



Luonnonvara- ja
biotalouden
tutkimus 58/2017

Latvusmassan kosteus palstalla

Kosteusennustemallit ja energiapuun mittauslaskuri

Jari Lindblad, Johanna Routa, Johanna Ruotsalainen, Marja Kolström,
Ari Isokangas, Petri Seppälä, Sami Nivala ja Lauri Sikanen

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 58/2017

Latvusmassan kosteus palstalla

Kosteusennustemallit ja energiapuun mittauslaskuri

Jari Lindblad, Johanna Routa, Johanna Ruotsalainen, Marja Kolström, Ari Isokangas,
Petri Seppälä, Sami Nivala ja Lauri Sikanen

Luonnonvarakeskus, Helsinki 2017



Lindblad, J., Routa, J., Ruotsalainen, J., Kolström, M., Isokangas, A., Seppälä, P., Nivala, S. ja Sikanen, L. 2017. Latvusmassan kosteus palstalla – Kosteusennustemallit ja energiapuun mittauslaskuri. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 58/2017. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 35 s.

ISBN: 978-952-326-464-9 (Painettu)

ISBN: 978-952-326-465-6 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-465-6>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Jari Lindblad, Johanna Routa, Johanna Ruotsalainen, Marja Kolström, Ari Isokangas, Petri Seppälä, Sami Nivala ja Lauri Sikanen

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2017

Julkaisuvuosi: 2017

Kannen kuva: Jari Lindblad / Luke

Painopaikka ja julkaisumyynti: Juvenes Print, <http://luke.juvenesprint.fi>

Tiivistelmä

Jari Lindblad ¹⁾, Johanna Routa ¹⁾, Johanna Ruotsalainen ²⁾, Marja Kolström ³⁾, Ari Isokangas ⁴⁾, Petri Seppälä ¹⁾, Sami Nivala ja Lauri Sikanen ¹⁾

- 1) Luonnonvarakeskus (Luke), Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki, etunimi.sukunimi@luke.fi
- 2) Ilmatieteen laitos, Erik Palménin aukio 1, 00560 Helsinki, etunimi.sukunimi@fmi.fi
- 3) Itä-Suomen yliopisto, Yliopistokatu 2, 80100 Joensuu, etunimi.sukunimi@uef.fi
- 4) Oulun yliopisto, Pentti Kaiteran katu 1, Linnanmaa, etunimi.sukunimi@oulu.fi

Latvusmassan mittauksessa käytetään yleisesti kuormainvaakoja, joilla mittaus voidaan toteuttaa metsäkuljetuksen yhteydessä. Kuormainvaaoilla punnitun latvusmassan painon muuntamiseen kiintotilavuudeksi käytetään muuntolukuja, niin sanottuja tuoretiheyslukuja. Nykyiset tuoretiheysluvut perustuvat energiapuutavaramallien keskimääräisiin laskennallisiin kuivatuoretiheyksiin, kosteuden ennustemalleihin ja suuralueiden pitkän ajan keskimääräisiin säähavaintoihin eri vuodenaikoina, jolloin ne eivät ota huomioon paikallista ja vuosien välistä olosuhteiden vaihtelua. Käytännön mittaus-toiminnassa saatujen havaintojen perusteella ongelmat korostuvat erityisesti uudistushakkuualoilta korjattavan latvusmassan mittauksessa.

Tämän projektin tavoitteena oli arvioida kosteusennustemallien sopivuutta toteutuneeseen säähän perustuvassa latvusmassan kosteusennustamisessa osana käytännön mittaustoimintaa. Lisäksi tavoitteena oli kehittää säähavaintoaineistoa hyödyntävä energiapuun mittausskuri.

Kosteusmallien toimivuutta ja soveltuvuutta arvioitiin määrittämällä vertailukosteudet todellisten korjuukohteiden (49 kpl) latvusmassalle ja laskemalla näille kohteille kosteusennusteet kosteusmalleilla. Kosteusmallien tuottamien kosteusarvojen todenmukaisuus (systemaattinen epävarmuus) oli verraten hyvällä tasolla koko vertailuaineistossa, mutta puutteellinen tietyissä olosuhteissa. On todennäköistä, että kosteusmallit tuottavat systemaattista virhettä esimerkiksi loppukesän ja syksyn korjuukohteilla. Kosteusennustemallien täsmällisyys (satunnainen epävarmuus) on heikko kaikissa olosuhteissa, mutta erityisesti loppukesän ja syksyn korjuukohteilla. Eri malleilla määritetyt kosteudet olivat ± 5 prosenttiyksikön virherajan sisällä vertailuarvostaan 37–47 prosentissa korjuukohteista. Nykyisin käytössä olevalla menetelmällä tuoretiheyslukujen määrittämisessä päästiin jokseenkin vastaavaan tarkkuuteen kuin kosteusennustemalleja käyttämällä.

Kosteusennustemallien tarkasteluiden perusteella niiden soveltuvuus on puutteellinen hyödynnettäväksi latvusmassan tuoretiheyslukujen määrittämisessä. On kuitenkin mahdollista, että kosteusmallien käytöllä saavutettaisiin parannusta nykyiseen menetelmään verrattuna muun muassa vuosien välisistä sääolosuhde-eroista johtuvien virheiden pienentämisen kautta.

Asiasanat: energiapuu, latvusmassa, tuoretiheys, kosteus, muuntoluku, mittausskuri, mittaussäädäntö

Sisällys

1. Johdanto	5
2. Tutkimusaineistot ja -menetelmät	6
2.1. Yleiskuvaus.....	6
2.2. Mekrijärven tutkimusympäristö ja tutkimusaineisto.....	6
2.3. Korjuu- ja toimituskohteet.....	7
2.4. Korjuukohteiden taustatiedot ja luokitukset.....	8
2.5. Kosteuden vertailuarvojen määrittäminen.....	8
2.6. Säähavainnot	9
3. Kosteusennustemallit, niiden kehittäminen ja soveltuvuuden arviointi.....	10
3.1. Kosteusennustemalleja koskevat tutkimukset	10
3.2. Testattavat kosteusennustemallit	11
3.3. Kuivatuskokeet laboratoriossa.....	21
4. Kosteusennustemallien soveltuvuuden arviointi.....	24
5. Energiapuun mittauslaskurin kehittäminen	30
Viitteet	31

1. Johdanto

Energiapuun mittauksessa käytetään yleisesti kuormainvaakoja, joilla mittaus voidaan toteuttaa energiapuun metsäkuljetuksen yhteydessä. Kuormainvaaoilla punnitun energiapuun painon muuntamiseen kiintotilavuudeksi käytetään muuntolukuja, niin sanottuja tuoretiheyslukuja. Energiapuutavaralajien tuoretiheysluvut annetaan Luonnonvarakeskuksen määräyksissä puutavaran mittauksesta annetun lain perusteella (414/2013, muutokset 566/2014 ja 725/2016).

Nykyiset tuoretiheysluvut perustuvat energiapuutavaralajien keskimääräisiin laskennallisiin kuiva-tuoretiheysiin, kosteuden ennustemalleihin ja suuralueiden pitkän ajan keskimääräisiin säähavaintoihin eri vuodenaikoina. Tuoretiheysluvut on esitetty taulukkomuodossa. Tuoretiheyslukujen ja -taulukoiden käyttöä varten on Metsäntutkimuslaitoksessa laadittu taulukkolaskentapohjainen EPPU -energiapuun mittaaslaskuri. EPPU -mittauslaskuri on saatavissa Luonnonvarakeskuksen internetsivuilta.

Tuoretiheyslukuihin perustuvassa energiapuun mittauksessa on havaittu erinäisiä ongelmia. Tuoretiheysluvut perustuvat keskimääräisiin sääolosuhteisiin, jolloin ne eivät ota huomioon vuosien välistä olosuhteiden toisinaan merkittävääkin vaihtelua. Lisäksi on havaittu, että nopeat olosuhteiden muutokset voivat olla ongelmallisia tuoretiheyslukujen käytölle. Ongelmia on ilmennyt erityisesti silloin, kun kuormainvaakamittaus on tehty sateella tai sateen jälkeen, jolloin taulukoiden antama tuoretiheysluku poikkeaa merkittävästi mittauserän todellisesta tuoretiheydestä. Erityisen suuria poikkeamat ovat olleet uudistushakkuualoilta korjattavan latvusmassan kuormainvaakamittauksessa.

Edellä esitettyjä energiapuun mittauksen haasteita ei pystytä tyydyttävällä tavalla ratkaisemaan kehittämällä nykymuotoisia energiapuun tuoretiheystaulukoita tai EPPU- energiapuun mittaaslaskuria. Mittauksen luotettavuuden ja tarkkuuden kehittäminen edellyttää korjuukohteiden sääolojen huomioon ottamista mittausmenetelmän sisällössä. Tavoitetilana voidaan pitää, että energiapuun mittauksessa käytettävän tuoretiheysluvun määrittämisen on perustuttava paikalliseen toteutuneeseen säätietoon energiapuun varastointiaikana ja energiapuutavaralajien kosteuden ennustemallien käyttöön.

Energiapuun kosteusennustemalleja on kehitetty useissa tutkimusprojekteissa ja -organisaatioissa. Malleja on jossakin määrin käytetty energiapuun tienvarsivarastojen laadun ennustamisessa, tarkoituksena määrittää varastojen sopiva käyttöönottoajankohta. Kosteusennustemallien käyttö puutavaran mittauksessa ei ole ollut mahdollista, sillä malleja ei ole vahvistettu puutavaran mittaussäädännössä määritetyllä tavalla. Vahvistamiselle ei ole ollut edellytyksiäkään, sillä esimerkiksi latvusmassan kosteusennustamiseen kehitettyjä mallivaihtoehtoja ei ole järjestelmällisesti raportoitu eikä validoitu. Toisin sanoen mallien käyttöönotto edellyttää sitä, että niiden sopivuus suunniteltuun käyttötarkoitukseensa varmistetaan.

Energiapuun hankinnassa toimivilla yhtiöillä ja yrittäjillä on vaihtelevat edellytykset saada käyttöönsä paikallisia säähavaintoja ja soveltaa kosteuden ennustemalleja. Sikäli kuin kosteusennustemalleja otettaisiin käyttöön energiapuun mittauksessa, tulisi vähintään mittauksen toteuttajien käytettävissä olla sovellys, joka mahdollistaa uuteen menetelmään perustuvan tuoretiheysluvun määrittämisen.

Tämän projektin kokonaistavoitteena oli luoda latvusmassan mittaukseen entistä tarkempi ja toimijoita tasapuolisesti kohteleva mittausten menetelmä ja mittauksen järjestely. Projektin osaprojektit ja niiden tavoitteet olivat:

Osaprojekti 1: Latvusmassan kosteusennustemallien arviointi

- a) eri kosteusennustemallien sopivuus toteutuneeseen säähän perustuvaan latvusmassan kosteusennustamiseen osana käytännön mittaustoimintaa tunnetaan,
- b) käyttökelpoinen kosteusennustemalli, jolla on ennusteen tarkkuuden ja toiminnallisen luotettavuuden suhteen edellytykset tulla käyttöönotettavaksi puutavaran mittaussäädännössä tarkoitettussa mittauksessa, on olemassa.

Osaprojekti 2: Energiapuun mittaussäädännön kehittäminen

- a) ensimmäinen versio työnimeä NettiEPPU käyttävästä energiapuun mittaussäädännöstä on valmis ja käytettävissä.

2. Tutkimusaineistot ja -menetelmät

2.1. Yleiskuvaus

Tässä projektissa toteutetussa kosteusennustemallien kehittämisessä on käytetty Itä-Suomen yliopiston (UEF) Mekrijärven tutkimusasemalla kerättyä tutkimusaineistoa. Kosteusmallien rakenne ja esittäminen on laadittu näiden tutkimusaineistojen perusteella.

Luonnonvarakeskus omistaa latvusmassan korjuukohteilta vuosina 2009 ja 2012 kerättyjä kosteuden tutkimusaineistoja (Ronkainen, 2010; Lindblad ym., 2013; Ronkainen ym., 2014). Näitä aineistoja käytettiin kosteusennustemallien yleisen toimivuuden tarkasteluissa sekä todellisille korjuukohteille tarkoituksenmukaisten parametrien arvojen määrittämisessä.

Tässä projektissa kosteusennustemallien testaamiseen käytetty kenttäkoeaineisto kerättiin Sami Nivalan opinnäytetyössä (Itä-Suomen yliopisto). Aineisto kerättiin todellisilta latvusmassan korjuukohteilta. Riittävän laaja olosuhdevaihtelu varmistettiin korjuukohteiden maantieteellisellä hajauttamisella ja varastointiaikojen ajallisella hajauttamisella.

Korjuukohteiden latvusmassasta määritettiin kosteuden vertailuarvot metsäkuljetusajankohtana. Kosteusmääritys toteutettiin kuljettamalla kuorma latvusmassaa toimituskohteeseen heti metsäkuljetuksen jälkeen. Kosteusotanta ja kosteuden määrittäminen tehtiin toimituskohteissa.

2.2. Mekrijärven tutkimusympäristö ja tutkimusaineisto

Itä-Suomen yliopiston (UEF) Mekrijärven tutkimusasemalle (nyk. omistaja Megrin Matkailu Oy) rakennettu tutkimusympäristö mahdollistaa energiapuun kosteuden- ja laadunhallintaan liittyvien kokeiden toteuttamisen. Tutkimusympäristöön kuuluu kymmenen järeää kuivauskehikkoa, joista kahdeksan soveltuu energiapuun tienvarsivarastoinnin simulointiin ja kaksi palstavarastoinnin simulointiin. Kehikoiden alusrakenteessa on painoanturit, joilla kehikoiden ja niiden sisällön painoa voidaan seurata jatkuvasti varastointikokeiden aikana. Lisäksi tutkimusympäristöön kuuluu Ilmatieteen laitoksen sääasema.

Mekrijärven tutkimusympäristössä on tutkittu latvusmassan palstakasojen kosteuden vaihtelua vuosina 2013–2016 järjestetyissä kokeissa. Koejärjestelyssä kahteen kuivauskehikkoon laitettiin palstakasoja jäljittelevä määrä kaatotuoretta latvusmassaa. Perustamista seuranneena varastointiaikana rekisteröitiin kehikon paino minuutin välein. Painohavainnot muutettiin kosteushavainnoiksi kokeen aloittamisajankohtana latvusmassasta otannalla määritetyn kosteuden perusteella. Varastointiajan säähavainnot määritettiin Mekrijärven sääasemalla, jossa mitataan suurin osa säähavainnoista yhden tunnin välein. Lisäksi käytettävissä ovat olleet säähavainnot lähimmältä säähavaintopisteeltä (hilasääaineisto).

Vuosina 2013–2016 järjestettiin yhteensä 12 (6 koetta / kehikko) latvusmassan palstakasojen kuivumiskoetta. Mallien kehittämisessä on käytetty pääasiassa vuosien 2013–2015 kokeiden aineistoja, kausimallissa (Malli F) on hyödynnetty myös vuoden 2016 kokeiden aineistoja. Muun muassa ukkosvauriot häiritsivät sekä painonmittausta että sääaseman toimintaa, minkä vuoksi täysin yhteistä havaintoaineistoa ei pystytty keräämään. Sähkökatkot, lumenpaino sekä painoantureihin kertynyt jää ovat myös aiheuttaneet häiriöitä mittauksiin ja vaikeuttaneet aineistojen käyttöä ja käyttöedellytyksiä.



Kuva 1. Latvusmassan palstakasojen kosteuden mittauksen koejärjestely Mekrijärven tutkimusasemalla.

2.3. Korjuu- ja toimituskohteet

Latvusmassan toimituskohteet valittiin yhteistyössä projektin toteuttajien kanssa. Toimituskohteet sijaitsivat Hämeenkyrössä, Kaipolassa, Kotkassa ja Oulussa. Korjuukohteet valittiin alueilta, joista puunhankintaorganisaatiot toimittavat latvusmassaa edellä mainittuihin toimituskohteisiin.

Korjuukohteet valittiin puunhankintaorganisaatioiden normaaleista kuusivaltaisista latvusmassan korjuukohteista. Korjuukohteiden tuli vastata puulajin, pinta-alan, latvusmassan kertymän ja muiden vastaavien tekijöiden suhteen tavanomaista latvusmassan hankintaa. Kohteelta tuli olla korjattavissa latvusmassahaketta vähintään täysperävaunuokormen verran.

