



■ Mervi Kokkila

Mervi Kokkila

Ilmastonmuutoksen vaikutus puunkorjuun talvikauden korjuuoloihin hienojakoisella kivennäismaalla

Kokkila, M. 2013. Ilmastonmuutoksen vaikutus puunkorjuun talvikauden korjuuoloihin hienojakoisella kivennäismaalla. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2013: 5–18.

Tutkimuksessa tarkastellaan talvikorjuulojen muutoksia jaksoilla 2011–2020 ja 2021–2030 jaksoon 1971–2000 verrattuna. Tutkimus on toteutettu simuloimalla lumi- ja routaoloja säägeneraattorin ja maaperämallin avulla Juupajoen, Maaningan ja Kajaanin ilmasto-oloissa. Ilmaston muutosarvioina käytettiin ACCLIM-tutkimushankkeessa esitetyjä keskilämpötilan ja sademäärän muutoksen mediaaniskenaarioita, jaksoille 2011–2020 ja 2021–2030. Simuloinnit toteutettiin hiesumaapohjalle aukeaa ja ensiharvennusikäistä kuusikkoa vastaavissa kasvipeiteoloissa. Simulointituloksia on verrattu kulkukelpoisuuskriteereihin, ja tämän perusteella on määritetty talvikorjuukauden laskennallinen pituus erilaisissa ilmasto-oloissa. Kriteereinä käytettiin yli 20 cm paksua routakerrosta ja alle 5 cm paksua pintasulaa kerrosta tai roudattoman maan tapauksessa yli 40 cm paksua lumikerrosta.

Simulointien perusteella keskimääräinen laskennallinen talvikorjuukauden pituus lyhenee tarkastelujaksolla kaikilla kolmella tutkimuspaikkakunnalla. Eniten korjuukausi lyheni Juupajoella, jossa jakson (2021–2030) ilmasto-oloissa laskennallinen talvikorjuukausi oli kuusikkoa vastaavissa kasvipeiteoloissa 35 % ja aukealla 28 % lyhyempi kuin vertailuilmaston oloissa. Lumi- ja routamäärät olivat Juupajoen simuloinneissa hyvin lähellä tässä käytettyjä kulkukelpoisuuskriteerien alarajoja ja voidaan olettaa, että ilmaston lämpeneminen tästä edelleen merkitsisi näiden kriteerien mukaisten talvikorjuulojen hyvin nopeaa harvinaistumista Juupajokea ilmastollisesti vastaavissa oloissa. Maaningan ja Kajaanin osalta vastaavaa nopeaa muutosta ei sen sijaan ollut tarkastelujaksolla nähtävissä.

Asiasanat: CoupModel, ilmastonmuutos, kivennäismaat, mallit, *Picea abies*, puunkorjuu, simulointi
Sähköposti mervi.kokkila@kotikone.fi

Hyväksytty 21.11.2012

Saatavissa <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff13/ff131005>

I Johdanto

Koneellista puunkorjuuta varten korjuukohteet on perinteisesti jaettu kolmeen luokkaan kohteen saavutettavuuden, korjuukohteen maaperän sekä puuston vaurioitumisriskin perusteella. Luokituksessa talvikorjuukelpoisiksi kohteiksi on määritelty kohteet, jotka ovat saavutettavissa, tai joilla puunkorjuu on mahdollista vain maan ollessa jäätynyt. Kelirikkoilmikoilla puunkorjuu ja puutavaran kuljetus on mahdollista kaikissa oloissa ja kesäkorjuukelpoisilla korjuukohteilla muulloin kuin kelirikon aikana. Käytännössä talvikorjuukelpoisiksi korjuukohteiksi ovat maaperän ja puuston perusteella päätyneet kuusikoiden harvennushakkuut ja puunkorjuu turvemaiilla. Perinteisen korjuukelpoisuusluokituksen muuttaminen on kuitenkin tullut aiempaa ajankohtaisemmaksi, kun vaateet hyvään korjuujälkeen sekä ympärivuotiseen ja tasaiseen puunkorjuuseen ovat lisääntyneet ja samaan aikaan ilmaston lämmitessä puunkorjuu täytyy sopeuttaa entistä vaihtelevampiin korjuuoloihin.

Ilmatieteen laitos on esittänyt ilmastonmuutosarvioita mm. ACCLIM-tutkimushankkeessa (Jylhä ym. 2009). Näiden arvioiden mukaan jo jaksolla 2011–2020 talvikuukausien keskilämpötila Etelä-Suomessa kohoaisi 1,3 °C käytettyyn vertailujaksoon 1971–2000 nähden ja seuraavalle vuosikymmenelle vastaava arvio olisi jo 1,9 °C. Tämän lisäksi myös kevään ja syksyn keskilämpötilat kohoaisivat n. 1 °C vastaavaan vertailujaksoon nähden. Samaan aikaan sademäärän arvioidaan lisääntyvän muutamia prosentteja. Onkin tärkeää, että ilmaston muuttamisen vaikutuksia tarkastellaan toimialakohtaisesti ilmastonmuutoksen sopeutumistutkimuksissa.

Ilmastonmuutokseen sopeutumisessa keskeisiä tarkasteltavia tekijöitä ovat puunkorjuun näkökulmasta routa- ja lumiolosuhteiden muutokset. Näitä tekijöitä ovat Suomen osalta tarkastelleet Kellomäki ym. (2010) sekä Venäläinen ym. (2001a ja 2001b). Alueellisesti kattavimpia ja em. tutkimuksista parhaiten puunkorjuun näkökulman huomioon ottavia arvioita ovat antaneet Kellomäki ym. (2010), jotka ovat simuloineet säägeneraattorin ja maaperämallin avulla ilmastonmuutoksen vaikutuksia maaperän vesipitoisuuteen ja routaan sekä lumikerrokseen puuttomilla kivennäismailla sekä lähitulevaisuudessa

että pidemmällä aikavälillä. He ovat myös antaneet simulointien perusteella yleisiä arvioita puunkorjuun korjuuolosten muutoksista. Venäläinen ym. (2001a) puolestaan esittelevät simulointituloksia hiekkamoreenimaalla kasvavan männikön routa- ja lumisuhteista tämän vuosisadan lopulla. Venäläinen ym. (2001b) ovat arvioineet pakkaskertymään perustuen ilmastonmuutoksen vaikutusta routaantumiseen lumettomilla pinnoilla.

Simulointien (Kellomäki ym. 2010, Venäläinen ym. 2001a) perusteella lumipeite keskimäärin sekä ohenee että lumipeitteinen kausi lyhenee. Tosin sademäärän lisääntyminen voi joillakin alueilla vielä lähitulevaisuudessa merkitä myös paksumpaa lumipeitettä. Tällöin merkitystä on luonnollisesti sillä, missä lämpötilassa sadanta tulee ja miten leudot jaksot vaikuttavat lumen kerrospaksuuteen. Roudan osalta vaikutukset ovat samansuuntaiset eli routakerros keskimäärin ohenee ja maaperän routa-aika lyhenee, tosin tällöinkin esiintyy alueellisia eroja. Routaantumisen osalta merkitystä on mm. sillä, miten lumipeitteen kerrostuminen ja pakkasjaksot ajoittuvat alkutalvella ja miten lumipeitteen kerrospaksuus ja lumipeitteen lämmönjohtavuusominaisuudet ja siten lumen eristevaikutus muuttuvat. Kellomäen ym. (2010) mukaan myös maaperän syys- ja talvikauden kosteus lisääntyy, mikä yhdessä roudan vähenemisen kanssa voi heikentää maaperän kantavuutta.

Tutkimustulosten perusteella muutosten voidaan olettaa lyhentävän keskimääräistä talvikorjuukauden pituutta sekä pidentävän syksyn ja kevään kelirikkokautta. Talvikorjuuolosten esiintyminen voi muuttua satunnaisemmaksi myös alueilla, joilla olosuhteet ovat aiemmin suosineet talvikorjuuta, ja talvikorjuukaudet voivat muuttua rikkonaisemmaksi. Korjuukohdetasolla tämä merkitsee sitä, että osa kuusikoiden harvennuksista sekä turvemaiden puunkorjuusta on tehtävä sulan maan aikaan ja kelirikkokaudellakin käsiteltävissä olevia kivennäismaiden korjuukohteita tarvitaan lisää.

Ilmastonmuutoksen sopeutumistarpeiden arviointia voidaan kuitenkin puunkorjuun näkökulmasta viedä astetta pidemmälle, jos keskitytään pelkkien routa- ja lumiolosuhteiden muutosten sijaan tarkastelemaan sitä, kuinka nämä muutokset vaikuttavat korjuukoneiden käyttömahdollisuuksiin. Puunkorjuun näkökulman huomioon ottavassa sopeutumis-

tutkimuksessa myös tarkastelujen aikajänteen lyhentäminen on tärkeää. Erityisesti Etelä-Suomessa talvikorjuun olosuhteet ovat perinteisestikin olleet vaihtelevia ja siten varsin vähäinen ilmaston muuttuminen voi aiheuttaa merkittäviä muutoksia talvikauden korjuuolosuhteissa.

