

LITTERATURSTUDIE AF EMISSIONSFAKTOREN FOR LATTERGAS FRA DYRKEDE MARKER UNDER DANSKE FORHOLD

1 BAGGRUND

Landbrug er globalt en af de væsentlige kilder til lattergasudledning til atmosfæren (K. A. Smith, 2017). Lattergas er en kraftig drivhusgas, og der er derfor et ønske om at begrænse lattergasudledningen, også fra landbruget. Lattergas har en drivhusgas effekt der er ca. 265 gange så kraftig som CO₂ (IPCC, 2014), og ifølge FN's internationale klimapanel (IPCC) bidrager lattergas med ca. 10 pct. af drivhusgasudledningerne, opgjort som CO₂ ækvivalenter (IPCC, 2014). Landbruget er langt fra den eneste kilde til lattergasudledningerne, men lattergas udledning fra landbruget er en vigtig kilde til lattergasudledning (K. A. Smith, 2017).

Lattergasudledningerne i landbruget skyldes, at mange af de mikrobiologiske processer i kvælstofkredsløbet udvikler lattergas som biprodukt. Det gælder f.eks. for både nitrifikation (omsætning af ammonium til nitrat) og denitrifikation (omsætning af nitrat til frit kvælstof), men også andre kvælstofomsætningsprocesser i jorden (Baggs og Phillipot, 2010). Det er således umuligt helt at undgå lattergas udledning fra landbruget, fordi der sker omsætning af kvælstof mange steder i landbrugssystemet, både i markjorden, ved dyrenes fordøjelse af foder og ved opbevaring af husdyrgødning. En god kvælstofudnyttelse og brug af f.eks. nitrifikationshæmmere kan dog begrænse lattergasudledningen.

1.1 Opgørelse af landbruget lattergasudledninger

Landbrugets lattergasudledninger opgøres ud fra IPCC's guidelines om opgørelse af klimagasudledninger fra landbrug (IPCC, 2006). Lattergasudledningerne fra markbruget opdeles i henhold til disse guidelines i to grupper, nemlig direkte og indirekte udledninger. De direkte udledninger er de udledninger som sker direkte i marken, og kan henføres til markens dyrkning, f.eks. som konsekvens af tildeling af kvælstofgødning (IPCC, 2006). Indirekte udledninger dækker over de udledninger der sker andre steder end i marken, men kan henføres til effekten af markens dyrkning (IPCC, 2006). Det kan f.eks. være udledning fra omsætning af kvælstof der udvaskes fra landbrugsjorden, eller deponeres på naturarealer eller vandområder efter ammoniakfordampning ved gødningsudkørsel. Indirekte emissioner dækker også lattergas emission ved brug af brændstof og afbrænding af biomasse i landbrugsproduktionen (IPCC, 2006).

Estimater af direkte udledninger kan ske efter Tier systemet. I Tier systemet findes der tre niveauer af opgørelsesmetoder Tier1, Tier 2, og Tier 3, der bliver mere komplekse med højere Tier nummer, men også øger nøjagtigheden i opgørelsen fra Tier 1 til Tier 3.

I Tier 1 opgørelser anvendes globalt gældende standardfaktorer til at estimere udledningen. Lattergas udledningen fra mineraljord i omdrift vil i en Tier 1 opgørelse opgøres som 1 pct. af det tilførte kvælstof i handelsgødning, husdyrgødning og planterester (IPCC, 2006). Man siger derfor at emissionsfaktoren (EF) er 1 pct. for kvælstof tilført på mineral jord. Der findes andre emissionsfaktorer for organisk jord og marker under afgræsning (IPCC, 2006).

I Tier 2 opgørelser anvendes mere detaljerede emissionsfaktorer, der er neddelte på f.eks. jord- eller gødningstype (IPCC, 2006), typisk estimeret ud fra nationale studier. F.eks. ved at bruge to forskellige emissionsfaktorer for handelsgødning og husdyrgødning eller for sandjord og lerjord. Tier 2 metoder kræver at

man har adgang til både de mere detaljerede emissionsfaktorer og aktivitetsdata (data for f.eks. gødningsanvendelse fordel på gødningstyper).

Tier 3 opgørelser er mere avancerede metoder, hvor der anvendes målinger eller modelleringstilgange til at estimere lattergas udledningen (IPCC, 2006). F.eks. kan man tænke at modellere lattergasudledningen ud fra viden om kvælstoftilførsel, jordtype, og miljøvariable så som temperatur og pH i jorden. Hvis lattergasudledningen modelleres, er det et krav fra IPCC at modellerne valideres op mod målte data.

