

Tuhkalannoituksen vaikutus metsämaan kasvihuonekaasuvirtoihin

Marja Maljanen¹
Hannu Nykänen¹
Mikko Moilanen²
Pertti Martikainen¹

Metsätehon raportti 83
27.12.1999

Konsortiohanke: Fortum Power and Heat Oy,
Metsähallitus, Metsäliitto Osuuskunta,
Metsäteollisuus ry, Pölkky Oy, Stora Enso Oyj,
UPM-Kymmene Oyj, Vapo Timber Oy

Kirjoittajien yhteystiedot: ¹ Kuopion yliopisto
Ympäristötieteiden laitos
PL 1627, 70211 Kuopio
Puhelin: (017) 163 586

² Metsäntutkimuslaitos
Muhoksen tutkimusasema
Kirkkosaarentie 7, 91500 Muhos
Puhelin: (08) 531 2200

Asiasanat: tuhka, kadmium, kasvihuonekaasut

© Metsäteho Oy

Helsinki 1999

SISÄLLYS

ALKUSANAT	3
TIIVISTELMÄ	4
1 TAUSTAA JA TAVOITE	6
2 AINEISTO JA MENETELMÄT	7
2.1 Koealueet	7
2.2 Tuhkan koostumus	8
2.3 Kaasumittaukset	8
3 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	9
3.1 Dityppioksidi	9
3.2 Metaani	11
3.3 Hiilidioksidi	11
3.4 Maaperäanalyysit	14
3.5 Maaperäominaisuuksien liittyminen kaasuvirtoihin	16
KIRJALLISUUS	17

ALKUSANAT

Metsäteollisuusyritykset pyysivät 1995 Metsätehoa selvittämään sitä, mitä tutkimuksia ja kehittämistoimia pitäisi tehdä, jotta luotaisiin edellytykset suurien voimalaitosten tuottaman etupäässä puuperäisen tuhkan laajamittaiselle metsäkäytölle. Selvitystyön johdosta käynnistettiin vuoden 1996 lopulla Metsätehon koordinoimana Biotuhkan hyödyntäminen metsänparannusaineena -hanke. Hankkeessa tutkitaan erityisesti tuhkan metsäkäytön ympäristövaikutuksia, kuten ravinteiden huuhtoutumista ja vaikutusta vesiin, tuhkan vaikutusta marjojen ja sienien raskasmetallipitoisuuksiin sekä maaperän mikro-organismeihin. Teknistaloudellisten tutkimusten ja kokeilujen tehtävänä puolestaan on tuottaa tietoa mm. tuhkan esikäsittelystä ja hyödyntämisen tekniikoista ja taloudesta.

Tuhkahanke on 3-vuotinen ja päättyy vuoden 1999 lopussa. Hankkeen rahoittajat ovat Fortum Power and Heat Oy, Metsäliitto Osuuskunta, Metsähallitus, Metsäteollisuus ry, Pölkky Oy, Stora Enso Oyj, UPM Kymmene Oyj, Vapo Timber Oy ja TEKES. Hankkeessa tutkimuksia suorittavat organisaatiot ovat Helsingin yliopisto, Kuopion yliopisto, Oulun yliopisto, Metsäntutkimuslaitos, Metsäteho Oy sekä Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos.

Tässä raportissa esitetään Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitoksen ja Metsäntutkimuslaitoksen Muhoksen tutkimusaseman yhteistyönä tehdyt tuhkalannoituksen kasvihuonekaasututkimukset. Tutkimuksen johtajana toimi professori Pertti Martikainen Kuopion yliopistosta.

Helsinki 10.10.1999

Antti Korpilahti
Tuhkahankkeen koordinaattori

TIIVISTELMÄ

Tuhkalannoituksella ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta dityppioksidipäästöön millään tutkituista alueista. Tutkimukseen sisältyi mittauksia vain kesäkuukausina, joten talven ja kevään päästöistä ei ole tietoa. Kiihtynyttä turpeen hajoamista kuvaava hiilidioksidipäästö lisääntyi vanhoilla tuhkalannoitetuilla koealueilla (12 - 36 %), mutta vain yhdellä uudella koealueella (lisäys 30 %). Koejärjestelyllä ei mitattu ekosysteemin hiilitasetta. Mitattu CO₂-emissio kuvaa turpeen sekä maanpäällisen ja -alaisen karikkeen hajoamista. Osa mitatusta CO₂-virrasta liittyy myös kasvien juurten hengitykseen ja kasvien pimeärespiraatioon.

Tuhkalla näyttäisi olevan metaanipäästöjä vähentävä pitkäaikainen vaikutus turvemaissa, joissa päästö on luontaisesti pieni. Tämä selittyy joko metaanin tuoton laskulla tai metaanin hapetuksen kiihtymisellä. Metaanin tuotto on herkempi lämmölle kuin metaanin hapetus, joten alempi lämpötila tuhkalannoitetussa turvemaassa saattaa myös liittyä pienempään metaanipäästöön. Aineiston pienuuden vuoksi jäi epäselväksi se, voiko tuhka lisätä metaanipäästöä tapauksissa, joissa päästö on korkeasta vesipinnasta johtuen suuri. Maan pH:n ja ravinteisuuden muutokset tuhkalannoituksen jälkeen saattavat vaikuttaa metaania tuottavien ja hapettavien mikrobien toimintaan. Nämä saattavat liittyä havaintoihin, että välittömästi tuhkalannoituksen jälkeen maaperän kyky niellä ilmakehän metaania heikkeni hieman.

Tuhkan sisältämällä kadmiumilla ei ollut välitöntä vaikutusta tutkittujen kaasujen virtoihin. Pitkäaikaisvaikutuksia kadmiumin mahdollisesti siirtyessä syvemmälle maaprofiiliin ei tunneta.

Tarkkoja johtopäätöksiä tuhkan vaikutuksista kaasuvirtoihin ei voida vielä tehdä. Jatkossa mittauksia tulisi tehdä varhaiskevällä, myöhäissyksyllä ja myös talvella. Nämä ajankohdat voivat vaikuttaa merkittävästi kaasujen vuositaseisiin (Alm ym. 1999). Alustavat tulokset ovat joka tapauksessa rohkaisevia esim. dityppioksidin osalta. Päästöt eivät näyttäisi lisääntyvän räjähdysmäisesti, kuten teoreettisesti voisi olla mahdollista. Hiilidioksidin osalta tulokset tukevat aiempia havaintoja tuhkan hajotustoimintaa kiihdyttävästä vaikutuksesta. Vaikutukset metsämaan metaaninieluun vaativat lisätutkimuksia.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia tuhkalannoituksen vaikutusta maaperän kasvihuonekaasuvirtoihin. Tuhka voi vaikuttaa maaperän hiilen- ja typenkierron prosesseihin. Tässä tutkimuksessa mitattiin metaani (CH₄), dityppioksidi (N₂O) ja hiilidioksidivirtoja (CO₂) eri ikäisistä kivennäismaan

ja turvemaan tuhkalannoituskokeista ja niiden kontrollialueista. Kaikkien kokeiden tuhka oli puunkuoresta saatua pölymäistä tuhkaa. Kaasupäästöt mitattiin suljetun kammion menetelmällä ja kerättyjen kaasunäytteiden pitoisuudet määritettiin vuorokauden kuluessa näytteenotosta kaasukromatografilla.

