

This is an electronic reprint of the original article.

This reprint *may differ* from the original in pagination and typographic detail.

Author(s): Aino Smolander, Helena M. Henttonen, Pertti J. Martikainen

Title: Hitaasti typpeä vapauttavan ureaformaldehydin vaikutuksista puuston kasvuun, maaperään ja ympäristöön

Year: 2020

Version: Published version

Copyright: The Author(s) 2020

Rights: CC BY-SA 4.0

Rights url: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Please cite the original version:

Smolander A., Henttonen H.M., Martikainen P.J. (2020). Hitaasti typpeä vapauttavan ureaformaldehydin vaikutuksista puuston kasvuun, maaperään ja ympäristöön. Metsätieteen aikakauskirja 2020-10219. Katsaus. 17 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10219>

All material supplied via *Jukuri* is protected by copyright and other intellectual property rights. Duplication or sale, in electronic or print form, of any part of the repository collections is prohibited. Making electronic or print copies of the material is permitted only for your own personal use or for educational purposes. For other purposes, this article may be used in accordance with the publisher's terms. There may be differences between this version and the publisher's version. You are advised to cite the publisher's version.

Aino Smolander¹, Helena M. Henttonen² ja Pertti J. Martikainen³

Hitaasti typpeä vapauttavan ureaformaldehydin vaikutuksista puuston kasvuun, maaperään ja ympäristöön

Smolander A., Henttonen H.M., Martikainen P.J. (2020). Hitaasti typpeä vapauttavan ureaformaldehydin vaikutuksista puuston kasvuun, maaperään ja ympäristöön. Metsätieteen aikakauskirja 2020-10219. Katsaus. 17 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10219>

Tiivistelmä

Suomessa perustettiin 1970-luvulla kenttäkokeita hidas- ja nopealiukoisten typpi- fosfori- ja kaliumlannoitteiden vertailua varten. Hitaasti typpeä vapauttavaa amerikkalaista ureaformaldehydilannoitetta verrattiin nopealiukoisiin ureaan ja ammoniumnitraattiin. Ureaformaldehydiä valmistetaan syntetisoimalla ureaa ja formaldehydiä (formaliinia) molekyylikooltaan eli ketju-pituudeltaan erikokoisiksi yhdisteiksi. Tämän katsauksen tavoitteena on esitellä tämän ureaformaldehydilannoitteen vaikutuksia puuston kasvuun sekä metsäekosysteemin muihin komponentteihin ja ympäristöön. Tämä toteutetaan tarkastelemalla aikaisemmin julkaisematonta aineistoa sekä julkaistuja tutkimuksia lannoitteiden vaikutuksista ja kestävyysnäkökohdista. Lannoitteen vaikutusten osoittaminen metsäekosysteemiin vaatii vuosien tai jopa vuosikymmenien tutkimusjakson. Ureaformaldehydin vaikutuksista on jo monipuolista tietoa pitkältä ajalta, ja sen vertailu yleisesti käytettyihin nopealiukoisiin typpilannoitteisiin on mahdollista. Ureaformaldehydillä voidaan saavuttaa kertalannoituksella pitkäaikainen kasvunlisäys (jopa yli 15 vuotta). Nopealiukoisella lannoitteella saadaan nopeampi vaikutus metsän kasvuun, mutta vaikutuksen kesto on lyhyempi. Merkittävin tulos ympäristön kannalta on, ettei ureaformaldehydi lisää riskiä typen häviöille, vaan typpi pysyy maassa vapautuen hitaasti hajotustoiminnan tuloksena tyydyttämään puuston typen tarvetta. Muitakaan haittavaikutuksia maan ominaisuuksiin ja toimintoihin tai kasvillisuuteen ei ole havaittu.

Asiasanat metsämaa; metsänlannoitus; typpilannoitus; typpirajoiteisuus

Yhteystiedot ¹Luonnonvarakeskus (Luke), Luonnonvarat, Helsinki; ²Luonnonvarakeskus (Luke), Biotalous ja ympäristö, Helsinki; ³Itä-Suomen yliopisto, Ympäristö- ja biotieteiden laitos, Kuopio

Sähköposti aino.smolander@luke.fi

Hyväksytty 30.4.2020

1 Johdanto

Viime vuosina kiinnostus metsänlannoitukseen on kasvanut lähes 30 vuoden hiljaisemman kauden jälkeen. Käytännön metsänlannoitustoiminta alkoi Suomessa 1960-luvun puolivälissä ja saavutti huippunsa 1975, jolloin lannoitettiin lähes 250 000 hehtaaria metsää (Kukkola ja Nöjd 2000). Metsiä lannoitettiin 1960-luvulta 1980-luvun loppupuolelle yhteensä 3,2 milj. hehtaaria (n. 15 % metsämaan pinta-alasta), josta noin puolet oli kangasmaita ja puolet turvemaita (Saarsalmi ja Mälkönen 2001). Lannoitusala pieneni 1980-luvulla, ja 1990-luvun alkupuolen lamavuosina se oli enää muutamia tuhansia hehtaareja. Kukkola ja Nöjd (2000) arvioivat kangasmaiden lannoituksen lisänsen puuston kasvua yhteensä 16,2 milj. kuutiometriä vuosina 1950–1998, valtaosa jakson viimeisimmän 35 vuoden aikana. Vuosina 1976–1978 lannoituksin tuotetun kasvunlisäyksen arvioitiin olleen noin miljoona kuutiometriä vuosittain (Kukkola ja Nöjd 2000).

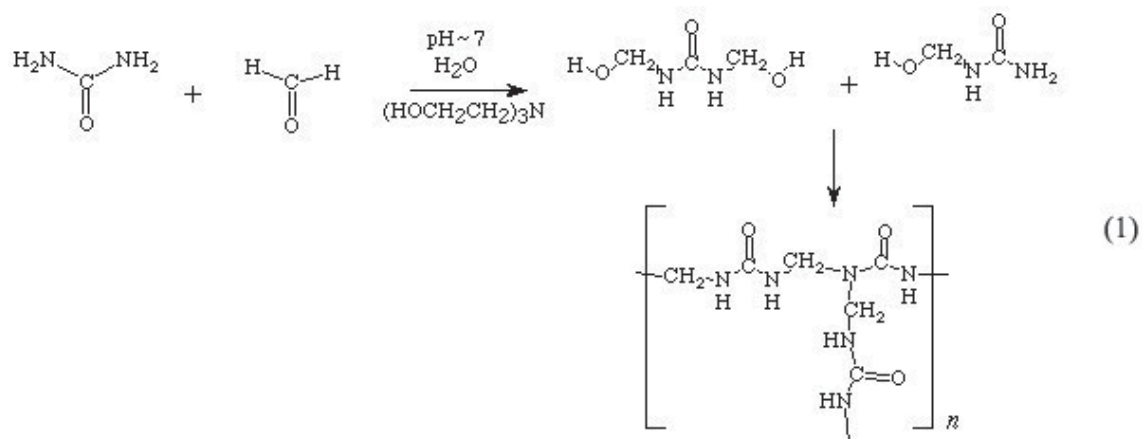
Kangasmailla käyttökelpoinen typpi rajoittaa puuston kasvua (Hedwall ym. 2014; Högberg ym. 2017). Typpilannoitus parantaa siten puuston kasvua lannoitteista eniten (Saarsalmi ja Mälkönen 2001), ja valtaosa kangasmaiden lannoituksilla saadusta kasvunlisäyksestä lieneekin typpilannoituksen ansiota. Tavallisissa metsän typpilannoitteissa typpi on ollut nopeasti vapautuvassa, nopealiukoisessa muodossa, ammonium- ja nitraattityppinä tai ureana, joka hydrolysoituaan myös vapauttaa typen nopeasti ammoniumtyppinä.

Suuri kerta-annos nopealiukoista typpilannoitetta nostaa nopeasti maanesteen typpipitoisuutta. Tämä ei vastaa metsäpuiden ravinteidenoton pääperiaatetta, jonka mukaan ravinteiden pitoisuus maanesteessä ei ole ratkaisevaa vaan niiden jatkuva saanti pienistäkin pitoisuuksista (Högberg ym. 2017). Niinpä puusto ottaa vain pienen osan lisäystä tyypestä: joissain arvioissa vajaa 10 % lisäystä tyypestä on puustossa ja valtaosa on aluskasvillisuudessa ja humuskerroksessa (Sponseller ym. 2017). Typpirajoitteiset metsämaat pidättävät lisättyä typeä hyvin. Silti äkillinen korkea liukoisen typen pitoisuus maassa lisää riskiä typen huuhtoutumiselle vesistöihin varsinkin lannoitettaessa laaja alue kerralla ja valunnan ollessa suuri. Typpilannoituksen on osassa kohteista todettu kiihdyttävän nitrifikaatiota ja nitraattitypen pitoisuuksia maassa (Martikainen ym. 1989; Smolander ym. 1995). Nitrifikaatio ei ole toivottavaa, koska siinä maahan muodostuva nitraattityppi – lannoitteen nitraattitypen lisäksi – huuhtoutuu helposti ja nitrifikaation sivutuotteena muodostuu voimakasta kasvihuonekaasua, dityppioksidia (N_2O). Lisäksi toinenkin mikrobiologinen prosessi, denitrifikaatio, poistaa nitraattityppeä ilmakehään kaasumaisena tyyppinä (NO , N_2O , N_2). Metsäekosysteemistä huuhtoutumalla tai kaasumaisina päästöinä karannut typpi on pysyvästi poissa puuston typen saannista.