De danske lattergasudledninger fra markbruget opgøres i dag efter en Tier 1 metode. De indirekte emissioner fra markdriften beskrives ikke i dette notat, og opgørelsesmetoder for disse er derfor ikke beskrevet.

2 FAKTORER DER HAR INDFLYDELSE PÅ LATTEGASEMISSIONEN FRA LANDBRUGSJORD

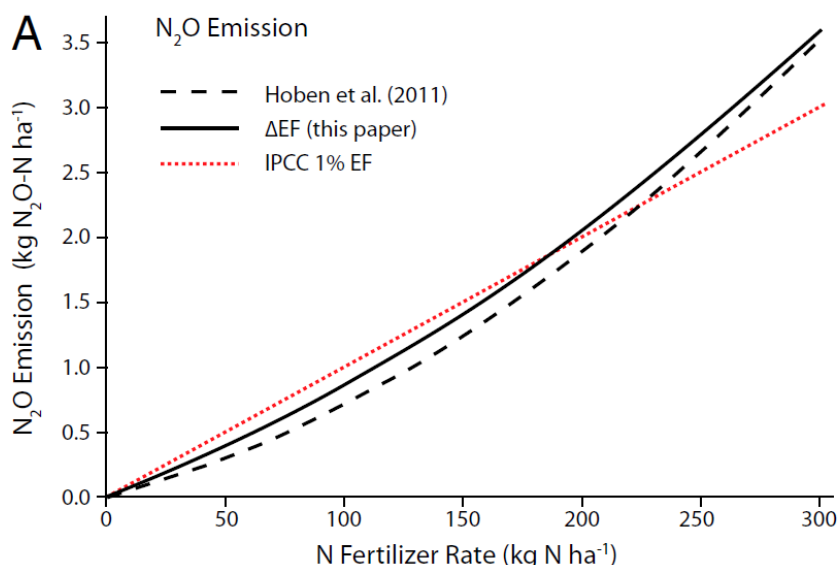
Fra den videnskabelige litteratur ved man, at der findes en række faktorer der har indflydelse på størrelsen af lattergasemissionen fra landbrugsjord. I det følgende gennemgås en række af disse faktorer.

2.1 Kvælstoftilførsel

I en Tier 1 metode ligger implicit, at kun mængden af tilført kvælstof har indflydelse på lattergasudledningen fra marken, og at sammenhængen mellem kvælstoftilførselen og lattergasudledningen er lineær, jfr. ligning 1.

Ligning 1: $N_2O - N = EF \times N_{\text{tilført}}$

Forskningen har dog vist, at denne sammenhæng måske slet ikke er lineær. Shcherbak et al. (2014) har i en metaanalyse af 78 publicerede studier fra hele verden vist, at lattergasemission ved stigende kvælstofmængder beskrives bedre af et andengrads polynomium end af en simpel lineær funktion, som antages i Tier 1 metoden. I praksis betyder det, at emissionsfaktoren lattergasemissionen for lattergas ændre sig med stigende kvælstoftilførsel. I figur 1 ses lattergasudledningen beskrevet efter både efter IPCC's tier 1 metode (IPCC 1% EF) og efter et 2. gradspolynomium (ΔEF) beskrevet af Shcherbak et al. (2014). Man skal være opmærksom på, at de analyserede forsøg i Shcherbak et al. (2014) spænder over et globalt datasæt, med tilsvarende store variationer i klima, jordbundsforhold og afgrøder. I forsøg fra England og Skotland, der klimatisk og dyrkningsmæssigt er sammenligneligt med Danmark, fandt Sylvester-Bradley et al. (2015) i en gennemgang af enkeltforsøg, at sammenhængen mellem kvælstoftilførsel og lattergasemission i nogle forsøg var lineær, og i andre forsøg fugte en kvadratisk funktion og således steg med stigende kvælstoftilførsel. Der mangler yderligere analyser af ændringer i emissionsfaktorens størrelse under forhold sammenlignelige med de danske, for sikkert at kunne konkludere at emissionsfaktoren ændre sig med kvælstoftilførselen, også under danske forhold.



Emission med stigende kvælstoftildeling. Linær model som i IPCC guidelines og to modeller med stigende anden af tilført kvælstof der omdannes til lattergas fra Shcherbak et al. (2014). Se tekst for detaljer.