Korjuukohteet kiintiöitiin hakkuu- ja metsäkuljetusajankohdan mukaan seuraaviin kolmeen luokkaan:

- Luokka 1: syksyllä ja talvella hakatut kohteet, metsäkuljetus keväällä ja alkukesällä.
- Luokka 2: keväällä ja alkukesällä hakatut kohteet, metsäkuljetus keväällä ja alkukesällä.
- Luokka 3: kesällä hakatut kohteet, metsäkuljetus loppukesällä tai syksyllä.

Korjuukohteiden määrät toimituskohteittain ja hakkuu- ja metsäkuljetusajankohdan mukaisen luokituksen mukaisesti on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Korjuukohteiden kappalemäärät toimituskohteittain ja hakkuu- ja metsäkuljetusajankohdan mukaan luokiteltuina.

Luokka	Hämeenkyrö	Kaipola	Kotka	Oulu	Yhteensä
Luokka 1	6	4	5	3	18
Luokka 2	5	4	5	0	14
Luokka 3	6	6	4	1	17
Yhteensä	17	14	14	4	49

2.4. Korjuukohteiden taustatiedot ja luokitukset

Korjuukohteilta kerättiin taustatietoina kohteiden pinta-alat ja hakatun runkopuun tilavuudet. Sää-tietojen hankkimista varten tarvittiin paitsi hakkuu- ja metsäkuljetusajankohdat, myös korjuukohteiden sijaintitiedot koordinaatteina. Puuhankintaorganisaatioiden toimihenkilöt arvioivat korjuukohteita kuivumisolosuhteita seuraavan luokituksen mukaisesti:

1. Maaston korkeus ja muoto
 - a. palsta on korkeassa maastonkohdassa tai maasto on kalteva etelä-länsisuuntaan
 - b. palsta on tasainen ja ympäröivän maaston tasalla
 - c. palsta on ympäröivää maastoa alempana, palstalla on paljon painanteita tai maasto on kalteva itä-pohjoissuuntaan

2. Reunametsät ja varjostus
 - a. palstaa ei ympäröi metsä, eikä reunametsä vaikuta kuivumisolosuhteisiin
 - b. palstaa ympäröi osittain metsä, joka estää tuulen ja auringon vaikutusta vähän
 - c. palstaa ympäröi metsä, joka estää tuulen ja auringon vaikutusta paljon

3. Korjuukohteen kosteustilanne
 - a. palsta on kuiva
 - b. palsta on melko kuiva lukuun ottamatta muutamia painanteita
 - c. palsta on kostea tai märkä

2.5. Kosteuden vertailuarvojen määrittäminen

Korjuukohteilta kuljetettiin kuorma latvusmassaa toimituskohteisiin metsäkuljetuksen aikana tai enimmillään kaksi päivää sen jälkeen. Toimituskohteissa kuormista otettiin kosteusnäytteet, joista edelleen määritettiin latvusmassan kosteuden vertailuarvot. Yhdessä toimituskohteessa (Kaipola) käytettiin kosteusotannan sijasta röntgenmittausta.

Kosteusotannalla tehtävässä kosteusmäärittäyksessä noudatettiin soveltuvalla tavalla Puupolttoai-neiden laatuohjetta (VTT, 2014). Näytteenoton ja kosteusmäärittäyksen pääkohdat olivat:

- Manuaalisessa näytteenotossa *yksittäisnäytteitä* kerättiin tasaisesti kuorman eri osista. Näytteenotto tehtiin purkuvirrasta tai kentälle puretusta kuormasta. Yksittäisnäytteen koko oli vähintään kolme litraa.
- Yksittäisnäytteitä otettiin syksyllä tai talvella hakattujen korjuukohteiden (luokka 1) kuormista *vähintään 15 kappaletta* ja keväällä ja kesällä hakattujen korjuukohteiden (luokat 2 ja 3) kuormista *vähintään 10 kappaletta*.
- Kuorman yksittäisnäytteet yhdistettiin *kokoomanäytteeksi*. Kokoomanäyte sekoitettiin ja siitä otettiin *kaksi vähintään kolmen litran laboratorionäytettä*.
- Kosteus määritettiin molemmista laboratorionäytteistä otetuista, vähintään kahden litran suuruisista *analyysinäytteistä*.

Kosteusmäärittäyksessä arvioitiin päästävän keväällä ja kesällä korjatuilla kohteilla noin 3,5 prosenttiyksikön mittausepävarmuuteen ja syksyllä ja talvella hakatuilla kohteilla noin 4,5 prosenttiyksikön mittausepävarmuuteen (tilastollinen mittausepävarmuus kun $k = 2 \rightarrow \sim 95$ prosentin luottamusväli).

2.6. Säähavainnot

Korjuukohteiden varastointiajan säähavainnot kerättiin Ilmatieteen laitoksen hilasääaineistosta korjuukohtetta lähimmältä hilapisteeltä. Säähavaintoaineistona oli käytössä pääasiassa 10km x 10km hilaruudukolle interpoloituja säähavaintoja. Myös 1km x 1km hilaruudukon säähavaintoja kokeiltiin, mutta kosteusennusteiden määrittämisen kannalta niistä ei saatu merkittävää hyötyä. Ilmatieteen laitoksella on noin 200 säähavaintoasemaa, joilla mitataan lämpötilaa, kosteutta ja ilman suhteellista kosteutta. Tämän lisäksi on noin 85 kpl pelkkiä sadeasemia. Ilmatieteen laitoksella on käytössä 10 tutka-asemaa, joilla saadaan katettua verraten hyvin Etelä- ja Keski-Suomi, mutta Pohjois-Suomen osalta jää jonkin verran katvealueita.

Hilasääaineisto koostuu Kriging-menetelmällä interpoloiduista havainnoista lämpötilasta, tuulesta ja ilman suhteellisesta kosteudesta. Menetelmässä oletetaan, että kahden toisiaan lähellä olevan pisteen arvot ovat lähempänä toisiaan kuin kahden kauempana olevan pisteen arvot. Kyse on siis spatiaalisesta autokorrelaatiosta, jossa oletetaan, että kahden pisteen arvot ovat riippuvaisia toisistaan. (Aalto ym., 2013).

Yksittäisen hilapisteen arvot eivät siis ole todellisia säähavaintoja, vaan laskennallisia suureita. Koska pilvisyyshavaintoja ei nykyisin enää saada riittävän kattavasti, ovat tarvittavat säteilyhavainnot saatu numeerisen mallin lähtötilanteesta ns. analyysihetkestä (Vajda ym., 2013). Numeerisen mallin lähtötilanteessa voi olla todellisuudesta poikkeavia arvoja. Säteilyn osuus haihdunnan laskemisessa on merkittävä, joten mahdolliset virheelliset arvot korostuvat haihdunnan laskennassa ja vaikuttavat vahvasti kosteusennustemallin tuloksiin.

Sadehavainnoissa käytetään tutkasademittauksia ja niiden puuttuessa säähavaintoasemilta saatuja mittaustuloksia. Talvisateiden osalta on tiedossa, että tutkasademittaukset eivät havaitse kaikkea sadetta kaukana tutka-asemasta, koska pilvet jäävät tutkan säteen alapuolelle ja toisaalta tutkasadetulkinnalla on taipumusta aliarvioida rankkasateita.

Hilasääaineistosta saadaan laskettua potentiaalihakidunta, jonka laskemisen ovat esittäneet Venäläinen ym. (2005). Lisäksi aineistossa on mukana maankosteus ja siitä edelleen laskettu metsäpaloindeksi. Maankosteus kuvaa maaperän pintakerroksen kosteutta tilavuusprosentteina ja voi saada arvoja 0,1 ja 0,5 välillä. Kun maa on keväällä kosteimmillaan heti lumien suluttua, on maankosteus 50 prosenttia (0,5) ja myös metsäpaloindeksin laskenta aloitetaan. Metsäpaloindeksi saa arvoja 1,0 ja 6,0:n välillä. Kun maankosteus on 20 prosenttia (0,2), saa metsäpaloindeksi arvon 4,0. Tämä arvo on raja-arvo metsäpalovaroituksen antamisessa. (Vajda ym. 2013)

Hilasääaineisto kuvaa varsin hyvin keskimääräisiä olosuhteita korjuukohteen ympäristössä, mutta siinä ei pystytä huomioimaan mikroklimatologiaa tarkasti. Yksittäinen hilapiste edustaa avointa maastoa, eikä huomioi esimerkiksi puuston aiheuttamaa varjostusta tai painanteissa seisovaa vettä. Vaikka hilasääaineiston arvot eivät ole yksittäisen pisteen kohdalla mitattuja säähavaintoja, on aineiston merkittävä etu kuitenkin sen kattavuus. Yksittäisiltä sääasemilta ei saada tietoa kaikista tarvittavista parametreista eikä sääasemia ole riittävän tiheästi kattamaan mallinnuksen laskentatarvetta.

Koska 1kmx1km hiladatan käyttäminen ei parantanut merkittävästi ennustetarkkuutta verrattuna harvempaan aineistoon, voidaan olettaa, että kosteusennustemallissa yksittäisten säähavaintojen tarkkuus ei ole niin merkittävä, kuin esimerkiksi mikroklimatologian osuus. 1km x 1km hiladatassa tärkein parannus tapahtuu sadetutkahavainnoissa, joiden resoluutio on myös 1km x 1km. Sen sijaan numeerisen sääennustemallin resoluutio on 9km x 9km, joten siitä lasketuissa säteilyhavainnoissa ei juuri parannusta tapahdu 10km x 10km aineistoon verrattuna.

3. Kosteusennustemallit, niiden kehittäminen ja soveltuvuuden arviointi

3.1. Kosteusennustemalleja koskevat tutkimukset

Eri puu- ja puutavaralajien säämuuttujiin perustuvia kosteusennustemalleja on kehitetty useissa tutkimusprojekteissa ja -organisaatioissa 2000-luvun aikana. Tutkimuksissa on saatettu tarkastella olosuhteiltaan normaalia puunhankintaa vastaavien pinojen kosteuskehitystä määrittämällä puutavaran kosteudet kosteusotannalla. Vastaavasti kosteusmuutoksen tarkastelu on saatettu toteuttaa koejärjestelyin, joissa koepinojen painoa ja painonmuutosta on rekisteröity jatkuvalla painonmittauksella. Seuraavassa on listattu joitakin projekteja, tutkimuksia ja julkaisuja, joissa on tutkittu puu- ja puutavaralajien kosteudenmuutosta ja mahdollisesti tehty kosteusennustemallinnusta.

Norwegian University of Life Sciences ja tutkimuskumppanit. Tutkimuksessa seurattiin kosteusotannalla energiakäyttöön tarkoitettujen kokopuupinojen kosteudenmuutosta pinojen eri osissa. (Filbak, T., Høibø, O. & Nurmi, J., 2011; Filbak, T., Høibø, O., Dibdiakova, J. & Nurmi, J., 2011).

Metsäenergiaa kannattavasti METKA -projekti (Metsäntutkimuslaitos). Projektissa koottiin voimaitoksiin toimitettujen energiapuuerien kosteusotannalla määritettyjä kosteustietoja. Energiapuuerien tietoja täydennettiin puutavaralaji-, tienvarsivaraston sijainti- ja korjuuajankohtatiedoilla. Ilmatieteen laitoksen tuottamista säähavaintoaineistoista määritettiin varastointiaikaa ja -paikkaa vastaavat säähavainnot, joita käytettiin energiapuuvarastojen loppukosteuden mallinnuksessa. Energiapuutavaralajien kosteudelle sovitettiin epälineaariset mallit käyttäen selittäjinä varastointiajan potentiaalista haihduntaa erilaisilla interseptiokapasiteeteilla. (Jahkonen, M., Lindblad, J., Sirkiä, S. & Lauren, A. 2012)

Energiapuun mittauksen kehittäminen -projekti (Metsäntutkimuslaitos). Projektissa määritettiin todellisilla latvusmassan korjuukohteilla palstakasojen kosteudet heti hakkuun jälkeen. Kosteudet määritettiin uudelleen metsäkuljetuksen aikana. Ilmatieteen laitoksen säähavaintoaineistoista määritettiin korjuukohteiden varastointiaikaa ja -paikkaa vastaavat säätiedot. Latvusmassan kosteudelle laadittiin epälineaarinen kosteusennustemalli, jossa selittäjänä käytettiin varastointiajan sade- ja haihduntasummaa. (Lindblad, J., Jahkonen, M. & Sirkiä, S., 2013)

Biovarma -projekti (VTT). Tutkimuksessa laadittiin yleinen muoto mallista, jolla voidaan laskea energiapuuvaraston kosteudenmuutosta säämuuttujien ja -havaintojen perusteella. (Heiskanen, V.-P., Raitila, J. & Hillebrand, K., 2014).

Laava -projekti (UEF, Metla, IL). Projektin koejärjestelyssä (UEF:n Mekrijärven tutkimusasema, Ilo-mantsi) seurattiin energiapuupinojen kosteudenmuutosta jatkuvalla painonmittauksella. Tutkittavat puutavaralajit olivat latvusmassa ja energiaranka. Koepinot jäljittelivät tienvarsivarastointia. Tutkimuksessa laadittiin tavaralajikohtaisia kosteusennustemalleja. (Routa, J., Kolström, M., Ruotsalainen, J. & Sikanen, L. 2012)

BEST -tutkimusohjelma (Metla/Luke, UEF, OY, IL). Tutkimusohjelmassa jatkettiin Laava -projektissa aloitettua tutkimusta ja kenttäkokeita. Tienvarsivarastoinnin lisäksi kokeissa jäljiteltiin myös latvusmassan palstavarastointia. (Erber, G. ym. 2014; Routa, J., Kolström, M., Ruotsalainen, J. & Sikanen, L., 2015a ja 2015b)

Skogsforsk, Ruotsi. Skogsforsk on toteuttanut vastaavia jatkuvaan painon mittaukseen ja säähavaintojen koostamiseen perustuvia kenttäkokeita kuin UEF Mekrijärvellä. Skogsforsk on raportoinut latvusmassan kuiva-aineisuuden ennustemallit tienvarsi- ja palstakasoille. (Erber, G. ym. 2014)

University of Natural Resources and Life Sciences, Austria. Tutkimuksen seurattiin mäntypölkkyistä koostuvien koepinojen kosteuden muutosta jatkuvalla painonmittauksella. Tutkimuksessa laadittiin joukko kosteusernustemalleja, joissa kosteudenmuutosta ennustettiin tunti- tai päivätasolla. (Erber, G., Kanzian, C. & Stampfer, K., 2012).

Puutavaranmittauksen viranomaistehtävät -projekti (Luonnonvarakeskus). Projektin tutkimusluonteisena tehtävänä on muun muassa määritetty sateiden nopeita vaikutuksia latvusmassan kosteuteen ja edelleen tuoretiheyteen. Määrittämisessä on käytetty Laava- ja BEST -projekteissa tuotettuja koeaineistoja. Tuloksista on raportoitu puutavaranmittauksen neuvottelukunnalle ja sen energiapuun mittauksen jaostolle. (Lindblad, J. 2016)

3.2. Testattavat kosteusernustemallit

Tässä projektissa testattaville ja vertailtaville kosteusernustemalleille annettiin raportointia varten yhdenmukaiset tunnistet (Mallit B, C, D, E, F ja G). Seuraavassa on esitetty mallien rakenteet ja matemaattinen esittämistapa, sekä kuvattu tarvittavilta osin mallien laskenta-aineistot ja muodostaminen.

Malli B

Malli B on laadittu BEST-tutkimusohjelmassa ja sitä on edelleen kehitetty tässä projektissa. Koska mallia ei ole julkaistu, se esitetään tässä raportissa verraten perusteellisesti.

Mallin laadinnassa käytettiin Mekrijärvellä toteutettujen kenttäkokeiden koeaineistoja vuosilta 2013–2015 (kohta 2.2.). Koeaineistoa muokattiin laskentaa varten siten, että koekasojen kosteus- ja säähavainnot määritettiin aikavälille kolme tuntia (3h). Alkuperäisessä perusaineistossa koekasojen paino- ja kosteushavainnot on määritetty yhden minuutin välein. Paino- ja kosteushavaintojen laskenta tehtiin määrittämällä kullekin tasatunnille (3h) minuuttitaso painohavaintojen keskiarvo ajalta tasatunti ± 5 minuuttia.

Laskenta-aineistoon tehtiin veden sitoutumiseen ja kosteusmuutokseen liittyvä luokittelu. Vesi sitoutuu puuhun puun sisälle soluseinämiin, soluonteloihin ja soluväleihin (jatk. sisäkosteus) ja lisäksi puu voi sitoa vettä pinoilleen interseptiovarastoon (jatk. pintakosteus). On perusteltua arvioida, että sisäkosteuden muutokset ovat hitaita ja vaativat paljon energiaa verrattuna pintakosteuden muutoksiin.

