



■ Mervi Kokkila

Mervi Kokkila

Simulointituloksia ilmastonmuutoksen vaikutuksista metsäteiden kelirikoon

Kokkila, M. 2013. Simulointituloksia ilmastonmuutoksen vaikutuksista metsäteiden kelirikoon. Metsätieteen aikakauskirja 2/2013: 115–125.

Tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella metsätiestön runkokelirikon keston ja vaikeuden muutoksia jaksoilla 2011–2020 ja 2021–2030 oletuksella, että ilmasto muuttuu Ilmatieteen laitoksen ACCLIM-tutkimushankkeessa esittämien keskilämpötilan ja sademäärän muutoksen mediaaniskenaarioiden mukaisesti. Tutkimuksessa simuloitiin säägeneraattorin ja maaperämallin avulla pohjamaaltaan routivaa hiekkamoreenia olevan lumettoman aluetien tieprofiilin lämpö- ja kosteusoloja Juupajoen, Maaningan ja Kajaanin oloissa. Simuloinnit tehtiin vertailuilmastona käytetylle jaksolle 1971–2000 sekä muutosjaksoille 2011–2020 ja 2021–2030.

Simuloinneissa havaittiin kuljetusolosuhteisiin vaikuttavia olosuhdemuutoksia. Tutkimuksessa kuvatus aluetien routaantuminen tapahtui nykyistä myöhemmin ja hitaammin. Hitaampi routaantuminen näkyi runkokelirikon vaikeusluokittelussa vaikeiksi luokiteltujen runkokelirikkokeväiden yleistymisenä (25%:sta 35%:iin) ja helppojen runkokelirikkokeväiden harvinaistumisena (25%:sta 15%:iin). Simuloinneissa myös roudan keskimääräinen tunkeumasyyvyys pieneni ja sulaminen sekä nopeutui että aikaistui. Ajallisesti tiestön routakausi ja sulamisjakson pituus lyhenivät tarkastelujaksolla molemmat n. 10 vrk. Tutkimuksessa ei tarkasteltu talvikauden olosuhdevaihtelua, mutta erityisesti Juupajoen osalta oli nähtävissä leutojen talvien yleistymisen ja mahdollisuus talviaikaisen kelirikoon. Maantieteellisesti muutokset voidaan tulkita siten, että tässä tutkimuksessa määritetyt routaa kuvaavat tunnusluvut ovat Kajaanissa kaudella 2021–2030 varsin samanlaisia kuin Juupajoen vertailujakson 1971–2000 tunnusluvut.

Asiasanat: CoupModel, kuljetus, mallit, puutavara, simulointi

Sähköposti mervi.kokkila@kotikone.fi

Hyväksytty 17.1.2013

Saatavissa <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff13/ff132115.pdf>

I Johdanto

Puunhankinnassa raaka-aineen saavutettavuus vaihtelee olosuhteiden mukaan. Pääsyy saavutettavuuden vaihteluun on sorateiden kelirikko, joka valtaosassa metsä- ja yksityisteitä katkaisee ja yleisillään sorateilla paikoin rajoittaa puutavaran kuljetuksia keväällä ja runsaiden syyssateiden aikaan. Teollisuuden puuhuollolle tämä kausivaihtelu aiheuttaa vuosittain n. 100 milj. euron lisäkustannukset mm. lisääntyvän varastointitarpeen, laatutappioiden ja kalustoseisokkien muodossa (Pennanen ja Mäkelä 2003).

Suomessa on yleisiä teitä n. 80 000 km. Tämä tieverkko muodostaa kuitenkin vain rungon puunhankinnalle, jossa pääosin vasta erilaisten yksityisteiden muodostama tieverkko johtaa metsään raaka-aineen lähteille. Yksityisteitä on arvioitu olevan n. 350 000 km, joista pysyvän asutuksen yksityisteitä on n. 100 000 km ja rakennettuja metsäteitä n. 130 000 km. Loput yksityisteistä ovat muita ajokelpoisia metsä- ja loma-asutusteitä. (Hämäläinen 2003; Uotila 2003; Metsätalastollinen vuosikirja 2008) Sorapintaisista yleisistä teistä n. 10 %:lla on tierekisterien mukaan todettu kelirikko (Belt 1999). Tämän lisäksi arvioiden mukaan (Metsähallitus 2011; Greis I. [Tapiio, metsänparannusasiantuntija, henkilökohtainen tiedonanto 15.9.2011]) rakennetuista metsäteistä n. 80 % ei kestä liikennöintiä kelirikkoajana. Kun lisäksi voidaan olettaa, että muitakaan yksityisteitä ei ole pääosin rakennettu kestävästi puutavarakuljetuksia kelirikon aikana, supistuu kelirikkokaudella käytettävissä oleva tieverkko murto-osaan koko tiestömäärästä. Tieverkon supistumisen ohella, verkko muuttuu myös väistämättä rikkonaisemmaksi, mikä edelleen lisää kelirikon haittavaikutuksia.

Kelirikolla tarkoitetaan tierakenteen tilaa, jossa sulavan tien kantavuus on alentunut, ja tie on siksi altis vaurioitumiselle kuormitettaessa. Pintakelirikossa tien pehmeneminen rajoittuu tien pintakerrokseen, mutta runkokelirikossa pehmeneminen ulottuu syvemmälle tierakenteeseen. Pintakelirikkoa ilmenee sulamisen alkuvaiheissa, kesällä rankkasateilla tai syksyllä syyssateiden aikaan. Runkokelirikko seuraa pintakelirikkoa sulamisaikaan teillä, joilla pohjamaa on routivaa. Routaantumisaikana routivasta, hienojakoisesta pohjamaasta imeytyy vettä jäätymisvyö-

hykkeeseen, jolloin tierakenteeseen muodostuu jäälinssijä. Runkokelirikon aikana jäälinssit sulavat ja runsaan veden seurauksena tierakenteen kantavuus heikkenee huomattavasti (Saarelainen ja Törnqvist 2004).