2.2 Gødningstyper

Det har været meget diskuteret, om gødningstypen har indflydelse på lattergasemissionen. Derfor er lattergas emissionen fra forskellige handelsgødning og husdyrgødningstyper også målt i en række studier. Under klimatiske forhold, der kan sammenlignes med de danske, har det været vist, at lattergasemissionen ved anvendelse af kalk-ammoniumsalpeter giver højere lattergas emission end anvendelse af urea (Dobbie og Smith, 2003; Harty et al., 2016; Stehfest og Bouwman, 2006), men der findes også studier der ikke kan eftervise en forskel i lattergasemission imellem urea og ammoniumnitrat baserede gødninger (Bell et al., 2015).

Tilsætning af nitrifikationshæmmere reducere lattergasemissionen betydeligt i alle gødningstyper (Bell et al., 2015; Dobbie et al., 1999; Harty et al., 2016), mens anvendelse af urease inhibitorer ikke ser ud til at reducere lattergasemissionen betydeligt (Dobbie og Smith, 2003; Harty et al., 2016).

2.3 pH

Jordens pH, dvs. reaktionstal kan have indflydelse på lattergasemissionen, således at lattergas emissionen er større fra jord med lavere pH (Russenes et al., 2016; Shcherbak et al., 2014; Stehfest og Bouwman, 2006). Det skyldes formentlig, at lav pH hæmmer de denitrificerende bakteriers produktion af enzymet N₂O-reduktase der er nødvendigt for at omsætte lattergas til frit kvælstof i sidste trin i denitrifikationen (Liu et al., 2010). Ved lav pH vil forholdet mellem produceret lattergas og frit kvælstof derfor være højere end ved højere pH. Meta studier viser ligeledes, at pH har indflydelse på lattergasudledningen. Således fandt Stehfest og Bouwman (2006), at lattergas produktionen var signifikant højere i forsøg hvor jordens pH var <7,3, mens Shcherbak et al. (2014) fandt en signifikant højere lattergasproduktion, højere emissionsfaktorer, og en kraftigere øgning af lattergasudledningen ved mersgødskning ved pH <7.

pH i dansk landbrugsjord ligger typisk omkring 5 til 7, med lavere værdier på sandjord i Vest- og Nordjylland og højere værdier i Østjylland og på øerne (Mortensen, 2017). Derfor kan moderat kalkning til højere reaktionsstal muligvis bidrage til at nedsætte lattergas emissionen fra landbrugsjord (Russenes et al., 2016), men da kalkning udleder CO₂ bør man nøje gennemregne klimapotentialet i kalkning som virkemiddel.

2.4 Tekstur og klimaforhold

Jordens tekstur og struktur kan i samspil med de klimatiske betingelser også påvirke lattergasemissionens størrelse. Årsagen er at denitrifikationen påvirkes af, hvor store andele af jordens porevolumen der er vandfyldt, fordi anoxiske forhold i vandfyldte porer giver favorable forhold for denitrifikation der udleder lattergas som biprodukt (Dobbie et al., 1999; Dobbie og Smith, 2003; Skiba og Ball, 2002). Derfor er lattergasemissionen afhængig af både jordens tekstur og nedbørsforholdene (Benoit et al., 2015; Dobbie et al., 1999; Skiba og Ball, 2002). Typisk vil der være gode forhold for lattergas emission når de vandfyldte porevolumen er >60 pct. (Benoit et al., 2015; Dobbie et al., 1999), men der er dog nogen variation mellem studier (F.eks. Baral et al., 2017; Dobbie et al., 1999; Ruser et al., 2017; Skiba og Ball, 2002).

I praksis betyder dette, at man vil forvente at lattergasudledningen er større på mere lerede jorde i nedbørsrige områder, og mindre på mere sandede jorde i nedbørsfattige områder. I forsøg har det været vist, at lattergasemissionen stiger med stigende lerprocent (F.eks. Skiba og Ball, 2002). Sammenhængen mellem jordens tekstur og lattergasemissionen er dog ikke simpel, idet nedbørs og jordbundsforhold kan på vekselvirke med jordens tekstur. Som eksempel kan nævnes, at effekten af stigende lerprocent i studiet af Skiba og Ball (2002) kun var signifikant, hvis jordens rumvægt blev inddraget som co-variabel. Teksturen er også en signifikant parameter i Stehfest og Bouwmans (2006) metastudie af publicerede forskningsstudier.