Lannoituksen toistaminen pienillä kerta-annoksilla ja siten metsäpuiden ravinteidenoton kannalta edullisesti ei ole mahdollista käytännön metsätaloudessa. Sopivin metsän typpilannoite on lannoite, joka vapauttaa typeä maassa hitaasti, mutta tällaisia lannoitteita on markkinoilla laajamittaisempaan käyttöön saatavissa vain vähän. Typen kontrolloitu vapautuminen lannoitteesta voi perustua nopealiukoisen typpiyhdisteen vapautumista estävään kuoreen, typpiyhdisteen hidasliukoisuuteen tai siihen, että vapautuakseen lannoite on hajotettava kemiallisesti tai biologisesti (Hayatsu 2014). Yleisesti ottaen hitaasti ravinteita vapauttavan lannoitteen etuja verrattuna nopealiukoisiin (Alexander ja Helm 1990) ovat: 1) Kasvin typen otto on tehokkaampaa, 2) Se johtaa pienempiin häviöihin huuhtoumalla tai kaasumaisina päästöinä, 3) Ravinteita on kasvien saatavilla koko kasvukauden ajan, 3) Sillä on hyvä hyötysuhde 4) Levittämiskustannukset ovat pienemmät, koska tarvitaan vähemmän lannoituskertoja, 5) Se ei aiheuta pintakasvillisuuden polttovaikutusta.

2 Ureaformaldehydi – hitaasti typpeä vapauttava lannoite

Ureaformaldehydi eli formaldehydin ja urean muodostama polymeeri esiteltiin ensimmäisenä synteettisenä hidasliukoisena typpilannoitteena. Du Pont Company markkinoi sitä jo vuonna 1939 liuoksena ja 1940-luvulla tehtiin kiinteä kondensoitumistuote, ureaform (Hays 1980). Ureaformaldehydilannoite syntetisoidaan katalyytin läsnä ollessa ureasta ja formaldehydistä erilaisissa lämpötiloissa, ja se voi sisältää komponentteinaan lyhytketjuisesta metyleenidiureasta aina tetrametyleenipentaureaan riippuen synteesiolosuhteista ja urean ja formaldehydin moolisuhteesta kaavan 1 mukaisesti:



Laaja kirjo erilaisia maamikrobeja kykenee hajottamaan ureaformaldehydiä (Alexander ja Helm 1990; Jahns ym. 1999). Mikrobien tuottamien ureaasientsyymien ja hydrolyyttisten entsyymien avulla typpi vapautuu ureaformaldehydistä maassa pikkuhiljaa ammoniumtyyppinä. Ureaformaldehydipolymeerissä ei ole vapaata formaldehydiä eikä sitä myöskään vapaudu maaperään yhdisteen mineralisaatiossa. Ureaformaldehydilannoite voi sisältää lyhyt- ja pitkäketjuisia metyleeniureapolymeereja, ja typen vapautuminen ureaformaldehydistä riippuu hitaammin hajotettavien pitkäketjuisten polymeerien osuudesta (Hayatsu 2014). Kuumaan veteen liukenematon pitkäketjuinen metyleeniurea eli ureaformaldehydi hajoaa maassa huomattavasti hitaammin kuin urea tai lyhytketjuinen metyleeniurea, ei aiheuta ammoniumpitoisuuden äkillistä nousua eikä nitraattia juuri muodostu päinvastoin kuin noilla kahdella muulla yhdisteellä (Jahns ym. 1999). Polymerisaation aste riippuu esim. urean ja formaldehydin moolisuhteesta ollen yli yhden lannoitteissa ja alle yhden joissakin muissa käyttötarkoituksissa kuten muoveissa ja liimoissa (Alexander ja Helm 1990; Jahns ym. 1999). Synteesiä muokkaamalla saadaan siis halutunlainen lannoite ja teoreettisesti ajatellen metsän lannoitteena sekoitus erilaisia ketjupituuksia painottuen pitkäketjuisiin lienee paras.

Ureaformaldehydiä on käytetty maailmalla pääasiassa nurmi-, vihannes- ja kasvihuoneviljelyssä (Jahns ym. 1999), mutta joitakin julkaisuja myös metsälannoitteena on olemassa; ”controlled-release ureaform” (tuotenimi Nitroform Blue-chip) lisäsi enemmän ja kauemmin vaihtuvan typen pitoisuuksia ja typen nettomineralisaatiota männikön (*Pinus taeda* L.) maassa kuin urea (Elliot ja Fox 2006). Ureaformaldehydilannoitteen hajoamiseen ja typen vapautumiseen siitä vaikuttavat samat tekijät kuin orgaanisen aineksen hajoamiseen maaperässä yleensäkin, tärkeimpinä lämpötila, kosteus ja pH. Ureaformaldehydilannoitteen raakoolla on merkitystä, mutta typpi vapautuu hitaasti jopa jauhmaisesta ureaformaldehydistä (Alexander ja Helm 1990).

Kemira Oy perusti 1970-luvulla kenttäkokeita Suomeen vertaillakseen hidasliukoisia ja nopealiukoisia typpi-, fosfori- ja kaliumlannoitteita (Martikainen 1994; Päivinen 1994). Typpilannoituksen osalta kokeissa verrattiin ureaformaldehydiä (amerikkalainen lannoite tuotenimellä

Nitroform) nopealiukoisiin ureaan ja ammoniumnitraattiin (oulunsalpietari, mukana pieniä määriä kalsiumia ja magnesiumia). Kokeita perustettiin kangas- ja turvemaille, kuusikoihin ja männiköihin. Kestävyys- ja ympäristönäkökohtia tutkittiin suomalaisten yliopistojen ja tutkimusorganisaatioiden voimin *Lannoituksen vaikutus metsäekosysteemiin* (LAVAME) -hankkeessa. Tuloksia julkaistiin vertaisarvioituissa tieteellisissä artikkeleissa ja Jyväskylän yliopiston raporttisarjan yksi numero omistettiin LAVAME-tuloksille (Biological Research Reports from the University of Jyväskylä 38, 1994). Puuston kasvun osalta mittauksia tehtiin aina vuoteen 1995 asti. Puustotuloksista osa on esitelty em. LAVAME-raportissa ja Kemiran raporteissa. Lannoitustoiminnan rajusti vähentyessä 1990-luvulla LAVAME-hankkeen tulokset saivat Suomessa vähän huomiota.

Kangasmetsien typpilannoitusta pidetään tehokkaana keinona lisätä hiilen sitoutumista metsiin (Sponseller ym. 2016; Hedwall ym. 2014; Högberg ym. 2017). Kehitettäessä uusia hidasliukoisia typpilannoitteita kestää vuosia tai vuosikymmeniä saada selville niiden pitkäaikaisvaikutukset metsäekosysteemiin. Tämän katsauksen tavoitteena on koota tietoa siitä, miten typpeä hitaasti vapauttava ureaformaldehydi vaikuttaa toisaalta puuston kasvuun ja toisaalta metsäekosysteemin muihin komponentteihin ja ympäristöön. Tämä toteutetaan analysoimalla 1970-luvulla perustettujen kenttäkokeiden puustomittauksia ja tarkastelemalla julkaistuja tutkimuksia painottaen erityisesti ekologista kestävyyttä. Ureaformaldehydin vaikutuksia verrataan viime vuosikymmenten yleisimmin käytettyjen typpilannoitteiden eli nopealiukoisten ammoniumnitraatin (oulunsalpietari, nykyisin suomensalpietari) ja urean vaikutuksiin.

3 Lannoituskokeet ja tutkimukset

Kemira Oy:n ja LAVAME-projektin perustamilla lannoituskokeilla vertailtiin useita erityyppisiä lannoitteita ja niiden yhdistelmiä (Martikainen 1994). Tässä käsitellään seuraavia lannoitteita: ureaformaldehydi (Nitroform, Hercules), ammoniumnitraatti (oulunsalpietari sisältäen 4 % kalsiumia ja 2,2 % magnesiumia, Kemira) ja urea (Kemira). Osalla urealannoituskäsittelyistä oli lannoitus uusittu Metsän NP-lannoitteella (Kemira), jossa oli mukana fosforia; typpiannosta 156 kg/ha vastaava fosforiannos oli 19 kg/ha (Päivinen 1994).



Kuva 1. Kokeiden sijainti.

Puuston kasvun tarkastelu perustuu yhteensä 12 kenttäkokeeseen viidellä paikkakunnalla: Pudasjärvellä, Kestilässä, Saarijärvellä, Sumiaisissa ja Tammelassa (Kuva 1). Kemira perusti kokeet 1970-luvulla, ja puustotiedot on mitattu viimeksi 1990-luvulla (Taulukko 1). Kokeet 2 ja 6 Kestilässä on perustettu latinalaisen neliön muotoisina. Perustamisvaiheessa Kestilän kokeissa oli neljä käsittelyä (KO = lannoittamaton kontrolli, UF = ureaformaldehydi, U = urea ja CaAN = oulunsalpietari), joista kaikista oli neljä toistoa. Toistoruutujen pinta-ala oli 400 m², ja ruutuja erotti 10 m levyinen vaippa. Kokeella 6 osa toistoista oli hylätty uudelleenmittauksen yhteydessä (Taulukko 1). Syynä oli ilmeisesti soistuneisuus, jonka takia kokeen reunoilla on myös sen perustamisen jälkeen tehdyn ojituksen vaikutusta. Pudasjärven, Tammelan, Sumiaisten ja Saarijärven kokeilla käsittelyt ja toistot on arvottu kartalle rajatuille ruuduille, joiden pinta-ala oli 1600 m² (40 m × 40 m). Osalla kokeista oli maatutkimuksia varten rajattu myös pieniä, 100 m² ja 25 m² ruutuja. Ne eivät sisälly taulukon 1 toistoihin.

