

Nye teknologier til reduktion af markbrugets klimabelastning	Ansvarlig	ksko, majh
	Oprettet	16-12-2021
Projekt: 7854: Mod en klimaneutral planteproduktion	Side	1 af 12

STØTTET AF

## Promilleafgiftsfonden for landbrug

# Nye teknologier til reduktion af markbrugets klimabelastning

## Indhold

Naturlige og biologiske nitrifikationshæmmere .....	1
HVAD ER NATURLIGE OG BIOLOGISKE NITRIFIKATIONSHÆMMERE? .....	2
IMPLEMENTERINGS- OG REDUKTIONSPOTENTIALE VED NATURLIGE OG BIOLOGISKE NITRIFIKATIONSHÆMMERE .....	2
BARRIERER FOR UDVIKLING OG IMPLEMENTERING .....	5
GMO med kvælstoffikserende egenskaber .....	5
REGNEEKSEMPEL MED KLIMAEFFEKT AF KVÆLSTOFFIKSERENDE EGENSKABER.....	6
BARRIERER/PERSPEKTIV FOR UDVIKLING OG IMPLEMENTERING .....	7
Ureasehæmmer (en gammel ny teknologi).....	7
AMMONIAKREDUKTION MED UREASEHÆMMER .....	7
LATTERGASREDUKTION MED UREASEHÆMMER OG THIOSULFAT .....	8
REGNEEKSEMPEL MED KLIMAEFFEKT AF UREASEHÆMMER.....	9
BARRIERER/PERSPEKTIV FOR UDVIKLING OG IMPLEMENTERING .....	10
Referencer .....	11

Klimaneutralitet forudsætter store teknologispring. Derfor skal der hele tiden tænkes på nye strategier, der kan bidrage til drive udviklingen i markbruget, og sikre at vi når målet om klimaneutralitet i 2050. Det kræver, at der tænkes ud af boksen og at nye teorier afprøves. Derfor vil notatet belyse teknologier, der ligger lidt uden for skiven af de teknologier og virkemidler, der er i umiddelbar pipeline. I dette notat fokuseres på teknologier, der kan reducere emissionen af N<sub>2</sub>O fra marken.

## Naturlige og biologiske nitrifikationshæmmere

For nuværende er nitrifikationshæmmere på det danske marked kemiske nitrifikationshæmmere, som ikke er tilladt i den økologiske produktion. Biologiske og naturlige nitrifikationshæmmere er en ny teknologi, som måske kan udbrede anvendelsen af nitrifikationshæmmere og give økologerne en mulighed for at mindske lattergasudledningen fra marken.

## HVAD ER NATURLIGE OG BIOLOGISKE NITRIFIKATIONSHÆMMERE?

Biologisk nitrifikationshæmning er den naturlige evne, som nogle plantearter besidder, til at udskille nitrifikationshæmmende stoffer gennem rødderne (Subbarao et al., 2013). Naturlige nitrifikationshæmmere er naturlige eller plantebaserede stoffer, med nitrifikationshæmmende effekter. Frigivelsen af biologisk nitrifikationshæmmende stoffer er en stærkt reguleret proces, der udløses af tilstedeværelsen af ammonium ( $\text{NH}_4$ ) i rhizosfæren, hvorved de nitrifikationshæmmende stoffer frigives præcis der hvor størstedelen af de nitrificerende mikrober er til stede (Subbarao et al., 2013). Subbarao et al. (2013) skriver at hæmning af nitrifikation sandsynligvis er en del af en tilpasningsmekanisme til at bevare og bruge kvælstof effektivt i naturlige systemer, hvor kvælstof er det mest begrænsende næringsstof. Der kan derfor også være tale om, at denne tilpasning kun er til stede hos bestemte sorter og genotyper indenfor plantearten.

## IMPLEMENTERINGS- OG REDUKTIONSPOTENTIALE VED NATURLIGE OG BIOLOGISKE NITRIFIKATIONSHÆMMERE

Der er et stort potentiale for at implementere brugen af naturlige og biologiske nitrifikationshæmmere i det danske landbrug. Med en politisk ambition om at fordoble det økologiske areal, vil der ske en stigning i landbrugsarealer, hvor det ikke vil være tilladt at bruge syntetiske nitrifikationshæmmere. Her vil naturlige nitrifikationshæmmere være et oplagt middel til at opnå reduktioner i udledningen fra marken, hos såvel økologiske som konventionelle landmænd.

Sahrawat et al. (1982) lavede forsøg med karanjin, karanja og neem, for at undersøge nitrifikationshæmningen af urea ved tilsætning af disse stoffer. Nedenstående tabel viser resultatet fra undersøgelsen. Her ses en hæmning af nitrifikationen på helt op til 77%. Dog tyder det på at effekten aftager relativt hurtigt efter tilsætning og at hæmningen af nitrifikationen varierer over den målte periode. Forsøget er lavet på sandy clay loam (61% sand, 15% silt, 24% ler). Jorden er indsamlet i New Delhi. pH 7,7; organisk kulstof 0,6 %, total N 0,07 %. CEC 11,6 m.e./100g, WHC (water holding capacity) 38,4 %. Da forsøget er lavet på en jord og under forhold som ikke er direkte sammenlignelige med danske forhold, kan vi ikke antage at effekten vil være den samme.

Tabel 1. Hæmning af nitrifikation i urea ved tilsætning af karanjin og alkohol ekstrakt (Sahrawat et al., 1982).

