

Lattergasemission fra jord

– kilder og kontrol

Lattergas er en vigtig kilde til drivhusgasemission fra landbruget. Artiklen sammenfatter, hvad vi ved om kilder til lattergas, processerne bag, og hvilke faktorer som kontrollerer udledningen af lattergas. Desuden diskuteres mulige virkemidler til lattergas-reduktion.

SØREN O. PETERSEN, DIEGO ABALOS &
LARS STOUJANN JENSEN

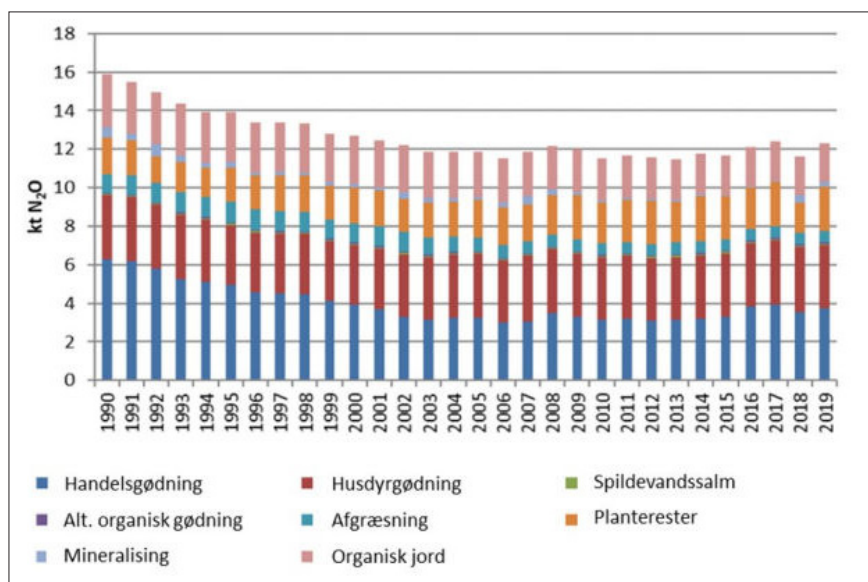
Kilder og miljøfaktorer

Lattergas udgør 45% af de drivhusgasemissioner (metan og lattergas), der knyttes til landbruget i den nationale opgørelse, og heraf stammer 77% fra dyrkede arealer. Handelsgødning, husdyrgødning og planterester er de vigtigste kilder til lattergas (N_2O), jf. figur 1. Ud over disse direkte emissioner på ca. 12 kt N_2O pr. år er der også indirekte emissioner af N_2O fra nitratudvaskning og ammoniakfordampning, som udgør 1,5-2 kt pr. år.

Lattergasemissionerne opgøres i øjeblikket ved hjælp af standard-emissionsfaktorer for de enkelte kilder, som er foreslået af det Internationale Klimapanel IPCC /1/. Disse emissionsfaktorer er ikke nødvendigvis repræsentative for Danmark, og estimaterne er derfor meget usikre. Flere danske projekter undersøger i øjeblikket de vigtigste kilder til N_2O for at forbedre nøjagtigheden af de estimerede emissioner og derved få et bedre grundlag for at vurdere effektiviteten af virkemidler til N_2O -reduktion.

I landbrugsjord kan N_2O produceres via en af flere mikrobielle processer, se de vigtigste processer i Boks 1. Jordens fysisk-kemiske egenskaber og klimaet (temperatur, nedbør) varierer regionalt, og det har stor indflydelse på risikoen for lattergasudledning.

Det er velkendt, at jordens surhedsgrad hæmmer omdannelsen af N_2O til N_2 . I nogle områder er jordens pH-værdi naturligt lav, svarende til høj surhedsgrad. Gødning, der indeholder ammonium eller ammoniak, vil også sænke pH over tid gennem nitrifikationspro-



Figur 1. Kilder til lattergas (N_2O) fra dyrkningsjord i Danmark i perioden 1990-2019). 1 kt = 1000 tons. Kilde: Denmark's National Inventory Report 2021 (DCE-rapport nr. 437)

cessen. Kalkning er en almindelig praksis som kan bidrage til at holde jordens pH-værdi i et interval, der er velegnet til planteproduktion, og kalkning kan derved mindske risikoen for N_2O -emissioner.

