

Tidsskrift for miljø og natur

VAND & JORD

KLIMAMÅL I DANSK FØDEVAREPRODUKTION

- METAN FRA DRØVTYGGERE
- LATTERGAS FRA JORD
- KULSTOF I LANDBRUGSJORD
- TØRVEJORD
- BÆREDYGTIGE LANDSKABER
- PLANTEBASEREDE FØDEVARER

3

NEPPER & STAGEHØJ 29. årgang • September 2022
FORLAGET



Vil du være med til at løse vigtige miljøudfordringer?

Klimaforandringer giver mange udfordringer for samfundet. Vi har brug for at udvikle løsninger og nye metoder til at håndtere oversvømmelser og tørke, producere rent vand, udvinde energi fra biomasse og genanvende ressourcer. Vi skal sikre, at kemiske stoffer og mikroplast ikke skader mennesker og miljø.

Søg ind på bacheloruddannelsen i Miljøteknologi og vær med til at løse nogle af disse udfordringer, i Danmark og resten af verden.

Bachelorstudiet i Miljøteknologi bygger videre på din viden fra gymnasiet i bl.a. kemi, naturgeografi, bioteknologi, matematik og fysik. Du får også viden i nye fag som miljø og bæredygtighed, klimaændringer, geologi, økologi og miljøtekniske processer.

Hør mere til Online Åbent Hus på DTU 28. juni 2022.



Online
Åbent hus
på DTU 28. juni
aabenthus.dtu.dk



VAND & JORD

Vand & Jord er et dansk fagtidsskrift med artikler og debat om miljøforhold i vore ydre omgivelser. Emnerne omfatter alle forhold i vandets kredsløb, rent eller forurenset. Tidsskriftet formidler ny og aktuel viden til alle, der arbejder med og har interesse i dansk og international miljø- og naturbeskyttelse.

Vand & Jord er uafhængig af organisations- og firma-interesser.

© Selskabet for Vand & Jord
og Forlaget Nepper & Stagehøj

REDAKTION:

Charlotte Kjærgaard, NovaDrain ApS, ansv.
Claus Hagebro, cand. scient.
Søren Brandt, Herning Kommune
Anja Skjoldborg Hansen, Aarhus Universitet
Astrid Zeuthen Jeppesen, NIRAS
Poul L. Bjerg, Danmarks Tekniske Universitet - DTU Miljø

REDAKTIONSKOMITÉ:

Anders Erichsen, DHI
Loren Ramsay, VIA UC
Mogens Flindt, SDU
Heidi Barlebo Christiansen, GEUS
Uffe Gangelhof, Vandcenter Syd
Peter Holm, KU-PLEN

Redaktionskomitéens medlemmer er personligt valgt. De tegner i Vand & Jord-sammenhæng ikke de firmaer eller institutioner, hvor de er ansat.

Mekanisk, fotografisk eller anden gengivelse er kun tilladt i overensstemmelse med overenskomst mellem Undervisningsministeriet og Copy-Dan. Enhver anden udnyttelse er uden selskabets og forlagets skriftlige tilladelse forbudt ifølge gældende dansk lov om ophavsret. ISSN 0908-7761

Abonnementspris 2022 – 4 numre pr. år
Institutionsabonnement: kr. 600,00 inkl. moms
Privat abonnement: kr. 240,00 inkl. moms.
Studenterabonnement: kr. 150,00 inkl. moms.
Virksomhedsabonnement kr. 5.000 kr. inkl. moms
Alle priser er inkl. forsendelse.

Se mere på <http://www.vandogjord.dk/>
– her findes også forfattervejledning

PRODUKTION: Vand & Jord ApS
LAYOUT: Forlaget Nepper & Stagehøj
TRYK: P. E. Offset & Reklame A/S, Varde

UDGIVER OG ABONNEMENT:

Forlaget Nepper & Stagehøj
Nojsomhedsvej 19, st.tv.
2100 København Ø
Tlf. 35 26 45 31
e-mail: forlaget@nepperogstagehoej.dk

ANNONCER:

Claus Hagebro
Fuglevænget 10
3520 Farum
Tlf. 44 95 07 60
e-mail: hagebro3@hotmail.com

Forsidefoto: Risø halvø ved Roskilde Fjord.
Foto af Anja Skjoldborg Hansen

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Synspunkt: Klimaomstillingen af dansk landbrug er en kæmpeopgave | 88 |
| <i>Jørgen E. Olesen</i> | |
| Hvordan nås klimamålet samtidig med andre bæredygtighedsmål? | 90 |
| <i>Jørgen E. Olesen</i> | |
| Muligheder for at begrænse metan fra drøvtyggere | 93 |
| <i>Peter Lund, Ole Højberg, Christian F. Børsting, Mette Olaf Nielsen, Trine Villumsen & Martin R. Weisbjerg</i> | |
| Minimering af klimapåvirkning fra lagret husdyrgødning | 96 |
| <i>Anders Feilberg, Frederik Rask Dalby, Jesper Nørlem Kamp, Søren O. Petersen & Anders Peter S. Adamsen</i> | |
| Lattergasemission fra jord – kilder og kontrol | 100 |
| <i>Søren O. Petersen, Diego Abalos & Lars Stoumann Jensen</i> | |
| Kan vi øge kulstofindholdet i landbrugsjorden? | 104 |
| <i>Jobannes L. Jensen, Lars J. Munkholm & Jørgen Eriksen</i> | |
| Biokul – et klimamæssigt kinderæg | 107 |
| <i>Sander Bruun, Tobias Pape Thomsen, Dorette Müller-Stöver & Lars Elsgaard</i> | |
| Tørvejordernes fremtidsudsigter | 112 |
| <i>Cecilie Hermansen, Lis Wollesen de Jonge & Mogens Humlekrog Greve</i> | |
| Flerårige afgrøders rolle i klimakampen | 116 |
| <i>Uffe Jørgensen, Poul Erik Lærke & Henrik Brinck-Pedersen</i> | |
| Landskaber med fokus på klimaneutralitet og bæredygtighed | 122 |
| <i>Tommy Dalgaard</i> | |
| Plantebaserede fødevarer som klimavirkemiddel | 126 |
| <i>Christian Bugge Henriksen</i> | |

Vand & Jord udgives med
støtte fra:



ATV JORD OG GRUNDVAND



AARHUS
UNIVERSITET
DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI



INSTITUT FOR AGROØKOLOGI
AARHUS UNIVERSITET



SDU

Klimaomstillingen af dansk landbrug er en kæmpeopgave

Klimaet på dagsordenen

Med folketingsvalget i 2019 kom klimaet på den politiske dagsorden i Danmark. Det skete i kølvandet på COP21 i Paris i 2015, hvor der blev international enighed om at holde de globale klimaændringer under 2°C. Desuden skabte den rekordtørre sommer i 2018 forståelse for aktualiteten og alvorligheden i klimaændringer. I virkeligheden blev det politiske grundlag skabt for 35 år siden med Brundtland-kommissionens rapport om miljø og udvikling "Vor fælles fremtid", der bl.a. konkluderede, at de industrialiserede lande skulle halvere deres energiforbrug per indbygger inden for 40 år for at kunne skabe plads til et stigende forbrug i udviklingslandene. Siden da er forbruget steget stærkt i udviklingslandene uden at der er sket stort i de industrialiserede lande.

Efter folketingsvalget i 2019 var der blandt stort set alle partier enighed om en ambitiøs klimapolitik med reduktioner i udledningerne på 70% inden 2030 i forhold til niveauet i 1990. Landbrugets udledninger af klimagasser udgjorde i 2018 ca. 35% af de samlede danske udledninger, og landbrugets udledninger er kun faldet med ca. 15% siden 1990. På globalt plan står fødevarerforbruget for ca. en tredjedel af klimabelastningen, og der er således god grund til større fokus på grøn omstilling af landbrugs- og fødevarerproduktionen.

Folketingets klimaambitioner blev udmøntet i klimaloven fra 2020, og i oktober 2021 indgik et stort flertal af partierne en aftale om grøn omstilling af landbruget. Aftalen indeholdt en køreplan for reduktioner i landbrugets udledninger af klimagasser. Her indgår både teknologiske løsninger i landbruget og ændringer i forbruget mod flere plantebaserede fødevarer. Størstedelen af reduktionerne er dog planlagt at komme fra teknologier, som endnu ikke er udviklede eller afprøvede i praksis.

Grøn omstilling tager tid

Den grønne omstilling kommer ikke af sig selv, og der er mange tanker om hvordan omstillingen kan understøttes og fremmes. Det fremføres ofte af både miljøøkonomer og politikere at en ensartet CO₂-afgift vil være det vigtigste redskab til sikre emissionsreduktioner, fordi dette sikrer ensartede priser på forurening og dermed incitamenter på



Vand på mark ved Bovbjerg. Foto: Bent Lauge Madsen.

tværs af sektorer. For landbruget er der dog væsentlige problemstillinger i denne præmis, især relateret til tre forhold: lækageudfordringen, emissionsopgørelser og investeringer i nye teknologier.

Lækageudfordringen

Dansk landbrug er stærkt eksportorienteret med 70-80% af produktionen afsat på eksportmarkederne og samtidig en betydelig import af fødevarer. En beskatning af udledningerne i Danmark vil øge produktionsomkostningerne for danske landmænd, og dermed stille danske landmænd dårligere konkurrencemæssigt på både hjemmemarked og eksportmarkederne. Dette giver i sidste end risiko for lækage af udledningerne, fordi produktionen flytter til andre lande med ringere regulering af udledninger og dermed i virkeligheden risiko for at udledningerne øges samtidig med at fødevarerforsyningen mindskes.

Emissionsopgørelser

Det er ganske vanskeligt præcist at opgøre udledningerne af klimagasser fra landbrugets aktiviteter. Der er et stort behov for udvikling af opgørelsesmetoder, der bedre afspejler forskelle mellem produktionssystemer og lokale jord- og klimaforhold. Samtidig skal effekter af ændringer i management og teknologier naturligvis kunne afspejles i emissionsopgørelser på bedrifts og nationalt niveau. Udledninger af klimagasser fra landbruget er mangeartede og komplekse, og udvikling af bedre opgørelsesmetoder kræver en massiv forskningsindsats.

Ny teknologier

Det kræver væsentlige investeringer i nye teknologier og produktionssystemer at opnå de skitserede reduktioner i klima- og miljøpåvirkning samtidig med at fødevarerforsyningen øges. Dette forudsætter risikovillig kapital til både udvikling og implementering af teknologierne. En sådan kapital stilles kun til rådighed hvis der er rimelig garanti for afkast, og dette vil ikke alene afhænge af hvordan dansk landbrug reguleres, men også af hvordan klima- og miljøaftryk på fødevarer vurderes på de globale fødevaremarkeder. Her er det afgørende, at der skabes ensartede retningslinjer på tværs af landegrænser for hvordan klima- og miljøpåvirkninger opgøres.