Tässä tarkastelussa mukana ovat sellaiset kangasmaiden mänty- tai kuusivaltaisten metsiköiden kokeet, joista oli mittaustietoa yli kymmenen vuoden ajalta ja joissa oli toistoja käsittelyistä. Käsittelyistä verrattiin ureaformaldehydi- oulunsalpietari- ja urealannoituksia sekä lannoittamatonta kontrollia. Sumiaisten, Tammelan ja Saarijärven kokeilla lannoitus oulunsalpietarilla oli toistettu mittausjakson puolivälissä ja urealannoituskäsittelyt oli uusintalannoitettu NP-lannoitteella (Taulukko 1). Kokeet olivat hiekka- tai hietamoreenimailla paitsi Pudasjärven koe 617, jonka maalaji oli lajittunut hieno hiekka (Kestilän kokeista ei tietoa). Humuskerroksen pH oli 3,8–4,3 ja kivennäismaan pH 4,6–5,1 kokeesta riippuen (Kestilän kokeiden kivennäismaan pH:sta ei tietoa).

Taulukko 1. Kokeiden käsittelyt ja mittausvuodet. KO = kontrolli, UF = ureaformaldehydi (Nitroform), CaAN = oulunsalpietari, U = urea, NP = metsän NP-lannoite. Tammelassa, Sumiaisissa, Saarijärvellä ja Pudasjärvellä koeala 1600 m². Kestilässä 400 m². Vaippa 10 m kaikissa. (Martikainen 1986; Martikainen ym. 1989; Martikainen 1994; Päivinen 1994; Aarnio ja Martikainen 1995; Aarnio 1996).

Paikkakunta	Koe	Toistoja/käsittely				N, kg/ha		Lannoitusajankohta, kk/vuosi		Mittaus- vuosi	Jakso, v
		KO	UF	U+NP ^c	CaAN+ CaAN ^c	UF	U+NP ^c , CaAN+CaAN ^c	UF	U+NP ^c , CaAN+CaAN ^c		
Tammela	101	2	2	2	2	200	200+156	11/1978	11/1978+1986 ^c	1993	15
Tammela	102	2 ^a	2 ^a	2 ^a	2 ^a	200	200+156	11/1978	11/1978+1986 ^c	1993	15
Tammela	103	2	2 ^a	2	2	200	200+156	11/1978	11/1978+1986 ^c	1993	15
Sumiainen	309	2 ^a	2 ^a	2 ^a	2 ^a	200	200+156	6/1979	6/1979+1986 ^c	1994	16
Sumiainen	308	2 ^b	2 ^b	2 ^b	2 ^b	200	200+156	6/1979	6/1979+1986 ^c	1994	16
Saarijärvi	410	2 ^b	2 ^b	2 ^b	2 ^b	200	200+156	5/1979	5/1979+1986 ^c	1994	16
Kestilä	2	4	4	4	4	152	152	5/1971	5/1971	1995	25
Kestilä	6	2	3	4	3	152	152	11/1972	11/1972	1995	23
Pudasjärvi	614	2	2	2	2	200	200	6/1979	1 ^d ,6/1979	1990	12
Pudasjärvi	615	2	2	2	2	200	200	6/1979	1 ^d ,6/1979	1990	12
Pudasjärvi	616	2	2	2	2	200	200	6/1979	1 ^d ,6/1979	1997	19
Pudasjärvi	617	2	2	2	2	200	200	6/1979	1 ^d ,6/1979	1997	19

a) Aineistossa vain toistojen keskiarvo käsittelylle

b) Vuosina 1988–1994 aineistossa vain toistojen keskiarvot eri käsittelyille

c) Uusintalannoitus keväällä 1986 Tammelassa, Sumiaisissa ja Saarijärvellä

d) Urealannoitus Pudasjärvellä tammikuussa 1979

Taulukko 2. Kokeiden metsikkötunnuksia. (Martikainen 1994; Martikainen ym. 1989; L. Päivisen dokumentit).

Paikkakunta	Koe	Metsätyyppi	Tilavuus, m ³ /ha			Keskipituus, m	Ikä, v
			Mänty	Kuusi	Koivu		
Tammela	101	MT	161	60	2	20	70
Tammela	102 ^a	MT	17	161	8	17	70
Tammela	103	CT	159	0	0	15	65
Sumiainen	309	CT	142	0	0	16	40
Sumiainen	308	VT	147	0	0	14	40
Saarijärvi	410	MT	1	168	4	14	40
Kestilä	2	ECT	59	0	0	8	75
Kestilä	6	ECT	42	0	0	-	-
Pudasjärvi	614	HMT	32	96	32	15	120
Pudasjärvi	615	VMT	140	0	0	16	75
Pudasjärvi	616	MCCIT-EMT	85	0	0	12	95
Pudasjärvi	617	CIT	60	0	0	11	75

a) Kokeella tehty harvennushakkuu, jossa poistettu runkoluvusta 38 % (KO), 46 % (U+NP), 39 % (CaAN+CaAN) ja 44 % (UF)

Päivinen (1994) on kuvannut puustotietojen mittauksen ja koealojen vuotuisten keskikasvujen laskennan. Kokeiden kasvupaikkatyypit, puuston tilavuus, keskipituus ja keski-ikä on esitetty taulukossa 2. Vain Kestilän kokeelta 2 on olemassa tietoja puustosta käsittelytasolla ennen lannoitusta. Muista kokeista ei siis tiedetä, oliko puustoissa eroja kokeen sisällä ennen käsittelyä. Kokeilta on kuitenkin olemassa laskettu tilavuuskasvu myös 1–4 vuodelle ennen lannoitusta (jakson pituus vaihtelee eri kokeilla). Ne on esitetty taulukossa 3. Tämän tarkastelun perusteella ureaformaldehydi (UF) -käsittelyt ovat sattuneet Etelä-Suomessa kaikissa kokeissa keskimäärin huonompiin kohtiin (alhaisempi keskikasvu ennen käsittelyä) kuin oulunsalpietari- ja ureakäsittelyt, ja useimmilla kokeilla ja keskimäärin myös huonompiin kohtiin kuin käsittelemätön kontrolli. Suurin kokeen sisäinen vaihtelu on Sumiaisten kokeella 308, jossa ureaformaldehydikäsittelyn keskikasvu ennen lannoitusta oli 5,1 m³/ha/v ja kontrollin 8,4 m³/ha/v. Samalla kokeella myös oulunsalpietari-käsittelyt poikkesivat selvästi kontrollista ja kasvu oli 5,7 m³/ha/v. Kestilän ja Pudasjärven kokeilla erot käsittelyjen tilavuuskasvuissa olivat pieniä ja erojen suunta vaihteli eri kokeilla.

Kestävyysnäkökohtien tarkastelu perustuu vertaisarvioituihin tieteellisiin julkaisuihin (Martikainen 1984, 1985a; Martikainen ym. 1989; Aarnio ja Martikainen 1995; Sen 1990; Aarnio ym. 1996; Insam ja Palojarvi 1995) ja osaksi niihin pohjautuviin väitöskirjoihin (Martikainen 1986; Aarnio 1996). Lisäksi tarkastelu perustuu LAVAME-raportin (Biological Research Reports from the University of Jyväskylä 38, 1994) sisältämiin artikkeleihin, joihin jatkossa viitataan kuhunkin erikseen. Pääosa raportin tuloksista perustuu samoilla kokeilla tehtyihin tutkimuksiin kuin puustotulokset. Lisäksi osa tuloksista on Tammelan CT-männikön kokeen 103 viereen perustetuista pienruutukokeista (koealakoko 10 m × 10 m) ja osa muista koesarjaan kuuluvista kokeista.

Taulukko 3. Puuston keskikasvu ennen lannoituskäsittelyjä. Tammelassa, Sumiaisissa ja Saarijärvellä neljän lannoitusta edeltävän kasvukauden keskikasvu. Pudasjärvellä ja Kestilän kokeella 2 kahden lannoitusta edeltävän kasvukauden keskikasvu ja Kestilän kokeella 6 yhden lannoitusta edeltävän vuoden keskikasvu.