I et tempereret klima som det danske, med store variationer i nedbør og temperatur hen over dyrkningsåret, vil lattergasemissionen også være påvirket af timingen af nedbøren og variationer i temperaturen over dyrkningsåret. Øget temperatur i jorden giver bedre forhold for denitrifikationen, og højere temperaturer giver derfor ofte højere lattergasudledninger (Smith, 2017). Det har også været vist, at nedbørshændelser med kraftig nedbør kan give anledning til kortvarige toppe i lattergasemissionen (Benoit et al., 2015). De højeste lattergasemissioner måles typisk ved nedbørshændelser der indtræffer umiddelbart efter gødningstildeling (Baral et al., 2017; Dobbie et al., 1999; Ruser et al., 2017). Det skyldes at der under disse forhold er rigelige mængder nitrat til rådighed i jorden for denitrifikation, samtidig med at jorden kan være vandmættet enten i hele jordprofilet, eller i lokale mikromiljøer. Der kan også ses øgede lattergasemissioner efter i efteråret efter høst af afgrøden (Ruser et al., 2017). Dette kan muligvis skyldes tilgængelighed af kulstof og nitrat fra nedbrydning af afgrøderester, kombineret med høj nedbør om efteråret (Ruser et al., 2017).

2.5 Kulstofindhold

Jordens kulstofindhold har også have betydning for lattergasemissionen fra dyrkningsjord, således at højere kulstofindhold giver højere lattergasudledninger. I Stehfest og Bouwmans (2006) metaanalyse er det vist, at lattergasudledningen er signifikant højere, når jordens kulstofindhold er >3 pct. end når det ligger under dette niveau. Den stigende lattergasudledning med stigende kulstofindhold skyldes, at de denitrificerende bakterier lever af at nedbryde kulstof ved brug af nitrat. Højt kulstof indhold sikrer således at kulstof ikke er begrænsende for denitrifikationen.

Studier har vist at kulstoftilførsel i form af afgrøderester kan være mere drivende for lattergasemissionen end kvælstoftilførselen (Li et al., 2015; Pugesgaard et al., 2017). Denne effekt skyldes, at nedbrydning af afgrøderester giver de denitrificerende bakterier adgang til let nedbrydeligt kulstof og nitrat (Li et al., 2016). Samtidig medvirker nedbrydningen af afgrøderester i jorden til at opretholde anoxiske forhold, der er nødvendige for at denitrifikation kan forløbe. I overensstemmelse her med er det i et laboratorie studie af Li et al. (2016) vist, at kvaliteten af afgrøderester har betydning for lattergasemissionens størrelse, således at let nedbrydelige afgrøde rester giver højere lattergasemission.

Konklusionen er, at både jordens kulstofindhold, og tilførsel af let nedbrydeligt kulstof i form af afgrøderester kan øge lattergasemissionen fra dyrkede marker.

3 EMISSIONSFAKTORENS STØRRELSE

IPCC's guidelines fastsætter emissionsfaktoren for lattergas til 1 procent (IPCC, 2006), men der er som beskrevet i de ovenstående afsnit flere faktorer, der påvirker lattergasemissionen fra landbrugsjord. I en international sammenhæng er danske jorder meget sandede, og det er derfor sandsynligt at den faktiske emission er lavere end 1 pct. at kvælstoftilførselen. IPCC's standard faktor er fastsat på baggrund af resultater fra en række metaanalyser, blandt andet en analyse af Stehfest og Bouwman (2006). Disse metaanalyser inddrager data fra alle klimaregioner og jordtyper, hvor der findes forsøgsdata, og resultaterne er således globale gennemsnitsværdier. Datasættet fra Stehfest og Bouwman (2006) er offentligt tilgængeligt, og indeholder oplysninger om blandt andet forsøgsområde, dyrkningsbetingelser, kvælstoftilførsel, klima, afgrøde, nedbør, jordtype og lattergasemissioner. Derfor kan dette datasæt anvendes til at gennemføre en analyse af emissionsfaktorer for lattergas, for klimaer og dyrkningsforhold der ligner de danske.

3.1 Datasæt

Der er taget udgangspunkt i datasættet fra Stehfest og Bouwman (2006) der indeholder 1891 enkeltobservationer fra 296 publikationer. For at undersøge hvad emissionsfaktoren for lattergas er under forhold sammenlignelige med danske forhold, er dette datasæt udbygget med nyere studier, og der er lavet en analyse af emissionsfaktorerne under klimatiske betingelser der minder om de danske.