Laskenta-aineistoon luokiteltiin seuraavat kosteuden muutoksen prosessit:

- 1) *Pintakosteuden kasvaminen ("pintakastuminen")*: sadetunnit
- 2) *Pintakosteuden laskeminen ("pintakuivuminen")*: välittömästi sateen jälkeen alkava jakso, jota kestää niin kauan, kunnes sadetta edeltävä kosteustaso on saavutettu tai seuraava sade alkaa
- 3) *Sisäkosteuden laskeminen ("sisäkuivuminen")*: pintakosteuden kuivumisen jälkeen alkava jakso, jota jatkuu seuraavaan sateeseen saakka

Edellinen luokittelu ei ole täsmällinen ja se kuvaa tutkimusaineiston kosteudenmuutosta suunta-antavasti. Tässä ei ole otettu huomioon neljättä prosessia, joka edellisellä ajattelumallilla olisi sisäkosteuden kasvaminen ("sisäkastuminen"), mutta jonka määrittäminen ja tunnistaminen olisi käytössä olevan aineiston perusteella hyvin vaikeaa.

Mallin B perusajatuksena on aloittaa kosteusernusteen laskenta annetusta kosteusarvosta tarkastelujakson alussa (MC_0). Soveltamisen kannalta tämä ajanhetki vastaa hakkuuajankohtaa. Mallilla lasketaan säähavaintojen perusteella kosteusmuutos ja kosteus (MC_{i+1}) kolmen tunnin (3 h) välein tarkastelujakson alusta eteenpäin.

Mallissa B kosteusmuutoksen selittäjinä ovat haihdunta (potentiaalihaihdunta) ja sade. Kosteusmuutos kolmen tunnin (3h) tarkastelujaksoilla ei vaikuta olevan lineaarista haihdunnan ja sateen suhteen. Kuvissa 2–4 on esitetty koekasojen painon muutos potentiaalihaihdunnan (mm) suhteen kolmen tunnin aikajaksoilla. Painonmuutos on tässä määritetty pinta-alayksikköä kohti (kg/m^2) siten, että pinta-alana käytettiin koekehikoiden alaa. Tällöin haihdunnalla ja painonmuutoksella on vertailukelpoiset yksiköt. Kuvassa 3 on tarkasteltu prosessia *pintakuivuminen*, ja vastaavasti kuvassa 2 prosessia *sisäkuivuminen*, haihdunnan suhteen. Oranssit käyrät ovat muuttujien välille tehtyjä LOESS-tasoituksia, vastaavasti turkoosit käyrät ovat sovitettuja epälineaaria malleja. LOESS-tasointu on mallina joustava ja ottaa hyvin huomioon muun muassa aineiston suuren satunnaisvaihtelun. Epälineaariset mallit näyttävät noudattavan kohtalaisen hyvin LOESS-tasointujen muotoa.

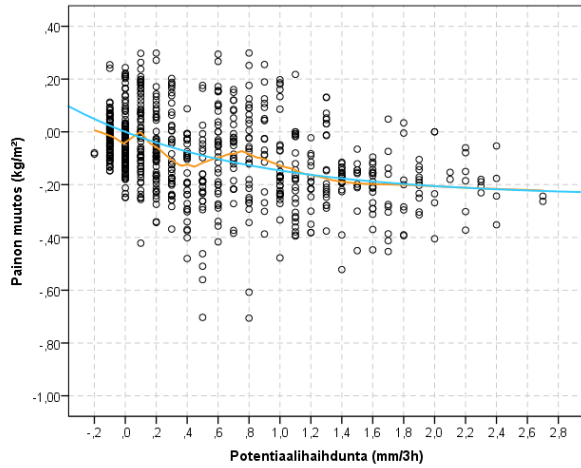
On selvää, että todellinen haihdunta (painon muutos kg/m^2) on pienempi kuin potentiaalihaihdunta. Sovitettujen epälineaaristen mallien perusteella (kuvat 2 ja 3) todellinen haihdunta on suurimmillaan noin puolet potentiaalihaihdunnasta; esimerkiksi pintakosteudella potentiaalihaihdunta 0,4 mm vastaa noin 0,2 kg/m^2 todellista haihduntaa (kuva 3). Kuivumisnopeus (painon muutos) kasvaa noin 1,5 mm/3h haihduntaan saakka, minkä jälkeen merkittävää muutosta ei enää tapahdu. Pintakosteuden haihdunnassa painon muutos potentiaalihaihdunnan suhteen on merkittävästi nopeampaa kuin sisäkosteuden haihdunnassa.

Kosteusmuutoksen ja haihdunnan epälineaarinen riippuvuus ei ole syiltään ja eikä laskenta-aineistojen perusteella ilmeinen. Voidaan kuitenkin arvioida, että hyvissä kuivumisolosuhteissa, jolloin potentiaalihaihdunnan arvot ovat suuria, kuivumisnopeutta rajoittavaksi tekijäksi tulee kosteuden siirtyminen puuaineen sisältä puun pinnalle.

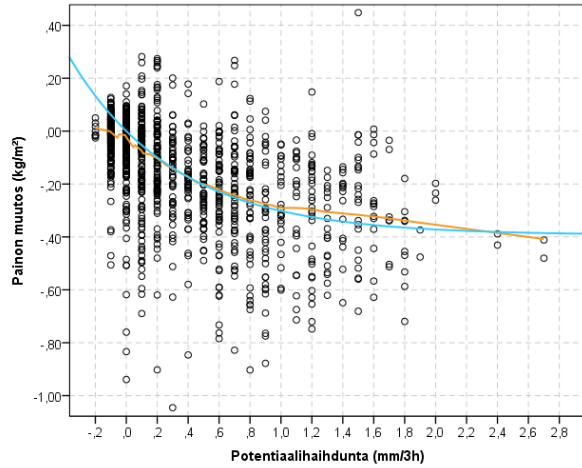
Kuvassa 5 on esitetty koekasojen painon muutos (kg/m^2) sademäärän suhteen kolmen tunnin jaksoilla. Tässä aineistossa ja koejärjestelyssä painon muutos oli noin puolet sadannasta pienillä sademäärillä. Kuvaan tasoitettun mallin perusteella esimerkiksi kahden millimetrin sade on vastannut noin 1 kg/m^2 painon muutosta. Painon muutos sademäärän suhteen ei ole lineaarinen, eli koekasasta ohivirtaavan veden osuus kasvaa sademäärän suhteen.

Kosteusmuutoksen epälineaarisuus sekä sateen että haihdunnan suhteen on mallissa B pyritty ottamaan huomioon määrittämällä eksponenttifunktiolla tekijät P_R ja E_R sateen ja haihdunnan suhteen. Samaa mallin muotoa hyödynnetään sateen ohivirtauksen laskentaan maaperässä (Vajda, ym. 2014) esimerkiksi metsäpalovaaran määrittämistä varten. Määrittämällä tekijä P_R sateesta P vähennetään erityisesti runsaiden sateiden ohivirtaus, joka sinänsä ei vaikuta latvusmassan kosteuteen.

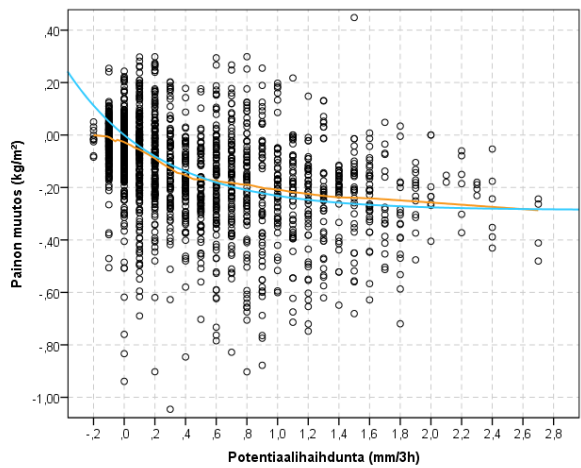
Puun kuivumisnopeus samoissa olosuhteissa muuttuu puun kosteuden suhteen. Tämä päätelmä on johdettavissa esimerkiksi tutkimuksista, joissa on havaittu saman vesimäärän poistamiseen tarvittavan sitä enemmän energiaa, mitä pienemmässä kosteudessa puu on (esim. Kärkkäinen 2007). Puun kuivumisnopeuden muuttuminen kosteuden suhteen on Mallissa B pyritty ottamaan huomioon parametrilla a , joka on määritetty kosteuden suhteen. Käytännössä parametrin a funktion nollakohta määrittää Mallin B tuottamien kosteusennusteiden minimiarvon (noin 17 %). Vastaavalla tavalla parametri b määrittää sateen aiheuttaman kastumisen voimakkuuden kosteuden suhteen. Edelleen parametrin b funktion nollakohta määrittää Mallin B tuottamien kosteusennusteiden maksimiarvon (noin 65 %). Tämä vastaa kuivatuoretiheydeltään 400 kg/m^3 puuaineen suurinta mahdollista kosteutta (Kärkkäinen, 2007).



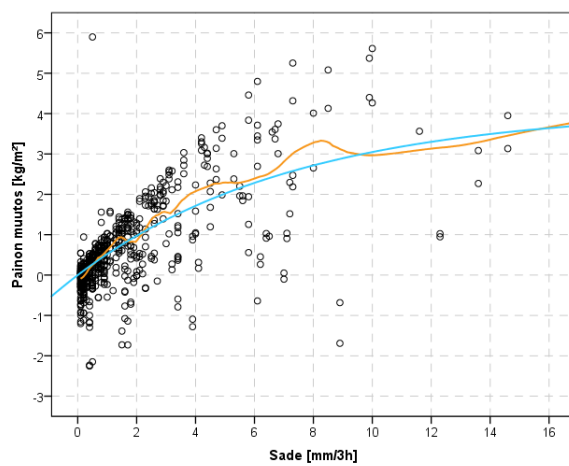
Kuva 2. (kuva vas.) Koepalstakasojen painon muutos (kg/m^2) kolmen tunnin aikajaksoilla potentiaalihaidunnan ($\text{mm}/3\text{h}$) suhteen silloin, kun latvusmassan pinnalla ei ole vettä (sisäkuivuminen).



Kuva 3. (kuva oik.) Koepalstakasojen painon muutos (kg/m^2) kolmen tunnin aikajaksoilla potentiaalihaidunnan ($\text{mm}/3\text{h}$) suhteen sateiden jälkeen (pintakuivuminen).



Kuva 4. (kuva vas.) Koepalstakasojen painon muutos (kg/m^2) kolmen tunnin aikajaksoilla potentiaalihaidunnan ($\text{mm}/3\text{h}$) suhteen.



Kuva 5. (kuva oik.) Koepalstakasojen painon muutos (kg/m^2) kolmen tunnin aikajaksoilla sademäärän ($\text{mm}/3\text{h}$) suhteen.

Malli B:

$$MCdry_{i+1} = MCdry_i + b \times P_R + S_{i+1} \times a \times E_R \quad (1)$$

, jossa $MCdry_{i+1}$ = kosteusennuste veden ja kuiva-aineen painojen suhteena ajanhetkellä $i+1$ (kg/kg)

$MCdry_i$ = kosteusennuste veden ja kuiva-aineen painojen suhteena ajanhetkellä i (kg/kg)

$S_{i+1} = (1, 0) \rightarrow 1$ kun lumen syvyys on 0 cm, muulloin 0

Mallin parametrien arvot määritetään kaavoilla 2–5.

$$b = b_{11} \times (b_{12} - MCdry_i) \quad (2)$$

$$P_R = b_{21} \times (1 - \exp(P_{i+1} / b_{22})) \quad (3)$$

, jossa P_{i+1} on sade, mm/3h

$$a = a_{11} \times (a_{12} + MCdry_i) \quad (4)$$

$$E_R = a_{21} \times (1 - \exp(E_{i+1} / a_{22})) \quad (5)$$

, jossa E_{i+1} on potentiaalivaihdunta, mm/3h

Kosteusmallilla määritetyt, kuivapainoon suhteutetut kosteusarvot ($MCdry$)[kg/kg] muunnetaan märkämpainoon suhteutetuiksi kosteusarvoiksi ($MCwet$)[%] kaavalla 6. Kaavojen 2–5 parametrien $a_{11}...a_{22}$ ja $b_{11}...b_{22}$ arvot ovat taulukossa 2.

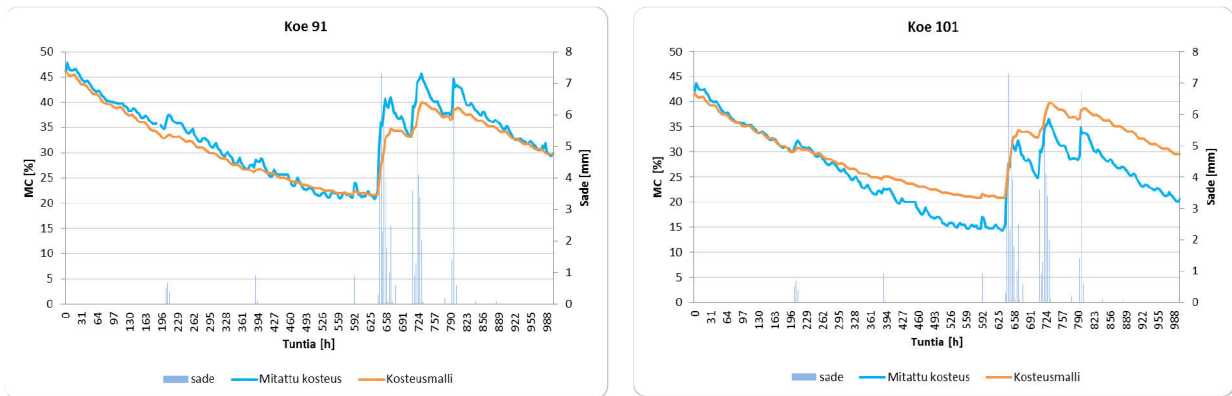
$$MCwet = 100 \times MCdry / (1 + MCdry) \quad (6)$$

Kosteuslaskenta aloitetaan annetusta kosteusarvosta ($MCdry_0$) varastointiajan alussa ($i = 0$). Annettu alkukosteuden arvo 0,90 (veden ja kuiva-aineen painojen suhde) vastaa likimäärin märkämpainoon suhteutettua kosteutta 47 %.

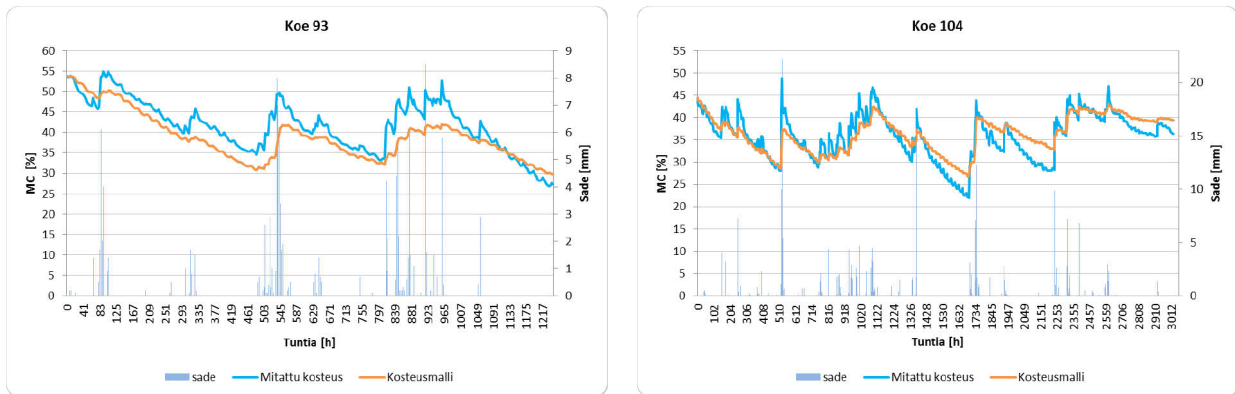
Taulukko 2. Parametrien arvot Mallin B kaavoihin 2–5.