Paikkakunta	Koe	Keskikasvu, m ³ /ha/v			
		Käsittely			
		KO	UF	U+NP ^a	CaAN+CaAN ^a
Tammela	101	8,78	7,96	8,84	8,88
Tammela	102 ^b	5,08	4,93	7,43	6,80
Tammela	103	5,39	5,65	5,70	5,90
Sumiainen	309	6,03	5,95	6,65	6,45
Sumiainen	308	8,43	5,10	7,04	5,74
Saarijärvi	410	7,73	8,64	9,05	9,01
	<i>keskiarvo</i>	6,91	6,37	7,45	7,13
Kestilä	2	1,67	1,73	1,68	1,41
Kestilä	6	1,30	1,20	1,63	1,40
Pudasjärvi	614	3,83	3,08	3,65	3,30
Pudasjärvi	615	2,98	3,15	3,03	3,43
Pudasjärvi	616	3,08	2,73	3,20	3,03
Pudasjärvi	617	1,93	2,35	1,88	1,80
	<i>keskiarvo</i>	2,47	2,37	2,51	2,40

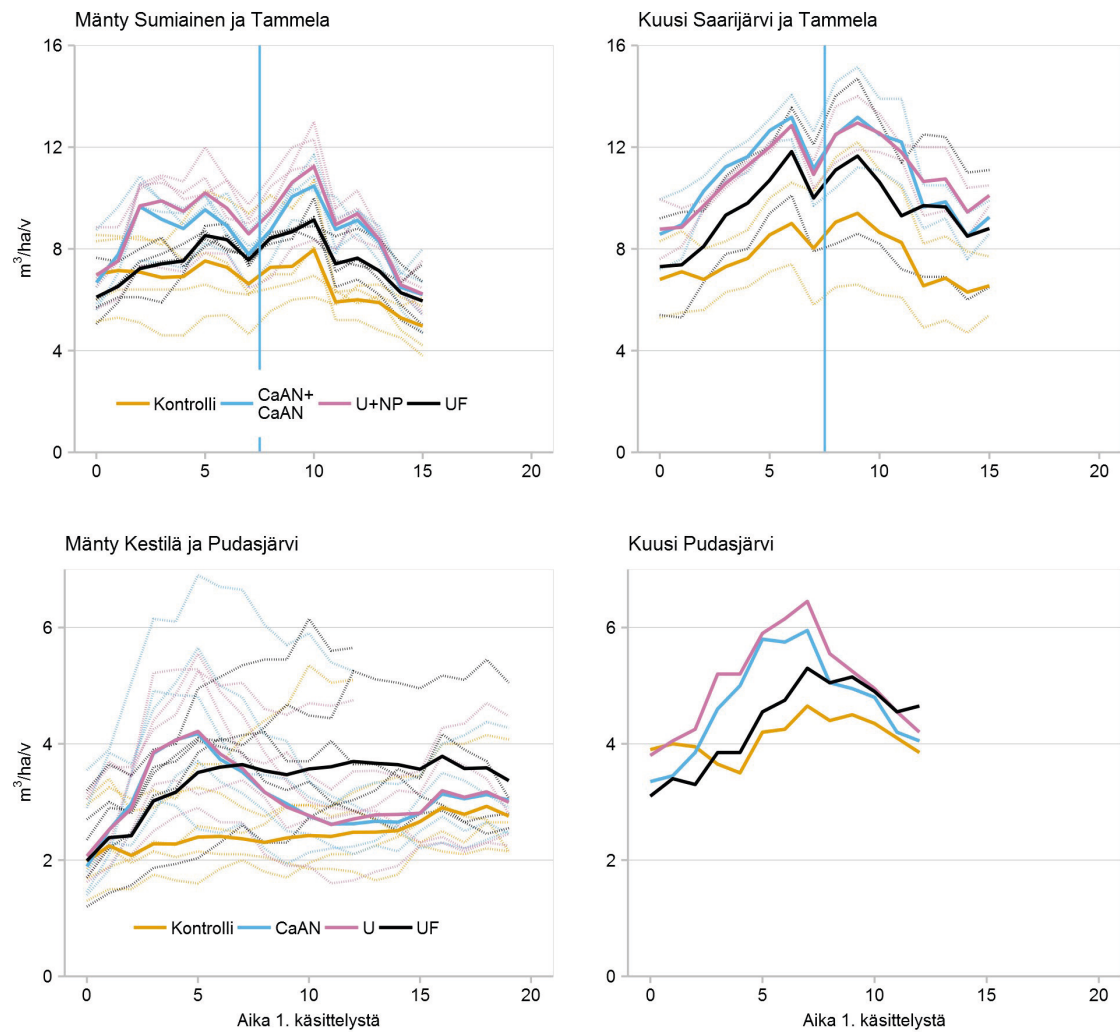
a) Uusintalannoitus keväällä 1986 Tammelassa, Sumiaisissa ja Saarijärvellä

b) Jäänyt puusto harvennetulla kokeella

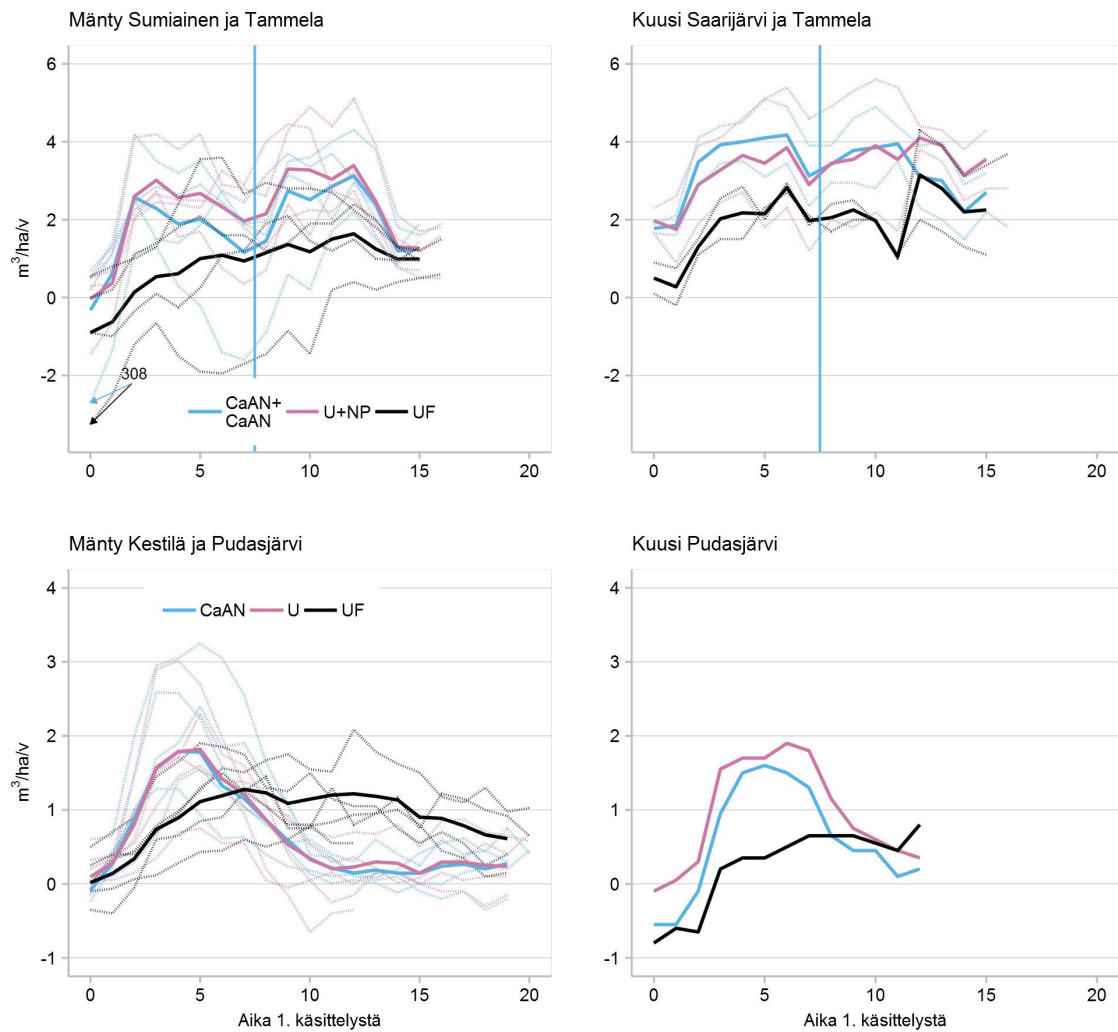
4 Ureaformaldehydin vaikutus puuston kasvuun

Keskimääräinen tilavuuskasvu (m³/ha/v) lannoituksesta kuluneen ajan funktiona on esitetty kuvassa 2 ja tilavuuskasvun erotus kontrollista lannoituskäsittelyissä kuvassa 3. Oulunsalpietari ja urea antoivat noin 7 vuotta kestävä kasvusykäksen, joka toistui uusintalannoituksen jälkeen (Tammelan, Sumiaisten ja Saarijärven kokeet). Kasvuvasteen muoto ureaformaldehydilannoituksen jälkeen oli erilainen alkaen hitaammin mutta kestäen kauemmin.

