



Litteraturstudie over ikke-lineær udledning af lattergas





Udgivet af

Innovationscenter for Økologisk Landbrug
Agro Food Park 26
8200 Aarhus N
+45 78780120
info@icoel.dk

Forfattere

Majken Husted, Innovationscenter for Økologisk Landbrug
Morten Winther Vestenaa, Innovationscenter for Økologisk Landbrug

Finansiering

Promilleafgiftsfonden for landbrug.

Udarbejdelse af notatet

Forfatterne har i forbindelse med udarbejdelse af notatet indhentet viden fra relevante videnskabelige artikler.

Citeres som

Husted, M., 2025. Litteraturstudie over ikke-lineær udledning af lattergas. 9 sider.
Innovationscenter for Økologisk Landbrug.

Henvendelser vedr. notatet

Majken Husted, majh@icoel.dk

Forsidefoto

Lars Egelund Olsen, Innovationscenter for Økologisk Landbrug

Baggrund og metode

Der er søgt og samlet litteratur ved at søge efter artikler som indeholder ord der relaterer sig til lineær og ikke-lineær udledning af lattergas fra tilførsel af gødning. Der er søgt efter både primær litteratur og metaanalyser, og overlap i data kan derfor forekomme. Søgninger er gjort på Web-of-science og Google Scholar med følgende søgeordene: *Nonlinear, linear, Nitrous oxide, N₂O, exponential, fertilizer, review*.

Formålet med indsamlingen af data er undersøge hypotesen: Bør der indføres en ikke-lineær sammenhæng imellem gødsning med N-holdige gødninger i Danmark. Målet er derfor at samle litteratur som påviser enten lineær eller ikke-lineær udledning af lattergas ved tildeling af gødning, samt præsenterer teoretisk fundament for de to sammenhænge imellem gødsning og lattergasemission.

Hovedpointer

Der er en række faktorer som har betydning for hvorvidt lattergasudledningen stiger lineært, eller ikke-lineært med kvælstoftildelingen. Herunder er der opsummeret nogle af de væsentligste parametre som kan have betydning.