Mitatut N_2O -päästöt vastasivat aiempien tutkimusten tuloksia sekä kangasmailla (alle $200\mu g N_2O m^2 vrk^{-1}$), että turvemailla (alle $1\ 000 - 9\ 000\ \mu g N_2O m^2 vrk^{-1}$). Tuhkalannoituksella ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta dityppioksidipäästöön millään tutkituista alueista. Kangasmaat olivat aina metaanin nieluja. Soista osa toimi nieluina, osa metaanin lähteinä. Vanhoilla koealueilla tuhkalannoitus joko hieman vähensi metaanipäästöä tai lisäsi metaanin nielua. Uusista koealueista Pelson karu räme oli metaanin lähde, jolla päästöt olivat tuhkalannoitetulla alueella viisi kertaa kontrollialuetta suurempia. Joillakin uusilla alueilla tuhkalannoitus oli pienentänyt metaanin nielua. Tuhkalla näyttäisi olevan metaanipäästöä vähentävä pitkäaikainen vaikutus turvemaissa, joissa päästö on luontaisesti pieni. Pimeärespiraatio (CO_2) oli suurempi turvemailla kun kangasmailla ja se lisääntyi kontrolliin verrattuna tuhkakäsitellyillä vanhoilla koealueilla $12 - 36\ %$, mutta vain yhdellä uudella koealueella (lisäys $30\ %$). Tulokset tukevat aiempia havaintoja tuhkan hajotustoimintaa kiihdyttävästä vaikutuksesta. Mitattu pimeärespiraatio sisältää turpeen sekä maanpäällisen ja -alaisen karikkeen hajoamista sekä kasvien juurten hengityksestä ja kasvien pimeärespiraatiosta tulevan hiilidioksidin.

Tuhkan sisältämällä kadmiumilla ei ollut välitöntä vaikutusta tutkittujen kaasujen virtoihin. Pitkäaikaisvaikutuksia kadmiumin mahdollisesti siirtyessä syvemmälle maaprofiiliin ei tunneta.

Tarkkoja johtopäätöksiä tuhkan vaikutuksista kaasuvirtoihin ei voida vielä tehdä, mm. vaikutukset metsämaan metaanivirtoihin vaativat lisätutkimuksia. Jatkossa mittauksia tulisi tehdä myös varhaiskevällä, myöhäissyksyllä ja talvella, koska nämä ajankohdat voivat vaikuttaa merkittävästi kaasujen vuositaseseisiin. Alustavat tulokset ovat joka tapauksessa rohkaisevia esim. dityppioksidin osalta, jonka päästöt eivät näyttäisi lisääntyvän.

1 TAUSTAA JA TAVOITE

Metsätalouden vaikutuksista soiden kaasuvirtoihin saatiin runsaasti tietoa Silmu-tutkimuksissa. Tutkimustulosten mukaan metsäojitus muuttaa merkittävästi kaasuvirtoja. Metaanipäästöt (CH_4) vähenevät, mutta hiilidioksidi (CO_2)- ja dityppioksidi (N_2O)-päästöt kasvavat (Martikainen ym. 1993, Martikainen ym. 1995, Regina ym. 1996). Tuhka vaikuttaa maaperän hiilen- ja typenkierron prosesseihin. Tuhkalannoitus on lisännyt hiilidioksidin vapautumista turpeesta joissakin metsitetyissä suoekosysteemeissä (Silvola ym. 1985). Tämä liittyy kiihtyneeseen turpeen hajoamiseen, joten tuhkalannoitus lisää myös typen mineralisaatiota. Typen mineralisaation kiihtyminen saattaa edistää maaperän mikrobiologisia prosesseja, joissa muodostuu dityppioksidia. Dityppioksidi on tehokas kasvihuonekaasu, sadan vuoden ajaksolla tarkasteltuna (IPCC 1994) se on ainemäärää kohti 320 kertaa tehokkaampi kuin hiilidioksidi. Turpeen ravinnetasolla saattaa olla suuri merkitys siihen, kuinka dityppioksidin tuotto turpeessa muuttuu tuhkalannoituksen seurauksena. Tuhkan vaikutusta metaanivirtoihin ei kuitenkaan vielä tunneta. Tuhkalannoitus voi vaikuttaa turpeessa sekä metaanin tuottoon että sen hapettumiseen - nettovaikutus metaanivirtaan on näiden kahden prosessin summa. Tuhkalla on myös epäsuora vaikutus puuston kasvun kautta turpeen kasvihuonekaasujen muodostumiseen. Puuston lisääntyneen kasvun ja vedenkäytön seurauksena pohjavesipinta laskee, jolloin turpeen hapellisuus lisääntyy ja se vaikuttaa mikrobiprosesseihin.

Tuhka voi lisätä dityppioksidin ja hiilidioksidin tuotantoa myös mineraalimailla. Tuhkan vaikutukset kasvihuonekaasujen mikrobiologiaan mineraalimailla saattavat riippua turvemaiden tapaan ekosysteemin ravinnetasosta. Mineraalimaat ovat globaalisti merkittäviä metaanin nieluja johtuen metsämaaprofiilissa toimivista metaania hapettavista mikrobeista. Kiihtynyt typen mineralisaatio tuhkalannoitetussa maassa saattaa vaikuttaa metaanin hapettumiseen. Mineraalitypen, erityisesti ammoniumin, on havaittu vähentäneen metaanin hapettumista borealisessa metsämaassa (Saari ym. 1997, Stuedler ym. 1989). Tuhka voisi siis pienentää metaanin nielua metsämaassa. Tuhka vähentää maan happamuutta eli nostaa maan pH:ta, joka myös vaikuttaa metaanin hapettumiseen (Saari ym. 1997).

Tämän työn tavoitteena oli tuottaa tietoa siitä, kuinka tuhkalannoitus vaikuttaa maaperän kasvihuonekaasuvirtoihin. Tutkimuksessa kerättiin maaperäkaasuja eri-ikäisistä kivennäismaan ja turvemaan tuhkalannoituskokeista ja niiden kontrollialueista. Näytteenoton huolehti Metsäntutkimuslaitoksen Muhkan tutkimusasema. Kaasunäytteet analysoitiin Kuopion yliopistossa ja Kansanterveyslaitoksessa. Vuonna 1997 näytteet otettiin aiemmin perustetuista kokeista ja vuonna 1998 uusista, vuonna 1997 perustetuista ja lannoitetuista kokeista

2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Koealueet

Vuonna 1997 valittiin kaksi viljavuustasoltaan erilaista kivennäismaakohdetta, joista toinen oli kuivan kankaan männikkö ja toinen tuoreen kankaan kuusikko, ja kolme metsätaloustalouteen ojitettua turvemaakohdetta, jotka olivat entinen ruohoinen neva, tupasvillaräme ja suursararäme. Neva oli tuhkalannoituskokeista vanhin, 50-vuotias. Muut alueet oli käsitelty 14 - 18 vuotta aiemmin (taulukko 1).