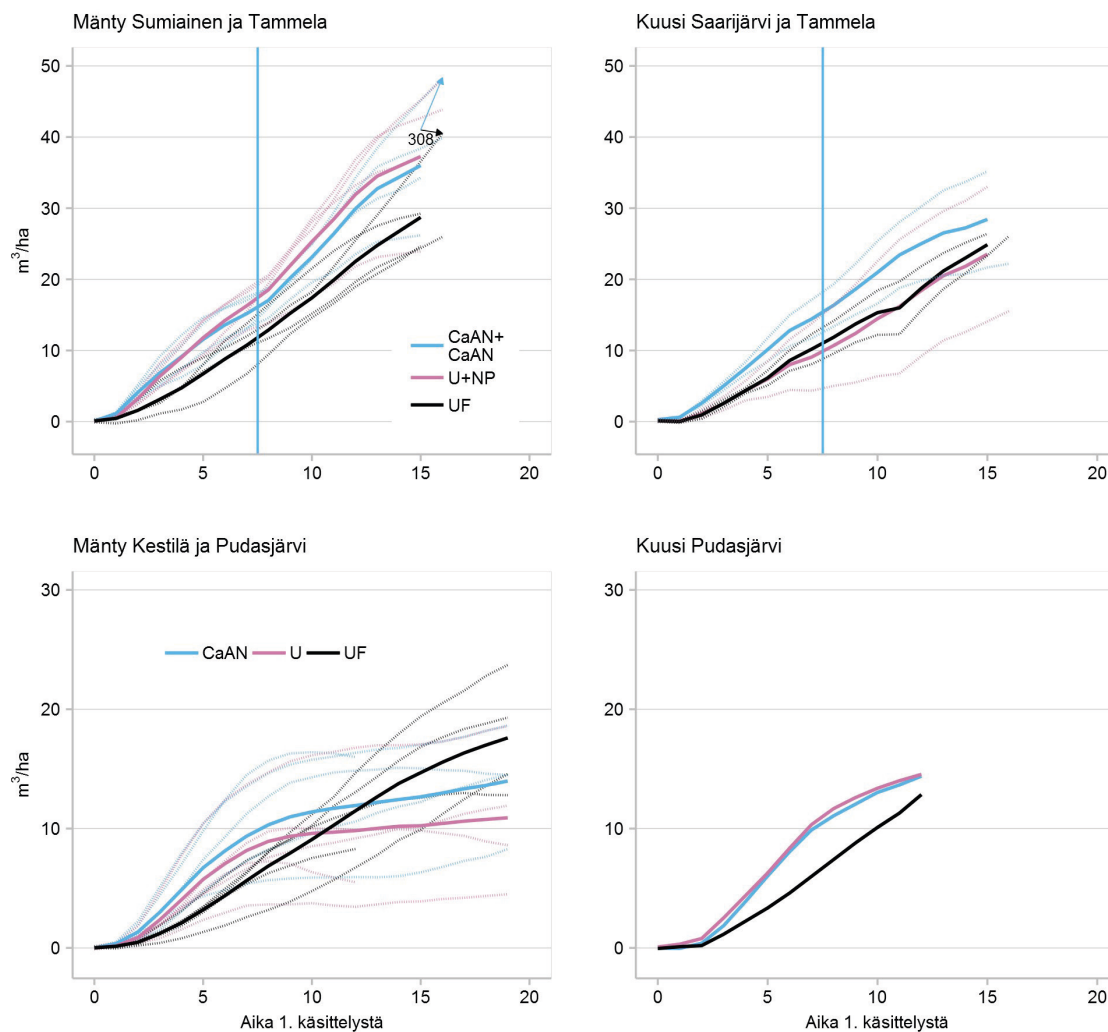
Lannoituskäsittelyjen ja kontrollin erotuksen kumulatiivinen summa (Kuva 4, Taulukko 4) kuvaa lannoituksen aiheuttamaa puuston tilavuuden (m³/ha) lisäystä lannoituksesta kuluneen ajan funktiona. Koska käsittelyjen välillä oli eroja tilavuuskasvussa ennen lannoitusta (Taulukko 3), kunkin lannoituskäsittelyn tilavuuskasvuihin on kuvassa 4 lisätty kontrollikäsittelyn ja lannoituskäsittelyn erotus ennen lannoitusta (Taulukko 3). Pudasjärvellä ja Kestilässä, joissa oli tehty vain yksi lannoituskäsittely, ureaformaldehydillä lannoitettujen mäntyvaltaisten koealojen puuston tilavuuden kokonaislisäys ylittää oulunsalpietarilla ja urealla saadun tilavuuden nousun noin 12 vuoden kuluttua lannoituksesta. Etelä-Suomen mäntyvaltaisilla kokeilla (Tammela ja Sumiainen) saatiin ureaformaldehydilannoituksella 15 vuodessa 29 m³/ha tilavuuden lisäys verrattuna kontrolliin. Se on 17 % alkupuuston tilavuudesta. Pohjois-Suomen kokeilla (Kestilän ja Pudasjärven kokeet 616 ja 617) vastaava lisäys oli 15 m³/ha eli noin 19 % alkupuuston tilavuudesta. Kuusivaltaisissa metsissä ureaformaldehydilannoituksen vaikutus puuston kasvuun oli samansuuntainen kuin männiköissä (Kuva 4). Lannoituksen vaikutus puuston tilavuuden kasvuun on kuusella kuitenkin hieman pienempi kuin männyllä. Tammelan ja Sumiaisten kuusikokeilla saatiin ureaformaldehydilannoituksella 15 vuodessa 25 m³/ha (14 %) enemmän puuta kuin kontrollikäsittelyssä. Pudasjärvellä



Kuva 2. Keskimääräiset tilavuuskasvut (m³/ha/v) yksittäisillä kokeilla (ohuet viivat) sekä Etelä- ja Pohjois-Suomen kokeilla keskimäärin (paksut viivat). Alueelliset keskiarvot on laskettu niiden kokeiden keskiarvona, joista Etelä-Suomessa oli havaintoja vähintään 15 kasvukaudelta ja Pohjois-Suomessa männyllä 19 kasvukaudelta lannoituksen jälkeen. Aika käsittelystä kasvukausina: Lannoitusta seuraava kasvukausi = 1 ja lannoitusta edeltävä kasvukausi = 0. Käsittelyjen CaAN+CaAN ja U+NP uusintalannoituksen ajankohta sinisellä pystyviivalla.



Kuva 3. Käsittelyjen tilavuuskasvujen erotukset kontrollista ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{v}$) keskimäärin yksittäisillä kokeilla (ohuet viivat) sekä Etelä- ja Pohjois-Suomen kokeilla keskimäärin (paksut viivat). Alueelliset keskiarvot on laskettu niiden kokeiden keskiarvona, joista Etelä-Suomessa oli havaintoja vähintään 15 kasvukaudelta ja Pohjois-Suomessa männyllä 19 kasvukaudelta lannoituksen jälkeen. Aika käsittelystä kasvukausina: Lannoitusta seuraava kasvukausi = 1 ja lannoitusta edeltävä kasvukausi = 0. Etelä-Suomessa käsittelyjen CaAN+CaAN ja U+NP uusintalannoituksen ajankohta sinisellä pystyviivalla. Koe 308, jolla erot kasvussa ennen käsittelyä olivat suuria, on merkitty nuolilla.



Kuva 4. Käsittelyjen ja kontrollin vuotuisten tilavuuskasvujen erotuksen kumulatiivinen summa (m³/ha) yksittäisillä kokeilla (ohuet viivat) sekä Etelä- ja Pohjois-Suomen kokeilla keskimäärin (paksut viivat). Kaikkiin käsittelyjen tilavuuskasvuihin on lisätty kontrollin ja käsittelyn vuotuisen keskikasvun erotus ennen lannoitusta (Taulukko 3). Alueelliset keskiarvot on laskettu niiden kokeiden keskiarvona, joista Etelä-Suomessa oli havaintoja vähintään 15 kasvukaudelta ja Pohjois-Suomessa 19 kasvukaudelta lannoituksen jälkeen. Aika käsittelystä kasvukausina: Lannoitusta seuraava kasvukausi = 1 ja lannoitusta edeltävä kasvukausi = 0. Etelä-Suomessa käsittelyjen CaAN+CaAN ja U+NP uusintalannoituksen ajankohta sinisellä pystyviivalla. Koe 308, jolla erot kasvussa ennen käsittelyä olivat suuria, on merkitty nuolilla.

Taulukko 4. Lannoituksella saatu puuston tilavuuden lisäys (m³/ha) 10, 15 ja 19 vuoden ajanjaksolla lannoituksesta. Kaikkiin käsittelyjen tilavuuskasvuihin on lisätty kontrollin ja käsittelyn vuotuisen keskikasvun erotus ennen lannoitusta (Taulukko 3).

Käsittely	Kokeet	Vallitseva puulaji	m ³ /ha/10 v	m ³ /ha/15 v	m ³ /ha/19 v
UF	101, 103, 309, 308	Mänty	17	29	-
U+NP ^a			25	37	-
CaAN+CaAN ^a			23	36	-
UF	102, 410	Kuusi	15	25	-
U+NP ^a			14	24	-
CaAN+CaAN ^a			21	28	-
UF	2, 6, 616, 617	Mänty	9	15	18
U			10	10	11
CaAN			11	13	14
UF	614	Kuusi	10	-	-
U			13	-	-
CaAN			13	-	-

a) Uusintalannoitus keväällä 1986 (ennen kahdeksatta kasvukautta ensimmäisen lannoituksen jälkeen) Tammelassa, Sumiaisissa ja Saarijärvellä

lannoitettu kuusikko oli iältään jo 120-vuotiaista ja sitä seurattiin vain 12 vuotta. Tällä lyhyellä seurantajaksolla ureaformaldehydikäsittelyn vaikutus oli samansuuntainen kuin Etelä-Suomessa.

Kaiken kaikkiaan puuston mittaustulokset osoittivat, että ureaformaldehydi sai aikaan huomattavan pitkäaikaisen kasvunlisäyksen verrattuna nopealiukoiseen oulunsalpietariin ja ureaan, joiden vaikutus kesti noin 7 vuotta. Nopealiukoisella lannoitteella saadaan kasvu lisääntymään nopeasti, mutta se palautuu ennalleen 7–10 vuodessa (Saarsalmi ja Mätkönen 2001). Puuston kasvun kannalta ureaformaldehydilannoitteen etuna on se, ettei tarvita useita lannoituskertoja, kun tavoitellaan pitkäaikaista, jopa yli 15 vuoden kasvunlisäystä.

Typpilannoituksen aiheuttamat nopeat muutokset vuosilustojen leveyksissä saattavat huonontaa sahataran laatua (Macdonald ja Hubert 2002). Ureaformaldehydillä asiaa ei ole tietääksemme tutkittu, mutta hitaasti typeä vapauttavana lannoitteena se ei aiheuttane yhtäkkistä vuosilustojen paksunemista ja ylläpitää siten todennäköisesti parempaa puun laatua kuin nopealiukoinen typpi-lannoite.

