

# Effekter på metanoxidation och lustgasproduktion efter kvävegödsling

Olle Rosenberg

**Omslag:****Ämnesord:** Metanoxidation, kvävegödsling, lustgasemission.

---

**SkogForsk – Stiftelsen Skogsbrukets Forskningsinstitut**

SkogForsk arbetar för ett långsiktigt, lönsamt skogsbruk på ekologisk grund. Bakom SkogForsk står skogsbolag, skogsägareföreningar, stift, gods, allmänningar, plantskolor, SkogsMaskinFöretagarna m.fl., som betalar årliga intressentbidrag. Hela skogsbruket bidrar dessutom till finansieringen genom en avgift på virke som avverkas i Sverige. Verksamheten finansieras vidare av staten enligt särskilt avtal och av fonder som ger projektbundet stöd.

SkogForsk arbetar med forskning och utveckling med fokus på tre centrala frågeställningar: Skogsodlingsmaterial, Skogsskötsel samt Råvaruutnyttjande och produktions-effektivitet. På de områden där SkogForsk har särskild kompetens utförs även i stor omfattning uppdrag åt skogsföretag, maskintillverkare och myndigheter.

---

Serien **Arbetsrapport** dokumenterar långliggande försök samt inventeringar, studier m.m. och distribueras enbart efter särskild beställning.

Forsknings- och försöksresultat från SkogForsk publiceras i följande serier:

**SkogForsk-Nytt:** Nyheter, sammanfattningar, översikter.

**Resultat:** Slutsatser och rekommendationer i lättillgänglig form.

**Redogörelse:** Utförlig redovisning av genomfört forskningsarbete.

**Report:** Vetenskapligt inriktad serie (på engelska).

**Handledningar:** Anvisningar för hur olika arbeten lämpligen utförs.

---

ISSN 1404-305X

# Innehåll

Bakgrund .....	3
Gödsingspåverkan.....	3
Faktorer förutom gödsel som påverkar CH <sub>4</sub> -oxidationen .....	5
Slutsats metan .....	6
Bakgrund .....	6
Gödslingspåverkan.....	7
Faktorer förutom gödsel som påverkar N <sub>2</sub> O-emissionen.....	7
Slutsats lustgas .....	8
Slutsats av studien .....	8
Referenser.....	8



# Metan

## Bakgrund

Skogliga åtgärders inverkan på växthusgaser har under en längre tid haft relativt hög prioritet. Nohrstedt & Westling (1995) skriver att N-gödsling haft positiva effekter på CO<sub>2</sub>-flödena, d.v.s. mindre CO<sub>2</sub> kommer upp i atmosfären. Denna positiva effekt kan gå förlorad om CH<sub>4</sub>-oxidationen minskar och N<sub>2</sub>O-emissionerna ökar efter N-gödsling eftersom dessa gaser är betydligt potentare växthusgaser än CO<sub>2</sub>. Ett problem i sammanhanget är att forskningen om CH<sub>4</sub>-oxidation har till stor del styrts av vad kvävedepositionen (luftföroreningar) har för effekter snarare än N-gödsling. Till följd av detta har främst (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> och olika NO<sub>3</sub>-föreningar använts som gödselmedel (t.ex. Butterbach-Bahl et al. 1998; Bradford et al. 2001b). Även NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (AN) och urea (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) har använts för att studera effekter på CH<sub>4</sub>-oxidation av N-tillförsel både i skog och på åkermark (t.ex. Steudler et al. 1989; Dunfield et al. 1995; Klemmedtsson et al. 1999). I flera studier har dock gödselmedlet applicerats i stor mängd vid ett och samma tillfälle på samma sätt som vid vanlig gödsling (t.ex. Bradford et al. 2001a; Steinkamp et al. 2001). CH<sub>4</sub> bildas i blöta biotoper vid anaerob (syrefri) nedbrytning av organiskt material och transporteras upp i atmosfären. I friska och torra skogsmarker kan atmosfäriskt CH<sub>4</sub> diffundera ner i marken, i denna rapport kallad upptag. Medan förbrukningen av CH<sub>4</sub> går under benämningen CH<sub>4</sub>-oxidation.

