

Notat om det tidslige forløb af kvælstoffrigivelse ved omsætning af organiske gødninger i jord

Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet

Peter Sørensen

Institut for Agroøkologi



Datablad

Titel:	Notat om det tidlige forløb af kvælstoffrigivelse ved omsætning af organiske gødninger i jord
Forfatter(e):	Professor Peter Sørensen, Institut for Agroøkologi, AU
Fagfællebedømmelse:	Professor Sven G Sommer, Institut for Bio- og kemiteknologi, AU
Kvalitetssikring, DCA:	Chefkonsulent Louise Dybdahl Pedersen, DCA Centerenheden, AU
Rekvirent:	SEGES Innovation P/S.
Dato for bestilling/levering:	01.01.2025 / 30.01.2026
Journalnummer:	2026-0935748 / 2025-0831567
Finansiering:	Notatet er udarbejdet som del af et samfinansieret forskningsprojekt med titlen "Fastsættelse af kvælstofbehov i fremtidens udledningsbaserede kvælstofregulering" under ledelse af SEGES Innovation og finansieret af Planteafgiftsfonden. Projektet hører under rammeaftalen om samfinansierede forsknings- og udviklingsprojekter mellem Aarhus Universitet og SEGES Innovation P/S.
Ekstern kommentering:	Der har været afholdt et fælles møde mellem AU, SEGES Innovation P/S og Københavns Universitet (KU), hvor et tidligt udkast til de to notater fra AU og KU blev fremlagt og drøftet med henblik på koordinering af indhold og den overordnede disposition. Drøftelserne medførte ikke ændringer i notatets disposition.
Eksterne bidrag:	Nej
Kommentarer til besvarelse:	Ingen Notatet præsenterer resultater, som ved notatets udgivelse ikke har været i eksternt peer review eller er publiceret andre steder. Ved en evt. senere publicering i tidsskrifter med eksternt peer review vil der derfor kunne forekomme ændringer.
Citeres som:	Sørensen P. 2026. Notat om det tidlige forløb af kvælstoffrigivelse ved omsætning af organiske gødninger i jord . Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet. 27 sider. Leveret: 30.01.2026.
Foto forside:	Fotograf: Peter Sørensen. Slangeudlægning af gylle i voksende afgrøde.
Rådgivning fra DCA:	Læs mere på https://dca.au.dk/raadgivning/

Sammendrag

Dette notat sammenfatter den eksisterende viden om det tidlige forløb for frigivelse og omsætning af kvælstof (N) fra organiske gødninger under danske forhold. Umiddelbart efter tilførsel af de fleste organiske gødninger sker der en mikrobiel immobilisering af kvælstof, der senere følges af en fase med en høj frigivelsesrate. Efter 2-3 måneder svarer mængden af tilgængeligt N omtrent til det oprindelige indhold af ammonium-N i gødningen, hvis ammoniaktab er ubetydelige. Dette gælder dog ikke for afgassede gødninger, hvor fasen med immobilisering er ubetydelig, og her ses ofte en nettofrigivelse af organisk bundet N indenfor 2-3 måneder kombineret med en højere ammonium-N andel ved tilførslen.

Den potentielle førsteårsvirkning kan forudsiges ud fra gødningers C/N-forhold og ofte giver ammonium-N/total N-forholdet også en god indikation af førsteårsvirkningen. Førsteårsvirkningen er påvirket af interaktioner mellem jordtype og fordeling af gødningen i jorden, og oftest ses en lavere frigivelse med stigende lerindhold i jorden. Tilsvarende ses også en lavere frigivelse af residual N i de følgende år med stigende lerindhold i jorden.

Samlet vurderes den empiriske model beskrevet af Sørensen *et al.* (2017) at give et godt estimat for frigivelsen af organisk bundet kvælstof fra svine- og kvæggødning over de første 5 år efter tilførsel, og der kan med god tilnærmelse anvendes samme mineraliseringsforløb for organisk N i gylle og fast gødning fra samme dyreart. Dog kan et højt indhold af halm, som i dybstrøelse, forventes at forsinke N-frigivelsen. Afgasning øger førsteårsvirkningen, men reducerer tilsvarende eftervirkningen i de følgende år.

Frigivelsen af kvælstof har betydning for nitratudvaskningen, idet mineraliseringen forløber over hele året inklusive perioder uden afgrødevækst, der ellers kan opsamle det frigivne kvælstof. Der ses derfor en betydelig højere andel af mineraliseret kvælstof, der udvaskes, i forhold til kvælstof tilført med gødninger om foråret. Andelen af mineraliseret kvælstof, der udvaskes, er dog meget afhængigt af bevoksningen i efterårs- og vinterperioden. Tilstedeværelsen af efterafgrøder eller permanent vegetation reducerer denne risiko markant. Andelen af tilført kvælstof der udvaskes fra mineralsk og organisk N tilført om foråret er omtrent ens i det første år og relativ lav (under 10%), på trods af at kun en mindre del af det organiske N frigives og er tilgængeligt i første år. Til gengæld sker en betydelig del af frigivelsen efter høst af afgrøderne, hvorved en stor andel af det frigivne N potentielt kan udvaskes.

Summary

This note describes the temporal release of nitrogen after application of organic fertilizers to agricultural soil under temperate humid conditions, like in Denmark. Nitrogen release from organic fertilizers results from complex biological and chemical processes involving both mineral and organically bound nitrogen. A variable proportion of applied nitrogen occurs as ammonium-N, which is immediately plant-available, whereas organically bound nitrogen contributes to plant nutrition after microbial turnover and mineralisation. The temporal dynamics of these processes are critical for determining fertilizer efficiency, nitrogen use efficiency, and the risk of nitrogen losses to the environment.

Immediately following application of most organic fertilizers, microbial immobilisation of nitrogen occurs, primarily affecting ammonium-N, due to enhanced microbial activity associated with the decomposition of readily degradable organic substrates. This phase is subsequently followed by a period of increased net mineralisation, during which nitrogen is released both from microbial biomass turnover and from the continued breakdown of organically bound nitrogen. Under conditions with negligible ammonia losses, the amount of plant-available nitrogen after approximately two to three months typically corresponds to the initial ammonium-N content of the fertilizer. In contrast, digestates from anaerobic digestion exhibit little or no initial immobilisation, and a net release of organically bound nitrogen may occur already within the first growing season.

The first-year nitrogen fertilizer value of organic amendments is closely related to their chemical composition, particularly the C/N ratio and the proportion of ammonium-N. In general, fertilizer efficiency declines with increasing C/N ratio, while a high ammonium-N content is associated with greater immediate nitrogen availability. Soil type and the spatial distribution of the fertilizer within the soil profile also exert a strong influence. Increasing clay content generally reduces mineralisation rates and plant nitrogen uptake, and thorough mixing of organic fertilizers with soil tends to enhance microbial immobilisation compared with more concentrated placement, such as band application or injection.

The organically bound nitrogen fraction contributes to a substantial residual effect in subsequent years. Long-term field studies and empirical modelling indicate that a considerable proportion of organic nitrogen is mineralised during the first two to three years after application, after which the release rate declines but continues at lower levels for several additional years. Mineralisation patterns are broadly similar for slurry and solid manure derived from the same animal species, whereas fertilizers with a high straw content are characterised by slower nitrogen release. Anaerobic digestion increases the first-year fertilizer value but is accompanied by a corresponding reduction in residual nitrogen availability in later years.

Nitrogen mineralisation proceeds throughout the year and therefore has important implications for nitrate leaching risk. Although nitrate leaching losses from spring-applied mineral and organic nitrogen are generally low and of similar magnitude during the first year, a substantial share of nitrogen mineralised after harvest may be leached during periods without active crop uptake. The presence of catch crops or permanent vegetation significantly reduces this risk by improving nitrogen retention during autumn and winter.

Baggrund

Dette rådgivningsnotat er udarbejdet på baggrund af det samfinansierede forskningsprojektet "Fastsættelse af kvælstofbehov i fremtidens udledningsbaserede kvælstofregulering".

Projektet er et samarbejde mellem Institut for Plante- og Miljøvidenskab, Københavns Universitet (KU-PLEN), Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet (AU-Agro) og SEGES Innovation (projektleder: Julie T. Christensen, SEGES Innovation). KU-PLEN og AU-Agro udarbejder separate, men koordinerede notater jf. nedenstående.

Formålet med projektet er at udarbejde en beskrivelse af det tidlige forløb af kvælstoffrigivelse ved omsætning af organisk stof tilført jord i form af organiske gødninger og planterester. Herunder at beskrive hvilke forhold med hensyn til jordtyper, klima mv., der påvirker denne omsætning. Dette notat omhandler frigivelse af kvælstof fra organiske gødninger, mens Jensen & Schwarzkopff (2026) behandler frigivelsen af kvælstof fra planterester og visse organiske gødninger.

Indhold

Sammendrag	3
Summary.....	4
Baggrund	5
Indhold.....	6
1. Introduktion.....	7
2. Kvælstoffer i organiske gødninger	7
3. Omsætning af kvælstof efter tilførsel af organisk gødning	8
4. Forsøg med mærket N (^{15}N isotop).....	10
5. Kvælstoffrigivelse til første afgrøde.....	12
5.1 Samspil mellem gødningens fordeling i jorden og jordtypen.....	12
5.2 Betydning af C/N-forhold for N-frigivelse.....	14
5.3 Effekter af omsætning i biogasanlæg	16
6. Gødningsvirkning første år (1. afgrøde).	17
6.1 Relationer mellem målt N-mineralisering uden planter og gødningsvirkning	17
7. Kvælstoffrigivelse efter høst af første afgrøde og i de følgende år	19
7.1. Model til beskrivelse af kvælstoffrigivelsen	19
7.2 Kvælstoffrigivelse målt i udenlandske undersøgelser	20
7.3 Effekt af afgasning af gødning	22
7.4 Effekt af afgrøde og jordtype på udnyttelsen af residual N	22
8. Udvaskning af nitrat fra tilført mineralsk og organisk N	23
Referencer.....	26

1. Introduktion

På dansk landbrugsjord tilføres ca. halvdelen af det tilførte kvælstof (N) med organiske gødninger, mens resten af N-tilførslen sker med mineralske gødninger (Sommer & Knudsen, 2021). Derudover er der et input af kvælstof fra luften via kvælstoffikserende afgrøder. De organiske gødninger indeholder både mineralsk N og organisk bundet N i varierende forhold, og det organisk bundne N skal først frigives som mineralsk N, før det kan udnyttes af planter. Det sker ved omsætning/nedbrydning af det organiske materiale som kvælstoffet er bundet til. Kendskab til andelen af organisk bundet N i gødningen og til det tidsmæssige forløb af omsætningen heraf er derfor vigtigt for at kunne vurdere gødningsvirkningen, samt for en vurdering af hvornår der er risiko for tab af N til miljøet. Vurdering af gødningsvirkningen kompliceres af, at der oftest sker en mikrobiel binding af N umiddelbart efter tilførsel af organiske gødninger til jorden

Dette notat beskriver kvælstoffrigørelsen over tid for forskellige typer af organisk gødning, der tilføres jord på baggrund af tidligere undersøgelser og publikationer. Det tidsmæssige forløb er beskrevet med udgangspunkt i normale tilførselstidspunkter til jorden, hvilket for husdyrgødning typisk sker ved udbringning om foråret, men også kan finde sted hen over sommeren til det tidlige efterår. Der er fortrinsvis taget udgangspunkt i danske undersøgelser samt undersøgelser fra lande omkring Danmark.