Tässä tutkimuksessa keskitytään arvioimaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia hienojakoisella kivennäismaalla kasvavien ensiharvennusikäisten kuusikoiden talvikorjuulojen muutoksiin jaksolla 2011–2020 ja 2021–2030. Turvemaat on rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle, koska turvealusta poikkeaa olennaisesti kivennäismaista sekä kulkelpoisuusominaisuuksien että roudan muodostumisen osalta. Korjuulojen muutoksia kuvataan pyöreälustaisen kuormatraktorin laskennallisilla korjuukauden pituuksilla erilaisissa ilmasto-oloissa. Tutkimus on toteutettu simuloimalla maaperämallin ja säätilageneraattorin muodostamalla mallijärjestelmällä routa- ja lumiolosuhteita kolmella maan keskiosassa sijaitsevalla tutkimuspaikkakunnalla.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Tutkimusalueet

Routa- ja lumisimuloinnit toteutettiin Juupajoen (61°50'; 24°17'), Maaningan (63°08'; 27°18') sekä Kajaanin (64°16'; 27°40') vertailu- ja muutosilmastojen olosuhteissa. Vertailuilmaston säähavainnoista laskettuna sekä vuoden keskilämpötila että talvikuukausien keskilämpötilat alenevat tasaisesti Pirkanmaalta Kainuun suuntaan. Näin ollen tutkimukseen valittujen paikkakuntien avulla saadaan läpileikkauskuva puuntuotannon näkökulmasta merkittävän Suomen keskiosan talvikorjuulojen lähivuosisikymmenten muutoksista.

Maakunnallisesti tarkasteltuna Juupajoen sademäärä on vuositasolla suurempi kuin keskimäärin muualla Pirkanmaalla. Maaningalla puolestaan paikallisiin ilmastoon vaikuttaa merkittävimmin sijainti Kallaveden laaksossa, jolloin vesistö toimii ilmastoa lämmittävänä tekijänä. Kajaani edustaa Kainuun eteläosien ilmastollisesti edullisempaa järvi- ja jokilaaksoa. Kajaanin säähavaintojen ja simulointitulosten tarkastelussa on myös syytä ottaa huo-

mioon, että säähavaintoasema sijaitsee Oulujärven itäreunalla ja alue poikkeaa erityisesti sademäärien osalta huomattavasti vaaraseutujen runsassateisista alueista. (Kersalo ja Pirinen 2009)

Huttunen ja Soveri (1993) ovat esittäneet routahavaintoihin perustuvan routa-aluejaon, jossa Juupajoki sijoittuu II-alueeseen eli Kaakkois-, Keski- ja Länsi-Suomen sisämaahan. Näillä alueilla lumipeite on rannikkoalueita jonkin verran paksumpi ja routa ei siten pääse tunkeutumaan yhtä syväälle kuin rannikkoalueilla. Maaninka ja Kajaani sijaitsevat II- ja III-alueiden rajalla. Alueelle III on tyypillistä, että lumipeite sataa maahan jo yleensä talven alussa ennen pakkaskausia, joten routa jää paksuudeltaan usein alle 20 cm:n. Tätä aluetta voidaankin luonnehtia Suomen vähäroutaisimmaksi alueeksi.

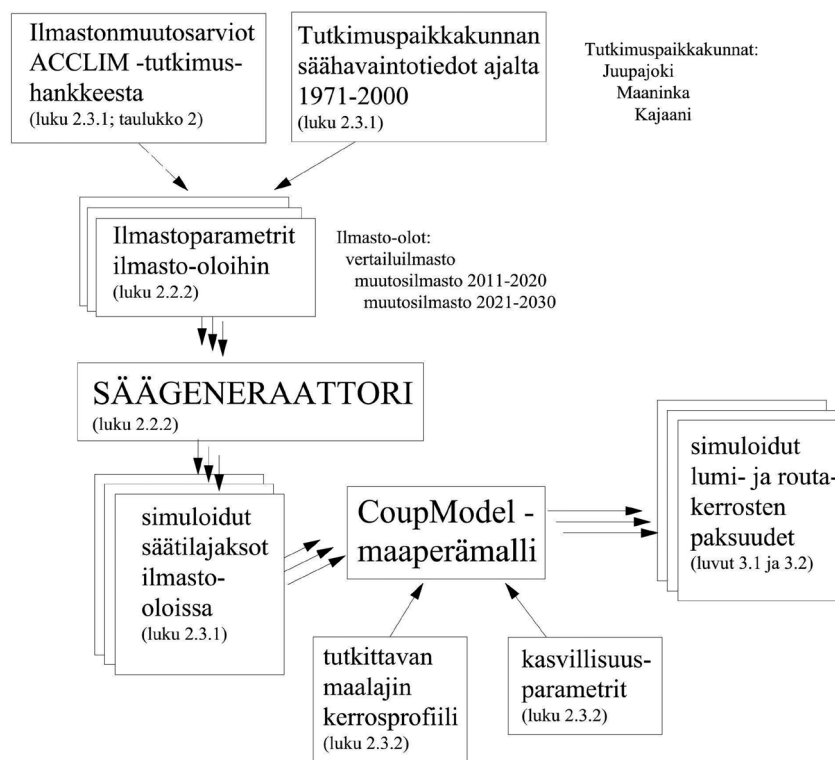
2.2 Simulointimalli

2.2.1 Maaperämalli

Tutkimuksessa käytetty mallijärjestelmä on esitetty kuvassa 1. Järjestelmän ytimen muodostaa ruotsalainen maaperämalli CoupModel (versio 3.2, October 2009) (Jansson ja Karlberg 2004; KTH 2009), jolla voidaan simuloida maaperäprofiilin lämpö- ja vesitalousmuuttujien vasteita erilaisiin säätilasyyteisiin. Xarpellin ym. (2010) tutkimuksessa malli kykeni kuvaamaan hyvin maaperän routautumista ja sulamista Pohjois-Karjalan hiekkaisen Jaamankankaan kuusikossa. Venäläinen ym. (2001a), Peltola ym. (1999) ja Kellomäki ym. (2010) ovat aiemmin soveltaneet mallin eri versioita ilmastonmuutoksen vaikutusarviointeihin.

2.2.2 Sägeneraattori

Maaperämallin syötetietona käytetyt säätilat generoitiin jonkin verran alkuperäisestä Strandmanin ym. (1993) kuvaamasta sägeneraattorista muute- tulla mallilla. Generaattorin perusideana on tuottaa tietyn ilmaston ilmastoparametrien avulla kyseisen ilmaston mukaisia säätiloja käyttäjän määrittelemälle aikavälille. Mallin tuottamia päiväkohtaisia säätilamuuttujia ovat vuorokauden sadekertymä, keskimääräinen lämpötila, ilman suhteellinen kos-



Kuva 1. Tutkimuksessa käytetty mallijärjestelmä. Ilmastoparametrien ja säägeneraattorin avulla tuotettuja eri ilmasto-olojen säätilajaksot käytetään syötteenä CoupModel-maaperämallissa. Kuvaukset järjestelmän osista on esitetty lukuviittausten mukaisissa artikkelin kohdissa.

teus, pilvisuus sekä tuulen nopeus. Näistä lämpötila ja sademäärä ovat tämän tutkimuksen näkökulmasta keskeisimmät muuttujat.

Malliin tehdyt merkittävimmät muutokset liittyvät mallin vuorokauden keskilämpötilan generointiin. Alkuperäinen malli tuottaa lämpötila-arvojen kuukausikohtaisen tarkastelun perusteella normaalijakaumaa noudattavia lämpötila-arvoja. Tämä ei kuitenkaan vastaa todellisuutta talvikuukausina, jolloin kuukausikohtaiset vuorokauden keskilämpötilojen jakaumat ovat vasemmalle vinoja ja keskiarvoa suurempia lämpötiloja on runsaasti. Näiden lämpötilojen poikkeamat keskilämpötilasta ovat kuitenkin suhteellisen pieniä toisin kuin keskiarvoa alhaisemmissa lämpötiloissa, joissa voi olla suurtakin vaihtelua. Jakauman vinous näkyi selvästi tutkimuspaikkakuntien vuosien 1971–2000 lämpötilahavaintojen frekvenssijakaumissa ja havainnoista lasketuissa jakauman vinoutta kuvaavissa tunnusluvuissa. Rou-

dan muodostumisen ja lumen kertymisen kannalta tällä on merkitystä, koska vaikka kuukauden keskilämpötila olisikin huomattavasti 0°C alapuolella voi havaintoarvojen moodi olla hyvin lähellä 0°C ja näin ollen olosuhteet roudan muodostumisen kannalta epäedulliset.