Datasættet fra Stehfest og Bouwman (2006) er suppleret med observationer fra publikationerne i tabel 1.

Tabel 1. Referencer anvendt til at udbygge Stehfest og Bouwman datasættet

Reference	Land	Antal observationer
(Bell et al., 2015)	Storbritannien	27
(Van Groenigen et al., 2004)	Holland	22
(Baral et al., 2017)	Danmark	5
(Harty et al., 2016)	Irland	34

Datasættet begrænses til de observationer der stammer fra:

- Landbrugsarealer
- Tempereret kystnært klima
- Hvor lattergasemissionen uden kvælstoftilførsel er bestemt

Datasættet begrænses til de observationer hvor lattergasemissionen uden kvælstoftilførsel er bestemt, fordi denne værdi skal anvendes når emissionsfaktoren for lattergas bestemmes, idet denne beregnes som:
Emissionsfaktoren = lattergas emission ved tildelt kvælstof – lattergas emission uden tildelt kvælstof.

Kun datasættet f fra Stehfest og Bouwman (2006) indeholder data fra naturarealer. Mens datasættet fra Stehfest og Bouwman (2006) kun indeholder lidt flere observationer end datasættet fra SEGES, indeholder datasættet Stehfest og Bouwmans (2006) datasæt observationer fra flere forskellige publikationer og lokaliteter. Derfor er det mere sandsynligt at ehfest og Bouwman (2006) dækker en større variationsbrede end SEGES's datasæt. Dog øges variationsbredden i SEGES' datasæt af, at de fundne publikationer indeholder data fra flere forskellige lokaliteter.

Begrænsningerne af datasættene gør, at der i alt er 213 observationer der kan anvendes til analysen, heraf stammer 117 fra Stehfest og Bouwmans (2006) originale datasæt mens 96 observationer stammer fra de publikationer som SEGES har udbygget datasættet med. Opdateringen har således næsten fordoblet antallet af observationer fra landbrugsarealer i tempererede klimaer, i forhold til den originale analyse fra Stehfest og Bouwmans (2006).

Tabel 2. Emissionsfaktorer for de analyserede datasæt delt på jordtypekategorier. Kategorien "Grov" dækker alle jordtyper fra JB1 til JB6.

Tekstur	Total			Stehfest og Bouwman (2006)			SEGES		
	n	EF(%)	EF (Std. Afv.)	n	EF (%)	EF (Std. Afv.)	n	EF (%)	EF (Std. Afv.)
Grov	97	0,5	0,4	40	0,7	0,5	57	0,3	0,3
Medium	67	0,7	0,8	39	0,7	0,7	28	0,6	0,8
Fin	20	1,2	0,7	9	1,1	0,7	11	1,3	0,8
Ukendt	18	1,9	2,0	18	1,9	2,0			
Total	213	0,9	1,2	117	1,2	1,5	96	0,5	0,6

Emissionsfaktoren for det samlede datasæt er ca. 0,7 pct. I Stehfest og Bouwmans (2006) originale datasæt var den 0,9 pct., mens den i SEGES' datasæt var 0,5 pct. standardafvigelse viser, at variationen er meget høj.

Emissionsfaktoren stiger jo finere tekturen bliver (Tabel 2). I international sammenhæng er danske jorder meget sandede, og kategorien "Grov" dækker derfor de danske jordtyper fra JB1 til JB6, mens JB7 til JB9 ligger i kategorien medium. Næsten hele Danmarks landbrugsareal er således dækket af de jord i kategorien grov. Emissionsfaktoren for jordtypekategorien "Grov" er 0,7 pct. for Stehfest og Bouwman (2006) datasættet men kun 0,3 pct. for SEGES datasættet. For det samlede datasæt er emissionsfaktoren i denne jordtype kategori 0,5 pct. Konklusionen er, at emissionsfaktoren under danske forhold formentlig er i størrelsesordenen 0,5 pct.