Betydningen af vigtige egenskaber ved gødningen med betydning for tidsforløbet for kvælstoffrigørelsen, som f.eks. C/N-forholdet, er nærmere beskrevet, ligesom betydningen af andre faktorer som tilførselsesmetode, jordtype og klima er beskrevet. Gødningsvirkningen af det frigivne kvælstof kvantificeres normalt ved angivelse af hvor meget tilført kvælstof i mineralsk gødning, det kan erstatte.

Ammoniaktab efter udbringningen af organiske gødninger har også afgørende betydning for N-virkningen i det første år, men denne faktor er ikke nærmere behandlet i dette notat.

2. Kvælstofformer i organiske gødninger

Kvælstof i organiske gødninger findes hovedsagligt som **ammonium-N** og **organisk bundet N**. Normalt er nitratindholdet i organiske gødninger meget lavt, hvilket skyldes, at nitrat denitrificeres under anaerobe eller delvis anaerobe forhold, som normalt opstår under lagringen af gødningen. I kompost kan der efter lang tids omsætning forekomme nitrat. Det organisk bundne N findes i en bred vifte af organiske stoffer, med meget varierende omsættelighed. Specielt kan organisk bundet N, der har været igennem en drøvtygger uden at blive fordøjet, have en meget lav omsættelighed (Sørensen & Jensen, 1998). I tabel 1 er angivet gennemsnitligt andel af ammonium-N i forhold til total N i gængse typer organisk gødning. I fjerkrægødning findes en del kvælstof som urinsyre, der er let omsætteligt i jord, og også kan omsættes til ammonium under lagring af gødningen.

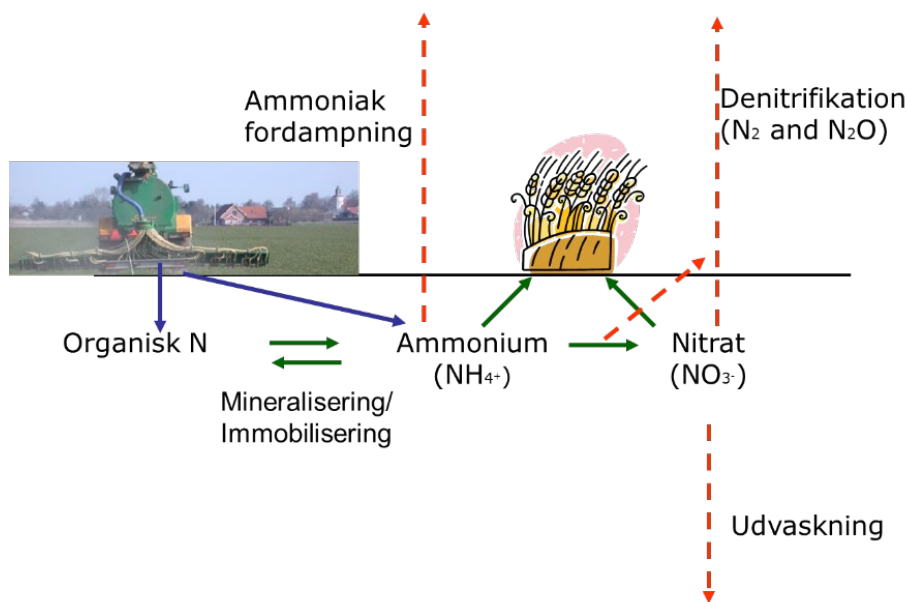
Tabel 1. Andel af ammonium-N i forhold til total N vurderet for organiske gødningstyper, der indgår i de nuværende gødningsregnskaber (fra Sørensen & Børgesen, 2025).

Gødningstype	Andel af mineralsk N (% af total N)
Svinegylle	75
Kvæggylle	60
Fjerkrægylle	80
Dybstrøelse (kvæg og svin)	20
Dybstrøelse (fjerkræ) og anden husdyrgødning (fjerkræ)	60 ^a
Fiberfraktion efter forarbejdning	25
Væskefraktion efter forarbejdning	70
Ajle	85
Afgasset biomasse	65
Komposteret husdyrgødning fra fællesanlæg	5

a) Inkluderer indhold af urinsyre- N i fjerkrægødning.

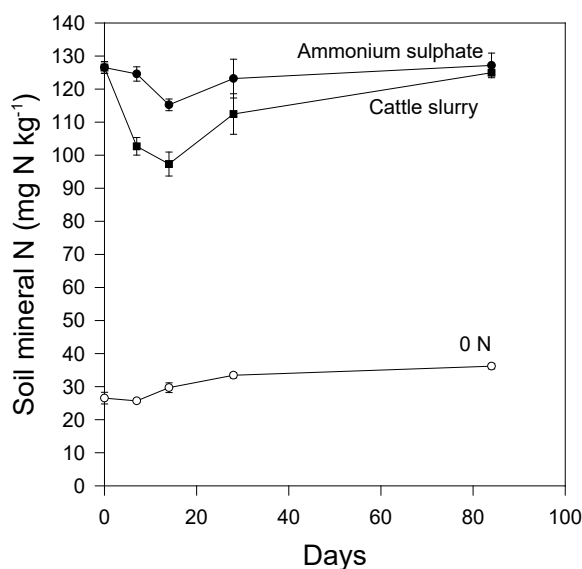
3. Omsætning af kvælstof efter tilførsel af organisk gødning

Umiddelbart efter tilførsel af organisk gødning til jorden sker der en opblomstring af jordens mikroorganismer i forbindelse med at omsætteligt organisk materiale nedbrydes, og omsættes til vækst af mikroorganismene med et relativt højt indhold af kvælstof. Dette medfører en forøget mikrobiel binding af uorganisk kvælstof, også kaldet for **N-immobilisering**. Kvælstofbindingen sker primært fra den ammonium-N, der er i den tilførte organiske gødning. Samtidigt sker der en frigivelse af mineralsk kvælstof ved omsætningen af organisk bundet kvælstof i gødningen, også kaldet **N-mineralisering**. Forskellen mellem de to samtidige processer N-mineralisering og N-immobilisering betegnes som **nettomineraliseringen**, illustreret i figur 1. I de første uger efter tilførsel af organisk gødning er N-immobiliseringen normalt større end N-mineraliseringen og det betyder, at der de første uger efter tilførsel netto er mindre kvælstof tilgængeligt end det tilførte ammonium-N i gødningen, selv under forhold uden ammoniaktab. Kvælstof optages normalt af planterne på mineralsk form (ammonium og nitrat), selvom det også er påvist at planter kan optage N i simple organiske forbindelser som frie aminosyrer. Normalt når jordens mikroorganismer dog at nedbryde eller assimilere frie aminosyrer inden de når planterødder, hvor de kan optages.



Figur 1. De vigtigste kvælstofomsætnings- og tabsprocesser i jorden efter tilførsel af organisk gødning. Organisk N inkluderer både N bundet i levende organismer og N bundet i dødt organisk materiale i jord og tilført gødning.

Når de første ugers nedbrydning af gødningen er overstået, sker der en betydelig øgning af nettomineraliseringen af N, både ved at mikroorganismer dør og nedbrydes og ved fortsat nedbrydning af organisk materiale i gødningen. Det betyder, at netto-frigivelsen af mineralsk N fra husdyrgødningen efter 2-3 måneder ofte svarer til den oprindeligt tilførte mængde ammonium-N i gødningen (figur 2). Dermed kan man forvente en gødningsvirkning i den første afgrøde omtrent svarende til ammoniumindholdet i gødningen, når ammoniaktab undgås. Med andre ord betyder det, at der ikke sker nogen netto-mineralisering fra det tilførte organiske kvælstof i de første ca. 3 måneder på trods af en betydelig N-omsætning. Det frigivne kvælstof kan erstatte brug af N i handelsgødning. Da N i gylle findes i opløst form i en relativ stor væskemængde, vil det være hurtigere tilgængeligt for optagelse i rødder end ved tilførsel af granuleret handelsgødning, der først skal opløses af jordvand eller af nedbør og derefter fordeles ud i jordvæsken, før det kan optages. En mindre andel af det tilførte ammonium-N i husdyrgødning, der immobiliseres i starten, bliver dog først tilgængeligt senere i vækstperioden.



Figur 2. Mineralsk N målt i fugtig jord uden planter over 12 uger efter tilførsel af samme mængde ammonium-N (100 mg N/ kg jord) i enten kvæggylle eller mineralsk gødning (ammoniumsulfat) under forhold med minimalt ammoniaktab og sammenlignet med jord uden N-tilførsel (0N) (fra Sørensen, 2004).