Sorateiden kelirikkoa käsitellessä tutkimuksissa (Ryynänen ym. 2003, Saarelainen ja Törnqvist 2004) on todettu, että pitkä routaantumisaika sekä korkealla oleva pohjavesi mahdollistavat jäälinssien kasvun ja luovat siten otolliset olosuhteet vaikealle runkokelirikolle. Tutkimuksissa on käytetty runkokelirikon vaikeuden ennustamiseen routaantumisaikaa, joka on laskettu pakkasmäärän avulla. Pakkasmäärä lasketaan ilman vuorokautisista keskilämpötiloista ja sitä laskettaessa otetaan huomioon sekä positiiviset että negatiiviset erot jäätymisspisteeseen. Pakkasmäärän kasvun 2500 kelvintunnista (Kh) 6500 kelvintuntiin (etelärannikko) tai 12000 kelvintuntiin (muu Suomi) on laskettu vastaavan roudan etenemistä 0,5 m:n syvyydestä 1,0 m:n syvyyteen. Pitkän routaantumisaikojen vaikutusta runkokelirikon esiintymiseen on perusteltu sillä, että roudan hidas eteneminen mahdollistaa pitkäkestoisen veden imeytymisen routarintamaan ja siten paksujen jäälinssien muodostumisen.

Pitkä routaantumisaika ei kuitenkaan yksin riitä selittämään runkokelirikon esiintymistä, vaan vaikutusta on myös alueen maaperän ja tiestön kelirikkoalttiudella sekä kevään sulamisajan olosuhteilla. Kevään sateisuus ja säiden nopea lämpeneminen pahentavat kelirikkoa ja näiden tekijöiden vaikutus korostuu erityisesti alueilla, joilla maaperä ja tiesto on kelirikkoherkkää. Kelirikkomalleissa lämpenemisen vaikutusta on kuvattu sulamiskauden alusta lähtien lasketulla 30 vrk:n lämpösummalla. (Ryynänen ym. 2003)

Ryynänen ym. (2003) ja Saarelainen ja Törnqvist (2004) ovat tarkastelleet kelirikon vuoksi soratielle asetettavan painorajoituksen asettamis- ja poistamisajankohtien määrittämistä Tiehallinnon ”Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito” -tutkimusohjelmassa. Painorajoituksen oikeana asettamisajankohtana pidetään ajankohtaa, jolloin sulaminen on edennyt tien pinnasta 10–15 cm:n syvyyteen. Käytännössä tämä sulamissyvyys saavutetaan jo ennen kuin ilman keskilämpötila on noussut 0 °C:n yläpuolelle. Painorajoitukset voidaan puolestaan poistaa sulamisen päättymisen ja/tai sen jälkeen kun tien

kantavuus on jälleen palautunut ylimääräisen veden poistumisen jälkeen. Hienorakeisilla tien alusrakenteilla veden poistuminen ja rakenteen tiivistyminen jatkuu vielä noin 3 viikkoa rakenteen täydellisen sulamisen jälkeen.

Kelirikon esiintyminen ja voimakkuus määräytyvät edellä kuvatun mukaan siitä, kuinka tierakenne ja pohjamaa reagoivat erilaisiin säätilamuutoksiin. Näin ollen myös ilmastonmuutoksen, jonka on arvioitu jo lähivuosikymmeninä nostavan keskilämpötiloja sekä lisäävän jonkin verran sadantaa (Jylhä ym. 2009), voi olettaa vaikuttavan metsäteiden kelirikoon. Ilmastonmuutoksen vaikutuksista roudan maksimisyvyyteen on tehty tutkimuksia lumipeitteisten pintojen ohella myös tiestöä vastaavilla lumettomilla pinnoilla. Venäläinen ym. (2001a) tutkimuksessa roudan maksimisyvyys pieneni tällä vuosisadalla pakkasmäärän vähetessä Etelä- ja Keski-Suomessa 100–150 cm:stä n. 50–100 cm:in olosuhteissa, jotka karkeasti vastasivat lumetonta tiepintaa. Tiehallinnon asiantuntija-arvioiden (Tiehallinto 2009) mukaan ilmastonmuutos lisää kevään kelirikon määrää ja vaikeutta sorateillä ja myös syyskelirikon määrä tulee lisääntymään merkittävästi. Tutkimusten ja arvioiden perusteella voidaan hahmottaa metsäteidenkin osalta olosuhdemuutosten vaikutussuunta. Sen sijaan sitä, kuinka nopeasti muutoksia voidaan pitää puunhankinnan näkökulmasta merkittävänä, ei em. aineiston perusteella voida arvioida.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tarkastella sitä, millaisia muutoksia kevään kelirikokaudessa tapahtuu puutavaran autokuljetuksen näkökulmasta jaksoilla 2011–2020 ja 2021–2030, mikäli ilmasto muuttuu arvioiden mukaisesti. Tarkastelujaksot, tutkimuspaikkakunnat (Juupajoki, Maaninka ja Kajaani) sekä ACCLIM-tutkimushankkeen ilmastonmuutosskenaario ovat tässä tutkimuksessa samoja kuin aiemmassa tutkimuksessa (Kokkila 2013), jossa on tarkasteltu ilmastonmuutoksen vaikutusta puunkorjuun talvikauden korjuuoloihin hienojakoisella kivennäismaalla.

