

Maaperän hiili ja typpi luonnontilaisissa ja talousmetsissä

Pekka Tamminen ja Hannu Ilvesniemi

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

Sarjassa ei käytetä tieteellistä tarkastusmenettelyä.

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

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

Toimitus

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

Julkaisija

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

Tekijät			
Tamminen, Pekka & Ilvesniemi, Hannu			
Nimeke			
Maaperän hiili ja typpi luonnontilaisissa ja talousmetsissä			
Vuosi	Sivumäärä	ISBN	ISSN
2012	16	978-951-40-2369-9 (PDF)	1795-150X
Alueyksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet			
Etelä-Suomen alueyksikkö / 3534 Maankäsittelyn ja lannoituksen vaikutus metsämaahan ja puustoon			
Hyväksynyt			
Taneli Kolström, tutkimusjohtaja, 10.5.2012			
Tiivistelmä			
<p>Tässä tutkimuksessa käytettävät luonnontilaisten metsien aineistot koottiin pääosin 1990-luvun alussa perustetuilta koealoilta (n=289) vuosina 2001–2003 ja talousmetsiä edustava aineisto valtakunnan metsien 8. inventoinnin pysyviltä koealoilta (n=310) vuosina 2006–2007. Luonnontilaiset metsät olivat keskimäärin 136- ja talousmetsät 73-vuotiaita. Aineistoista poistettiin koealat, jotka olivat soistuneita tai sijaitsivat kalliomaalla. Luonnontilaisista koealoista poistettiin lisäksi metsäpalon polttamat ja VMI-koealoista muut kuin nuoria ja varttuneita kasvatusempeksiä ja uudistuskypsiä metsiä edustavat koealat.</p> <p>Luonnonmetsien orgaanisen kerroksen hiilipitoisuus ja C/N-suhde olivat suurempia, mutta typipitoisuus oli pienempi kuin talousmetsissä. Typpeä (kg/ha) oli luonnonmetsien orgaanisessa kerroksessa vähemmän kuin talousmetsissä, sen sijaan hiiltä (kg/ha) oli yhtä paljon. Luonnontilaisissa metsissä kivennäismaakerroksen 0–10 cm hiilen ja typen pitoisuudet ja määrät olivat pienempiä kuin talousmetsissä. Luonnonmetsien suuremmat C/N-suhteet ja vähäisempi typen määrä viittasivat luonnonmetsien maaperän huonompaan viljavuuteen. Luonnon- ja talousmetsien ikäero selitti vain osan yleensä hyvin maan viljavuutta kuvaavien C/N-suhteiden eroista. C/N-suhde oli luonnonmetsien orgaanisessa kerroksessa 1,5 yksikköä ja kivennäismaassa 4 yksikköä suurempi kuin ikäeron perusteella oli odotettavissa.</p> <p>Kun koealat luokiteltiin talous- ja luonnonmetsiin analyttisesti erotteluanalyyysillä, erottelu onnistui kohtuullisesti, onnistumissadannes oli 70. Erotteluyhtälöön valikoituivat tällöin orgaanisen kerroksen C/N-suhde ja kivennäismaan typipitoisuus ja hiilen määrä.</p>			
Asiasanat			
luonnonmetsät, maaperä, hiili, typpi, viljavuus			
Julkaisun verkko-osoite			
http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp236.htm			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
Yhteydenotot			
Pekka Tamminen, Metla, PL 18, 01301 Vantaa. Sähköposti pekka.tamminen@metla.fi			
Bibliografiset tiedot			
Muita tietoja			
Taitto: Maija Heino			

Sisällys

1 Johdanto	5
2 Aineisto ja menetelmät	6
3 Tulokset	8
3.1 Aineistojen vastaavuus	8
3.2 Pitoisuustunnukset.....	9
3.3 Hiili- ja typpimäärät	11
3.4 Luonnon- ja talousmetsien erottelu hiili- ja typpimuuttujien avulla	12
4 Tulosten tarkastelu	13
5 Johtopäätökset	14
Kirjallisuus	14

1 Johdanto

Metsämaat ovat kehittyneet Suomessa jääkauden jälkeen mm. siten, että maan pinnalle ja kivennäismaan pintaosiin on kertynyt kariketta ja siitä muodostunutta orgaanista ainetta. Samalla maa on happamoitunut, kivennäismaan pintaosa on rapautunut ja alkuaineita ja yhdisteitä on huuhtoutunut maan pinnasta syvemmälle maahan, pohjaveteen ja vesistöihin. Maan pintaosa on muuttunut niin, että on muodostunut erilaisia maannoksia, joista yleisimpiä ovat podsolit ja turvemaat eli histosolit (Tamminen ja Tomppo 2008).

Hiiltä ja typpeä on kertynyt metsämaahan Suomessa jopa 10 000 vuoden ajan (Niemelä 1990). Eniten hiiltä on kertynyt soihin ja soistuneille kasvupaikoille. Hiilen vuotuinen nettokertymä kangasmailla on ollut Liskin ja Westmannin (1995) mukaan 7...10 kg/ha jääkauden jälkeisenä aikana. Peltoniemi ym. (2004) arvioivat mallitarkastelun perusteella, että hiiltä kertyy vuosittain orgaaniseen kerrokseen keski-ikäisissä talousmetsissä muutamasta kilogrammasta muutamaa kymmeneen kilogrammaan hehtaarille.

Hiilen ja typen kertymiseen ovat vaikuttaneet jääkauden jälkeisenä aikana mm. maan ikä (Liski ym. 1998), ilmasto (Liski ja Westman 1997), kasvillisuuden koostumus, kasvien biomassatuotos, karikkeen hajotus, erityisesti sen hitaus soiden hapettomissa oloissa, metsäpalot, myrskytuhot ja myös ihmisen toiminta. Vaikka on mahdotonta arvioida, kuinka paljon ihmisen toiminta on muuttanut hiilen ja typen määriä, voidaan olettaa, että ihmisen toimenpiteet ovat yleensä nopeuttaneet orgaanisen aineen hajoamista, edistäneet typen mineralisaatiota ja vähentäneet hiilen kertymistä maahan (Janssen 1996, Olsson ym. 1996, Lundmark-Thelin ja Johansson 1997, Smolander ym. 1998, Smolander ym. 2000, Bengtsson ym. 2003). Ihminen on vaikuttanut laaja-alaisesti metsiin ja metsien maaperään Suomessa 300–400 vuotta, eniten ehkä kaskeamalla ja laiduntamalla, mutta erityisesti viimeisten 50 vuoden aikana myös korjaamalla puutavaraa, ojittamalla, kulottamalla, muokkaamalla, kylvämällä, istuttamalla ja lannoittamalla. Suuri osa metsistä ja metsämaista on ollut luonnontilassa tuhansia vuosia, jopa yli 9000 vuotta eli 90–95 % ajasta, joka on kulunut maiden paljastumisesta maannerjään tai jääkauden jälkeisten vesien alta. Ihmisen vaikutus metsiin on kestänyt siis melko lyhyen ajan.