Omstillingen skal speedes op

Med kun otte år til at opnå meget betydelige reduktioner er der brug for at øge hastigheden i alle nødvendige indsatser. Al erfaring viser at ting tager tid, og ikke mindst implementeringen af Vandrammedirektivet har vist, hvor svært og hvor langsomt det er at tage nye virkemidler i brug. De politiske ambitioner skal derfor følges op med handling på en langt større klinge, end hvad der hidtil har været set.

Jørgen E. Olesen

Jørgen E. Olesen er professor og institutleder ved Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi
e-mail: jeo@agro.au.dk



Biodiversitetssymposium

Land sparing & land sharing: Hvordan skabe vi plads til biodiversitet i et multifunktionelt produktionslandskab?

Arrangeret af IPBES i Danmark

Sted: Moesgaard Museum, Aarhus Universitet

Dato: 30. november 2022

Hvordan bevarer vi klodens biodiversitet? To tilgange, der har fået stor opmærksomhed i de seneste år er "land sparing", hvor fx landmænd intensiverer landbrugsdriften for at øge produktiviteten, hvilket teoretisk betyder, at ekspansion ind i naturarealer kan begrænses eller arealet med natur ligefrem kan øges.

Modsat er der "land sharing", hvor der anvendes miljøvenlige metoder eller tænkes en helt anden struktur i landskabet. Symposiumet her har fokus på biodiversitet indenfor det kontinuum "land sharing – land sparing" udgør i et multifunktionelt landskab specielt med fokus på det åbne land.

Symposiumet vil opdatere dig med den nyeste faglige forskningsmæssige viden. Der gives faglige indlæg til, hvordan vi kan få fremme biodiversitet og sikre bedre natursammenhæng i det danske landskab bl.a. med inspiration fra udenlandske undersøgelser. Vi har verdens førende forsker Professor Andrew Balmford fra Cambridge til at introducere os til emnet. Herefter tager en række danske topforskere fat inden for to kategorier:

- Hvordan afsætter vi areal til biodiversitet fra det eksisterende produktionsareal?
- Hvordan sikrer vi bedre biodiversitet i fremtidens produktionslandskab?

Med symposiumet forventer vi at spille ind til en ny planlægning og forvaltning, der vil være nødvendig for at bidrage til den gennemgribende forandring, der ifølge IPBES er nødvendig for at vende biodiversitetskrisen og skabe plads til biodiversitet.

Arrangør er IPBES i Danmark på en bevilling fra 15. Juni Fonden. Der er kaffe og rundstykker fra kl. 9:15, programmet starter kl. 9:50.

Invasiv daddelmusling fundet i Nordsøen

Den asiatiske daddelmusling (Asian date mussel, *Arcuatula senhousia*), som er i familie med blåmuslingen, er invasiv i de europæiske havområder. Ved stort antal kan den forårsage væsentlige økologiske og økonomiske problemer ved at udkonkurrere andre muslinger, ændre sedimentforholdene og ved at påvirke havgræssers vækst. Økologisk og økonomisk vigtige skaldyr som hjertemuslinger kan blive påvirket. Forskere har bekræftet tilstedeværelsen af denne art siden 2011 - i den sydlige Solent region i England, som er en del af Nordsø regionen.

Muslingen er "økosystem ingeniør" pga. sin evne til at ændre habitatet ved at tilføje struktur (i form af skallerne) og ændre sedimentforholdene. Ved antal af op til tusinder pr. kvadratmeter konkurrerer den med andre arter om plads og føde. Men de økologiske og økonomiske problemer for arter og levesteder i Europa er ufuldstændig.

Oprindelsesområdet for denne lille musling er Asien, hvor den findes fra Singapore til Sibirien. Den kan derfor introduceres i områder der påvirker både Nordamerika, Europa, Afrika og Oceanien.

Før dette studie var permanente populationer ikke bekræftet i Nordsø regionen, som omfatter kystlinier i Frankrig, Holland, Tyskland, Danmark, Norge, Sverige og Storbritannien.

Den første rapport om muslingen i Europa var fra det vestlige Middelhav i 1980'erne. I 2002 blev muslingen fundet i Arcachon Bugten på den franske atlantehavskyst. Herefter var der ikke observationer før i 2017 fra Solent regionen (et 32 km langt stræde mellem Isle of Wight og det engelske fastland) og i Holland i 2018.

Forskerne kombinerede data tilbage fra 2007 i tidevandsområder for at skabe en baseline for UK. Tilfældige observationer fra andre

overvågninger blev også fundet, ligesom information om effekter på sårbare arter og habitater. Også reproduktionscyklus for daddelmuslingen blev undersøgt.

Resultaterne bekræftede, at muslingen har reproduceret sig og opretholdt populationer i Nordsø regionen i adskillige år og, at populationen var delvist associeret med havgræsserne. Daddelmuslinger blev fundet på tomme østersskaller og hjertemuslinger samt levende blåmuslinger. Forskerne vurderer, at muslingen kan have været introduceret ad forskellige ruter, men skibsfart er nok mest sandsynlig.

Forskerne frygter vidtrækkene påvirkninger på kystmiljøet i UK og resten af Europa. For eksempel kan muslingerne ved høje populationer påvirke forsøg på at restorere havgræssområder, ved at hindre vækst af rødder, (observeret i San Diego Bay, USA). De kunne også øge omkostningerne ved skaldyrskultur ved biofouling af skaller og direkte konkurrence om substrat og føde. Sygdomsintroduktion og hybridisering er også mulige risici for den europæiske blåmuslingeakvakultur, men det skal belyses yderligere.

Forskerne så på positive og negative effekter. For eksempel kan asiatiske daddelmuslinger bruges som føde til mennesker og dyr og kan have nogle positive virkninger på habitater – for eksempel ved at beskytte sårbare levesteder mod erosion eller øge økosystemets kompleksitet.

Kilde:

Watson, G.J., Dyos, J., Barfield, P., Stebbing, P. and DeY, K.G. (2021) Evidence for self-sustaining populations of *Arcuatula senhousia* in the UK and a review of this species' potential impacts within Europe. *Nature Scientific Reports*, 11:9678. DOI: 10.1038/s41598-021-86876-x

FERSKVANDS SYMPOSIUM



Ferskvandssymposiumet 2023 afholdes 1. - 2. februar på Vingstedcentret. Tilmelding og yderligere oplysninger kan findes på hjemmesiden <https://ferskvands-symposiumet.dk/>

Hvordan nås klimamålet samtidig med andre bæredygtigheds mål?

Menneskets aktiviteter fylder stadig mere for jordkloden, og landbrugs- og fødevarerproduktionen belaster arealanvendelse, klima, miljø og biodiversitet. Udfordringerne er således mangefold, og handler ikke kun om klima, men også om hvordan verdens befolkning kan sikres nærende kost med mindre arealforbrug og lavere miljøbelastning.

JØRGEN E. OLESEN

Kloden og det menneskelige samfund står over for de største udfordringer nogensinde. Som følge af øget befolkning og velstand baseret på øget forbrug, er de menneskelige aktiviteter nu dominerende for udviklingen i verdens økosystemer, atmosfærens kemi og klimaet. Disse effekter vil på mange områder være dominerende for samfundsmæssige beslutninger i de kommende årtier og århundreder, med mindre det hurtigt lykkes at finde løsninger på de mange forbundne problemstillinger. Udsigten til problemerne lader sig løse inden for forholdsvis kort tid er desværre meget små, ikke mindst fordi det kræver store teknologiske og samfundsmæssige ændringer.

Udfordringernes omfang

Vi står i landbruget overfor en lang række meget omfattende udfordringer, som hver især er massive, men som tilsammen kan synes næsten uoverstigelige:

- Verdens behov for fødevarer forventes at stige med omkring 45% over perioden fra 2010 til 2050 /1/.
- Verdens behov for bioenergi vil skulle fire-dobles frem mod 2050 for at imødekomme krav til udfasning af fossil energi /2/.
- Landbrug og fødevarerproduktion står globalt for 34% af drivhusgasemissioner /3/ og for Danmark er det 35% /4/.
- Landbruget bidrager til hovedparten af ud-

nyttelsen af verdens landareal, nedgangen i biodiversitet, forurening med næringsstoffer og overforbrug af ferskvand /5/.

- Klimaændringerne vil i sig selv true verdens fødevarerproduktion, især som følge af øget tørke /6/. Der er derfor brug for mere modstandsdygtige dyrkningssystemer.

Grundlæggende kræver en bæredygtig udvikling, at landbrug og skovbrug fylder mindre på verdens landareal og at disse produktionssystemer forurener langt mindre end for nuværende. Samtidig skal de selvfølgelig kunne levere nok fødevarer, bioenergi og biomaterialer til at opfylde de menneskelige behov.

Dette kan kun løses hvis der arbejdes med nye teknologier, der øger systemernes produktivitet med lavere input, reducerer al for form for spild, samtidig med at det menneskelige forbrug, især af areal, nedsættes /7/.

En bæredygtig udvikling kræver indsats på mange områder, og i Danmark udarbejdede danske forskere ved universiteter og videninstitutioner en roadmap for hvordan forskning og innovation kan sikre en dansk udvikling, der kan opfylde målene /4/. Dette omfatter indsatser indenfor arealanvendelse, husdyrbrug, plantebaserede fødevarer og nye bioteknologiske muligheder til fødevarerproduktion. Here skitseres med udgangspunkt i /4/ hvordan dansk landbrug kan blive klimaneutralt med langt lavere kvælstofudledninger, lavere pesticidforbrug og styrkelse af biodiversitet.

Klimaneutralitet i dansk landbrug

Der er mange kilder til landbrugets klimabelastning, men især metan (CH_4) og lattergas (N_2O) spiller en stor rolle på grund af deres potente opvarmningseffekt sammenlignet med CO_2 (tabel 1). Disse drivhusgasser skyldes mikrobielle processer i dyr, husdyrgødning og jord, og teknologier til at reducere disse kræver, at der fokuseres på de betingelser, der påvirker mikroorganismene. Effekterne i tabel 1 er baseret på estimater af effektivitet af eksisterende og forventede teknologier sammenholdt med estimater for hvor hurtigt disse teknologier kan implementeres.

Reduktionerne af drivhusgasser i 2030 og 2050 stammer hovedsageligt fra fem hovedkategorier til udledninger: metan fra husdyrenes fordøjelse, håndtering af husdyrgødning, gødsning, organiske jorder og øget lagring af kulstof i jord (tabel 1). Estimaterne er baseret på, at den nuværende husdyrproduktions størrelse opretholdes, men med reduceret landareal til foderproduktion, hvilket giver rum til et areal til øget produktion af plantebaserede fødevarer og til uberørte arealer til understøttelse af natur og biodiversitet.