Flera nordamerikanska studier har visat att N-gödsling kortsiktigt hämmar CH<sub>4</sub>-oxidationen. Den här litteraturstudien behandlar skogsgödslingens effekter på CH<sub>4</sub>-oxidationen samt hur långvariga dessa effekter kan vara. Dock är det bara Börjesson och Nohrstedt (1998 och 2000) som undersökt effekterna av Skog-CAN på CH<sub>4</sub>-oxidationen. Skog-CAN är i dag det enda gödselmedel som används i praktiskt skogsbruk och innehåller förutom AN också bl.a. Ca, Mg, och B.

Litteratursökningar har gjorts i internationella databaser (CAB, Agris, Agricola, Biological abstracts och TREE).

## Gödsingspåverkan

Många av studierna visar att N-tillförsel både i form av gödsel och genom atmosfärisk deposition hämmar CH<sub>4</sub>-oxidationen (t.ex. Steudler et al. 1989; Mosier et al. 1991; Bronson & Mosier 1994; Castro et al. 1994; Castro et al. 1995; Willison et al. 1995; Sitaula et al. 1995b; Sitaula et al. 2000; Steinkamp et al. 2001). Dock fann Hütsch et al. (1993) ingen hämning av CH<sub>4</sub>-oxidationen efter någon enstaka N-giva, däremot uppstod en påverkan vid långvariga behandlingar (>7 år). Inhiberingen kan finnas kvar från dagar (t.ex. Nesbit & Breitenbeck 1992; Whalen 2000; Steinkamp et al. 2001; Kravchenko et al., 2002) till år efter gödslingstillfället (Mosier et al. 1991). Kortvarig inhibering kan bero på att marken har hög immobiliseringskapacitet (Steinkamp et al. 2001). Börjesson och Nohrstedt (2000) skriver att utlakning av kväve kan vara en förklaring till minskad inhibering.

Förutom de undersökningar som påvisat effekter finns också ett flertal undersökningar som inte påvisat någon förändring i CH<sub>4</sub>-oxidation efter kvävegödsling (t.ex. Dunfield et al. 1995; Gulledge et al., 1997; Whalen & Reeburgh, 2000; Glatzel & Stahr, 2001). Hög katjonutbyteskapacitet, vilken medför att NH<sub>4</sub><sup>+</sup> binds till markens utbytesplatser kan ha betydelse (Dunfield et al., 1995; De Vischer et al., 1999; Kravchenko et al., 2002). Enligt Bradford et al. (2001a) kan den medföljande SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-anjonen i (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> motverka hämningseffekten av NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Detta överensstämmer med Adamsen & King (1993) som fann att NH<sub>4</sub>Cl hade större inhiberande effekt än (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. I marker med mycket nitrifikation är CH<sub>4</sub>-oxidationen liten p.g.a. att CH<sub>4</sub>-oxidationen huvudsakligen utförs av nitrifierare (Castro et al., 1995). Whalen & Reeburgh (2000) skriver att okänslighet mot NH<sub>4</sub>-N i boreal skog kan bero på att metanotrofer och inte nitrifierare står för oxidationen av CH<sub>4</sub>. Enligt Gulledge et al. (1997) kan utebliven inhibering förklaras av NH<sub>3</sub>-okänsliga CH<sub>4</sub>-oxiderare.

Vissa studier tyder dock på att gödsling kan öka CH<sub>4</sub>-oxidationen (De Visscher et al., 1999; Klemedtsson et al., 1999; Rigler & Zechmeister-Boltenstern, 1999; Börjesson & Nohrstedt, 1998; Börjesson & Nohrstedt, 2000) och att detta kan bero på att marken från början varit näringsfattig eller haft ogynnsamt hög C/N-kvot (Rigler & Zechmeister-Boltenstern, 1999). Bender & Conrad (1995) skriver att låga halter NH<sub>4</sub><sup>+</sup> kan öka CH<sub>4</sub>-oxidationen, åtminstone under en kortare tid, eftersom N behövs för bakterietillväxt. Frånvaron av NH<sub>4</sub><sup>+</sup> kan verka inhiberande på CH<sub>4</sub>-oxidationen (Klemedtsson et al., 1999). Det måste tilläggas att Börjesson och Nohrstedt (2000) inte fick några signifikanta skillnader mellan gödslingsyta och kontroll, utan endast tendenser till minskning av CH<sub>4</sub>-oxidationen under den första tiden efter gödsling. Två år efter gödsling var tendensen i stället en ökad CH<sub>4</sub>-oxidation.