Da danske landbrugsjorder i altovervejende grad er domineret af jord i kategorien "Grov", er de videre analyser udelukkende foretaget på jordtypekategorien "Grov". Det er analyseret om datasættet viser en effekt af nitrifikationshæmmere. Det viser sig at være tilfældet, og i de her analyserede studier reducer emissionsfaktoren fra 0,5 pct. til 0,1 pct. (Tabel 3). Da der kun er 10 observation med nitrifikationshæmmere i datasættet, ud af totalt 97 observationer, er denne størrelsen på emissionsfaktoren når der anvendes nitrifikationshæmmere formentlig usikkert bestemt. Men analysen viser, at nitrifikationshæmmere kan bidrage til

at reducere lattergasudledningen fra marken. Dette er i overensstemmelse med de individuelle studier, hvor effekten på lattergasemission er undersøgt (Bell et al., 2015; Harty et al., 2016).

Tabel 3. Emissionsfaktorer med og uden nitrifikationshæmmere

	n	EF%	Std. afv%
Uden nitrifikationshæmmer	87	0,5	0,4
Med nitrifikationshæmmer	10	0,1	0,1
Total	97	0,5	0,4

For at undersøge om landmanden kan nedsætte lattergasemissionen ved at vælge andre gødningstyper, blev det analyseret, om der er forskel på emissionsfaktorer fra forskellige gødningstyper i datasættet. Antallet af forskellige gødningstyper i datasættet er dog stort, hvilket betyder, at der kun er få observationer for selv de mest udbredte gødningstyper, som f.eks. urea, kalkammoniumsalpeter eller ammoniumnitrat. Harty et al. (2016) fandt at emissionerne fra kalkammoniumsalpeter var højere end for andre gødningstyper, men i det samlede datasæt analyseret her, var der kun en beskedne forskel mellem kalkammoniumsalpeter (EF = $0,4 \pm 0,4$ pct., n = 23) og urea (EF = $0,3 \pm 0,3$ pct., n = 22). Forskellene mellem urea og kalkammoniumsalpeter er baseret på relativt få observationer (45 i alt), er det ikke muligt at konkludere sikkert, at en gødningstyper giver lavere emissioner end en anden, under danske forhold.

Det er også undersøgt, om jordens kulstofindhold har indflydelse på emissionsfaktoren. Emissionsfaktoren er højere ved kulstofindhold over 3 pct. Det skyldes som nævnt i afsnit 2.5 formentlig, at et højt kulstofindhold i jorden giver gode forhold for denitrifikation, idet de denificerende bakterier lever af at oxidere organisk kulstof.

Kulstofindhold i jord	n	EF%	Std. afv%
Ukendt	20	0,4	0,4
<3 pct.	62	0,4	0,4
>3 pct.	15	0,7	0,5
Total	97	0,5	0,4

Det analyserede datasæt er baseret på information, der er indsamlet fra videnskabelige artikler. Derfor har det ikke for alle studier været muligt at finde alle de parametre der kunne være interessante at relatere til lattergasemissionen. Det kunne f.eks. være årsnedbør eller N-min i jorden. Derfor kan der ikke med rimelighed laves yderligere analyser af, hvilke faktorer, der påvirker emissionen af lattergas og sammenhængen med kvælstoftilførselen.

4 KONKLUSION

Lattergasemissionen fra dyrket jord påvirkes af en række faktorer der knytter sig til de klimatiskeforhold eller til jordbundsforholdene i marken. Det kan f.eks. være nedbør, pH, og jordens tekstur. En opdatering og analyse af datasættet fra Stehfest og Bouwmans (2006) viser, at emissionsfaktoren for lattergas formentlig er i størrelsesorden 0,5 pct. på jordtyper der ligner de danske. Konklusionen er, at IPCCs globale standard emissionsfaktor på 1 pct. af tilført kvælstof formentlig overestimerer lattergasudledningen fra danske marker med en faktor 2.