Vuonna 1998 koealueina olivat kolme kuivan kangasmaan männikköä sekä tupasvillaräme ja ruohoinen räme. Näille alueille levitettiin Oy Metsä-Botnia Ab:n Äänekosken tehtaan pölytuhkaa vuonna 1997 (taulukko 1). Suoalueet oli ojitettu 1950-luvulla ja perattu 1993. Tuhkan sisältämän kadmiumoksidin vaikutusta tutkittiin erillisellä kokeella kuivahkolla kangasmaalla (Lummelampi 2).

TAULUKKO 1 Koealat, niiden kasvupaikkatyypit, tuhkan alkuperä, levitysmäärä ja -aika

Paikka	Tyyppi	Tuhkan alkuperä	Annos (tn/ha)	Levitys aika	Ojitus-vuosi
Leppiniemi	Rh-suo	Koivupuu	8	IV 1947	1932
Varissaari	Ss-suo	Puu (OYKS)	5	V 1982	1973
Oisava	Tn-suo Puu	(OYKS)	4	VI 1983	1967
Kylmäla	CT-kangas	Puu (OYKS)	5	1979	
Paljakka	MT-kangas	Puunkuori	10	IX 1981	1981
Pelso 1	TR-suo	Puu (Äänekoski)	5	VI 1997	
Pelso 2	VRiN-suo	Puu (Äänekoski)	5	VI 1997	
Sadinselkä	VMT-kangas	Puu (Äänekoski)	3	VI 1997	
Lummelampi 1	CIT-ECT-kangas	Puu (Äänekoski)	3	VI 1997	1950
Lummelampi 2	ECT-kangas	Puu (Äänekoski)	3 + Cd-oksidi	X 1997	1950

Kasvupaikkojen luonnehdinta:

Vanhat kokeet:

Leppiniemi: entinen ruohoinen neva

Varissaari: suursararäme

Oisava: tupasvillaräme

Kylmäla: kanerva-puolukkatyyppin kangas

Paljakka: mustikkatyyppin kangas

Uudet kokeet:

Pelso 1: karu tupasvillaräme

Pelso 2: ruohoinen räme, paksuturpeinen, runsastyyppinen

Sadinselkä: tuore kangas

Lummelampi 1: karu kangas, jäkälä-kanervatyyppiä

Lummelampi 2: kuiva kangas

2.2 Tuhkan koostumus

Kaikkien kokeiden tuhka oli puunkuoresta saatua pölymäistä tuhkaa. Uusilla koealoilla käytettiin vuonna 1997 Oy Metsä-Botnia Ab:n Äänekosken tehtaasta lentotuhkaa. Tuhkien alkuainekoostumus on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2 Kokeiden tuhkakäsittelyt (kg/ha kuiva-aineena) ja niiden sisältämät alkuainemäärät

Koealue	Käsittelyt, kg/ha	P g/ha	K kg/ha	Ca g/ha	Mg g/ha	Fe kg/ha	Mn kg/ha	Zn g/ha	B g/ha	Cu g/ha	Cd /ha	Ni g/ha	Cr g/ha
Leppiniemi	Puutuhka 7200	120	615	1505	275	90	150	29610	1050	2320	*	*	*
Varissaari	Puutuhka 4500	135	225	1415	210	30	90	3360	1880	660	*	*	*
Oisava	Puutuhka 4500	135	225	1415	210	30	90	3360	1880	660	*	*	*
Kylmä	Puutuhka 4500	80	335	1270	*	*	120	4050	1350	800	*	*	*
Paljakka	Puutuhka 7000	30	35	1625	85	245	30	3230	290	210	*	*	*
Pelso 1 ja 2 Lummelampi ja	Pölytuhka 5000	45	140	1760	90	55	50	11950	990	400	80	350	320
Sadinselkä	Pölytuhka 3000	30	85	1055	55	35	30	7170	590	240	50	210	190
Lummelampi 2	Pölytuhka 3000	30	85	1055	55	35	30	7170	590	240	50	210	190
Lummelampi 2	Pölytuhka 3000 + Cd	30	85	1055	55	35	30	7170	590	240	1230	210	190

2.3 Kaasumittaukset

Kaasupäästöt mitattiin suljetun kammion menetelmällä. Kammio oli pohjastaan avoin metallilieriö, jonka halkaisija oli 30 cm ja korkeus 35 cm. Kammion avoin alapää upotettiin maahan n. 10 cm syvyyteen kaasuvirta-mittausta varten. Kammioon yhdistettiin näytteenottoletkut ja näytteet otettiin kolmitiehanoilla suljettaviin ruiskuihin 5, 15, ja 25 minuutin kuluttua kammion asettamisesta mittauskohtaan. Kammion lämpötila ja maaprofiilin lämpötila mitattiin näytteenoton aikana läheltä kammiota maan pinnasta 15 - 30 cm syvyyteen 5 cm väleillä. Kammioiden vieressä sijaitsevista pohjavesikaivoista mitattiin pohjaveden taso. Näyteruiskuihin kerättyjen kaasujen pitoisuudet määritettiin vuorokauden kuluessa näytteenotosta Kansanterveyslaitoksella Kuopiossa kaasukromatografilla, jossa oli EC-detektori N₂O:n mittaukseen, TC-detektori hiilidioksidin ja FI-detektori metaanin mittaamiseen. Standardina käytettiin paineilmaa, jonka kaasupitoisuudet oli määritetty tarkkoja kaasustandardeja vastaan. Kaasujen päästöt laskettiin kammiossa mittausjakson aikana havaittujen kaasujen pitoisuusmuutosten, kammion lämpötilan ja kammion koon mukaan neliometriä kohti (Nykänen ym. 1995, Nykänen ym. 1998).

Maaperäanalyysit kaasumittauskoealueilta teki Metla. Maan pH:n määrittäminen tehtiin sekoittamalla maata ja vettä suhteessa 1:25 (20 ml tuoretta maata ja 50 ml vettä). Johtoluku mitattiin samasta maa-vesi-suspensiosta.