En vigtig faktor for de processer, som kan danne N_2O , er adgangen til ilt, som afhænger af jordens porøsitet og vandindhold samt iltforbruget i jorden. Både naturlige forhold (f. eks. lerindhold, nedbør) og dyrkningsmetoder (f. eks. jordpakning, gødningstype og udbringningsmetode) påvirker jordens iltstatus og dermed risikoen for dannelse af N_2O . Nitrifikation er en iltkrævende proces som kan producere N_2O , hvis iltten bliver begrænsende. En anden proces, denitrifikation, omdanner nitrat til frit kvælstof (N_2) med N_2O som et frit mellemprodukt. Denitrifikation er en anaerob

(iltfri) proces som undertrykkes af ilt. En alternativ denitrifikationsproces, der benævnes nitrifier-denitrifikation, udføres af nitrificerende bakterier ved iltmangel og eventuelt andre former for stress. Flere undersøgelser har fundet, at denitrifikation er den vigtigste kilde til N_2O i landbrugsjord.

Strategier til at begrænse N_2O -emissioner fra dyrkningsjorden skal, direkte eller indirekte, påvirke den mikrobielle omsætning af kvælstof ved at ændre betydende miljøfaktorer i de mikromiljøer, hvor omsætningen finder sted.

Kvælstofgødskning

Udledninger af N_2O fra den mikrobielle omsætning af kvælstof i handels- og husdyrgødning varierer i både tid og rum. Emissionen

påvirkes af mængde, sammensætning og fordeling af kvælstof i tilført gødning. Vekselvirkninger med jordbundsforhold, og eventuelt med planterester under nedbrydning, afgør balancen mellem aerobe og anaerobe processer, som kan resultere i N_2O -emission (boks 1) /2/.

Emissionen af N_2O stiger uforholdsmæssigt, hvis kvælstoftilførslen overstiger afgrødens behov, men i Danmark har stramme regler for kvælstoftilførsel i gødning forhindret dette. Desuden har gradvist stigende krav til udnyttelsen af kvælstof i husdyrgødning væsentligt reduceret forbruget af handelsgødning siden 1990 (figur 1).

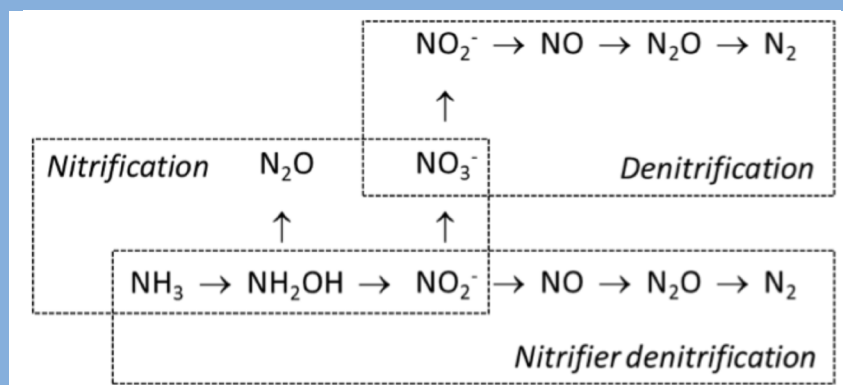
Den emissionsfaktor, som i øjeblikket anvendes til opgørelse af emissionen af N_2O fra såvel handelsgødning som husdyrgødning (og planterester) er 0,01, hvilket betyder, at 1% af det tilførte kvælstof antages at blive udledt som N_2O . Disse skøn er imidlertid meget usikre, og tidligere undersøgelser har antydnet en lavere gennemsnitlig EF på 0,007 (95% konfidensinterval: 0,005-0,008) under danske forhold /3/. I 2019 blev der igangsat et forskningsprojekt, "Nationale emissionsfaktorer for lattergas fra kvælstofgødning og sædskifter" (NATEF), med det primære formål at estimere mere repræsentative emissionsfaktorer for dansk landbrug. Projektet undersøger N_2O -emissioner fra hele sædskifter og forskellige gødningsmaterialer under forskellige jordtype- og klimaforhold. NATEF-projektet fortsætter indtil 2024, men foreløbige resultater tyder på, at N_2O -emissionen under danske forhold varierer med klimatiske forhold (sted og år), og sted i sædskiftet. Desuden ser N_2O -emissionsfaktoren for husdyrgødning og visse planterester ud til at være højere end for handelsgødning.