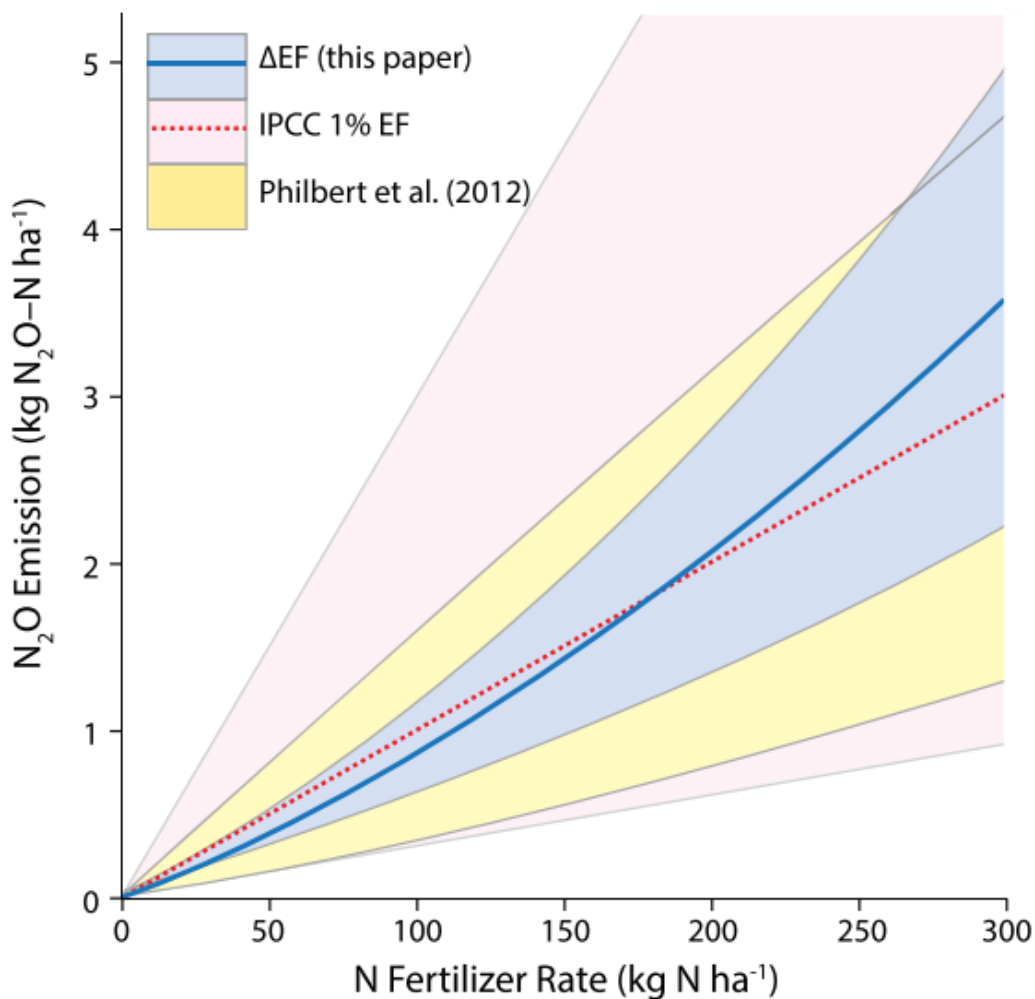
- Der er sandsynligvis en sammenhæng mellem afgrødens optag af kvælstof og risikoen for lattergasudledning. Når der tildeles kvælstof som, overstiger afgrødens behov, så er der en større andel af det tildelte kvælstof som ikke bliver udnyttet af afgrøden og som derfor kan give anledning til kvælstoftab, enten til luften eller som udvaskning.
- Kvælstoftildeling; ved hvor høj en kvælstoftildeling kan man forvente af lattergasudledningen ikke reagerer lineært. Herudover kan der være en effekt af hvorvidt kvælstoffet tildeles på én gang eller ved flere tildelinger i løbet af vækstsæsonen.
- Gødningstype; der er i studierne anvendt forskellige typer af gødning. Der kan være forskel mellem de forskellige typer af gødning og den kombination som de anvendes i.
- Afgrødeinteraktion; der kan være forskellige emissionsfaktorer ved forskellige kvælstoftildelinger afhængigt af afgrødens vækstperiode og optimale kvælstofoptag. Der kan fx være forskel mellem vår- og vinterkorn, samt forskel mellem enårige eller flerårige afgrøder.
- Kulstoftilgængelighed; denitrifikationen kræver kulstof. Da denitrifikationen er den proces som giver anledning til de største udledninger af lattergas, vil tilgængeligheden af kulstof i jorden have en betydning for lattergasudledningen. Dette kan enten være i form af kulstofindhold i jorden eller kulstof tilført med gødningen (fx husdyrgødning).
- Reaktionstal; pH værdi i jorden har betydning for dannelsen af lattergas. Lav pH giver højere lattergasudledning.

Sammendrag af indsigter fra litteraturstudiet

En metaanalyse af Shcherbak et al. (2014) analyserede resultater fra 78 publicerede studier, som hver inkluderede kvælstoftildelinger i mindst 3 niveauer, samt en kontrolbehandling uden kvælstoftildeling. Metaanalysen inkluderer også studier foretaget i Europa. På baggrund af disse studier, beregnede de emissionsfaktorer for lattergas. Som det kan ses i figur 1, så fandt de at emissionen af lattergas ikke steg lineært med kvælstoftildelingen. Der var en lavere lattergasudledning per kg tildelt kvælstof ved lavere kvælstoftildelinger og en højere lattergasudledning per kg tildelt kvælstof ved højere kvælstoftildelinger.