*Comparison of inhibition of nitrification of urea by karanjin, and alcohol extracts of karanja and neem seeds\**

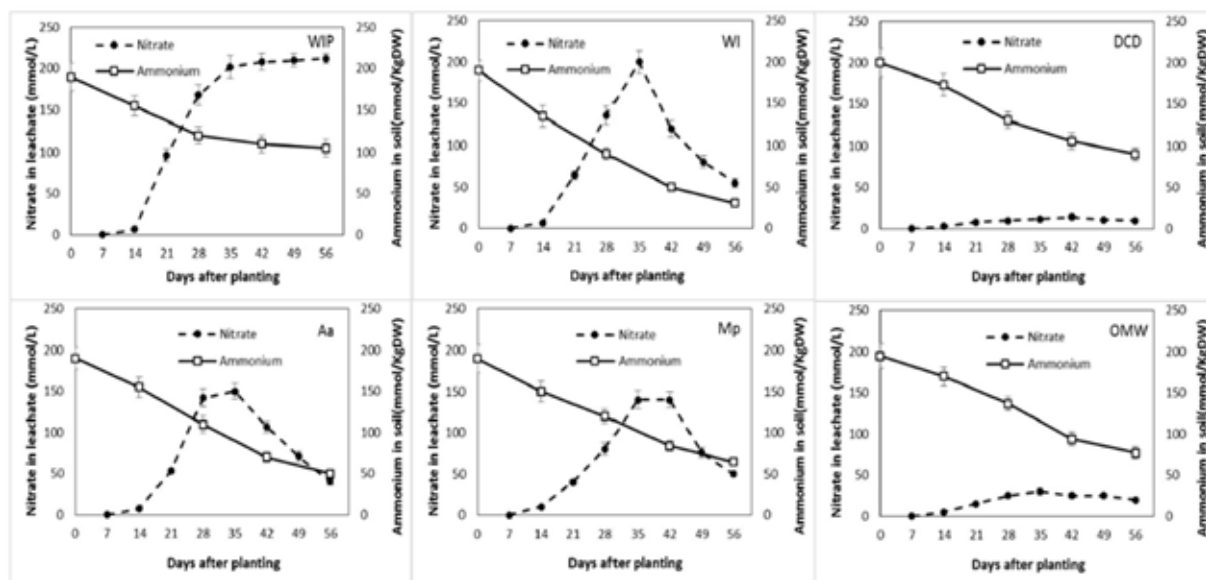
Nitrification inhibitor	Amount of inhibitor added (% of N applied)	% inhibition of nitrification after days				
		15	30	45	60	75
Karanjin	5	57	62	47	31	12
	10	64	77	59	43	18
Karanja seed extract	20	64	10	38	3	1
	30	71	54	45	5	0
Neem seed extract	20	21	51	38	10	7
	30	43	62	47	20	11

\*Inhibition of nitrification was calculated from the nitrification rates obtained from the values of  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  and  $\text{NO}_3^-$  produced in soil samples as suggested by Sahrawat (1980)

Di Martino et al. (2021) har undersøgt effekten af olivenmølle spildevand (olive mill wastewater), pebermynte ekstrakt (*Mentha piperita* L.) og ekstrakt af kinesisk malurt (*Artemisia annua* L.) på aktiviteten af nitrificerende bakterier. Effekten blev sammenlignet med en kontrol behandling (m/u plante) og den kemiske nitrifikationshæmmer dicyandiamide. Forsøget er lavet i pletter, hvor alle pletter blev gødet til et

ammonium indhold på 200 mmol/kg jord. Artiklen beskriver selv, at det er et lavt gødningsniveau forsøget er lavet på. Hver potte (undtagen kontrol uden plante) havde én selleriplante pr. Potte.

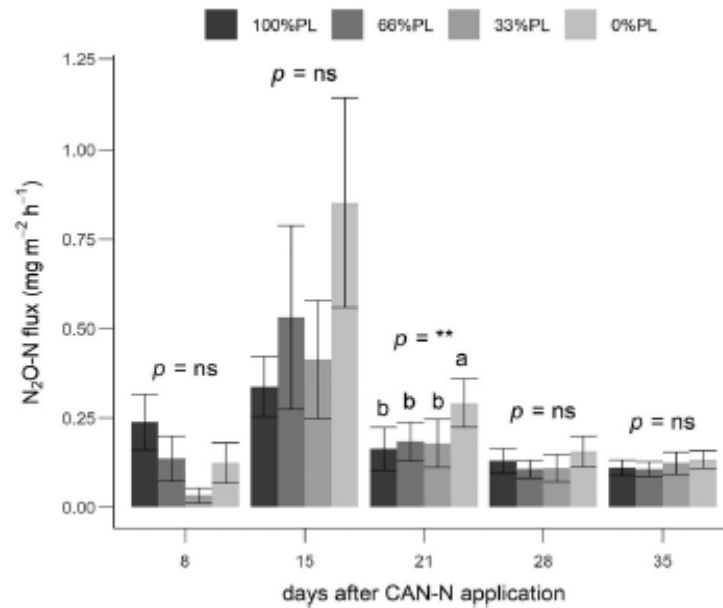
I nedenstående figurer kan man se ammonium og nitrat indhold i de forskellige behandlinger, hvor mængden af nitrat er et udtryk for hvor meget nitrifikation der er i behandlingen. Her ses det, at der er en lille hæmning af nitrifikationen ved tilsætning af pebermynte ekstrakt (*Mentha piperita* L.) og ekstrakt af kinesisk malurt (*Artemisia annua* L.). Den største hæmning af nitrifikationen ses ved tilsætning af dicyandiamide, men der ses også en stor effekt ved tilsætning af olivenmølle spildevand.