Planterester

Anvendelse af husdyrgødning, og tilbageførsel af planterester fra landbrugsafgrøder, er de vigtigste metoder til at bevare jordens indhold af organisk stof. Planterester har mange positive effekter på jordens kvalitet, men kan også øge udledningen af N_2O . Planterester indeholder kvælstof, og N_2O -emissionerne fra planterester estimeres som nævnt med en emissionsfaktor på 0,01 baseret på kvælstofindholdet. Denne enkle fremgangsmåde overser imidlertid det komplekse samspil mellem planterester og jordmiljø, som afgør risikoen for dannelse af N_2O . Eksempelvis kan planterester, der er rige på letnedbrydelige organiske forbindelser, øge N_2O -emissionerne ved at levere energi og eventuelt frigive kvælstof, der stimulerer den biologiske omsætning i jorden. En høj biologisk aktivitet forbruger ilt, og det

Boks 1. Processer, som danner lattergas (N_2O) i jorden

- **Denitrifikation.** Udføres af organismer, der er i stand til at bruge nitrit (NO_2^-) eller nitrat (NO_3^-) i deres respiration, hvis O_2 bliver begrænsende. De fleste denitrificerende organismer kræver organisk materiale. Synes at være den vigtigste kilde til N_2O .
- **Nitrifikation.** Kan ske via kemisk nedbrydning af hydroxylamin (NH_2OH). Nøgleproces i N_2O -emissioner, hvis tilgængeligheden af NO_2^- og NO_3^- begrænser N_2O -produktionen via denitrifikation.
- **Nitrifier-denitrifikation.** Ammoniak (NH_3)-oxiderende bakterier kan omdanne NO_2^- til N_2O ved hjælp af denitrifikationsenzymmer under O_2 -begrænsende forhold.
- **Koblet nitrifikation-denitrifikation.** Involverer to typer mikroorganismer (nitrificerende og denitrificerende bakterier), forekommer omkring grænseflader med/uden O_2 . Kan være vigtig i nærheden af gødning og planterester.
- Andre procesveje inkluderer **co-denitrifikation** af organiske N-forbindelser med nitrogenoxid (NO), **nitratreduktion til ammonium og kemodenitrifikation**, hvor NO_2^- reagerer med reduceret jern i sure miljøer.



Kilder: Butterbach-Bahl, K. et al. 2013 (Philosophical Transactions of the Royal Society B 368, 20130122) og Wrage, N. et al., 2001 (Soil Biology & Biochemistry 33, 1723-1732).



Majshøst på en af de fire lokaliteter i projektet Nationale emissionsfaktorer for lattergas fra handels- og husdyrgødning. Foto: Jens B. Kjeldsen.

Boks 2: Drænede organiske jorde

En af de kilder til N_2O , der er vist i Figur 1, er "organisk jord". Der er tale om tørvejord, som er drænet med henblik på landbrugsproduktion. Det høje indhold af organisk materiale er opbygget gennem hundreder af år, hvor jorden var mættet med vand, hvilket har forhindret nedbrydningen. Dræning giver adgang for ilt til jorden, og det fremskynder nedbrydningen af organisk materiale og frigiver kvælstof som en del af denne proces.