Tutkimus antaa pohjatietoa puutavaran kuljetuksen tulevaisuustarkasteluihin, kun arvioidaan olosuhdemuutoksiin sopeutumisen tarpeita ja keinoja 10–20 vuoden aikajänteellä. Työssä keskitytään muutoksiin metsätiestön kelirikossa ja tällöin päähuomio kohdistuu alueteihin, joita ei yleensä ole

rakennettu kestävästi kuljetuksia kelirikko-aikaan. Tarkasteltavina tekijöinä ovat tien talvikäyttömahdollisuuksien muutos, routaantumisaika, sulamisen alkamisajankohta, sulamisen kesto ja kelirikon vaikeus.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Menetelmät

2.1.1 Säätilageneraattori

Tutkimuksessa käytettiin olosuhdemuutosten arviointiin säätilageneraattoria (Strandman ym. 1993) ja ruotsalaista CoupModel-maaperämallia (Jansson ja Karlberg 2004; KTH 2009). Säätilageneraattorin perusideana on tuottaa tietyn ilmaston ilmastoparametrien avulla kyseisen ilmaston mukaisia säätilajaksoja. Mallin tuottamia päiväkohtaisia säätilamuuttujia ovat vuorokauden sadekertymä, keskilämpötila, ilman suhteellinen kosteus, pilvisuus sekä tuulen nopeus. Näistä lämpötila ja sademäärä ovat tämän tutkimuksen näkökulmasta keskeisimmät muuttujat.

Säätilajaksot generoitiin jonkin verran alkuperäisestä Strandman ym. (1993) kuvaamasta säägeneraattorista muutetulla mallilla. Merkittävimmät malliin tehdyt muutokset liittyivät vuorokauden keskilämpötilan generointiin, jossa havaittiin tehtyjen kokeilujen perusteella puutteita talvikaudella. Myös mallin tapaa generoida sadetta muutettiin. Malliin tehdyt muutokset on kuvattu yksityiskohtaisesti aiemmassa Kokkilan (2013) tutkimuksessa, jossa on käsitelty ilmastonmuutoksen vaikutusta puunkorjuun korjuuoloihin.

Generoitujen säätilajaksojen tietoja käytettiin maaperämallin syötetietona, mutta generoiduista lämpötilatiedoista määritettiin myös mm. routaantumisaikaa kuvaava pakkasmäärän kasvu sekä kevään sulamisajan lämpökertymä. Nämä arvot laskettiin tutkimuksessa Rynäsen ym. (2003) kuvaamalla tavalla. Pakkas- ja lämpökertymiä hyödynnettiin kelirikon vaikeuden arvioinnissa.

Taulukko 1. Simuloinnissa käytetyt maaperän lämmön- ja vedenjohtavuuden parametrit ja huokoisuus ja käytetyn maa-aineksen raekokojakauma

Maaperän lämmönjohtavuus (λ), (W/m°C)

$$\text{sulassa tilassa: } \lambda_s = 0,143 \left[a_1 \log \left(\frac{\theta}{\delta_d} \right) + a_2 \right] 10^{a_3 \delta_d}$$

$$\text{jäätyneessä tilassa: } \lambda_j = b_1 10^{b_2 \delta_d} + b_3 \left(\frac{\theta}{\delta_d} \right) 10^{b_4 \delta_d}$$

θ = vesipitoisuus, paino-%; δ_d = 0,17 g/cm³ maaperän kuivairtitiheys

$$a_1 = 0,1 \quad b_1 = 0,00158$$

$$a_2 = 0,058 \quad b_2 = 1,336$$

$$a_3 = 0,6245 \quad b_3 = 0,0375$$

$$b_4 = 0,9118$$

Maaperän vedenjohtavuus, K_{sat} , (cm/s) ja huokoisuus (%)

0–45 cm	$1,3 \cdot 10^{-1}$	47
45–65 cm	$1,3 \cdot 10^{-3}$	41
60–290 cm	$2,7 \cdot 10^{-3}$	47

Maaperän raekokojakauma, %:a maa-aineksesta

Kerros	Raekoko, mm							
	<0,002	0,002–0,006	0,006–0,02	0,02–0,06	0,06–0,2	0,2–0,6	0,6–2,0	Org.aines
0–45 cm	1	0	0	2	2	45	50	0
45–65 cm	5	4	6	13	14	20	37	1
65–290 cm	5	4	6	13	14	20	37	1

2.1.2 Maaperämalli

Tutkimuksessa käytetyn CoupModel-maaperämallin versio oli 3.3. January 2011. Mallilla voidaan simuloida maaperäprofiilin lämpö- ja vesitaloutta kuvaavien muuttujien vasteita erilaisiin säätilasyytöteisiin (Jansson ja Karlberg 2004). Venäläinen ym. (2001b), Peltola ym. (1999) ja Kellomäki ym. (2010) ovat soveltaneet mallia ilmastonmuutoksen vaikutusten arviointiin ja samaa mallia on käytetty myös hienojakoisten kivennäismaiden talvikorjuulojen muutosten arviointiin (Kokkila 2013). Tässä tutkimuksessa maaperämallilla arvioidaan erityisesti tieprofiilin routaantumista ja sulamista ja siten tien talvikäytön mahdollisuuksia sekä kelirikon kestoa.

Maaperämalliin kuvattiin aluetien kerrosprofiili Metsätehon metsätieohjeiston (Metsäteho 2001) perusteella. Profiilin pintaosa (0–45 cm) oli veden- ja lämmönjohtavuusominaisuuksiltaan lähes kokonaan hiekkaa tai sitä karkeampaa ainesta. Tämän kerroksen alapuolella (45–65 cm syvyydellä) oli routivasta

hiekkamoreenista muodostunut kerros, joka oli hie- man tiiviimpää kuin alimpana ollut saman aineksen pohjamaakerros. Routiva hiekkamoreeni ulottui profiilin pohjalle eli 2,9 m:n syvyyteen. Profiilin osalta oletetaan, etteivät pintakerros ja hiekkamoreeni sekoitu keskenään. Kerrosten vedenjohtavuus määritettiin CoupModel-mallilla (Jansson ja Karlberg 2004) aineksen raekoostumuksen perusteella (*pedo-transfer functions*) ja hiekkaisen maaperän lämmönjohtavuuden määrittämisessä hyödynnettiin niin ikään CoupModel-malliin sisällytettyjä johtavuusyhtälöitä. Maaperäparametrit on esitetty taulukossa 1.