Det finns olika förslag till varför N-gödsel inhiberar CH<sub>4</sub>-oxidationen. Den vanligaste uppfattningen är att NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-jonen orsakar inhiberingen (t.ex. Nesbit & Breitenbeck, 1992; Bronson & Mosier, 1994; Willison et al., 1995). En annan uppfattning är att inhibering kan bero på ickespecifik salteffekt vid högre halter (Whalen et al., 2000). Vid låga pH-värden är NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-koncentrationen av mindre vikt, troligen p.g.a. av att det egentligen är NH<sub>3</sub> som verkar inhiberande på CH<sub>4</sub>-oxidationen (Bender & Conrad, 1995).

Årligen återkommande N-gödsling kan orsaka förändringar i mikrosamhället och det är troligen detta som orsakar negativa effekter på CH<sub>4</sub>-oxidationen (Adamsen & King, 1993; Willison et al., 1995; Hütsch, 1996). Förekomsten av NH<sub>4</sub><sup>+</sup> har gjort att NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-oxiderare utvecklats på bekostnad av CH<sub>4</sub>-oxiderare (Hütsch, 1996). Då årliga gödslingar huvudsakligen utförs på åkermark borde denna typ av effekt till största delen vara aktuell för just åkermark. Börjesson & Nohrstedt (2000) skriver till och med att icke kontinuerlig tillförsel av N-gödsel skulle kunna medföra högre CH<sub>4</sub>-oxidation i skogsjordar. Enligt Willison et al. (1997) påverkar markanvändningen i sig CH<sub>4</sub>-oxidationen. De fann att antalet CH<sub>4</sub>-oxiderande bakterier var betydligt högre i ogödslad skogsmark jämfört med ogödslad åkermark.

## Faktorer förutom gödsel som påverkar CH<sub>4</sub>-oxidationen

Det organiska skiktet hos skogsjordar fungerar som en diffusionsbarriär för atmosfäriskt CH<sub>4</sub> att nå mineraljorden där det mesta av CH<sub>4</sub>-oxidationen äger rum (t.ex. Saari et al. 1998). Enligt Gulledge & Schimel (2000) styrs CH<sub>4</sub>-oxidationen huvudsakligen genom diffusionen av CH<sub>4</sub> till jorden. I en inkubationsstudie fann Benstead & King (1997) att ökad CH<sub>4</sub>-koncentration i marken medför att hastigheten av CH<sub>4</sub>-oxidationen ökar. Dock ökade inte kapaciteten att oxidera CH<sub>4</sub>, vilket författarna anser bero på att någon annan faktor än tillgängligheten av CH<sub>4</sub> begränsar de bakterier som oxiderar atmosfäriskt CH<sub>4</sub>.

Katjonutbyteskapaciteten som nämnts tidigare kan vara av stor betydelse för vilka effekter som en N-gödsling eventuellt kan ge. Dock skriver Kravchenko et al. (2002) att det mikrobiella samhället och dess respons på N-gödsling kan ha en större betydelse. Whalen & Reeburgh (2000) skriver att markens känslighet för N-gödsling, vad gäller CH<sub>4</sub>-oxidation, kan bero på var i markhorisonten metanotroferna finns. I deras studie fanns den högsta CH<sub>4</sub>-oxidationshastigheten på mellan 10–20 cm djup. Saari et al. (1998) uppmätte den högsta CH<sub>4</sub>-oxidationen på mellan 8–13 cm djup och endast små förändringar i CH<sub>4</sub>-oxidation till följd av borttagande av det organiska skiktet. Gulledge et al. (1997) uppmätte den högsta CH<sub>4</sub>-oxidationen i 0–10 cm skiktet och konstaterade att oxidationen minskade med djupet. Swensen & Bakken (1999) konstaterade att CH<sub>4</sub> oxideras i mineraljord ned till minst 230 cm djup.