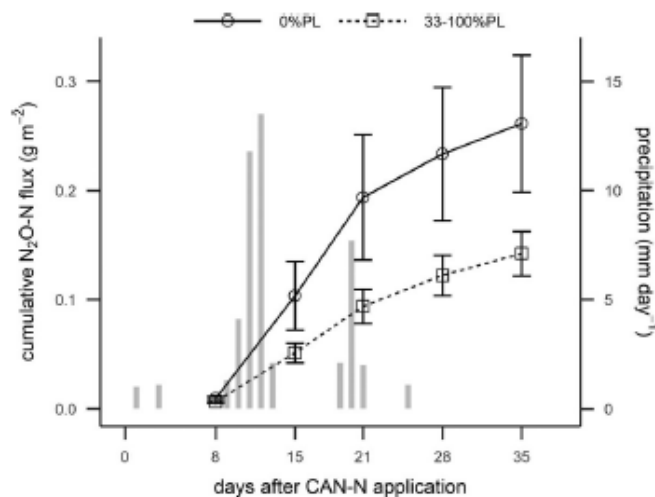
Figur 1. Gns. koncentration af nitrat i perkuleret vand (stiplet linje med sorte cirkler), og ammonium i jordblandingen (linje med hvide cirkler). Behandlinger: WIP = kontrol uden plante og uden nitrifikationshæmmer. WI = kontrol med plante men uden nitrifikationshæmmer. DCD = dicyanideamide. Aa = *A. annua* L. ekstrakt. Mp = *M. piperita* L. ekstrakt. OMW = olivenmølle vand (Di Martino et al., 2021)

Pijlman et al. (2020) har lavet forsøg med vejbred på tørvejord, for at undersøge hvordan udskillelsen af nitrifikationshæmmende stoffer påvirker nitrificerende mikroorganismer. Man har identificeret nogle sekundære metabolitter fra vejbred, som potentielt virker nitrifikationshæmmende. Disse stoffer er aucubin, catalpol, verbascoside og deres aglyka (Pijlman et al., 2020). Det er relevant at undersøge vejbred arter i Danmark for disse bioaktive stoffer.

Forsøget er lavet i en blanding af rajgræs og vejbred, med forskellige mængder af vejbred i blandingen; 100% vejbred, 66% vejbred, 33% vejbred og 0% vejbred. Herunder kan man se lattergasemissionen for de forskellige behandlinger, vist på de enkelte målingsdage, samt som kumulativ udledning. Fra dette ses det at der generelt ikke er statistisk forskel på udledningen af lattergas mellem behandlingerne, når det ses på det enkelte dage. Men når man kigger på den kumulative udledning, kan man se at der er en lavere samlet udledning af lattergas, fra de behandlinger som indeholder vejbred. Da forsøget er lavet på tørvejord, er resultaterne ikke direkte sammenlignelige med mineraljord.



Figur 2. Felteksperiment. N<sub>2</sub>O-N flux ved dag 8 til 35 efter CAN-N tildeling (5 g pr. m<sup>2</sup>). På figuren ses standardfejl (SE) samt test for signifikans. Bar med samme bogstav er ikke signifikant forskellige.



Figur 3. Felteksperiment. Grå barer: Nedbør siden CAN-N tilførsel (5 g pr. m<sup>2</sup>) og kumulativ N<sub>2</sub>O-N flux mellem 8 og 35 dage efter CAN-N tildeling i behandling 0%PL (fast linje) versus alle behandlinger med vejbred (PL) (33% PL, 66% PL og 100% PL) (stiplet linje). Kumulativ N<sub>2</sub>O-N flux var signifikant lavere ved tilstedeværelse af vejbred.

I 2021 har SEGES Økologi Innovation og Teknologisk Institut undersøgt 8 forskellige naturlige nitrifikationshæmmere i et screeningsforsøg. Disse var økologisk plant acid fra AddCon, Sheaskrå fra OK Biotech, Actiferm fra VISKAL, gavnlige microorganismer fra GreenF, pilebarksaft fra Grainas A/S, Zeo-Sand fra ZeoCem, BioChar af blandet strå fra Frichs Pyrolyse, 50% Tannic acid ekstraheret fra gallenøder i Kina, tørret og knust Lancet Vejbred opsamlet i Foulum (Teknologisk Institut, 2021). Fra disse screeningsforsøg blev det konkluderet at "de mest interessante nitrifikationshæmmere var plant acid og sheaskrå, som begge havde en reducerende effekt på N<sub>2</sub>O udledning". Og at "den reducerende N<sub>2</sub>O udledning højst sandsynligt kan tilskrives en antimikrobiel effekt på de nitrificerende og denitrificerende mikroorganismer, men yderligere forsøg skal udføres for at bekræfte denne hæmningsmekanisme. Effekten af ren tannic acid bør også undersøges yderligere da resultaterne fra en 50% tannic acid blanding var tvetydig" (Teknologiske Institut, 2021).

## BARRIERER FOR UDVIKLING OG IMPLEMENTERING

Der mangler i høj grad forskning på området, under danske forhold. Mange studier om biologiske nitrifikationshæmmere er lavet på tropiske planter eller under næringsstoffebegrænsede forhold, og resultaterne kan derfor ikke direkte overføres til danske forhold. Herudover, mangler der viden om, hvilke sorter eller genotyper der er tale om, ved de forskellige plantearter hvor man har set biologisk nitrifikationshæmning, samt i hvor høj grad dette er karakteristika der ses ved flere sorter og genotyper. Pijlman et al. (2020) konkluderer i et studie om biologisk nitrifikationshæmning i vejbred, at genotype kan have spillet en rolle, da man har fundet at koncentrationen af nitrifikationshæmmende stoffer i vejbred er genotype specifik. Det er derfor sandsynligt at dette også kan gøre sig gældende ved andre plantearter. Studier om naturlige nitrifikationshæmmere er potentielt nemmere at afprøve under danske forhold, da der ikke kræves særlige plantearter og sorter til formålet. Men det afhænger i høj grad også af om det er muligt at skaffe de relevante produkter, som skal bruges som nitrifikationshæmmer.