Reduktionerne i metan fra dyrenes fordøjelse antages at være 40% i 2030, som stammer fra en 50% reduktion for kvæg i konventionelle systemer, men kun 20% for økologiske jordbrug, og dette hidrører fra en kombination af ændringer i fodring, avl og brug af foderadditiver. For afgræssende dyr vil reduktionerne være væsentligt lavere. Det antages, at nye teknologier vil kunne øge reduktionen til

70% i 2050.

Teknologier til håndtering af husdyrgødning fokuserer primært på at reducere metan, da udledninger fra lattergas formentlig i praksis er lavere end estimaterne i tabel 1. Teknologierne omfatter køling af gylle, biogas, forsuring, overdækning af gødningslagre kombineret med teknologier til iltning af metanen. Det er dog væsentligt, at der opereres med teknologipakker som håndterer hele håndteringskæden fra stald til mark. Dette vil i sidste ende kunne reducere udledningerne med mere end 90% i både konventionelle og økologiske systemer.

En betragtelig del af udledningerne af lattergas i marken (30-40%) kan reduceres med brug af nitrifikationshæmmere, som allerede er tilgængelige. Hertil kommer at nye gødningsformer og øget brug af flerårige afgrøder vil kunne reducere udledningerne yderligere. Dette giver estimerede reduktioner på 40% og 70% i 2050. Dette stammer især fra reduktioner i konventionelle dyrkningssystemer, da mange af disse teknologier ikke pt. kan implementeres i økologisk jordbrug.

Det estimeres at vådlægning af alle danske dyrkede organiske jorder vil kunne reducere emissionerne med 80%, da vådlægning vil øge metanudledningerne hvilket modvirker en del af reduktionerne i CO₂ udledningerne fra de drænedede jorder. Det vurderes at en stor indsats vil kunne give en 30% reduktion allerede i 2030.

Der er også mindre reduktioner i lattergas fra bedre håndtering af planterester og reducerede kvælstoftab fra ammoniak og nitratudvaskning (tabel 1). Dette hidrører især fra øget brug af planterester til bioraffinering og biogas, hvorimod ændringer i ammoniakfordampning og nitratudvaskning især er knyttet til bedre håndtering af husdyrgødning og nye dyrkningssystemer. Brugen af fossil energi antages at kunne udfases med 50% i 2030 og fuldstændig inden 2050, især gennem øget elektrificering og brug af nye brændsler.

I beregningerne kan kulstofindholdet i dansk jord øges med 1,80 og 4,30 mio. ton CO₂ årligt i henholdsvis 2030 og 2050. Dette hidrører især fra øget kulstoflagring i dyrkningssystemer med flerårige afgrøder (især græs) og i arealer, der er afsat til natur og skov. Dette er estimeret at bidrage med 0,66 og 1,31 mio. ton CO₂ i henholdsvis 2030 og 2050. Den resterende stigning i jordkulstof antages primært at komme fra brug af biokul, som kan stamme fra pyrolyse af en række biomasser, og en sådan udnyttelse af restbiomasser vil også understøtte recirkulering af vigtige næringsstoffer til landbrugsjorden.

Reducerede næringsstofudledninger

Udledninger af næringsstoffer (kvælstof og fosfor) til vandmiljøet udgør fortsat den største trussel for kvaliteten af vandmiljøet, og især udledninger af nitrat fra landbrugsarealerne er fortsat hovedproblemet for mange fjorde. Opfyldelsen af Vandrammedirektivet kræver yderligere reduktioner i kvælstofbelastningen af det marine vandmiljø i Danmark på omkring 15.000 ton årligt. Det er dog meget store forskelle mellem forskellige vandoplande, og der vil derfor også skulle være forskelle på indsatserne i forskellige afstrømningsoplande afhængig af reduktionskrav og mulighederne for at reducere udledningerne gennem ændringer i landbrugsmæssig dyrkning og arealanvendelse, herunder dræning og vådområder, og der vil de fleste steder være behov for en kombination af tiltag for at nå målsætningerne /8/.

Tabel 2 illustrerer hvordan reduktioner i kvælstofbelastning til det marine miljø kan opnås gennem både eksisterende og nye virkemidler. Estimer for eksisterende virkemidler er baseret på /9/, mens de nye virkemidler er baseret på konservative estimer for forbedret kvælstofoptag i afgrøder om efteråret ved tidligere såning af vintersæd og bedre efterafgrøder. Flerårige afgrøder har lavere nitratudvaskning end de typiske afgrøder i omdrift, og den forudsatte stigning i disse afgrøder (tabel 4) vil derfor reducere kvælstofbelastningen. Der er desuden muligheder for at forbedre udnyttelsen af handels- og husdyrgødning, bl.a. gennem præcisionsgødsning og nitrifikationshæmmere, og dermed reducere nitratudvaskningen. Den skitserede skovrejsning og braklægning i tabel 4 vil også kunne reducere nitratudvaskningen, især hvis den målrettes de mest sårbare områder /10/. Øget reten-

tion af kvælstof kan opnås ved retablering af vådområder og nye konstruerede vådområder tilkøbet drænsystemerne. Der er på flere områder synergi mellem disse tiltag og effekterne på biodiversitet og klimabelastning.

Pesticider

Der er en politisk ambition om at udfase brugen af kemiske pesticider, og disse kan heller ikke anvendes i økologisk jordbrug. Nogle herbicider anvendes til nedvisning af afgrøder og efterafgrøder, og dette gælder særligt i pløjefri dyrkning, hvor glyfosat bruges til at nedvisne efterafgrøder. Udfasning af pesticider vil derfor involvere en række ændringer i dyrkningssystemer og teknologier for at erstatte disse i bekæmpelsen af ukrudt, sygdomme og skadedyr (tabel 3).

Flerårige afgrøder baseret på græs har betydeligt lavere pesticidbehov end typiske afgrøder i omdrift, og den forudsatte stigning i disse afgrøder vil derfor reducere pesticidanvendelsen. En øget diversitet af dyrkede arter og sorter for omdriftsafgrøder vil øge konkurrence med ukrudtet og mindske sygdoms- og skadedyrstrykket og dermed mindske bekæmpelsesbehovet. Biologiske bekæmpelsesmidler forventes at kunne erstatte en del af midlerne til bekæmpelse af sygdomme og skadedyr. Desuden vil nye sensorbaserede systemer på droner og robotter kunne være med til at målrette bekæmpelsesindsatsen og dermed reducere behovet især for herbicider.

Biodiversitet

Biodiversiteten kan øges gennem øgede naturarealer og gennem en styrkelse af biodiversiteten i landbrugslandskabet (tabel 4). Det øgede naturareal vil ske på bekostning af landbrugsarealet, og det kræver at der produceres

Tabel 1. Estimerede potentialer til reduktion af klimagasser dansk landbrug.

| | Baseline (Mt CO ₂ ækv) | Reduktion (%) | | Reduktion (Mt CO ₂ ækv) | |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------|------|---------------------------------------|-------|
| | | 2030 | 2050 | 2030 | 2050 |
| Kilde | 2018 | | | | |
| Husdyr fordøjelse (CH ₄) | 3,77 | 40 | 70 | 1,51 | 2,64 |
| Husdyrgødning lagring (CH ₄ , N ₂ O) | 2,81 | 50 | 90 | 1,41 | 2,53 |
| Gødsning (N ₂ O) | 2,83 | 40 | 70 | 0,91 | 1,60 |
| Planterester (N ₂ O) | 0,61 | 10 | 40 | 0,06 | 0,24 |
| Ammoniak fordampning (N ₂ O) | 0,34 | 20 | 40 | 0,07 | 0,13 |
| Nitratudvaskning (N ₂ O) | 0,33 | 10 | 30 | 0,03 | 0,10 |
| Kalkning (CO ₂) | 0,24 | 10 | 20 | 0,02 | 0,05 |
| Energiforbrug (CO ₂) | 1,25 | 50 | 100 | 0,62 | 1,25 |
| Organiske jorder (CO ₂ , N ₂ O) | 5,75 | 30 | 80 | 1,73 | 4,60 |
| Jordkulstof (CO ₂) | - | - | - | 1,80 | 4,30 |
| Total | 17,37 | 48 | 100 | 8,16 | 17,44 |

Tabel 2. Estimerede reduktioner i kvælstofbelastning (ton N per år) til marine økosystemer i Danmark sammenlignet med en baseline belastning i 2027 på 52.000 ton N per år.

| Kategori | Kilde | 2030 | 2050 |
|-----------------|--------------------------------|-------|--------|
| Land management | Forbedrede dyrkningssystemer | 2.200 | 2.500 |
| | Flerårige afgrøder | 1.000 | 2.000 |
| | Forbedre gødning/husdyrgødning | 500 | 1.000 |
| | Præcisionsgødskning | 500 | 1.000 |
| Øget retention | Retablerede vådområder | 1.500 | 3.000 |
| | Konstruerede vådområder/filtre | 1.500 | 3.000 |
| Arealanvendelse | Braklægning | 750 | 1.500 |
| | Skovrejsning | 750 | 1.500 |
| Total | | 8.750 | 15.500 |

Tabel 3. Estimerede bidrag til reduktion af landbrugets pesticidforbrug (procent af nuværende forbrug).

| Measure | 2030 | 2050 |
|--------------------------------|------|------|
| Flerårige afgrøder | 10 | 15 |
| Diversitet i dyrkningssystemer | 5 | 20 |
| Biologiske bekæmpelsesmidler | 5 | 10 |
| Resistensforædling | 10 | 15 |
| Præcisions teknologier | 15 | 30 |
| Total | 45 | 90 |

flere fødevarer på det tilbageværende areal. Dette vil omfatte vådlægning af arealer (ca. 250.000 ha) og etablering skove og tør natur (ca. 200.000 ha).

En forøgelse af biodiversiteten på dyrkningsfladen er ofte forbundet med lavere udbytter som fx i økologisk jordbrug. Der er dog muligheder for at øge plantediversiteten i på det eksisterende landbrugsareal gennem nye dyrkningsmetoder og brug af artsblandinger på en måde, som også øger udbytterne. Dette kan ske gennem skovlandbrug og øget artsdi-

Tabel 4. Ændringer i arealanvendelse (1000 ha) af det nuværende landbrugsareal som bidrag til forbedret biodiversitet. Det nuværende danske landbrugsareal udgør 2,62 mio. ha.

| Kategori | 2030 | 2050 |
|-------------------------------|------|------|
| Vådområder | 100 | 250 |
| Braklægning | 50 | 100 |
| Skovrejsning | 50 | 100 |
| Skovlandbrug | 50 | 100 |
| Biodiverse flerårige afgrøder | 300 | 500 |
| Biodiverse afgrøder i omdrift | 500 | 1000 |
| Total | 1100 | 2050 |

versitet i både flerårige og enårige afgrøder (i alt 1,6 mio. ha).