I figur 1 er resultatet af metaanalysen sammenlignet med IPCC's 1% emissionsfaktor for lattergas. Fra figuren kan man se at man ved tildelinger under ca. 180 kg total-kvælstof per hektar har en emission der er lavere end 1% af tildelt kvælstof, og en emission der er højere end 1% af tildelt kvælstof ved tildelinger højere end ca. 180 kg total-kvælstof per hektar. Der er i figuren ikke differentieret mellem

gødningstyper, men forfatterne noterer at " the N₂O response to N inputs grew significantly faster than linear for synthetic fertilizers and for most crop types".



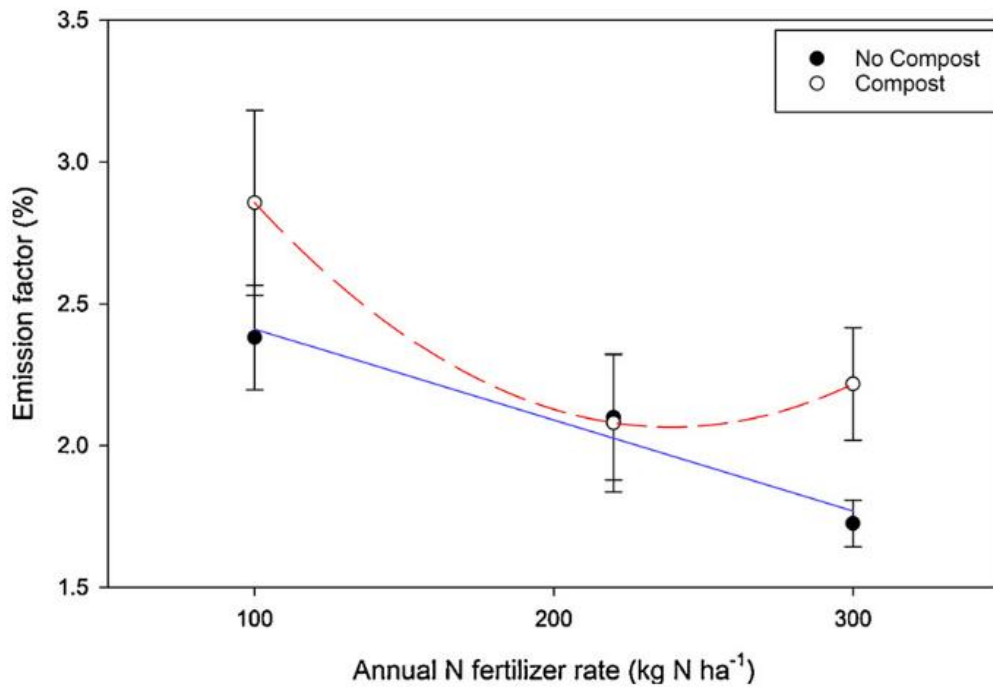
Figur 1: Ikke-lineær udledning af lattergas, sammenholdt med lineær udledning jf. IPCC emissionsfaktor. Kilde: Shcherbak et al., 2014.

Man kan da også se på figur 1, at usikkerheden for IPCC's emissionsfaktor på 1% har en betydelig usikkerhed tilknyttet (figur 1, lyserød markering). På figuren kan man også se at man ved at anvende en ikke-lineært stigende emissionsfaktor kan reducere usikkerheden (figur 1, blå markering). I tråd med dette konkluderer Philibert et al. (2012) at man ved at implementere en eksponentielt stigende emissionsfaktor kan reducere usikkerheden på IPCC's emissionsfaktor på 1% (figur 1, gul markering).

De fandt også en sammenhæng mellem kulstofindhold i jorden og lattergasudledning, samt pH og lattergasudledning. Emissionsfaktoren for lattergas var signifikant højere i jorde med et kulstofindhold over 1,5 % og i jorde med pH under 7. Der var også en sammenhæng mellem antallet af kvælstoftildelinger og emissionsfaktor, hvor de fandt at når man kun havde én tildeling af kvælstof havde en højere emissionsfaktor, end hvis den samme mængde kvælstof var tildelt over flere gange i løbet af afgrødens vækst.