Der er en høj forventet frigivelse af N_2O fra drænet organisk jord på 20 kg pr. ha pr. år i Danmark /9/, men undersøgelser har vist, at emissionerne i nogle områder kan være endnu højere. Dette kan skyldes sæsonbetinget variation i grundvandsstanden i kombination med lavt pH /10/. Arealanvendelsen er vigtig, og med et permanent plantedække, såsom græs, der løbende fjerner mineralisk N fra jorden, er emissionen af N_2O lav medmindre der tilføres kvælstofgødning.

Det er vigtigt at få belyst, om særligt høje udledninger af N_2O fra tørvejord er udbredt i Danmark, og om nødvendigt træffe foranstaltninger til at reducere emissionerne, f.eks. ved at undgå brakperioder eller ved vådlægning af arealerne for at begrænse skift mellem iltfattige og iltede forhold i løbet af året.



Monitering af N_2O i Store Vildmose, i nabomarker med henholdsvis kartofler og græs med henholdsvis høj og lav N_2O -emission sammenlignet med det forventede /9/.

kan fremme udledningen af N_2O ved at skabe et iltbegrænset miljø.

Nyere undersøgelser har vist, at plantematerialets modenhed på tidspunktet for tilbageførsel kan være en enkel og robust måde at beskrive planteresters biokemiske egenskaber med betydning for N_2O -emissionen /4/. Indarbejdes umodne (grønne) planterester i jorden, f.eks. ved omlægning af græsmarker eller nedpløjning af efterafgrøder, øger det således N_2O -emissionen sammenlignet med indarbejdelse af planterester fra modne planter, f.eks. halm, der kun vil have en marginal effekt på N_2O -emissionen. Årsagen er, at umodne planterester typisk har et lavt C:N-forhold (på grund af en høj kvælstofkoncentration), et lavt celluloseindhold, og et højt indhold af opløseligt tørstof og vandopløseligt C. De vigtigste afgrødetyper med umodne planterester – efterafgrøder, græsmarker og grøntsager – har en række gavnlige effekter på jorden (økosystemtjenester), men der er brug for mere viden om, hvordan planteresterne skal håndteres for at undgå høje N_2O -emissioner.

Efterafgrøder

I Danmark dyrkes i dag efterafgrøder på mere end 20% af det dyrkede areal (500-600.000 ha), og dette tal kan stige til 25-30% i de kommende år. Dyrkning af efterafgrøder er et kostningseffektivt virkemiddel til at reducere

udvaskningen af nitrat, men der er stadig begrænset viden om efterafgrøders klimaaftryk.

Den ekstra biomasse i planterester fra efterafgrøder, der tilbageføres, kan øge kulstoflagringen i jorden, ikke mindst fra dybe rødder /5/. Ved at reducere jordens nitratindhold vil efterafgrøderne også reducere risikoen for direkte og indirekte (fra udvasket nitrat) N_2O -emissioner igennem efteråret og vinteren. Til gengæld udgør efterafgrøders planterester en kilde til N_2O -emission, når de nedmulses.

Der findes i øjeblikket ikke noget klart billede af, hvad efterafgrøder betyder for N_2O -emissionen. En litteraturgennemgang /6/ fandt både højere og lavere emissioner sammenlignet med en reference uden efterafgrøde, og set over hele året var forskellen lille eller ubetydelig. I Danmark har undersøgelser på sandet jord i Vestdanmark fundet, at kvælstof i planterester fra efterafgrøder har større betydning for den årlige N_2O -emission end kvælstof tilført i form af gødning. I et aktuelt klimaforskningsprojekt om efterafgrøder, Catch crops for carbon capture (CatCap), er det på en sandblandet lerjord fundet, at efterafgrøder påvirker fordelingen af N_2O -emissioner over året. Om efteråret er emissionen lavere, hvis efterafgrøden er veletableret og effektiv i optagelsen af kvælstof, og om vinteren kan der være en periode med forhøjet N_2O -emission, hvis efterafgrøden dør, f.eks. i

forbindelse med frost. Efter nedmuldning om foråret stimuleres N_2O -emissionen, især hvis efterafgrøden har et lavt C/N-forhold, men for året som helhed er der kun observeret små stigninger i N_2O -emissionen.