5 Ureaformaldehydin vaikutus maahan ja ympäristöön

Päätuloksia ureaformaldehydilannoituksen vaikutuksista maahan ja ympäristöön on koottu taulukkoon 5. Useassa tutkimuksessa tarkasteltiin samassa koeasetelmassa typpilannoitteiden kanssa hidas- ja nopealiukoisia P- ja K-lannoitteita, joten tähän kootut tulokset ja johtopäätökset eivät aina perustu asianmukaiseen tilastolliseen vertailtavuuteen, mutta ovat kuitenkin suuntaa antavia.

Sekä ammoniumtypen pitoisuus että typen nettomineralisaationopeus, joka kuvastaa helposti mineralisoitavissa olevan typen määrää, oli korkein ureaformaldehydikäsittelyjen humuskerroksessa 2–3, 7 ja 14 vuoden kuluttua lannoituksesta (Taulukko 5; Martikainen 1984; Martikainen ym. 1989). Vertailukohteena olivat lannoittamaton kontrolli sekä urea- ja oulunsalpietarikäsittelyt. Lyhytaikaisessa 3 kk:n tutkimuksessa, jossa maata lannoitettiin ureaformaldehydi-ureaseoksilla (ureaformaldehydi/urea 100, 80, 50, 25 ja 0), havaittiin, että ammoniumtypen määrä maassa oli sitä pienempi, mitä enemmän ureaformaldehydiä oli suhteessa ureaan (Aarnio ja Martikainen 1995).

Taulukko 5. Tutkimuksia ureaformaldehydin vaikutuksista maahan ja ympäristöön. Kokeen numero on mainittu, mikäli kyseessä on sama koe kuin puustotutkimuksissa (ks. Kuva 1 ja Taulukot 1–2).

Havainto	Paikkakunta	Metsätyyppi (koe) tai muu kuvaus	Päätulos	Viite
Typen mineralisaatio	Tammela	MT (101), CT (103)	Ammoniumtypen pitoisuus ja typen netto-mineralisaationopeus korkein UF-käsittelyssä 2–3 v kuluttua lannoituksesta.	Martikainen (1984)
	Tammela Kestilä	MT (101), CT (103) ECT (2)	Typen nettomineralisaationopeus korkein UF-käsittelyssä 7 v (Tammela) ja 14 v (Kestilä) kuluttua lannoituksesta.	Martikainen ym. (1989)
	Tammela	CT (103)	Ureaformaldehydi/urea määräsuhdekoe: korkealla suhteella alhaisempi ammoniumtypen pitoisuus maassa 3 kuukauden kuluttua kuin matalalla suhteella.	Aarnio ja Martikainen (1995)
Nitrifikaatio	Tammela	MT (101), CT (103)	U-käsittelyssä voimakas nettonitrifikaatio MT-kokeella 2–3 v kuluttua lannoituksesta, CaAN- ja UF-käsittelyissä ei nettonitrifikaatiota.	Martikainen (1984)
	Tammela	MT (101), CT (103)	Nitrifikaatiobakteerien lukumäärä korkea U-käsittelyssä molemmissa kokeissa, CaAN- ja UF-käsittelyissä olematon 2 v kuluttua lannoituksesta.	Martikainen (1985)
	Tammela Kestilä	MT (101), CT (103) ECT (2)	Nettonitrifikaatiota 7 v kuluttua Tammelan MT-kokeen U- ja CaN-käsittelyissä mutta ei UF-käsittelyssä. Tammelan CT- (7 v) ja ECT (14 v) -kokeilla ei nettonitrifikaatiota millään käsittelyllä.	Martikainen ym. (1989)
	Tammela	CT (103)	Ureaformaldehydi/urea määräsuhdekoe: korkealla suhteella alhaisempi nitrifikaatiobakteerien lukumäärä maanäytteessä 3 kk kuluttua kuin matalalla suhteella.	Aarnio ja Martikainen (1995)
Typen kohtalo	Tammela	CT (103)	Ioninvaihtohartsikoe maastossa: mitä korkeampi ureaformaldehydi/urea -suhde, sitä vähemmän mineraalityppeä huuhtoutuu ja pelkällä UF:lla mineraalityppeä ei huuhtoudu.	Aarnio ja Martikainen (1995)
	Itävallan Alpit	Kuusikko ja kuusi pyökki-sekametsikkö	Huuhoutumismahdollisuuksien maksimointi maapylväskokeessa laboratoriossa: ureaformaldehydin tyyppi ei juuri huuhtoudu toisin kuin nopealiukoisten typpilannoitteiden tyyppi.	Insam ja Palojärvi (1995)
	Vancouver Island, Kanada	Douglaskuusikko	Lisätyn ureaformaldehydin typen vaiheet lisäyksen jälkeen vuoden seurannassa: ureaformaldehydin tyyppi helposti mineralisoitavassa orgaanisessa ositteessa, urean tyyppi vaihtuvana mineraalityypinä.	Aarnio ym. (1996)
	Tammela Kestilä	MT (101), CT (103) ECT (2)	Maan kokonaistyyppipitoisuus korkeampi ja C/N-suhde alhaisempi UF- käsittelyssä kuin U- ja CaAN-käsittelyissä 7 v (Tammela) ja 14 v (Kestilä) kuluttua lannoituksesta.	Martikainen ym. (1989)
Sienet ja bakteerit	Pudasjärvi	CIT(617), MCCIT-EMT (616), VMT (615), HMT (614)	CaAN-lannoitus vähensi 4–5 v kuluttua mykorritsasienten itiömiä (biomassaa kg/ha), UF-lannoituksella ei vaikutusta.	Ohenoja (1994)
	Tammela Kevo	MT (101), CT (103) ECIT	UF-lannoituksella ei haitallisia vaikutuksia mikrobiyhteisöön: - Yleinen mikrobiaktiivisuus, - Selluloosan hajotus (vain ECIT, Kevo), - Sieni- ja bakteerimäärät.	Martikainen ym. (1989, 1994)
	Kasvihuone	Hiekkaturveseos	Taimikokeessa ureaformaldehydi ei suurinakaan määrinä heikentänyt mykorritsasienien kykyä infektoida männyn taimia.	Sen (1990)
Kasvillisuus	Saarijärvi Sumiainen Pudasjärvi	MT (410) VT (308) CIT (617), MCCIT-EMT (616), VMT (615)	UF-lannoitus ei vähentänyt pohjakasvillisuuden peittävyyttä kuten U- ja CaAN-lannoitus osalla kokeista. UF lisäsi lievemmin heinien ja ruohojen biomassaa 3 v kuluttua lannoituksesta kuin CaAN.	Sipola (1994a, 1994b); Raatikainen ja Niemelä (1994)

Nämä tutkimukset osoittivat, että ureaformaldehydi kiihdyttää typen nettomineralisaatiota pitkäaikaisesti, mikä viittaa typen hitaaseen vapautumiseen lannoitteesta tai mineralisoitavissa olevasta maan timestä. Yhdysvalloissa männyllä (*Pinus taeda* L.) tehdyssä lyhytaikaisessa tutkimuksessa maan mineraalitypen pitoisuudet pysyivät korkeina ureaformaldehydillä lannoitetussa maassa koko 5 kk tutkimuksen ajan, kun taas urealannoitus aiheutti pitoisuuspiikin vain alussa (Elliot ja Fox 2006). Suomessa tehdyissä tutkimuksissa typen mineralisaatiota kiihdyttävä vaikutus oli havaittavissa vielä 14 vuoden kuluttua lannoituksesta; tämän pitempiaikaisia tutkimuksia ei ole tietääksemme olemassa. Lämpötila- ja muut ympäristötekijät vaikuttavat siihen, miten maa-mikrobit vapauttavat typeä ureaformaldehydistä. Typen vapautumisnopeus ureaformaldehydistä riippuu kuitenkin suuresti sen kondensaatioasteesta (ketjupituudesta). Tavoitteen mukainen urean ja formaldehydin synteesi korostuu, kun halutaan säädellä typen vapautumisnopeutta lannoitteesta.

Maan happamuus ja ammoniumtypen pitoisuus säätelevät nitrifikaatiota. Borealisissa happamissa metsämaissa alhaisen typpilaskeuman alueella nettonitrifikaatiota ei useimmiten tapahdu, ja nitraattitypen pitoisuudet ovatkin olemattomia (esim. Smolander ym. 2000). Nopealiukoisien typpilannoitteen on todettu aloittavan nettonitrifikaation tai kiihdyttävän sitä ja näin lisäävän nitraattitypen pitoisuuksia osassa metsämaita (Martikainen 1984), joissakin maissa kuitenkin vasta kun pH:ta on kohotettu kalkitsemalla (Smolander ym. 1995; Priha ym. 1995; Martikainen 1985b). Ureaformaldehydi ei kiihdyttänyt nettonitrifikaatiota millään kokeella toisin kuin urea (Taulukko 5; Martikainen 1984; Martikainen ym. 1989). Ureaformaldehydi ei myöskään lisännyt nitrifikaatioon kykenevien bakteerien lukumäärää (Martikainen 1985a). Urean hydrolyysissä vapautuu ammoniakkia, joka reagoidessaan maan vetyionien kanssa vähentää maan happamuutta, mikä puolestaan saattaa edistää nitrifikaation alkamista. Ureaformaldehydi-ureaseoskokeessa humuskerroksen pH nousi, kun seoksessa oli ureaa vähintään puolet (Aarnio ja Martikainen 1995). Pitemmällä tähtäimellä eli 2, 7 ja 14 vuoden kuluttua urea-, oulunsalpietari- ja ureaformaldehydilannoituksesta humuskerroksen pH-arvon muutos riippui kenttäkokeesta ja oli aina lievä, enimmillään 0,3 pH-yksikköä (Martikainen 1984; Martikainen ym. 1989). Yleisesti ottaenkin pitkäaikaistutkimukset osoittavat, etteivät toistuvatkään typpilannoitukset muuta metsämaan happamuustasoa merkittävästi (Saarsalmi ja Mälkönen 2001).