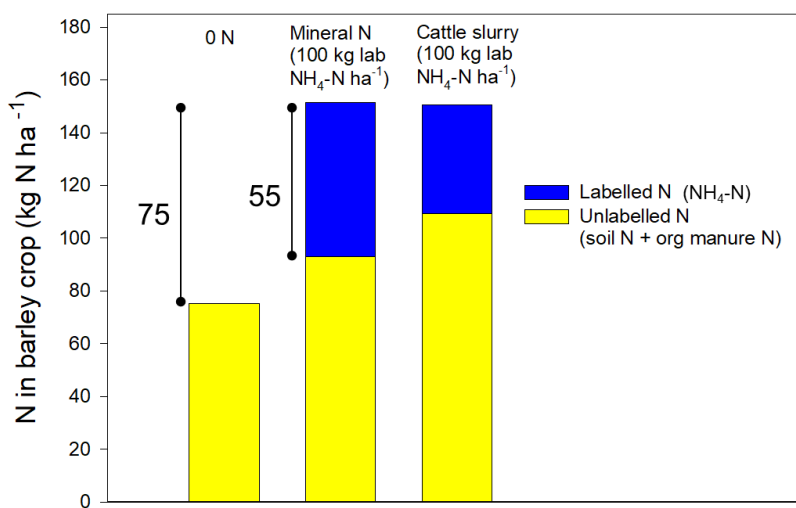
4. Forsøg med mærket N (^{15}N isotop)

Man kan mærke kvælstof i både handelsgødning og husdyrgødning ved at berige tilført kvælstof med den stabile kvælstof-isotop ^{15}N . Det fungerer som en tracer, der kan genfindes i planter, jord, gasser eller i udvasket kvælstof. Undersøgelser med ^{15}N har været vigtige for at forstå processerne for omsætning af kvælstof. Desuden giver anvendelsen af ^{15}N mulighed for at følge omsætningen og frigivelsen af kvælstof i tilført materiale over en længere årrække i markforsøg, hvilket ellers ikke er muligt. Der er lavet undersøgelser med mærkning af enten ammonium-N delen i husdyrgødning (f. ex. Sørensen & Amato, 2002; Sørensen, 2004), mærkning af total N i gødning eller mærkning af henholdsvis N fra urin og fra fæces (Jensen *et al.*, 1999; Sørensen & Jensen, 1998; Sørensen & Thomsen, 2005).

Ved tolkning af forsøg med ^{15}N er det vigtigt at være opmærksom på at optagelsen af mærket kvælstof i en afgrøde ikke er synonym med nettovirkningen af gødningen. Det skyldes, at der kan ske såkaldte isotop-ombytninger (Mary *et al.* 1996). En vigtig årsag hertil er, at jordens mikroorganismer foretrækker at optage ammonium frem for nitrat, hvilket f.eks. kan betyde, at mikroorganismene optager tilført mærket ammonium-N fremfor det kvælstof, der allerede findes i jorden som nitrat (Sørensen, 2001). Senere, når ammonium er omdannet til nitrat, sker optagelsen også fra den umærkede N-pulje i jorden. Betydningen heraf er illustreret i figur 3 baseret på et forsøg i marken med tilførsel af 100 kg N/ha i ^{15}N -mærket ammonium-N i henholdsvis ammoniumsulfat (svovlsur ammoniak) eller i nedfældet kvæggylle før såning af vårbyg (Sørensen, 2004). Kvælstofoptagelsen i kerne + halm blev sammenlignet med ugødet vårbyg. I forholdet til

ugødet vårbyg var der et øget N-optag på 75 kg N/ha, både ved tilførsel af 100 kg N/ha i mineralsk gødning og ved tilførsel af kvæggylle, svarende til en udnyttelse på 75% for handelsgødningen. Der fandtes imidlertid kun 55% af den mærkede N i den mineralske gødning i den høstede afgrøde, men til gengæld var der en øget optagelse af umærket N fra jorden på 20 kg N/ha i forhold til ugødet. Dette må især tilskrives ovennævnte effekt af, at mikroorganismerne foretrækker ammonium-N. Måske har gødskningen også øget vårbyggens rodsystem og dermed også øget optagelsen af umærket N fra jorden. Efter tilførsel af kvæggylle blev kun genfundet 40% af det mærkede kvælstof fra ammonium i afgrøden, men til gengæld var der en yderligere optagelse af umærket N, der stammede dels fra jorden og dels fra omsætning af organisk bundet N i den tilførte gylle. Igen kan den lave optagelse af mærket N tilskrives mikrobiel immobilisering.

Ovenstående illustrerer, at man skal være varsom med at sidestille en målt optagelse af mærket kvælstof i tilført gødning til nettofrigivelsen af N fra den tilførte gødning i tilførselsåret. På trods heraf giver anvendelsen af isotoper os en viden, som det ellers er vanskeligt at opnå, især omkring de langvarige effekter af tilført gødning. Det kan antages, at effekten af isotopombytning er ubetydelig for omsætning og optagelse af ^{15}N , der frigives ved mineralisering i årene efter tilførsel, idet produktet ved mineralisering af organisk bundet N er ammonium-N uanset om det stammer fra jordens N-pulje eller fra mærket organisk N.



Figur 3. Optagelse af mærket og umærket N i vårbyggerne plus -halm efter tilførsel af 100 kg N/ha i mærket ammonium-N med enten mineralsk gødning (ammoniumsulfat) eller kvæggylle (184 Kg total N/ha) sammenlignet med parcel uden N tilførsel (0N). Data fra Sørensen (2004).

5. Kvælstoffrigivelse til første afgrøde

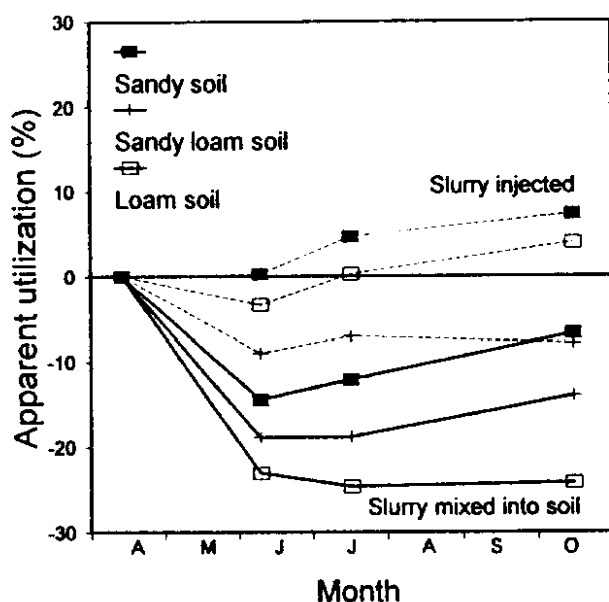
5.1 Samspil mellem gødningens fordeling i jorden og jordtypen

Frigivelsen af kvælstof i første år efter tilførsel af organisk gødning er både afhængig af gødningens sammensætning, af gødningens fordeling i jorden og af jordtypen. Dette kompliceres af et samspil mellem fordelingen af gødningen i jorden og jordtypen, og gødning fordelt klumpvis i jorden vil have mindre kontakt og interaktion med jordens aggregater end gødning, der er godt opblandet med jorden. Desuden har gødningens tørstofindhold betydning for gødningens infiltration i jorden. Under markforhold vil gødningen altid ligge klumpvis i jorden, men praktiske markforsøg har dog vist, at der kan være betydende forskelle mellem nedfældet gylle, der er placeret i koncentrerede bånd, og gylle, der er nedharvet eller nedpløjet, og dermed bedre opblandet med jorden (Sørensen *et al.*, 2003a).

Generelt set falder tilgængeligheden af kvælstof med stigende lerindhold i jorden, og tilgængeligheden falder også med øget opblanding med jorden. Effekterne af jordtype og gyllefordeling er illustreret i figur 4, der viser den relative N-udnyttelse af ammonium-N i kvæggylle i forhold til samme mængde N i ammoniumsulfatgødning, og en værdi på nul betyder ens N-optagelse i italiensk rajgræs ved tilførsel af samme mængde $\text{NH}_4\text{-N}$ med ammoniumsulfat og kvæggylle. Udnyttelsen for N tilført i mineralsk N var i dette forsøg tæt på 100%, hvilket betyder, at det også kan antages at tilgængeligheden af N i gylle svarede til N-optagelsen i høstet græs. Forsøget repræsenterer ekstremer for både lerindhold i jord under danske forhold (4,5%-26% ler) og for graden af opblanding af gylle med jord. Ved fuld opblanding af kvæggylle med 10 cm jord kan estimeres, at der ved sidste høst i oktober var en netto-binding af N svarende til 7% af tilført ammonium-N i kvæggylle i sand, 14% i ler og 24% i svær lerjord (Sørensen & Jensen, 1995). Ved minimal opblanding var der derimod en netto-frigivelse svarende til 7% af ammonium-N i sand og 4% i svær lerjord, men stadig en netto-binding på 8% i lerjorden.

Forsøget i figur 4 illustrerer, at der sker en relativ begrænset frigivelse af N fra forårs-tilført kvæggylle i perioden fra midt juli til sidste græsklip midt oktober, idet det ekstra N-optag i græs fra gyllen i denne periode svarede til 0-5% af tilført ammonium-N eller 0-11% af det organiske N i kvæggyllen. Kvæggyllen i forsøget havde en relativ høj andel af ammonium-N på 69% af total N.

En nyere undersøgelse ved AU har vist, at fordelingen af gylle i jorden under markforhold også kan have betydning for N-virkningen. Ved en direkte sammenligning af nedfældning af gylle før og efter pløjning fandtes en øget gødningsværdi på 2-9% point i vårbyg ved nedfældning efter pløjning (Tabel 2, Peter Sørensen, upublicerede data). Det kan dels forklares som en placerings-effekt og muligvis kan det også forklares ved en øget opblanding med jord ved nedfældning før pløjning. Ved nedfældning efter pløjning sker der ingen ændringer i gyllestrengens placering i jorden.