Kaava	b_{11}	b_{12}	b_{21}	b_{22}
2	0,01	1,9		
3			4,1	-7,4
Kaava	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}
4	-0,04	-0,2		
5			0,3	-0,7

Kuvissa 6 ja 7 on esitetty Mallilla B laskettu kosteus verrattuna Mekrijärven yksittäisten koekasojen mitattuihin kosteuksiin kokeiden aikana. Tässä Mallia B siis tarkastellaan suhteessa laskenta-aineistoonsa. Kokeet 91 ja 101 (kuva 6) ovat rinnakkaiset kokeet kesällä 2013. Kuvista on nähtävissä, että täysin samoissa olosuhteissa toteutetuissa rinnakkaisissa kokeissa koekasojen mitatut kosteudet ja kosteuden muutokset poikkeavat varsin paljon toisistaan. Kosteusmuutoksen selvät erot rinnakkaisissa kokeissa antavat viitteen siitä, että säätekijöiden lisäksi kosteuden muutokseen vaikuttavat merkittävästi myös kasan ominaisuudet.



Kuva 6. Mitattu kosteus ja mallilla B laskettu kosteus Mekrijärven kokeissa 91 ja 101. Kokeet ovat rinnakkaisia kesällä 2013. Malli B on laskettu Mekrijärven aineistojen perusteella.



Kuva 7. Mitattu kosteus ja mallilla B laskettu kosteus Mekrijärven kokeissa 93 (koe kesällä 2014) ja 101 (koe kesällä 2015). Malli B on laskettu Mekrijärven aineistojen perusteella.

Malli C

Malli C on laadittu BEST -tutkimusohjelmassa. Mallin laadinnassa on käytetty Mekrijärvellä toteutettujen kenttäkokeiden koeaineistoja (kohta 3.1. Laava - ja BEST -projektit). Malli ja sen aiemmin tehty arviointi on tarkemmin raportoitu Routa ym. (2016) tutkimuksessa.

Malli C:

$$MCwet_m = MCwet_0 - \Delta MCwet$$

$$\Delta MCwet = -16,397 \times \frac{\sum_{i=0}^m P_i}{\sum_{i=0}^m E_i} + 20,6$$

, joissa

$MCwet_m$ = kosteusennuste [%] varastointijakson lopussa (→ metsäkuljetusajankohta)

$MCwet_0$ = kosteusennuste [%] varastointijakson alussa (hakkuuajankohta) = annettu alkukosteus

ΔMC_{wet} = kosteuden muutos koko varastoinjaksolla

P_i = sade [mm]

E_i = haihdunta [mm]

m = summausindeksi, metsäkuljetusajankohta \rightarrow sateet (P_i) ja haihdunnat (E_i) summataan varastointijaksolta aina, kun maankosteusindeksi < 0.5 .

Annettu alkukosteus otetaan taulukosta 3, johon on koostettu hakkuutähteen tuorekosteus kirjallisuudesta ja julkaisemattomista tutkimusaineistoista (Hakkila, 1962, Gislerud 1974, Kärkkäinen 1976, Nurmi 1999, Nurmi & Hillebrand 2001, Lindblad 2013, Routa julkaisematon data).

Taulukko 3. Kuusen latvusmassan tuorekosteudet hakkuukuukauden mukaan.

Kuukausi	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Kosteus, %	52	52	51	51	50	50	50	50	51	51	51	52

Malli D

Malli D on rakenteeltaan samanlainen ja perustuu samaan tutkimusaineistoon kuin Malli B, mutta mallin selittäjänä käytetään haihdunnan sijasta lämpötilaan ja kastepisteeseen perustuvaa selittäjää. Mallilla lasketaan säähavaintojen perusteella kosteusmuutos ja kosteus (MC_{i+1}) kolmen tunnin (3 h) välein tarkastelujakson alusta eteenpäin.

Malli D:

$$MC_{dry_{i+1}} = MC_{dry_i} + b \times P_R + S_{i+1} \times a \times K_R \quad (1)$$

, jossa $MC_{dry_{i+1}}$ = kosteusennuste veden ja kuiva-aineen painojen suhteena ajanhetkellä $i+1$ (kg/kg)

MC_{dry_i} = kosteusennuste veden ja kuiva-aineen painojen suhteena ajanhetkellä i (kg/kg)

$S_{i+1} = (1, 0) \rightarrow 1$ kun lumen syvyys on 0 cm, muulloin 0

Mallin parametrien arvot määritetään kaavoilla 2–5.

$$b = b_{11} \times (b_{12} - MC_{dry_i}) \quad (2)$$

$$P_R = b_{21} \times (1 - \exp(-P_{i+1} / b_{22})) \quad (3)$$

, jossa P_{i+1} on sade, mm/3h

$$a = a_{11} \times (a_{12} + MC_{dry_i}) \quad (4)$$

$$K_R = a_{21} \times (1 - \exp(-(T_{i+1} - K_i) / a_{22})) \quad (5)$$

, jossa T_{i+1} on lämpötila [C°] ja K_i on kastepiste [C°].

Kastepiste (K_i) lasketaan kaavalla:

$$K_i = \frac{d \times \frac{cT_i}{d+T_i} + \ln RH_i}{c - \frac{cT_i}{d+T_i} + \ln RH_i} \quad (6)$$

, jossa T_i on lämpötila [°C], RH_i on suhteellinen kosteus desimaalilukuna (esim. 0,91, ei 91 %) ja c ja d ovat vakioparametreja ($c = 17,27$ ja $d = 237,7$).

Kosteusmallilla määritetyt, kuivapainoon suhteutetut kosteusarvot (MC_{dry})[kg/kg] muunnetaan märkämpainoon suhteutetuiksi kosteusarvoiksi (MC_{wet})[%] kaavalla 7. Kaavojen 2–5 parametrien $a_{11} \dots a_{22}$ ja $b_{11} \dots b_{22}$ arvot ovat taulukossa 2.

$$MC_{wet} = 100 \times MC_{dry} / (1 + MC_{dry}) \quad (7)$$

Kosteuslaskenta aloitetaan annetusta kosteusarvosta (MC_{dry_0}) varastointiajan alussa ($i = 0$). Annettu alkukosteuden arvo 0,90 (veden ja kuiva-aineen painojen suhde) vastaa likimäärin märkämpainoon suhteutettu kosteutta 47 %.

Taulukko 4. Parametrien arvot Mallin D kaavoihin 2–5.

Kaava	b_{11}	b_{12}	b_{21}	b_{22}
2	0,01	1,9		
3			4,1	-7,4
Kaava	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}
4	-0,7	-0,2		
5			0,01	-4,5

Malli E

Malli E on laadittu Metsäntutkimuslaitoksessa Energiapuu mittauksen kehittäminen -projektissa (kohta 3.1.). Mallin laadinnassa on käytetty todellisilta latvusmassan kesäkorjuukohteilta kerättyä kosteusmittausaineistoa ja säähavaintoaineistoa (hilasääaineisto). Malli E on perustana nykyisissä latvusmassan tuoretiheystaulukoissa, joissa laskentaperusteena on käytetty suuralueiden keskimääräisiä säähavaintoja.

Malli E on epälineaarinen malli, jossa kosteutta selitetään koko varastointiajan haihduntasumman ja sadesumman erotuksella. Parametrit b_0 , b_1 ja b_2 kuvaavat ja määrittävät latvusmassan kosteutta ja kuivumista. Parametri b_2 määrittää mallin tuottaman suurimman kuivumisen varastointiaikana prosenttiyksiköissä. Parametri b_1 määrittää nopeuden, jolla kosteus muuttuu selittävän muuttujan kasvaessa. Parametri b_0 määrittää alimman kosteustason, jolle latvusmassan kosteus asettuu (loppukosteus), kun selittävä muuttuja kasvaa. Parametrien b_0 ja b_2 summuna saadaan laskennallinen mallin tuottama tuoreen latvusmassan kosteus [%].

Malli E:

$$MC_{wet,m} = b_0 \times \exp(-b_1 \times (\sum(E_i - P_i) + 1)) + b_2$$

, jossa

$MC_{wet,m}$ = kosteusennuste [%] varastointijakson lopussa (→ metsäkuljetusajankohta)

E_i = haihdunta [mm]

P_i = sade [mm]

b_0 , b_1 , ja b_2 ovat mallin parametreja: $b_0 = 26,9$, $b_1 = -0,01315$ ja $b_2 = 22,5$

Mallin E vahvuutena voidaan pitää kosteusennusteen johdonmukaista muotoa selittävän muuttujan suhteen. Käytännössä kuivumisnopeus hidastuu kosteuden pienentyessä. Mallin laskenta-aineisto kerätty kesäolosuhteissa, jolloin haihdunta- ja sadesummien erotus on yleensä pitkäköllä aikavälillä positiivinen. Myös mallin rakenne on laadittu tästä lähtökohdasta. Siten malli ei sovellu kosteusennustamiseen talvella tai talven yli, jolloin haihdunta- ja sadesummien erotus on pitkäköllä aikavälillä selvästi negatiivinen.

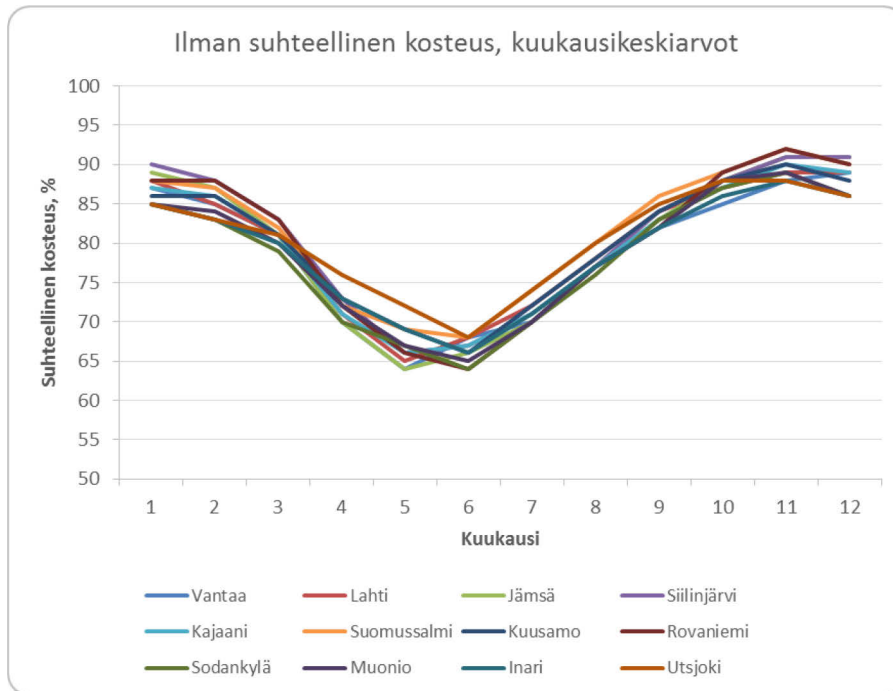
Malli E ottaa rajoitetusti huomioon sateen vaikutuksen kosteusennusteeseen. Tässä suhteessa malli ei kuitenkaan rakenteensa vuoksi toimi johdonmukaisesti, sillä mallin reagoitiherkkyys sateeseen muuttuu haihdunta- ja sadesumman erotuksen suhteen.

Malli F

Malli F perustuu LAAVA hankkeessa kehitettyyn kuivumismalliin, jota on käytetty myös tienvarsivarastoihin (Routa, J. ym. 2012; Erber, G. ym. 2014; Routa, J. ym. 2015a ja 2015b). Ensimmäisen kuivumismallin käytännön sovellukset ovat osoittaneet, että se ennustaa keväällä kuivumisen nopeaksi eikä syksyn kostuminen tapahdu. Näihin havaintoihin perustuen tämän hankkeen yhteydessä lähdettiin kokeilemaan kausimallin kehittämistä palstavarastoille. Kausimallin laadinnassa käytettiin Mekrijärvellä toteutettujen kenttäkokeiden koeaineistoja vuosilta 2013–2016 eli kaikkia palstakasoihin liittyvää aineistoa. Vuoden kierrossa palstakasa-aineistoja oli helmikuun alkupuolelta joulukuun alkuun. Pääosa koejärjestelyistä on kuitenkin keskittynyt touko-elokuille, jolloin kuivuminen on merkittäväntä.

Vuoden jakaminen eri kausiin ja kuivumisen kausimalleihin perustuu ilman suhteellisen kosteuden. Sen vuodenaikainen vaihtelu on hyvin samanlainen kautta Suomen (kuva 8). Tarkemmat päivämäärät eri kausille määritettiin Mekrijärvellä havaitun ilmankosteuden vaihteluista vuosina 2013–2016.

Kuivumismallissa ennustetaan kosteuden muutosta vuorokauden aikana nettohaihduntaan perustuen ja tuo muutos muuttaa edellisen päivän kosteutta. Kausimallien parametri ja vakio on määritetty vastaavan ajanjakson aineistolla, jota on saatu Mekrijärven tutkimusaseman koejärjestelyissä. Koska palstalavitsoilla kuivumisolosuhteet ovat erittäin hyvät; paikka avoin ja materiaali irti maasta, niin kevään ja kesän mallien parametria ja vakiota korjattiin siten, että päivittäinen kosteuden muutos on puolet havaituista muutoksista. Rajoitteet malleille on määritetty mallien tuottamien kosteuden kehittymisen perusteella; talvella kosteus nousee epärealistisen korkeaksi ilman ylärajaa ja mallin lineaarisuuden vuoksi äärevät nettohaihdunnat tuottavat liian suuren muutoksen, joten sitä rajoitetaan erityisesti kevät- ja kesäaikaan. Samoja rajoitteita käytetään kaikille kausimalleille (Taulukko 5).



Kuva 8. Ilman suhteellisen kosteuden kuukausikeskiarvot eri paikkakunnilla Suomessa (Pirinen ym. 2012).

Kausimallit ovat muotoa:

$$MC_i = MC(i-1) - DMC_i$$

$$DMC_i = a \cdot NH_i + b$$

$$NH_i = E_i - P_i$$

MC_i = materiaalin kosteus päivänä i [%]

DMC_i = kosteuden muutos päivänä i [%]

NH_i = nettohaihdunta päivänä i [mm]

E_i = haihdunta päivänä i [mm]

P_i = sade päivänä i [mm]

a = kerroin ja b = vakio

Taulukko 5. Kausimallien soveltamisjaksot, kertoimet, vakiot ja käytettävät rajoitteet.

Kausi	Ajanjakso	Kerroin a	Vakio b	Rajoitteet
Talvi	1.11.–31.3.	0,5148	0,1811	Jos $NH < -5$, $DMC = -1$
Kevät	1.4.–15.6.	0,2839	-0,2996	Jos $NH > 5$, $DMC = 1$
Kesä	16.6.–31.8.	0,2140	-0,1046	maksimaalinen kosteus $MC_{max} = 65\%$
Syksy	1.9.–31.10.	0,5684	0,0074	

Kausimallin etu on se, että sitä voidaan soveltaa läpi vuoden ja se on rakenteeltaan yksinkertainen. Sääolosuhteet eivät kuitenkaan selitä koko kuivumisprosessia, joten mallin antama ennuste ei vastaa validointimittauksia kaikissa tapauksissa. Validointiaineistossa oli kuvattu myös palstakasojen kuivumisaluetta, mutta kuivumista oletettavasti heikentävät tekijät eivät antaneet selitystä ennustemallin antaman tuloksen ja mittauksen välille. Jos malli antoi alemman kosteusarvon kuin mitattu, niin hakkuualueen tekijät eivät olleet huonoja kuivumisen kannalta. Toisaalta jos mallin antama kos-

teusarvo oli korkeampi kuin mitattu, eivät alueen kuivumisolosuhteiden kuvaus antanut syytä olettaa, että olosuhteet olisivat olleet erityisen hyvät kuivumisen kannalta. Ilmeisesti kasojen koko, niiden muoto ja sijainti alueella vaikuttaa niin paljon kuivumisprosessiin, ettei kosteuden ennustaminen säätiötojen perusteella kaikissa tapauksissa tuota riittävän hyvää estimaattia ($\pm 5\%$ mitattuun arvoon verrattuna). Käytettävällä alkukosteudella on iso merkitys ennustemallin tuottamaan loppukosteuteen. Validointiaineistossa ei tunnettu hakkuun jälkeistä alkukosteutta, joten käytettiin arvoa $47,5\%$, joka on keskiarvo EPPU-laskurissa käytetystä alkukosteusluokasta $45\text{--}50\%$. Luonnossa vaihtelua on todennäköisesti enemmän riippuen puuston kasvupaikasta ja hakkuun ajankohdasta.