Behov for forskning, innovation og implementering

De skitserede ændringer vil være den største revolution i dansk landbrug nogensinde, og dette forudsætter naturligvis en ekstraordinær indsats af alle involverede. Det kræver også en massiv forskningsindsats, og her kan et godt bekymre, at investeringerne i forskningen (infrastruktur og personer) stadig halter bagefter ved både universiteter og i virksomhederne. Der er dog på seneste igangsat større forskningsinitiativer og partnerskaber, som givet vil bidrage, men der skal meget mere til.

Denne forsknings- og innovationsindsats vil skulle foregå på mange niveauer og det er også nødvendigt med et internationalt samarbejde. Forskningen bør søge at understøtte synergier i forhold til opnåelse af de mange bæredygtighedsmål. Der er desuden behov for at alle aktører arbejder med hurtigst muligt at implementere nye bæredygtige teknologier, og også her er der brug for nytænkning til at nedbryde barrierer for optag af nye driftsformer og teknologier. I sidste ende kan målsætningerne kun opnås gennem et stærkt samarbejde mellem alle involverede.

Referencer

/1/ Xu, X., Sharma, P., Shu, S., Lin, T.-S., Ciaia, P., Tubiello, F.N., Smith, P., Campbell, N., Jain, A.K., 2021. Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nature Food* 2, 724-732.

/2/ Bauer, N., Rose, S.K., Fujimori, S., van Vuuren, D.P., Weyant, J., Wise, M., Cui, Y., Daioglou, V., Gidden, M.J., Kato, E., Kitous, A., Leblanc, F., Sands, R., Sano, F., Streffer, J., Tsutsui, J., Bibas, R., Fricko, O., Hasegawa, T., Klein, D., Kurosawa, A., Mima, S., Muratori, M., 2020. Global energy sector emission reductions and bioenergy use: overview of the bioenergy demand phase of the EMF-33 model comparison. *Climatic Change* 163, 1553-1568.99

/3/ Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F.N., Leip, A., 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food* 2, 198-207.

/4/ Olesen, J.E., Christensen, S., Jensen, P.R., Schultz, E., 2021. *AgriFoodTure: Roadmap for sustainable transformation of the Danish Agri-Food system*. Edited by Rasmussen, C., Kjer, K.H., Kristensen, T.N., Gade, J.J., Haslund, S., Henriksen, C.B., Persson, M., Kryger, K., Henriksen, L. SEGES, Aarhus, Denmark. 96 pp.

/5/ Campbell, B.M., Beare, D.J., Bennett, E.M., Hall-Spencer, J.M., Ingram, J.S.I., Jaramillo, F., Ortiz, R., Ramankutty, N., Sayer, J.A., Shindell, D., 2017. Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society* 22, 8.

/6/ Trnka, M., Feng, S., Semenov, M.A., Olesen, J.E., Kersebaum, K.C., Rötter, R.P., Semerádová, D., Klem, K., Huang, W., Ruiz-Ramos, M., Hlavinka, P., Meitner, J., Balek, J., Havlik, P., Büntgen, U., 2019. Mitigation efforts will not fully alleviate the increase in water scarcity occurrence probability in wheat-producing areas. *Science Advances* 5, eaau2406.

/7/ Springman, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B.L., Lassaletta, L., de Vries, W., Vermeulen, S.J., Herrero, M., Carlson, K.M., Jonell, M., Troell, M., DeClerck, F., Gordon, L.J., Zurayk, R., Scarborough, P., Rayner, M., Loken, B., Fanzo, J., Godfray, H.C.J., Tilman, D., Rockström, J., Willett, W., 2018. Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562, 19-525.

/8/ Hashemi, F., Olesen, J.E., Børgesen, C.D., Tornbjerg, H., Thodsen, H., Dalgaard, T. (2018). Potential benefits of farm scale measures versus landscape measures for reducing nitrate loads in a Danish catchment. *Science of the Total Environment* 637-638, 318-335.

/9/ Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B., Jacobsen, B.H., Baattrup-Pedersen, A., Strandberg, B., Christensen, B.T., Boelt, B., Iversen, B.V., Kronvang, B., Børgesen, C.D., Abalos, D., Zak, D., Hansen, E.M., Blicher-Mathiesen, G., Rubæk, G.H., Ørum, J.E., Rasmussen, J., Audet, J., Olesen, J.E., Elsgaard, L., Munkholm, L.J., Jørgensen, L.N., Martinsen, L., Bruus, M., Carstensen, M.V., Pedersen, M.F., Nørre-mark, M., Hutchings, N.J., Gundersen, P., Kudsk, P., Sørensen, P., Lærke, P.E., Gislum, R., van't Veen, S.G.M., Petersen, S.O., Riis, T., Jørgensen, U. (2020). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. DCA rapport nr. 174.

/10/ Odgaard, M.V., Olesen, J.E., Graversgaard, M., Børgesen, C.D., Svenning, J.-C., Dalgaard, T. (2019). Targeted set-aside: Benefits from reduction of nitrogen loading to aquatic environments. *Journal of Environmental Management* 247, 633-643.

JØRGEN E. OLESEN er professor og institutleder ved Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi, e-mail: jeo@agro.au.dk

Muligheder for at begrænse metan fra drøvtyggere

Metan dannes som følge af fermentering primært i vommen, og en malkeko producerer cirka 700 liter hver dag. Kvægets emission af enterisk metan er den største enkeltkilde i landbruget. Emissionen kan imidlertid reduceres ved ændringer i fodringen som f.eks. brug af fedt, brug af foderadditiver, som hæmmer de metan-producerende mikroorganismer, og avl for køer, som har en lavere emission.

PETER LUND, OLE HØJBERG, CHRISTIAN F. BØRSTING, METTE OLAF NIELSEN, TRINE VILLUMSEN & MARTIN R. WEISBJERG



Indledning

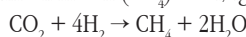
En højtstående malkeko producerer dagligt cirka 700 liter metan, og den udskilte metan er dels spild af energi for dyret og desuden et velkendt problem for klimaet. Emission af metan fra mavetarmsystemet (kaldet enterisk metan) fra kvæg udgør således omkring en tredjedel af udledningen af de direkte landbrugsmæssige drivhusgasser (metan og lattergas) i Danmark, og er dermed den klart største enkeltkilde i landbruget.

Hvorfor producerer koen metan?

Drøvtyggere (kvæg) er i langt højere grad end enmavede dyr (grise) afhængige af mikroorganismer i mavetarmkanalen for at omsætte og udnytte deres foder. Vommen fungerer således som en bioreaktor, hvor mikroorganismene nedbryder svært tilgængelige, strukturelle kulhydrater (fibre) og mere let nedbrydelig stivelse til mindre sukkerenheder, der efterfølgende forgæres til organiske syrer – især eddikesyre, propionsyre og smørsyre. Disse kortkædede fedtsyrer optages så over vomvæggen og indgår i koens stofskifte.

Ved forgæringsprocesserne dannes der også kuldioxid (CO₂) og brint (H₂). Med udgangspunkt i glukose (C₆H₁₂O₆), kan følgende forgæringsligninger opskrives:

Ved dannelsen af propionsyre forbruges brint, mens der ved dannelsen af eddikesyre og smørsyre dannes både kuldioxid og brint. Hvis den dannede brint ophobes i vommen kan den, pga. termodynamiske forhold, hæmme visse forgæringsprocesser og dermed koens foderudnyttelse. En særlig gruppe bakterielignende mikroorganismer, såkaldte metandannende arkæer eller blot metanogener, kan imidlertid omdanne kuldioxid og brint til metan (CH₄) ved følgende proces:



I modsætning til brint påvirker den dannede metan ikke processerne i vommen. Men den kan heller ikke omsættes og udskilles derfor gennem munden via opræbning eller udånding, mens en mindre del af det metan, der dannes ved forgæring i blind- og tyktarm, udskilles via anus. Den succesfulde symbiose mellem koen og forskellige typer af mikroorganismer, som igennem evolutionen har udviklet sig i vommen, har været til gavn for koen i forhold til at kunne udnytte svært nedbrydelige kulhydrater.

Hvordan måler man emission af metan?

Når en række fodermidler eller foderadditiver skal evalueres for deres potentielle metan-reducerende effekt, vil dette ofte først ske i

laboratorieforsøg (in vitro), inden de afprøves i dyreforsøg (in vivo). I laboratorieforsøg efterlignes omsætningen i koens vom. Dette gøres ved, at en given mængde foder inkuberes sammen med vomvæske, buffer og eventuelt foderadditiv under iltfrie forhold og ved 39 °C i små glasflasker. Mængden af produceret metan registreres løbende, og denne metode giver mulighed for screening af mange forskellige fodermidler eller foderadditiver på én gang.

Den daglige produktion af enterisk metan fra dyr måles typisk i såkaldte respirationskamre, som f.eks. er beskrevet detaljeret for mere end 100 år siden af Mølgaard & Andersen (1917) /1/. Metoden er baseret på, at koen opbindes i et lukket kammer, som i vores udgave er en stor kasse beklædt med transparente polycarbonatplader (figur 1). Ud fra koncentrationen af metan i indsugnings- og afgangsluft samt mængden af luft, som suges ud af respirationskammeret per tidsenhed, er det muligt løbende at beregne produktionen af enterisk metan fra det pågældende dyr. Dette system giver mulighed for måling af enterisk metan fra fermentering både i vommen og i blind- og tyktarmen, samt beregning af tidsserier for produktionen af metan f.eks. henover døgnnet. Denne målemetode giver samlet set mulighed for meget præcise målinger, om end på et lille antal dyr, og betegnes som "Golden standard" indenfor måling af



Figur 1. Malkekøer i respirationskamre på Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab, Aarhus Universitet.

emission hos husdyr.

Der er imidlertid ofte behov for måling på et betydeligt højere antal dyr, og til dette anvendes ofte et system kaldet GreenFeed. Det er en avanceret kraftfoderautomat, hvor koen tildeles en lille portion kraftfoder som lokkemad, og hvor mængden af produceret metan samtidig måles. Denne metode måler ikke produktionen af metan kontinuerligt som i respirationskamrene, men er afhængig af, at antallet af besøg er tilstrækkelig til, at målingerne af metan er repræsentative for et helt døgn emission. Metoden måler kun metan, udskilt gennem munden, og vil derfor svagt underestimere den samlede produktion af metan fra koens omsætningen af foderet.

Målinger på kvægbrug i forbindelse med avlsarbejde er en udfordring. Til dette formål er der derfor udviklet en særlig metode, som kan måle på tusindvis af dyr, om end med mindre præcision. Denne metode, kaldet sniffer-metoden, er baseret på måling af forholdet mellem koncentrationerne af metan og kuldioxid i koens udåndingsluft, når koen står i en malkerobot. Den udskilte mængde af metan beregnes derefter ud fra et estimat for koens produktion af kuldioxid, som estimeres ud fra koens energiindtag.