3 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

3.1 Dityppioksidi

Ravinnerikkaiden vanhojen tuhkalannoitettujen turvemaiden N_2O -päästöt (alle $1\ 000\ \mu\text{g}\ N_2O\ \text{m}^2\ \text{vrk}^{-1}$) olivat kesällä 1997 hieman pienempiä kuin mitä aiemmin on mitattu ravinteikkailta ojitetuilta turvemailta (taulukko 3, kuva 1). Karun turvemaan vähäinen päästö vastaa aiempien tutkimusten tuloksia (Martikainen ym. 1993, 1995, Regina ym. 1996). Uusilla tuhkalannoitusalueilla suurimmat N_2O -päästöt olivat ravinnerikkaalla tupasvillarämeellä ($5\ 000$ - $9\ 000\ \mu\text{g}\ N_2O\ \text{m}^2\ \text{vrk}^{-1}$). Sekä vanhojen että uusien kangasmaiden päästöt (alle $200\ \mu\text{g}\ N_2O\ \text{m}^2\ \text{vrk}^{-1}$) olivat pieniä ja samalla tasolla aiempien tulosten kanssa (Martikainen ym. 1994). Mittauksissa vasta yli $100\ \mu\text{g}$:n vuorokausipäästöt neliometrille ovat luotettavia.

Vuonna 1997 tuhkalannituksen saaneella tupasvillarämeellä (Pelso 1) tuhkalannoitetun alueen N_2O -päästöt olivat alkukesällä yli kaksinkertaisia lannoittamattomaan alueeseen verrattuna. Loppukesällä ja syksyllä päästöissä ei ollut merkittäviä eroja lannoitetun ja lannoittamattoman alueen välillä. Uusista tuhka-alueista ruohotason rämeellä (Pelso 2) alkukesän N_2O -päästö oli kontrollialalla nelinkertainen tuhkalannoitettuun alaan verrattuna. N_2O -päästöt pienenivät myöhemmin kesällä eikä syksyllä enää ollut suuria eroja lannoitetun ja lannoittamattoman koalueen välillä.

Vanhoista koalueista runsaimmin dityppioksidia tuottavalla Leppiniemen kokeella lannoittamattoman koekalan päästö oli suurempi kuin tuhkalannoitetun koekalan. Tämä lienee seurausta lannoitetun koalueen nopeammasta muuttumisesta turvekangasmaiseksi. On myös mahdollista, että tuhkalannoitus laskee dityppioksidin osuutta denitrifikaatiossa (muodostuu suhteessa enemmän typpikaasua). Leppiniemen lannoittamattoman koekalan N_2O -päästö lienee vuodessa typeksi laskettuna $0,7$ - $1,0\ \text{kg}$ hehtaarilta. Aiemmissä tutkimuksissa ravinteikkaat ojitetut suot ovat olleet N_2O :n lähteitä, päästö on ollut $0,5$ - $1,3\ \text{kg}\ N_2O\text{-N}\ \text{ha/vuosi}$ (Martikainen et al. 1993).

Yleistäen voidaan todeta, että turvemaiilla tuhkalannoituksen mahdollinen typen mineralisaatiota lisäävä vaikutus ei heijastunut vahvasti N_2O -päästöön. Ainoastaan suursaraisella Varissaaren koalueella tuhka oli hieman lisännyt dityppioksidin päästöä. Kaikilla kangaskoaloilla dityppioksidipäästöt olivat pieniä eivätkä juurikaan lisääntyneet tuhkan käytön seurauksena.

Dityppioksidipäästöissä tiedetään olevan huomattavaa ajallista vaihtelua. Vanhoilla turvekoaloilla dityppioksidin emissiot kasvoivat syksyä kohti. Keväällä roudan sulamisen yhteyteen on havaittu liittyvän hetkellinen suuri N_2O -päästö, ns. kevätpiikki. Sitä ei tässä tutkimuksessa voitu todeta mittausvälin pituuden vuoksi. Myös talvella turvemaan dityppioksidipäästöt voivat olla yli puolet koko vuoden N_2O -päästöstä (Alm 1999). Tässä tutkimuksessa päästöt mitattiin vain kesäkuukausien aikana.

TAULUKKO 3 Dityppioksidin, hiilidioksidin ja metaanin päästöt tuhka-lannoitetuilta ja lannoittamattomilta koelaitoilta kesällä 1997 ja 1998 (Metlan Muhoksen koalat). Kesän keskiarvot, standardipoikkeamat (S.E.), ja erillisten mittausten määrät. Tähdet tarkoittavat tilastollisesti merkitsevää eroa tuhka- ja kontrollialojen välillä.

Paikka, (tuhkalisäys)		TUHKALANNOITUS			KONTROLLI		
		keskiarvo	S.E	n.	keskiarvo	S.E	n.
Leppiniemi (Rh-suo) (8000 kg)	$\mu\text{g N}_2\text{O m-2 vrk-1}$	193	53	16	703	219	16
	$\text{mg CO}_2 \text{ m-2 t-1}$	357	41	16	288	27	16
	$\text{mg CH}_4 \text{ m-2 vrk-1}$	-1,35	0,27	16	23,01	11,4	16 ***
	maan lämpö -10 cm °C	7,53	1,7	16	11,85	0,78	16
Varissaari (Ss-suo) (5000 kg)	$\mu\text{g N}_2\text{O m-2 vrk-1}$	197	91	12	47	20	12
	$\text{mg CO}_2 \text{ m-2 t-1}$	509	66	12	392	32	12 *
	$\text{mg CH}_4 \text{ m-2 vrk-1}$	-0,05	0,87	12	0,26	0,7	12
	maan lämpö -10 cm °C	6,98	1,52	12	7,98	1,39	12
Oisava (Tn-suo) (4000 kg)	$\mu\text{g N}_2\text{O m-2 vrk-1}$	111	109	12	39	33	12
	$\text{mg CO}_2 \text{ m-2 t-1}$	400	26	12	293	31	12 *
	$\text{mg CH}_4 \text{ m-2 vrk-1}$	2,22	0,49	12	3,72	0,8	12
	maan lämpö -10 cm °C	10,2	1,23	12	11,25	0,96	12
Kylmä (CT-kangas) (5000 kg)	$\text{g N}_2\text{O m-2 vrk-1}$	70	40	12	45	12	12
	$\text{mg CO}_2 \text{ m-2 t-1}$	244	22	12	215	18	12
	$\text{mg CH}_4 \text{ m-2 vrk-1}$	-1,69	0,12	12	-0,63	0,14	12 ***
	maan lämpö -10 cm °C	13,37	1,29	12	13,85	1,02	12
Paljakka (MT-kangas) (10000 kg)	$\mu\text{g N}_2\text{O m-2 vrk-1}$	53	23	12	81	46	12
	$\text{mg CO}_2 \text{ m-2 t-1}$	272	27	12	215	22	12
	$\text{mg CH}_4 \text{ m-2 vrk-1}$	-0,33	0,15	12	-0,44	0,13	12
	maan lämpö -10 cm °C	9,52	0,41	12	8,08	1,41	12
Pelso 1, Resula (TR-suo) (5000 kg)	$\mu\text{g N}_2\text{O m-2 vrk-1}$	14	40	12	89	95	12
	$\text{mg CO}_2 \text{ m-2 t-1}$	358	30	12	252	19	12 **
	$\text{mg CH}_4 \text{ m-2 vrk-1}$	9,83	2,29	12	1,66	0,36	12 ***
	maan lämpö -5 cm °C	11,43	0,60	9	11,46	0,31	10
	pohjaveden korkeus	13,33	1,55	12	18,33	1,12	12
Pelso 2 (VRiN-suo) (5000 kg)	$\mu\text{g N}_2\text{O m-2 vrk-1}$	5676	1427	12	3901	957	12
	$\text{mg CO}_2 \text{ m-2 t-1}$	395	33	12	410	46	12
	$\text{mg CH}_4 \text{ m-2 vrk-1}$	-0,84	0,14	12	-1,51	0,21	12 *
	maan lämpö -5 cm °C	12,48	0,51	10	12,19	0,41	10
	pohjaveden korkeus	55,00	2,22	12	59,17	3,07	12
Sadinselkä (VMT- kangas) (3000 kg)	$\mu\text{g N}_2\text{O m-2 vrk-1}$	-48	43	12	-47	42	12
	$\text{mg CO}_2 \text{ m-2 t-1}$	481	36	12	502	24	12
	$\text{mg CH}_4 \text{ m-2 vrk-1}$	-0,73	0,12	12	-0,8	0,16	12
	maan lämpö -5 cm °C	11,03	0,40	12	10,72	0,52	12
Lummelampi 1 (CIT-ECT-kangas) (3000 kg)	$\mu\text{g N}_2\text{O m-2 vrk-1}$	8	31	12	-24,22	46,77	12
	$\text{mg CO}_2 \text{ m-2 t-1}$	386	45	12	429	48	12
	$\text{mg CH}_4 \text{ m-2 vrk-1}$	-0,8	0,09	12	-1,4	0,13	12 **
	maan lämpö -5 cm °C	11,91	0,38	10	12,62	0,37	10
Lummelampi 2 (ECT-kangas) (3000 kg)	$\mu\text{g N}_2\text{O m-2 vrk-1}$	62	27	12	76	32	12
	$\text{mg CO}_2 \text{ m-2 t-1}$	411	31	12	403	42	12
	$\text{mg CH}_4 \text{ m-2 vrk}$	-1,16	0,14	1	-1,3	0,09	12
	maan lämpö -5 cm °C	11,21	0,42	10	10,92	0,74	10
Lummelampi 2 (ECT-kangas) (3000 kg + Cd oksidi)	$\mu\text{g N}_2\text{O m-2 vrk-1}$	-34	34	12			
	$\text{mg CO}_2 \text{ m-2 t-1}$	400	33	12			
	$\text{mg CH}_4 \text{ m-2 vrk}$	-1,45	0,1	12			
	maan lämpö -5 cm °C	11,21	0,63	10			