Hvordan reduceres emissionen af N_2O ?

I betragtning af det komplekse samspil mellem N_2O -producerende processer og jordmiljøet er det en stor udfordring at reducere emissionen af denne vigtige drivhusgas.

Syntetiske nitrifikationshæmmere er udviklet med det formål at reducere miljømæssige tab af N før planteoptagelse. Stofferne hæmmer det enzym, som er ansvarligt for ammoniakoxidation, det første trin i nitrifikationsprocessen (Boks 1). Der er da også evidens for, at nitratudvaskning kan reduceres ved at anvende en nitrifikationshæmmer sammen med handels- eller husdyrgødning, dog primært under forhold, hvor der er høj risiko for udvaskning – eksempelvis ved dyrkning af majs på sandjord på grund af afgrødens sene kvælstofoptagelse. Til gengæld øger nitrifikationshæmmere risikoen for ammoniaktab fra gødning, der overfladeudbringes. Udledningen af lattergas har også vist sig at kunne reduceres med brug af nitrifikationshæmmere; her er den primære effekt formentlig, at adgangen til NO_3^- begrænses for denitrificerende bakterier. Der er også observeret øget aktivitet af et en-

zym i denitrifikationsprocessen, der reducerer N_2O til N_2 . Igen gælder det, at en effekt kun kan forventes, når jordbundsforholdene tillader N_2O -emission, og hvis NO_3^- er en begrænsende faktor. Af samme grund skal tilførsel af handelsgødning, især nitratholdig, før eller sammen med husdyrgødning undgås. IPCC har foreslået nitrifikationshæmmere som et potentielt virkemiddel til at mindske landbrugets N_2O -emissioner.

En række forskellige nitrifikationshæmmere er blevet undersøgt for effekt på N_2O -emission, når de anvendes sammen med handelsgødning og gylle. De mest veldokumenterede stoffer er DCD, DMPP og nitrapyrin. Den gennemsnitlige reduktion af N_2O -emission varierer mellem 39 og 48%, men effekten i de enkelte forsøg kan variere meget mere, og der er situationer med jordbundsforhold, hvor der ikke kan ventes nogen effekt. Nitrifikationshæmmeres effektivitet påvirkes af faktorer som jordens tekstur og pH-værdi, nedbør, afgrødetype, jordbearbejdning og gødningsstype. Disse mange faktorer påvirker effektiviteten ved at påvirke potentialet for N_2O -emission via nitrifikation eller denitrifikation. Hvis der er lille risiko for udledning af N_2O , er det også usandsynligt, at brug af nitrifikationshæmmere har nogen effekt. Tilsvarende forventes en større reduktion af N_2O med brug af en nitrifikationshæmmer, hvis jordens indhold af NO_3^- er lavt. Miljøeffekter af nitrifikationshæmmere skal desuden vurderes grundigt, før de kan tages i brug, og et igangværende forskningsprojekt, Klima- og miljøeffekter af nitrifikationshæmmere (KLIMINI) undersøger økotoxikologiske effekter og udvaskningsrisiko for udvalgte nitrifikationshæmmere.

Rodafsætningen fra visse plantearter kan indeholde sekundære metabolitter med potentiale for at virke som biologiske nitrifikationshæmmere. Indtil videre er det dog kun nogle få afgrøder, der har vist denne evne, og der er behov for en yderligere indsats for at finde plantesorter med effekt på N_2O -emissionen.

