & Nurmi, J. 2004. Nuorista metsistä korjatun energiapuun kuivatus ja varastointi. Projektiraportti. *VTT Prosessit*. 30 s.
- Hillebrand, K., Frilander, P. & Saastamoinen, J. 2004. Polttopuun keinokuivauksen tehostaminen. Projektiraportti. *VTT Prosessit*. 34 s.
- Jalava, M. 1941. Rasiin kaadettujen puiden kuivumisesta. *Metsätaloudellinen aikakauslehti*.
- Jirjis, R. 1995. Storage and drying of wood fuel. *Biomass and Bioenergy*, vol. 9: 181–190.
- Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittämenetelmät. Uunikuivausmenetelmä. Osa 1: Kokonaiskosteus, vertailumenetelmä. CEN/TS 14774-1:fi. Suomen standardisoimisliitto SFS.
- Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittämenetelmät. Uunikuivausmenetelmä. Osa 1: Kokonaiskosteus, vertailumenetelmä. SFS-EN 14774-1. Suomen standardisoimisliitto SFS.
- Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittämenetelmät. Uunikuivausmenetelmä. Osa 2: Kokonaiskosteus. Yksinkertaistettu menetelmä. CEN/TS 14774-2:fi. Suomen standardisoimisliitto SFS.
- Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittämenetelmät. Uunikuivausmenetelmä. Osa 2: Kokonaiskosteus. Yksinkertaistettu menetelmä. SFS-EN 14774-2. Suomen standardisoimisliitto SFS.
- Kokkola, J. 1993. Drying of pulpwood in northern Finland. *Silva Fennica* 27(4): 283–293.

- Kokkonen, T. & Koivusalo, H. 2009. Snow accumulation and melt. Teoksessa: Kokkonen, T, Jakeman, A.J., Koivusalo, H. ja Norton, J.P.(toim.). Computational methods for water resources assessment: An exercise kit. s. 43–49.
- Kuusisto, E. & Seppänen, H. 1986. Hydrologian meteorologisia peruskäsitteitä. Teoksessa: Mustonen, S. (toim): Sovellettu hydrologia. Suomen Vesiyhdistys Ry. s. 20–28.
- Kärkkäinen, M. 1976. Puun ja kuoren tiheys ja kosteus sekä kuoren osuus koivun, kuusen ja männyn oksissa. *Silva Fennica* 10(3): 212–236.
- Kärkkäinen, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Metsäkustannus Oy. 468 s.
- Laurila, J. & Lauhanen, R. 2010. Moisture Content of Norway Spruce Stump Wood at Clear Cutting Areas and Roadside Storage Sites. *Silva Fennica* 44(3): 427–434.
- Lindblad, J. 2008. Energiapuun mittauksessa käytettävät tuoretiheysluvut. Raportti Energiapuun mittaus-toimikunnalle. 16.7.2008. 17 s.
- Lindblad, J. 2010. Energiapuun mittauksessa käytettävien tuoretiheyslukujen uudistaminen. Raportti Energiapuun mittaus-toimikunnalle. 8.6.2010. 21 s.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and environment. Teoksessa: Fogg, G.E. (toim.). The State and Movement of Water in Living Organisms. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge Univ. Press. s. 205–234.
- Nikula, H. 2006. Energiapuun massan mittaus kuormainvaa’alla. Opinnäytetyö. Rovaniemen ammattikorkeakoulu, luonnonvara-ala, Metsätalouden koulutusohjelma. 51 s. + liitteet
- Nurmi, J. 1994. Työtavan vaikutus hakkuukoneen tuotokseen ja hakkuutähteen kasautumiseen. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/1994: 113–122.
- Nurmi, J. 1999. Hakkuutähteen ominaisuuksia. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 722. 32 s.
- Nurmi, J. & Hillebrand, K. 2007. The characteristics of whole-tree fuel stocks from silvicultural cleanings and thinnings. *Biomass and Bioenergy* 31: 381–392.
- Nurmi, J. & Lehtimäki, J. 2011. Debarking and drying of downy birch (*Betula pubescens*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*) fuelwood in conjunction with multi-tree harvesting. *Biomass and Bioenergy* 35: 3376–3382.
- Ronkainen, P. 2010. Latvusmassan kosteuden määrittäminen metsäkuljetuksen yhteydessä. Metsä- ja puuteknologian pro gradu – tutkielma. Itä-Suomen yliopisto, Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta. 60 s.
- Röser, D., Mola-Yudego, M., Sikanen, L., Prinz, R., Gritten, D., Emer, B., Väättäin, K. & Erkkilä, A. 2011. Natural drying treatments during seasonal storage of wood for bioenergy in different European locations. *Biomass and Bioenergy* 35: 4238–4247.
- Shuttleworth, W.J. 1992. Evaporation. Teoksessa: Maidment, D.R. (toim.). Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, New York. s. 4.1–4.53.
- Simola, P. 1977. Pienikokoisen lehtipuuston biomassa. *Folia Forestalia* 302. 16 s.
- Tarboton, D.G. & Luce, C.H. 1996. Utah Energy Balance Snow Accumulation and Melt Model (UEB), Computer model technical description and users guide. Utah Water Research Laboratory and USDA Forest Service Intermountain Research Station.
- Thörnqvist, T. 1985. Drying and Storage of Forest Residues for Energy Production. *Biomass* 7: 125–134.
- Uusivaara, O. 1984. Hakepuun kosteuden alentaminen ennen haketusta korjuuseen ja varastointiin liittyvin toimenpitein. *Folia Forestalia* 599. 30 s.
- Vakkilainen, P. 1986. Haihdunta. Teoksessa: Mustonen, S. (toim): Sovellettu hydrologia. Suomen Vesiyhdistys Ry. s. 64–81
- Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Pirinen, P. & Drebs, A. 2005. A basic Finnish climate data set 1961–2000 – Description and illustrations. *Ilmatieteen laitoksen raportteja* 2005:5. 27 s.
- Verkasalo, E. 1987. Metsähakkeen kosteuden ja kuivamassan mittaus kuormaotantamenetelmällä. *Folia Forestalia* 694. 35 s.