Vaikka ureaformaldehydi siis kiihdytti typen nettomineralisaatiota maassa huomattavasti pidemmän aikaa kuin nopealiukoiset typpilannoitteet, se ei lisännyt riskiä nitrifikaatiolle. Yhtenä syynä lienee ollut ammoniumtypen pitoisuuden pysyminen koko ajan kohtuullisena. Lyhytaikaisessa 3 kk:n tutkimuksessa, jossa maata lannoitettiin ureaformaldehydi-ureaseoksilla, nitrifikaatiobakteereiden lukumäärä oli pienin ureaformaldehydi/urea-suhteen ollessa korkein (Aarnio ja Martikainen 1995). Kyse ei ollut nitrifikaatiobakteereihin kohdistuvasta myrkyvaikutuksesta, sillä maan pH:n kohotuksen ja nitrifioivien mikrobien lisäyksen jälkeen (pieni lisäys nitrifioivaa metsämaata ureaformaldehydillä lannoitettuun maahan) nitrifikaation todettiin alkavan (Martikainen 1986).

Hitaasti muuttuva maan kokonaistyppipitoisuus oli korkeampi ja hiilityppisuhde matalampi ureaformaldehydillä lannoitetuissa maissa kuin nopealiukoisilla typpilannoitteilla lannoitetuissa 7 tai 14 vuoden kuluttua lannoituksesta (Taulukko 5; Martikainen ym. 1989). Laboratoriokokeessa osoitettiin ¹⁵N-isotooppileimauksen avulla, että metsämaahan lisätyn urean typpi oli maassa hyvin nopeasti lisäyksen jälkeen vaihtuvana mineraalityppinä, mutta ureaformaldehydinin typpi oli pääosin maaperän orgaanisessa typpivarastossa, todennäköisesti sen helposti mineralisoituvassa ositteessa (Aarnio ym. 1996). Ioninvaihtohartseilla tehtyt maastotutkimukset viittasivat siihen, ettei ureaformaldehydinin sisältämä typpi huuhtoudu, toisin kuin urean typpi (Aarnio ja Martikainen 1995). Heikkoa huuhtoutumisalttiutta vahvistivat maapylväillä tehtyt laboratoriokokeet, joissa maksimoitiin typen huuhtoutumisriski monin eri tavoin: ureaformaldehydiä saaneesta maasta huuhtoutui typeä hyvin vähän, kun taas typen huuhtoutuminen oli voimakasta nopealiukoisilla lannoitteilla (Insam ja Palojarvi 1995).

Edellä kuvatut erilaiset koejärjestelyt osoittivat, ettei ureaformaldehydin tyyppi lähde helposti liikkeelle vaan jää maahan. Yhdenmukaisesti näiden tulosten kanssa on osoitettu, etteivät huomattavan suurelta lannoitusmäärästä ureaformaldehydillä (typeä jopa 900 kg/ha) aiheuttaneet merkittävää typen huuhtoutumista nurmikkomaista (Alexander ja Helm 1990). Ureaformaldehydin ja urean välinen ero näkyy typpirikkaissa vähemmän happamissakin maissa, joissa nettonitrifikaatio on vilkasta ilman typpilisäkin. Nardi ym. (2018) vertasivat urean ja ureaformaldehydin typen huuhtoutumista tällaisissa maatalousmaissa (orgaanisen aineen pitoisuus 10–34 %, C/N-suhde 9,7–18,3, pH 5,2–7,4), ja 90 päivän intensiivisessä huuhtoutumiskokeessa laboratoriossa urean tyypestä huuhtoutui maasta riippuen 89–100 % ja käytetyn ureaformaldehydin tyypestä 46–73 %. Näin otollisia olosuhteita nitraatin muodostumiselle ja huuhtoutumiselle ei juuri ole metsämaissamme. Kaiken kaikkiaan nopealiukoiset typpilannoitteet siis lisäävät riskiä typen häviöille, joka saattaa realisoitua kasvupaikkatekijöistä, sääoloista ja vuodenaajasta riippuen. Ureaformaldehydin kohdalla tutkimustulokset puhuvat sen puolesta, että metsämaissamme riski ei lisäännä.

Yksittäisissä tutkimuksissa Suomessa selvitettiin lisäksi, miten ureaformaldehydi vaikuttaa maan yleiseen mikrobiaktiivisuuteen ja hajotustoimintaan, sieni- ja bakteerimääriin, mykorritsasienten infektiokykyyn ja itiöemien muodostukseen (Taulukko 5). Selluloosaliuskojen hajotus maastossa, maanäytteiden hiilidioksidin tuotto, viljeltävien bakteerien lukumäärä ja sienirihmasson pituus olivat ureaformaldehydikäsittelyssä samansuuruisia tai suurempia verrattuna lannoittamattomaan kontrolliin eri aikoina lannoituksen jälkeen tehdyissä tutkimuksissa (esim. 3 kk ja 7 v) (Martikainen ym. 1994, 1989). Ureaformaldehydi ei siis näytä hidastavan maan luontaista hajotustoimintaa ja orgaanisen aineen hajotusta, mikä usein on tilanne nopealiukoisen typpilannoituksen pitkäaikaisvaikutuksena.

Nopealiukoinen typpilannoitus lisää metsämaan hiilivarastoa, koska se sekä lisää karike-tuotantoa että hidastaa maan orgaanisen aineen hajotusta (Martikainen 1996; Smolander ym. 1994; Högberg ym. 2017). Typpilannoitusta onkin ehdotettu metsien hiilensidonnan lisäämiskeinoksi (Prescott 2010; Hedwall ym. 2014). Maan stabiili hiili koostuu nykykäsityksen mukaan enimmäkseen mikrobien hajotustoiminnassa prosessoimasta hiilestä ja mikrobijätteistä (esim. Liang ym. 2017). Ureaformaldehydin vaikutusta maan hiilivarastoon, sen syvyysjakaumaan ja pysyvämmän hiilen määrään ei tiedetä toistaiseksi.

Taimikokeessa havaittiin, ettei ureaformaldehydi suurinakaan määrinä heikentänyt mykorritsasienten kykyä infektoida männyn taimia (Sen 1990). Ohenojan (1994) mukaan kenttäkokeissa mykorritsasienilajit vähensivät yleensä itiöemien tuottamista 4–5 vuoden kuluttua oulunsalpietarilla lannoittamisesta, mutta ureaformaldehydillä ei ollut tätä vähentävää vaikutusta.

Kasvillisuustarkasteluissa merkittävin ero ureaformaldehydin ja nopealiukoisten typpilannoitteiden välillä oli se, ettei ureaformaldehydi vähentänyt pohjakasvillisuuden peittävyyttä. Se ei tuhonnut sammalpeitettä toisin kuin urea ja ammoniumnitraatti (Sipola 1994a, 1994b; Raatikainen ja Niemelä 1994). Lisäksi ureaformaldehydi lisäsi lievemmin heinien ja ruohojen biomassaa kuin muut typpilannoitteet (Sipola 1994a, 1994b). Tämä viittaa siihen, ettei ureaformaldehydi aiheuttaisi niin suurta kilpailua tyypestä puuston ja aluskasvillisuuden välillä kuin nopealiukoiset lannoitteet.

Ureaformaldehydin lisäksi on olemassa muitakin urean ja erilaisten aldehydien kondensaatiotuotteita: isobutyryyaldehydin kanssa isobutylideeniurea ja asetaledehydin kanssa krotonylideeniurea (Nardi ym. 2018). Tietääksemme tutkimusnäyttö niiden lannoitusvaikutuksista on vielä vähäistä.

6 Johtopäätöksiä

Kaiken kaikkiaan tutkimustulokset olivat ureaformaldehydin osalta lupaavia verrattuna nopealiukoisiin typpilannoitteisiin. Ureaformaldehydi antaa pitkäaikaisen kasvuvaikutuksen lisäämättä riskiä maaperä- tai ympäristöhaitoille. Jos tavoitellaan pitkäaikaista (jopa yli 15 vuoden) kasvunlisäystä, lannoituskertoja ei tarvita useita. Toisaalta tilanteessa, jossa puuta halutaan nopeasti enemmän, nopealiukoisella lannoitteella saadaan kasvu lisääntymään jo alle 10 vuoden kuluessa lannoituksesta. Merkittävin tulos ympäristön kannalta oli, ettei ureaformaldehydi lisännyt riskiä typen häviöille, vaan tyyppi pysyi täysmääräisenä maassa vapautuen hitaasti hajotustoiminnan tuloksena tyydyttämään puuston typen tarvetta.

Ureaformaldehydilannoitteen vaikutuksesta on olemassa huomattavan monipuolista pitkän ajan tietoa. Se antaa tälle typpilannoitteelle merkittävän edun verrattuna uusiin tai kehitteillä oleviin hidasliukoisiin typpilannoitteisiin, joilla tulosten saaminen pitkäaikaisvaikutuksista kestää vuosia tai vuosikymmeniä. Tulokset varsinkin huuhtoutumisalttiuden osalta ovat vakuuttavia. Tutkimustoiminnan puutteena on kuitenkin se, että osa tutkimuksista rajoittuu karuihin kasvupaikkoihin. Samoin ureaformaldehydin synteisiin täytyy kiinnittää huomiota, jotta tuote saadaan halutunlaiseksi kondensaatiotuotteeksi typen vapautumisen suhteen. Digitaali-, säätö- ja mittaustekniikan kehityksen ansiosta synteesin ohjaaminen on kuitenkin helpompaa kuin aiemmin. Jatkotutkimustarpeita ovat myös lannoittelajien elinkaaren ja taloudellisen kannattavuuden vertailut. Mikäli metsien laajamittaisempaa lannoitusta tyypellä harkitaan, olemassa olevan tutkimustiedon mukaan hitaasti typeä vapauttavassa ureaformaldehydissä on monia etuja verrattuna nopealiukoisiin typpilannoitteisiin.