Tuhkan sisältämällä kadmiumilla ei näyttänyt olevan merkittävää vaikutusta N₂O-päästöön Lummelammen kuivalla kankaalla (kuva 2). Tuhkan mukana kadmiumia saanut alue oli alkukesän mittauksessa jopa heikko dityppioksidin nielu (otto ilmasta maaperään < 100 µg vuorokaudessa).

3.2 Metaani

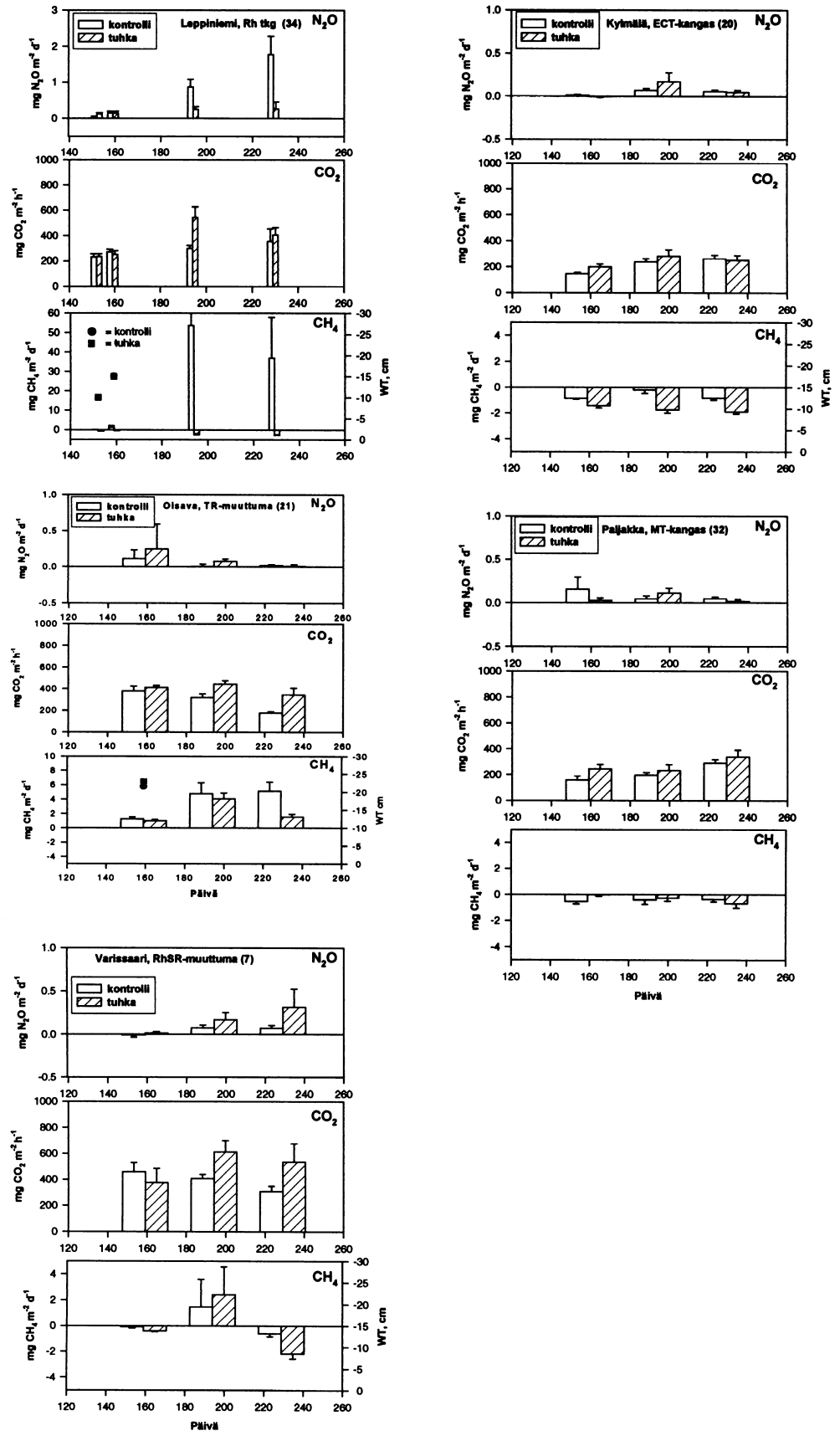
Vanhoista tuhka-alueista Leppiniemen lannoittamaton (alkujaan ruohoinen neva) sekä Oisavan lannoittamaton ja lannoitettu koealue (tupasvillaräme) olivat metaanin lähteitä, muut kohteet puolestaan toimivat metaanin nieluina. Leppiniemen ja Oisavan metaanipäästöt olivat verrattavissa ombrotrofisten soiden metaaniemissioihin (Nykänen ym. 1998). Vanhoilla koealueilla tuhkalannoitus joko hieman vähensi metaanipäästöä tai lisäsi metaanin nielua (taulukko 3, kuva 1).