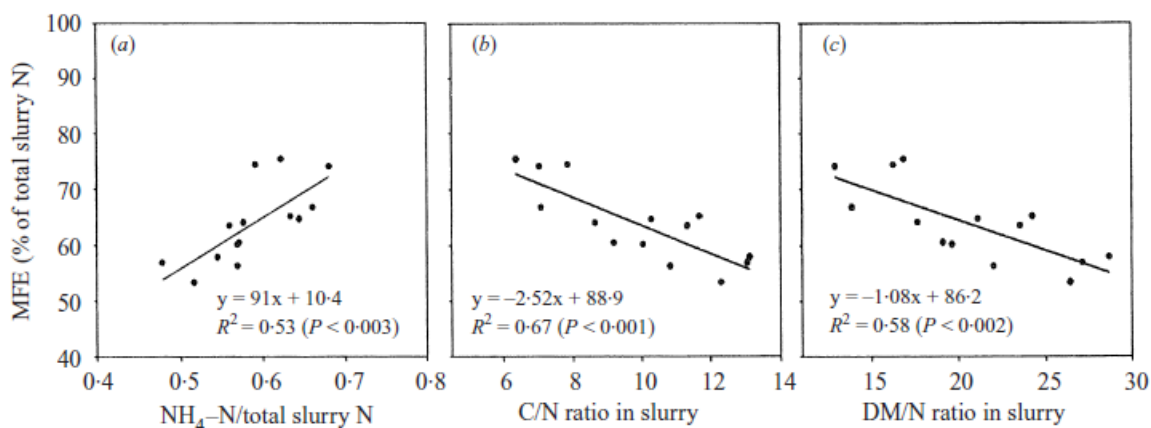
Figur 4. Relativ ekstra udnyttelse af ammonium-N i tilført kvæggylle i forhold til samme mængde N i ammoniumsulfat målt efter tilførsel til italiensk rajgræs i store potter med tre forskellige jordtyper, angivet i % af tilført ammonium-N. Kvæggylle blev tilført ved opblanding i de øverste 10 cm jord (i 30 cm høje potter) eller ved simuleret nedfældning (stiplede kurver) ved placering i et rundt hul (9 cm diameter, 10 cm dybde i jord). Jordtyperne var grovsand (sandy soil 4,5% ler), lerjord (sandy loam 17% ler) og svær lerjord (26% ler) og N-udnyttelsen er beregnet ud fra akkumuleret N- optag i høstet rajgræs i forhold til behandling uden N-tilførsel (fra Sørensen & Jensen, 1995).

Tabel 2. Gødningsværdi baseret på N-optagelse i vårbygkerner målt ved en direkte sammenligning af nedfældning af kvæggylle og afgasset gylle før og efter pløjning. Forsøget er gennemført på Foulumgaard (JB4) i 2022 og referencer med stigende N i handelsgødning blev udbragt på jordoverflade efter pløjning før såning (Peter Sørensen, upublicerede data).

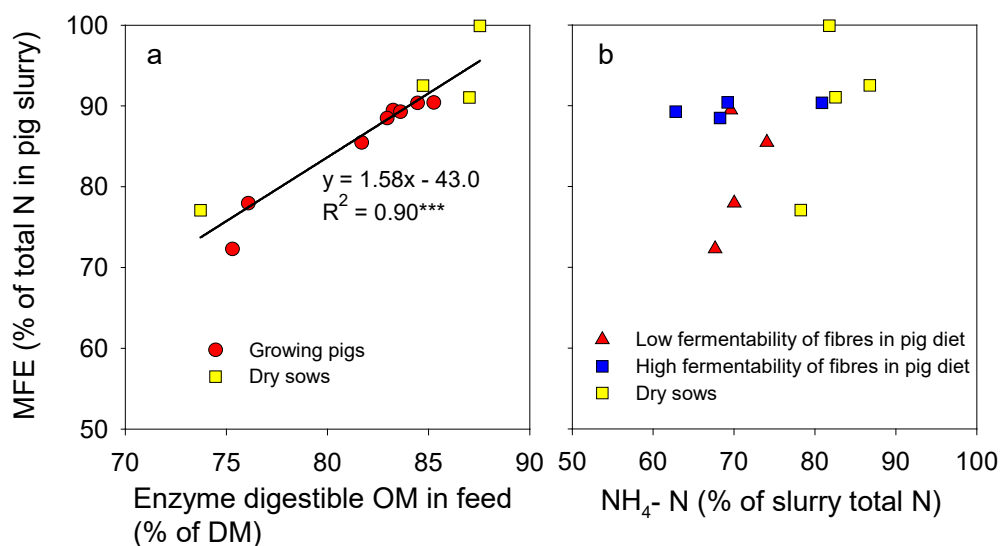
Gylletype	Værdital (% af total N)	
	Nedfældet før pløjning	Nedfældet efter pløjning
Kvæggylle, 100 kg N/ha	33	42
Kvæggylle, 200 kg N/ha	42	50
Afgasset gylle, 100 kg N/ha	57	59
Afgasset gylle, 200 kg N/ha	58	67

5.2 Betydning af C/N-forhold for N-frigivelse

Der findes en god sammenhæng mellem førsteårsvirkningen af organiske gødninger og både C/N-forholdet og ammoniumindholdet i gødningen, idet ammoniumindholdet typisk stiger med faldende C/N. Sørensen *et al.* (2003b) fandt et lidt bedre sammenhæng mellem gødningsevirkning og C/N-forholdet end for gødningsevirkning og $\text{NH}_4\text{-N}$ -andel (Figur 5).



Figur 5. Relationer mellem $\text{NH}_4\text{-N}$ andel, C/N og Tørstof/N i kvæggylle og gødningsevirkning (MFE: Mineral fertilizer equivalence) målt efter nedfældning før såning af vårbyg (Sørensen *et al.*, 2003b).



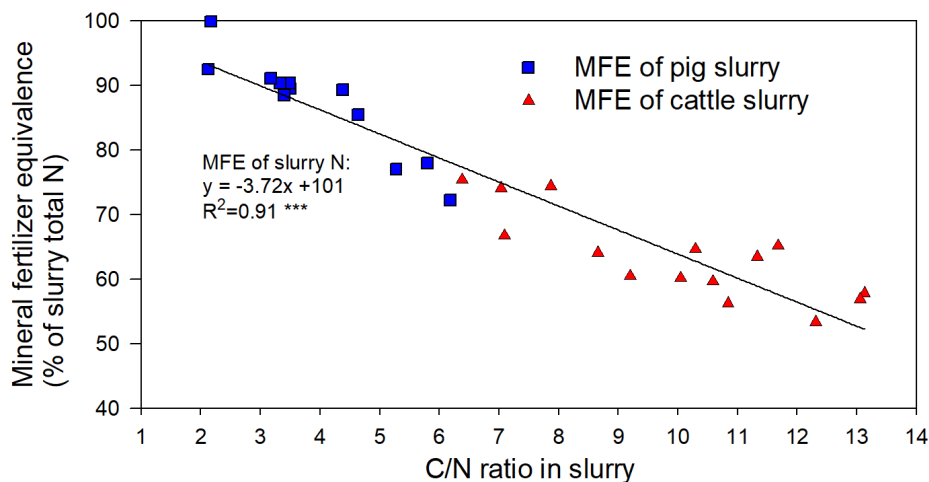
Figur 6. Forholdet mellem enzymfordøjelighed af foder og gødningsevirkning (MFE: Mineral fertilizer equivalence) (a) og $\text{NH}_4\text{-N}$ -andel i svinsegylle og gødningsevirkning (b) målt ved nedfældning af svinsegylle før såning af vårbyg (Sørensen & Fernández, 2003).

For svinøgylle fandt Sørensen & Fernandez (2003) ikke nogen god sammenhæng mellem $\text{NH}_4\text{-N}$ -andel og gødningsvirkning (Figur 6), men en god sammenhæng mellem enzymfordøjelighed af foder og gødningsvirkning. For både kvæg- og svinøgylle (alle lagrede) var der en lineær sammenhæng mellem C/N og gødningsvirkning ved nedfældning, som vist i Figur 7 (Webb *et al.*, 2013). Gødningsvirkningen, i procent af tilført total N, kunne beskrives med funktionen:

$$y = -3,72x + 101$$

-hvor x = C/N forhold i gødningen.

Skæring med y-aksen var her tæt på 100 svarende til C/N = 0, hvilket passer med at ren mineralsk gødning har C/N = 0 og en virkning på 100%.



Figur 7. Kvælstofvirkning (MFE: Mineral fertilizer equivalence) af kvæg- og svinøgylle fra forskelligt fodrede dyr relateret til C/N-forhold i gyllen målt ved N-optag efter nedfældning til vårbyg (Webb *et al.*, 2013).

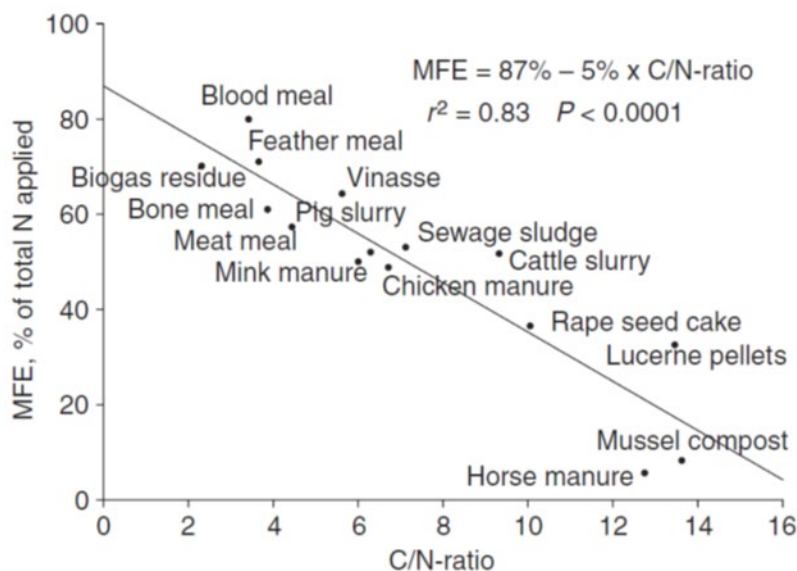
Delin *et al.* (2012) fandt ligeledes en god sammenhæng mellem gødningsvirkning, beregnet ud fra N-optag i græs i et potteforsøg, og C/N-forholdet i bredere gruppe af organiske gødninger.

Relationen mellem førsteårsvirkning og C/N kunne her beskrives med funktionen

$$y = -5x + 87$$

-hvor x = C/N forhold (figur 8).