Malli G

Malli G perustuu myös LAAVA hankkeessa kehitettyyn kuivumismalliin, jota on käytetty myös tienvarsivarastoihin (Routa, J. ym. 2012; Erber, G. ym. 2014; Routa, J. ym. 2015a ja 2015b). Tienvarsivarastoinnista tuttuun nettohaihduntamalliin on lisätty selittäjäksi metsäpaloindeksi, joka kertoo maaston kuivumisolosuhteista. Kuivumismallissa ennustetaan kosteuden muutosta vuorokauden aikana nettohaihduntaan perustuen ja muutos muuttaa edellisen päivän kosteutta. Mallin parametri ja vakio on määritetty aineistolla, jota on saatu Mekrijärven tutkimusaseman koejärjestelyissä.

Malli G on muotoa:

$$MC_i = MC_{i-1} - DMC_i$$

$$DMC_i = c + (a \cdot NHi) + (b \cdot MI)$$

$$NHi = E_i - P_i$$

MC_i = materiaalin kosteus päivänä i [%]

DMC_i = kosteuden muutos päivänä i [%]

NHi = nettohaihdunta päivänä i [mm]

E_i = haihdunta päivänä i [mm]

P_i = sade päivänä i [mm]

MI = metsäpaloindeksi

a = kerroin ja b = vakio

Taulukko 6. Indeksimallin (malli G) parametrit ja vakio.

Kerroin a	Kerroin b	Vakio c	Rajoitteet
0,315	-0,059	0,053	$25 < M_{ci} < 60$

Malli voi ennustaa liian alhaisia kosteuksia ja vastaavasti myös liian korkeita kosteuksia, joten sitä käytettäessä on rajoitettava mallia niin että kosteus pysyy $25\text{--}60\%$ välillä. Mallia käytetään silloin kun maankosteusindeksi saa arvoja $GRD < 0.5$.

3.3. Kuivatuskokeet laboratoriossa

Oulun yliopistolla suoritettiin puukappaleiden (kuva 9) kuivatuskokeita vakio-olosuhdehuoneessa ($T = 20\text{ °C}$ ja $RH = 50\%$). Kokeissa haluttiin tutkia tarkasti kosteusmuutoksia ja ennen kaikkea selvittää lähtökosteuden vaikutusta kuivumisnopeuteen. Kenttäkokeiden tulosten perusteella korkeamman lähtökosteuden kasojen kuivuminen tapahtui hitaammin kuin alhaisemmassa alkukosteudessa. Tavoitteena oli tutkia asian paikkansapitävyyttä suorittamalla kuivatuskokeita laboratorio-olosuhteissa ja pyrkiä antamaan selitys kenttäkokeiden mitatuille tuloksille.

Kokeissa käytettiin sahattuja puunkappaleita (kuva 9), joiden kuori oli poistettu. Puukappaleita säilytettiin eri olosuhteissa ennen kokeiden alkua, jotta alkukosteudet saatiin erilaisiksi. Varsinaisten kokeiden aikana puukappaleet punnittiin työpäivän aikana noin tunnin välein tarkkuusvaa'alla. Kokeen lopussa puukappaleille tehtiin uunikuivatus standardin mukaisesti kuivapainojen määrittämistä varten.

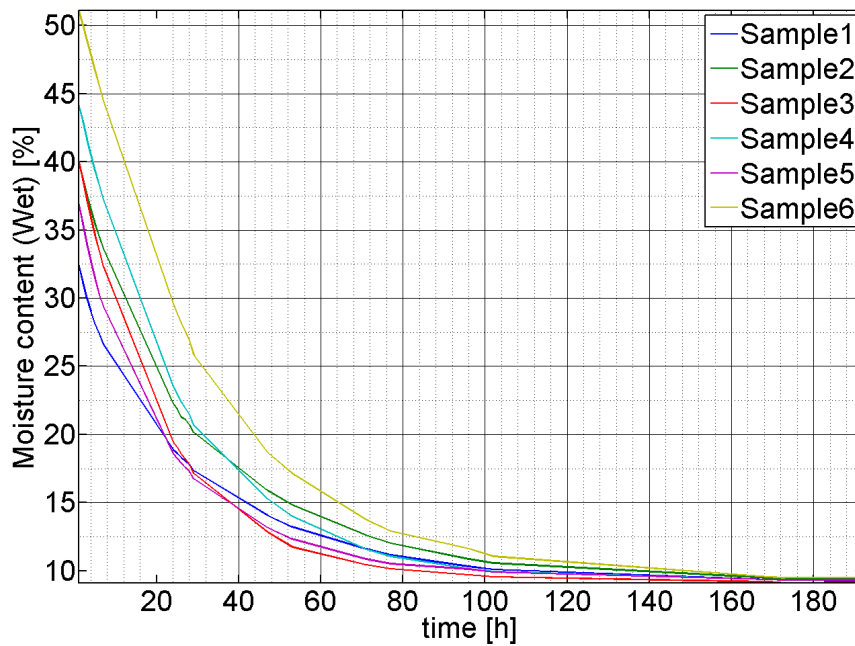


Kuva 9. Kokeissa käytetyt puukappaleet.

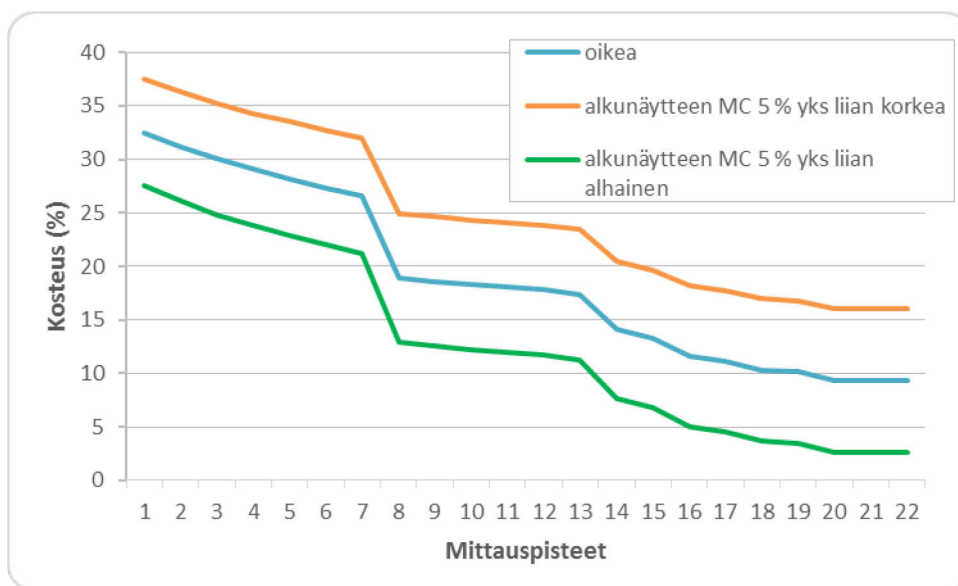
Kuvassa 10 on esitetty puukappaleiden kosteudenmuutos ajan funktiona. Lähtökosteudesta riippumatta puukappaleet saavuttavat tasapainokosteuden (n. 9,3 %) noin 180 tunnissa (7,5 vuorokautta). 90 tunnin jälkeenkin puukappaleet ovat kuivuneet lähes täydellisesti (korkeimman lähtökosteuden kappale on noin 2,5 prosenttiyksikköä kosteampi kuin 180 tunnin jälkeen).

Kenttäkokeiden tulokset ovat ristiriidassa saatujen tulosten kanssa. Kuvassa 11 on esitetty kosteudenmuutos mittauspisteiden funktiona (huom, ei lineaarinen aika-akseli, kuten kuvassa 2) tapauksissa, joissa on käytetty oikeaa alkukosteutta sekä ± 5 prosenttiyksikköä virheellisten alkukosteuksien perusteella. Kuvasta 11 havaitaan, että virheelliset alkukosteudet aiheuttavat sen, että alkutilanteen ± 5 prosenttiyksikön kosteuspoikkeama suurenee kokeen edetessä ja on kokeen lopussa noin ± 7 prosenttiyksikköä. Asia voidaan selittää virheellisten alkukosteuden perusteella määritetyille virheellisillä kuivamassoilla, jotka vaikuttavat kosteusmuutokseen ajan funktiona.

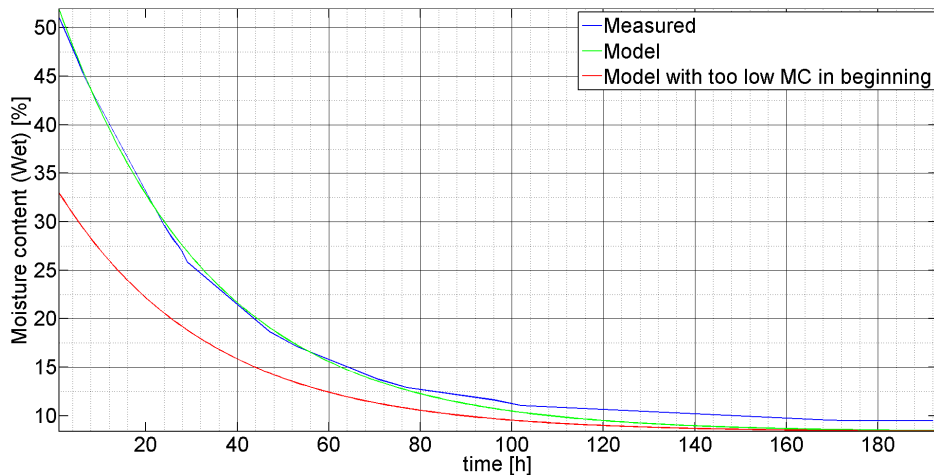
Kuivumisolosuhteet (joiden perusteella kenttämallinnusta on pääosin tehty) ovat kokeissa vakiot, mutta silti kuivumisnopeus on erilainen (ks. kuva 10). Kuivuminen riippuu lähinnä kosteuspitoisuudesta itsestään, minkä vuoksi mallirakenteena tuntidatalle käytettiin seuraavaa mallia: $MC(i+1)=MC(i)*0.97 + 0.25$. Malli pystyy ennustamaan kosteusmuutoksen hyvin kaikissa kokeissa. Kuvassa 12 on esitetty korkeimman lähtökosteuden mallinnetut sekä mitatut arvot (sample 6 kuvassa 10). Kuvassa on havainnollistettu myös mallin käyttäytymistä, jos alkukosteus olisi selvästi virheellinen. Kuvasta 12 nähdään, että virheellinen alkukosteus ei suurene kokeen edetessä vaan virhe pienenee.



Kuva 10. Puokappaleiden kosteudenmuutos ajan funktiona.



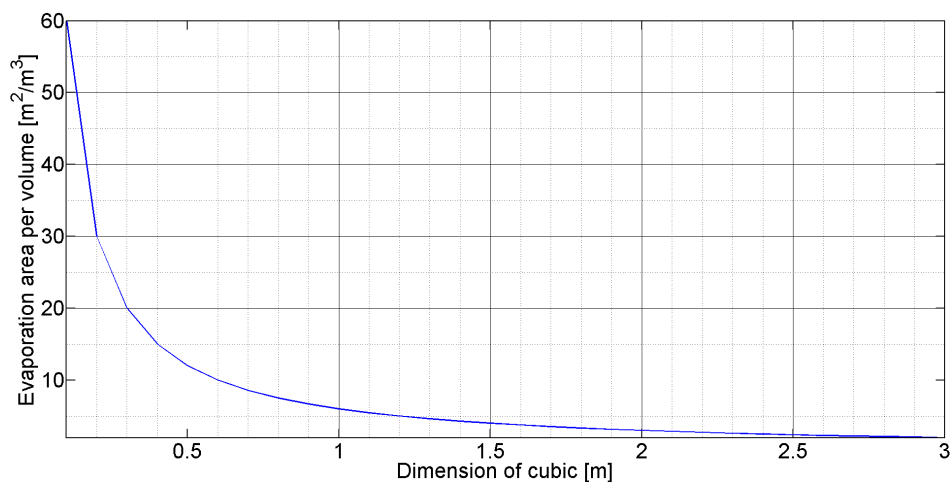
Kuva 11. Puokappaleiden kosteudenmuutos mittauspisteiden funktiona, joissa on käytetty oikeaa alkukosteutta ja sekä ± 5 prosenttiyksikköä virheellisiä alkukosteuksia. Tarkastelussa on kuvan 10 ensimmäinen näyte (sample 1).



Kuva 12. Puukappaleen 6 mallinnettu ja mitattu kosteudenmuutos mittauspisteiden funktiona. Kuvassa on havainnollistettu myös mallin käyttäytymistä, jos alkukosteus olisi selvästi virheellinen.

Edellä esitetty mallirakenne ei luonnollisesti toimi kenttäkokeissa, sillä tällöin myös kenttäkokeiden kasojen pitäisi kuivua yhtä nopeasti. Miksi? Syynä ei voi olla mikään muu kuin kappaleen/kasan koko. Maalaisjärjellä on helppo ymmärtää miksi pieni puukappale kuivuu alle 15 % kosteuteen muutamassa päivässä ja suuren kasan kosteusmuutokset ovat merkittävästi pienempiä. Kuvassa 13 on havainnollistettu kasan koon vaikutusta haihduntapinta-alan ja tilavuuden suhteeseen. Kuvan esimerkki on yksinkertaistettu niin, että kasan ”muotona” on kuutio ja x akseli kuvaa kuution sivun pituutta. Kuvasta 13 havaitaan, että haihduntapinta-alan ja tilavuuden suhde pienenee merkittävästi kasan koon kasvaessa. Suurissa kasoissakin kuivuminen tapahtuu kasojen pinnoilta, joiden suhde kokonaistilavuuteen on kuitenkin merkittävästi pienempi (kuva 13). Suurissa kasoissa kasan keskeltä voi olla pitkä matka pinnalle (kosteuden siirtyminen puumateriaalin sisällä tiedetään olevan hidasta). Lisäksi suuret sademäärät kastelevat myös kasan ”ydintä”, mikä hidastaa entisestään suurten varastokasojen kuivumisnopeutta.

Eryteisesti Mekrijärven kokeiden mittaussaineiston perusteella havaittiin, että säädätän perusteella on mahdollista mallintaa kosteudenmuutosta lyhyellä aikajänteellä. Toisaalta kokeissa havaittu sateen vaikutus on mittaussaineiston perusteella aivan liian suuri, koska sadevesi imeytyi tai lammitoitui joka tapauksessa kokeissa käytettyyn alusmateriaaliin (peittopaperi) ja jossain määrin myös sitoutui kehikkorakenteisiin. Sateen todellista vaikutusta kosteusmuutokseen koejärjestelyllä oli vaikea arvioida jälkikäteen. Mallirakenteiden huono toimivuus eri kenttäaineistojen kesken johtunee pääosin kasojen erilaisista haihduntapinta-alan ja tilavuuden suhteista.

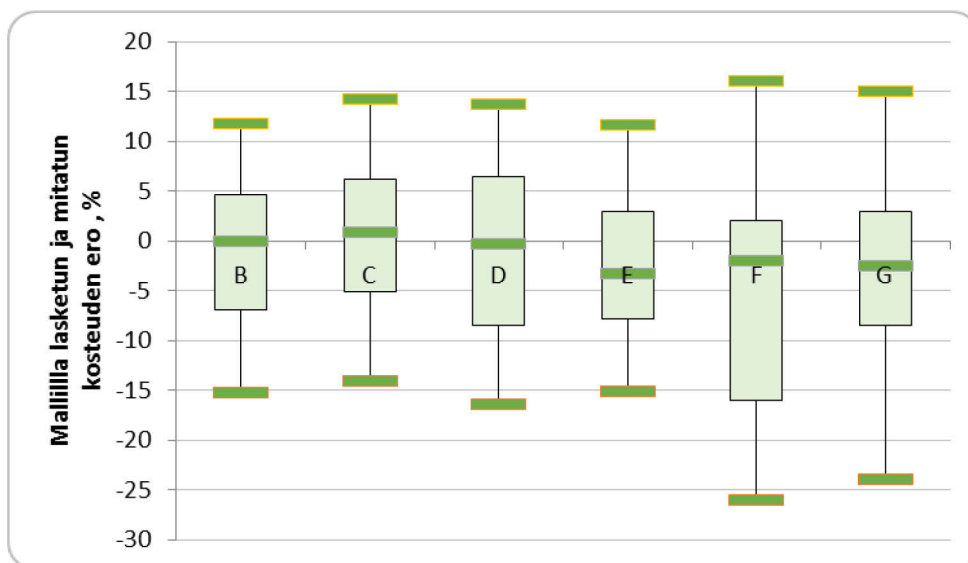


Kuva 13. Kuution muotoisen kasan dimension vaikutus haihduntapinta-alan ja tilavuuden suhteeseen.