Uusista koealueista Pelson karu räme oli metaanin lähde, muut alueet olivat metaanin nieluja. Tällä Pelson karulla rämeellä metaanipäästöt olivat tuhkalannoitetulla alueella huomattavasti korkeammat - viisinkertaiset - kuin kontrollialueella. Pohjaveden taso oli tuhkalannoitetulla alueella kuitenkin 5 - 9 cm korkeammalla kuin kontrollialueella, mikä saattoi edistää metaanipäästöä (Nykänen ym. 1998). Uusilla koealueilla, jotka olivat karulla kankaalla ja ruohoisella rämeellä, tuhkalannoitus oli laskenut metaanin nielua. Sama suuntaus oli nähtävissä myös tuoreella kankaalla ja kuivalla kankaalla vaikkakaan koejäsenet eivät poikenneet tilastollisesti.

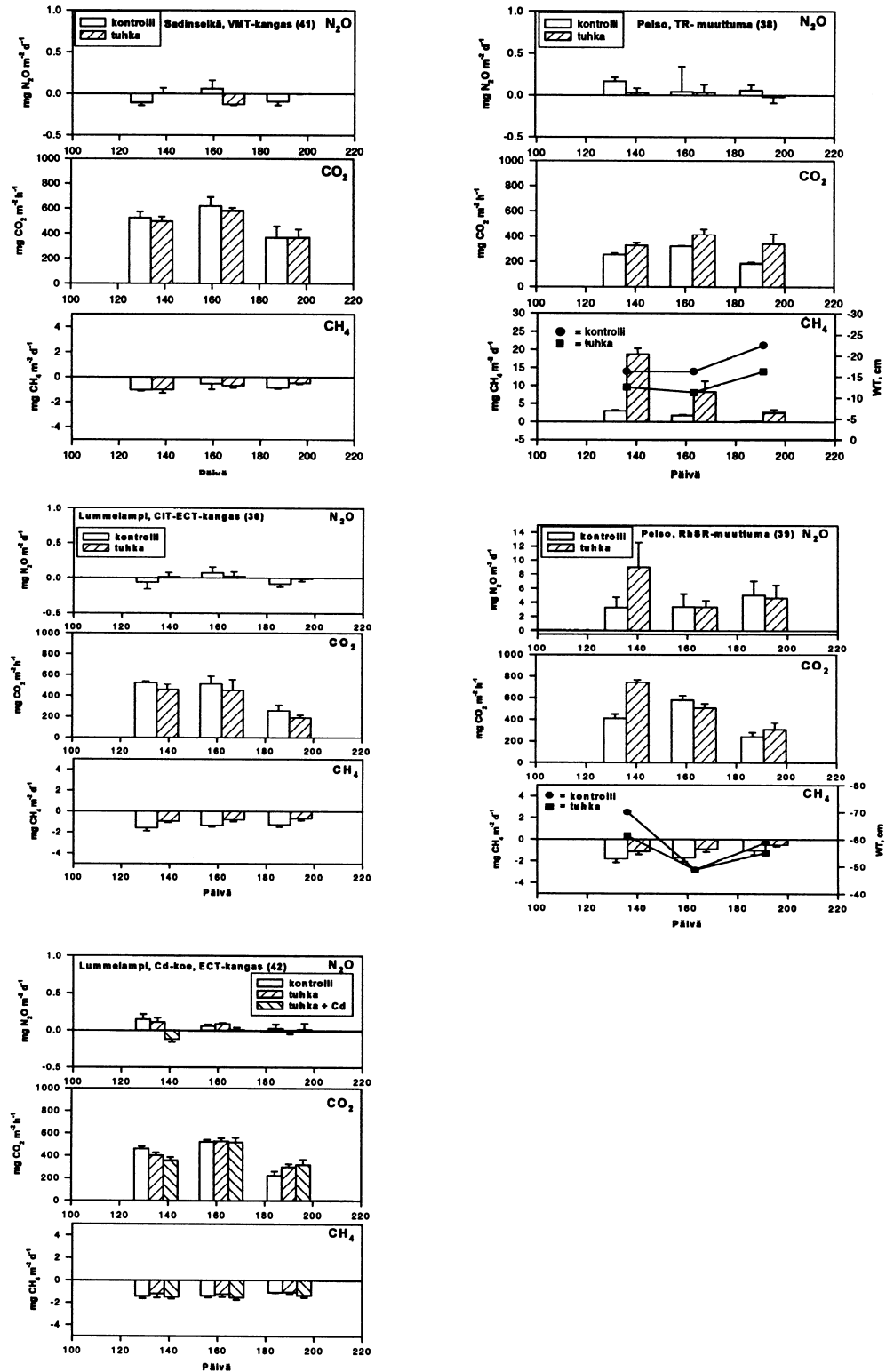
Tuhkalannoitus saattaisi siis joissakin tapauksissa laskea kangasmaiden metaanin nielua heti lannoituksen jälkeen. Jos näin on, vaikutus lakkaa vuosien myötä, sillä vanhoilla koealueilla ei ollut viitteitä tuhkan metaanin nielua laskevasta vaikutuksesta. Maaperän pH: noston vaikutukset metaania hapettavien mikrobien toimintaan ovat osittain ristiriitaisia. Kalkitus on eräissä tutkimuksissa lisännyt metaanin hapetusta metsämaassa (Saari ym. 1997). Merkittävä havainto oli, että tuhkan sisältämällä kadmiumilla ei ollut ainakaan välitöntä vaikutusta kangasmaan metaania hapettavien mikrobien toimintaan (kuva 2). Metaanin hapetus tapahtuu lähes yksinomaan mineraalimaassa (Saari ym. 1997), joten on mahdollista, että Cd ei vielä ollut tunkeutunut metaania hapettavaan maakerrokseen.

3.3 Hiilidioksidi

Pimeällä kammiolla mitattu hiilidioksidin päästö oli ojitetuilla turvemaidella suurempi kuin kangasmailla (taulukko 3, kuva 1). Päästöön kuuluu mineralisaatiossa vapautuva CO₂, kasvien juurten hengitys ja kasvien pimeärespiraatio. Tuhkalannoitus lisäsi hiilidioksidin päästöä kaikilla vanhoilla koealueilla (12 - 36 %), näin sekä turve- että mineraalimaidella (taulukko 3). Uusista tuhkalannoitusalueista vain Pelson karulla rämeellä tuhka oli lisännyt



Kuva 1. Dityppioksidin, hiilidioksidin ja metaanin dynamiikka ja pohjaveden korkeus eri mittauskerroilla kesällä 1997 Metsäntutkimuslaitoksen ns. vanhoissa tuhkalannoituskokeissa. Kokeen numero sulkeissa.