Luonnontilaisissa metsissä maaperää ovat muuttaneet paitsi edellä mainitut jatkuvat, mutta hitaat ilmiöt, myös metsäpalot, puiden kaatuminen juurineen myrskyissä ja maa-aineksen kulkeutuminen tulvissa ja eroosiotapahtumissa. Mitä kuivempi kasvupaikka on ollut, sitä useammin metsäpalo on polttanut metsän ja maan (Saari 1923, Angelstam 1998). Toisaalta kosteilla paikoilla metsäpalot ovat olleet harvinaisempia ja lievempiä, jolloin maahan on päässyt kertymään runsaammin orgaanista ainetta tai kasvupaikka on voinut soistuaikin eli maan pinnalle on kertynyt turvetta. Etelä-pohjoissuunnassa metsien ja metsämaiden kehitys on ollut erilaista. Etelässä on kasvanut vaateliaampia kasveja ja puita, joiden juuret ulottuvat syvemmälle ja joiden ravinteikkaampi karikke hajoaa nopeammin kuin pohjoisessa (Mikola 1954), mutta jotka tuottavat enemmän biomassaa ja kariketta kuin Pohjois-Suomen kasvillisuus. Juuristokerros on etelässä keskimäärin paksumpi kuin pohjoisessa (Paavilainen 1966), vaikka puiden juuriston tiheys runkutilavuutta kohti olisikin suurempi pohjoisessa kuin etelässä (Helmisaari ym. 2007). Maaperältään eniten luonnontilasta poikkeavia metsämaita ovat entiset pellot, toistuvasti kasketut maat, ojitetetut suot ja metsää uudistettaessa muokatut maat.

Kuinka sitten nykyään luonnontilaisiksi luokiteltavat metsät ja ns. talousmetsät poikkeavat toisistaan? Lähes kaikista tällä hetkellä luonnontilaisina pidetyistä metsistä on joskus korjattu puutavaraa ja osaa lienee myös kaskettu. Viimeisestä hakkuusta on voinut kulua 50...100 vuotta, jolloin

hakkuusta kertovat kannot ovat ehtineet suurelta osin lahota (Melin ym. 2009, Shorohova ym. 2012). Pääosa luonnontilaisina pidettävistä metsistä eroaa tavallisista talousmetsistä lähinnä siinä, että edellisestä hakkuusta on kulunut pidempi aika ja että nykypuuston luonnonpoistumaa ei ole korjattu pois metsästä.

Vaikka mallilaskelmien mukaan maan hiilimäärä on suurempi luonnon- kuin talousmetsissä (Hong ym. 2002, Shanin ym. 2011), niin Suomen oloissa, erityisesti maan eteläpuoliskossa, luonnon- ja talousmetsien maaperätunnusten erot voivat olla vähäisiä, koska likimain kaikkia metsiä on hakattu, kaskettu ja/tai laidunnettu. Metsien hoidon – esim. hakkuut ja luonnonpoistumapuuston korjuu – vaikutus ilmenee todennäköisesti selvemmin orgaanisessa kerroksessa (Covington 1981, Johnson 1992) kuin kivennäismaassa, mutta kaskeaminen ja metsälaiduntaminen saattavat vaikuttaa myös kivennäismaan pintaosiin (Kivekäs 1939).

Suomesta ei ole kerätty juurikaan tietoja luonnontilaisten metsien maaperästä tai jos on, tilannetta ei ole verrattu nykymuotoisiin talousmetsiin. Tässä tutkimuksessa pyritään selvittämään, eroavatko luonnon- ja talousmetsät toisistaan maaperän hiilen ja typen määrien tai pitoisuuksien osalta.

2 Aineisto ja menetelmät

Luonnontilaisilla metsillä tarkoitettiin koealoja perustettaessa metsiä, joissa ei ollut havaittavissa merkkejä ihmisen aiheuttamista muutoksista sen enempää maaperässä kuin puustossakaan (Isomäki ym. 1998). Luonnontilaisiin metsiin perustettiin 1990-luvulla koealarypäitä, jotka mitattiin vuosina 2001–2003 (Isomäki ym. 1998, Siitonen ja Isomäki 2003) ja joiden ns. keskuskoelalta (ympyräkoela, jonka pinta-ala oli 2500 m²) kerättiin sylinterillä (d=60 mm) otetusta 16:sta osanäytteestä koostuva kokoomanäyte orgaanisesta kerroksesta (Ofh) ja neljän lapiolla otetun osanäytteen kokoomanäyte kivennäismaakerroksesta 0–10 cm. Kivisyys arvioitiin ns. painamismenetelmällä kivennäismaan 30 cm:n pintakerroksesta samalla, kun otettiin humusnäyte ja mitattiin humukserroksen paksuus.

Talousmetsiä edustava vertailuaineisto valikoitiin valtakunnan metsien 8. inventoinnin pysyviltä koealoilta vuosina 2006–2007 kerätystä maanäyteaineistosta (Ilvesniemi ym. 2009). Orgaanisesta kerroksesta otettiin sylinterillä (d=60 mm) 20 osanäytteen kokoomanäyte ja kivennäismaakerroksesta 0–10 cm 5 osanäytettä lapiolla tai tilavuusnäytteenottimella (d=39 mm) tai 20 osanäytettä kourukairalla (d≈23 mm). Kivisyys arvioitiin painamismenetelmällä (Viro 1952, 1958) kuten luonnontilaisilla koealoillakin. Näytteenoton yhteydessä maanäytteistä poistettiin isot (d>2 mm) juuret.

Näytteet kuivattiin ilmakeiviksi 40 °C:ssa, orgaaniset näytteet jauhettiin hienoksi myllyllä, jossa oli 2 mm:n pohjaseula ja kivennäismaat seulottiin 2 mm:n seulalla. Analyysit tehtiin näistä alle 2 mm:n jakeista. Kaikista orgaanisen kerroksen näytteistä ja talousmetsien kivennäismaanäytteistä määritettiin hiili- ja typpipitoisuudet Leco CHN 1000 -laitteella. Luonnontilaisten koealojen kaikista kivennäismaanäytteistä määritettiin orgaanisen aineen pitoisuus hehikutushäviönä, mutta hiili- ja typpipitoisuus analysoitiin vain 60 näytteestä Leco CHN-laitteella. Näiden 60 näytteen avulla laskettiin regressioyhtälöt hiili- ja typpipitoisuuksien ennustamiseksi näytteille, joilta hiili- ja typpipitoisuus jäi analysoimatta. Hiilipitoisuus ennustettiin yhtälöllä (1):

$$(1) \quad C = \exp[-0,283 + 0,837 \cdot \ln(Oa + 1)] - 1; R^2 = 0,94; s_f = 0,088, \text{ missä}$$