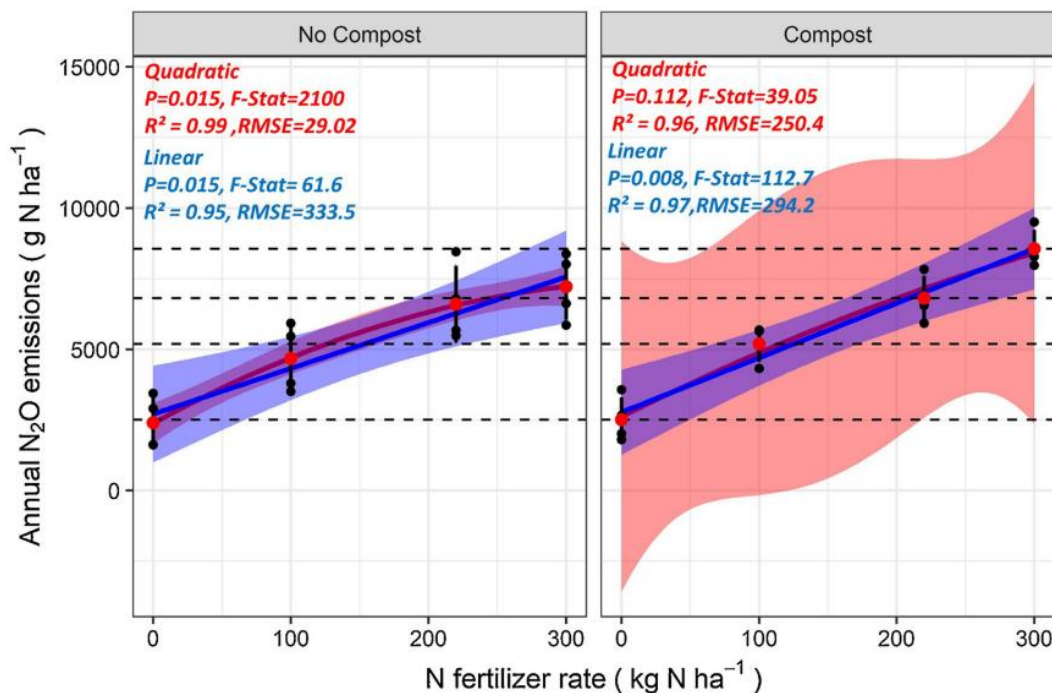
Et forsøg af Liyanage et al. (2020) i et tropisk dyrkningsystem i Sri Lanka tyder på at der kan være forskellig lattergasrespons under forskellige klimatiske forhold. I dette forsøg fandt de at emissionsfaktoren faldt med stigende kvælstoftildeling (figur 2, blå kurve). Men når de tildelte kvælstofgødning sammen med kompost, så de at emissionsfaktoren ved den højeste tildeling steg, relativt til en middel kvælstoftildeling (figur 2, rød kurve). Forskerne konkluderer i artiklen at lattergasudledningen i tropiske

systemer er begrænset af kulstoftilgængelighed. Der er således ikke kulstof nok tilgængeligt for mikroorganismene til at lave denitrifikation og dermed danne lattergas.



Figur 2: Emissionsfaktor relateret til N input i et tropisk system, med og uden tilførsel af kompost. Kilde: Liyanage et al., 2020.

Det er da heller ikke fordi lattergasudledningen ikke stiger med stigende kvælstoftildeling i forsøget (figur 3), men andelen af tildelt kvælstof som udledes som lattergas (emissionsfaktoren) er faldende med stigende kvælstoftildeling i dette forsøg.



Figur 3: Kumulative lattergasudledninger ved forskellige kvælstoftildelinger, med og uden kompost. Kilde: Liyanage et al., 2020.