Strandman ym. (1993) säägeneraattorissa vuorokauden (d) keskilämpötila (DT) tuotetaan yhtälöllä:

$$DT(d) = \mu_{mT} + \rho_{mT} \times (DT(d-1) - \mu_{mT}) + \sigma_{mT} \times n_i \times (1 - \rho_{mT}^2)^{1/2} \quad (1)$$

missä μ_{mT} on kuukauden keskilämpötila, ρ_{mT} on kuukausikohtainen keskilämpötilan autokorrelaatio, $DT(d-1)$ edellisen vuorokauden simuloitu keskilämpötila, σ_{mT} on keskilämpötilan keskihajonta ja n_i on normaalijakautunut satunnaisluku $N(0,1)$. Tässä tutkimuksessa satunnaisluku n_i noudatti vinoa normaalijakaumaa $SN(0,1,\alpha)$, jossa α kuvaa jakau-

man vinoutta ja määritettiin kuukausikohtaisesti tutkimuspaikkakuntien lämpötilahavainnoista. Kun $\alpha = 0$, $n_i \sim N(0,1)$ (Azzalini 2005). Toinen muutos oli kuukauden keskilämpötilan (μ_{mT}) ja vastaavasti keskilämpötilan keskihajonnan (σ_{mT}) korvaaminen 30 vuoden havaintoihin perustuvilla keskilämpötilan μ_{DT} ja keskihajonnan σ_{DT} päiväkohtaisilla keskiarvoilla. Tällä on merkitystä erityisesti generoitaessa lämpötiloja syksyn kylmetessä ja kevään lämmitessä, koska tällöin vältetään kuukausikohtaisen parametrin käytön lämpötilan generointiin tuottamat hyppäyksenomaiset viiveet ja porrastukset. Poikkeaman ($DT(d-1) - \mu_{mT}$) laskennassa μ_{mT} korvattiin arvolla $\mu_{(d-1)T}$.

Vuorokauden sademäärä (*paivasadanta* (d)) generoitiin tässä tutkimuksessa kyseiselle päivälle simuloitua pilvisyyttä (*pilvet*(d)) vastaavan odotettavissa olevan sadannan (*odotettu_sadanta*(d)), sadannan keskihajonnan ($\sigma_{sadanta}$) ja normaalijakautuneen satunnaistekijän $n_j \sim N(0,1)$ avulla seuraavasti:

$$\text{paivasadanta}(d) = \text{odotettu_sadanta}(d) + n_j \times \sigma_{sadanta} \quad (2)$$

jossa

$$\text{odotettu_sadanta}(d) = a \times e^{b \times \text{pilvet}(d)} \text{ ja}$$

$$\sigma_{sadanta} = c \times e^{b \times \text{pilvet}(d)}.$$

Kuukausikohtaiset yhtälöiden kertoimet a, b, c ja d on määritetty kutakin pilvisyysluokkaa (0–8) vastaavasta keskisadannasta ja sadannan keskihajonnasta havaintojen lukumäärällä painotettuina. Kyseiselle päivälle simuloitu pilvisyyden määrä (*pilvet*(d)) on ($0 \leq (\text{pilvet}(d)) \leq 8$), jolloin pilvien peittävyys tai vaankannen pinta-alasta lisääntyy pilvisyysarvon kasvaessa. Pilvisyyden ollessa esim. 2, on 25 % tai vaankannen pinta-alasta pilvien peitossa. Määrittely vastaa ilmatieteen laitoksen pilvisyyshavainnoissaan käyttämää luokittelua.

2.2.3 Jäätäneen maaperän kantavuuden arviointi

Eeronheimo (1991) on määritellyt puunkorjuun ammattilaisten näkemyksiin perustuvat talvikorjuukelpoisuuden kriteerit turvemaille. Edellytyksenä metsätraktorilla tapahtuvalle lähikuljetukselle on tällöin ollut vähintään 20 cm:ä paksu routakerros

lumettomassa maassa tai yli 40 cm:ä paksu lumikerros, jos routaa ei ole. Sulaneen pintamaan paksuus ei ole myöskään saanut ylittää 5 cm:ä. Routa- ja lumimittaushavaintojen perusteella näiden kriteerien mukainen normaalivarusteisen metsätraktorin laskennallinen käyttökauden pituus suometsissä on ollut Keski-Suomessa n. 80 vrk ja Oulun korkeudella n. 120 vrk.

Tässä tutkimuksessa haluttiin kantavuuskriteerien osalta kokeilla Suvisen (2006) koostamaa laskentatapaa. Menetelmässä verrataan pyöräalustaisen kuormatraktorin ominaisuuksien perusteella määritettyä korjuukoneesta aiheutuvaa kuormistusta maaperän kantokykyyn (murtokuorma), joka voidaan arvioida sekä sulalle että jäätyneelle maaperälle. Toisaalta kääntäen voidaan arvioida myös sitä roudanpaksuutta, joka riittää parantamaan maaperän kantavuuden sellaiseksi, että maa kantaa murtumatta korjuukoneen.

Jäätäneen maan kantavuuskriteeri laskettiin aluksi Suvisen (2006) esittämällä tavalla. Koska laskennallinen kantavuuskriteeri oli kuitenkin hiesumaalla sekä keskikokoiselle että pienelle kuormatraktorille hyvin lähellä Eeronheimon (1991) esittämää 20 cm:n routakerroksen paksuutta, päätettiin tutkimuksessa käyttää yleisinä kulkukelpoisuus-kriteereinä Eeronheimon (1991) käyttämiä kahta kulkukelpoisuusehtoa ($R + L/2 > 20$ ja $P < 5$), jossa R on roudan syvyys (cm), L on lumipeitteen paksuus (cm) ja P sulaneen pintamaan paksuus (cm).

Maaperän kantokyvyn laskentaan käytetään Suvisen (2006) menetelmässä plastisuusteoriaan perustuvaa kuormatraktorille soveltuva kantavuuskaavaa (Silversides ja Sundberg 1989). Kaavalla voidaan määrittää sulan maaperän kantavuus kitka- ja koheesiomaille ja sitä voidaan muokattuna soveltaa myös jäätäneen maan kantavuuden arviointiin. Tällöin perusoletus on, että jäätyneet kerros jakaa kuormituksen laajemmalle alueelle kuin sulan maan tapauksessa (Onninen 1992).

Jäätäneen maaperän kulkukelpoisuus-kriteeri arvioitiin Suvisen (2006) mallilla keskikokoiselle pyöräalustaiselle kuormatraktorille (8-pyöräisen kuormatraktorin massa 14 000 kg, kuorman massa 12 000 kg, renkaiden leveys 70 cm ja renkaiden halkaisija 134 cm). Tyhjän ajoneuvon massa jaettiin Anttilan (1998) ehdottamalla tavalla etu- ja takaosalle suhteessa 60 % ja 40 %. Kuorman massa

Taulukko 1. Juupajoen, Maaningan ja Kajaanin vertailuilmastoa (1971–2000) kuvaavat simuloitujen ja vuosien 1971–2000 havainnoista lasketut vuorokauden keskilämpötilojen kuukausikeskiarvot (T) ja kuukausien sadekertymät (P).

Kuu- kausi	Juupajoki		Maaainka		Kajaani	
	T (°C) sim/hav	P (mm) sim/hav	T (°C) sim/hav	P (mm) sim/hav	T (°C) sim/hav	P (mm) sim/hav
Tammikuu	–8,4 / –7,4	47 / 50	–9,6 / –9,5	41 / 42	–11,4 / –11,0	28 / 29
Helmikuu	–8,5 / –7,8	34 / 34	–10,6 / –9,6	29 / 30	–11,7 / –10,7	22 / 24
Maaliskuu	–3,8 / –3,5	40 / 41	–4,8 / –4,2	34 / 35	–5,5 / –5,4	26 / 25
Huhtikuu	1,7 / 1,6	42 / 40	0,8 / 1,1	33 / 32	0,8 / 0,2	27 / 26
Toukokuu	9,1 / 8,8	44 / 40	8,9 / 8,5	43 / 42	6,8 / 7,5	47 / 38
Kesäkuu	13,7 / 13,7	73 / 66	14,2 / 14,3	63 / 66	13,0 / 13,3	64 / 60
Heinäkuu	15,2 / 15,5	103 / 94	16,6 / 16,5	69 / 74	15,2 / 15,8	76 / 68
Elokuu	13,4 / 13,4	94 / 88	13,9 / 14,0	78 / 84	12,6 / 13,1	88 / 87
Syyskuu	7,8 / 8,2	72 / 71	8,6 / 8,8	53 / 57	8,1 / 7,8	63 / 57
Lokakuu	3,8 / 3,6	72 / 70	3,6 / 3,4	51 / 53	2,3 / 2,2	52 / 47
Marraskuu	–1,6 / –1,5	67 / 65	–2,9 / –2,5	47 / 52	–4,1 / –4,0	44 / 42
Joulukuu	–6,1 / –5,5	52 / 55	–7,6 / –7,1	43 / 44	–9,2 / –8,6	32 / 34