CoupModel-mallissa on mahdollista ottaa huomioon myös ojituksen ja veden horisontaalisuuntaisen liikkumisen vaikutus tieprofiilin kosteusoloihin. Siksi tieprofiilin kuvausta täydennettiin tieojien välisellä etäisyydellä (10 m) ja ojien syvyydellä (1,3 m). Simuloinneissa ajorata haluttiin pitää lumettomana mutta toisaalta tieluiskien lumen sulamisvesien vaikutus tien ominaisuuksiin haluttiin ottaa huomioon. Tämän vuoksi simulointi toteutettiin kahdessa osas-

Taulukko 2. Kuoreveden percoaseman havaitut ja simuloitut routaantumisen ja sulamisen alkamisajankohdat 15 cm:n syvyydessä ja koko tieprofiilin sulamisen päättymisajankohdat syksyn 2006 ja kevään 2009 välisenä aikana.

Ajanjakso / tapahtuma	Havaittu alkamisajankohta	Simuloitu alkamisajankohta	Huomiot
s2006 / routaantuminen	2.11.	5.11.	Routaantuminen myöh. uudelleen 19.12 / 23.12
k2007 / sulaminen alkaa	13.3.	23.3.	Simulointi: lämpötila lähellä 0 °C 13.3.alkaen
k2007 / sulaminen päättyy	24.4.	19.4.	
s2007 / routaantuminen	15.11.	14.11.	
k2008 / sulaminen alkaa	1.4.	2.4.	
k2008 / sulaminen päättyy	15.4.	10.4.	
s2008 / routaantuminen	21.11	21.11	
k2009 / sulaminen alkaa	3.4.	6.4.	
k2009 / sulaminen päättyy	6.5.	2.5.	

sa, jossa ensimmäisen simuloinnin tuloksia (lumen tieluiskan sulamisvedet) käytettiin syötetietona toisessa eli lumettoman ajoradan olosuhteiden simuloinnissa.

Maaperämällin kykyä kuvata tieprofiilin eri kerrosten lämpötilaa kokeiltiin pienellä testiaineistolla. Tieprofiilien lämpötiloja seurataan Suomessa muutamilla havaintopaikoilla ja tätä tutkimusta varten saatiin käyttöön Keski-Suomen ELY-keskuksen Kuoreveden percoaseman lämpötilan mittausaineisto ajalta 19.9.2006–17.6.2009. Percoasemalla mitataan kahden tunnin välein ilman lämpötila sekä tieprofiilin lämpötila syvyyksiltä: 0,15 m, 0,30 m, 0,50 m, 0,80 m ja 1,10 m. Kuoreveden percoasema on perustettu peltoalueen läpi kulkevalle yleiselle soratielle, jolla tien pinta 25 cm:n syvyyteen on soramursketta ja osin silttinen pohjamaa alkaa n. 55 cm:n syvyydellä (Kelho 2008). Koesimuloinnissa maaperämällin syötetietona käytettiin percoasemalla mitattua ilman lämpötilaa sekä muita säätietoja, jotka oli havaittu alle 10 km:n päässä sijaitsevalla Ilmatieteen laitoksen Jämsän Hallin havaintoasemalla (61°51'; 24°47').

Maaperämällillä simuloituja tieprofiilin lämpötiloja verrattiin percoasemalla mitattuihin lämpötiloihin. Tällöin huomiota kiinnitettiin erityisesti routaantumisen ja sulamisen alkamiseen 15 cm:n syvyydellä ja sulamisen päättymiseen koko profiilissa, koska näiden tekijöiden simuloinnilla on tämän tutkimuksen kannalta eniten merkitystä. Testisimuloinnin tulokset on koottu taulukkoon 2. Rajalämpötilana routaantumisen ja sulamisen alkamisessa sekä sulamisen päättymisessä on käytetty 0°C.

Koesimuloinnin tulosten perusteella maaperämälli kykeni varsin hyvin kuvaamaan havaittua maan jäätymiseen ja sulamiseen liittyvää lämpötilavaihtelua tarkastelujaksolla. Havaittujen ja simuloitujen lämpötila-arvojen tarkastelu 80 cm:n syvyydessä kuitenkin osoitti, että simuloitussa tieprofiilissa jäähtyminen ja toisaalta myös lämpeneminen tapahtuivat nopeammin kuin percoaseman tieprofiilin havainnoissa. Näin ollen simuloinnissa käytetty maaperämällin tieprofiilin lämmönjohtavuus lienee hieman suurempi kuin percoaseman tierakenteen lämmönjohtavuus.

2.2 Tutkimusalueet

Tässä tutkimuksessa simuloinnit tehtiin Pirkanmaalla sijaitsevan Juupajoen Hyytiälän (61°50'; 24°17'), Pohjois-Savon Maaningan (63°08'; 27°18') sekä Kajaanin (64°16'; 27°40') vertailu- ja muutosilmasto-olosuhteissa. Paikkakunnat ovat samoja kuin em. aiemmassa tutkimuksessa (Kokkila 2013).

Valitut paikkakunnat antavat läpileikkauskuvan nykyisiltä lämpöoloiltaan erilaisista Suomen keski-osa-alueista. Alueet ovat lisäksi mielenkiintoisia myös kelirikon esiintymisen kannalta. Ryynänen ym. (2003) esittämien Tiehallinnon tierekisteritietojen mukaan jonkinasteista runkokelirikkoa oli suhteellisesti eniten Hämeen ja Keski-Suomen tiepiireissä ja pahimpia runkokelirikkovaurioita esiintyi tavallista useammalla soratiellä mm. Savo-Karjalan tiepiirissä. Näin ollen tässä tutkimuksessa tavoitetaan varsin hyvin nykyisiä kelirikkoherkkiä alueita,

jotka toisaalta ovat myös metsäteollisuuden puuhuollon näkökulmasta merkittäviä toiminta-alueita.

2.3 Aineistot ja niiden analysointi

Simuloinneissa käytettiin samoja generoituja säätilajaksoja kuin aiemmassa korjuulojen muutosta käsittelevässä Kokkilan (2013) tutkimuksessa. Käytetyt aineistot ja säätilajaksojen generointitapa on kuvattu em. tutkimuksessa, joten tässä niistä esitetään vain pääkohdat.