Reduktion i enterisk metan via ændring i rationens sammensætning

Det er målet at sænke det samlede klimaaftryk fra mælkeproduktionen, så det er vigtigt ikke kun at reducere enterisk metanproduktion, men også at tage hensyn til klimaaftrykket ved produktionen af de fodermidler, der indgår i foderrationen, så man ikke taber på gyngerne, hvad man har vundet på karrusellerne.

Fedt

Fedtsyrer forgæres ikke i vommen, og ombytning af fermenterbart organisk stof som f.eks. stivelse eller fiber med fedt vil derfor direkte reducere produktionen af enterisk metan. Samtidig har fedt en inhiberende effekt på særligt de fibremedbrydende og metanpro-

ducerende mikroorganismer i vommen. Da fermentering af fiber hovedsageligt er koblet til produktionen af eddikesyre, vil denne hæmning medføre et fald i produktionen af brint og kuldioxid og dermed substrat for metanogenerne, jvf. ovenstående reaktionsligninger. På tværs af en række forsøg er det beregnet, at 20 g ekstra fedtsyrer pr. kg fodertørstof kan reducere produktionen af enterisk metan med ca. 8%. Om dette fedtniveau er økonomisk optimalt, afhænger af forholdet mellem prisen for tilskudsfeedt, mælk og i fremtiden også klimagasser. I Danmark anvendes bl.a. palmefedt og danskavlede rapskager. Klimaaftrykket af palmefedt er ca. det tredobbelte af rapskager, hvis klimaeffekten af regnskovsrydningen regnes ind. Ved brug af importeret palmefedt i stedet for danskavlede rapskager vil den nationale emission således reduceres væsentligt, mens den globale emission kun vil blive reduceret lidt eller evt. være uforandret, da reduktionen i produktionen af enterisk metan helt eller delvist modsvares af øgede emissioner ved dyrkning af palmefedt.

Grovfodertype

Som nævnt, hænger produktionen af enterisk metan bl.a. sammen med nedbrydning af foderelets fibre i vommen. Hvis græs høstes på et tidligt udviklingsstrin og med et lavere indhold af fibre, så falder produktionen af enterisk metan pr. kg fodertørstof. Hvis græsensilage, som indeholder meget fiber, erstattes af majsensilage, som indeholder meget stivelse, så sker der en forskydning i forgæringsprocesserne i vommen, således at der produceres forholdsvis mere propionsyre og mindre eddikesyre, og dermed er der også mindre brint til rådighed for metanogenerne. Men når der også tages hensyn til at klimaaftrykket er lavere ved dyrkning af græs end majs, så bliver det samlede klimaaftryk nogenlunde det samme, omend det samlede klimaaftryk er meget afhængigt af udbytteforholdet mellem dyrkning af græs og majs.

Forholdet mellem grovfoder og kraftfoder

En udskiftning af fiberrigt grovfoder med kraftfoder vil medføre, at produktionen af enterisk metan reduceres. Dette skyldes, at kraftfoder typisk indeholder mere fedt og stivelse end grovfoderet, hvorved forgæringsmønstret i vommen ændres mod en højere andel propionsyre og en mindre andel eddikesyre, hvilket jvf. ovenstående ligninger medfører mindre brint, som ellers ville indgå i dannelsen af metan. For at køerne kan opretholde deres normale drøvtygningsfunktion, er der dog grænser for, hvor høj kraftfoderelets andel af rationen kan være.

Reduktion i enterisk metan via brug af foderadditiver

3-Nitrooxypropanol

3-Nitrooxypropanol (3-NOP) er et kemisk stof, som har vist sig effektivt til at reducere produktionen af enterisk metan med op til 30% hos malkekøer under danske forhold. Stoffet hæmmer et særligt enzymesystem, som kun findes i de metanogene mikroorganismer, og det vil derfor ikke hæmme de bakterier, der er ansvarlige for forgæringen i vommen. Stoffet er netop blevet godkendt i EU under navnet Bovaer og kan derfor nu tages i brug på konventionelle bedrifter, men det vil sandsynligvis ikke blive en accepteret mulighed i den økologiske produktion.

Nitrat

Nitrat er et andet kemisk stof, som kan reducere produktionen af enterisk metan. Her er den primære virkningsmekanisme imidlertid anderledes end for 3-NOP. Nitrat omsættes således af særlige bakterier i vommen til ammoniak ved en proces, hvor der forbruges brint, som dermed ikke er tilgængelig for de metanogene mikroorganismer. Den dannede ammoniak vil efterfølgende kunne indgå i den mikrobielle proteinsyntese i vommen. Brugen af nitrat kan føre til øget kvælstofudledning i gødningen hvis ikke rationens øvrige pro-

teinkilder reduceres tilsvarende. Desuden kan nitrat omdannes til nitrit, som potentielt kan hæmme hæmoglobins evne til transport af ilt i dyret. Vores forsøg tyder dog på, at denne bekymring er ubegrundet.

Tang/makroalger

Der arbejdes forskellige steder i verden på at udvikle dyrkningssystemer til en tropisk makroalge ved navn *Asparagopsis*. Denne alge har i forsøg kunnet hæmme emissionen af metan fra vommen hos stude og får med op til 90%. Malkekøer er mere følsomme over for påvirkning af vommiljøet, og hos malkekøer har man ikke kunnet reducere emissionen af metan med mere end 30%, før det begyndte at give markant negative udslag på foderoptagelse og mælkeydelse. De bioaktive stoffer i *Asparagopsis*, der hæmmer dannelsen af metan i vommen, er såkaldte halometaner, som f.eks. bromoform og kloroform, som det ikke er specielt ønskværdigt at få ind i fødekæden. Det er imidlertid tilladt at anvende alger, herunder *Asparagopsis*, som foder til drøvtyggere i EU, og *Asparagopsis* er på nuværende tidspunkt reelt det eneste foderadditiv, bortset fra fedt, der vil kunne udnyttes i økologisk jordbrug til at reducere metan. Begrænsningen her og nu er at levere tilstrækkelige mængder til markedet. Dansk forskning har vist, at der findes andre arter af makroalger, der er naturligt forekommende, som kan dyrkes på vore breddegrader, og som har en vis metan-reducerende effekt, og som ikke indeholder førnævnte halometaner.

Stof X

Danske foderstofvirksomheder arbejder på at få patenteret et stof, kaldet X, der har vist sig at kunne reducere aktiviteten af metanogenerne. Stof X virker sandsynligvis ved at blokere et nøgleenzym hos metanogenerne, der er nødvendigt for at danne metan ud fra kuldioxid og brint. Der er på nuværende tidspunkt udført tre intensive forsøg med malkekøer i

Danmark, og på den baggrund er det realistisk at forvente, at stof X vil kunne reducere emission af metan fra malkekøer med 30-40% uden at påvirke køernes mælkeydelse og foderoptagelse negativt. Der vil formodentlig gå et par år, før stoffet har været igennem den nødvendige godkendelsesproces. Der er dog stor optimisme i forhold til, at godkendelsen vil blive givet, da stoffet allerede er godkendt til brug i fødevarerindustrien, bare ikke som foderadditiv.

Brint er en udfordring

En af udfordringerne ved flere af de meget potente metan-reducerende foderadditiver er, at reduktionen i metan er ledsaget af en markant øgning i produktionen af brint i vommen, og der forskes i, om dette har sammenhæng til de markante fald i foderoptagelse, som er set ved brug af flere af disse foderadditiver i høje koncentrationer. En hypotese er, at ophobningen af brint i vommen har en negativ effekt på den mikrobielle fermentering, som dermed går langsommere, hvorved også foderoptagelsen reduceres. En anden hypotese er baseret på, at metanogenerne omsætter 5 gasmolekyler (4 brint og 1 kuldioxid) til 1 gasmolekyle (metan), og når denne reaktion hæmmes, sker der rent volumenmæssigt en øget ophobning af gas i vommen, som måske kan være til gene for koen enten direkte fysisk eller fysiologisk via ændring i de fysiske og kemiske ligevægte i vommen.

Variation mellem køer

Koens produktion af metan påvirkes af faktorer såsom foderindtag, mælkeydelse og vægt. Men selv når alle ovenstående parametre er ens for to køer, kan den ene ko godt producere f.eks. 620 liter metan om dagen, mens den anden producerer 670 liter metan om dagen. Forskelle i metanproduktion mellem tilsyneladende identiske køer kan bl.a. forklares af forskelle i køernes gener. Disse nedarvede egenskaber har bl.a. indflydelse på

vommens kapacitet og foderets opholdstid i vommen og dermed fordøjelsen i vommen, og hvorledes forskellige typer af mikroorganismer klarer sig i vommen. Flere studier bl.a. i Danmark har vist, at der er en arvbahed på omkring 0,2 for metanproduktion hos malkekvæg. Dette betyder, at 20 % af den variation, man ser mellem køer, skyldes forskelle i deres gener. Indtil nu er de fleste metanstudier foretaget på baggrund af Holstein racen, men der forventes en tilsvarende variation indenfor racerne Jersey og Rød Dansk Malke race, hvilket er ved at blive undersøgt i igangværende studier.

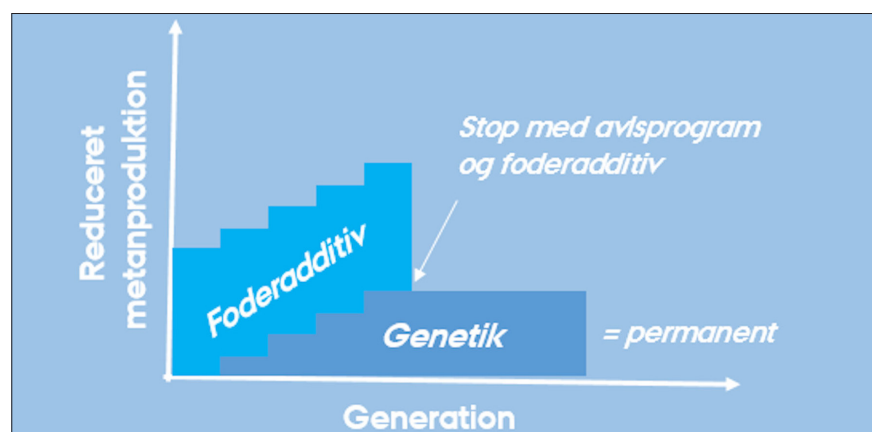
Med den betydelige arvbahed kunne det forventes, at der var en stor forskel mellem racer i metanproduktion. Imidlertid er der indtil nu ikke påvist betydelige forskelle mellem racer, men det er vist, at Holstein og Jersey reagerer forskelligt i metanproduktion, når man øger foderrationens kraftfoderandel betydeligt. Yderligere tyder det på, at der er forskel mellem køer indenfor den enkelte race i forhold til, hvordan køerne reagerer på en foderændring eller et foderadditiv til reduktion af metan. Der forskes for tiden i, hvorledes disse individuelle forskelle kan forklares og, hvorvidt de har ophav i koens genetik, vommikrobiom, eller andre træk, der skyldes nuværende management eller prægning i opvæksten.