Et studie under subtropiske dyrkningsforhold i sukkerrør fandt dog en eksponentielt stigende udledning af lattergas med stigende kvælstoftildeling (Takeda et al., 2021). De påpeger at der er et potentiale for at reducere kvælstoftildelingen og dermed mindske andelen af kvælstof som udledes som lattergas, uden udbyttetab. Et andet forsøg under subtropiske forhold med dyrkning af bomuld fandt ligeledes en ikke-lineær sammenhæng mellem kvælstoftildeling og lattergasudledning (Scheer et al., 2016).

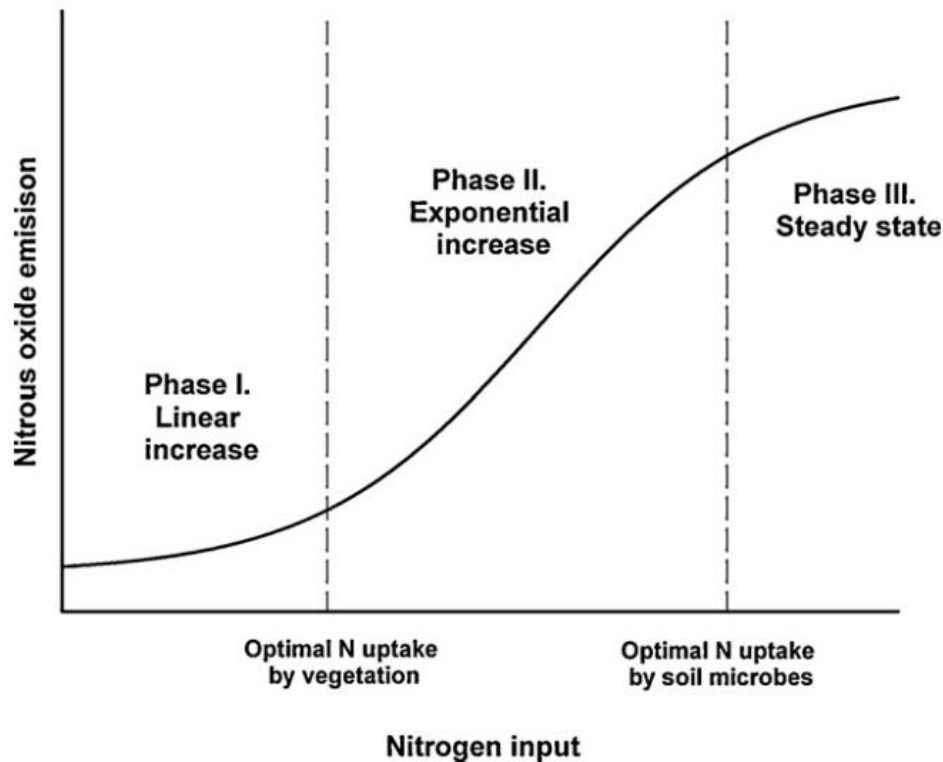
Albanito et al. (2017) fandt i et review en lineær sammenhæng mellem kvælstoftildeling og lattergasudledning i tropiske og subtropiske dyrkningssystemer. De fandt dog en forskel mellem de forskellige typer af handelsgødning som indgik i analysen.

Der er også set stigende emissionsfaktorer relativt til stigende kvælstoftildeling i grønsagssystemer i Kina, hvor grønsagerne dyrkes i intensive systemer i plastikdrivhuse (Ni et al., 2021). De fandt at et højt kulstofindhold i jorden, længere dyrkningsperiode, neutral pH og mere vanding øgede lattergasudledningen. Herudover så de også at en kombination af kunstgødning og husdyrgødning øgede lattergasudledningen, sammenlignet med når de to gødningstyper blev anvendt særskilt. Det skal her dog også bemærkes at der gødskes med signifikant højere mængder kvælstof end der anvendes i dansk landbrug.