Vertailuilmaston (1971–2000) säätilajaksojen generoinnit perustuivat Juupajoen, Maaningan ja Kajaanin sääasemien havaintotiedoista laskettuihin parametreihin, jotka määritettiin eräitä generointitavan muutoksia lukuun ottamatta Strandman ym. (1993) kuvaamalla tavalla. Ilmastonmuutosarvioina

Taulukko 3. Tutkimuksessa käytetyt ilmastonmuutosarvot vuodenaikojen lämpötilan ja sademäärän muutoksille (ΔT ja ΔP) Etelä-Suomeen jaksoille 2011–2020 ja 2021–2030 (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
Syysy (syys–marras)	0,8	3	1,2	4

käytettiin Jylhä ym. (2009) esittämiä keskilämpötilan ja sademäärän muutoksen (ΔT ja ΔP) todennäköisyysjakaumien mediaaneja Etelä-Suomeen jaksoille 2011–2020 ja 2021–2030 (taulukko 3). Kaikille paikkakunnille sekä jokaiselle ajanjaksolle generoitiin parametritietojen avulla yhteensä 135 kpl vuoden mittaisia säätilajaksoja (kolme 45 v:n simulaatiota).

Vertailuilmaston parametreilla tuotetuista säätilajaksista lasketut lämpötilan ja sademäärän tunnusluvut on esitetty taulukossa 4. Tunnuslukuista voidaan havaita, että malli kykenee hyvin generoimaan kuukausikohtaisen sadekertymän, mutta kuukausikohtainen keskilämpötila on simuloituissa säätilajaksissa talvikuukausina havaittuja matalampi. Tämä on seurausta malliin tehdyistä muutoksista (Kokkila 2013), joissa lämpötilajakaumaa vinoutettiin normaalijakautuneesta talvikuukausina. Muutos tehtiin, koska oletus normaalijakautuneista lämpötiloista ei talvikuukausina lämpötilahavaintojen tarkastelun perusteella pitänyt paikkaansa ja malli tuotti talvikuukausina mm. epärealistisen korkeita vuorokauden keskilämpötiloja.

Maaperämallilla tehdyissä simuloinneissa rouнтаantuminen katsottiin alkaneeksi, kun maaperän pintakerroksen lämpötila oli laskenut 0°C alapuolelle vähintään viikon ajaksi ja routa oli tällöin tunkeutunut vähintään 3 cm:n syvyyteen. Sulamisen alku puolestaan määräytyi ajankohdasta, jolloin routa oli keväällä sulanut 10 cm:n syvyydelle. Tieprofiili kat-

Taulukko 4. Juupajoen, Maaningan ja Kajaanin simuloitujen vuosien 1971–2000 havainnoista lasketut vuorokauden keskilämpötilojen kuukausikeskiarvot ja kuukausien sadekertymät.

Kuukausi	Juupajoki		Maaninka		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

sottiin kokonaan sulaneeksi, kun lämpötila kaikissa tieprofiilin kerroksissa oli kohonnut 0°C yläpuolelle. Routakauden pituus määritettiin jokaiselta simuloitulta talvelta sulamisen alkamisen ja routaantumisen alkamisen välisten ajankohtien erotuksena.

Tutkimuksessa runkokelirikon vaikeuden luokittelua tehtiin Ryynänen ym. (2003) kuvaamalla tavalla. Vuosittainen routaantumisaika, jolloin pakkasmäärä kasvaa 2500 Kh:sta 12000 Kh:in, voidaan määrittää lämpötilahavainnoista. Määrittämällä routaantumisaikat 30 vuoden lämpötilahavainnoista saadaan kuvattua routaantumisaikojen jakauma, joka noudattaa likimain normaalijakaumaa. Tällöin runkokeliriko voidaan luokitella helppoon, keskimääräiseen ja vaikeaan käyttämällä luokkarajoina esim. Ryynänen ym. (2003) mukaisesti jakauman 25 %:n ja 75 %:n prosenttipisteitä. Tällä luokittelulla esiintyy neljän vuoden aikana keskimäärin yksi vaikea runkokelirikkokevät, jolloin syksyn routaantumisaika on pidempi kuin 75 %:n prosenttipistettä vastaava routaantumisaika. Vastaavasti neljän vuoden aikana esiintyy keskimäärin yksi helppo ja kaksi tavanomaista runkokelirikkokevättä.

Runkokelirikon luokittelu helppoon, tavanomaiseen ja vaikeaan on tehty vertailuilmaston tilanteessa. Tässä työssä haluttiin tarkastella, kuinka routaantumisaikojen jakauma siirtyy ilmaston muuttuessa vertailuilmaston jakaumaan nähden ja kuinka suuri osa routaantumisaikoista on tällöin eri runkokelirikkokoluokissa. Simuloituihin säätietoihin perustuva routaantumisaikojen jakauma on huipukas. Koska prosenttipistetarkastelussa edellytetään routaantumisaikojen noudattavan normaalijakaumaa, tehtiin simuloituille routaantumisaikoille korjaus. Tällöin käytettiin hyväksi tietoa havainnoista lasketusta routaantumisaikojen keskihajonnasta, jonka oletetaan tässä säilyvän samansuuruisena myös ilmaston muuttuessa.

3 Tulokset

3.1 Routaantumisen ja sulamisen alkaminen sekä koko tieprofiilin sulaminen maaperämallilla tehtyjen simulointien perusteella

Simulointeihin perustuvat tieprofiilin routaantumisen ja sulamisen alkamisajankohtien mediaanien siirtymät sekä sulamisen päättymisajankohdan mediaanin siirtymät jaksoille 2011–2020 ja 2021–2030 verrattuna jaksoon 1971–2000 on esitetty taulukossa 5. Lisäksi taulukossa on esitetty routakauden keskimääräinen pituus ja roudan tunkeumasyyvyys tieprofiilissa eri ilmasto-oloissa sekä sulamisen keskimääräinen kesto.