Amaral & Knowles (1997) fann att det måste finnas, en eller flera, andra faktorer än NH<sub>4</sub><sup>+</sup> i det organiska markskiktet som påverkar CH<sub>4</sub>-oxidationen eftersom organiska komponenter inhiberade åtminstone några av metanotroferna i skogsmark.

Andra faktorer som påverkar CH<sub>4</sub>-oxidation är markfuktighet och temperatur. Enligt Bowden et al. (1998) minskar CH<sub>4</sub>-oxidationen vid både för låg och för hög fuktighet. Saari et al. (1998) skriver dock att CH<sub>4</sub>-oxidationen i boreala tallskogar inte är känslig för låg vattenhalt. Vad gäller temperaturens inverkan på CH<sub>4</sub>-oxidationen anser Steinkamp et al. (2001) att den är viktigare för CH<sub>4</sub>-oxidationen än markfuktigheten vid marktemperaturer understigande 10°C. Castro et al. (1995) anger ett intervall mellan –5 och 10°C där marktemperaturen är av betydelse. I en undersökning av Gulledge & Schimel (2000) var CH<sub>4</sub>-oxidationen okänslig mot förändringar i temperatur och vattenhalt, däremot hade placeringen i landskapet stor betydelse. Även Maljanen et al. (2002) fann att CH<sub>4</sub>-oxidationen inte var så temperaturberoende. Castro et al. (1995) pekar på lokalens bördighet och textur som de viktigaste faktorerna som påverkar CH<sub>4</sub>-oxidation i skogsjordar. Boeckx et al. (1997) fann att jordar med grövre textur hade högre CH<sub>4</sub>-oxidationskapacitet jämfört med finkorniga jordar. Dessutom skriver de att texturen hade betydelse för hur känslig CH<sub>4</sub>-oxidationen var för torra.

Ytterligare en faktor som har betydelse för  $\text{CH}_4$ -oxidationshastigheten är pH som nämndes i tidigare avsnitt (Bender & Conrad, 1995). Enligt Gulledge et al. (1997) är det dock inte alltid som pH påverkar  $\text{NH}_4^+$ 's inhiberande effekt på  $\text{CH}_4$ -oxidationen.

Enligt Sitaula et al. (2000) verkar både gödsling och kompaktering under lång tid ha inhiberande effekt på markens potential att oxidera  $\text{CH}_4$ .

## Slutsats metan

Den stora variationen i resultat och förklaringsmodeller visar på svårigheter att dra några generella slutsatser om N-gödsling påverkar  $\text{CH}_4$ -oxidationen i marken. Ytterligare faktorer som försvårar jämförelser mellan olika studier är skillnader i gödselmedel samt att undersökningarna utförts i olika ekosystem och att även syftena med undersökningarna varit andra än att studera praktisk N-gödsling. De enda undersökningarna som nyttjat det för skogen vanligaste gödselmedlet, Skog-CAN, var Börjesson och Nohrstedt (1998, 2000), och de fann inga signifikanta skillnader av  $\text{CH}_4$ -oxidationen hos gödslade respektive ogödslade ytor. En slutsats Börjesson & Nohrstedt (2000) presenterade var att om N applicerades som en gödslingsgiva, till skillnad mot en nedfallssituation, skulle detta kunna ge en ökad  $\text{CH}_4$ -oxidation i skogsjordar. Denna slutsats verkar också stämma med andra undersökningar under förutsättning att marken är N-fattig och att gödslingen medför ökad mikrotillväxt. Dock verkar denna effekt vara tidsbegränsad (Bender & Conrad, 1995). Emellertid kommer N-gödslingen i många fall att orsaka en något ökad hämning av metanoxidationen direkt efter gödsling, men det mesta tyder på att inhiberingen är tillfällig.

För att få tillförlitliga data huruvida N-gödslingen påverkar  $\text{CH}_4$ -oxidationen på lång sikt behövs ytterligare studier, där uppföljningar av samma ytor bör göras under flera år. Faktorer som påverkar  $\text{CH}_4$ -oxidationen och som försvårar jämförelser mellan olika platser och vid olika tidpunkter är temperatur, fuktighet samt variationer hos det organiska skiktet. Detta medför att temperatur och fuktighet måste vara jämförbara mellan olika provtagningstidpunkter. Dessutom vid jämförelse av effekten av  $\text{NH}_4^+$  på  $\text{CH}_4$ -oxidation mellan olika lokaler måste även katjonutbyteskapacitet (CEC) vara jämförbar.