Kuva 2. Dityppioksidin, hiilidioksidin ja metaanin dynamiikka ja pohjaveden korkeus eri mittauskerroilla kesällä 1998 Metsäntutkimuslaitoksen tuhkalannoituskokeissa, jotka oli perustettu 1997. Kokeen numero sulkeissa.

hiilidioksidipäästöä (30 %). Tuhkalannoituksen vaikutus kaikilla uusilla koe-alueilla ei ilmeisesti vielä ole näkyvissä. Tulokset viittaavat tuhkan lisäävän orgaanisen aineksen hajotusta (vrt. Silvola ym. 1985). Koska hiilidioksidipäästön lämpötilariippuvuus on suuri, tuhkan vaikutusta korostaa vielä se, että Paljakan kangaskohdetta lukuun ottamatta maan lämpötila oli vanhoilla tuhka-aloilla mittaushetkellä alempi kuin vertailualueilla. Uusilla alueilla ei lämpötiloissa ollut merkittäviä eroja. Kun tässä työssä tuhkalannoitettu ja tuhkalannoittamaton pari mitattiin 3 tunnin kuluessa, ovat tuhkalannoitetun ja lannoittamattoman parin erot seurausta käsiteltyjen alueiden muuttuneesta lämpötilaloudesta, tulos ei selity mittaustilanteiden lämpötilaeroilla. Maaperän alempi lämpötila siis osittain kompensoi tuhkan vaikutusta turvemailla, tuhka lisäisi CO₂-päästöä vielä enemmän mikäli lämpötilat eivät muuttuisi. Lämpötilan lasku ojitetuilla, puustoisilla turvemailla on kytköksissä puuston kehittymiseen ja voimistuneeseen vesipinnan laskuun (Hökkä ym. 1997).

Tuhkan sisältämällä kadmiumilla ei ollut merkittävää vaikutusta CO₂-päästöön ensimmäisen tuhkalannoitusvuoden jälkeen Lummelammen kuivalla kankaalla (kuva 2). Pitempiaikaista vaikutusta ei luonnollisesti saatu selville. Hiilidioksin tuotto liittyy maaperän hajottajamikrobien aktiivisuuteen ja tiedetään, että raskasmetallit voivat laskea metsämaan mikrobiaktiivisuutta.

3.4 Maaperäanalyysit

Maa-analyysien tulokset on esitetty taulukossa 4. Tuhkalannoitus on kohottanut maan pH:ta sekä turve- että mineraalimaissa. Muutos on voimakkain pintamaannoksessa. Tuhka on myös kohottanut, erityisesti pintamaannoksessa, Ca-, Mg-, K- ja P-pitoisuuksia. Tuhkapitoisuustulokset paljastavat, että osissa mineraalimaista orgaaninen kerros on ollut hyvin ohut, siihen on sekoittunut huomattava määrä mineraalimaata näytteenotossa.

TAULUKKO 4 Maaperäanalyysit koelaitoilta (tulokset Metlasta).

	Näyte	Tuhka (%)	N (%)	P mg/g	K mg/g	Ca mg/g	Mg mg/g	B mg/kg	PH 1/2,5	Johto- luku μS/cm	Kuivap/ Tuorep%
Leppiniemi Rh-suo Kontrolli	0-10 cm	9,2	2,36	1,16	0,32	1,40	0,27	1,5	3,9	198	
	10-20 cm	9,5	3,09	1,22	1,12	1,46	0,14	1,0	4,3	124	
	20-30 cm	4,7	2,84	1,05	0,07	1,99	0,17	1,0	4,3	74	
Leppiniemi Rh-suo Tuhka	0-10 cm	17,1	2,50	1,43	0,43	5,68	0,62	3,2	5,1	427	
	10-20 cm	10,9	3,21	1,31	0,18	3,47	0,36	1,5	5,0	178	
	20-30 cm	5,5	3,00	1,01	0,07	2,58	0,27	1,2	4,4	91	
Varissaari Ss-räme Kontrolli	0-10 cm	5,3	2,29	1,34	0,49	2,03	0,43	1,5	3,9	294	17,2
	10-20 cm	3,4	2,15	0,93	0,13	2,72	0,50	1,3	4,1	225	19,1
	20-30 cm	4,1	2,13	0,97	0,11	2,85	0,52	1,1	4,3	206	19,4
	30-40 cm	12,6	1,67	0,72	0,19	2,61	0,55	0,9	4,4	202	22,2
Varissaari Ss-räme Tuhka	0-10 cm	11,6	2,14	1,55	0,54	7,13	0,84	2,6	4,6	367	19,6
	10-20 cm	4,7	2,28	1,12	0,29	3,06	0,65	1,4	4,1	248	20,7
	20-30 cm	4,6	2,36	1,02	0,10	3,22	0,67	1,3	4,2	274	18,9
	30-40 cm	20,6	1,90	1,24	0,25	2,86	0,65	0,7	4,3	238	21,6
Oisava Tn-neva Kontrolli	0-10 cm	1,8	0,95	0,61	0,42	1,31	0,61	1,7	3,5	189	7,7
	10-20 cm	2,1	0,99	0,62	0,23	1,10	0,50	1,6	3,4	232	6,8
Oisava Tn-neva Tuhka	0-10 cm	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	Nd	nd
	10-20 cm	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	Nd	nd
Pajjakka MT-kangas Kontrolli	humus	16,5	1,24	1,22	0,69	1,08	0,49	1,8	3,6	321	12,9
	kiv.maa	92,6	0,13	0,21	0,69	0,05	0,18	0,7	4,0	104	68,4
Pajjakka MT-kangas Tuhka	humus	26,4	1,10	1,27	1,01	0,99	0,29	1,7	3,5	372	16,0
	kiv.maa	93,5	0,11	0,23	0,73	0,06	0,16	0,6	3,9	122	71,6
Kylmäla CT-kangas Kontrolli	humus	73,72	0,45	0,27	0,47	1,51	0,31	0,61	3,63	263	
	0-10 cm	98,07	0,03	0,21	0,45	1,67	0,47	0,66	4,51	86	
	10-20 cm	98,79	0,02	0,39	0,58	2,03	0,74	1,29	4,94	86	
Kylmäla CT-kangas Tuhka	humus	79,89	0,25	0,98	0,70	10,55	0,76	12,93	6,11	552	
	0-10 cm	98,27	0,05	0,23	0,55	2,15	0,56	1,11	5,5	48	
	10-20 cm	98,83	0,03	nd	nd	nd	nd	nd	5,93	334	
Pelso 1 TR-räme Kontrolli	0-10	2,19	1,36	0,79	0,47	1,14	0,26	0,81	3,56	195	
	10-20	1,93	1,86	0,69	0,14	0,88	0,12	nd	3,6	176	
	20-30	1,42	2,03	0,52	nd	0,70	0,70	nd	3,73	110	
Pelso 1 TR-räme Tuhka	0-10 cm	4,6	1,76	1,02	0,55	5,83	0,49	3,0	4,2	214	11,4
	10-20 cm	2,4	2,30	0,76	0,22	1,19	0,13	1,4	3,7	202	18,4
	20-30 cm	2,2	2,19	0,59	0,09	1,08	0,09	1,3	3,7	152	19,9
Pelso 2 VRiN-räme Kontrolli	0-10 cm	14,01	2,88	0,79	0,32	1,25	0,27	1,81	3,7	276	
	10-20 cm	9,39	3,09	0,62	0,11	0,89	0,09	1,81	3,81	130	
	20-30 cm	5,33	2,47	0,56	0,07	1,84	0,14	0,77	4,05	117	
Pelso 2 VRiN-räme Tuhka	0-10 cm	15,3	2,82	1,10	0,43	5,88	0,89	3,5	4,8	332	23,1
	10-20 cm	9,0	3,18	0,73	0,20	1,00	0,14	1,4	4,0	173	22,7
	20-30 cm	4,9	2,51	0,70	0,19	1,88	0,17	1,7	4,1	201	20,9
Lummelampi Clt-ECT-kangas Kontrolli	humus	76,8	0,36	0,27	0,25	0,41	0,13	1,2	3,6	240	36,9
	kiv.maa	98,8	0,02	0,24	0,20	0,09	0,18	0,6	4,4	57	89,8
	kiv.maa 10-20	99,4	0,01	0,31	0,17	0,10	0,24	0,7	4,7	30	93,9
Muhos Lummelampi Tuhka	humus	84,2	0,16	0,21	0,16	1,23	0,13	1,5	4,5	281	45,9
	0-10 cm	98,7	0,02	0,21	0,19	0,09	0,15	0,8	4,5	56	89,8
	10-20 cm	99,5	0,01	0,31	0,19	0,13	0,21	0,6	4,7	50	93,5