Routaantumisen tavallisin alkamisajankohta siirtyy simulointien perusteella kaikilla tutkimuspaikkakunnilla lähivuosisikymmenien kuluessa muutamia vuorokausia myöhäisemmäksi, mutta muutoksia ei voida pitää puutavaran kuljetuksen näkökulmasta kovinkaan suurina. Vastaavasti sulamisen alkaminen aikaistuu simulointien perusteella muutamia vuorokausia. Routakauden keskimääräinen pituus lyheni tarkastelujakson aikana Juupajoella 10 vrk, Maaningalla 12 vrk ja Kajaanissa 8 vrk jakson 1971–2000 kausipituuteen verrattuna. Ajankohta, jolloin tieprofiili on kokonaan sula aikaistui muutosilmastojen mukaisissa simuloinneissa Juupajoella 7 ja 10 vrk, Maaningalla 6 ja 9 vrk:tta ja Kajaanissa 6 ja 10 vrk:tta jakson 1971–2000 olosuhteisiin verrattuna. Keskimääräinen sulamiskauden kesto jaksolla 2021–2030 oli simuloinneissa Juupajoella 26 vrk, Maaningalla 31 vrk ja Kajaanissa 35 vrk.

Simulointien avulla määritetyt muutokset eivät vuorokausina mitaten ole kovinkaan suuria. Maantieteellisesti tarkastellen nämä simulointitulokset voidaan kuitenkin tulkita siten, että olosuhteet Kajaanissa jaksolla 2021–2030 ovat varsin lähellä Juupajoen vertailujakson 1971–2000 olosuhteita. Simuloinneissa havaittiin myös, että talvikaudella alkoi, Juupajoen ja Maaningan osalta jaksolla 2011–2020 ja lopulta Kajaaninkin osalta jaksolla 2021–2030, esiintyä talvikelirikon mahdollistavia olosuhteita, jolloin tienpinnan routa sulii yli 10 cm:n syvyyteen.

Taulukko 5. Simuloinneista määritetty tieprofiilin routakauden keskimääräinen pituus, routaantumisen alun ja sulamisen alun mediaanin siirtymä vertailuilmastoon (1970–2000) nähden (alkaminen: + siirtyä myöhemmäksi; – aikaistuu), sulamisen kesto ja roudan keskimääräinen suurin syvyys Juupajoen, Maaningan ja Kajaanin vertailu- ja muutosilmastojen oloissa

	Vertailuilmasto	2011–2020	2021–2030
Juupajoki			
Routakauden pituus ka. (vrk)	178	172	168
– routaantumisen alun mediaanin siirtymä (vrk)		+ 3	+ 5
– sulamisen alun mediaanin siirtymä (vrk)		– 2	– 4
Sulamisen kesto ka. (vrk)	31	27	26
Roudan suurin syvyys ka. (m)	1,33	1,22	1,15
Maaninka			
Routakauden pituus ka. (vrk)	183	178	171
– routaantumisen alun mediaanin siirtymä (vrk)		+ 1	+ 5
– sulamisen alun mediaanin siirtymä (vrk)		– 4	– 8
Sulamisen kesto ka. (vrk)	36	33	33
Roudan suurin syvyys ka. (m)	1,46	1,35	1,32
Kajaani			
Routakauden pituus ka. (vrk)	186	180	178
– routaantumisen alun mediaanin siirtymä (vrk)		+ 3	+ 3
– sulamisen alun mediaanin siirtymä (vrk)		– 4	– 4
Sulamisen kesto ka. (vrk)	42	37	35
Roudan suurin syvyys ka. (m)	1,53	1,43	1,33

3.2 Routaantumisen kesto lämpötilahavaintojen ja simuloitujen säätilajaksojen perusteella

Juupajoen, Maaningan ja Kajaanin säähavaintoasemien v. 1971–2000 lämpötilahavainnoista määritetyt routaantumisaikojen keskiarvot ja keskihajonnat sekä vertailu- ja muutosilmastojen simuloituista säätilahavainnoista määritetyt routaantumisaajat on esitetty taulukossa 6. Routaantumisaajoista voidaan huomata, että vertailuilmaston (1971–2000) säätilahavainnoista lasketut routaantumisaajat ovat kaikilla kolmella paikkakunnalla hieman pidempiä kuin vertailuilmaston simuloituista säätilajaksoista lasketut routaantumisaajat. Samoin routaantumisaikojen keskihajonnat ovat säätilahavainnoista laskettuina suurempia kuin simuloituissa säätilajaksoissa.

Taulukossa esitettyjen routaantumisaikojen osalta on syytä ottaa huomioon, että leutona talvena pakkasmäärä ei välttämättä edes saavuta 12000 Kh:a, jolloin tämä talvi ei tule mukaan routaantumiskalaskelmaan. Tällä tekijällä oli vaikutusta vain Juupajoella, jossa 4%:lla jakson 2011–2020 ja 20%:lla jakson 2021–2030 simuloituista talvista

Taulukko 6. Juupajoen, Maaningan ja Kajaanin säähavaintoasemien v. 1971–2000 lämpötilahavainnoista (Hav.) sekä simuloituista säätilajaksoista (Sim.) lasketut routaantumisaikojen (vrk) keskiarvot ja keskihajonnat.

	Hav. 1971–2000	Sim. 1971–2000	2011–2020	2021–2030
Juupajoki				
Keskiarvo	56	52	59	60
Keskihajonta	24	14	15	17
Maaninka				
Keskiarvo	50	47	55	55
Keskihajonta	25	10	15	14
Kajaani				
Keskiarvo	46	43	47	49
Keskihajonta	18	11	13	13

pakkasmäärä jäi alle 12000 Kh:n.

Runkokelirikon luokittelu eri vaikeusluokkiin kauden 2011–2020 ja 2021–2030 oloissa on esitetty taulukossa 7. Routaantumisaikojen jakauman siirros näyttää tämän perusteella pidentävän routaantumisaikoja ja siten vaikeuttavan runkokelirikkoa. Jaksolla 2021–2030 kaikilla tarkastelupaikoilla aiemman 25%:n sijaan n. 37% keväistä luokiteltai-

Taulukko 7. Runkokelirikon luokittuminen vaikeaan, keskimääräiseen ja helppoon jaksoilla 2011–2021 ja 2021–2030 vertailuilmaston luokkarajoilla.