Der kunne potentielt være en mulighed for at lave GMO afgrøder, som har evnen til at udskille nitrifikationshæmmende stoffer under deres vækst. Hvis dette kan gøres effektivt og planterne på denne måde kan øge kvælstofudnyttelsen og mindske lattergasudledningen, ville det være et stort teknologispring. På dette område kan der dog være lovgivningsmæssige barrierer, samt forventninger fra forbrugerne, som ikke ønsker f.eks. mælk fra køer som er fodret med GMO afgrøder.

For at biologiske og naturlige nitrifikationshæmmere kan blive et udbredt virkemiddel til at mindske lattergasemissionen fra marken, så er det af stor betydning hvor dyrt det er at implementere, samt hvor stor virkningen er. Ydermere, kan der være lovgivningsmæssige barrierer for implementering.

## GMO med kvælstoffikserende egenskaber

Som kort nævnt kan der være et potentiale i at udvikle GMO afgrøder med nitrifikationshæmmende egenskaber. Der er potentiale for flere kvælstofegenskaber med GMO. I følgende beskrives potentialet i at udvikle afgrøder, med kvælstoffikserende egenskaber.

Kvælstofgødning er uundværligt for at opretholde produktionen i markbruget. Størstedelen af den kvælstofholdige gødning, der produceres kemisk i dag, fremstilles ved Harber-Borsch processen, som er en meget energikrævende- og i sig selv klimabelastende proces (Rosenblueth et al., 2018). Herudover estimeres med den nuværende emissionsfaktor (IPCC 2006), at 1 pct. af tilført kvælstofgødning forsvinder fra marken som lattergas (Hergoualc'h et al., 2019). Kvælstofgødning er derfor en betydelig årsag til klimapåvirkning fra markbruget.

Flere steder i verdenen forskes der derfor i at udvikle nitrogenfikserende kornprodukter, som vi kender fra bælgfrugter, der i en symbiose med kvælstoffikserende bakterier optager det meste af det kvælstof de har brug for, fra luften (Ryu et al., 2020). I Voigt laboratoriet har man fokuseret på at overføre de specifikke gener til selve afgrøden, som findes i de nitrogenfikserende bakterier, der er kendt for at indgå i symbiose med bælgfrugter. Generne hedder *nif* gener, og de forsøger at de proteinstrukturer (nitrogenase-klynger), der fikserer nitrogen fra luften kommer til udtryk i bakterien (Miller, 2020). Andre steder i verdenen har man fokus på de bakterier, der i forvejen findes sammen med kornprodukter - både i jorden og på røddernes overflade eller indre – og forsker i, om de nitrogenfikserende egenskaber kan overføres til disse (Ryu et al., 2020).

Hvis det lykkedes at overfører kvælstoffikserende gener til kornprodukter, eller bakterier der kan gå i symbiose med disse afgrøder, ville man kunne spare en masse kvælstofgødning, fordi planterne selv vil evne at fikserer det- eller dele af det kvælstof, de har brug for (Miller, 2020).

## REGNEEKSEMPEL MED KLIMAEFFEKT AF KVÆLSTOFFIKSERENDE EGENSKABER

Klassiske kornprodukter og majs stammer fra den samme familie (korn der potentielt kan genmodificeres) og disse dyrkes i stort omfang i Danmark.

I 2021 blev der i Danmark dyrket hhv.: (Landbrugsstyrelsen, 2020; Landbrugsstyrelsen, 2021a).

545.841 ha vårbyg, med en Gns. kvælstofnorm (af JB 1 – 9) på 146 kg N/ha  
486.350 ha vinterhvede, med en Gns. kvælstofnorm (af JB 1 – 9) på 197 kg N/ha  
173.945,8 ha silomajs, med en Gns. kvælstofnorm (af JB 1 – 9) på 166 kg N/ha

Til de tre store kornafgrøder blev der, hvis gødet til normen, anvendt godt 204 kt N total i 2021. Antages det, at ca. halvdelen af total N tildeles som handelsgødning svarere dette til godt 102 kt N, mens den resterende del, 102/0,75 kt N (udnyttelseskrav), kommer fra husdyrgødning.

Klimaaftrykket fra denne handels- og husdyrgødning kan estimeres ved:

### • Klimaaftrykket fra handelsgødning (et ca. overslag) (Hvid, 2021):

- Produktion: 3,8 kg CO<sub>2</sub>e pr. kg N
- Lattergasemission fra marken, direkte:  $1 \text{ kg N} * 1,57 * 0,01 * 298 = 4,68 \text{ kg CO}_2\text{e pr. kg N}$
- Lattergas fra ammoniak:  $1 \text{ kg N} * 1,57 * 0,05 * 0,01 * 298 = 0,23 \text{ kg CO}_2\text{e pr. kg N}$

*Hvor: 1,57 er omregningsfaktoren fra N til N<sub>2</sub>O; 0,05 er den Gns. ammoniakfordampning fra handelsgødning; 0,01 er standard-emissionsfaktoren for kvælstof til lattergas (IPCC 2006); og 298 er GWP.*

Total pr. kg handelsgødning: 8,7 kg CO<sub>2</sub>e pr. kg N

### • Klimaaftrykket fra svinegylle (et ca. overslag) (Hvid, 2021):

- Det antages, at emissionen fra produktionen ikke tælles med i opgørelsen af klimaaftrykket fra markfladen, men i stedet tælles med i klimaaftrykket fra husdyrproduktionen.
- Lattergasemission fra marken, direkte:  $1 \text{ kg N} * 1,57 * 0,01 * 298 = 4,68 \text{ kg CO}_2\text{e pr. kg N}$
- Lattergas fra ammoniak:  $1 \text{ kg N} * 1,57 * 0,75 \text{ (andel af urea-N i husdyrgødning)} * 0,107 \text{ (Gns. ammoniakfordampning)} * 0,01 * 298 = 0,38 \text{ kg CO}_2\text{e pr. kg N}$