Sammenlignet med handels- og husdyrgødning er det en endnu større udfordring at mindske N_2O -emissionen fra afgrøderester /7/. Fjernelse fra marken, overfladenær indarbejdning, og mindre indarbejdning af planterester med et C:N-forhold < 30 , er metoder, der er forbundet med lavere N_2O -emission. Effekten af andre metoder, såsom tidspunkt for indarbejdning af planterester for at undgå vekselvirkninger med tilført gødning, var mindre entydige. Flere af de undersøgte strategier til N_2O -reduktion havde negative effekter på udbytte, lagring af kulstof i jorden, nitratudvaskning og/eller ammoniakfordampning. Andre



Efterafgrøders evne til at samle kvælstof op og reducere udledningen af lattergas undersøges i faktorielle markforsøg. Foto: Jens B. Kjeldsen.

muligheder kræver yderligere forskning, såsom høst af planterester til produktion af biogas eller biokul, hvor der kan være mulighed for at omfordele næringsstoffer. En anden strategi er behandling af plantemateriale med en nitrifikationshæmmer før indarbejdning i jorden /8/.

Disse og andre strategier bliver løbende evalueret som mulige virkemidler til N_2O -reduktion. Andre strategier omfatter delt gødning, bladgødsning og præcisionsgødsning. Et fælles mål er at begrænse opholdstiden for mineralsk kvælstof i jorden før planteoptagelse, specielt i form af nitrat NO_3^- .

Konklusion

Lattergas-udledning udgør en stor andel af dansk landbrugs klimaaftryk, og der er et presserende behov for at dokumentere emissioner og effekter af strategier med potentiale for N_2O -reduktion. Der er igangsat en række forskningsprojekter, som nu begynder at levere ny viden om N_2O -emissionen fra danske dyrkningssystemer og produktionsbetingelser. Resultaterne indikerer, at der kan være betydelige forskelle mellem kvælstofkilder og afgrøder med hensyn til N_2O -emissionen, og effekter af lokale forhold (jordbund og klima). Udviklingen af reduktionsstrategier på bedriftsniveau bør tage hensyn til noget af denne variation.

Referencer

- /1/ IPCC 2019: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. C. Buendia et al. (red.). Udgivet af: IPCC, Schweiz.
- /2/ Charles, A. et al. 2017: Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 236, 88-98.
- /3/ Petersen, S.O. et al. 2018: Niveau af emissioner på dan-

ske jordtyper afhængig af anvendelse af forskellige gødnings typer sammenlignet med IPCC standarder. Nr. 2017-760-000338 (10 p.).

- /4/ Abalos, D. et al. 2022a: Predicting field N_2O emissions from crop residues based on their biochemical composition: a meta-analytical approach. *Science of the Total Environment* 812, 152532.
- /5/ Liang Z. et al. 2018: Carbon mineralization and microbial activity in agricultural topsoil and subsoil as regulated by root nitrogen and recalcitrant carbon concentrations. *Plant & Soil* 433, 65-82.
- /6/ Basche, A.D. et al. 2014: Do cover crops increase or decrease nitrous oxide emissions? A meta-analysis. *Journal of Soil & Water Conservation* 69, 471-482.
- /7/ Abalos, D. et al. 2022b: A review and meta-analysis of mitigation measures for nitrous oxide emissions from crop residues. *Science of the Total Environment* 828, 154388.
- /8/ Kong, X.-W. et al. 2018: Evaluation of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) for mitigating soil N_2O emissions after grassland cultivation: A field study. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 259, 174-183.
- /9/ IPCC 2014: 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. Hiraishi, T. et al. (red.). IPCC, Schweiz.
- /10/ Taghizadeh-Toosi, A. et al. 2019: Regulation of N_2O emissions from acid organic soil drained for agriculture. *Biogeosciences* 16, 4555-4575.

SØREN O. PETERSEN (sop@agro.au.dk) er professor og DIEGO ABALOS (d.abalos@agro.au.dk) tenure-track forsker ved Institut for Agroøkologi, Århus Universitet. LARS STOU-MANN JENSEN (lsj@plen.ku.dk) er professor ved Institut for Plante- og Miljøvidenskab, Københavns Universitet.