tuli kokonaisuudessaan takaosalle. Hiesua kuvaavina maaperäparametreina olivat maan kantavuuden laskennassa tilavuuspaino 18,15 kN/m³ ja kitkukulma 27° (Korhonen ja Helenelund 1964). Hiesun ajateltiin käyttäytyvän kitkamaan tavoin, jolloin koheesio ei vaikuta maaperän leikkauslujuuteen. Laskennalliseksi kuormatraktorin kantavuuskriteeriksi em. parametreilla saatiin 19 cm:n routakerros lumettomassa maassa. Vertailun vuoksi kantavuuskriteeri kokoluokaltaan pienelle kuormatraktorille (8-pyöräisen kuormatraktorin massa 11 000 kg, kuorman massa 9000 kg, renkaiden leveys 60 cm ja renkaiden halkaisija 114 cm) oli 18 cm. Todellisen kulkemiseen tarvittavan routakerroksen voidaan arvioida olevan jonkin verran suurempi, koska malli ei ota huomioon esimerkiksi koneen heilunnasta aiheutuvia kuormitushuippuja.

2.3 Aineistot

2.3.1 Simuloitujen säätilajaksot

Säägeneraattorin käytössä tarvittavat parametritiedot määritettiin tutkimuspaikkakuntien säähavaintoasemien säätilahavainnoista jaksolta 1971–2000. Edellä kuvattuja lämpötilaan ja sadantaan liittyviä poikkeuksia lukuunottamatta parametritiedot noudattavat Strandmanin ym. (1993) kuvaamia periaatteita. Koska koesimulointien perusteella malli näytti

kuitenkin simuloivan talvikuukausina havaintoihin verrattuna liian paljon sadetta liian kylmissä lämpötiloissa, lämpötila–pilvisuus-suhdetta kuvaavia parametreja säädettiin hiukan voimistamaan lauhutumisen sademääriä lisäävää vaikutusta.

Kullekin tutkimuspaikkakunnalle simuloitiin vertailuilmastoa (1971–2000) kuvaavien parametritietojen avulla yhteensä 135 kpl vuoden mittaisia säätilajaksoja (kolme 45 v:n peräkkäisen vuoden simulaatiota) vertailuilmastoaineistoksi. Jaksoista lasketut kuukausien keskilämpötilat ja sademäärät sekä vastaavat havaintoaineistosta lasketut tunnusluvut on esitetty taulukossa 1. Vertailuilmaston arvoja tarkasteltaessa voidaan havaita, että malli kykenee hyvin simuloimaan keskimääräisen sademäärän. Sen sijaan simuloitujen talvikuukausien keskimääräiset lämpötilat ovat kaikilla paikkakunnilla havaittua alhaisempia. Tämä on seurausta satunnaislukujen jakauman vinouttamisesta, sillä malli tuottaa muutettuna aiempaa hieman enemmän kylmiä vuorokauden keskilämpötiloja eikä vielä aivan riittävästi havaintoarvojen moodia lähellä olevia lämpötiloja. Toisaalta epärealistisen korkeat simuloitujen talvilämpötilat on saatu karsittua pois satunnaislukujen vinouttamisella.

Ilmasto muuttuu vähitellen, mutta tässä tutkimuksessa tehdyissä simuloinneissa tarkastelujaksojen 2011–2020 ja 2021–2030 ilmaston muutosarvioina käytettiin Jylhän ym. (2009) esittämiä keskilämpötilan ja sademäärän muutoksen todennäköisyys-

Taulukko 2. Tutkimuksessa käytetyt arviot vuodenaikojen lämpötilan ja sademäärän muutoksille (ΔT ja ΔP) Etelä-Suomeen jaksoille 2011–2020 ja 2021–2030 perusjaksoon 1971–2000 verrattuna (Jylhä ym. 2009).

	2011–2020		2021–2030	
	ΔT (°C)	ΔP (%)	ΔT (°C)	ΔP (%)
Talvi (joulu–helmi)	1,3	5	1,9	7
Kevät (maalis–touko)	0,9	3	1,2	5
Kesä (kesä–elo)	0,6	3	0,9	4
Syksy (syys–marras)	0,8	3	1,2	4

jakaumien mediaaneja (taulukko 2). Vertailuilmaston kuukausikeskilämpötilaa ja sademäärää kuvaavien parametrien muuttamisen jälkeen säägeneraattorilla simuloitiin muutosilmastojen (2011–2020) ja (2021–2030) säätilajaksot kuten edellä vertailuilmastoaineistot.

Talvikuukausien keskilämpötilan keskihajontaa pienennettiin 5 % toiselle muutosjaksolle kuvaamaan erityisesti oletettua vähittäistä kaikkein kylmimpien lämpötilojen poisjääntiä arvojoukosta. Tällöin on syytä ottaa huomioon, että kaikkein kylmimpien lämpötilojen ohella arvojoukosta karsiutuivat myös kaikkein lämpimimmät arvot.

2.3.2 Routa- ja lumisimuloinnit

Simuloituja säätilasyötteitä käytettiin maaperäprofiilin lämpö- ja kosteusolojen sekä lumikerroksen simulointiin maaperämallilla. Maaperäprofiiliksi CoupModeliin määriteltiin 17-kerroksinen hiesumaalaji, joka ulottui 2,75 m:n syvyyteen. Profiilin kerrospaksuudet 30 cm:n syvyyteen olivat mallissa 3 cm ja tästä syvemmällä kerrospaksuudet kasvoivat 10 cm:stä profiilin pohjaosien 50 cm:n kerrospaksuuteen. Eri maalajitteiden ja orgaanisen aineksen keskimääräiset osuudet sekä huokoisuus profiilin pintaosassa (0–30 cm) olivat 8,6 % (Sa), 82,5 % (Hs), 4,8 % (Ht), 4,1 % (org. aines) ja huokoisuus 52 %. Kivennäismaalajin pinnalla oli simuloineissa 5 cm paksu humuskerros. Simuloinnissa maan katsottiin olevan jäässä, kun maan lämpötila oli laskenut 0 °C alapuolelle.

Simuloinnit tehtiin sekä puuston kanssa että ilman puustoa. Puustoa kuvaavina parametreina käytettiin kirjallisuuden perusteella koottuja kuusikoihin so-

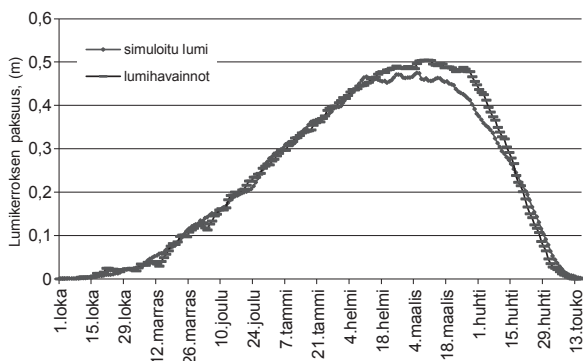
pivia parametriarvoja (puuston pituus 15 m, LAI (lehtialaindeksi, *Leaf Area Index*) 5, metsikkö-sadanta 65 %, juuriston syvyys 50 cm, lehden albedo 15). Nämä arvot sopivat kuvaamaan eteläsuomalais-ta kuusikkoa, jossa puuston valtapituus on 15 m ja pohjapinta-ala n. 25 m²/ha.

Lumen ja rännän sekä rännän ja veden rajalämpötiloina käytettiin mallissa –3 °C ja 1,5 °C (Vehviläinen 1992). Vastataneen lumen tiheys oli Maaningalla ja Juupajoella 110 kg/m³ ja lumen tiheys lumen vesipidännän ylittyessä oli 325 kg/m³. Kajaanissa vastaavat parametrit olivat 100 kg/m³ ja 300 kg/m³.