Da produktionen af enterisk metan til dels er arvelig, betyder det, at man kan avle efter køer, der producerer mindre metan for hver kg mælk, de producerer. Hvor tilsætning af effektive foderadditiver giver en øjeblikkelig effekt på produktionen af enterisk metan, er avl efter køer, der producerer mindre metan, en langsommere proces. For hver generation rykkes blot et lille skridt mod mindre metan; til gengæld er effekten fra avl blivende selv, hvis man stopper med at avle efter mindre metan (figur 2)

Referencer

/1/ Møllgaard, H. & A.C. Andersen (1917): Et pettenko-fersk respirationsapparat til forsøg med malkende kvæg. Den Kongelige Veterinær- og Landbohøjskole Aarsskrift 1917, 195-307

Professor PETER LUND (Peter.Lund@anis.au.dk), Seniorforsker OLE HØJBERG (Ole.Hojberg@anis.au.dk), Seniorrådgiver CHRISTIAN F. BØRSTING (cfb@anis.au.dk), Professor METTE OLAF NIELSEN (mon@anis.au.dk), Professor MARTIN R. WEISBERG (Martin.Weisbjerg@anis.au.dk), Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab, AU Viborg - Forskningscenter Foulum, Aarhus Universitet & seniorrådgiver TRINE VIL-LUMSEN (tmv@qgg.au.dk), Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning, AU Viborg - Forskningscenter Foulum, Aarhus Universitet



Figur 2. Effekt af brug af foderadditiv og avlsprogram til reduktion af enterisk metan hos malkekøer.

Minimering af klimapåvirkning fra lagret husdyrgødning

Udledning af metan fra lagring af husdyrgødning bidrager betydeligt til landbrugets klimapåvirkning. For at imødegå dette er der behov for effektive virkemidler, der kan realiseres på kort sigt som en del af en overordnet indsats rettet mod en markant lavere samlet udledning af metan. I artiklen gives eksempler på aktuell forskning, der bidrager til denne ambition.

ANDERS FEILBERG, FREDERIK RASK
DALBY, JESPER NØRLEM KAMP,
SØREN O. PETERSEN &
ANDERS PETER S. ADAMSEN

Husdyrgødningens betydning og hovedkilder

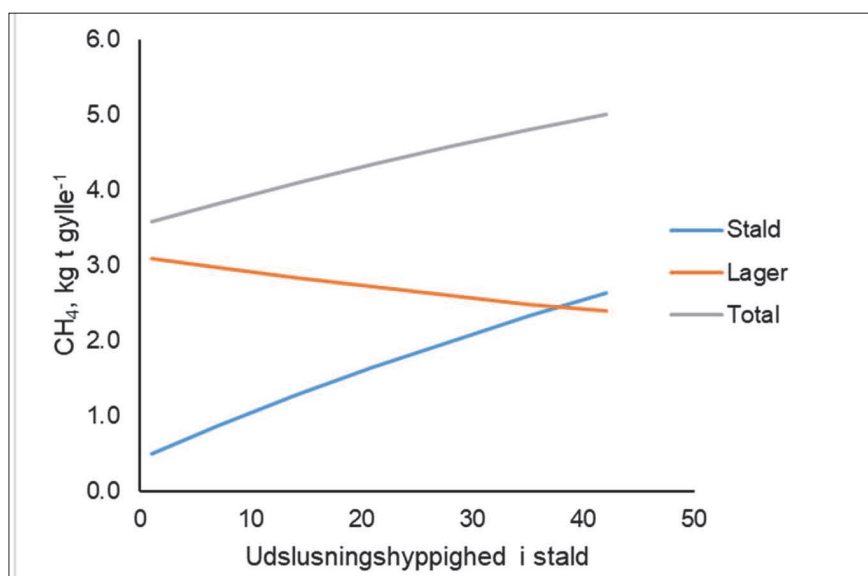
Husdyrgødning fra animalsk fødevareproduktion udgør en betydelig kilde til landbrugets samlede drivhusgas-udledning. En væsentlig del af udledningerne skyldes, at udskilt fæces og urin opsamles og lagres som gylle både indendørs i stalde og i udendørs lagertanke. Opsamling og lagring er en nødvendig del af den cirkulære udnyttelse af næringsstoffer, hvor gyllens gødningsværdi udnyttes til planteproduktion. Under lagringen produceres imidlertid metan under de iltfrie forhold i gyllen, hvor iltens indtrængning er ubetydelig. Metan dannes som et resultat af mikroorganismers nedbrydning af organisk materiale, der er til stede i rigelige mængder i husdyrgødningen.

I nylige rapporter fra bl.a. IPCC /1/ fremhæves betydningen af at reducere udledningen af metan. Dette hænger sammen med at metan er en såkaldt kortlivet drivhusgas med en atmosfærisk levetid på ca. 12 år som følge af en forholdsvis hurtig nedbrydning i atmosfæren. I øjeblikket overstiger udledningerne den atmosfæriske nedbrydning, hvilket øger kon-

centrationen af metan i atmosfæren. Der er derfor allerede på relativt kort sigt en betydelig gevinst ved at reducere udledningerne af metan for at stabilisere eller reducere koncentrationen af metan i atmosfæren. En sådan udvikling vil være et vigtigt bidrag til at nå Paris-aftalens ambitiøse mål om maksimalt 1,5 graders temperaturstigning i 2100.

Den samlede udledning af metan fra lagret husdyrgødning er opgjort til at udgøre ca. 20% af drivhusgasudledningen fra dansk landbrug, med et lidt højere bidrag fra svin (51%) end fra kvæg (47%) /2/. Metan-udledningen

fra gødnings håndtering (kvæg og svin) er opgjort til 2,4 mio. tons CO₂-ækvivalenter /2/. Til sammenligning svarer den enteriske metan-udledning fra kvæg og svin til 4,0 mio. tons CO₂-ækvivalenter /2/, og lagring af gylle udgør dermed 38% af den samlede metan-udledning fra kvæg- og svineproduktion. Udover metan er der et mindre drivhusgasbidrag fra dannelsen af lattergas under lagring, men de tilgængelige data /3/ tyder på, at lattergas bidrager med under 10% af den samlede belastning (beregnet som CO₂-ækvivalenter), og derfor giver det god mening at målrette indsatsen



Figur 1. Metan-emission som funktion af udslusningshyppighed (dage) i en svinestald med tilhørende lager. Kurverne er baseret på modelberegninger.

mod metan.

I de seneste få år har der været stigende fokus på at udvikle og dokumentere teknologier til at reducere udledningen af metan fra husdyrgødning som en del af vejen til et mindre klimabelastende landbrug. Virkemidler omfatter bl.a. gyllebehandling, optimeret gødningshåndtering og udnyttelse til biogasproduktion. Samtidig er der behov for robuste målemetoder til at opnå bedre dokumentation, og modeller til at estimere de specifikke udledninger under forskellige produktionsforhold.

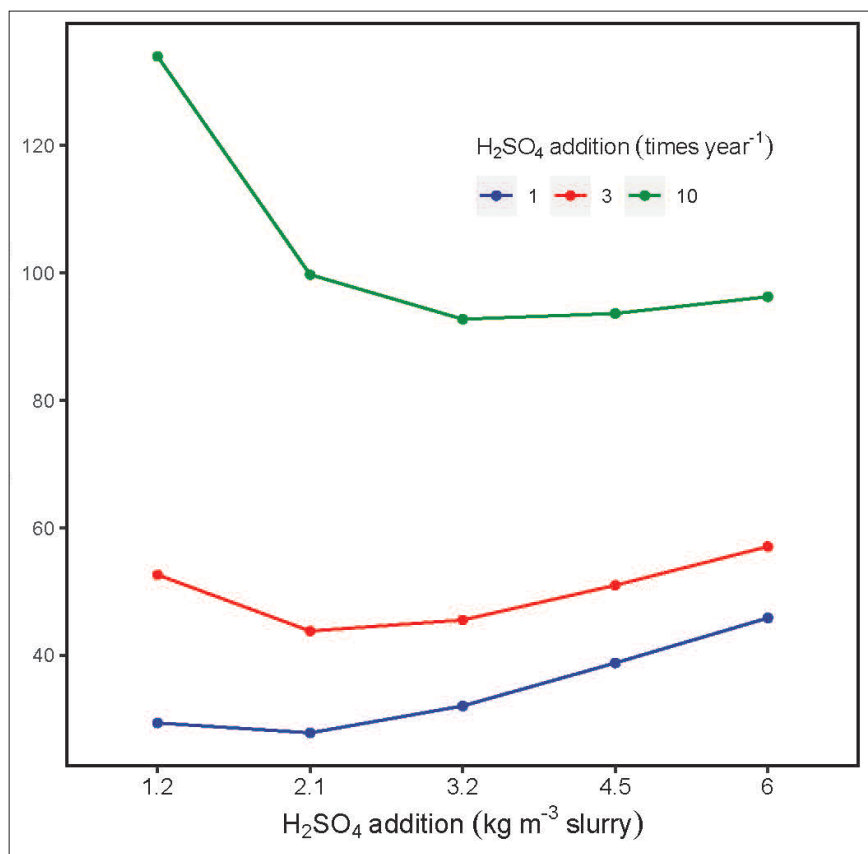
Overordnet strategi: hyppig udslusning og håndtering i lager

Gylle lagres i stalden i perioder fra dage til uger, hvorimod udendørs lagring sker over mange måneder fra gylletanken tømmes (typisk om foråret) og indtil næste gødningsudbringning, fx det efterfølgende år. De metan-producerende mikroorganismer vokser forholdsvis langsomt og kræver en vis temperatur for at kunne opbygge en væsentlig metanproduktion. Dette medfører, at udledningen af metan fra udendørs lagre fortrinsvis sker hen over sommeren og det tidlige efterår. Specielt for svinestalde er der en vis klimagevinst ved at reducere gyllens opholdstid i stalden. Med hyppig udslusning, fx hver 7. dag, opnås omtrent en halvering af udledningen fra stalden som følge af, at en større andel af det let-omsættelige kulstof overføres til lageret. Selv om metan-produktionen i lageret dermed øges, vil den lavere temperatur i lageret medføre, at den samlede metan-emission (fra stald og lager) bliver lavere. Figur 1 viser emissionen af metan som funktion af forskellige udslusningsfrekvenser (dage). For metan fra kvæggylle er der en mere ligelig fordeling mellem stald og lager, så for kvægstalde ændrer hyppig udslusning i sig selv ikke afgørende på metan-udledningen.