Runkokelirikko	Vertailu	Juupajoki		Vertailu	Maaninka		Vertailu	Kajaani	
		2011–2021	2021–2030		2011–2021	2021–2030		2011–2021	2021–2030
Vaikea	(25)	35	37	(25)	36	36	(25)	33	37
Keskimääräinen	(50)	48	48	(50)	48	48	(50)	49	48
Helppo	(25)	17	16	(25)	16	16	(25)	18	16

siin routaantumisaajan perusteella luokkaan ”vaikea runkokelirikko”. Vastaavasti luokan ”helppo runkokelirikko” osuus pienenee.

4 Tulosten tarkastelu

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli arvioida ilmastonmuutoksen vaikutuksia metsätietön kelirikoon lähivuosisikymmeninä. Tarkastelujakso oli ilmaston muuttumisen näkökulmasta lyhyt, mutta puunhankinnan näkökulmasta voidaan puhua jo pitkän aikavälin tarkastelusta. Toisin kuin korjuulojen muutokset hienojakoisilla kivennäismailla, kuljetusolojen muutokset routakauden pituuden osalta eivät olleet yhtä suuria eikä niissä ollut myöskään tarkastelujaksolla näkyvissä samanlaista muutoksen kynnysarvon saavuttamista, jonka jälkeen muutoksen vaikuttavuus olisi puunhankinnan näkökulmasta kasvanut. Tässä tutkimuksessa kuitenkin keskityttiin vain runkokelirikoon eikä tarkasteltu talvikauden jäätymis- ja sulamissykliä esiintymistä eri ilmasto-oloissa. Näin ollen tutkimuksessa ei voida ottaa kantaa talvikauden olosuhdevaihteluun ja sen vaikutuksiin kuljetusoloihin.

Kuljetusolojen talvikauden muutosten osalta jäätymis- ja sulamissykliä tarkastelu olisi ollut tärkeää, mutta nykyisenkaltaisella mallijärjestelmällä se ei ole mahdollista. Tämä sen vuoksi, että säägeneraattori pystyy kyllä tuottamaan keskimääräisiä olosuhteita varsin hyvin, mutta sillä ei voida generoida ääriolosuhteita (hyvin leuto talvi, hyvin kylmä talvi). Tämän lisäksi jäätymis- ja sulamissykliä aikajännteeseen ja esiintymistiheyteen liittyvä tarkastelu edellyttäisi lämpötilan ja sadannan muutosten yhteisvaikutuksen arviointia eri ilmasto-oloissa sekä säägeneraattorin muokkaamista, joten tällainen

tarkastelu on laajuutensa vuoksi luontevaa tehdä erillisenä. Samantyyppistä tarkastelua kannattaisi tehdä myös kevään sulamisjaksoilta, jolloin voitaisiin arvioida kevään sääolojen muutosten vaikutusta roudan sulamiseen ja runkokelirikon vaikeuteen. Tutkimuksessa havaittiin sulamisen aikaistuminen. Tämä voi merkitä sulamisjakson lämpökertymän pienentymistä ja siten hitaampaa roudan sulamista.

Säätiloja generoiva malli ei pysty talvikaudella tuottamaan täysin todenmukaista lämpötilajakautta. Mallilla ei myöskään pystytä kuvaamaan realistisesti ääritalvien esiintymistä, joten esimerkiksi leutojen talvien määrä voi olla tässä tutkimuksessa esitettyä suurempikin. Mallin rajoitteet näkyivät tutkimuksessa myös routaantumisaikalaskennassa, jossa vertailuilmaston säätilahavainnoista lasketut routaantumisaajat olivat hieman pidempiä kuin vertailuilmaston simuloituista säätilajaksoista lasketut routaantumisaajat. Syynä tähän on se, että mallin generoimat lämpötilat ovat hieman liian matalia, jolloin routaantumisaika jää säätilajaksoista laskettuna lyhyemmäksi kuin havainnoista laskettuna. Säätilahavainnoista ja simuloituista säätilajaksoista laskettujen routaantumisaikojen keskihajontojen erot selittyvät puolestaan sillä, että säätilajaksojen generointiin käytettyä mallia ei ole suunniteltu keskimääräisistä poikkeavien sääolosuhteiden kuvaamiseen. Tämä puolestaan heijastuu pienentävänä tekijänä simuloitujen säätilajaksojen routaantumisaikojen keskihajontaan.

Runkokelirikko näyttäisi routaantumisaikojen muutosten perusteella vaikeutuvan tarkastelujaksolla jakson 1971–2000 oloihin verrattuna. Runkokelirikoon vaikuttavat kuitenkin muutkin tekijät kuin routaantumisaika. Esimerkiksi kevään aikaistuminen voi merkitä pienempää sulamiskauden lämpökertymää eli käytännössä hitaampaa sulamista. Tämä puolestaan helpottaa runkokelirikkoa.

Toisaalta lähivuosisikymmeninä yleistyvät tilanteet, jossa routaantumista runkokelirikon kannalta merkittävimmissä tien kerroksessa voi tapahtua koko talven ajan. Jos pohjavesi on tällöin lähellä jääty-misvyöhykettä, voi siitä periaatteessa nousta vettä jäätymisrintamaan, jolloin jäälinssien muodostu-misen mahdollisuus tierakenteeseen on olemassa. Näin ollen talven pakkasmäärän jäädessä pieneksi korostuvat roudan vaikutusten arvioinnissa muut tekijät, kuten tierakenteen materiaali, alueen poh-jajamaa sekä pohjavesitilanne. Varsinkin metsäties-töllä tämän kelirikkoalttiuden vaihtelun tunteminen auttaa arvioitaessa sekä kuljetusten suunnittelua että mahdollisten kelirikkokorjausten tarvetta.