Der er sandsynligvis en sammenhæng mellem afgrødens optag af kvælstof og risikoen for lattergasudledning. Når der tildeles kvælstof som overstiger afgrødens behov, så er der en større andel af det tildelte kvælstof som ikke bliver udnyttet af afgrøden og som derfor kan give anledning til kvælstoftab, enten til luften eller som udvaskning. Et amerikansk studie fandt da også at man ved tildelingen af kvælstof til majs, som oversteg afgrødens kvælstofbehov, havde et højere lattergastab per kg tildelt kvælstof, uden at der var en betydelig udbyttegevinst (McSwiney et al., 2005). I det aktuelle forsøg viste de at lattergasudledningen var relativt lav indtil kvælstoftildelingen nåede 134 kg N per hektar, hvorefter lattergasudledningen steg betragteligt. De fandt også at udbyttet steg indtil en tildeling på 101 kg N per hektar, hvorefter de ikke fik yderligere udbytte for den ekstra tildeling af kvælstof. De konkluderer således at man ved at reducere tildelingen til afgrødebehovet kan reducere udledningen, uden mærkbare konsekvenser for udbyttet.

En metaanalyse af Kim et al. (2013) har forsøgt at forklare hvorfor man i forskellige studier kan finde hhv. lineær, eksponentiel og hyperbolsk sammenhæng mellem kvælstoftilførsel og lattergasudledning. De har anvendt data fra 27 datasæt på verdensplan, hvor der er målt udledning af lattergas fra gødning. De observerede oftere ikke-lineær sammenhæng mellem tilført kvælstof og lattergasudledning; kun i 5 ud af de 27 datasæt fandt de en lineær sammenhæng mellem kvælstoftilførsel og lattergasudledning. De finder her at der er en sammenhæng imellem hvor størrelsen på kvælstoftildelingen og forekomsten af en lineær eller ikke-lineær sammenhæng mellem kvælstoftildeling og lattergasudledning. I de studier hvor forfatterne fandt en lineær sammenhæng, var der undersøgt tildelingen på op til 400 kg N per hektar, og i studier hvor man fandt en ikke-lineær sammenhæng var der undersøgt tildelingen på op til 490 kg N per hektar. Undersøgelsen er lavet på tværs af afgrødetyper, hvor der er store forskelle i kvælstoftildelingen. I de to studier med tilførsel af op til hhv. 400 og 490 kg N per hektar, var det et forsøg i græs.

På baggrund af metaanalysen i Kim et al. (2013) er der defineret nogle hypoteser for forholdet mellem kvælstoftilførsel og lattergasudledning. De opdeler responsen for lattergas på kvælstoftildeling i tre på hinanden følgende faser, ved at anvende optimalt kvælstof optag i både afgrøde og mikroliv i jorden som grænser.