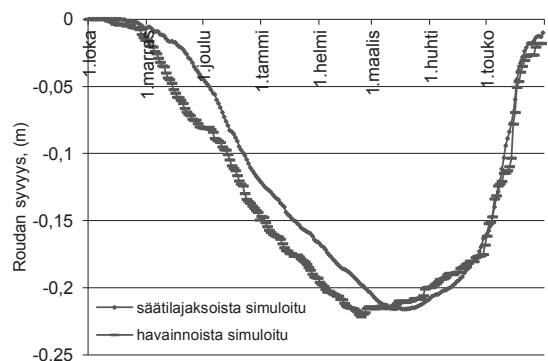
3 Tulokset

3.1 Simuloitu routa ja lumi vertailuilmaston oloissa

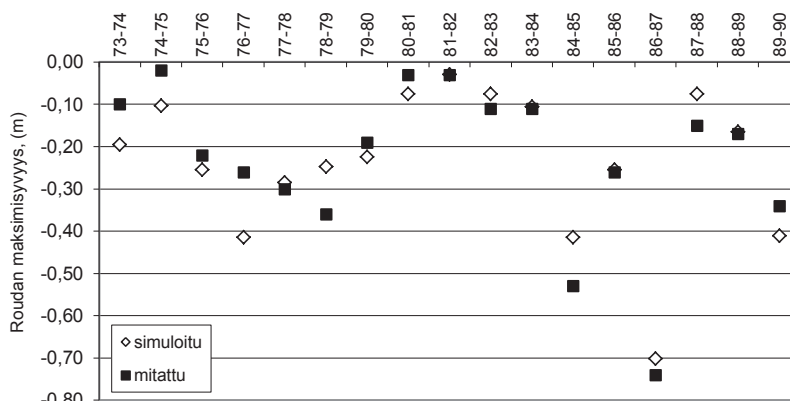
Maaperämallia ja sääsimulaattoria kokeiltiin aluksi Maaningan vertailuilmaston (1971–2000) oloissa. Mallit kykenivät simuloimaan hyvin lumen keskimääräisen paksuuden. Tämä käy ilmi kuvasta 2, jossa on esitetty vertailuilmaston lumihavainnoista laskettu lumikerroksen keskimääräinen päiväkohtainen kerrospaksuus ja kyseisen ilmaston parametreilla tuotetuista säätilajaksoista maaperämallilla simuloitu lumikerroksen paksuus. Varsinkin roudan muodostumisen kannalta merkittävän alkutalven keskimääräiset lumiolot kuvautuvat hyvin. Suurimmillaan simuloitun ja havaitun lumikerroksen erotus on 7 cm maaliskuun lopussa. Kuvassa 3 on puolestaan esitetty keskimääräiset roudanpaksuudet, jotka on simuloitu generoitujen säätilajaksojen ja toisaalta sää- sekä lumihavaintojen perusteella. Kuvan perusteella voidaan todeta, että säägeneraattorilla voidaan tuottaa säätilajaksoja, joihin maaperämalli reagoi keskimäärin samankaltaisesti kuin kyseisen ilmaston säähavaintotietoihin. Syystalvella säätilajaksojen perusteella simuloitu roudanmuodostuminen on hitaampaa kuin säähavaintotietojen perusteella



Kuva 2. Lumen keskimääräinen kerrospaksuus Maaningalla vertailuilmaston (1971–2000) lumihavaintojen ja Maaningan vertailuilmastoon säägeneraattorilla ja maaperämallilla simuloitun lumen perusteella.



Kuva 3. Maaperämallilla simuloitu roudan keskimääräinen syvyys Maaningan vertailuilmaston (1971–2000) sää- ja lumihavaintojen ja Maaningan vertailuilmastoon säägeneraattorilla tuotettujen säätilajakojen perusteella. Kuvassa ei ole esitetty pintasulantaa.

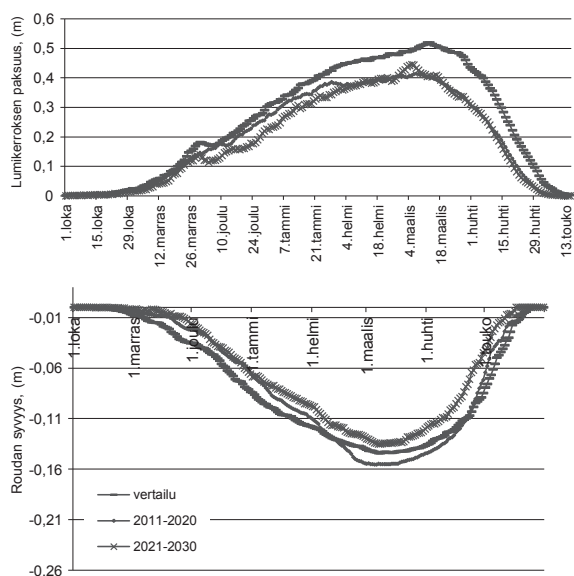


Kuva 4. Maaningan routahavaintoasemalla mitatut ja Maaningan säähavainnoista simuloitut roudan maksimisyvydet talvikausina v. 1973–1990.

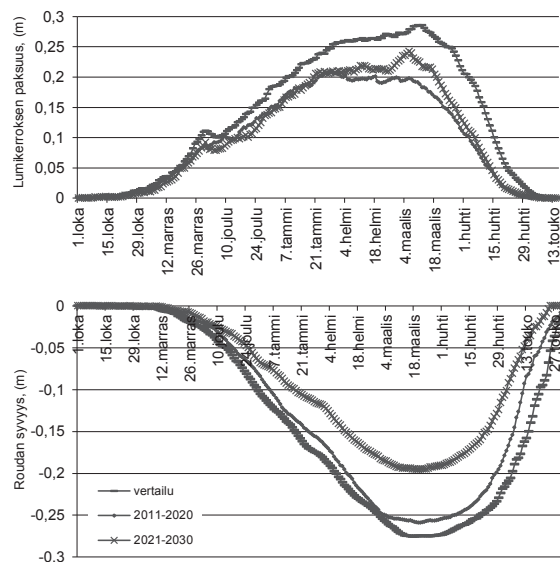
simuloitu routaantumisen, mutta routa tunkeutuu lopulta molemmissa tapauksissa samalle syvyydelle.

Mitatuista routatiedoista vertailuaineistoksi roudan osalta oli saatavilla Huttunen & Soverin (1993) esittämät vesi- ja ympäristöhallinnon Maaningan routamittausaseman maksimiroudansyvyudet talvilta 1973/1974–1989/1990 sekä havaintoaseman havaintotiedot vuosilta 1974–2000 (Ympäristöhallinto 2009). Routamittaukset mittauspisteellä on tehty kahden viikon välein ja mittauksen tarkkuudeksi on hiekkamaassa arvioitu ±5 cm. Maaperämallilla simuloitiin roudan muodostumista Maaningan säähavainto- ja lumitiedoilla hiesumaalajilla ja simu-

loituja roudansyvyyskertoja verrattiin routahavaintoihin (kuva 4). Simuloituja arvoja havaittuihin verratessa on syytä ottaa huomioon, että roudan mittauspaikka ei sijaitse säähavaintoasemalla ja routahavaintopaikan maaperäksi on routa-asetaverkon kuvauksessa merkitty hietä. Näin ollen vertailussa voitiin arvioida vain simuloitun ja havaitun roudan suuruusluokkeroja eri vuosina. Yleisesti ottaen simuloitu roudan maksimisyvyys vastasi varsin hyvin havaittuja vuosittaisia roudan maksimisyvyyskertoja (poikkeama oli keskimäärin 5 cm). Yksittäisten routahavaintojen ja vastaavien simuloitujen roudanpaksuuksien välinen poikkeama oli keskimäärin 7 cm.



Kuva 5. Keskimääräinen simuloitu lumikerroksen paksuus ja roudan syvyys Juupajoella, aukealla, vertailuilmastossa sekä tarkastelujaksolla 2011–2020 ja 2021–2030. Roudan pintasulantaa ei ole esitetty kuvassa.



Kuva 6. Keskimääräinen simuloitu lumikerroksen paksuus ja roudan syvyys kuusikossa Juupajoella vertailuilmastossa sekä tarkastelujaksolla 2011–2020 ja 2021–2030. Roudan pintasulantaa ei ole esitetty kuvassa.

3.2 Juupajoen, Maaningan ja Kajaanin simuloitu routa ja lumi eri ilmasto-oloissa

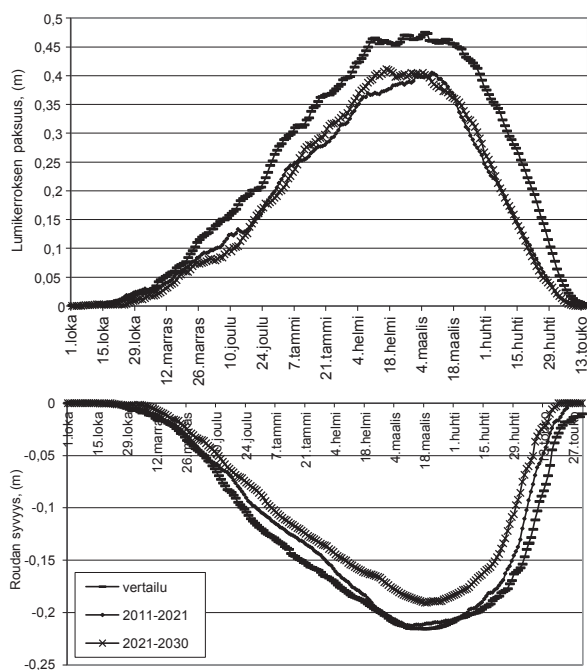
Juupajoella keskimääräinen roudansyvyys ei simuloinnissa käytetyissä kasvipeiteoloissa (aukea ja kuusikko) juurikaan pienentynyt vielä jaksolla 2011–2020 (kuvat 5 ja 6). Toisella jaksolla (2021–2030) ilmastonmuutoksen vaikutus roudansyvyyteen oli sen sijaan jo kuusikoissa nähtävissä. Keskimääräinen lumipeite oheni ensimmäisellä jaksolla (2011–2020) sekä aukealla että kuusikossa, mikä helpotti osaltaan routautumista vaikka ilmasto simuloinnissa lämpeni. Toisella jaksolla (2021–2030) sadannan lisääntyminen näytti simuloinneissa kompensoivan lämpenevän ilmaston lumipeitettä ohentavaa vaikutusta.