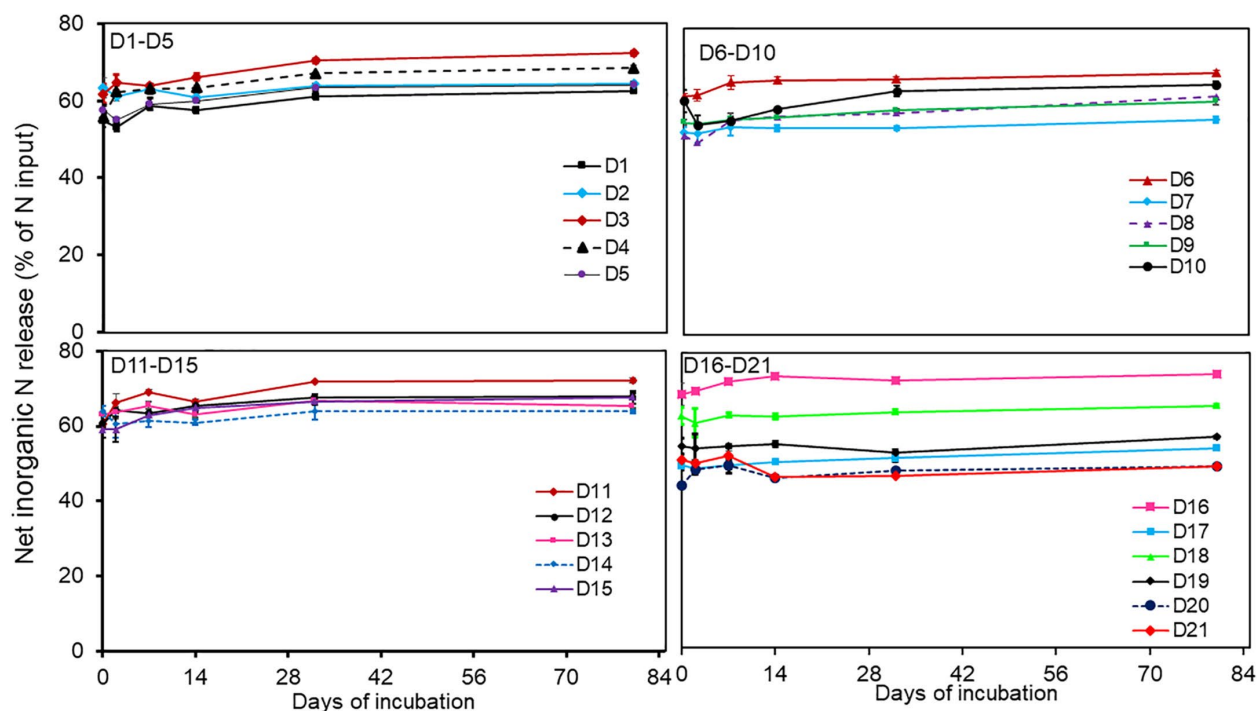
Hældningen af regressionen var her lidt mere negativ end fundet for gylle, hvilket muligvis skyldes den mere diverse gruppe af organiske gødninger, der blev testet i forhold til relationen fundet for gylle herover. Det kan dog også skyldes andre forsøgsomstændigheder, som planteart, jordtype og forsøgstype.



Figur 8. Kvælstofvirkning (MFE: Mineral fertilizer equivalence) i første år beregnet ud fra N-optag målt i pottforsøg med græs efter tilførsel af organiske gødninger med varierende C/N-forhold (Delin *et al.*, 2012).

5.3 Effekter af omsætning i biogasanlæg

Ved behandling af gødning i biogasanlæg sker der en omsætning af letomsættelige organiske forbindelser, som f.eks. organiske syrer. Det betyder at N-immobiliseringen efter tilførslen af afgasset biomasse bliver meget mindre og ofte ubetydelig i forhold til ubehandlet biomasse (Nyang'au *et al.*, 2023b). Figur 9 viser omsætningen af afgasset biomasse fra 21 danske biogasanlæg efter tilførsel til jord. Efter tilførslen sker der kun mindre ændringer i mineralsk N i forhold til det tilførte. Kun i enkelte tilfælde fandtes en lille N-immobilisering efter tilførsel af biomasse til jord. Nettomineraliseringen af tilført organisk N efter 80 dage i jord varierede fra 0 til 38% (Nyang'au *et al.*, 2023b), men lå for de fleste anlæg mellem 5 og 20%. Dermed kan der forventes en nettovirkning af det organiske N i den afgassede gødning i den første afgrøde, hvilket er i overensstemmelse med målinger af Nyang'au *et al.* (2023a), der ved nedfældning af afgasset biomasse til vårbyg fandt gødningsvirkninger på omkring 80% ved tilførsel af biomasse med en ammonium andel på 60-62% af total N.



Figur 9. Nettofrigivelse af mineralsk kvælstof efter tilførsel af afgasset biomasse fra 21 danske biogasanlæg til jord, angivet som % af total N i biomassen. Jorden er inkuberet fugtigt uden planter ved 10°C i 80 dage efter tilførsel (Nyang'au *et al.*, 2023b).

I modsætning til ovennævnte undersøgelser med ubehandlet gylle kunne nettofrigivelsen af N fra afgasset biomasse bedre forudsiges ud fra $\text{NH}_4\text{-N}/\text{total N}$ ($r=0,90$) end ud fra C/N ($r=-0,42$) (Nyang'au *et al.*, 2023b), og $\text{NH}_4\text{-N}/\text{total N}$ var klart den bedste parameter til at forudsige nettofrigivelsen af N.

6. Gødningsvirkning første år (1. afgrøde).

6.1 Relationer mellem målt N-mineralisering uden planter og gødningsvirkning

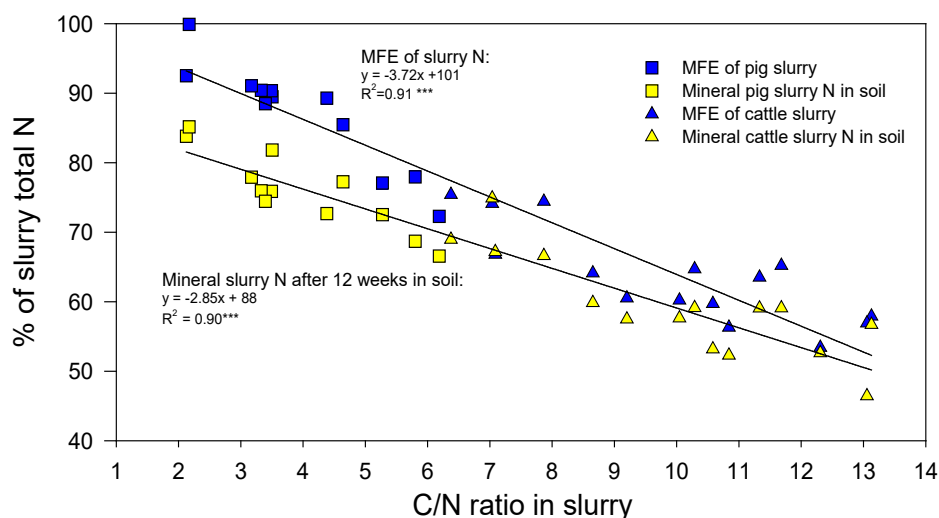
Gødningsvirkningen af N i husdyrgødning måles om regel ved at sammenligne N-udnyttelsen (N use efficiency) med tilført husdyrgødning i forhold til N-udnyttelsen med handelsgødning, og det kaldes for værdital. N-udnyttelsen er her defineret som N i høstet afgrøde med tilført gødning minus N i ugødet afgrøde og delt med tilført N (Jensen, 2013).

$$\text{N-udnyttelse} = (\text{N-optag gødet} - \text{N-optag ugødet}) / \text{tilført N gødning}$$

$$\text{Gødningsvirkning} = \text{N-udnyttelse (husdyrgødning)} / \text{N-udnyttelse (handelsgødning)} \text{ (omregnes ofte til \% ved at gange med 100)}$$

En række forsøg, hvor den samme husdyrgødning enten er tilført til ubevokset jord under laboratorieforhold eller tilført til en afgrøde med efterfølgende måling af N-optagelse, har vist en god

sammenhæng mellem N-frigivelsen af mineralisk N i ubevokset jord efter ca. 3 måneder og gødningsvirkningen målt i en afgrøde. Der er imidlertid i nogle forsøg, specielt med svinegylle, fundet en højere gødningsvirkning end N-frigivelsen målt i jorden og Sørensen *et al.* (2003b) fandt således højere gødningsvirkning efter nedfældning af svinegylle fra forskelligt fodrede grise end den tilsvarende målte N-frigivelse i jorden (Figur 10). I en anden undersøgelse med nedfældet svinegylle med og uden forsuring til vårbyg fandt Sørensen and Eriksen (2009) en gødningsvirkning omkring 100% af total N i svinegylle, mens N-frigivelsen i jorden kun var omkring 80% for den samme gødning, både med og uden tilsætning af svovlsyre. I begge disse undersøgelser var der i sideløbende behandlinger med kvæggylle god overensstemmelse mellem N-frigivelse og gødningsvirkning.



Figur 10. Gødningsvirkning af svine- og kvæggylle med varierende C/N-forhold nedfældet til vårbyg (blå punkter) sammenlignet med målt mineralisk N-frigivelse i jord uden planter efter 12 ugers omsætning af de samme gødninger (gule punkter). (Data fra Sørensen & Fernandez, 2003; Sørensen *et al.*, 2003b).

Vi har ikke nogen entydig forklaring på den høje gødningsvirkning på omkring 100% af total N ved tilførsel af svinegylle i nogle forsøg. Det kan ikke udelukkes, at svinegylle i nogle tilfælde har en såkaldt 'priming' effekt på omsætningen af organisk N i jorden, men det blev i omtalte forsøg kun observeret i marken med en afgrøde, og ikke i laboratorie-målinger uden planter.

Når det gælder eftervirkningen af organisk gødning i årene efter tilførsel, er der god grund til at antage at mineraliseret N fra resterende organisk N udnyttes tilnærmelsesvis som tilført mineralisk N og dermed har en gødningsvirkning der modsvarer mineraliseringen.

7. Kvælstoffrigivelse efter høst af første afgrøde og i de følgende år

7.1. Model til beskrivelse af kvælstoffrigivelsen

Sørensen *et al.* (2017) har beskrevet en simpel empirisk model til estimering af nettomineraliseringen af organisk bundet N i svine- og kvæggylle. Modellen er baseret på målinger af ekstra N-optag målt i vårbyg og rajgræs efterafgrøder over en 3-årig periode, efter at der i første år blev tilført enten handelsgødning eller en tilsvarende mængde ammonium-N i gylle (Sørensen, 2004; Sørensen & Amato, 2002). I de følgende år tilførtes samme mængde mineralsk N til alle behandlinger. Ved beregningen af nettomineralisering fra det organiske N i gyllen blev det i modellen antaget, at andelen af mineraliseret N optaget i den høstede afgrøde og efterafgrøde var den samme som udnyttelsen af tilført mineralsk N tilført til vårbyg om foråret, eller tilført til en efterafgrøde om efteråret (Sørensen *et al.* 2017). Mineraliseringen i 4. og 5. år efter tilførsel blev estimeret ud fra 5-årige engelske forsøg med måling af planteoptagelse af residual ^{15}N fra jorden i årene efter en tilførsel af ^{15}N -mærket mineralsk gødning, og det blev antaget at frigivelsesraten fra residual N er ens uanset oprindelsen af det tilførte kvælstof (Sørensen *et al.* 2017).