En overordnet strategi til at reducere klimaeffekten af husdyrgødningshåndtering er at kombinere hyppig udslusning med virkemidler til at reducere metan-emission før eller under lagring /4/. Jo hurtigere og mere effektivt det omsættelige kulstof eksporteres fra stalden, jo større bliver den potentielle klimagevinst ved denne strategi. I det følgende beskrives udvalgte tiltag, der kan bidrage til en høj samlet reduktion af metan-udledningen fra husdyrgødning.

Teknologiske løsninger

Effektive udslusningssystemer: I traditionelle staldsystemer er det ikke praktisk muligt at udsluse gylle oftere end ca. hver 7. dag. Der arbejdes derfor med at udvikle nye udslus-



Figur 2. Omkostning til lagerforsuring (per CO₂-besparelse) som funktion af syredosis ved hh. 1, 3 og 10 tilsætninger af syre /5/. (Gengivet med tilladelse fra forfatterne jf. copyright-aftale med American Chemical Society).

nings-systemer, hvor opholdstiden i stalden forkortes væsentligt. Dette kan bl.a. gøres med såkaldte gylletragte. Nye forsøg viser, at udledningen fra stalden isoleret set reduceres med 80-90 % med sådanne tragte, og hvis man samtidig kan eliminere metan-udledningen fra lageret med et passende virkemiddel, kan der opnås en meget høj klimagevinst. Udover tragte vil det også være muligt at opnå fx daglig udslusning ved at bruge såkaldte linespils-anlæg eller robotvaskere, der sikrer en effektiv tømning af gyllekummerne i stalden. Flere igangværende projekter har fokus på udvikling, optimering og dokumentation af nye udslusningssystemer.

Lagerforsuring: Hyppigt udsluset husdyrgødning, der opsamles i en lagertank, vil have et forholdsvis højt indhold af organisk kulstof, der kan omsættes til metan. Metan-produktionen hæmmes imidlertid kraftigt ved at tilsætte svovlsyre /5/. Forsøg i fuld skala har vist, at en enkelt forsuring kan minimere metan-udledningen i sommerperioden, hvor produktionen er størst. Samtidig vil forsuring reducere udledningen af ammoniak. Nye forsøg (figur 2) indikerer, at syremængden kan reduceres, hvis hovedformålet er at reducere metan-udledningen, og det vil i så fald være et omkostningseffektivt klimavirkemiddel /5/. Det sam-

lede potentiale ved at kombinere hyppig udslusning med lagerforsuring er betydeligt og vil kunne levere en positiv klimaeffekt på forholdsvis kort sigt.

Kontrolleret metan-oxidation i

flydelag: Under opbevaringen af gylle dannes ofte et naturligt flydelag af fibre og strøelse, eller et flydelag kan etableres/forstærkes ved iblanding af snittet halm. Hen over sommeren tørrer flydelaget delvist ud og bliver levested for mikroorganismer, der repræsenterer mange forskellige stofskiftetyper, herunder metan-oxiderende bakterier (metanotrofer). Metanotrofer har et potentiale for fjernelse af metan i flydelag gennem mikrobiel metan-oxidation, som er på niveau med vådområder og dækjorden over affaldsdepoter. Metan oxideres formentlig kun i begrænset omfang i en åben beholder, hvor metan primært udledes igennem sprækker i flydelaget og hurtigt fortyndes i atmosfæren. I overdækkede gyllelagre vil metan, som udledes, derimod have en længere opholdstid, og det kan stimulere metan-oxidationen. I øjeblikket undersøges en ny teknologi til at kontrollere luftskiftet med henblik på at optimere metan-oxidationen. Det sker i samarbejde med ventilationsfirmaet SKOV og vil i 2023 blive afprøvet i fuld skala.



Figur 3. Et af verdens største forsøgs-biogasanlæg (Aarhus Universitet, Foulum).

Fakkelaftænding af metan: Hvis en tilpas høj koncentration af metan akkumuleres under en gas-tæt overdækning, vil den producerede gas kunne brændes af i en gasfakkel. Teknikken er kendt fra bl.a. lossepladser. Aftænding af metan i fakler kræver videreudvikling af de eksisterende anlæg for at sikre en effektiv forbrænding og en lav udledning af kvælstofilte (NO_x). Fakkelaftænding er let at implementere, da teknologien (i) ikke kræver ombygninger i stalde, (ii) spiller fint sammen med gyllekøling eller hyppig udslus-

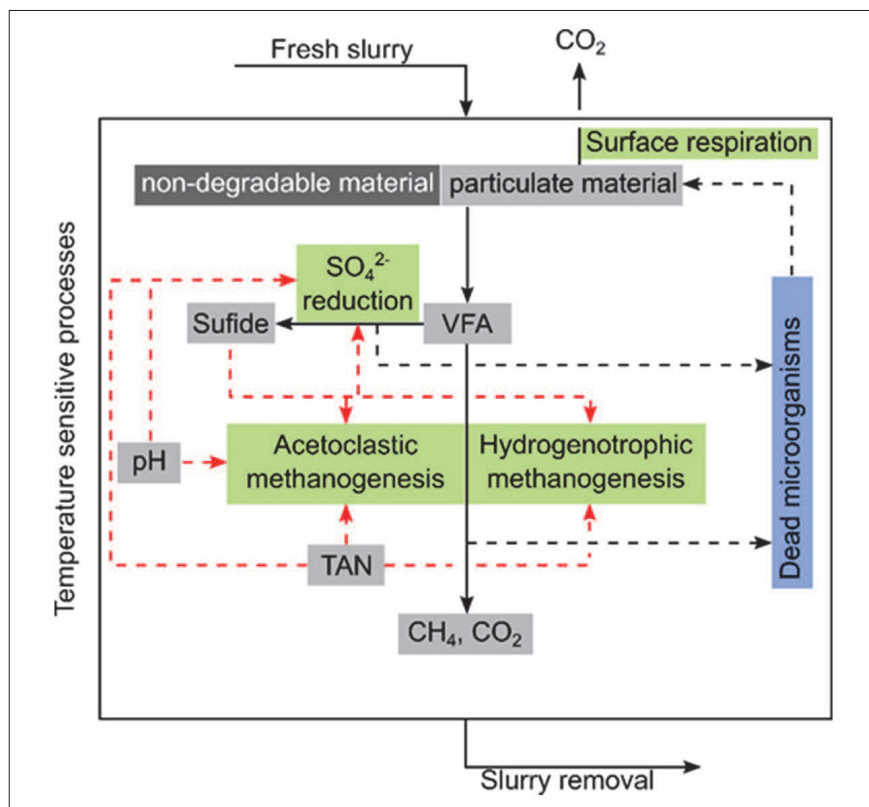
ning, og (iii) er let at kontrollere, da metanmængden kan måles før den ledes til faklen. Fakkelaftænding kan anvendes i tilfælde, hvor det ikke er muligt at udnytte metanproduktionen til biogas. I et nyt projekt finansieret af GUDP skal fakkelaftænding videreudvikles og dokumenteres.

Bioforgasning: Anvendelse af husdyrgødning til biogas er en effektiv teknologi til at reducere udledningen af metan under lagring af husdyrgødning samtidig med at den producerede metan kan erstatte fossile brændsler og

dermed reducere udledningerne af drivhusgasser yderligere /6/. I dag bliver ca. 25% af husdyrgødningen anvendt til biogas, og der er en forventning om en kraftig stigning i de kommende år på vejen mod at blive uafhængig af naturgas. I biogasanlægget omsættes typisk fra 40 til 60% af det organiske stof i husdyrgødningen, og det medfører, at der udledes væsentligt mindre metan ved den efterfølgende lagring, især hvis den afgassede gylle køles ned inden lagringen. De fleste biogasanlæg anvender i dag en blanding af husdyrgødning, halm og andre biprodukter fra samfundet, men det er især husdyrgødningen, der bidrager til at reducere metan-emission. Biogas kan med fordel kombineres med hyppig udslusning og transport til biogasanlæggene, hvorved der både opnås lavere emission fra stalden og et højere samlet energiudbytte i forhold til den producerede mængde husdyrgødning. For at opnå en høj klima-effekt af biogas er det imidlertid vigtigt, at metan-tab fra anlæggene minimeres, da selv små tab vil have stor negativ effekt.

Modeller til at forudsige emissioner

Der findes mange modeller til beregning af metan-emissioner med stor variation i kompleksitet afhængigt af kontekst og formål. I de nationale opgørelser over metan-udledning fra lagret husdyrgødning (primært gylle) estimeres udledningen grundlæggende ud fra tre parametre: udskilt organisk materiale i fæces og urin, som kan omsættes af metanproducerende bakterier (metanogener), opholdstid i stald eller lager, samt temperatur /2/. Temperaturen er afgørende for hvor hurtigt det organiske materiale nedbrydes. Samme principper bruges i IPCCs anbefalinger /7/ med mulighed for større eller mindre detaljegråd. Mere komplekse modeller (se figur 4) forsøger at inkludere potentialet for mikrobiel aktivitet ved fx at tage højde for, at metan-dannende organismer vokser langsomt /8/. Det har derfor betydning, at en rest af gylle med tilpassede metanogener (et såkaldt inokulum med høj metanogen aktivitet) efterlades i gyllekummer ved tømning. Modeller med en bedre beskrivelse af metanogen aktivitet bliver specielt vigtige til beskrivelse af metanemissionen ved strategier med hyppig udslusning af gylle eller andre tiltag, som inaktiverer eller fjerner inokulum. Årsagen er, at metanogener tilpasning og vækst da i højere grad bliver den begrænsende faktor for metanemissionen. I tilfælde hvor metanogen vækst ikke er begrænsende, er det nedbrydningen (hydrolysen) af organiske komponenter, der begrænser metanemissionen. Hastigheden for hydrolyse afhænger dels af gyllens sam-



Figur 4. Principskitse af ABM-modellen (Anaerobic Biodegradation Model), der er udviklet til at forudsige metanproduktion i lagret husdyrgødningen /8/. Modellen beskriver bl.a. hydrolyse og populationsdynamik under indflydelse af varierende temperatur.

mensætning, men også af tilgængeligheden af let-nedbrydelige komponenter, som igen afhænger af fodersammensætning og dyrenes fordøjelse.

Den store variation i metan-udledninger, der typisk rapporteres fra husdyrgødning, skyldes sandsynligvis forskelle med hensyn til balancen mellem de to begrænsende faktorer, metanogeneres vækst og aktivitet, og hydrolyse-hastigheden. Modeller, som tager begge processer i betragtning, har derfor størst chance for nøjagtigt at beskrive emissionens tidslige udvikling og dermed også metanemission på gårdniveau.