3.5 Maaperäominaisuuksien liittyminen kaasuvirtoihin

Koska kaikkia maaperänäytteiden analyysyjä ei ollut käytettävissä, kaasupäästöjen ja maaperäominaisuuksien väliset korrelaatiot laskettiin eri kasvu- paikkojen kaikista koealoista yhdessä (taulukko 5). Maaperäominaisuuksista typpipitoisuus, kalsium ja johtoluku korreloivat positiivisesti N₂O-päästön kanssa. Metaanipäästön ja kalsiumin pitoisuuden välillä oli myös positiivinen korrelaatio. Kuivapainolla ja metaanipäästöllä oli negatiivinen korrelaatio, eli mitä kuivempi maa sen pienempi metaanipäästö.

TAULUKKO 5 Maaperäominaisuuksien ja kaasupäästöjen väliset korrelaatiot. Taulukossa esitetty Pearsonin korrelaatiokertoimet ja niiden tilastollinen merkitsevyys.

	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	N	P	K	Ca	Mg	B	pH	KP
CO ₂	-0,17										
N ₂ O	0,04	-0,21									
N	0,23	0,44	0,74***								
P	0,32	0,56*	0,42	0,85***							
K	0,05	-0,45	-0,10	-0,04	-0,03						
Ca	0,08	0,47	0,33	0,57	0,75***	0,15					
Mg	-0,04	0,31	0,37	0,43	0,58*	0,14	0,85***				
B	0,11	0,52*	0,52	0,74	0,77***	-0,00	0,91***	0,77***			
PH	-0,55*	0,21	-0,03	-0,17	0,03	-0,14	0,44	0,45	0,29		
KP	-0,71*	-0,19	-0,39	-0,79*	-0,81***	-0,27	-0,71**	-0,81**	-0,78**	0,18	
Johtoluku	-0,07	0,33	0,51	0,85***	0,78***	0,24	0,63**	0,49	0,70***	-0,11	-0,66

KIRJALLISUUS

- Alm J., Saarnio S., Nykänen H., Silvola J. ja Martikainen P.** 1999. Winter CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands. *Biogeochemistry* 44:163-186.
- Hökkä, H., T. Penttilä ja M. Siipola** 1997. Relationships between groundwater level and temperature in peat, Chapter 20: 287-296, in *Northern Forested Wetlands: Ecology and management*, eds. C.C. Trettin, M. Jurgenson, D. Grigal, M. Gale and J. Jeglum. Lewis Publishers, New York, 1997.
- Martikainen P.J., Nykänen H., Lång K. ja Ferm A.** 1994. Kasvihuonekaasujen päästöt turkistarhojen lähimetsissä. Julkaisussa: Suomen metsien kunto: metsien terveydentilan tutkimusohjelman väliraportti (toim. E. Mälkönen, H. Sivula). *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 527: 212-223.
- Martikainen P.J., Nykänen H., Crill P. ja Silvola J.** 1993. Effect of a lowered water table on nitrous oxide fluxes from northern peatlands. *Nature* 366 (4): 51-53.
- Martikainen P.J., Nykänen H., Alm J. ja Silvola J.** 1995. Changes in fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide due to forest drainage of mire sites of different trophy. *Plant and Soil* 168/169: 571-577.
- Nykänen H., J. Alm, K. Lång, J. Silvola ja P. J. Martikainen** 1995: Emissions of CH₄, N₂O and CO₂ from a virgin fen and a fen drained for grassland in Finland. *Journal of Biogeography* 22: 351- 357.
- Nykänen H., Alm J., Silvola J., Tolonen K. ja Martikainen P.J.** 1998 Methane fluxes on boreal peatlands of different fertility and the effect of longterm experimental lowering of the water table on flux rates. *Global Biogeochemical Cycles*. 12: 53-69.
- Regina K., Nykänen H., Silvola J. ja Martikainen P.J.** 1996. Fluxes of nitrous oxide from boreal peatlands as affected by peatland type, water table level and nitrification capacity of the peat. *Biogeochemistry* 35: 401-418.
- Saari A., Martikainen P.J., Ferm A., Ruuskanen J., De Boer W., Troelstra S.R. ja Laanbroek H.J.** 1997. Methane oxidation in soil profiles of Dutch and Finnish coniferous forests with different soil texture and atmospheric nitrogen deposition. *Soil Biology & Biochemistry* 29:1625-1632.

- Silvola J., Välijoki J. ja Aaltonen H.** 1985. Effect of draining and fertilization on soil respiration at three ameliorated peatland sites. Acta. For. Fennica 191: 1-32.
- Silvola J., Alm J., Ahlholm U., Nykänen H. ja Martikainen P.J.** 1996. CO₂ fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture conditions. J. Ecol. 84: 219-228.
- Stuedler, P.A., Bowden R.D., Melillo J.M ja Aber J.D.** 1989. Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soil. Nature 341: 314-316.