I tabel 3 er vist den årlige nettomineralisering gennem de første fem år beregnet med modellen efter tilførsel af kvæg- og svinegylle. Det ses, at nettomineraliseringen i år 1 og 2 er omtrent ens, hvilket hænger sammen med at der sker en betydelig N-immobilisering af det nyligt tilførte ammonium over de første uger efterfulgt af en relativ høj mineralisering efterfølgende (figur 11).

Tabel 3. Modelestimeret årlig nettomineralisering af tilført organisk N i kvæggylle og svinegylle tilført om foråret beregnet for en femårig periode (Sørensen *et al.*, 2017).

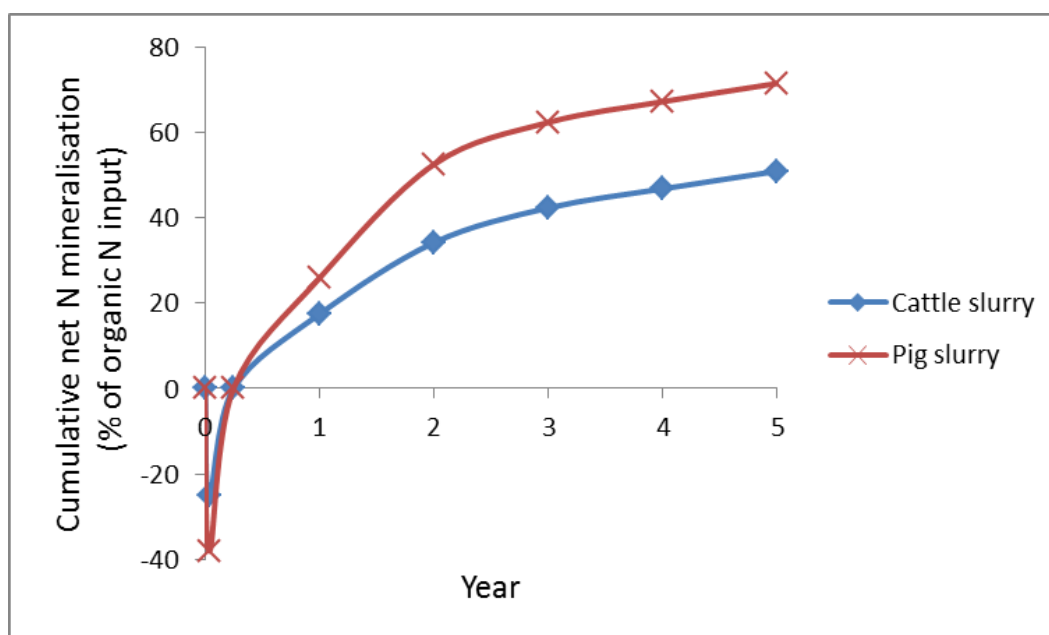
Gødning	År 1	År 2	År 3	År 4	År 5
Kvæggylle (% af organisk N input)	17	17	8,1	4,5	4,1
Svinegylle (% af organisk N input)	26	27	9,8	4,9	4,3
Kvæggylle (% af resterende organisk N) ^a	17	20	12	7,8	7,8
Svinegylle (% af resterende organisk N) ^a	26	36	21	13	13

^a Resterende organisk N i jord ved start af år er baseret på forudgående beregnet mineralisering.

Det skal bemærkes, at modellen som nævnt er baseret på målt N-optagelse i en vårbyg afgrøde og i efterafgrøder høstet omkring 1. november. I modellen tages derfor ikke højde for, at der sandsynligvis har været en ekstra udvaskning fra den tilførte gødning og muligvis et tab ved denitrifikation. Efterafgrøden blev indarbejdet i det følgende forår, og det kan betyde, at en mindre del af det tilførte organiske N har været frigivet i løbet af vinteren, optaget i efterafgrøden og frigivet til den følgende afgrøde i andet år. Det betyder med andre ord, at mineraliseringen i første år sandsynligvis er underestimeret, mens mineraliseringen i andet år kan være lidt overestimeret. Udvasningen fra lignende jord med efterafgrøde er fundet til omkring 2% (Pedersen *et al.* 2021, se senere afsnit). Det betyder, at underestimeringen af mineralisering som følge af negligeret udvaskning også kan forventes at være omkring 2% point i første år.

I forsøg med tilførsel af store mængder kvæg-dybstrøelse er det fundet en tilsvarende relativ frigivelse om efteråret, som fra organisk N i kvæggylle, baseret på måling af N-optag i olieræddike efterafgrøde (Pedersen *et al.*, 2021). Her svarede den ekstra N-optagelse i efterafgrøden til 5-5,7% af tilført total N med dybstrøelsen, ved tilførsel af 725 kg total-N/ha, svarende til 5,6-6,4% af det organiske N i dybstrøelsen. Hvis der antages en genfindelse af mineraliseret N i overjordiske dele af olieræddike på 43%, som målt af Li *et al.* (2015), svarer dette til en mineralisering i efteråret på 13-15 % af tilført organisk N i dybstrøelsen og dermed lidt lavere end for organisk N i kvæggylle (Tabel 3).

I en undersøgelse af Pedersen *et al.* (2020) målte eftervirkning af varierende blandinger af væske- og fiberfraktion fra kvæg- og svinogylle, og eftervirkningen i 2 år efter tilførsel blev omregnet til mineralisering per år. Her fandtes også en god overensstemmelse med den modelberegne mineralisering i andet og tredje år fra kvæggylle i Sørensen *et al.* (2017), mens mineraliseringen fra organisk N fra svinogødning i Pedersen *et al.* (2020) var 35% i andet år og 13% i tredje år, og højere end de i Sørensen *et al.* (2017) modelberegne 27 % og 10% (Tabel 3).



Figur 11. Kumulativ nettomineralisering fra forårstilført organisk N i kvæggylle og svinogylle beregnet med en simpel empirisk model over 5 år (Sørensen *et al.* 2017). Nettomineraliseringen er sandsynligvis lidt underestimeret i første år og overestimeret i andet år (se tekst).

7.2 Kvælstoffrigivelse målt i udenlandske undersøgelser

Den estimerede N-mineralisering fra kvæggylle ved brug af modellen var i god overensstemmelse med målinger af eftervirkning ved gentagne tilførsler af kvæggylle målt af Schröder *et al.* (2007) i hollandske forsøg ifølge Sørensen *et al.* (2017). Schröder *et al.* (2007) fandt dog en lidt højere eftervirkning af kvæggylle i de første to år svarende til ca. 21% nettomineralisering per år fra det organiske N i kvæggylle.

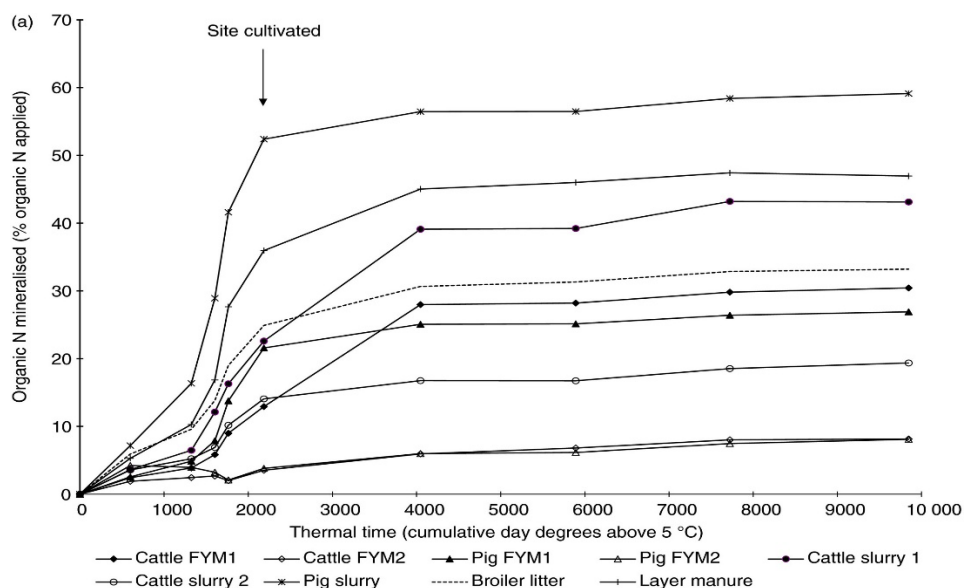
Modellens estimering af mineralisering i første år var også i rimelig overensstemmelse med en engelsk undersøgelse af mineralisering efter tilførsel af forskellige typer husdyrgødning (Chadwick *et al.*, 2000). Mineraliseringen af organisk N blev i denne undersøgelse målt ved at fjerne al ammonium-N i gødninger ved en hurtig tørring, og derefter måle N-optagelse fra det organiske N i gødningen i græs i pletter over en periode på 3184 graddage over 0°C, svarende til ca. 1 år under markforhold i Danmark. Ved tørringen af gødningen må det formodes, at let omsættelig organiske forbindelser er gået tabt, ligesom den initiale N-immobilisering kan forventes lavere når ammonium-N er fjernet. Desuden er der i denne beregning antaget, at 100% af det mineraliserede N genfindes i det høstede græs, hvilket ikke altid kan forventes. I Chadwick *et al.* (2000) fandtes også en betydelig hurtigere mineralisering fra svinegødning og fjerkrægødning end fra kvæggødning, og der fandtes omtrent samme mineraliseringsrate fra gylle, som fra faste gødninger fra samme dyreart (Tabel 4).

Tabel 4. Kumulativ nettomineralisering af organisk N i gødningsprøver tilført jord i pletter med græs estimeret efter 199 dage (3184 graddage over 0°C svarende til en periode på ca. 1 år i Danmark) ud fra N-genfindelsen i høstet græs (apparent N recovery), angivet i % af tilført organisk N. Ammonium-N i alle organiske gødninger blev fjernet ved hurtig tørring før tilførsel og i undersøgelsen indgik i alt 50 gødningsprøver (Chadwick *et al.* (2000).