5 LITTERATUR

- Baggs, E. M., Phillipot, L. (2010). Microbial terrestrial pathways to nitrous oxide. In K. A. Smith (Ed.), *Nitrous oxide and climate change* (pp. 4–35). London: Earthscan.
- Baral, K. R., Labouriau, R., Olesen, J. E., Petersen, S. O. (2017). Nitrous oxide emissions and nitrogen use efficiency of manure and digestates applied to spring barley. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 239, 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.012>
- Bell, M. J., Hinton, N., Cloy, J. M., Topp, C. F. E., Rees, R. M., Cardenas, L., ... Chadwick, D. R. (2015). Nitrous oxide emissions from fertilised UK arable soils: Fluxes, emission factors and mitigation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 212, 134–147. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.003>
- Benoit, M., Garnier, J., Billen, G., Tournebise, J., Gréhan, E., Mary, B. (2015). Nitrous oxide emissions and nitrate leaching in an organic and a conventional cropping system (Seine basin, France). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 213, 131–141. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.030>
- Dobbie, K. E., McTaggart, I. P., Smith, K. A. (1999). Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: Variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D21), 26891–26899. <https://doi.org/10.1029/1999JD900378>
- Dobbie, K. E., Smith, K. A. (2003). Impact of different forms of N fertilizer on N₂O emissions from intensive grassland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 67(1), 37–46. <https://doi.org/10.1023/A:1025119512447>
- Dobbie, K., Smith, K. (2003). Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water filled pore space and other controlling variables. *Global Change Biology*, 99, 204–218. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00563.x>
- Harty, M. A., Forrestal, P. J., Watson, C. J., McGeough, K. L., Carolan, R., Elliot, C., ... Lanigan, G. J. (2016). Reducing nitrous oxide emissions by changing N fertiliser use from calcium ammonium nitrate (CAN) to urea based formulations. *Science of the Total Environment*, 563–564, 576–586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.120>
- IPCC. (2006). *N₂O Emissions From Managed Soils, and CO₂ Emissions From Lime and Urea application. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Li, X., Petersen, S. O., Sørensen, P., Olesen, J. E. (2015). Effects of contrasting catch crops on nitrogen availability and nitrous oxide emissions in an organic cropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 199, 382–393. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.016>
- Li, X., Sørensen, P., Olesen, J. E., Petersen, S. O. (2016). Evidence for denitrification as main source of N₂O emission from residue-amended soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 92, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.10.008>
- Liu, B., Mørkved, P. T., Frostegård, Å., Bakken, L. R. (2010). Denitrification gene pools, transcription and kinetics of NO, N₂O and N₂ production as affected by soil pH. *FEMS Microbiology Ecology*, 72(3), 407–417. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00856.x>
- Mortensen, R. M. (2017). Jordbundsanalyser. In J. B. Pedersen (Ed.), *Oversigt over Landsforsøgene 2017* (p. 407). Skejby.
- Pugesgaard, S., Petersen, S. O., Chirinda, N., Olesen, J. E. (2017). Crop residues as driver for N₂O emissions from a sandy loam soil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 233, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.007>
- Ruser, R., Fuß, R., Andres, M., Hegewald, H., Kesenheimer, K., Köbke, S., ... Flessa, H. (2017). Nitrous oxide emissions from winter oilseed rape cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 249(August), 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.039>
- Russenes, A. L., Korsæth, A., Bakken, L. R., Dörsch, P. (2016). Spatial variation in soil pH controls off-season N₂O emission in an agricultural soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 99, 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.019>
- Shcherbak, I., Millar, N., Robertson, G. P. (2014). Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences*,

- 111(25), 9199–9204. <https://doi.org/10.1073/pnas.1322434111>
- Skiba, U., Ball, B. (2002). The effect of soil texture and soil drainage on emissions of nitric oxide and nitrous oxide. *Soil Use and Management*, 18(3), 56–60. <https://doi.org/10.1079/SUM2001101>
- Smith, K. A. (2017). Changing views of nitrous oxide emissions from agricultural soil: key controlling processes and assessment at different spatial scales. *European Journal of Soil Science*, 68(2), 137–155. <https://doi.org/10.1111/ejss.12409>
- Stehfest, E., Bouwman, L. (2006). N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: Summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 74(3), 207–228. <https://doi.org/10.1007/s10705-006-9000-7>
- Sylvester-Bradley, R., Thorman, R., Kindred, D., Wynn, S., Smith, K., Rees, R., ... Munro, D. (2015). *Project Report No . 548 Minimising nitrous oxide intensities of arable crop products (MIN-NO)*. Retrieved from [https://cereals.ahdb.org.uk/publications/2015/october/29/minimising-nitrous-oxide-intensities-of-arable-crop-products-\(min-no\).aspx](https://cereals.ahdb.org.uk/publications/2015/october/29/minimising-nitrous-oxide-intensities-of-arable-crop-products-(min-no).aspx)
- Van Groenigen, J. W., Kasper, G. J., Velthof, G. L., Van Den Pol-Van Dasselaar, A., Kuikman, P. J. (2004). Nitrous oxide emissions from silage maize fields under different mineral nitrogen fertilizer and slurry applications. *Plant and Soil*, 263(1–2), 101–111. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047729.43185.46>