## Lustgas

### Bakgrund

Lustgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) bildas huvudsakligen genom denitrifikation, vilken är en anaerob (syrefri) process där  $\text{NO}_3^-$  reduceras till  $\text{N}_2$  eller  $\text{N}_2\text{O}$ . En viss del  $\text{N}_2\text{O}$  kan också bildas vid nitrifikation. Sitaula & Bakken (1993) fann i en laboratoriestudie att en tillsats av  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  till skogsjord orsakade en ökning av  $\text{N}_2\text{O}$ -emissionen. Dock kunde inte Nohrstedt (1988) uppmäta någon förhöjd  $\text{N}_2\text{O}$ -emission efter gödsling. Klemmedtsson et al. (1997) har efter kontinuerlig N-tillförsel konstaterat att  $\text{N}_2\text{O}$ -emissionen ökade, dock var ökningen mycket liten och ej signifikant. Denna litteraturstudie syftar till att klargöra effekterna av gödsling i skogsmark.



## Gödslingspåverkan

Butterbach-Bahl et al. (1998) uppmätte högre  $N_2O$ -emissioner till följd av hög N-deposition ( $20 \text{ kg NH}_4\text{-N}$  och  $10 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ ) och Dunfield et al. (1995) efter en gödsling med  $100 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ . Enligt De Vischer et al. (1998) ökar  $N_2O$ -emissionen efter tillförsel av  $\text{NH}_4^+$ . I en studie av Clayton et al. (1997) visas att  $N_2O$ -emissionen ökar direkt efter att gödslingsgivan men också att emissionen sjunker tillbaka ungefär till ursprungsnivån inom ca en månad (även något negativa flöden i slutet på varje gödslingsperiod),  $0,4 - 1,2 \%$  av tillfört  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  försvann genom  $N_2O$ -emission. Detta stöds av Romanovskaya (2001). Emellertid dröjde det ca 40 dagar innan en avmattning i  $N_2O$ -emissionen kunde observeras och 140 dagar innan bakgrundsvärdet uppnåddes. I en finsk studie av N-gödsling i skogsmark fann Sitaula et al. (1995a) att  $N_2O$  avgivningen kunde öka. Även Mosier et al. (1991) skriver att gödsling ger större  $N_2O$ -emissioner, och att detta orsakas av en hög N-omsättning oavsett om denna beror på gödsling eller är naturlig. Dock fann Glatzel och Stahr (2001) ingen signifikant förändring i  $N_2O$ -emission efter gödsling med olika preparat på vall/gräsmark i södra Tyskland. Detta anser författarna troligen berodde på snabb N-mineralisering och upptag. Upprepade gödslingar medför betydligt högre emissioner än engångsgivor (Chang et al., 1998).

## Faktorer förutom gödsel som påverkar $N_2O$ -emissionen

Enligt De Vischer et al. (1998) kan effekterna av  $\text{NH}_4^+$  på  $N_2O$  bildning bara jämföras mellan jordar med samma katjonutbyteskapacitet (CEC). Clayton et al. (1997) har en liknande uppfattning och skriver det är svårt att göra jämförelser med andra studier bland annat p.g.a. skillnader i markegenskaper. Enligt Kravchenko et al. (2002) är det mikrobiella samhället av större vikt för  $N_2O$ -emissioner än vad CEC är. Vidare skriver författarna att CEC inte hade någon effekt på  $N_2O$ -emissioner deras studie.

Carnol & Ineson (1999) fann att  $N_2O$ -emissionen var temperatur- och koncentrationsberoende. Vid låg temperatur och liten deposition var  $N_2O$ -flödena negativa, men över  $12^\circ\text{C}$  blev dock flödena positiva. Även markfuktighet har betydelse för  $N_2O$ -emissioner (Chang et al. 1998; Romanovskaya, 2001). Hög fuktighet, dålig luftning och lågt pH kan stimulera  $N_2O$ -emission både genom biokemiska och kemiska processer (Romanovskaya, 2001).