*Hvor: 1,57 er omregningsfaktoren fra N til N<sub>2</sub>O; 0,75 er andelen af urea i husdyrgødning; 0,107 er den Gns. ammoniakfordampning fra husdyrgødning; 0,01 er standard-emissionsfaktoren for kvælstof til lattergas (IPCC 2006); og 298 er GWP.*

Total pr. kg husdyrgødning: 5,1 kg CO<sub>2</sub>e pr. kg N

Emissionen fra kvælstofforbruget til kornproduktionen af de tre afgrøder var i 2021:  
887 kt CO<sub>2</sub>e fra handelsgødning + 693,6 kt CO<sub>2</sub>e fra husdyrgødning = 1581 kt CO<sub>2</sub>e.

Antages det, at afgrøderne ved GMO-teknologien selv kan fikse al det kvælstof de har behov for, kan der altså opnås en årlig besparelse på ca. 1581 kt CO<sub>2</sub>e fra de tre afgrøder. Antages det, at man ved GMO-teknologien kan opnå at fikseringen dækker 50 pct. af kvælstofbehovet, mens den resterende del tildeles som husdyrgødning, kan man med teknologien årligt spare ca. 887 kt CO<sub>2</sub>e.

Der vil potentielt være en øget lattergasemission fra afgrøderesterne, idet afgrøderesterne kan indeholde en øget andel kvælstof grundet fiksering. Dette skal modregnes reduktionen i lattergasemissionen forbundet med teknologien.

## BARRIERER/PERSPEKTIV FOR UDVIKLING OG IMPLEMENTERING

Planter der kan optage kvælstof fra luften, optager dette via en symbiose med bakterier, der fikserer N<sub>2</sub>. Der er forskel på hvordan gener udtrykkes i bakterier (prokaryoter) og planter (eukaryoter). Derfor er det en udfordring at overfører gener fra bakterier direkte til planter. Herudover er de *nif* gener, der fikserer kvælstoffet involveret i en kompleks kaskade; '*the nif pathway*' som er stor og involverer mange forskellige gener, der er påkrævet for at processen kan forløbe. Det er derfor komplekst at overfører denne egenskab direkte til kornafgrøder. Udfordringen ved at overfører generne til bakterier der kan associeres til kornafgrøder er, at hovedparten af disse ikke kan fikserer kvælstof 'uden for den rodknold' bælgeplanter er kendt for at lave om bakterierne – det er en knold som kornafgrøder ikke danner (Ryu et al., 2020). Derfor forskes der endnu i mulige løsninger på teknologien.

På verdensplan stiger anvendelsen af GMO-teknologien, især i USA, Sydamerika, Indien og Canada, og i Danmark importerer vi GMO-foder til vores husdyr. På trods af, at teknologien bliver mere og mere anvendt, skaber den stadig grundlag for stor debat, grundet bekymring for om GMO'en spreder sig til det omkringliggende miljø, samt bekymring for sundhed i dyr og mennesker. I EU har vi derfor en lovgivning om GMO-afgrøder, og der foretages en risikovurdering af GMO'en, inden der kan foretages en godkendelsesbehandling af denne. Risikovurderingen består i at sammenligne GMO'en med tilsvarende ikke-genmodificerede organismer, og på baggrund af det vurderes det om GMO'en kan anvendes til foder- og fødevarerforbrug uden risiko for mennesker og dyrs sundhed, samt for miljøet. Det er den Europæiske Fødevarsikkerhedsautoritet (EFSA), der er ansvarlig for risikovurderingen af GMO'er til foder- og fødevarerforbrug i Europa (Landbrugsstyrelsen, 2021b).

Ud over mulig påvirkning på miljø og sundhed, vil der være økonomiske omkostning forbundet med at omlægge store kornafgrøder til GMO-afgrøder. Omvendt er der lige nu både økonomiske og miljømæssige byrder i den måde vi i dag anvender kvælstofgødning til at opretholde vores kornproduktion (Ryu et al., 2020). Dette, samt potentialet for et bedre udbytte, vil skulle modregnes den omkostning der vil være ved at omlægge en produktion af korn, til sorter der via GMO kan opnå kvælstoffikserende effekt. Dog har man fra kløver set, at der kan opstå kløvertræthed, hvis afgrøden dyrkes med for høj frekvens. Derfor kan der være anledning til at overveje, at der potentielt kan være en risiko ved at have for mange genmodificerede kvælstoffikserende afgrøder i sit sædskifte.

### Ureasehæmmer (en gammel ny teknologi)

I Danmark har forbruget af urea-gødning længe været beskedent, fordi dette er forbundet med en høj ammoniakfordampning og lav kvælstofudnyttelse. Den lave kvælstofudnyttelse i urea-gødning har betydet at størstedelen af kvælstofforbruget i Europa gennem mange år har været ammonium-nitrat. Dog kan urea-gødning blive mere aktuelt, fordi brug af ureasehæmmer eller evt. en kombination ureasehæmmer og Thiosulfat kan hæmme emissionen af både ammoniak og lattergas fra marken, i forbindelse med anvendelse af gødningen. I januar 2020 trådte derfor en lov i kraft om tilsætning af ureasehæmmer til urea-baseret kvælstof (amidkvælstof) (Danish Agro, 2019).