4. Kosteusennustemallien soveltuvuuden arviointi

Korjuukohteille laskettiin eri kosteusennustemalleilla latvusmassan kosteusennusteet metsäkuljetusajankohtana. Ennusteiden laskennassa käytetään korjuukohteita lähimpien hilasääpisteiden säähavaintoaineistoja latvusmassan varastointiaikana.

Kosteusennustemallien toimivuuden tarkastelussa yksi ulottuvuus oli korjuukohteiden mitattujen vertailukosteuksien ja kosteusennusteiden erojen tarkastelut. Huomioon otettavia seikkoja olivat kosteusennusteiden todenmukaisuus (systemaattiset erot) ja täsmällisyys (virrehajonnan suuruus), mutta myös ennusteissa mahdollisesti syntyvät karkeat virheet. Periaatteessa kosteusennustemallit eivät saisi missään olosuhteissa ja säähavaintojen yhdistelmillä tuottaa täysin virheellisiä ja reaalisesti mahdottomia ennusteita. Luonnollisesti tarkasteluissa oli otettava huomioon vertailuarvojen mittausepävarmuus.



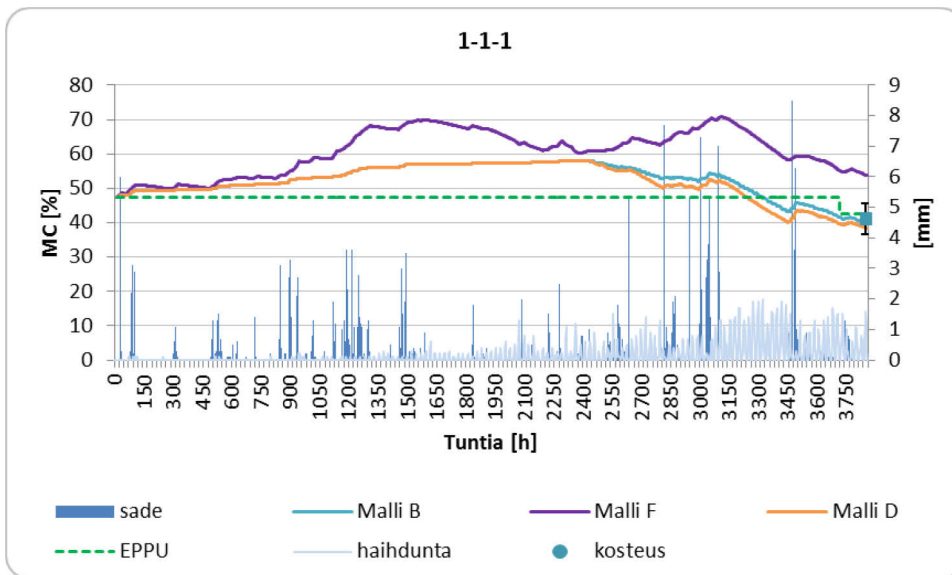
Kuva 14. Korjuukohteiden malleilla laskettujen ja mitattujen kosteuksien eron mediaanit ja jakaumat. Laatikot osoittavat ylä- ja alaneljänneksiä (laatikoiden sisällä 50 % havainnoista) ja virhepalkit vaihteluväliä (minimi- ja maksimihavainnot). Malli E:n ei ole käytetty säähavaintoja, vaan kosteusmääritys on tehty EPPU-laskurilla.

Taulukko 7. Koekorjuukohteiden kappalemäärät luokittain, ja niiden korjuukohteiden kappalemäärät (suluissa suhteellinen osuus), joilla latvusmassan mitatun ja mallilla lasketun kosteuden ero on ± 5 prosenttiyksikön sisällä.

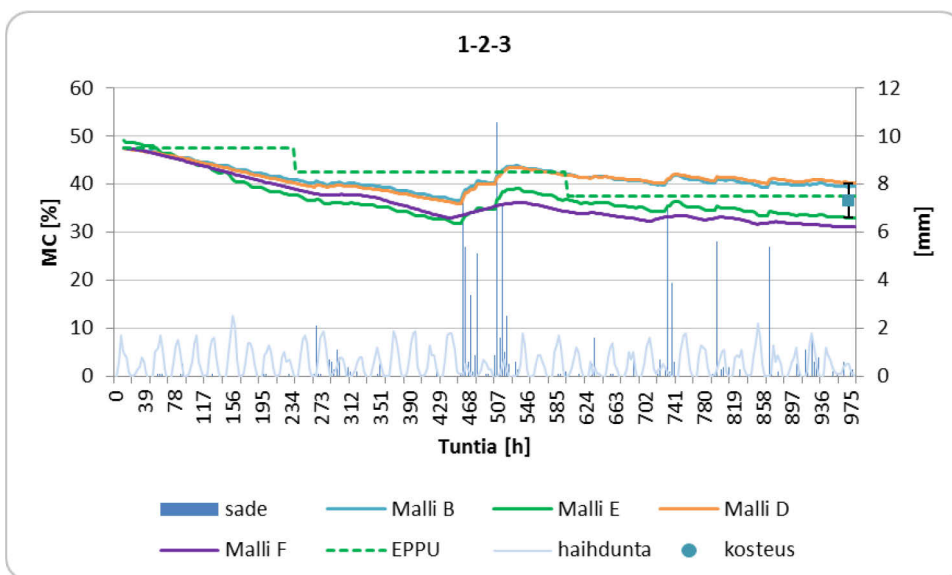
Korjuukohteet		Malli B	Malli C	Malli D	Malli E ²⁾	Malli F	Malli G
Luokitus ¹⁾	kpl	ero ± 5 prosenttia, kpl (%)					
Luokka 1	18	11 (61)	9 (50)	9 (50)	12 (67)	10 (56)	5 (28)
Luokka 2	14	8 (57)	7 (50)	7 (50)	4 (29)	6 (43)	9 (64)
Luokka 3	17	4 (24)	5 (29)	3 (18)	4 (24)	3 (18)	4 (24)
Kaikki kohteet	49	23 (47)	21 (43)	19 (39)	20 (41)	19 (39)	18 (37)

¹⁾ Luokka 1 : syksyllä ja talvella hakatut kohteet, metsäkuljetus keväällä ja alkukesällä
 Luokka 2: keväällä ja alkukesällä hakatut kohteet, metsäkuljetus keväällä ja alkukesällä
 Luokka 3: kesällä hakatut kohteet, metsäkuljetus loppukesällä tai syksyllä

²⁾ Kosteuden määrittäminen EPPU-laskurilla



Kuva 15. Mallien B, D ja F kosteusennustekuvaajat, tuoretiheystaulukoiden mukainen kosteus (EPPU), mitattu kosteus ja mittausepävarmuus (MC, vasen pystyakseli) sekä sademäärä ja haihdunta (3h arvot, oikea pystyakseli) varastointiajan suhteen koekorjuukohteelle 1-1-1 (hakkuu XII/2015, kosteuden mittaus V/2016)



Kuva 16. Mallien B, D, E ja F kosteusennustekuvaajat, tuoretiheystaulukoiden mukainen kosteus (EPPU), mitattu kosteus ja mittausepävarmuus (MC, vasen pystyakseli) sekä sademäärä ja haihdunta (3h arvot, oikea pystyakseli) varastointiajan suhteen koekorjuukohteelle 1-2-3 (hakkuu V/2016, kosteuden mittaus VII/2016).

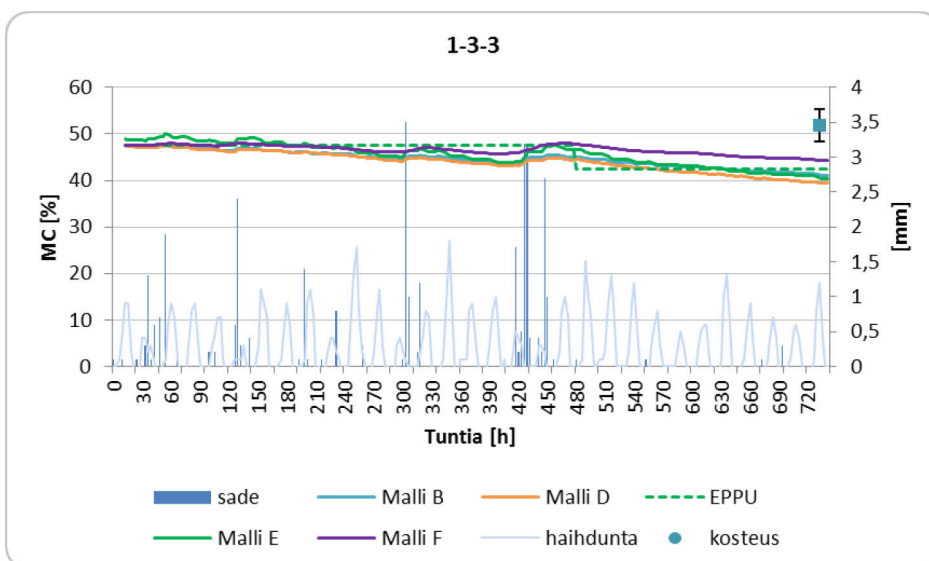
Kuvassa 14 on esitetty 49 latvusmassan koekorjuukohteen eri malleilla laskettujen ja mitattujen kosteuksien ero keskiluvut ja jakaumat. Etumerkiltään miinusmerkkinen ero tarkoittaa tässä sitä, että malli on tuottanut vertailuarvoa pienemmän kosteuden. Vastaavat korjuukohdekohtaiset kosteusarvot ja kosteuserot on esitetty liitteessä. Kuvan 14 kaaviossa keskimäinen palkki osoittaa kosteuserojen mediaanin ja virhepalkit vaihteluvälin (pienin ja suurin ero). Laatikoiden rajaaman eron sisällä on 50 prosenttia kosteuseroista. Mallin E osalta ei tässä ole käytetty säähavaintoaineistoa,

vaan kosteusmääritys on tehty EPPU-laskurilla. Malli E siis vastaa nykyisin käytössä olevan mittaomenetelmän mukaista kosteusmääritystä.

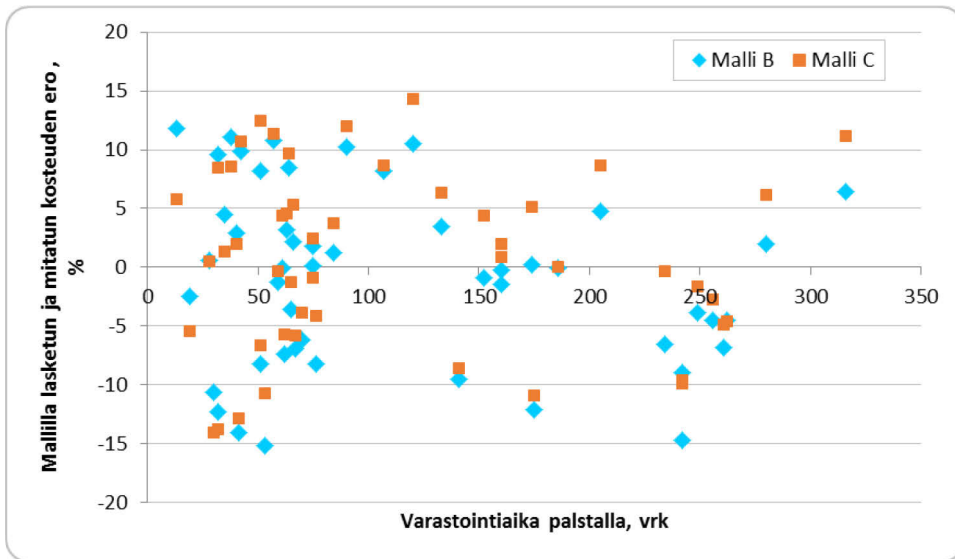
EPPU-laskurilla (kuva 14, Malli E) määritettyjen kosteuksien eron mediaani oli noin -3 prosenttiyksikköä. Vastaavasti Mallien B, C ja D kosteuserojen mediaanit, samoin keskiarvot olivat lähellä nollaa. Näiden mallien todenmukaisuus siis oli tässä aineistossa hyvä. On kuitenkin huomattava, että kosteuserojen mediaanit ja keskiarvot poikkesivat nolasta selvästi silloin, kun tarkasteltiin korjuukohteita niiden hakkuu- ja metsäkuljetusajankohtiin mukaisten luokkien sisällä. Erityisen ongelmallisia olivat loppukesän korjuukohteet (luokka 3), joissa mallit tuottivat vertailuarvoa selvästi pienempiä kosteuksia. Tämä on nähtävissä myös kuviin 15–17 valituista esimerkkikohteista. Talvikorjuukohteilla (luokka 1) useimmat mallit tuottivat keskimäärin hieman liian pieniä kosteuksia (kuva 15), vastaavasti kevään ja alkukesän korjuukohteella (luokka 2) mallista riippuen joko keskimäärin liian suuria tai pieniä kosteuksia (kuva 16). Vastaavasti loppukesän ja syksyn (luokka 3) kaikki mallit tuottivat keskimäärin liian pieniä kosteuksia. On siis todennäköistä, että tietyissä olosuhteissa ja vuodenaikoina kosteusmalleilla lasketut kosteusennusteet eivät ole todenmukaisia, siis kosteusennusteissa on systemaattista virhettä.

Kosteuserojen hajonta oli kautta linjan suurta, samoin kosteuserojen vaihteluväli oli parhaimmillaankin ± 15 prosenttiyksikön sisällä (kuva 14). Kosteusmalleilla tuotettujen kosteusennusteiden täsmällisyyttä voidaan pitää heikkona. Taulukossa 7 on esitty korjuukohdeluokittain niiden kosteusennusteiden kappalemäärä ja osuus, joissa kosteusero oli ± 5 prosenttiyksikön sisällä. Nykyisellä menetelmällä (EPPU-laskurilla, Malli E) tämän virherajan sisällä olivat 20 (41 prosenttia) koekorjuukohteen kosteusennusteet. Malleilla lasketut kosteusennusteet olivat asetetun virherajan sisällä (± 5 prosenttiyksikköä) 18–23 korjuukohteella (37–47 prosenttia). Loppukesän korjuukohteilla (luokka 3) virherajan sisällä olevien kosteusennusteiden osuus oli kautta linjan pienempi kuin talven (luokka 1) tai alkukesän (luokka 2) korjuukohteilla. Aineistossa oli joitakin korjuukohteita, joissa mitattu kosteus on yli 50 prosenttia tai alle 30 prosenttia. Lähes kaikissa näistä kohteista mallien tuottamat kosteusennusteet poikkesivat selvästi mitatusta kosteudesta.

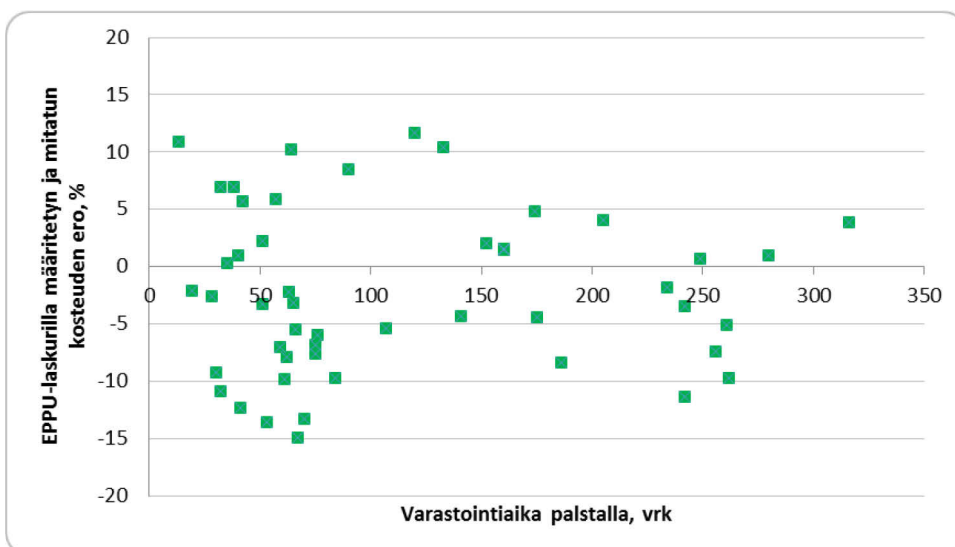
Koekorjuukohteiden latvusmassan palstavarastointiaika vaihteli 13–316 vuorokautteen. Kuvassa 18 on esitetty mallien B ja C kosteusennusteiden ja mitatun kosteuden kosteuserot korjuukohteen varastointiajan suhteen. Kuvassa 19 on sama tarkastelu EPPU-laskurilla määritetyille kosteuksille. Kosteuserot eivät näytä riippuvan varastointiajasta.