Maaningalla ja Kajaanissa simuloitujen ilmastonmuutoksen vaikutukset routaan ja lumeen ovat samansuuntaiset kuin Juupajoella, mutta muutokset roudan keskimääräisessä syvyydessä eivät ole aivan yhtä suuria kuin Juupajoella (kuvat 7–10). Routaa oli Juupajoella kuusikon simuloinneissa toisella jaksolla (2021–2030) keskimäärin 8 cm vähemmän

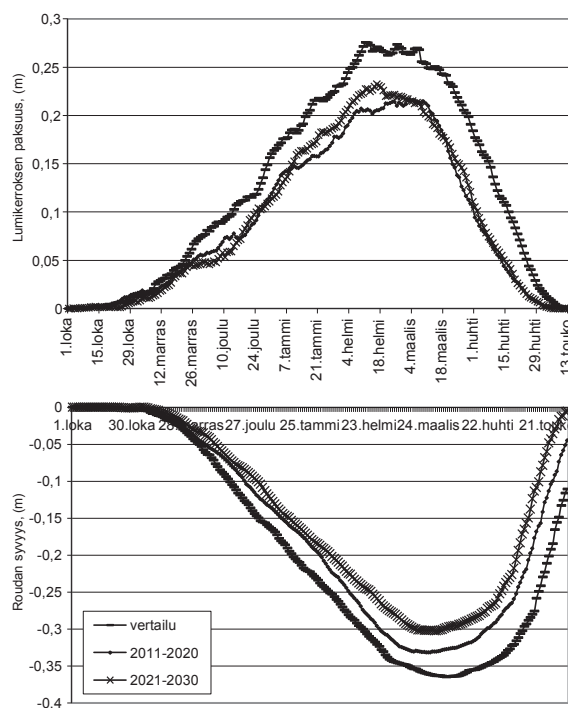
kuin vertailuilmaston simuloinneissa. Maaningalla ja Kajaanissa vastaava vähennys oli 6 cm. Simulointien mukaan toisellakin jaksolla Maaningalla ja Kajaanissa routa painui maaliskuun loppupuolella keskimäärin n. 30 cm:n syvyyteen kuusikkoa vastaavissa kasvipeiteoloissa, mutta Juupajoella jäätin tällöin 20 cm:n keskimääräiseen roudansyvyyteen. Aukealla roudan keskimääräinen suurin syvyys simuloinnissa käytetyllä hiesumaapohjalla oli toisella jaksolla Maaningalla 19 cm, Kajaanissa 16 cm ja Juupajoella 13 cm.

3.3 Simuloitujen puunkorjuun olosuhde-muutokset Juupajoella, Maaningalla ja Kajaanissa

Simulointien perusteella keskimääräinen laskennallinen talvikorjuukauden pituus eli kulkukelpoisuus-kriteerit täyttävien päivien lukumäärä vähenee tarkastelujaksolla kaikilla kolmella tutkimuskohteella (taulukko 3). Eniten korjuukausi lyheni Juupajoella, jossa keskimääräinen talvikorjuukausi toisen jaksossa ilmasto-oloissa (2021–2030) oli hiesumaapoh-



Kuva 7. Keskimääräinen simuloitu lumikerroksen paksuus ja roudan syvyys Maaningalla, aukealla, vertailuilmas-
tossa sekä tarkastelujaksoilla 2011–2020 ja 2021–2030. Roudan pintasulantaa ei ole esitetty kuvassa.



Kuva 8. Keskimääräinen simuloitu lumikerroksen paksuus ja roudan syvyys kuusikossa Maaningalla vertailuilmas-
tossa sekä tarkastelujaksoilla 2011–2020 ja 2021–2030. Roudan pintasulantaa ei ole esitetty kuvassa.

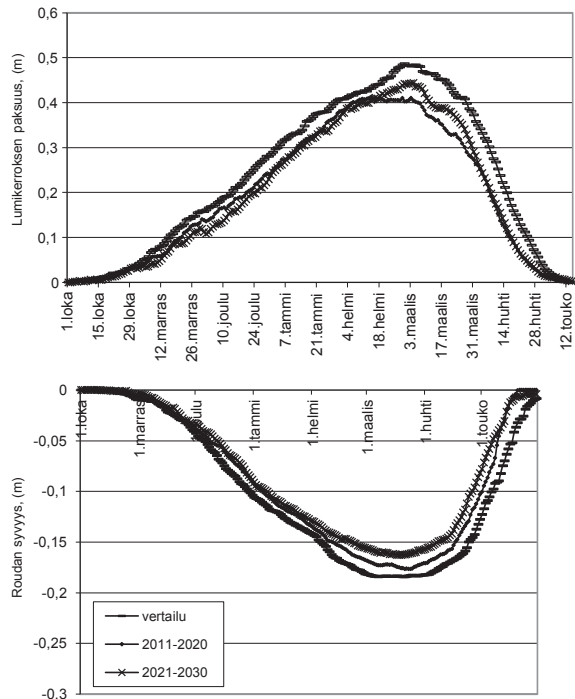
jalla kuusikkoa vastaavissa kasvipeiteoloissa 35 % ja aukealla 28 % lyhyempi kuin vertailuilmaston (1971–2000) oloissa. Korjuukauden alkamisajankohdan mediaani siirtyi simuloinneissa kuusikoissa 18 vuorokautta ja aukealla 13 vuorokautta myöhäisemmäksi ja vastaavasti korjuukausi päättyi kuusikossa 22 vuorokautta ja aukealla 20 vuorokautta aikaisemmin. Vertailuilmaston (1971–2000) oloissa simuloitu korjuukauden pituus oli aukealla 116 vuorokautta ja kuusikossa 109 vuorokautta.

Korjuukauden pituudella mitattuna kahdessa kolmesta Juupajoen toisen jakson (2021–2030) simuloituista talvista korjuukauden pituus oli hiesumaapohjalla kuusikossa vähintään 59 vuorokautta ja aukealla 74 vuorokautta. Vertailuilmaston oloissa vastaavat korjuukauden pituudet olivat 103 ja 112 vuorokautta.

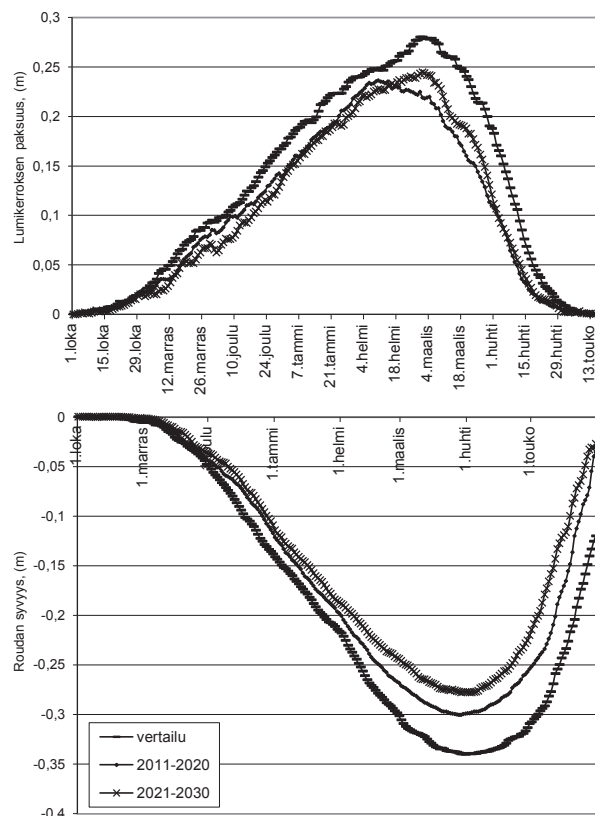
Maaningalla laskennallinen keskimääräinen korjuukausi oli simuloinneissa aukealla ja kuusikossa n. 17 % lyhyempi kuin vertailuilmaston oloissa. Vertai-

luilmaston (1971–2000) oloissa keskimääräinen korjuukausi oli hiesumaapohjan kuusikossa 123 vuorokautta ja aukealla 121 vuorokautta. Vertailun vuoksi, Eeronheimon (1991) Maaningan routahavainnoista määrittämä vastaava korjuukauden pituus oli hienon hiedan suometsässä 112 vuorokautta. Korjuukauden alkamisajankohdan mediaani siirtyi simuloinneissa sekä kuusikossa että aukealla n. 2 viikkoa myöhäisemmäksi ja päättymisajankohta vastaavasti aikaistui 6 ja 9 vuorokautta. Simuloituista talvista kahdessa kolmesta laskennallinen korjuukauden pituus oli Maaningalla kuitenkin vielä n. kolmen kuukauden mittainen myös toisella simuloitijaksolla (2021–2030). Talvien hajonta korjuukauden pituudella mitattuna ei siten ollut Maaningalla niin suurta kuin Juupajoella, jossa kolmanneksessa simuloituista talvista talven korjuukausi jäi toisella simuloitijaksolla (2021–2030) alle kahden kuukauden mittaiseksi.