Den hyppigste og mest gennemtestede ureasehæmmer er Agrotain (nBTPT), med aktivstoffet (N-(n-butyl)-thiophosphoric (Hutchings & sommer, 2020). Aktivstoffet i Agrotain virker ved at hæmme urease-enzymet, som er det enzym, der omdanner amid (urea) til ammonium. Når omdannelsen af amid-N til ammonium hæmmes, reduceres det tab af kvælstof, der kommer fra ammoniakfordampning fra marken (Danish Agro, 2019).

## AMMONIAKREDUKTION MED UREASEHÆMMER

Gødskning med urea giver anledning til en markant ammoniakfordampning, idet urea omsættes til ammonium. Ammoniak er ikke direkte en drivhusgas, men fordampningen belaster miljøet med kvælstof, som senere kan blive til lattergas. Derfor er ammoniak en indirekte kilde til drivhusgaspåvirkning fra

markbruget. Der findes ikke danske forsøg med ureasehæmmer til urea-gødning, men forsøg med ureasehæmmer fra udlandet viser meget stor variation i ammoniakreduktionen:

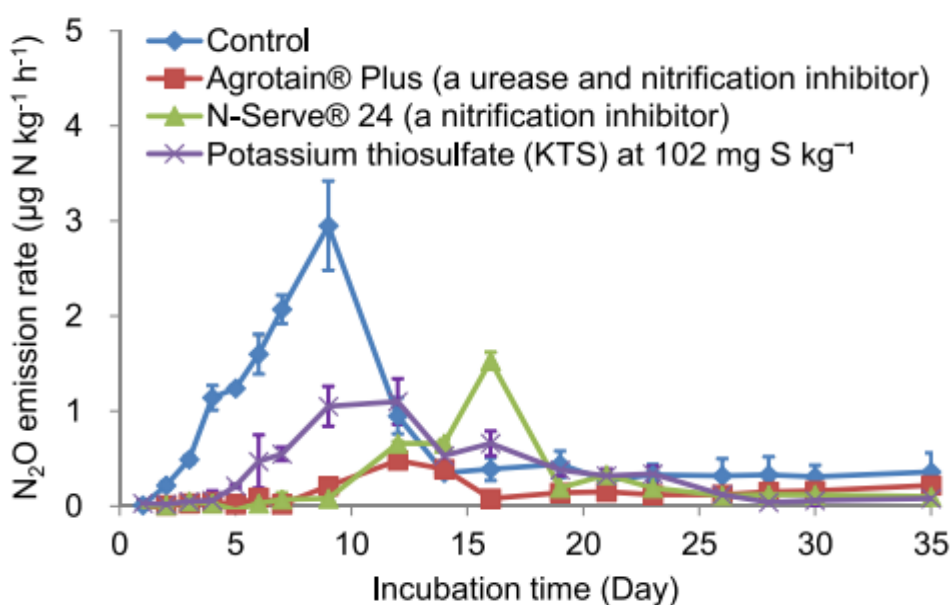
Forsøg med Agrotain fra Storbritannien har fundet en reduktion i ammoniakfordampningen fra urea-gødning på 70 pct. (41 – 100 pct.), og fra UAN-gødning er der fundet en reduktion på 44 pct. (mellem 15 og 71 pct.). I Tyskland er der udført målinger af ammoniakfordampning fra urea udbragt på græs efter tilsætning af ureasehæmmeren N-(2-nitrophenyl) phosphoric triamide (2-NPT). Her fandt man en reduktion på mellem 69 og 100 pct. Andre forsøg med Agrotain i Tyskland har fundet en reduktion på 32 pct, og i et metastudie er det fundet, at nBTPT reducerede ammoniakemissionen fra urea med 52 pct. (Hutchings & sommer, 2020).

Med den store variation i resultaterne, regner vi med/estimeres fra Aarhus Universitet, at der med ureasehæmmer opnås en ammoniakreduktion på 60 pct. fra urea-gødning, og på 44 pct. fra UAN-gødning (Hutchings & sommer, 2020).

### LATTERGASREDUKTION MED UREASEHÆMMER OG THIOSULFAT

Kalium-Thiosulfat (KTS) har vist sig at være nitrifikationshæmmende, med potentiale for at reducere lattergasemissionen fra marken (Cai et al., 2018). Den hæmmende effekt opstår af den direkte giftige effekt Thiosulfat har på de bakterier og mikroorganismer der oxiderer nitrit.

I USA har man lavet laboratorieforsøg med både AgrotainPlus (en urease- og nitrifikationshæmmer), en kommerciel nitrifikationshæmmer samt KTS i grov-sandet jord. Sammenlignet med kontrol, var resultaterne fra forsøget, at tilsætning af KTS i mængderne; 26, 51 og 102 mg  $S_2O_3^{2-}$ -S pr. kg jord reducerede lattergasemissionen signifikant, med hhv. 30, 26 og 48 pct. Mens lattergasemissionen fra jorden tildelt 26 og 51 mg  $S_2O_3^{2-}$ -S pr. kg jord i høj grad fulgte det samme emissionsforløb som kontrol (dog i sidste ende med en total reduktion), ses at emissionen tilsat 102 mg  $S_2O_3^{2-}$ -S pr. kg jord følger et helt andet forløb end emissionen fra kontrol (figur 4). AgrotainPlus tilført i den anbefalede mængde (6,8 kg pr. t UAN, svarende til 23,4 g pr. Kg N), reducerede den samlede lattergasemission med 78 pct, og N-serve (en kommerciel nitrifikationshæmmer) tilført i mængden 10,9 ml pr. kg N, reducerede emissionen med 60 pct. (Cai et al., 2018).