Gødning	Mineralisering af organisk N (%)	
	Interval	Gennemsnit
Kvæggylle (n=12)	2-19	12
Fast kvæggødning (n=14)	11-24	14
Svinegylle (n=8)	21-37	27
Fast svinegødning (n=6)	18-30	21
Fjerkrægødning (n=10)	16-56	29

n angiver antal prøver i undersøgelsen

En anden engelsk undersøgelse med eftervirkning af husdyrgødning under markforhold fandt et noget anderledes omsætningsforløb for organisk N i tilførte gødninger, baseret på N-optagelsen målt i græs samt udvaskningstab målt over 5 år efter én tilførsel (Bhokal *et al.* (2016), Figur 12). I denne undersøgelse anvendtes også gødninger strippet for ammonium-N og relativt store mængder organisk N blev tilført i første år. Bhokal *et al.* (2016) relaterede mineraliseret N til kumulerede graddage over 5°C og fandt en næsten konstant frigivelsesrate over de første 2300 graddage (ca. 18 måneder). På én af to jorde var der i perioden 2300-4100 graddage en noget lavere frigivelse og derefter faldt frigivelsen til et lavt niveau. På den anden jord blev frigivelseshastigheden allerede efter 18 måneder meget lav. Bhokal *et al.* (2016) inddelte gødningerne i to grupper: 1) Svinegylle og hønsegødning (layer manure) med en mineralisering på 35-70% efter 18 måneder og 2) kvæggylle, fast kvæg- og svinegødning (FYM) og slagtekylling (broiler) med mineralisering på 5-40% efter 18 måneder.



Figur 12. Mineralisering af organisk N i forskellige typer husdyrgødning relateret til graddage over 5°C, estimeret på basis af målt N-optagelse i græs over en 5-årig periode under engelske forhold (Gle-adthorpe) (Bhogal *et al.*, 2016).

7.3 Effekt af afgasning af gødning

Ved afgasning af gødning sker der en mineralisering af organisk N i gødningen og mindre N-immobilisering, som beskrevet ovenfor. I overensstemmelse hermed fandt Schröder *et al.* (2007) en øget N-udnyttelse ved afgasning af kvæggylle, sammenlignet med tilsvarende ubehandlet kvæggylle nedfældet i græs, med en øget gødningsvirkning på 8-9% point af total N i første år. Imidlertid var den akkumulerede gødningsvirkning (N-optag i græs) ens for afgasset og ikke-afgasset kvæggylle efter 4 års gentagne tilførsler. Det viser, at der var en reduktion i eftervirkningen de følgende år, der modsvarede den øgede førsteårvirkning ved afgasning af kvæggylle.

7.4 Effekt af afgrøde og jordtype på udnyttelsen af residual N

Mineraliseringen sker lidt hurtigere i sandjord end i lerjord. Betydningen heraf er illustreret i tabel 5, der viser målt optagelse af mærket N i vårbyg og rajgræs efterafgrøde i de første to eftervirkningsår. Det kan antages, at alt det optagne kvælstof stammer fra mineralisering af organisk N i enten planterester eller mikrobielle nedbrydningsprodukter. Her fandtes i gennemsnit for fire perioder 19% lavere frigivelse og optagelse af mærket rest N på lerjord i forhold til sandjord, hvor rest N er defineret som det tilbageværende ^{15}N bundet i jorden ved starten af året. Det viser, at det nyligt bundne N i afgrøderester og rester af mikroorganismer er bedre beskyttet mod nedbrydning i lerjord. En del af dette bundne N findes i jordens levende mikroorganismer, og Sørensen (2004) fandt efter tilførsel af mærket N i gødning, at 13% af det bundne ^{15}N stadig fandtes i mikrobiel biomasse i jorden efter 2,5 år.

Tabel 5. Optagelse af rest ^{15}N i afgrøde og efterafgrøde i to eftervirkningsår efter tilførsel ^{15}N -mærket ammonium-N i enten mineralsk gødning eller svinegylle (gns. af behandlinger) til lerblandet sand (9% ler) og lerjord (19% ler). Optagelsen af ^{15}N er udtrykt i procent af rest ^{15}N i jorden ved start af hvert eftervirkningsår. Den relative optagelse af rest ^{15}N i forhold til optagelsen i lerblandet sandjord, som reference, er angivet i parenteser. Data fra Sørensen & Amato (2002).

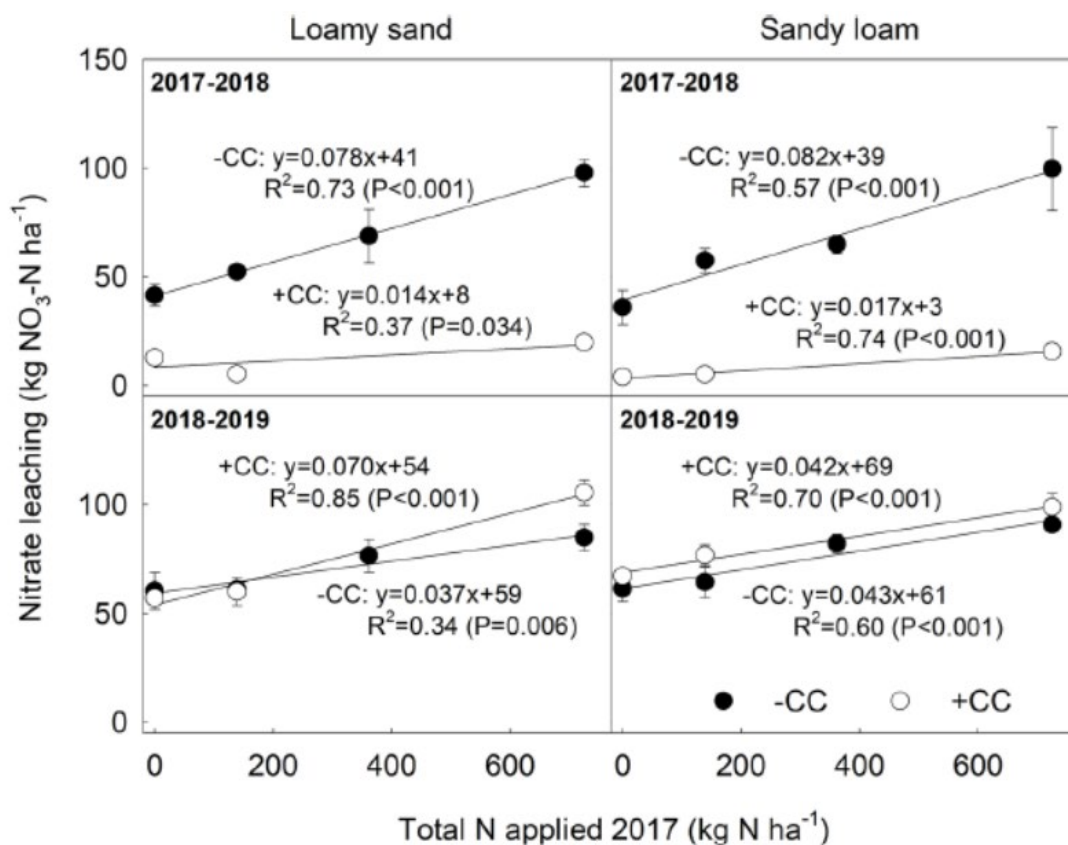
	1. eftervirkningsår (1997) (% af rest ^{15}N)		2. eftervirkningsår (1998) (% af rest ^{15}N)	
	Vårbyg	Efterafgrøde	Vårbyg	Efterafgrøde
Lerblandet sandjord (JB4)	6,6 (100)	2,5 (100)	3,7 (100)	1,9 (100)
Lerjord (JB7)	4,9 (74)	1,9 (76)	3,5 (95)	1,5 (79)
LSD ($P < 0,05$)	0,4	0,3	Ikke sign.	0,2

8. Udvaskning af nitrat fra tilført mineralsk og organisk N

Udvaskningen fra forårstilført mineralsk N og organisk N i gødning, som % af tilført N, er omtrent ens ifølge en række forsøg. Således fandt Pedersen *et al.* (2021) at udvaskningsandelen fra både mineralsk gødning og dybstrøelse i første år var 8% af tilført N efter tilførsel til vårbyg, mens andelen af udvasket N kun var 1-2% efter tilførsel til vårbyg med efterafgrøde. I andet år efter tilførsel var udvaskningsraten 4-7% for vårbyg uden efterafgrøde. En tilsvarende relativ udvaskning i første og andet år efter tilførsel af handelsgødning og fast kvæggødning er fundet af Thomsen (2005) på samme type jord.

Nogle år efter tilførsel af N i enten mineralsk gødning eller organisk gødning kan det antages, at langt hovedparten af det resterende kvælstof i jorden findes i enten planterester, mikroorganismer eller i mikrobielle nedbrydningsprodukter. Det betyder, at næsten alle organiske N-forbindelser i den oprindelige husdyrgødning er blevet omsat og omdannet til nye forbindelser. Det betyder også, at det overordnet kan betragtes som en samlet pulje af kvælstof i jorden, uanset hvilken form det oprindeligt er tilført som. Sørensen *et al.* (2023) fandt dog at mærket kvælstof, der var fastholdt i jordens organiske stof 25-30 år efter at det var tilført i ^{15}N -mærket mineralsk gødning, stadig havde en højere gennemsnitlig tilgængelighed end den samlede organiske kvælstofpulje i jorden. Med andre ord viser dette, at en del af jordens "gamle" kvælstof findes bundet i meget stabile forbindelser.

Da mineraliseringen af N er en kontinuert proces, der foregår over hele året, er vegetationsdækket i specielt efterårs- og vintermånederne meget vigtig for hvor stor en andel af det mineraliserede N, der udvaskes. Sørensen *et al.* (2023) fandt således, at 33-40% af det mineraliserede N blev udvasket ved dyrkning af vårbyg uden efterårsbevoksning, 14-16% ved dyrkning af vårbyg med efterafgrøde, mens udvaskningen var betydeligt lavere fra et areal med permanent græs (Tabel 6). Det betyder, at udvaskningsraten (andelen) er betydeligt højere for mineraliseret N fra jordpuljen (inkluderende residual N fra tidligere gødningstilførsler) end andelen for N tilført om foråret i enten mineralsk eller organisk gødning (på omkring 8% i figur 13). Behandlingen med græs blev ikke ompløjet, og en del mærket kvælstof har været bundet i græsset og ikke frigivet som i de øvrige behandlinger, hvor græsset blev ompløjet.