C on hiilipitoisuus (%) kuiva-aineesta
 Oa on orgaanisen aineen pitoisuus (%)
 exp[f] tarkoittaa ilmaisua e^f
 R^2 on selityaste
 s_f on regressioyhtälön jäännöshajonta

Typipitoisuus ennustettiin yhtälöllä (2):

$$(2) N = \exp \{0,141 - 0,0457 \cdot [\ln(Oa+1)]^2 + 0,0422 \cdot Oa\} - 1; R^2 = 0,93, s_f = 0,014.$$

Kivennäismaan tiheys, joka tarkoittaa alle 2 mm:n jakeen massaa jaettuna koko näytteen tilavuudella, ennustettiin luonnontilaisille koealoille Tammisen ja Starrin (1994) aineistosta lasketulla yhtälöllä (3):

$$(3) Tiheys_{2mm} = 1,53 - 0,18 \cdot \sqrt{Oa} - 0,0108 \cdot Sora; R^2 = 0,80; s_f = 0,093.$$

Taloustmetsäkoalojen kivennäismaiden tiheys määritettiin joko määrättilavuisten näytteiden perusteella tai ennustettiin Tammisen ja Starrin (1994) yhtälöillä (9) ja (10).

Kasvupaikka- ja puustotunnuksista määritettiin kummassakin aineistossa koealan yhtenäiskoordinaatit, jakson 1971–2000 lämpösumma (Ojansuu ja Henttonen 1983), maaperän paksuus (1–3), avokallion peittävyys (0–5), suosammalien peittävyys (0–5), kasvupaikan kosteus (1–6), kivisyys (Viro 1952, 1958, Tamminen 1991), kasvupaikkatyyppi (1–6), puuston kehitysluokka (0–7), pääpuulaji ja puuston keski-ikä.

Vaikka luonnonmetsissä on myrskyjen ja metsäpalojen uudistamia metsiköitä, niiden vertaaminen nuoriin taloustmetsiin on ongelmallista, eikä näitä nuorimpia luonnonmetsiä ole sen tähden otettu mukaan selvitykseen. Aineistoista poistettiin kalliomaat, soistuneet (suosammalien peittävyys > 25 %) tai ojitetut kasvupaikat, koealat, joilla orgaanisen kerroksen paksuus oli yli 9,5 cm, koealat, joilla puuston kehitysluokka oli 0–3 tai 7 (Metsäntutkimuslaitos 1985) – ts. mukaan otettiin vain nuoret ja varttuneet kasvatusmetsät sekä uudistuskypsät metsät – ja joilta puuttui puulajiarvio tai puulaji ei ollut mänty, kuusi tai koivu. Orgaanisen kerroksen paksuuden ylärajaksi asetettiin 9,5 cm, koska sitä paksummat kerrokset olivat yleensä turvetta.

Talous- ja luonnonmetsien hiili- ja typpitunnusten eroja testattiin varianssianalyysillä. Aineistojen vertailtavuutta pyrittiin parantamaan käyttämällä parhaiten vastemuuttujien kanssa korreloivia maaperä-, kasvupaikka- ja puustomuuttujia kovariaatteina varianssianalyseissä. Tilastollista analyysiä varten muodostettiin valemuuttujia, jotta nominaali- ja järjestysasteikolla mitattuja muuttujia olisi voitu hyödyntää kovarianssianalyysissä. Osa jakaumista, erityisesti kivennäismaan muuttujien jakaumat, olivat oikealle vinoja. Ne normalisoitiin logaritimuunnoksella. Samalla näiden muuttujien jäännösvariانسsit tasoittuivat. Logaritimuunnettujen muuttujien keskiarvo, alkuperäisessä asteikossa estimoitiin kaavalla,

$$\bar{x}_g = e^{\overline{\ln x} + \frac{s_{\overline{\ln x}}^2}{2}}, \text{ missä}$$

$\overline{\ln x}$ on ln-muunnettujen arvojen aritmeettinen keskiarvo ja

$s_{\overline{\ln x}}$ on vastaava keskiarvon keskivirhe

Logaritimuunnettujen muuttujien keskiarvon keskivirhe alkuperäisessä asteikossa estimoitiin kaavalla

$$s_{\bar{x}} = \bar{x} \sqrt{e^{s_{\overline{\ln x}}^2} - 1}$$

Erotteluanalyysillä etsittiin parhaat maa-analyysimuuttujien yhdistelmät, jotka erottelivat luonnon- ja taloustmetsiä, ja testattiin samalla erottelun onnistumista. Tilastoanalyseissä käytettiin PASW Statistics 17 -ohjelmistoa.

3 Tulokset

3.1 Aineistojen vastaavuus

Luonnon- ja talousmetsien kasvupaikka-, maaperä- ja puustotunnusten välillä oli tilastollisia eroja. Luonnonmetsät sijaitsivat keskimäärin 69 km pohjoisempana, 47 m korkeammalla, niiden lämpösumma oli 90 astepäivää alempi ja kivinäisyydessä kiviä oli 5 %-yksikköä vähemmän kuin talousmetsissä (taulukko 1). Aineistojen ikäjakaumat poikkesivat selvästi toisistaan, mutta laskentaan rajatuista luonnonmetsistä ikä oli määritetty vain 180 koealalta (taulukko 1). Talousmetsissä puuston iän minimi, mediaani ja maksimi olivat 16, 73 ja 326 vuotta ja luonnonmetsissä 46, 136 ja 324 vuotta. Luonnonmetsät olivat siis keskimäärin noin 60 vuotta vanhempia kuin talousmetsät – aritmeettisten keskiarvojen erotus oli 58 ja mediaanien erotus 63 vuotta.

Lisäksi luonnonmetsät olivat keskimäärin uudistuskypsiä, kun talousmetsät olivat varttuneita kasvatusmetsiä, ja aineistojen puulajijakaumat olivat sikäli erilaiset, että luonnonmetsissä oli enemmän kuusikoita ja vähemmän männiköitä kuin talousmetsissä (taulukko 2).

Taulukko 1. Talous- (TM) ja luonnonmetsien (LM) pohjoiskoordinaatti, lämpösumma, korkeus ja kivinäisyyden (0–30 cm) kivisyys sekä puuston keski-ikä.

Muuttuja	TM	LM	t-arvo	p-arvo
n	310	289		
P-yhtenäiskoord., km	6 994	7 064	-3,79	,000
L-summa, d.d.	1 102	1 012	6,82	,000
Korkeus, m	136	183	-8,65	,000
Kivisyys, %	37	32	2,90	,004
Ikä	77	135 ^{a)}	14,7	,000

a) n=180

Taulukko 2. Kosteusluokkien, kasvupaikkatyyppien, puulajien ja kehitysluokkien frekvenssit talous- ja luonnonmetsäaineistoissa.