Roudan tunkeumasyvyyden osalta muutokset oli-vat tässä tutkimuksessa samansuuntaisia kuin erilai-seen ilmastonmuutoskenaarioon perustuvat Venä-läinen ym. (2001a) esittämät tulokset. Roudan mak-simisyvyys alenee ja esimerkiksi Juupajoen osalta routa tunkeutui jakson 2021–2030 simuloinneissa keskimäärin 1,15 m syvyydelle. Tiestön routaan-tumisen osalta on hyvä pitää mielessä, että vaikka ilmasto lämpenee, pakkasjaksoja tulee esiintymään jatkossakin ja näin ollen routa painuu lumettomalla tiestöpinnalla myös jatkossa varsin syväälle. Tässä yhteydessä on kuitenkin hyvä muistaa myös se, että kaikki tämän tutkimuksen routatarkastelut pe-rustuvat lumettoman tienpinnan tilanteeseen, jolloin eristävä lumikerros ei estä roudan muodostumista. Tässä tutkimuksessa ei siten ole tarkasteltu tieraken-teen routaa tilanteissa, joissa metsätie aurataan vasta talven kuluessa ja jolloin tien kantavuutta paran-tavaa routaa ei ole välttämättä ennättänyt lainkaan muodostua.

Tässä tutkimuksessa kuvatut muutokset tiestön routaantumisessa ja roudan sulamisessa eivät vai-kuta kovin suurilta. Maantieteellisesti ne voidaan kuitenkin tulkita siten, että Kajaanin tunnusluvut kaudella 2021–2030 ovat jo varsin samankaltaiset Juupajoen vertailujakson tunnuslukujen kanssa. Näin muutamassa vuosikymmenessä olosuhteissa voi tapahtua monen sadan kilometrin suuruinen siirros.

Kiitokset

Käsikirjoitusta ovat sen eri vaiheissa kommenteil-laan edistäneet Esko Mikkonen, Hannu Rita sekä kaksi anonymiä arvioijaa. Lisäksi tutkimustyötä ovat tukeneet Metsäteho Oy:n asiantuntijat sekä CoupModel'in User Group ja Per-Erik Jansson. Kiitokset heille kaikille. Kiitokset Metsämiesten Säätiölle tutkimuksen rahoittamisesta.

Kirjallisuus

- Belt, J., Lämsä, V.-P., Ehrola, E., Ernvall, T. & Seppälä, H. 1999. Soratiestön runkokelirikko. Tielaitoksen tut-kimuksia 1/1999. Tiehallinto. Tie- ja liikenneolojen suunnittelu. 92 s.
- Hämäläinen, E. 2003. Tiehallinnon pienteitä koskevan hallinnon järjestäminen. Tiehallinto, palvelujen suun-nittelu. Sisäisiä julkaisuja 39/2003. 51 s. + liitteet 6 s.
- Jansson, P.-E. & Karlberg, L. (toim.). 2004. [Verkko-julkaisu] COUP manual – Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere system. Saa-tavissa: <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. & Seito-la, T. 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti. Raportteja 2009:4. Ilmatieteen laitos, Hel-sinki. 102 s.
- Kelho, M. 2008. Roudan seuranta-asetat painorajoitus-suunnittelun tukena. Diplomityö. Teknillinen korkea-koulu, rakennus- ja ympäristötekniikan koulutusohjel-ma. 115 s + liitteet 75 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.
- Kokkila, M. 2013. Ilmastonmuutoksen vaikutus puunkor-juun talvikauden korjuuoloihin hienojakoisella kiven-näismaalla. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2013: 5–18.
- KTH. 2009. [Verkkodokumentti]. CoupModel – Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere system. Saatavissa: <http://www.lwr.kth.se/vara%20da>

- torprogram/CoupModel/. [Viitattu 4.12.2009].
- Metsähallitus, 2011. [Verkkodokumentti] Metsätalous – Metsät ja metsien käyttö – Metsätiet. <http://www.metsa.fi/sivustot/metsa/fi/Metsatalous>. [Viitattu 14.9.2011]
- Metsäteho. 2001. Metsätieohjeisto. Helsinki, 2001. ISBN 951-673-169-4. 96 s.
- Metsätilastollinen vuosikirja, 2008. [Verkkojulkaisu] 3. Metsien hoito. Saatavissa: http://www.metla.fi/met-info/tilasto/julkaisut/vsk/2008/vsk08_03.pdf. [Viitattu 21.11.2011]
- 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.
- Pennanen, O. & Mäkelä, O. 2003. Raakapuukuljetusten kelirikkohaittojen vähentäminen. Metsätehon raportti 153. 42 s + liitteet 11 s.
- Ryynänen, T., Belt, J. & Ehrola, E. 2003. Sorateiden runkokelirikko ja kelirikon vaikeuden ennustaminen. Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito -tutkimusohjelma. Tiehallinnon selvityksiä 46/2003. 69 s.
- Saarelainen, S. & Törnqvist, J. 2004. Painorajoituksen suuruuden ja ajoituksen määrittäminen. Alempiasteisten teiden taloudellinen ylläpito. Esiselvitys. Tiehallinnon selvityksiä 8/2004. 63 s + liitteet 18 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.
- Tiehallinto, 2009. Ilmastonmuutoksen vaikutus tiestön hoitoon ja ylläpitoon. Tiehallinnon selvityksiä 8/2009. 66 s + liitteet 8 s.
- Uotila, E. 2003. Puoli vuosisataa tietekoa metsänparannusvaroilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2003. s. 109–127.
- Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Lahtinen, R. & Heikinheimo, M. 2001a. The influence of climate warming on soil frost on snow-free surfaces in Finland. *Climatic change* 50: 111–128.
- , Tuomenvirta, H., Heikinheimo, M., Kellomäki, S., Peltola, H., Strandman, H. & Väisänen, H. 2001b. Impact of climate change on soil frost under snow cover in a forested landscape. *Climate research* 17: 63–72.

20 viitettä