Vid tjällossning uppstår en topp i  $N_2O$ -emissionen endera p.g.a. att den fysiska barriär som islagret utgör försvinner eller till följd av denitrifikation under upptiningen (Teepe et al., 2001).

Enligt Maljanen et al. (2002) är frekvensen av mätningar en kritisk faktor för att med säkerhet bestämma  $N_2O$ -emissionen. Dessutom skriver de att mätningar bör ske både dag och natt eftersom  $N_2O$ -emissionen varierar. Mätningar under dagtid visade sig ge upp till 1,6 ggr så höga värden som mätningar under både dagen och natten.

## Slutsats lustgas

Flera studier anger en något förhöjd N<sub>2</sub>O-emission efter gödsling och att emissionen ökar med ökande giva. Dock verkar det som att denna effekt är snabbt övergående.

Då N-halten i marken kan ha stor betydelse för N<sub>2</sub>O-emissionen innebär detta att även markens förmåga att immobilisera kvävet har stor betydelse. I marker där i stort sett inget mineralkväve finns är risken för N<sub>2</sub>O-avgångar liten. Med andra ord borde N<sub>2</sub>O-emissioner från skogsmarker som behöver N-gödsel vara mycket små och snabbt övergående. Dock krävs ytterligare studier i skogsmark efter gödsling med Skog-CAN för att med större säkerhet kunna förutsäga följderna.

Vad det gäller tillförlitliga data, bör tillvägagångssättet för N<sub>2</sub>O-studier utföras på samma sätt som beskrivits för CH<sub>4</sub> och dessutom för att undvika överskattningar av N<sub>2</sub>O-emissioner bör mätningar utföras under både dagen och natten.

## Slutsats av studien

Eftersom N-gödsling av naturliga förekommer på N-fattiga marker är den preliminära slutsatsen att normal N-gödsling inte i någon nämnvärd omfattning kommer att påverka CH<sub>4</sub>-oxidation och N<sub>2</sub>O-bildning. Dock kommer N-gödsling troligen initialt att orsaka en något ökad inhibering av CH<sub>4</sub>-oxidationen, och en något förhöjd N<sub>2</sub>O-emission.

## Referenser

- Adamsen, A.P.S. & King, G.M. 1993. Methane consumption in temperate and subarctic forest soils: rates, vertical zonation, and responses to water and nitrogen. *Appl. Environ. Microbiol.* 59:485–490.
- Amaral, J.A. & Knowles, R. 1997. Inhibition of methane consumption in forest soils and pure cultures of methanotrophs by aqueous forest soil extracts. *Soil Biol. Biochem.* 29: 1713–1720.
- Bender, M. & Conrad, R. 1995. Effect of CH<sub>4</sub> concentrations and soil conditions on the induction of CH<sub>4</sub> oxidation activity. *Soil Biol. Biochem.* 27:1517–1527.
- Benstead, J. & King, G.M. 1997. Response of methanotrophic activity in forest soil to methane availability. *FEMS Microbiol. Ecol.* 23:333–340.
- Bowden, R.D., Newkirk, K.M. & Rullo, G.M. 1998. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions. *Soil Biol. Biochem.* 30:1591–1597.
- Bradford, M.A., Ineson, P., Wookey, P.A. & Lappin-Scott, H.M. 2001a. The effects of acid nitrogen and acid sulphur deposition on CH<sub>4</sub> oxidation in a forest soil: a laboratory study. *Soil Biol. Biochem.* 33:1695–1702.
- Bradford, M.A., Wookey, P.A., Ineson, P. & Lappin-Scott, H.M. 2001b. Controlling factors and effects of chronic nitrogen and sulphur deposition