	Kosteus						
	Hyvin kuiva	Kuiva	Tuore	Kosteahko	Kostea	Yhteensä	
TM	3	85	189	31	2	310	
LM	5	99	161	18	6	289	
Yhteensä	8	184	350	49	8	599	
	Kasvupaikkatyyppi						
	Lehdot	OMT ym	MT ym	VT ym	CT ym	CIT	Yhteensä
TM	8	51	135	99	17	0	310
LM	3	63	114	77	24	8	289
Yhteensä	11	114	249	176	41	8	599
	Vallitseva puulaji						
	Mänty	Kuusi	Koivu	Yhteensä			
TM	195	98	17	310			
LM	132	138	19	289			
Yhteensä	327	236	36	599			
	Kehitysluokka						
	Nuori kasvatus	Varttunut kasvatus	Uudistuskypsä	Yhteensä			
TM	99	120	91	310			
LM	32	54	203	289			
Yhteensä	131	174	294	599			

3.2 Pitoisuustunnukset

Luonnon- ja talousmetsät erosivat toisistaan kaikkien pitoisuustunnusten suhteen (taulukko 3). Orgaanisen kerroksen hiilipitoisuus ja C/N-suhde olivat luonnonmetsissä korkeampia ja tyypipitoisuus matalampi kuin talousmetsissä (taulukko 3), kun taas luonnonmetsien kivennäismaan hiili- ja tyypipitoisuudet olivat matalampia ja C/N-suhde korkeampi kuin talousmetsissä. Näistä muuttujista parhaiten kasvupaikan viljavuutta mittaava orgaanisen kerroksen C/N-suhde oli keskimäärin matalin maan eteläosissa ja lehtomaisilla koivu- tai kuusia kasvavilla kasvupaikoilla.

Taulukon 3 kovariaattien lisäksi orgaanisen kerroksen hiilipitoisuus ja C/N-suhde korreloivat nykypuuston iän kanssa niin, että muuttujat kasvoivat nykypuuston iän myötä aluksi voimakkaasti, myöhemmin hyvin hitaasti (kuvat 1a ja 1b).

Yhdistetyn aineiston, 310 talousmetsä- ja 180 luonnonmetsäkoealaa, joilta oli määritetty puuston ikä, pitoisuustunnusten osittaiskorrelaatiot osoittivat, että muuttujat korreloivat parhaiten nykypuuston iän logaritmin kanssa. Tämä tarkoittaa sitä, että hiilen ja typen pitoisuuksien muutokset olivat nopeampia nuorissa kuin vanhoissa metsissä (kuva 1, taulukko 4).

Taulukko 3. Talous- ja luonnonmetsien orgaanisen kerroksen ja kivennäismaakerroksen 0–10 cm hiili- ja tyypipitoisuudet. Keskiarvot on estimoitu kovarianssianalyysillä kovariaattien keskimääräiseen tasoon. Kovariaattien edessä on regressiokertoimen etumerkki.

Muuttuja	Talousmetsä		Luonnonmetsä		F-arvo	p	Kovariaatit (p<0,05) ^{b)}
	\bar{X}	$S_{\bar{X}}$	\bar{X}	$S_{\bar{X}}$			
<i>Orgaaninen kerros</i>							
C, g kg ⁻¹	392	3,7	412	3,8	14,6	,000	+Lsum, -Kpt12
N, g kg ⁻¹	12,9	0,13	11,5	0,13	55,2	,000	+Kivis, +Kpt12, -Mänty
C/N	31,1	0,28	36,9	0,28	193	,000	-Lsum, -Kpt12, +Mänty
n	301		289				
<i>Kivennäismaa 0–10 cm</i>							
C, g kg ^{-1 a)}	24,6	0,42	20,9	0,38	19,6	,000	+Lsum, +Korkeus, + Kivis
N, g kg ^{-1 a)}	1,29	0,031	0,89	0,032	83,2	,000	+Lsum, +Kpt12, -Mänty
C/N	21,9	0,21	26,9	0,22	254	,000	+Lsum, +Kivis, -Kpt12
n	310		288				