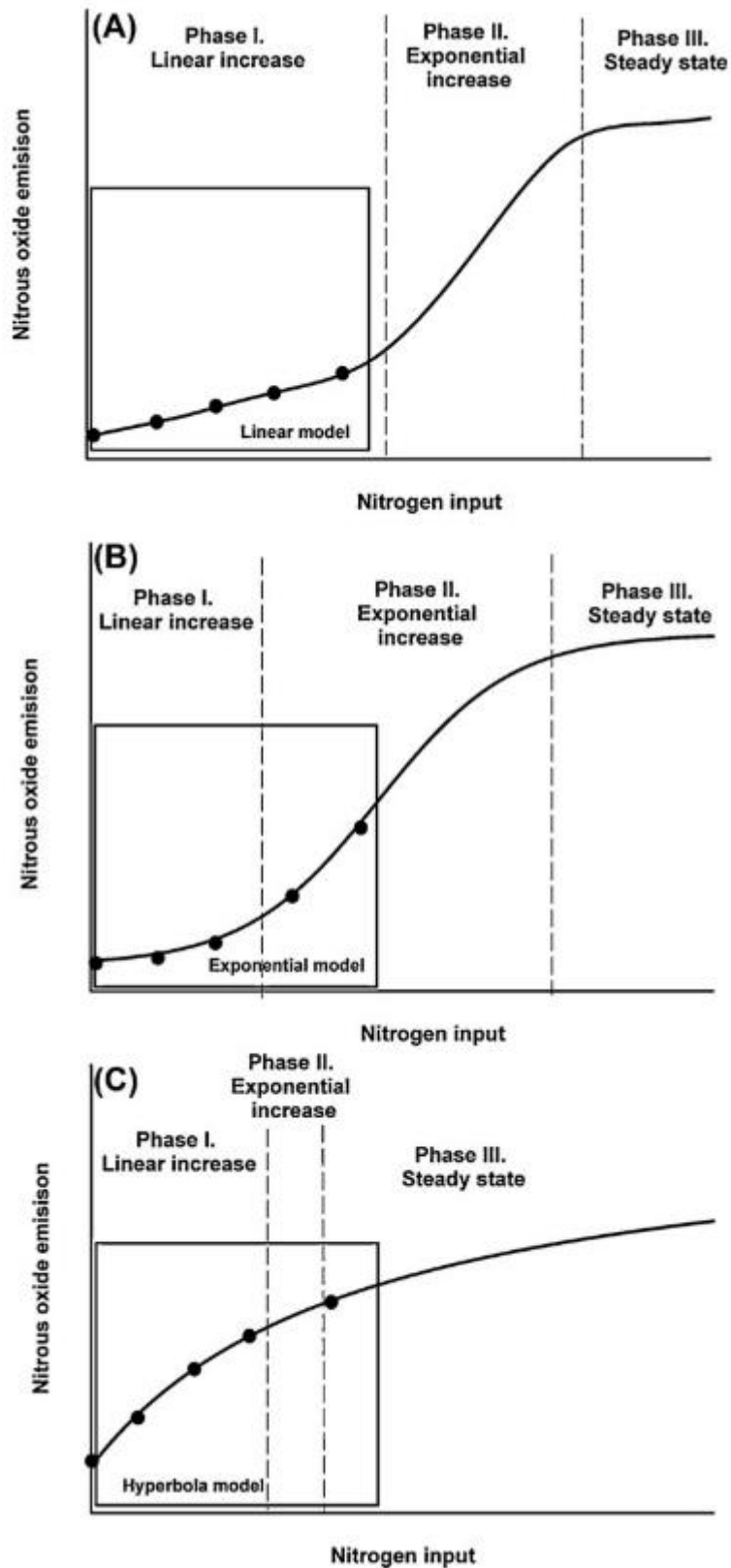


Figur 4: Hypotetisk fremstilling af variationen i direkte lattergasudledning ved øget kvælstofinput. Kilde: Kim et al., 2013.

I fase 1 forbruges det tilførte kvælstof af afgrøde og mikrober og lattergasudledningerne bliver primært styret af konkurrencen mellem afgrøde og mikrober om det tilgængelige kvælstof. I denne fase vil lattergasudledningerne derfor stige lineært med den stigende kvælstoftildeling. Herefter, når kvælstoftilførslen overstiger afgrødens optimale kvælstofoptagelsesrate, vil man se eksponentiel stigning i udledningen af lattergas, fordi lattergasproduktionen i jorden stiger hurtigt med den stigende overskydende kvælstoftilførsel (fase 2). Til sidst, når kvælstoftilførslen fortsætter med at stige gradvist ud over mikrobernes kapacitet til at udnytte kvælstoffet, vil produktionen af lattergas aftage og til sidst nå et stabilt niveau (fase 3). Dette er illustreret i figur 4.

Med udgangspunkt i faserne illustreret i figur 4, har forfatterne illustreret hvad der sandsynligvis sker i tilfælde hvor man finder hhv. lineær, eksponentiel og hyperbolsk sammenhæng mellem kvælstoftildeling og lattergasudledning. Dette er illustreret i figur 5 (Kim et al., 2013). Det handler således om, om man med de undersøgte kvælstoftildelinger i et forsøg med lattergasmålinger dækker de 3 faser, som beskrevet tidligere. Her er det også vigtigt at være opmærksom på, at hvordan faserne inddeler sig ift. kvælstoftildeling kan variere med afgrøde, klimatiske forhold og jord.