Kuva 17. Mallien B, D, E ja F kosteusennustekuvaajat, tuoretiheystaulukoiden mukainen kosteus (EPPU), mitattu kosteus ja mittausepävarmuus (MC, vasen pystyakseli) sekä sademäärä ja haihdunta (3h arvot, oikea pystyakseli) varastointiajan suhteen koekorjuukohteelle 1-3-3 (hakkuu VIII/2016, kosteuden mittausta IX/2016).



Kuva 18. Koekorjuukohteiden malleilla B ja C laskettujen ja mitattujen kosteuksien erot (ero = malli - mitattu) palstavarastointiajan suhteen.



Kuva 19. Koekorjuukohteiden EPPU -energiapuun mittauslaskurilla määritettyjen ja mitattujen kosteuksien erot (ero = EPPU - mitattu) palstavarastointiajan suhteen.

Korjuukohteiden kuivumisolosuhteita – maaston muotoa ja korkeutta, reunametsien vaikutusta ja palstan kosteustilannetta – arvioitiin ja luokiteltiin olosuhteet kolmiportaisen asteikon mukaan. Näistä tekijöistä ei pystytty löytämään syitä kosteusennusteiden ja mitattujen kosteuksien eroihin.

Kosteusmallien puutteellisen toimivuuden todellisten korjuukohteiden kosteusennustamisessa voidaan arvioida liittyvän lukuisiin eri tekijöihin. Tekijät liittyvät yhtäältä koejärjestelyihin, malleissa käytettyihin tekijöihin ja ylipäätään mallien kykyyn kuvata ilmiötä, ja toisaalta todellisilla korjuukohteilla käytettävissä oleviin lähtötietoihin, kosteusmäärittysten epävarmuuteen ja koejärjestelyiden ja todellisten korjuukohteiden vastaavuuteen. Näiden tekijöiden painotuksia ja vaikutusta kokonaisepävarmuuteen on vaikea määrittää.

Mekrijärvellä toteutettu koeasetelma mahdollisti uuden tavan havainnoida latvusmassan kosteuden lyhyen ajan kehitystä säämuuttujien suhteen. Kokeiden toteuttamisen kannalta välttämättömät rakennelmat, muun muassa mittauskehikot ja aluspaperit, aiheuttivat todennäköisesti epävarmuutta

kosteusmäärityksessä. Mittaustuloksen virheen mahdollisuus oli olemassa lähinnä sadejaksoilla tai niiden jälkeen, jolloin osa sadevedestä on ollut sitoutuneena kokeiden rakennelmiin. Tämän seurauksena sateen vaikutus kosteuden muutokseen on todennäköisesti tullut määritetyksi liian suureksi. Lisäksi on mahdollista, että ainakin kestoiltaan pisimpien kokeiden aikana koekasojen kuiva-ainesisältö on muuttunut, mikä aiheuttaisi systemaattista virhettä kosteusmäärityksessä. Edellisistä ja mahdollisesti muista tunnistamattomista syistä kokeiden kosteushavainnot ja -muutokset eivät ole täysin todenmukaisia, eivätkä aina myöskään keskenään johdonmukaisia säähavaintojen ja koekasojen koon suhteen.

Laaditut mallit ovat rajuja yksinkertaistuksia kuivumis- ja kastumisilmiöistä. Käytännössä kaikki vertailtavat mallit perustuvat säämuuttujien ja kosteusmuutoksen tilastollisten riippuvuuksien hakemiseen ilman varsinaista kausaliteettia. Malleja laadittaessa on toki pyritty löytämään ja muodostamaan muuttujia, joilla olisi selvä termofysiikan perusoppien kautta perusteltavissa oleva yhteys kosteusmuutokseen. Tällaisia olivat esimerkiksi muuttujat, joissa laskennallisesti määritettiin ilman ja puun pinnan absoluuttiset kosteudet, jolloin kosteusmuutoksen voimakkuus ja suunta perustuisi kosteuseroon siirtopinnalla. Tällaisten muuttujien löytäminen ja edelleen kosteuden mallintaminen on kuitenkin haasteellista osaltaan puutteellisten tietojen vuoksi; kosteusmuutoksen perusteellisempi mallintaminen edellyttäisi ainakin tarkkoja tietoja koekasojen koosta ja muodosta, mahdollisesti myös esimerkiksi koekasojen sisälämpötilan kehittymisestä. Lisäksi neulasten merkittävä osuus latvusmassakasoissa olisi otettava huomioon kosteuden vaihtelussa.

Latvusmassakasojen koko ja muoto ovat todennäköisesti yksi keskeisistä tekijöistä kosteusmuutoksessa. Voidaan perustellusti olettaa, että latvusmassakasojen kosteusmuutokseen voimakkuuteen vaikuttavat esimerkiksi sellaiset tekijät kuin pohjan pinta-alan ja kiintotilavuuden suhde (sateen vaikutus), kasan kokonaispinta-alan ja kiintotilavuuden suhde (haihdunta- ja kastumispinta-ala) tai kasan tiiviys (ilman kierto kasan sisällä). Kasojen kokonaispinta-alan suhde tilavuuteen pienentyy koon, siis tilavuuden, kasvaessa. Yksinkertaistaen voidaan ajatella, että latvusmassan tai minkä tahansa pinotun puutavarain kuivuminen on sitä nopeampaa, mitä suurempi pinta-alan ja tilavuuden suhde on. Tällöin haihduntapinta-ala ja esimerkiksi kasaan kohdistuva auringon säteilyteho tilavuuden suhteen ovat suurimmillaan. Vastaavasti kasaan kohdistuva sademäärä tilavuusyksikköä kohti on periaatteessa sitä pienempi mitä suurempi kasan tilavuus on. Sateen vaikutuksessa tekijänä on myös kasan muoto, jolloin sademäärä tilavuuskohti pienentyy myös kasan korkeuden ja pohjan pinta-alan suhteen kasvaessa. Vaikutusten suuruudet ja suunnat eivät kuitenkaan ole yksiselitteisiä. Esimerkiksi kasan korkeuden, tiiviiden, sademäärän ja sateen intensiteetin vaikutukset kasaan sitoutuvan ja ohivirtaavan sademäärän osuusiin ovat vaikeasti arvioitavissa.

Todellisilla latvusmassan korjuukohteilla kasojen koot ovat suuruusluokaltaan puolesta kahteen kiintokuutiometrin ($0,5\text{--}2\text{ m}^3$) suuruisia. Kasojen kokoon korjuukohteilla vaikuttavat paitsi hakattavan metsikön rakenne ja puuston oksamassan määrä, myös hakkuun ja latvusmassan korjuun työtapat. Mekrijärven kokeissa koekasojen koot vastasivat suuruusluokaltaan todellisten korjuukohteiden kasoja, mutta koekasojen tarkkaa tilavuutta tai tiiviyttä ei tunnettu. Koekasoista tunnettiin paitsi kokonaispaino, myös kuivapaino, jotka sinänsä kuvaavat koekasan kokoa. Kasojen kokoa ei kuitenkaan ollut edellyksiä käyttää kosteusmallien tekijöinä. Latvusmassakasojen kokoa ei pystytä ottamaan huomioon myöskään todellisten korjuukohteiden kosteusennusteiden laskennassa. Latvusmassakasojen koon vaihtelu aiheuttaa kosteusmalleilla määritettyihin kosteusennusteisiin vähintään täsmällisyyteen (satunnainen mittausepävarmuus), mutta mahdollisesti myös todenmukaisuuteen (systemaattinen mittausepävarmuus) liittyviä ongelmia.

Luonnollisesti todellisilla korjuukohteilla latvusmassan kosteus hakkuuajankohtana ei ole tunnettu. Siten kosteusennustemalleja käytettäessä hakkuuajankohdan kosteutena on käytettävä jotain annettua kosteusarvoa (alkukosteus). Tässä projektissa tarkasteluissa kosteusmalleissa on päädytty erilaisiin ratkaisuihin alkukosteuden määrityksessä. Osassa malleista on käytetty vakioitua alkukosteutta (mallit B, D, E ja F), osassa hakkuukuukauden mukaan vaihtuvaa alkukosteutta (malli C ja G). Kuusen latvusmassan kuten muunkin puuraaka-aineen tuorekosteus vaihtelee muun muassa vuodenajan, kasvupaikan, ja sääolosuhteiden mukaan. Kosteutta on kuitenkin mahdotonta arvioida täsmällisesti ilman mittauksia.

Johtuen mallien erilaisista rakenteista alkukosteuden arvon vaikutus loppukosteuteen vaihtelee. Osassa malleista alkukosteus on kriittinen tekijä ja sen muutos vaikuttaa lineaarisesti kosteusennusteen riippumatta palstavarastointiajan pituudesta. Vastaavasti osassa malleista alkukosteuden merkitys loppukosteuteen on vähäinen normaaleilla palstavarastointiajoilla. Voidaan arvioida, että todellisilla korjuukohteilla latvusmassan hakkuuajankohdan kosteuden (alkukosteus) vaikutus loppukosteuteen vähenee ajan suhteen. Tätä voidaan perustella muun muassa sillä tunnetulla ominaisuudella, että puuaineen kosteus on jatkuvassa muutostilassa kohti lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden määrittämää tasapainokosteutta. Muutos on sitä nopeampaa, mitä kauempana puun kosteus on tasapainokosteudesta. Siten puun, tässä tapauksessa latvusmassan, alkukosteuserojen voidaan mieltää ikään kuin tasoittuvan ajan suhteen.

Koekorjuukohteiden aineiston osalta on syytä ottaa huomioon vertailukosteuksiin liittyvä, pelkätään kosteusotannasta johtuva epävarmuus. Tavanomaista toimintatapaa selvästi suuremmillakin näytämäärillä ovat vertailukosteuksien tilastolliset mittausepävarmuudet ($k=2$) kesäkorjuukohteilla tasolla $\pm 3,5$, ja talvikorjuukohteilla $\pm 4,5$ prosenttiyksikköä. Lisäksi korjuukohteen yksittäisenä ajanhetkenä määritetty kosteus on tietoarvoltaan paitsi hyvin rajallinen, mutta myös eräällä tavalla satunnainen. Koska latvusmassan kosteus voi tietyissä olosuhteissa muuttua nopeasti, aiheuttaa kosteusmäärityksen ajanhetken valinta merkittävää vaihtelua kosteudessa. Tämänkaltaisen tarkastelu mallien toimivuudesta sovelluskohdetta vastaavassa tilanteessa ja käyttötarkoituksessa on toki tarpeellinen, mutta jää yksipuoliseksi ja suppeaksi. Käytännössä tutkimusaineiston havaintomäärä on vain 49 kappaletta.

Koekorjuukohteiden aineistojen perusteella voidaan tehdä ainoastaan suuntaa-antavia päätelmiä kosteusmallien ja niihin perustuvan kosteusmäärityksen soveltuvuudesta ja hyvydestä ylipäättään, ja verrattuna nykyiseen menetelmään. Koekorjuukohdeaineistojen perusteella ei ollut osoitettavissa, että kosteusmallien käytöllä olisi saavutettavissa parannusta latvusmassan kosteuden määrittämisessä nykyisin käytössä olevaan menetelmään verrattuna. Parhaiden kosteusmallien ja nykyisten tuoretiheystaulukoiden vertailukosteuksiin nähden lasketut kosteuserojen keskiarvot (todenmukaisuus) ja keskihajonnat (täsmällisyys) ovat samalla tasolla.

Puhtaasti mallien kosteusennusteille ja kosteuseroille laskettujen tunnuslukujen ja näiden tarkasteleiden perusteella mallit eivät ole riittävän hyviä hyödynnettäväksi latvusmassan tuoretiheyslukujen määrittämisessä. Käytännön kannalta oleellinen näkökulma on kuitenkin myös se, pystytäänkö kosteusmallien käyttöönotolla saavuttamaan parannusta nykyiseen menettelyyn verrattuna. Ei ole poissuljettua, että kosteusmalleilla voisi olla mahdollista saavuttaa parannusta nykyiseen menetelmään verrattuna muun muassa vuosien välisistä sääolosuhde-eroista johtuvien virheiden pienentämisen kautta. Kosteusmallien käytön etuna voidaan pitää sitä, että tällöin kosteuden määrittämisessä käytettäisiin paikallista toteutunutta säätietoa, kun nykyisten tuoretiheystaulukoiden käyttö perustuu pitkän aikavälin keskimääräisiin säätietoihin, minkä vuoksi menetelmä ei ota huomioon vuosien välisiä tai alueittaisia eroja sääolosuhteissa. Luonnollisesti tämä edellyttäisi sitä, että sovellettava kosteusmalli tuottaisi todenmukaisia kosteusennusteita erityyppisissä sääolosuhteissa ja eripituisilla palstavarastointijaksoilla. Koekorjuukohdeaineisto antaa kuitenkin viitteen siitä, että kosteusmallien tuottamien kosteusennusteiden todenmukaisuudessa on eroja hakkuun ja palstavarastointiajan ajoittumisen suhteen.

5. Energiapuun mittauslaskurin kehittäminen

Energiapuun mittauslaskuri tulisi olemaan palvelusovellus, jossa käytettäisiin kosteusennustemalleja ja säähavaintoaineistoja käyttäjän määrittämästä paikasta. Mittauslaskuri tuottaisi energiapuuerän päiväkohtaisia kosteusennusteita ja mittauksessa käytettäviä tuoretiheyslukuja (painon ja tilavuuden väliset muunnokset). Mittauslaskuria käytettäisiin energiapuuerien mittaustulosten laskentaan ja perusraporttien tuottamiseen.

Energiapuun mittauslaskurin ensimmäinen versio soveltuisi uudistushakkuualojen latvusmassan mittaukseen vahvistettavien kosteusennustemallien perustalta, mutta se olisi myöhemmin laajennettavissa muiden puutavaralajien mittaukseen. Käyttäjien kannalta vähitellen kosteusmallien käyttöön oton myötä korvaisi nykyisin käytettävän excel-pohjaisen EPPU -laskurin. Energiapuun mittauslaskurin keskeinen sisältö olisi latvusmassan kosteusennustemalli. Jotta mittauslaskuria voitaisiin puutavaran mittauslaissa tarkoitettuun mittaukseen, tulee käytettävissä olla Luonnonvarakeskuksen määräyksen perustuva kosteusennustemalli.

Tässä projektissa laadittiin ensimmäinen versio täysin uudesta kosteusennustemallien ja säähavaintoaineiston käyttöön perustuvasta energiapuun mittauslaskuri -ohjelmasta. Taustatöinä ohjelman laatimista varten oli täydennettävä Ilmatieteen laitoksen Luonnonvarakeskukseen säännöllisesti toimittaman hilasääaineiston sisältöä. Lisäksi oli erikseen järjestettävä luvat laskennan toteuttamiseksi Luonnonvarakeskuksen palvelimella.

Ohjelma tuottaa latvusmassa kosteusennusteen ja tuoretiheysluvun käyttäjän määrittämän paikan ja ajankohtien mukaan. Kosteusennusteen laskenta aloitetaan käyttäjän antamasta hakkuuajan kohdasta ja se päätetään mittauspäivään, jolle ohjelma tuottaa kosteusennusteen. Ohjelman sisäisessä laskennassa kosteusennusteita tuotetaan 3h välein hakkuupäivämäärän ja mittauspäivämäärän välisenä aikana. Mittauspäivämäärän kosteusarvo määritetään kyseisen päivän kosteusennustearvojen keskilukuna. Laskennassa käytetään 1 km x 1 km hilalta poimittua säähavaintoaineistoa.

Laskennan tuottamaa mittauspäivämäärän kosteusarvoa käytetään painon ja tilavuuden välisen muuntoluvun eli tuoretiheyden $[\text{kg}/\text{m}^3]$ laskennassa. Tuoretiheyden laskentaan käytettävä latvusmassan kuivatuoretiheys $[\text{kg}/\text{m}^3]$ sisältyy ohjelman laskentaan. Latvusmassan kiintotilavuus lasketaan käyttäjän ohjelmaan syöttämän latvusmassan painon ja laskennan tuottaman tuoretiheyden osamääränä. Liitteessä 2 on kuvakaappaus ensimmäisen ohjelmaversioiden käyttöliittymän näkymästä.

Energiapuun mittauslaskuri -ohjelman käyttöönotto edellyttäisi paitsi kosteusennustemallin vahvistamista, myös ohjelman jatkokehittämistä; ohjelmaan tarvittaisiin varsinaisen laskennan lisäksi myös raportointiin ja mittaustietojen koostamiseen liittyviä ominaisuuksia. Lisäksi Luonnonvarakeskuksen on arvioitava ja kartoitettava ohjelman tosiasiallinen tarve välittömästi ja muutaman vuoden aikajanelalla. On mahdollista tai jopa todennäköistä, että kosteusennustemalleja tulotaisiin sisällyttämään osaksi yhtiöiden omia järjestelmiä muutamassa vuodessa.