Kiitokset

Kiitämme metsätalousinsinööri Lauri Päivistä pitkäaikaisten puuston mittaustulosten luovuttamisesta käyttöömmme, MMM Päivi Sorosta avusta aineiston järjestelyssä ja FT Veikko Kitusta synteesikemian asiantuntemuksesta.

Kirjallisuus

- Aarnio T. (1996). Mineralization of carbon and nitrogen in forest soil treated with fast- and slow-release fertilizers. PhD thesis, University of Helsinki. ISBN 952-90-7668-1. 48 s.
- Aarnio T., Martikainen P.J. (1995). Mineralization of C and N and nitrification in Scots pine forest soil treated with nitrogen fertilizers containing different proportions of urea and its slow-releasing derivative, ureaformaldehyde. *Soil Biology and Biochemistry* 27(10): 1325–1331. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00066-N](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00066-N).
- Aarnio T., McCullough K., Trofymow J.A. (1996). Fate of urea and ureaformaldehyde nitrogen in a one-year laboratory incubation with Douglas-fir forest floor. *Soil Biology and Biochemistry* 28(10–11): 1407–1415. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(96\)00148-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(96)00148-4).
- Alexander A., Helm H.-U. (1990). Ureaform as a slow release fertilizer: a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 153(4): 249–255. <https://doi.org/10.1002/jpln.19901530410>.
- Biological Research Reports from the University of Jyväskylä 38. (1994). Effects of fertilization on forest ecosystem. 218 s.
- Elliot J.R., Fox T.R. (2006). Effects of a controlled release fertilizer on the nitrogen dynamics of mid-rotation loblolly pine plantation in the Piedmont, Virginia. Teoksessa: Connor K. (toim.). Proceedings of the 13th biennial southern silvicultural research conference. General Technical

- Report SRS-92. U.S. Departments of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC. 640 s.
- Hayatsu M. (2014). A novel function of controlled-release nitrogen fertilizers. *Microbes and Environments* 29(2): 121–122. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME2902rh>.
- Hays J.T. (1980). Ureaform: first synthetic slow release fertilizer. *Weeds, Trees & Turf* 6/1980: 42–43.
- Hedwall P.-O., Gong P., Ingerslev M., Bergh J. (2014). Fertilization in northern forests – biological, economic and environmental constraints and possibilities. *Scandinavian Journal of Forest Research* 29(4): 301–311. <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.926096>.
- Högberg P., Näsholm T., Franklin O., Högberg M. (2017). Tamm review: on the nature of the nitrogen limitation to plant growth in Fennoscandian forests. *Forest Ecology and Management* 403: 161–185. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.045>.
- Insam H., Palojarvi A. (1995). Effects of forest fertilization on nitrogen leaching and soil microbial properties in the Northern Calcareous Alps of Austria. *Plant and Soil* 168: 75–81. <https://doi.org/10.1007/BF00029315>.
- Jahns T., Schepp R., Siersdorfer C., Kaltwasser H. (1999). Biodegradation of slow-release fertilizers (methylenureas) in soil. *Journal of Environmental Polymer Degradation* 7: 75–82. <https://doi.org/10.1023/A:1021856200578>.
- Kukkola M., Nöjd P. (2000). Kangasmetsien tuottama kasvunlisäys Suomessa 1950–1998. *Metsätieteen aikakauskirja* 4: 603–2000. <https://doi.org/10.14214/ma.6065>.
- Liang C., Schimel J.P., Jastrow J.D. (2017). The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology* 2: 17105. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2017.105>.
- Macdonald E., Hubert J. (2002). A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry* 75(2): 107–138. <https://doi.org/10.1093/forestry/75.2.107>.
- Martikainen P.J. (1984). Nitrification in two coniferous forest soils after different fertilization treatments. *Soil Biology and Biochemistry* 16(6): 577–582. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(84\)90075-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(84)90075-0).
- Martikainen P.J. (1985a). Numbers of autotrophic nitrifiers and nitrification in fertilized forest soil. *Soil Biology and Biochemistry* 17(2): 245–248. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90122-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90122-1).
- Martikainen P.J. (1985b). Nitrification in forest soil of different pH as affected by urea, ammonium sulphate, and potassium sulphate. *Soil Biology and Biochemistry* 17(3): 363–367. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90074-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90074-4).
- Martikainen P.J. (1986). Nitrification in two fertilized pine forest soils. PhD thesis, University of Helsinki. ISBN 951-99733-1-1. 74 s.
- Martikainen P.J. (1994). The experimental sites and the fertilization treatments. Teoksessa: Effects of fertilization on forest ecosystems. Biological Research Reports from the University of Jyväskylä 38. ISBN 951-34-0231-2. s. 29–39.
- Martikainen P.J. (1996). Microbial processes in boreal forest soils as affected by forest management practices and atmospheric stress. Teoksessa: Stotzky G., Bollag J.-M. (toim.). *Soil Biochemistry* 9: 195–222. Marcel Dekker, Inc, New York.
- Martikainen P.J., Aarnio T., Taavitsainen V.-M., Päivinen L., Salonen K. (1989). Mineralization of carbon and nitrogen in soil samples taken from three fertilized pine stands: long-term effects. *Plant and Soil* 114: 99–106. <https://doi.org/10.1007/BF02203087>.
- Martikainen P.J., Ohtonen R., Silvola J., Vuorinen A. (1994). The effects of fertilization on forest soil biology. Microbiology. Teoksessa: Effects of fertilization on forest ecosystems. Biological Research Reports from the University of Jyväskylä 38. ISBN 951-34-0231-2. s. 40–79.

- Nardi P., Neri U., Di Matteo G., Trinchere A., Napoli R., Farina R., Subbarao G.V., Benedetti A. (2018). Nitrogen release from slow-release fertilizers in soils with different microbial activities. *Pedosphere* 28(2): 332–340. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60429-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60429-6).
- Ohenoja E. (1994). Forest fertilization and the fruiting body production of larger fungi. Teoksessa: Effects of fertilization on forest ecosystems. Biological Research Reports from the University of Jyväskylä 38. ISBN 951-34-0231-2. s. 140–155.
- Prescott C.E. (2010). Litter decomposition: what controls is and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? *Biogeochemistry* 101: 133–149. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9439-0>.
- Priha O., Smolander A. (1995). Nitrification, denitrification and microbial biomass N in soil from two fertilized and limed Norway spruce forests. *Soil Biology and Biochemistry* 27(3): 305–310. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)00181-Y](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)00181-Y).
- Päivinen L. (1994). The experiments at Tammela, Sumiainen and Saarijärvi. Teoksessa: Effects of fertilization on forest ecosystems. Biological Research Reports from the University of Jyväskylä 38. ISBN 951-34-0231-2. s. 173–182.
- Raatikainen M., Niemelä M. (1994). The effect of fertilization on the yield of wild forest berries. Teoksessa: Effects of fertilization on forest ecosystems. Biological Research Reports from the University of Jyväskylä 38. ISBN 951-34-0231-2. s. 123–129.
- Saarsalmi A., Mälkönen E. (2001). Forest fertilization research in Finland: a literature review. *Scandinavian Journal of Forest research* 16(6): 514–416. <https://doi.org/10.1080/02827580152699358>.
- Sen R. (1990). Isozymic identification of individual ectomycorrhizas synthesized between Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and isolates of two species of *Suillus*. *New Phytologist* 114(4): 607–616. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00431.x>.
- Sipola K. (1994a). Effects of forest fertilization on the ground vegetation of coniferous forests on mineral soil sites in Northern Finland. Teoksessa: Effects of fertilization on forest ecosystems. Biological Research Reports from the University of Jyväskylä 38. ISBN 951-34-0231-2. s. 98–111.
- Sipola K. (1994b). Effects of forest fertilization on the nitrogen content of *Vaccinium myrtillus* L. Teoksessa: Effects of fertilization on forest ecosystems. Biological Research Reports from the University of Jyväskylä 38. ISBN 951-34-0231-2. s. 130–139.
- Smolander A., Kitunen V., Priha O., Mälkönen E. (1995). Nitrogen transformations in limed and nitrogen fertilized soil in Norway spruce stands. *Plant and Soil* 172: 107–115. <https://doi.org/10.1007/BF00020864>.
- Smolander A., Kukkola M., Helmisaari H.-S., Mäkipää R., Mälkönen E. (2000). Functioning of forest ecosystems under nitrogen loading. Teoksessa: Mälkönen E. (toim.). Forest condition in a changing environment – the Finnish case. *Forestry Sciences* 65. Kluwer Academic Publishers. s. 229–247. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9373-1_27.
- Smolander A., Kurka A., Kitunen V., Mälkönen E. (1994). Microbial biomass C and N, and respiratory activity in soil of repeatedly limed and N- and P-fertilized Norway spruce stands. *Soil Biology and Biochemistry* 26(8): 957–962. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90109-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90109-0).
- Sponseller R.A., Gundale M., Futter M., Ring E., Nordin A., Näsholm T., Laudon H. (2016). Nitrogen dynamics in managed boreal forests: recent advances and future research directions. *Ambio* 45: S175–S187. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0755-4>.

37 viitettä.