Figur 13. Nitratudvaskning målt i 150 cm dybe lysimetre med to jordtyper (loamy sand JB4 og sandy loam JB7) over to år (april-april) og relateret til tilført total N i handelsgødning (139 kg N/ha) eller kvægdybstrøelse (362 og 725 kg N/ha), tilført umiddelbart før såning af vårbyg. I første år (2017) var der behandlinger med og uden efterafgrøde (+/-CC på figur) og i andet år (2018) var alle lysimetre bevokset med vårbyg uden efterafgrøde og tilført 80 kg N/ha i handelsgødning (Pedersen *et al.*, 2021).

Tabel 6. Udvaskning af ^{15}N -mærket nitrat-N over 2 vækstsæsoner med forskellige vegetationstyper relateret til målt residual ^{15}N i jord i 2017 bestemt ved hjælp af lysimetre. Det ^{15}N -mærkede kvælstof i jorden stammede fra ^{15}N -mærket mineralsk gødning tilført 1989-93 til landbrugsafgrøder, og i perioden 2004-17 var alle lysimetre bevokset med ugødet græs (slåningsbrak), der blev ompløjet i foråret 2018 undtagen i behandlinger med græs. Ved beregning af andelen af udvaskning fra mineraliseret N er det antaget, at al mineraliseret ^{15}N blev udvasket fra bar jord i begge perioder, og at mineraliseringen var ens i pløjede behandlinger (Sørensen *et al.*, 2023).

Vegetation	Udvaskning		Udvaskning	
	(% af residual ^{15}N i jord 2017)		(% af mineraliseret N)	
	2018-19	2019-20	2018-19	2019-20
Græs	0,2	0,06	4*	2*
Bar jord	4,7	2,7	100	100
Vårbyg (uden efterafgrøde)	1,9	0,9	40	33
Vårbyg med efterafgrøde	0,7	0,4	14	16

*) Er sandsynligvis underestimeret, idet mineraliseringen af residual ^{15}N forventes lavere på den uompløjede jord med græs sammenlignet med ompløjet bar jord (Sørensen *et al.*, 2023).

Som nævnt er udvaskningen fra tilført organisk og mineralsk N tilført om foråret omtrent ens på trods af, at kun en mindre del af det organiske frigives og kan udvaskes i første år. Det kan forklares ved at en meget højere andel af det frigivne organiske N udvaskes efter mineralisering efter første vækstsæson. Udvaskningsmodellen NLES5 beregner dog en lavere udvaskning fra tilført organisk N i første år, sammenlignet med forårstilført mineralsk N (Børgesen *et al.*, 2022). Dette kan bl.a. forklares ved, at reduceret udvaskning relateret til ammoniaktab fra husdyrgødning bliver integreret i parameteren tilført organisk N i organisk gødning i NLES5 modellen (Børgesen *et al.*, 2022). Ovennævnte udvaskningsforsøg i lysimetre er gennemført med minimale ammoniaktab, i modsætning til en del af de målinger der indgår i NLES5 modellen.

Referencer

- Bhogal, A., Williams, J.R., Nicholson, F.A., Chadwick, D.R., Chambers, K.H., Chambers, B.J. 2016. Mineralization of organic nitrogen from farm manure applications. *Soil Use and Management*, **32**, 32-43.
- Børgesen, C.D., Pullens, J.W.M., Zhao, J., Blicher-Mathiesen, G., Sørensen, P., Olesen, J.E. 2022. NLES5-An empirical model for estimating nitrate leaching from the root zone of agricultural land. *European Journal of Agronomy*, **134**, 126465.
- Chadwick, D.R., John, F., Pain, B.F., Chambers, B.J., Williams, J. 2000. Plant uptake of nitrogen from the organic nitrogen fraction of animal manures: a laboratory experiment. *Journal of Agricultural Science*, **134**, 159-168.
- Delin, S., Stenberg, B., Nyberg, A., Brohede, L. 2012. Potential methods for estimating nitrogen fertilizer value of organic residues. *Soil Use and Management*, **28**(3), 283-291.
- Jensen, B., Sørensen, P., Thomsen, I.K., Jensen, E.S., Christensen, B.T. 1999. Availability of nitrogen in N-15-labeled ruminant manure components to successively grown crops. *Soil Science Society of America Journal*, **63**(2), 416-423.
- Jensen, L.S. 2013. *Animal Manure Fertiliser Value, Crop Utilisation and Soil Quality Impacts*. In: Sommer SG, Christensen ML, Schmidt T, *et al.* (eds.) *Animal Manure Recycling: Treatment and Management*. John Wiley & Sons Ltd, 295-328.
- Jensen, L.S., Schwarzkopff, M.V. 2026. Notat om det tidlige forløb af kvælstoffrigivelse ved omsætning af organisk stof tilført jord i form af planterester og visse organiske gødninger. Notat fra Københavns Universitet (under udarbejdelse). Li, X., Sørensen, P., Li, F.C., Petersen, S.O., Olesen, J.E. 2015. Quantifying biological nitrogen fixation of different catch crops, and residual effects of roots and tops on nitrogen uptake in barley using in-situ N-15 labelling. *Plant and Soil*, **395**(1-2), 273-287.
- Mary, B., Recous, S., Robin, D., 1998. A model for calculating nitrogen fluxes in soil using ¹⁵N tracing. *Soil Biology & Biochemistry*, **30**, 1963-1979.
- Nyang'au, J.O., Moller, H.B., Sørensen, P. 2023a. Effects of electrokinetic and ultrasonication pretreatment and two-step anaerobic digestion of biowastes on the nitrogen fertiliser value by injection or surface banding to cereal crops. *Journal of Environmental Management*, **326**, 116699.
- Nyang'au, J.O., Sørensen, P., Moller, H.B. 2023b. Nitrogen availability in digestates from full-scale biogas plants following soil application as affected by operation parameters and input feedstocks. *Bioresource Technology Reports*, **24**, 101675.
- Pedersen, B.N., Christensen, B.T., Bechini, L., Cavalli, D., Eriksen, J., Sørensen, P. 2020. Nitrogen fertilizer value of animal slurries with different proportions of liquid and solid fractions: A 3-year study under field conditions. *Journal of Agricultural Science*, **158**(8-9), 707-717.
- Pedersen, B.N., Eriksen, J., Christensen, B.T., Sørensen, P. 2021. Fertilizer replacement value and leaching of nitrogen applied to spring barley in cattle deep litter: A 3-year lysimeter study. *Soil & Tillage Research*, **209**, 707-717.
- Schröder, J.J., Uenk, D., Hilhorst, G. 2007. Long-term nitrogen fertilizer replacement value of cattle manures applied to cut grassland. *Plant and Soil*, **299**(1), 83-99.
- Sommer, S.G., Knudsen, L. 2021. Impact of Danish Livestock and Manure Management Regulations on Nitrogen Pollution, Crop Production, and Economy. *Frontiers in Sustainability*, **2**, 658231.
- Sørensen, P. 2001. Short-term nitrogen transformations in soil amended with animal manure. *Soil Biology and Biochemistry*, **33**, 1211-1216.

- Sørensen, P. 2004. Immobilisation, remineralisation and residual effects in subsequent crops of dairy cattle slurry nitrogen compared to mineral fertiliser nitrogen. *Plant and Soil*, **267**(1-2), 285-296.
- Sørensen, P., Amato, M. 2002. Remineralisation and residual effects of N after application of pig slurry to soil. *European Journal of Agronomy*, **16**(2), 81-95.
- Sørensen, P., Børgesen C.D. 2025. Håndtering af kvælstof i NUAR-beregneren. Rådgivningsnotat fra DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. 14. April 2025. 10 pp. https://pure.au.dk/ws/portalfiles/portal/424929865/Levering_H_ndte-ring_af_N_i_NUAR.pdf
- Sørensen, P., Eriksen, J. 2009. Effects of slurry acidification with sulphuric acid combined with aeration on the turnover and plant availability of nitrogen. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **131**(3-4), 240-246.
- Sørensen, P., Fernández, J.A. 2003. Dietary effects on the composition of pig slurry and on the plant utilization of pig slurry nitrogen. *Journal of Agricultural Science*, **140**, 343-355.
- Sørensen, P., Jensen, E.S. 1998. The use of N-15 labelling to study the turnover and utilization of ruminant manure N. *Biology and Fertility of Soils*, **28**(1), 56-63.
- Sørensen, P., Jensen, E.S. 1995. Mineralization-immobilization and plant uptake of nitrogen as influenced by the spatial distribution of cattle slurry in soils of different texture. *Plant and Soil*, **173**(2), 283-291.
- Sørensen, P., Pedersen, B.N., Thomsen, I.K., Eriksen, J., Christensen, B.T. 2023. Plant availability and leaching of 15N-labelled mineral fertilizer residues retained in agricultural soil for 25 years: A lysimeter study. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **186**(4), 441-450.
- Sørensen, P., Thomsen, I.K. 2005. Separation of pig slurry and plant utilization and loss of nitrogen-15-labeled slurry nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, **69**(5), 1644-1651.
- Sørensen, P., Thomsen, I.K., Schröder, J.J. 2017. Empirical model for mineralisation of manure nitrogen in soil. *Soil Research*, **55**(5-6), 500-505.
- Sørensen, P., Vinther, F.P., Petersen, S.O., Petersen, J., Lund, I. 2003a. Høj udnyttelse af gyllens kvælstof ved direkte nedfældning. in: *Grøn Viden*, Vol. 281, Danmarks JordbrugsForskning, Research Centre Foulum, pp. 1-6.
- Sørensen, P., Weisbjerg, M.R., Lund, P. 2003b. Dietary Effects on the Composition and Plant Utilization of Nitrogen in Dairy Cattle Manure. *The Journal of Agricultural Science*, **141**(01), 79-91.
- Thomsen, I.K. 2005. Crop N utilization and leaching losses as affected by time and method of application of farmyard manure. *European Journal of Agronomy*, **22**(1), 1-9.
- Webb, J., Sørensen, P., Velthof, G., Amon, B., Pinto, M., Rodhe, L., Salomon, E., Hutchings, N., Burczyk, P., Reid, J. 2013. An assessment of the variation of manure nitrogen efficiency throughout Europe and an appraisal of means to increase manure-N efficiency. *Advances in Agronomy*, **119**, 371-442.