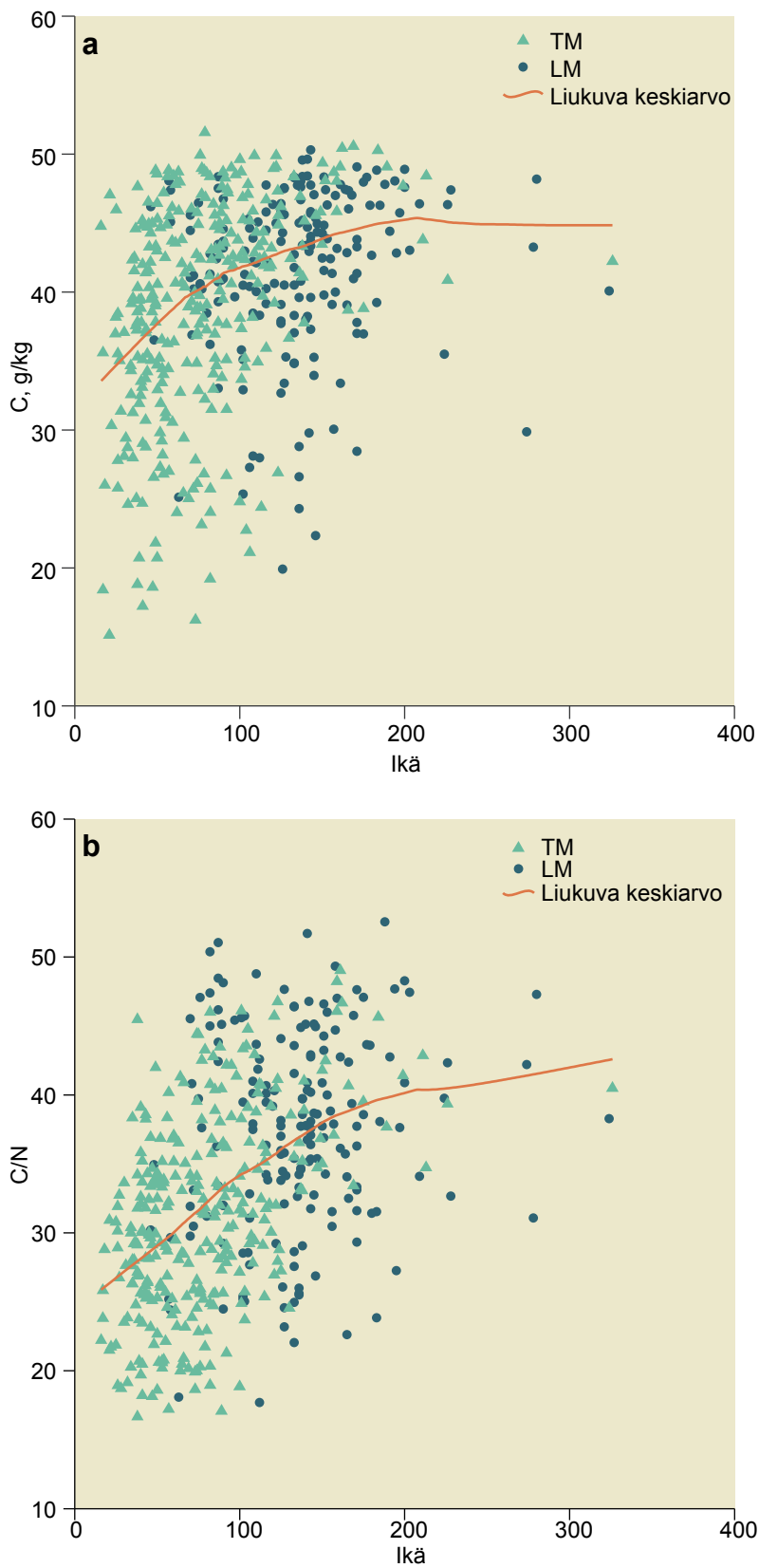
a) Ln-muunnos

b) Keskiarvojen yhtäsuuruus testattiin kovarianssianalyysillä. Kovariaattien selitykset: Lsum – Keskimääräinen lämpösumma kaudella 1971–2000 (dd/1000), Korkeus – Paikan korkeus m.p.y (m), Kpt12 – Kasvupaikkatyyppi lehto (1) tai lehtomainen kangas (2), Kivis – Painamisenetelmällä arvioitu kivien osuus maan tilavuudesta (%), Mänty – Vallitseva puulaji mänty

Taulukko 4. Pitoisuusmuuttujien osittaiskorrelaatiot (r) nykypuuston iän suhteen.

Orgaaninen kerros	r (ln lkä)	p-arvo	Muuttujat, joiden vaikutus poistettu ^{a)}
C, g kg ⁻¹	0,30	,000	Lsum, Kpt12
N, g kg ⁻¹	-0,09	,055	Mänty, Kpt12, Kpt56
C/N	0,51	,000	Lsum, Kpt12, Kpt3
<i>Kivennäismaa 0–10 cm</i>			
C, g kg ⁻¹	-0,13	,003	Lsum, Kpt12, Kpt56
lnN, g kg ⁻¹	-0,27	,000	Lsum, Kpt12, Kpt3
C/N	0,39	,000	Lsum, Kpt12, Kpt4

a) Ks. taulukon 3 alaviite. Kpt3 – Kasvupaikkatyyppi tuore kangas (3), Kpt4 – Kasvupaikkatyyppi kuivahko kangas (4), Kpt56 – Kasvupaikkatyyppi kuiva (5) tai karukko (6) kangas.



Kuva 1. Orgaanisen kerroksen hiilipitoisuus (a) ja C/N-suhde (b) nykypuuston iän funktiona.

3.3 Hiili- ja typpimäärät

Luonnonmetsissä oli vähemmän typpeä sekä orgaanisessa kerroksessa että kivennäismaassa, mutta hiilen suhteen ei ollut eroja (taulukko 5). Testauksen tasapuolisuutta pyrittiin parantamaan malliin lisätyillä, vastemuuttujan kanssa hyvin korreloivilla kovariaateilla (taulukko 5).

Yhdistetyssä aineistossa orgaanisen kerroksen typpimäärä ja kivennäismaan hiili- ja typpimäärät korreloivat negatiivisesti ja orgaanisen kerroksen hiilimäärä positiivisesti puuston iän kanssa (taulukko 6).

Yhdistetystä aineistosta laskettiin orgaanisen kerroksen hiilen määrälle regressioyhtälö (4)

$$(4) \quad C_{\text{org}} (\text{kg ha}^{-1}) = \exp(8.4 + 0.635 * L_{\text{sum}} - 0.259 * K_{\text{pt56}} + 0.189 * S_{\text{uosam}} + 0.172 * \ln I_{\text{kä}}) - 1$$

(lyhenteet taulukoiden 3–6 alaviitteissä), jonka selitysaste oli vaatimaton 0.16, mutta jonka kaikki regressiokertoimet erosivat tilastollisesti erittäin merkitsevästi nolasta. Hiilen määrä orgaanisessa kerroksessa ennustettiin em. yhtälön avulla tietyille iänkohdille (25, ... 300 a) ja laskettiin näiden iänkohtien hiilimäärien erotukset ja edelleen ko. aikavälin keskimääräinen vuotuinen muutos. Hiilen määrän vuotuinen kasvu näytti pienentyvän 25–50 vuotiaan puuston 60–90 kg:sta 300 vuotta vanhan puuston 10–15 kg:n vuotuisen lisäykseen (kuva 2).

Taulukko 5. Talous- ja luonnonmetsien orgaanisen kerroksen ja kivennäismaakerroksen 0–10 cm hiilen ja typen määrät. Keskiarvot on estimoitu kovarianssianalyysillä kovariaattien keskimääräiseen tasoon. Kovariaattien edessä on regressiokertoimen etumerkki.

Muuttuja	Talousmetsä		Luonnonmetsä		F-arvo	p	Kovariaatit (p<0,05) ^{b)}
	\bar{X}	$S_{\bar{X}}$	\bar{X}	$S_{\bar{X}}$			
<i>Orgaaninen kerros</i>							
C, Mg ha ⁻¹ ^{a)}	18,0	0,38	19,0	0,42	2,65	,104	-Korkeus, -Kpt56, +Suosam
N, kg ha ⁻¹ ^{a)}	597	12,5	554	12,2	5,57	,019	+Lsum, -Kpt56, +Suosam, -Mänty
n	301		289				
<i>Kivennäismaa 0–10 cm</i>							
C, Mg ha ⁻¹ ^{a)}	12,8	0,27	12,3	0,27	1,48	,225	+Lsum, +Korkeus, -Kivis, -Mänty
N, kg ha ⁻¹ ^{a)}	580	11,6	475	10,0	43,3	,000	-Lsum, -Kivis, +Kpt12, -Mänty
n	310		288				
<i>Orgaaninen + kivennäismaa</i>							
C, Mg ha ⁻¹ ^{a)}	31,8	0,48	32,5	0,52	1,05	,306	+Lsum, -Kivis, -Kpt56, +Kuusi
N, kg ha ⁻¹ ^{a)}	1231	19,7	1031	17,5	54,8	,000	+Lsum, -Kivis, +Kpt12, -Mänty
n	310		288				