- on methane oxidation in a temperate forest soil. *Soil Biol. Biochem.* 33:93–102.
- Boeckx, P., Van Cleemput, O. & Villaralvo, I. 1997. Methane oxidation in soils with different textures and land use. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 49:91–95.
- Bronson, K.F. & Mosier, A.R. 1994. Suppression of methane oxidation in aerobic soil by nitrogen fertilizers, nitrification inhibitors, and urease inhibitors. *Biol. Fertil. Soils* 17: 263–268.
- Butterbach-Bahl, K., Gasche, R., Huber, C.H., Kreuzer, K. & Papen, H. 1998. Impact of N-input by wet deposition on N-trace gas fluxes and CH<sub>4</sub>-oxidation in spruce forest ecosystems of the temperate zone in Europe. *Atmos. Environ.* 32:559–564.
- Börjesson, G. & Nohrstedt, H.-Ö. 1998. Short- and long-term effects of nitrogen fertilization on methane oxidation in three Swedish forest soils. *Biol. Fertil. Soils* 27: 113–118.
- Börjesson, G. & Nohrstedt, H.-Ö. 2000. Fast recovery of atmospheric methane consumption in Swedish forest soil after single-shot N-fertilization. *For. Ecol. Manage.* 134:83–88.
- Carnol, M. & Ineson, P. 1999. Environmental factors controlling NO<sub>3</sub>-leaching, N<sub>2</sub>O emissions and numbers of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> oxidisers in a coniferous forest soil. *Soil Biol. Biochem.*, 31:979–990.
- Castro, M.S., Peterjohn, W.T., Melillo, J.M., Steudler, P.A., Gholz, H.L. & Lewis, D. 1994. Effects of nitrogen fertilization on the fluxes of N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, and CO<sub>2</sub> from soils in a Florida slash pine plantation. *Can. J. For. Res.* 24:9–13.
- Castro, M.S., Steudler, P.A., Melillo, J.M., Aber, J.D. & Bowden, R.D. 1995. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils. *Global Biogeochem. Cycles* 9:1–10.
- Chang, C. Cho, C.M. & Janzen H.H. 1998. Nitrous oxide emission from long-term manured soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:677–682.
- Clayton, H., McTaggart, I.P., Parker, J., Swan, L. & Smith, K.A. 1997. Nitrous oxide emissions from fertilised grassland: A 2-year study of the effects of N-fertiliser form and environmental conditions. *Biol. Fertil. Soils* 25:252–260.
- De Visscher, A., Boeckx, P. & van Cleemput, O. 1998. Interaction between nitrous oxide formation and methane oxidation in soils: influence of cation exchange phenomena. *J. Environ. Qual.* 27:679–687.
- Dunfield, P.F., Topp, E., Archambault, C. & Knowles, R. 1995. Effect of nitrogen fertilizers and moisture content on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O flux in a humisol: Measurements in the field and intact soil cores. *Biogeochemistry* 29:199–222.
- Glatzel, S. & Stahr, K. 2001. Methane and nitrous oxide exchange in differently fertilised grassland in southern Germany. *Plant and Soil* 231: 21–35.
- Gulledge, J., Doyle, A.P. & Schimel, J.P. 1997. Different NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-inhibition patterns of soil CH<sub>4</sub> consumption: a result of distinct CH<sub>4</sub>-oxidizer populations across sites? *Soil Biol. Biochem.* 29:13–21.