Kajaanissa muutokset olivat samankaltaisia kuin



Kuva 9. Keskimääräinen simuloitu lumikerroksen paksuus ja roudan syvyys aukealla Kajaanissa vertailuilmastossa sekä tarkastelujaksoilla 2011–2020 ja 2021–2030. Roudan pintasulantaa ei ole esitetty kuvassa.



Kuva 10. Keskimääräinen simuloitu lumikerroksen paksuus ja roudan syvyys kuusikossa Kajaanissa vertailuilmastossa sekä tarkastelujaksoilla 2011–2020 ja 2021–2030. Roudan pintasulantaa ei ole esitetty kuvassa.

Maaningalla. Vertailuilmaston noin 120 vuorokauden laskennallinen korjuukausi Kajaanissa lyheni toisella simulointijaksolla (2021–2030) kuusikossa viidenneksen ja aukealla hieman vähemmän. Korjuukauden alkamisajankohdan mediaani siirtyi 10 vuorokautta myöhäisemmäksi ja korjuukausi päättyi aukealla 6 vuorokautta ja kuusikossa 10 vuorokautta vertailuilmaston vastaavia ajankohtia aiemmin. Maaningan tapaan laskennallinen korjuukauden pituus oli Kajaanissakin toisella simulointijaksolla (2021–2030) vielä kahdessa kolmesta simuloinnista n. kolmen kuukauden mittainen.

4 Tulosten tarkastelu

Tämän tutkimuksen tulokset olivat routa- ja lumimäärien osalta samansuuntaisia kuin aiemmissa tutkimuksissa. Sekä roudan että lumen määrät vähenivät simuloinneissa tutkimuspaikkakunnilla, kun ilmasto muuttui Ilmatieteen laitoksen jaksoille 2011–2020 ja 2021–2030 esittämien muutosarvioiden mukaisesti. Kellomäen ym. (2010) tutkimuksessa keskimääräiset roudansyvytydet olivat kuitenkin suurempia kuin roudansyvytydet puuttomalla maapohjalla nyt tehdyissä simuloinneissa. Tällöin useimpien tutkimuskoealojen maalajiksi oli arvioitu karkea tai hieno moreeni tai lajittuneiden maiden osalta hiekka. Koska kivennäismailla roudansyvyys yleensä kasvaa raekoon kasvaessa, voidaan osan

Taulukko 3. Routa- ja lumisimuloinneista määritetty laskennallisen talvikorjuukauden pituuden keskiarvo, korjuukauden pituus kahdessa kolmasosassa simuloinneista ja talvikorjuukauden alkamis- ja päättymisajankohtien mediaanin muutokset Juupajoen, Maaningan ja Kajaanin vertailuilmaston (1979–2000) ja tarkastelujaksojen 2011–2020 ja 2021–2030 oloissa.

	Vertailuilmasto	2011–2020	2021–2030
JUUPAJOKI			
Aukea			
– talvikorjuukauden pituus ka. (vrk)	116	96	84
– 2/3:ssa simuloinneista talvikorjuukauden pituus vähintään (vrk)	112	85	74
– alkamisajankohdan mediaanin siirtymä (vrk)		+ 8	+ 13
– päättymisajankohdan mediaanin siirtymä (vrk)		– 6	– 20
Kuusikko			
– talvikorjuukauden pituus ka. (vrk)	109	91	71
– 2/3:ssa simuloinneista talvikorjuukauden pituus vähintään (vrk)	103	82	59
– alkamisajankohdan mediaanin siirtymä (vrk)		+ 7	+ 18
– päättymisajankohdan mediaanin siirtymä (vrk)		– 6	– 22
MAANINKA			
Aukea			
– talvikorjuukauden pituus ka. (vrk)	121	105	101
– 2/3:ssa simuloinneista talvikorjuukauden pituus vähintään (vrk)	115	96	91
– alkamisajankohdan mediaanin siirtymä (vrk)		+ 8	+ 13
– päättymisajankohdan mediaanin siirtymä (vrk)		– 4	– 9
Kuusikko			
– talvikorjuukauden pituus ka. (vrk)	123	105	103
– 2/3:ssa simuloinneista talvikorjuukauden pituus vähintään (vrk)	115	94	98
– alkamisajankohdan mediaanin siirtymä (vrk)		+ 12	+ 14
– päättymisajankohdan mediaanin siirtymä (vrk)		– 5	– 6
KAJAANI			
Aukea			
– talvikorjuukauden pituus ka. (vrk)	118	104	101
– 2/3:ssa simuloinneista talvikorjuukauden pituus vähintään (vrk)	108	92	95
– alkamisajankohdan mediaanin siirtymä (vrk)		+ 6	+ 10
– päättymisajankohdan mediaanin siirtymä (vrk)		– 7	– 6
Kuusikko			
– talvikorjuukauden pituus ka. (vrk)	121	105	97
– 2/3:ssa simuloinneista talvikorjuukauden pituus vähintään (vrk)	110	95	88
– alkamisajankohdan mediaanin siirtymä (vrk)		+ 11	+ 10
– päättymisajankohdan mediaanin siirtymä (vrk)		– 5	– 10

tutkimustulosten eroista arvioida selittyvän tässä tutkimuksessa käytetyn hienojakoisen hiesun vähäisemmällä routaantumisella. Lisäksi Kellomäen ym. (2010) tutkimuksessa käytettiin ilmastonmuutoksen skenaariona FINADAPT-skenaariota (Ruosteenoja ym. 2005), joka poikkeaa jonkin verran tässä tutkimuksessa käytetystä ACCLIM-skenaariosta.

Tutkimuksessa käsiteltiin routaantumista vain hiesuilla ja muut kivennäismaalajit sekä turvemaat rajattiin tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Hiesun valinta maalajiksi perustuu siihen, että hiesuilla luonnollinen vesipitoisuus on hyvin lähellä maa-

lajin juoksurajaa ja siten vähäininkin veden lisäys voi muuttaa maalajin kantamattomaksi. Näin ollen voidaan olettaa, että juuristo- ja maastovaurioiden välttäminen hiesumaalla edellyttää puunkorjuuta joko maan ollessa jäätynyt tai normaalitilanteeseen verrattuna hyvin kuiva. Hiesu edustaa siten kulkelpoisuudeltaan heikointa kivennäismaata, ja muilla kivennäismailla roudan tai maaperän kosteuden vaikutus maaperän kantavuuteen ei ole yhtä merkittävää kuin hiesuilla.

Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu lumi- ja rou- taoloja ensiharvennusikäisissä kuusikoissa. Varttu-

neissa kuusikoissa metsikkösadantaa vähentävää ja toisaalta lumen latvuspäntää lisäävää latvusmassaa on enemmän, latvukset ovat pidempiä ja lunta kannattelevat oksat vahvempia kuin nuorissa kuusikoissa. Tämän vuoksi voidaan olettaa, että lunta kertyy varttuneen kuusikon maapohjalle vähemmän kuin nuoremmissa kuusikoissa. Lisäksi latvuksista sulakausina tippuva lumi tiivistää maata peittävää lumikerrosta, jolloin lumikerroksen eristevaikutus pienenee. Näillä oletuksilla varttuneessa kuusikossa routa tunkeutuisi tässä kuvatuissa ilmasto- ja maaperäoloissa syvemmälle kuin ensiharvennusikäisissä kuusikoissa. Metsikkösadantaan, lumen kertymiseen ja roudan muodostumiseen vaikuttavat kuitenkin muutkin tekijät, kuten puuston tiheys ja puiden keskinäiset sijaintisuhteet, puiden latvusten kunto ja elävän latvuksen osuus sekä metsikön piensijainti ja -ilmasto. Varttuneiden kuusikoiden routa- ja lumiohjien muutoksen arviointi vaatisi siten erillisen kattavan tarkastelun.