^{a)} Ln-muunnos

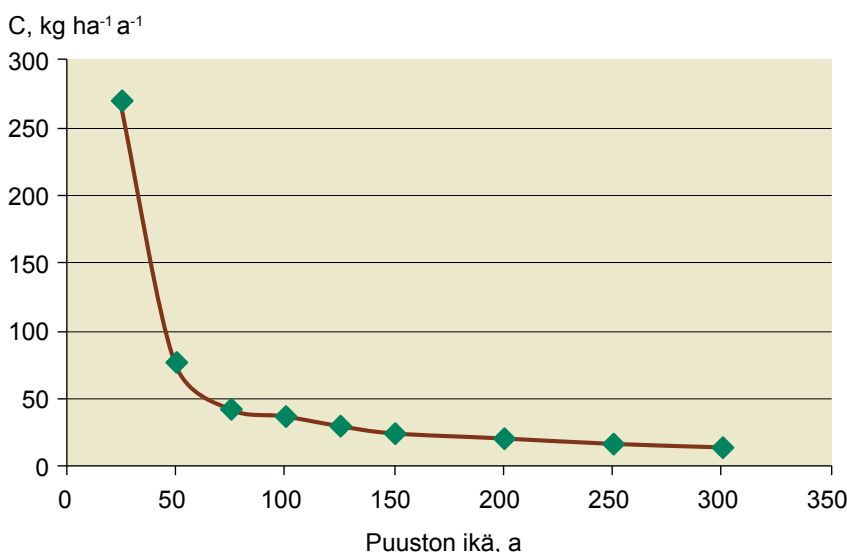
^{b)} Ks. taulukon 3 alaviite. Suosam – Kasvupaikalla esiintyvä suosammalia; Kuusi – Vallitseva puulaji kuusi.

Taulukko 6. Hiili- ja typpimäärien osittaiskorrelaatiot (r) nykypuuston iän suhteen.

Orgaaninen kerros	r (ln lkä)	p-arvo	Muuttujat, joiden vaikutus poistettu ^{a)}
C, kg ha ⁻¹	0,28	,000	Lsum, kpt12, kpt56, Suosam
N, kg ha ⁻¹	-0,18 ^{b)}	,000	(suora korrelaatio)
Kivennäismaa	0–10 cm		
C, kg ha ⁻¹	-0,13	,004	(suora korrelaatio)
N, kg ha ⁻¹	-0,20	,000	Lsum, Mänty, kpt12

a) Ks. taulukoiden 3–5 alaviitteet.

b) Osittaiskorrelaatio laskettu muuttujan lkä suhteen.



Kuva 2. Orgaanisen kerroksen hiilen määrän muutos puuston iän funktiona yhtälön (4) mukaan, kun suosammalia ei esiintynyt (Suosam=0), kasvupaikkatyyppi ei ollut 5 (CT) eikä 6 (CIT) (Kpt56=0) ja lämpösummamuuttujan arvo oli aineiston keskiarvo (Lsum=1,068).

3.4 Luonnon- ja talousmetsien erottelu hiili- ja typpimuuttujien avulla

Taulukoiden 3 ja 5 perusteella parhaiten ryhmiä erotteli yksittäisistä muuttujista kivennäismaan C/N-suhde ja toiseksi parhaiten orgaanisen kerroksen C/N-suhde. Mutta koska kivennäismaan hiili- ja typpimuuttujat oli pääosin (230/289) ennustettu orgaanisen aineen pitoisuuden avulla, niin kivennäismaan C/N-suhdetta ei otettu mukaan erotteluanalyysiin. Erotteluanalyysillä pyrittiin erottelamaan ryhmät toisistaan mahdollisimman hyvin maa-analyysimuuttujilla, jotka eivät korreloineet toistensa kanssa – toleranssiparametri >0,5. Orgaanisen kerroksen muuttujista ainoastaan C/N-suhde (F=87, p=0,000) erotteli luonnon- ja talousmetsiä onnistumissadanneksen ollessa 66. Kivennäismaan muuttujista typpipitoisuuden (F=117, p=0,000) ja hiilen määrän (F=29, p=0,000) muodostaman erottelufunktion onnistumissadannes oli 67. Molempien kerrosten kaikista hiili- ja typpimuuttujista muodostettuun erotteluyhtälöön valikoituivat orgaanisen kerroksen C/N-suhde (F=24, p=0,000) ja kivennäismaan typpipitoisuus (F=39, p=0,000) ja hiilen määrä (F=36, p=0,000). Onnistumissadannes oli 70. Jos erotteluyhtälön muuttujien sallittiin korreloida keskenään, yhtälöön valikoituivat kaikki kivennäismaan muuttujat, pitoisuudet ja määrät, onnistumissadanneksen ollessa 81.

4 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksessa hyödynnetty luonnontilaisten metsien aineisto sisälsi pääasiassa vanhoja, uudistuskypsiä metsiä, ja luonnon- ja talousmetsien ikäjakaumat olivat erilaisia, keski-iat olivat 136 ja 73 vuotta. Aineistoista pyrittiin poistamaan maaperältään ohuet kalliomaat, selvästi soistuneet kasvupaikat, taimikot ja hyvin harvapuustoiset metsät ja muut kuin mänty-, kuusi- tai koivuvaltaiset metsät. Rajoituksista huolimatta aineistot eivät täysin vastanneet toisiaan esim. sijainnin, maalajin, topografisen aseman ja historian (metsäpalot, myrskyt, kaskeaminen yms.) suhteen. Toisaalta voidaan kysyä, kuinka hyvin luonnon- ja talousmetsien pitäisi vastata toisiaan tai mihiin talousmetsän kehitysvaiheeseen luonnonmetsää pitäisi verrata. Tällaisen tutkimuksen tulokset riippuvat hyvin voimakkaasti sekä luonnon- mutta erityisesti talousmetsiä edustavasta otoksesta. Suhteellisen pienistä otanta-aineistoista tehtyjen tilastanalyysien tulokset riippuvat usein voimakkaasti laskenta-aineistosta (Tamminen 1993). Siksi nyt saatuihin tuloksiin liittyy melkoinen epävarmuus.

Luonnon- ja talousmetsien ikäero oli noin 63 vuotta. Ikävuosien 73 ja 136 välisenä aikana hiiltä kertyisi orgaaniseen kerrokseen regressioyhtälö (4) mukaan $63 \text{ a} \cdot 33 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} = 2079 \text{ kg ha}^{-1}$ mikä on selvästi enemmän kuin luonnon- ja talousmetsien hiilimäärien erotus, 1000 kg ha^{-1} . Toisaalta puuston iän ja hiilimäärän hyvin löyhän riippuvuuden takia arvio hiilimäärän lisäyksestä on erittäin epävarma, eivätkä luonnon- ja talousmetsien orgaanisen kerroksen hiilimäärät toisaalta eronneet tilastollisesti toisistaan. Kuitenkin näytti siltä, että nykypuuston ikä korreloi kaikkien hiili- ja typpimuuttujien kanssa (taulukot 4 ja 6). Vaikka nykypuuston ikä luonnonmetsässä lienee olennaisesti huonompi mittari kuin suhteellisen tasaikäisissä talousmetsissä, luonnon- ja talousmetsien ikäero selittänee merkittävän osan maaperätunnusten eroista.