Ifølge forfatterne til Kim et al. (2013) vil man i de tilfælde hvor man ser en lineær sammenhæng mellem kvælstoftildeling og lattergasudledning, ikke have tildelt mere kvælstof end afgrøde og mikrober kan udnytte (figur 5A). En eksponentiel sammenhæng vil man se når der tildeles kvælstof i mængder som overstiger afgrødens kapacitet til at optage kvælstof (figur 5B). Men ved kvælstoftildelinger der overstiger afgrødens kapacitet til at optage kvælstof, kan man dog også se lineære sammenhænge. Dette skyldes interaktioner med jordens kulstof og kvælstofindhold som kan begrænse lattergasudledningen. I tilfælde hvor afgrødens og mikrobernes niveau for optimalt kvælstofoptag ligger tæt på hinanden vil fase 2 med en eksponentielt stigende lattergasudledning være meget lille og ikke kunne identificeres. Man vil i stedet se en stejl lineær stigning som går mod et stabilt niveau (figur 5C).



Figur 5: Hypotetiske diagrammer som forklarer lineær (A), eksponentiel (B) og hyperbolsk (C) respons for lattergasudledning ved øget tilførsel af kvælstof. Kilde: Kim et al., 2013.

Referencer

- [1] Albanito, F., Lebender, U., Cornulier, T., Sapkota, T. B., Brentrup, F., Stirling, C., & Hillier, J. (2017). Direct nitrous oxide emissions from tropical and sub-tropical agricultural systems—a review and modelling of emission factors. *Scientific reports*, 7(1), 44235.
- [2] Liyanage, A., Grace, P. R., Scheer, C., de Rosa, D., Ranwala, S., & Rowlings, D. W. (2020). Carbon limits non-linear response of nitrous oxide (N₂O) to increasing N inputs in a highly-weathered tropical soil in Sri Lanka. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 292, 106808.
- [3] Takeda, N., Friedl, J., Rowlings, D., De Rosa, D., Scheer, C., & Grace, P. (2021). Exponential response of nitrous oxide (N₂O) emissions to increasing nitrogen fertiliser rates in a tropical sugarcane cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 313, 107376.
- [4] 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.
- [5] Kim, D. G., Hernandez-Ramirez, G., & Giltrap, D. (2013). Linear and nonlinear dependency of direct nitrous oxide emissions on fertilizer nitrogen input: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 168, 53-65.
- [6] Ni, B., Zhang, W., Xu, X., Wang, L., Bol, R., Wang, K., ... & Meng, F. (2021). Exponential relationship between N₂O emission and fertilizer nitrogen input and mechanisms for improving fertilizer nitrogen efficiency under intensive plastic-shed vegetable production in China: A systematic analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 312, 107353.
- [7] Scheer, C., Rowlings, D. W., & Grace, P. R. (2016). Non-linear response of soil N₂O emissions to nitrogen fertiliser in a cotton–fallow rotation in sub-tropical Australia. *Soil Research*, 54(5), 494-499.
- [8] Hoben, J. P., Gehl, R. J., Millar, N., Grace, P. R., & Robertson, G. P. (2011). Nonlinear nitrous oxide (N₂O) response to nitrogen fertilizer in on-farm corn crops of the US Midwest. *Global Change Biology*, 17(2), 1140-1152.
- [9] McSwiney, C. P., & Robertson, G. P. (2005). Nonlinear response of N₂O flux to incremental fertilizer addition in a continuous maize (*Zea mays* L.) cropping system. *Global Change Biology*, 11(10), 1712-1719.
- [10] Philibert, A., Loyce, C., & Makowski, D. (2012). Quantifying uncertainties in N₂O emission due to N fertilizer application in cultivated areas. *PLoS One*, 7(11), e50950.