Tutkimuksessa käytetyistä simulointimalleista, säägeneraattori ei muokattunakaan kyennyt täysin todenmukaisesti kuvaamaan talven lämpötiloja vaan vertailuilmaston generoidut lämpötilat olivat talven osalta kylmempiä kuin vertailujaksolla havaitut. Näin ollen voidaan olettaa, että jos ilmasto muuttuu annettujen arvioiden mukaisesti ovat maaperämallilla nyt simuloituiden routa- ja lumimäärät pikemmin yli- kuin aliarvioita lähitulevaisuuden routa- ja lumimääristä, ja siten muutos puunkorjuun talvikorjuuoloihin voisi olla nyt esitettyä suurempikin.

Yleisesti ottaen säägeneraattori kykenee kuitenkin tuottamaan varsin hyvin kullekin kuukaudelle tyypillisiä säätiloja. Sen sijaan keskimääräisistä runsaasti poikkeavien kuukausien lämpötilojen ja sademäärien simulointiin malli ei kovin hyvin pysty. Tämä on simuloitujen ja havaittujen kuukausikohtaisten keskilämpötilojen ja sademäärien vertailun lisäksi pääteltävissä myös mallin laskentatavoista. Mallin eri muuttujien generointitavat ovat luonteeltaan keskimääräisiin säätiloihin palauttavia, eivät siitä poikkeuttavia. Tämän perusluonteensa vuoksi ne eivät myöskään kovin hyvin kykene kuvaamaan keskimääräistä kylmempiä/lämpimämpiä tai sateisia/kuivia kausia. Tuloksissa esitetäänkin siksi simuloinneista lähinnä keskimääräisiä lumi- ja routamääriä ja niiden perusteella määritettyjä keskimääräisiä korjuukausien pituuksia.

Tässä tutkimuksessa Suvisen (2006) esittämällä jäätyneen maan kantavuusmallilla lasketut roudanpaksuuteena esitetyt kulkukelpoisuuden kriteerit olivat samaa luokkaa kuin Eeronheimon (1991) turvemaille esittämät 20 cm:n roudanpaksuudet. Lumenpaksuus on Eeronheimon (1991) kriteereissä nähty pikemmin kulkukelpoisuutta parantavana kuin kulkemista estävänä tekijänä. Kuitenkin paksu lumikerros muodostaa lumen läpi tunkeutuvalla korjuukoneelle ennen kaikkea kulkuvastuksen ja on siten puunkorjuuta hankaloitava tekijä. Tiivistettynä ja tiivistyksen jälkeen kovettuneena lumikerros on kuitenkin kantavuutta parantava tekijä, mihin perustuu lumikerroksen käyttö toisena kriteerinä roudan syvyyden ohella.

Juupajoella keskimääräiset routa- ja lumimäärät olivat toisen jakson (2021–2030) simuloinneissa jo hyvin lähellä em. kulkukelpoisuus-kriteerien alarajoja, mikä näkyi Juupajoen tuloksissa muita tutkimuspaikkakuntia voimakkaampana laskennallisen talvikorjuukauden lyhentymisenä. Voidaan olettaa, että mikäli talvikuukausien keskilämpötila kohoaisi tämän jälkeen edelleen, merkitsisi se Juupajokea ja sitä ilmastollisesti vastaavien alueiden osalta tässä tutkimuksessa käytettyjen kulkukelpoisuus-kriteerien mukaisten talvikorjuuolujen käymistä harvinaisiksi. Maaningan ja Kajaanin simulointituloksissa ei tarkastelujaksolla ollut nähtävissä yhtä nopeaa muutosta ja esimerkiksi jakson (2021–2030) routaolot vastasivat simuloinneissa keskimääräisen roudan maksimisyvyyden osalta Juupajoen vertailuilmaston olosuhteita.

Kiitokset

Käsikirjoitusta ovat sen eri vaiheissa kommentoineet Esko Mikkonen, Hannu Rita sekä kaksi anonyymiä arvioijaa. Lisäksi tutkimustyötä ovat kommentillaan tukeneet Mike Starr sekä CoupModel'in User Group ja PerErik Jansson. Kiitokset heille kaikille työn edistämisestä. Kiitokset Suomen Kulttuurirahastolle, Niemi-säätiölle ja Metsäteho Oy:lle tutkimuksen rahoittamisesta.

Kirjallisuus

- Anttila, T. 1998. Metsämaan raiteistumisen ennustaminen WES-menetelmää käyttäen. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 17. Helsinki. 53 s + liite 3 s.
- Azzalini, A. 2005. [Verkkodokumentti]. A very brief introduction to the skew-normal distribution. Saatavissa: <http://azzalini.stat.unipd.it/SN/Intro/intro.html>. [Viitattu 6.6.2010].
- Eeronheimo, O. 1991. Suometsien puunkorjuu. *Folia Forestalia* 779. 29 s.
- Huttunen, L. & Soveri, J. 1993. Luonnontilaisen roudan alueellinen ja ajallinen vaihtelu Suomessa. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja – sarja A 139. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki. 74 s.
- Jansson, P.-E. & Karlberg, L. (toim.). 2004. [Verkkodokumentti] COUP manual – Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere system. Saatavissa: <http://www.lwr.kth.se/vara%20datorprogram/CoupModel/coupmanual.pdf>. [Viitattu 8.9.2008].
- Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. & Seitola, T. 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti. Raportteja 2009:4. Ilmatieteen laitos, Helsinki. 102 s.
- Kellomäki, S., Maajärvi, M., Strandman, H., Kilpeläinen, A. & Peltola, H. 2010. Model computations on the climate change effects on snow cover, soil moisture and soil frost in the boreal conditions over Finland. *Silva Fennica* 44(2): 213–233.
- Kersalo, J. & Pirinen, P. (toim.). 2009. Suomen maakuntien ilmasto. Raportteja 2009:8. Ilmatieteen laitos, Helsinki. 185 s.
- Korhonen, K.-H. & Helenelund, K.-V. 1964. Geotekniikka ja pohjarakennus. Tiedotus, Sarja III – Rakennus 78. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Helsinki. 75 s.
- KTH. 2009. [Verkkodokumentti]. CoupModel – Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere system. Saatavissa: <http://www.lwr.kth.se/vara%20datorprogram/CoupModel/>. [Viitattu 4.12.2009].
- Onninen, H. 1992. Jäätäneen suon kulkukelpoisuus. Kulkukelpoisuuden arviointi. Raporttisarja B 1992/3. Maanpuolustuksen tieteellinen neuvottelukunta. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. ISBN 951-25-0607-6. 22 s. + liite 8 s.
- Peltola, H., Kellomäki, S. & Väisänen, H. 1999. Model computations of the impact of climatic change on the windthrow risk of trees. *Climatic change* 41: 17–36.
- Ruosteenoja, K., Jylhä, K. & Tuomenvirta, H. 2005. Climate scenarios for FINADAPT studies of climate change adaptation. FINADAPT Working Paper 15, Finnish Environment Institute Mimeographs 345. Helsinki. 32 s.
- Silversides, C.R. & Sundberg, U. 1989. Operational efficiency in forestry. Volume 2: Practice. Forestry Sciences. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London. 169 s.
- Strandman, H., Väisänen, H. & Kellomäki, S. 1993. A procedure for generating synthetic weather records in conjunction of climatic scenario for modelling of ecological impacts of changing climate in boreal conditions. *Ecological modeling* 70: 195–220.
- Suvinen, A. 2006. A GIS-based simulation model for terrain tractability. *Journal of Terramechanics* 43: 427–449.
- Vehviläinen, B. 1992. Snow cover models in operational watershed forecasting. Publications of the Water and Environment Research Institute 11. Helsinki. 112 s.
- Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Heikinheimo, M., Kellomäki, S., Peltola, H., Strandman, H. & Väisänen, H. 2001a. Impact of climate change on soil frost under snow cover in a forested landscape. *Climate Research* 17: 63–72.
- , Tuomenvirta, H., Lahtinen, R. & Heikinheimo, M. 2001b. The influence of climate warming on soil frost on snow-free surfaces in Finland. *Climatic Change* 50: 111–128.
- Xarpell, L.G., Koivusalo, H., Laurén, H. & Repo, T. 2010. [Verkkójulkaisu]. Simulation of soil temperature and moisture under different snow and frost conditions with COUP model. Metlan työraportteja 163. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp163.htm>. [Viitattu 22.11.2010].
- Ympäristöhallinto, 2009. [Verkkopalvelu]. OIVA – ympäristö- ja paikkatietopalvelu asiantuntijoille. Saatavissa: <http://www.wp2.ymparisto.fi/scripts/oiva.asp>. [Aineisto ladattu 24.8.2009].

21 viitettä