Viitteet

- Aalto, J., Pirinen, P., Heikkinen, J., Venäläinen, A. 2013. Spatial interpolation of monthly climate data for Finland: comparing the performance of kriging and generalized additive models. *Theoretical and Applied Climatology* 112(2013): 99-111
- Erber, G., Kanzian, C., Stampfer, K. 2012: Predicting moisture content in a pine logwood pile for energy purposes. *Silva Fennica* 46(4): 555–567.
- Erber, G., Routa, J., Wilhelmsson, L., Raitila, J., Toiviainen, M., Riekkinen, J., Sikanen, L. 2014. A prediction model prototype for estimating optimal storage duration and sorting. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 297. 76 s.
- Filbakk, T., Høibø, O., Nurmi, J., 2011. Modelling natural drying efficiency in covered and uncovered piles of whole broadleaf trees for energy use. *Biomass and bioenergy* 35(2011) 454–463.
- Filbakk, T., Høibø, O., 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(3): 267–277.
- Gislerud, O. 1974. Helttreutnyttelse. II Biomasse og biomasseegenskaper hos tynnigsvirke av gran, furu, bjork og or. Rapp. Norsk Inst. Skogforsk 6/74: 1–59.
- Hakkila, P. 1962. Polttohakepuun kuivuminen metsässä. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 54.
- Heiskanen, V.-P., Raitila, J. & Hillebrand, K. 2014. Varastokasassa olevan energiapuun kosteuden muutoksen mallintaminen. VTT-R-08637-13. 27 s.
- Jahkonen, M., Lindblad, J., Sirkiä, S. & Laurén, A. 2012. Energiapuun kosteuden ennustaminen. *Metlan työraportteja* 241. 35 s.
- Kärkkäinen, M. 1976. Puun ja kuoren tiheys ja kosteus sekä kuoren osuus koivun, kuusen ja männyn oksissa. *Silva Fenn* 10: 212–236.
- Kärkkäinen, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. *Metsäkustannus Oy*. 468 s.
- Laki puutavaran mittauksesta 414/2013. Helsinki 14.6.2013. Suomen säädöskokoelma.
- Laki puutavaran mittauksesta annetun lain muuttamisesta 566/2014. Naantali 27.6.2014. Suomen säädöskokoelma.
- Laki puutavaran mittauksesta annetun lain muuttamisesta 725/2016. Helsinki 25.8.2016. Suomen säädöskokoelma.
- Jahkonen, M., Lindblad, J., Sirkiä, S. & Lauren, A. 2012. Energiapuun kosteuden ennustaminen. *Metlan työraportteja* 241. 35 s.
- Lindblad, J. 2016. Latvusmassan tuoretiheyslukujen sadekorjaus. Raportti Energiapuun mittauksen jaostolle. 12 s.
- Lindblad, J., Jahkonen, M., Sirkiä, S. 2013. Latvusmassan tuoretiheyslukujen uudistaminen. Raportti Energiapuun mittaustoimikunnalle. *Metsäntutkimuslaitos*. 16 s.
- Metsäntutkimuslaitoksen määräys puutavaran mittaukseen liittyvistä yleisistä muuntoluvuista annetun Metsäntutkimuslaitoksen määräyksen liitteen muuttamisesta. Määräys nro 2/2013. 18.12.2013. *Viranomaisten määräyskokoelmat*.
- Nurmi, J. 1999. The storage of logging residue for fuel. *Biomass & Bioenergy* 17: 41–47.
- Nurmi, J. & Hillebrand, K. 2001. Storage alternatives affect fuelwood properties of Norway spruce logging residues. *New Zealand Journal of Forestry Science* 31(3): 289–297.
- Pirinen, P., Simola, H., Aalto, J., Kaukoranta, J.-P., Karlsson, P., Ruuhela, R. 2012. Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010. Raportteja 2012:1, Ilmatieteen laitos. Helsinki. 83 s.
- Puupolttoaineiden laatuohje. VTT-M-07608-13 – päivitys 2014. 66 s.
- Ronkainen, P., 2010. Latvusmassan kosteuden määrittäminen metsäkuljetuksen yhteydessä. *Metsätieteen pro gradu, metsä- ja puuteknologia*. Itä-Suomen yliopisto, Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta. 60 s.

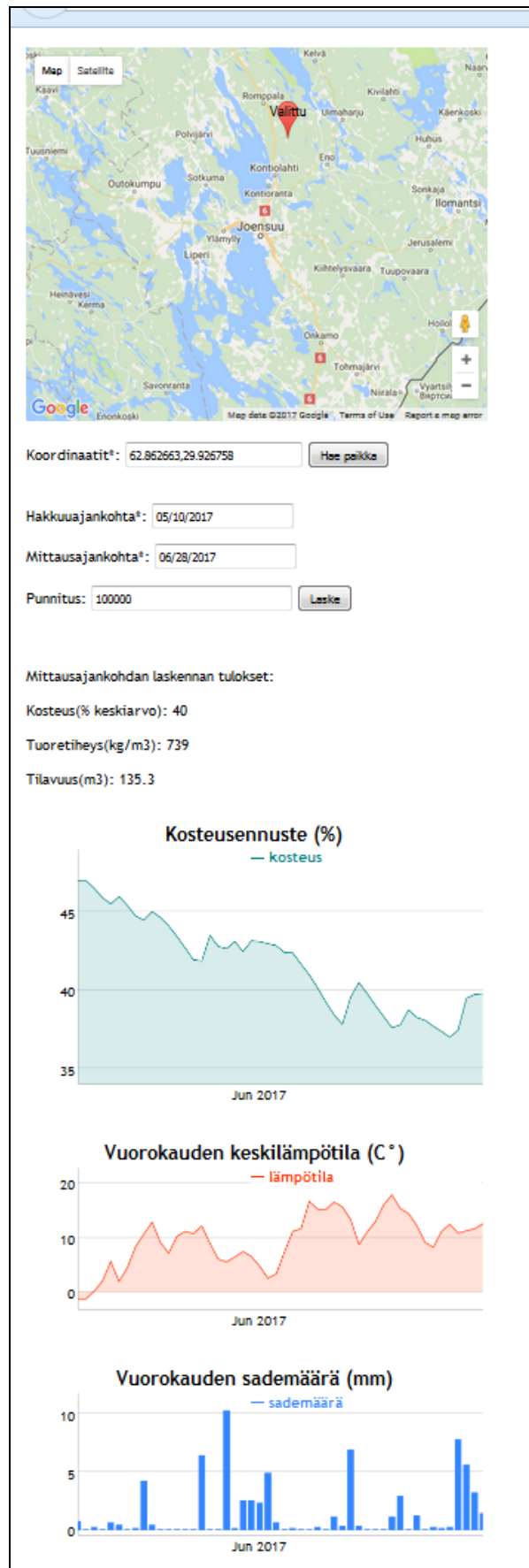
- Ronkainen, P., Sirkiä, S. & Lindblad, J., 2014. Harvennusenergiapuun ja latvusmassan kosteuden määrittäminen metsäkuljetuksessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2014: 211–228.
- Routa, J., Kolström, M., Ruotsalainen, J., Sikanen, L., 2012. Forecasting moisture changes of energy wood as a part of logistic management. In: Special issue. Abstracts for international conferences organized by LSFRI Silava in cooperation with SNS and IUFRO. *Mezzinatne* 25: 33–35.
- Routa, J., Kolström, M., Ruotsalainen, J., Sikanen, L. 2015a. Precision Measurement of Forest Harvesting Residue Moisture Change and Dry Matter Losses by Constant Weight Monitoring. *International Journal of Forest Engineering* 26(1): 71–83.
- Routa, J., Kolström, M., Ruotsalainen, J. & Sikanen, L. 2015b. Validation of Prediction Models for Estimating the Moisture Content of Small Diameter Stem Wood. *Croatian Journal of Forest Engineering* 36(2015)2: 283–291.
- Routa, J., Kolström, M., Ruotsalainen, J., Sikanen, L. 2016. Validation of prediction models for estimating the moisture content of logging residues during storage. *Biomass and bioenergy* 94: 85–93.
- Vajda, A., Venäläinen, A., Suomi, I., Junila, P. & Mäkelä, H.M., 2014. Assessment of forest fire danger in a boreal forest environment: description and evaluation of the operational system applied in Finland. *Meteorol. Appl.* 21: 879–887 (2014).
- Venäläinen, A., Salo, T., & Fortelius, C. 2005. The use of numerical weather forecast model predictions as a source of data for irrigation modelling.

Liite 1. Latvusmassan koekorjuu- ja toimituskohteet, hakkuu- ja metsäkuljetusajankohdat sekä latvusmassan mitattu ja malleilla laskettu kosteus (MC [%]) ja näiden ero (Δ MC [%]) metsäkuljetusajankohtana.

Korjuukohte	Toimituskohte	Hakkuu	Metsäkuljetus	Mitattu kosteus, %	Malli B		Malli C		Malli D		Malli E (EPPU)		Malli F		Malli G	
					MC	Δ MC	MC	Δ MC	MC	Δ MC	MC	Δ MC	MC	Δ MC	MC	Δ MC
					[%]											
1-1-1	Hämeenkyrö	22.12.2015	30.5.2016	41	40	-1	43	2	39	-3	43	1	48	7	46	5
1-1-2	Hämeenkyrö	29.9.2015	4.6.2016	42	38	-4	40	-2	36	-6	43	1	43	1	31	-11
1-1-3	Hämeenkyrö	12.9.2015	30.5.2016	48	41	-7	43	-5	39	-9	43	-5	49	1	42	-5
1-1-4	Hämeenkyrö	2.1.2016	22.5.2016	52	42	-9	43	-9	40	-12	48	-4	51	-1	43	-9
1-1-5	Hämeenkyrö	18.12.2015	26.5.2016	41	41	0	42	1	39	-2	43	2	50	9	41	0
1-1-6	Hämeenkyrö	25.9.2015	24.5.2016	51	42	-9	41	-10	39	-12	48	-4	50	-1	38	-13
1-2-1	Hämeenkyrö	12.5.2016	10.7.2016	40	38	-1	39	0	40	0	33	-7	25	-14	30	-9
1-2-2	Hämeenkyrö	20.6.2016	9.7.2016	45	42	-2	39	-5	43	-2	43	-2	42	-2	43	-2
1-2-3	Hämeenkyrö	28.5.2016	7.7.2016	37	39	3	39	2	40	4	38	1	29	-7	33	-4
1-2-4	Hämeenkyrö	9.6.2016	7.7.2016	40	41	1	41	1	43	2	38	-3	39	1	42	2
1-2-5	Hämeenkyrö	5.6.2016	17.7.2016	32	42	10	43	11	43	11	38	6	35	3	45	13
1-3-1	Hämeenkyrö	19.8.2016	20.9.2016	53	41	-12	40	-14	40	-14	43	-11	31	-22	43	-10
1-3-2	Hämeenkyrö	29.7.2016	20.9.2016	56	41	-15	45	-11	40	-16	43	-14	34	-23	52	-4
1-3-3	Hämeenkyrö	17.8.2016	16.9.2016	52	41	-11	38	-14	39	-12	43	-9	33	-19	42	-10
1-3-4	Hämeenkyrö	25.7.2016	14.9.2016	46	38	-8	39	-7	37	-9	43	-3	28	-18	38	-8
1-3-5	Hämeenkyrö	30.7.2016	30.9.2016	50	43	-7	45	-6	41	-9	43	-8	31	-19	51	1
1-3-6	Hämeenkyrö	12.8.2016	22.9.2016	55	41	-14	42	-13	40	-15	43	-12	29	-26	47	-8
2-1-1	Kaipola	16.9.2015	22.6.2016	37	39	2	43	6	38	2	38	1	40	4	38	1
2-1-2	Kaipola	16.1.2016	16.6.2016	36	35	-1	40	4	33	-3	38	2	41	6	30	-6
2-1-3	Kaipola	20.4.2016	23.6.2016	27	36	8	37	10	36	9	38	10	26	-2	25	-2
2-1-4	Kaipola	5.12.2015	27.6.2016	34	38	5	42	9	39	5	38	4	36	2	27	-6
2-1-5	Kaipola	17.1.2016	21.7.2016	41	41	0	41	0	43	2	33	-9	22	-19	25	-16
2-1-6	Kaipola	1.3.2016	29.6.2016	26	36	10	40	14	37	11	38	12	19	-6	25	-1
2-1-7	Kaipola	30.3.2016	28.6.2016	29	39	10	41	12	40	11	38	8	30	1	27	-2

Korjuukohde	Toimitus- kohde	Hakkuu	Metsä- kuljetus	Mitattu kosteus, %	Malli B		Malli C		Malli D		Malli E (EPPU)		Malli F		Malli G	
					MC	ΔMC	MC	ΔMC	MC	ΔMC	MC	ΔMC	MC	ΔMC	MC	ΔMC
					[%]											
2-2-1	Kaipola	6.5.2016	20.7.2016	40	42	2	39	-1	44	4	33	-8	17	-24	25	-15
2-3-1	Kaipola	16.7.2016	23.8.2016	31	42	11	39	9	44	13	38	7	40	9	39	8
2-3-2	Kaipola	9.6.2016	14.8.2016	38	40	2	43	5	44	6	33	-6	34	-4	47	9
2-3-3	Kaipola	12.6.2016	12.8.2016	42	42	0	47	4	46	3	33	-10	37	-6	55	13
2-3-4	Kaipola	25.7.2016	7.8.2016	32	44	12	37	6	45	14	43	11	44	12	44	13
2-3-5	Kaipola	20.7.2016	24.8.2016	37	42	5	39	1	45	7	38	0	41	4	42	4
2-3-6	Kaipola	24.7.2016	25.8.2016	36	45	10	44	8	46	11	43	7	46	10	50	14
3-1-1	Kotka	26.11.2015	19.5.2016	52	40	-12	41	-11	38	-14	48	-5	42	-10	38	-14
3-1-2	Kotka	25.10.2015	23.6.2016	49	34	-15	39	-10	35	-14	38	-11	28	-21	25	-24
3-1-3	Kotka	8.12.2015	30.5.2016	38	38	0	43	5	37	-1	43	5	38	1	38	0
3-1-4	Kotka	11.10.2015	1.6.2016	44	38	-7	44	0	35	-9	43	-2	40	-5	40	-4
3-1-5	Kotka	7.1.2016	19.5.2016	37	41	3	44	6	37	0	48	10	47	10	41	4
3-2-1	Kotka	25.5.2016	27.7.2016	35	38	3	39	5	41	6	33	-2	24	-11	28	-7
3-2-2	Kotka	31.5.2016	27.7.2016	27	38	11	38	11	40	14	33	6	24	-2	25	-2
3-2-3	Kotka	1.6.2016	15.8.2016	39	40	0	42	2	42	3	33	-7	28	-11	37	-2
3-2-4	Kotka	23.5.2016	15.8.2016	37	39	1	41	4	41	4	28	-10	19	-19	32	-6
3-2-5	Kotka	10.5.2016	25.8.2016	33	41	8	42	9	43	10	28	-6	19	-14	32	-1
3-3-1	Kotka	25.6.2016	31.8.2016	48	41	-7	42	-6	43	-5	33	-15	35	-13	39	-8
3-3-2	Kotka	12.6.2016	2.8.2016	30	39	8	43	12	41	11	33	2	31	0	45	15
3-3-3	Kotka	5.7.2016	19.9.2016	49	40	-8	44	-4	41	-8	43	-6	24	-25	46	-3
3-3-4	Kotka	1.8.2016	5.10.2016	46	42	-4	44	-1	40	-6	43	-3	25	-21	52	6
4-1-1	Oulu	13.5.2016	22.7.2016	46	40	-6	42	-4	44	-2	33	-13	34	-12	38	-8
4-1-2	Oulu	20.8.2015	1.7.2016	34	40	6	45	11	40	6	38	4	50	16	46	13
4-1-3	Oulu	1.11.2015	14.7.2016	45	41	-4	42	-3	43	-2	38	-8	47	2	31	-14
4-1-4	Oulu	27.10.2015	15.7.2016	47	43	-5	43	-5	44	-4	38	-10	49	2	35	-12

Liite 2. Energiapuun mittausrakurin ensimmäisen version käyttöliittymänäkymä. Laskuri käyttää kosteusennustemallia ja paikallista säähavaintoaineisto.





luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000