- Gulledge, J. & Schimel, J.P. 2000. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of taiga forest stands in interior Alaska. *Ecosystems* 3:269–282.
- Hütsch, B.W., Webster, C.P. & Powlson, D.S. 1993. Long-term effects of nitrogen fertilization on methane oxidation in soil of the Broadbalk wheat experiment. *Soil Biol. Biochem.* 25:1307–1315.
- Klemedtsson, L., Klemedtsson, Å.K., Moldan, F. & Weslien, P. 1997. Nitrous oxide emission from Swedish forest soils in relation to liming and simulated increased N-deposition. *Biol. Fertil. Soils* 25:290–295.
- Klemedtsson, L., Jiang, Q., Klemedtsson, Å.K. & Bakken, L. 1999. Autotrophic ammonium-oxidising bacteria in Swedish mor humus. *Soil Biol. Biochem.* 31:839–847.
- Kravchenko, I., Boeckx, P., Galchenko, V. & Van Cleemput, O. 2002. Short- and medium-term effects of  $\text{NH}_4^+$  on  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes in arable soils with a different texture. *Soil Biol. Chem.* 34: 669–678.
- Maljanen, M., Martikainen, P.J, Aaltonen, H. & Silvola, J. 2002. Short-term variation in fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in cultivated and forested organic boreal soils. *Soil Biol. Biochem.* 34: 577–584.
- Mosier, A., Schimel, D., Valentine, D., Bronson, K. & Parton, W. 1991. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature* 350:330–332.
- Nesbit, S.P. & Breitenbeck, G.A. 1992. A laboratory study of factors influencing methane uptake by soils. *Agric. Ecosyst. Environ.* 41:39–54.
- Nohrstedt, H.-Ö. 1988. Effect of liming and N-fertilization on denitrification and  $\text{N}_2$ -fixation in an acid coniferous forest floor. *For. Ecol. Manage.* 24:1–13.
- Nohrstedt, H.-Ö. & Westling, O. 1995. Miljökonsekvensbeskrivning av STORA Skogs gödslingsprogram. Del 1, faktaunderlag. Institutet för Vatten- och Luftvårdsforskning, Rapport IVL B 1218. Aneboda. 90 s.
- Rigler, E. & Zechmeister-Boltenstern, S. 1999. Oxidation of ethylene and methane in forest soils- effect of  $\text{CO}_2$  and mineral nitrogen. *Geoderma* 90:147–159.
- Saari, A., Heiskanen, J. & Martikainen, P.J. 1998. Effect of the organic horizon on methane oxidation and uptake in soil of a boreal Scots pine forest. *FEMS Microbiol. Ecol.* 26:245–255.
- Swensen, B. & Bakken, L.R. 1999. Release of fossil methane from mineral soil particles, and its implication for estimation of methane oxidation in a mineral subsoil. *Biogeochemistry* 47:1–14.
- Romanovskaya, A.A, Gytarsky, M.L, Karaban, R.T, Konyushkov, D.E. & Nazarov, I.M. 2001. The dynamics of nitrous oxide emission from the use of mineral fertilizers in Russia. In optimizing nitrogenmanagement in food and energy production and environmental protection: Proceedings of the 2nd international nitrogen conference on science and policy. *TheScientificWorld* 1(S2):336–342.

- Sitaula, B.K. & Bakken, L.R. 1993. Nitrous oxide release from spruce forest soil: effect of N input and soil acidification. *Soil Biol. Biochem.* 25:1415–1421.
- Sitaula, B.K., Bakken, L.R. & Abrahamsen, G. 1995a. N-fertilization and soil acidification effects on N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emission from temperate pine forest soil. *Soil Biol. Biochem.* 27:1401–1408.
- Sitaula, B.K., Bakken, L.R. & Abrahamsen, G. 1995b. CH<sub>4</sub> uptake by temperate forest soil: effect of N input and soil acidification. *Soil Biol. Biochem.* 27:871–880.
- Sitaula, B.K., Hansen, S., Sitaula, J.I.B. & Bakken, L.R. 2000. Methane oxidation potentials and fluxes in agricultural soil: Effects of fertilisation and soil compaction. *Biogeochemistry* 48:323–339.
- Steinkamp, R., Butterbach-Bahl, K. & Papen, H. 2001. Methane oxidation by soils of an N-limited and N-fertilized spruce forest in the Black Forest, Germany. *Soil Biol. Biochem.* 33:145–153.
- Stuedler, P.A., Bowden, R.D., Melillo, J.M. & Aber, J.D. 1989. Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. *Nature* 341:314–316.
- Teepe, R., Brumme, R. & Beese, F. 2001. Nitrous oxide emissions from soil during freezing and thawing periods. *Soil Biol. Biochem.* 33:1269–1275.
- Whalen, S.C. 2000. Influence of N and non-N salts on atmospheric methane oxidation by upland boreal forest and tundra soils. *Biol. Fertil. Soils* 31:279–287.
- Whalen, S.C. & Reeburgh, W.S. 2000. Effect of nitrogen fertilization on atmospheric methane oxidation in boreal forest soils. *Chemosphere – Global Change Science* 2:151–155.
- Willison, T.W., Webster, C.P., Goulding, K.W.T. & Powlson, D.S. 1995. Methane oxidation in temperate soils: effects of land use and the chemical form of nitrogen fertilizer. *Chemosphere* 30:539–546.
- Willison, T.W., O’Flaherty, M.S., Tlustos, P., Goulding, K.W.T. & Powlson, D.S. 1997. Variations in microbial populations in soils with different methane uptake rates. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 49:85–90.