Figur 4. Rate for lattergasemission i et kontrolforsøg; Tilsat 6,8 kg AgrotainPlus pr. t UAN; tilsat Kalium-thiosulfat (KTS) i mængden 102 mg  $S_2O_3^{2-}$ -S pr. kg jord; samt tilsætning af en kommerciel nitrifikationshæmmer (N-Serve) i mængden 20,9 ml pr. Kg N.

Figur 4 viser, at lattergasemissionen i kontrolforsøget uden nogen form for hæmmer, steg betydeligt i tiden efter UAN-tildeling, mens emissionsforløbet er helt anderledes- samt at totalemissionen var betydeligt



reduceret af de respektive hæmmerer. Den samlede lattergasemission fra behandlingen med KTS (102 mg S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>-S pr. kg jord) var ikke signifikant anderledes end emissionen fra en behandling med en kommerciel nitrifikationshæmmer (N-Seve). Dog ses, at lattergasemissionen fra behandling med KTS er signifikant højere end emissionen fra AgroatinPlus-behandlingen (Cai et al., 2018).

## REGNEEKSEMPEL MED KLIMAEFFEKT AF UREASEHÆMMER

I 2019 var ca. forbruget af amid-gødning tilført som handelsgødning i Danmark hhv.;

Tabel 2. En del af det uorganisk N-gødningsforbrug i 2019 med tilhørende NH<sub>3</sub> emissionsfaktor (Nielsen et al., 2021).

Gødningstype	NH <sub>3</sub> emissionsfaktor kg NH <sub>3</sub> -N pr. kg N.	Forbrug, kt N
Urea	0,157	0,45
Flydende UAN	0,097	12,04
Flydende nitrat	0,097	22,79

Til beregning af lattergas-effekten med ureasehæmmer, anvendes tidligere formler (Hvid, 2021):

• Lattergasemission fra ammoniak i handelsgødning pr. kg N:

$$1 \text{ kg N} * 1,57 * 0,05 \text{ (Gns. ammoniakfordampning)} * 0,01 * 298 = 0,23 \text{ kg CO}_2\text{e pr. kg N}$$

*Hvor: 1,57 er omregningsfaktoren fra N til N<sub>2</sub>O; 0,05 er den Gns. ammoniakfordampning fra handelsgødning; 0,01 er standard-emissionsfaktoren for kvælstof til lattergas (IPCC 2006); og 298 er GWP.*

Frem for den Gns. ammoniakfordampning anvendes i stedet differentierede emissionsfaktorer for NH<sub>3</sub> for de respektive gødninger, og der regnes med en reduktion i ammoniakfordampningen på hhv. 60 og 44 pct. fra urea-gødning og UAN/flydende gødning tilsat ureasehæmmer.

### Urea-gødning

Lattergasemission fra ammoniak i urea-gødning uden ureasehæmmer:

$$1 \text{ kg N} * 1,57 * 0,157 * 0,01 * 298 = 0,73 \text{ kg CO}_2\text{e pr. kg N} * 0,45 \text{ kt N} = 0,33 \text{ kt CO}_2\text{e i 2019}$$

Lattergasemission fra ammoniak i urea-gødning med ureasehæmmer:

$$1 \text{ kg N} * 1,57 * (0,157 * 0,4) * 0,01 * 298 = 0,29 \text{ kg CO}_2\text{e pr. kg N} * 0,45 \text{ kt N} = 0,13 \text{ kt CO}_2\text{e i 2019}$$

$$\text{Lattergasbesparelse med ureasehæmmer i urea-gødning:} = 0,33 - 0,13 = 0,2 \text{ kt CO}_2\text{e i 2019}$$

### UAN-gødning

Lattergasemission fra ammoniak i UAN-gødning uden ureasehæmmer:

$$1 \text{ kg N} * 1,57 * 0,097 * 0,01 * 298 = 0,45 \text{ kg CO}_2\text{e pr. kg N} * 12,04 \text{ kt N} = 5,46 \text{ kt CO}_2\text{e i 2019}$$

Lattergasemission fra ammoniak i UAN-gødning med ureasehæmmer:

$$1 \text{ kg N} * 1,57 * (0,097 * 0,56) * 0,01 * 298 = 0,25 \text{ kg CO}_2\text{e pr. kg N} * 12,04 \text{ kt N} = 3,05 \text{ kt CO}_2\text{e i 2019}$$

$$\text{Lattergasbesparelse med ureasehæmmer i UAN-gødning:} = 5,46 - 3,05 = 2,41 \text{ kt CO}_2\text{e i 2019}$$

### Flydende nitrat

Lattergasemission fra ammoniak i Flydende nitrat uden ureasehæmmer:

$$1 \text{ kg N} * 1,57 * 0,097 * 0,01 * 298 = 0,45 \text{ kg CO}_2\text{e pr. kg N} * 22,79 \text{ kt N} = 10,39 \text{ kt CO}_2\text{e i 2019}$$

Lattergasemission fra ammoniak i Flydende nitrat med ureasehæmmer:

$$1 \text{ kg N} * 1,57 * (0,097 * 0,56) * 0,01 * 298 = 0,25 \text{ kg CO}_2\text{e pr. kg N} * 22,79 \text{ kt N} = 5,82 \text{ kt CO}_2\text{e i 2019}$$

$$\text{Lattergasbesparelse med ureasehæmmer i Flydende nitrat:} = 10,39 - 5,82 = 4,57 \text{ kt CO}_2\text{e i 2019}$$

## **BARRIERER/PERSPEKTIV FOR UDVIKLING OG IMPLEMENTERING**

Der foreligger forsøg fra laboratoriemålinger af effekten af thiosulfater på lattergasemissionen, men der mangler stadig måling foretaget i marken. På grund af mangel på forsøg med effekten af KTS på lattergasemissionen, har man ikke helt afklaret potentialet for at anvende dette til at reducere lattergasemission i marken. Hvis det i markforsøg viser sig, at KTS er lige så effektivt som andre kommercielle hæmmere, kan man med KTA øge kvælstofudnyttelsen og reducere omkostningerne ved gødningsanvendelse i marken (Cai et al., 2018).