Luonnonmetsien pintamaassa oli vähemmän tyypeä kuin talousmetsissä, ja maa-analyytitunnuksista C/N-suhde erotteli parhaiten ryhmät toisistaan. C/N-suhteen suureneminen on osoitus ravintilan heikentymisestä metsikön ikääntyessä (Brais 1995). Luonnonmetsissä, joista iänmääritys oli tehty vain 180 metsiköstä, orgaanisen kerroksen C/N-suhteella ei ollut ikäriippuvuutta. Kun talousmetsissä C/N-suhteen regressiokerroin iän suhteen oli 0,048, niin talous- ja luonnonmetsien orgaanisen kerroksen C/N-suhteen eron olisi pitänyt olla noin 3 C/N-yksikköä 5 yksikön sijaan (ks. taulukko 3). Luonnonmetsien orgaanisen kerroksen C/N-suhde oli siis selvästi suurempi kuin samanikäisissä talousmetsissä. Tähän voi olla syynä paitsi luonnonmetsien iänmäärityksen epävarmuus myös esimerkiksi erot talous- ja luonnonmetsien lämpö- ja valaistusoloissa tai maan orgaanisen aineksen ja karikkeen laadussa – luonnonmetsissä maahan kertyy enemmän puumaista kariketta kuin talousmetsissä. Vaikka kivennäismaan C/N-suhde erotteli hyvin talous- ja luonnonmetsiä, niin luonnonmetsissä metsikön ikä ei selittänyt lainkaan C/N-suhdetta ja talousmetsissäkin heikosti, regressiokerroin oli 0,016. Talous- ja luonnonmetsien kivennäismaan C/N-suhteen erotuksen olisi pitänyt olla ikäeron perusteella noin 1 C/N-yksikköä, kun se oli 5 C/N-yksikköä (taulukko 3).

Tämän aineiston maaperätunnuksista paras talous- ja luonnonmetsien erottelija oli ennako-odotusten vastaisesti kivennäismaakerroksen 0–10 cm C/N-suhde ja toiseksi paras orgaanisen kerroksen vastaava suhde. Ennakolta arvioitiin, että luonnonmetsissä orgaanisen kerroksen hiilen määrä olisi mahdollisesti suurempi kuin talousmetsissä ja että se erottelisi parhaiten luonnonmetsät talousmetsistä ja että kivennäismaan tunnuksiset eivät eroaisi luonnon- ja talousmetsissä toisistaan (Covington 1981, Johnson 1992). Braisin ym. (1995) mukaan orgaanisen aineksen laatua kuvaava C/N-suhde näyttää kasvavan käyräviivaisesti iän suhteen siten, että orgaanisen kerroksen C/N-suhde kasvaa nuorissa metsissä nopeammin kasvun tasaantuessa ennen 100 vuoden ikää. Tässä

aineistossa orgaanisen kerroksen C/N-suhteen kasvu näytti tasaantuvan vasta 150...200 vuoden iässä (kuva 1b).

Talous- ja luonnonmetsät eroavat puustoltaan selvästi toisistaan. Luonnonmetsät ovat mm. vanhempia, niiden elävän puuston keskitilavuus on suurempi ja kuollutta pystypuustoa on enemmän kuin kangasmailla keskimäärin (Isomäki ym. 1998, Ylitalo 2010). Talous- ja luonnonmetsien maaperäerot näyttävät nyt tutkitun aineiston perusteella olevan sen sijaan hyvin pieniä. Kokonaistyyppiä ja C/N-suhteesta päätellen myös kasveille käyttökelpoista tyyppiä (Thomas ja Prescott 2000, Yoh 2001) näyttää olevan talousmetsien pintamaassa enemmän kuin luonnonmetsissä. Näyttää siltä, että mitä kauemmin on kulunut talousmetsän uudistamisesta tai luonnonmetsän puuston uudistumiseen johtavasta häiriöstä, niin sitä suurempi on orgaanisen kerroksen hiilen pitoisuus ja sitä pienempi on pintakivennäismaan hiilen pitoisuus. Syynä pieniin eroihin talous ja luonnonmetsien välillä lienee myös aineistojen mahdollinen lomittuneisuus, sillä osa tämän tutkimuksen talousmetsistä on saattanut olla luonnonmetsien kaltaisia ja osa luonnonmetsistä on saattanut vastaavasti muistuttaa historialtaan talousmetsiä. On myös muistettava, että tutkittujen talous- ja luonnonmetsien maat ovat kokeneet usean tuhannen vuoden satunnaisen luontaisen kehityksen.

5 Johtopäätökset

Talous- ja luonnonmetsät näyttävät eroavan toisistaan maaperän tyyppien suhteen siten, että luonnonmetsien sekä orgaanisessa kerroksessa että kivennäismaakerroksessa 0–10 cm on vähemmän tyyppiä kuin talousmetsissä. Orgaanisen kerroksen ja kivennäismaan C/N-suhteet erottelivat parhaiten talous- ja luonnonmetsiä. C/N-suhteet olivat luonnonmetsissä selvästi suurempia kuin talousmetsissä.

Kirjallisuus

- Angelstam, P. K. 1998. Maintaining and restoring biodiversity in European boreal forests by developing natural disturbance regimes. *Journal of Vegetation Science* 9: 461–610.
- Bengtsson, G., Bengtsson, B. & Månsson, K. F. 2003. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. *Soil Biology & Biochemistry* 35(1): 143–154.
- Brais, S., Camiré, C., Bergeron, Y. & Paré, D. 1995. Changes in nutrient availability and forest floor characteristics in relation to stand age and forest composition in the southern part of the boreal forest of northwestern Quebec. *Forest Ecology and Management* 76(1–3): 181–189.
- Covington, W.W. 1981. Changes in Forest Floor Organic Matter and Nutrient Content Following Clear Cutting in Northern Hardwoods. *Ecology* 62: 41–48.
- Helmisaari, H.-S., Derome, J., Nöjd, P. & Kukkola, M. 2007. Fine root biomass in relation to site and stand characteristics in Norway spruce and Scots pine stands. *Tree Physiology* 27: 1493–1504.
- Hong, J., Apps, M.J., Peng, C., Zhang, Y. & Liu, J. 2002. Modelling the influence of harvesting on Chinese boreal forest carbon dynamics. *Forest Ecology and Management* 169: 65–82.
- Ilvesniemi, H., Tamminen, P., Heikkinen, J., Korpela, L. & Tonteri, T. 2009. Valtakunnallinen hiilivaraston inventointi. *Pro Terra* 41: 10–11.
- Isomäki, A., Niemistö, P. & Varmola, M. 1998. Luonnonmetsien rakenteen seuranta-ohjelmalla. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 705: 75–86.
- Janssen, B.H. 1996. Nitrogen mineralization in relation to C:N ratio and decomposability of organic materials. *Plant and Soil* 181: 39–45.