Fordi der uden brug af ureasehæmmer er stor ammoniakfordampning forbundet til gødsning med urea-gødning, er størstedelen af gødningsforbruget i Danmark baseret på produktion af AN-gødning. Hvis anvendelse af urea-gødning tilsat hæmmer skal udbredes, kræver det derfor en omlægning i produktionen af gødning. Hvad den økonomiske pris forbundet til denne omlægning vil være, er svær at gisne om, men det kan tages med i betragtningen, at urea-gødning er billigere end AN-gødning. Derfor kan der være potentiale i at anvende urea-gødning, hvis man med ureasehæmmer og thiosulfat kan reducere N tabet, sådan at kvælstofudnyttelsen stiger og urea bliver en rentabel gødning ift. AN-gødning.

## Referencer

- Danish Agro (2019). Nyhedsbrev August, Emne: Ny husdyrbekendtgørelse vedrørende Agrotain. Tilgængelig: [Ny Husdyrbekendtgørelse omhandlende tilsætning af Agrotain.pdf \(danishagro.dk\)](#)
- Di Martino, C., Palumbo, G., Di Iorio, E., Colombo, C., & Crawford, T. W. (2021). Effects of Olive Mill Wastewater and Two Natural Extracts as Nitrification Inhibitors on Activity of Nitrifying Bacteria, Soil Nitrate Leaching Loss, and Nitrogen Metabolism of Celery (*Apium graveolens* L.). *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(5), 1922-1938.
- Cai, Z., Gao, S., Xu, M., & Hanson, B. D. (2018). Evaluation of potassium thiosulfate as a nitrification inhibitor to reduce nitrous oxide emissions. *Science of the Total Environment*, 618, 243-249.
- Hvid, S. K. (2010). [Effekt af urease inhibitor på ammoniakfordampning og klimapåvirkning fra amidholdig gødning \(landbrugsinfo.dk\)](#)
- Hvid, S. K. (2021). Klimaaftryk fra produktion af handelsgødning. Notat, SEGES.
- Hutchings & sommer, 2020. Vurdering af emissionsfaktorer ved ændret udbringningspraksis for urea og svovlsur ammoniak. DCA – National Center for Fødevarer og Jordbrug. [Emissionsfaktorer for urea og svovlsur ammoniak 19.06.2020.pdf \(au.dk\)](#)
- Hergoualc'h, K., Akiyama, H., Bernoux, M., Chirinda, N., del Prado, A., Kasimir, Å., ... & Weerden, T. J. V. D. (2019). IPCC, kap 11. N2O emissions from managed soils, and CO2 emissions from lime and urea application. [CHAPTER 11 \(cgiar.org\)](#)
- Landbrugsstyrelsen (2020). Vejledning om gødsning og harmoniregler. Planperioden 1. august 2020 til 31. juli 2021. Miljø- og Fødevarerministeriet, Landbrugsstyrelsen. [Vejledning om gødsnings- og harmoniregler 2020 2021.pdf \(lbst.dk\)](#)
- Landbrugsstyrelsen (2021a). Opgørelse af afgrødefordeling 2021. Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri. J.nr. 21-22120-000143
- Landbrugsstyrelsen (2021b). GMO. Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri. Tilgængelig: [GMO - Landbrugsstyrelsen \(lbst.dk\)](#)
- Miller, L. (2020). Making real a biotechnology dream: nitrogen-fixing cereal crops. Massachusetts Institute of Technology, MIT News. Tilgængelig: [Making real a biotechnology dream: nitrogen-fixing cereal crops | MIT News | Massachusetts Institute of Technology](#)
- Nielsen, O., et al., (2021). Denmark's national inventory report 2021. Emission Inventories 1990-2012 – Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 237
- Pijlman, J., Berger, S. J., Lexmond, F., Bloem, J., van Groenigen, J. W., Visser, E. J., ... & van Eekeren, N. (2020). Can the presence of plantain (*Plantago lanceolata* L.) improve nitrogen cycling of dairy grassland systems on peat soils?. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 63(1), 106-122.
- Rosenblueth, M., Ormeño-Orrillo, E., López-López, A., Rogel, M. A., Reyes-Hernández, B. J., Martínez-Remero, J. C., Reddy, P. M., & Martínez-Romero, E. (2018). Nitrogen Fixation in Cereals. Tilgængelig: [Frontiers | Nitrogen Fixation in Cereals | Microbiology \(frontiersin.org\)](#)

Ryu, M. H., Zhang, J., Toth, T., Khokhani, D., Geddes, B. A., Mus, F., ... & Voigt, C. A. (2020). Control of nitrogen fixation in bacteria that associate with cereals. *Nature microbiology*, 5(2), 314-330.

Sahrawat, K. L. (1982). Comparative evaluation of karanjin and extracts of karanja (*Pongamia glabra* Vent.) and neem (*Azadirachta indica* L.) seeds for retardation of nitrification of urea in soil. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 30(2), 156-159.

Subbarao, G. V., Rao, I. M., Nakahara, K., Sahrawat, K. L., Ando, Y., & Kawashima, T. (2013). Potential for biological nitrification inhibition to reduce nitrification and N<sub>2</sub>O emissions in pasture crop–livestock systems. *Animal*, 7(s2), 322-332.

Teknologisk Institut (2021). Laboratorienotat. Screening af naturlige og biologiske nitrifikationshæmmere.