- Johnson, D.W. 1992. Effect of forest management on soil carbon storage. *Water, Air, and Soil Pollution* 64: 83–120.
- Kivekäs, J. 1939. Kaskiviljelyksen vaikutus eräisiin maan ominaisuuksiin. Referat: Über den Einfluss der Brandkultur auf einige Eigenschaften des Bodens. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 27(2). 44 s.
- Liski, J., Ilvesniemi, H., Mäkelä, A. & Starr, M. 1998. Model analysis of the effects of soil age, fires and harvesting on the carbon storage of boreal forest soils. *European Journal of Soil Science* 49: 407–416.
- Liski, J. & Westman, C.J. 1995. Density of organic carbon in soil at coniferous forest sites in southern Finland. *Biogeochemistry* 29: 183–197.
- Liski, J. & Westman, C.J. 1997. Carbon storage in forest soil of Finland. 1. Effect of thermoclimate. *Biogeochemistry* 36: 239–260.
- Lundmark-Thelin, A. & Johansson, M.-B. 1997. Influence of mechanical site preparation on decomposition and nutrient dynamics of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) needle litter and slash needles. *Forest Ecology and Management* 96(1–2): 101–110.
- Melin, Y., Petersson, H. & Nordfjell, T. 2009. Decomposition of stump and root systems of Norway spruce in Sweden – A modelling approach. *Forest Ecology and Management* 257(5): 1445–1451.
- Metsäntutkimuslaitos 1985. Valtakunnan metsien 8. inventointi. Pysyvien koealojen kenttätöön ohjeet 1985–1986. Metsäntutkimuslaitos, metsänarvioimisen tutkimusosasto, Helsinki. 127 s.
- Mikola, P. 1954. Kokeellisia tutkimuksia metsäkarikkeen hajoamisnopeudesta. Summary: Experiments on the rate of decomposition of forest litter. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 43(1). 50 s.
- Niemelä, J. 1990. Mannerjäätikön häviämisen pääpiirteet. Teoksessa: Alalammi, P. (toim.) Suomen kartasto. 123–126 *Geologia*. s. 14.
- Ojansuu, R. & Henttonen, H. 1983. Kuukauden keskilämpötilan, lämpösumman ja sademäärän paikallisten arvojen johtaminen Ilmatieteen laitoksen mittauksista. Summary: Estimation of the local values of monthly mean temperature, effective temperature sum and precipitation sum from the measurements made by the Finnish Meteorological Office. *Silva Fennica* 17(2): 143–160.
- Olsson, B.A., Staaf, H., Lundkvist, H., Bengtsson, J. & Rosén, K. 1996. Carbon and nitrogen in coniferous forest soils after clear-felling and harvests of different intensity. *Forest Ecology and Management* 82: 19–32.
- Paavilainen, E. 1966. Maan vesitalouden järjestelyn vaikutuksesta rämemännikön juurisuhteisiin. Summary: On the effect of drainage on root systems of Scots pine on peat soils. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 61(1). 110 s.
- Peltoniemi, M., Mäkipää, R., Liski, J. & Tamminen, P. 2004. Changes in soil carbon with stand age – an evaluation of a modelling method with empirical data. *Global Change Biology* 2004(10): 2078–2091.
- Saari, E., 1923. Kuloista – etupäässä Suomen valtionmetsiä silmällä pitäen. Summary: Forest fires in Finland – with special reference to state forests. *Acta Forestalia Fennica* 26, 1–155.
- Shanin, V.N., Komarov, A.S., Mikhailov, A.V. & Bykhovets, S. S. 2011. Modelling carbon and nitrogen dynamics in forest ecosystems of Central Russia under different climate change scenarios and forest management regimes. *Ecological Modelling* 222: 2262–2275.
- Shorohova, E., Ignatyeva, O., Kapitsa, E., Kauhanen, H., Kuznetsov, A. & Vanha-Majamaa, I. 2012. Stump decomposition rates after clear-felling with and without prescribed burning in southern and northern boreal forests in Finland. *Forest Ecology and Management* 263(1): 74–84.
- Siitonen, J. & Isomäki, A. (toim.) 2003. Natural forest sample plot network. Uneven-aged Forest Management: Alternative Forms, Practices, and Constraints. IUFRO International Interdisciplinary Conference and Field Tour. Post Conference Tour to North Finland.
- Smolander, A., Paavolainen, L. & Mälkönen, E. 2000. C and N transformations in forest soil after mounding for regeneration. *Forest Ecology and Management* 134(1–3): 17–28.
- Smolander, A., Priha, O., Paavolainen, L., Steer, J. & Mälkönen, E. 1998. Nitrogen and carbon transformations before and after clear-cutting in repeatedly N-fertilized and limed forest soil. *Soil Biology and Biochemistry* 30(4): 477–490.

- Tamminen, P. 1991. Kangasmaan ravinnetunnusten ilmaiseminen ja viljavuuden alueellinen vaihtelu. Summary: Expression of soil nutrient status and regional variation in soil fertility of forested sites in southern Finland. *Folia Forestalia* 777. 40 s.
- Tamminen, P. 1993. Pituusboniteetin ennustaminen kasvupaikan ominaisuuksien avulla Etelä-Suomen kangasmetsissä. Summary: Estimation of site index for Scots pine and Norway spruce stands in South Finland using site properties. *Folia Forestalia* 819. 26 s.
- Tamminen, P. 1998. Maaperätekijät. Julkaisussa: Mälkönen, E. (toim.). Ympäristömuutos ja metsien kunto. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 691. Metsäntutkimuslaitos, Vantaa. s. 64–75.
- Tamminen, P. & Tomppo, E. 2008. Finnish forest soils. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 100. 21 s.
- Thomas, K.D. & Prescott, C.E. 2000. Nitrogen availability in forest floors of three tree species on the same site: the role of litter quality. *Canadian Journal of Forest Research* 30: 1698–1706.
- Viro, P. 1952. Kivisyyden määrittämisestä. Summary: On the determination of stoniness. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 40(3). 23 s.
- Viro, P. 1958. Suomen metsämaiden kivisyydestä. Summary: Stoniness of forest soil in Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 49(4). 45 s.
- Yoh, M. 2001. Soil C/N ratio as affected by climate: An ecological factor of forest NO₃- leaching. *Water, Air & Soil Pollution* 130: 661–666.
- Ylitalo, E. (toim.). 2010. Metsätilastollinen vuosikirja 2010. Skogsstatistisk årsbok 2010. Finnish Statistical Yearbook of Forestry 2010. Metsäntutkimuslaitos. Skogsforskningsinstitutet. Finnish Forest Research Institute. Vantaa. 472 s.