Referencer

- /1/ IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L., C.P. Connors, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R., and T.K.M. Matthews, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou, Editors. 2021, IPCC: Cambridge, United Kingdom. 10.1017/9781009157896.
- /2/ Nielsen, O.-K., M.S. Plejdrup, M. Winther, M. Nielsen, S. Gyldenkærne, M.H. Mikkelsen, R. Albrektsen, M. Thomsen, K. Hjelgaard, P. Fauser, H.G. Bruun, V.K. Johannsen, T. Nord-Larsen, L. Vesterdal, I. Stupak, N. Scott-Bentsen, E. Rasmussen, S.B. Petersen, L. Baunbæk, og M.G. Hansen, DENMARK'S NATIONAL INVENTORY REPORT 2022 Emission Inventories 1990-2020 – Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol, in Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy. 2022, Aarhus University: Aarhus. <https://dce2.au.dk/pub/SR494.pdf>.
- /3/ Kupper, T., C. Hani, A. Nefel, C. Kincaid, M. Buhler, B. Amon, og A. VanderZaag, Ammonia and greenhouse gas emissions from slurry storage - A review. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2020. 300.
- /4/ Adamsen, A.P., M.J. Hansen, og H.B. Møller. Effekt af hyppig udslusning af gylle på metanproduktion. 2021; Available from: https://pure.au.dk/portal/files/207749759/Metanproduktion_og_hyppig_udslusning_af_gylle_i_stalde_120121.pdf.
- /5/ Ma, C., F. Dalby, A. Feilberg, B.H. Jacobsen, og S.O. Petersen, Low-Dose Acidification as a Methane Mitigation Strategy for Manure Management. *ACS Agricultural Science and Technology*, 2022. 10.1021/acscagstech.2c00034.
- /6/ Møller, H.B., P. Sørensen, J.E. Olesen, S.O. Petersen, T. Nyord, og S.G. Sommer, Agricultural Biogas Production-Climate and Environmental Impacts. *Sustainability*, 2022. 14(3).
- /7/ IPCC, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture, Forestry and Other Land Use, E. Calvo Buendia, Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S., Editor. 2019, IPCC: Switzerland.
- /8/ Dalby, F.R., S.D. Hafner, S.O. Petersen, A. Vanderzaag, J. Habtewold, K. Dunfield, M.H. Chantigny, og S.G. Sommer, A mechanistic model of methane emission from animal slurry with a focus on microbial groups. *Plos One*, 2021. 16(6).

ANDERS FEILBERG (af@bce.au.dk) er lektor på Institut for Bio- og Kemiteknologi, Aarhus Universitet (AU-BCE), FREDERIK RASK DALBY (fd@bce.au.dk) er post doc på AU-BCE, JESPER NØRLEM KAMP (jk@bce.au.dk) er post doc på AU-BCE, SØREN O. PETERSEN (sop@agro.au.dk) er professor på Institut for Agro-økologi, Aarhus Universitet, og ANDERS PETER S. ADAMSEN (apa@bce.au.dk) er seniorforsker på AU-BCE.

Lattergasemission fra jord

– kilder og kontrol

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

SØREN O. PETERSEN, DIEGO ABALOS &
LARS STOUJANN JENSEN

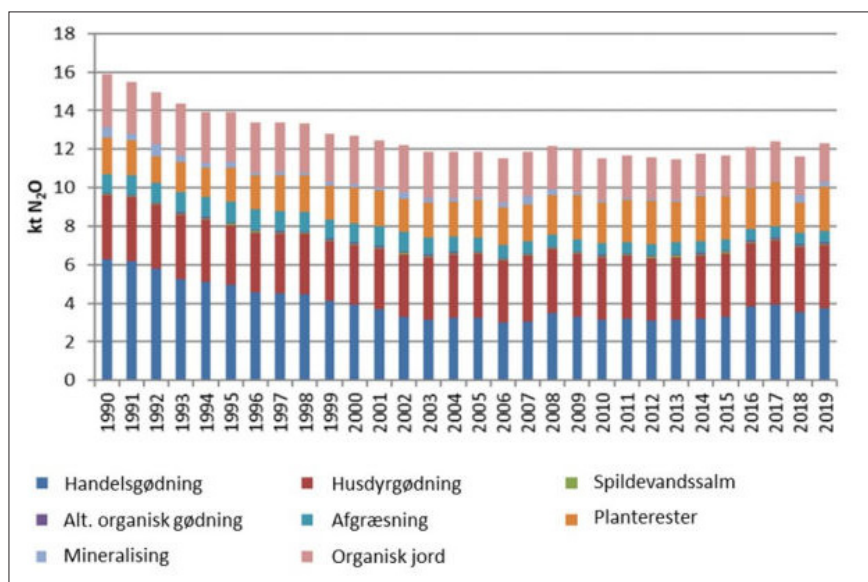
Kilder og miljøfaktorer

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

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

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

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



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

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

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

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

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

Kvælstofgødskning

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

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

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

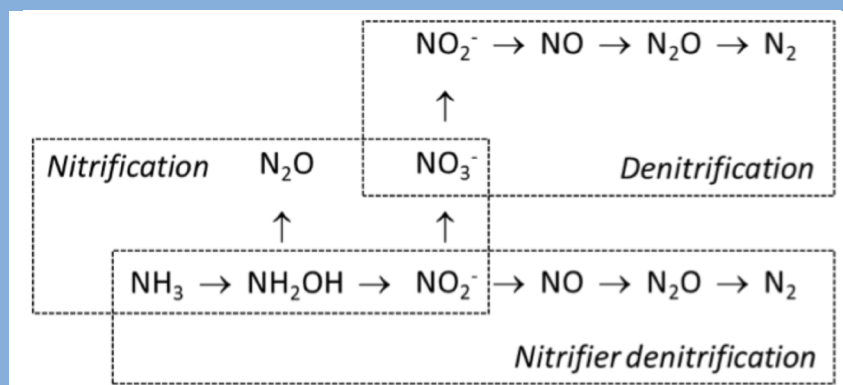
Den emissionsfaktor, som i øjeblikket anvendes til opgørelse af emissionen af N_2O fra såvel handelsgødning som husdyrgødning (og planterester) er 0,01, hvilket betyder, at 1% af det tilførte kvælstof antages at blive udledt som N_2O . Disse skøn er imidlertid meget usikre, og tidligere undersøgelser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

Planterester

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

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

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



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



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

Boks 2: Dræned organiske jorde

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

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

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



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

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

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

Efterafgrøder

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

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

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

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

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

Hvordan reduceres emissionen af N_2O ?

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

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

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

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

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

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



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

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

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

Konklusion

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

Referencer

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

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

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

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

Kan vi øge kulstofindholdet i landbrugsjorden?

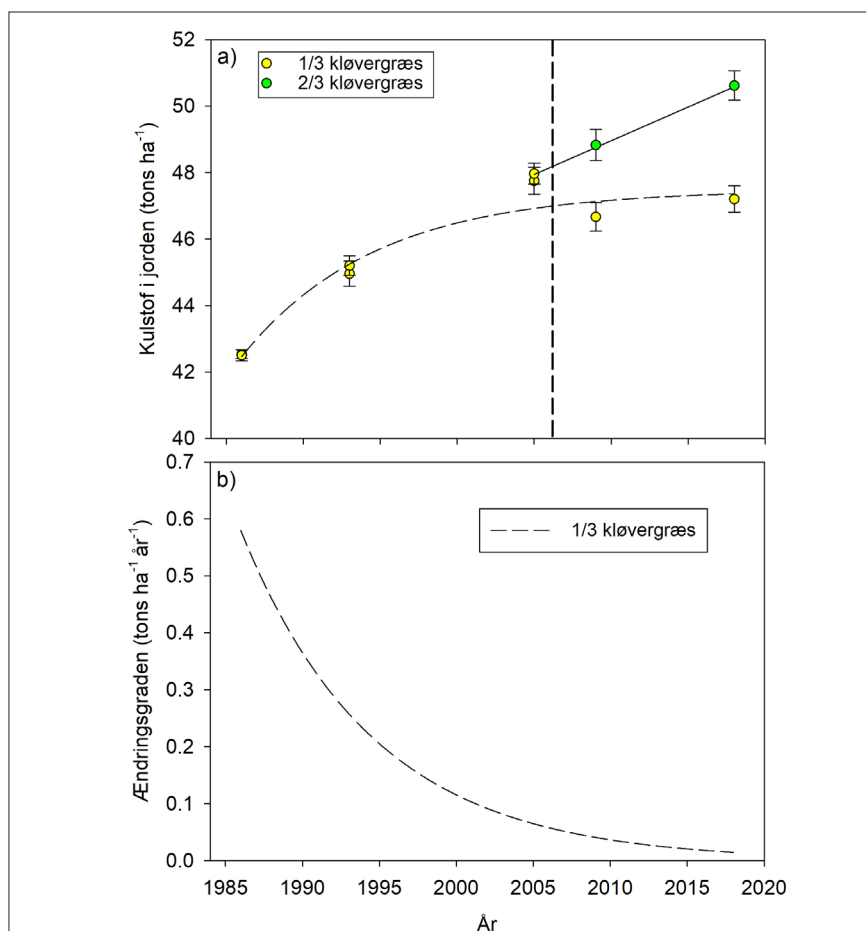
Ifølge Folketingets ”Aftale om grøn omstilling af dansk landbrug” skal landbruget bidrage væsentligt til at nå målet om at reducere udledninger af drivhusgasser i 2030 med 70 % i forhold til niveauet i 1990. En forøgelse i jordens kulstoflager ved ændringer i driften på marken kan reducere den årlige CO₂ udledning, men det er en kompliceret affære at opgøre driftstiltagenes kulstoflagringspotentiale.

JOHANNES L. JENSEN, LARS J.
MUNKHOLM & JØRGEN ERIKSEN

Kulstof i et klimaperspektiv

Klimaforandringer betragtes som et af vor tids mest presserende problemer. I den sammenhæng spiller jord en væsentlig rolle, idet jord både kan lagre CO₂ fra atmosfæren og udlede CO₂ via mikrobiel nedbrydning af organisk materiale. Jord indeholder tre gange så meget kulstof som vegetationen og dobbelt så meget kulstof som atmosfæren. Derfor kan selv små ændringer i jordens kulstofindhold have stor effekt på det globale kulstofkredsløb, hvorfor der i stigende grad er fokus på kulstoflagring i jord med henblik på at afbøde klimaforandringer. F.eks. via ”4 promille initiativet”, som blev lanceret ved COP-21 konferencen i Paris i 2015 /1/. Formålet med dette globale forskningsinitiativ er at øge jordens kulstoflager med 0,4 % i de øverste 40 cm af jorden årligt og dermed reducere den årlige CO₂ udledning betragteligt. Her spiller landbrugsjorden en afgørende rolle, idet cirka 38 procent af det globale areal benyttes til landbrugsproduktion.

Men hvad skal der så til for at øge kulstofindholdet i landbrugsjorden? Det hele starter med fotosyntesen, hvor planterne ved hjælp af sollysets energi omdanner CO₂ og vand til ilt og organisk materiale i form af glukose og andre kulstofforbindelser. Derfor handler det i høj grad om at maksimere produktionen af



Figur 1. (a) Kulstof i jord i 0-20 cm for to sædskifter i perioden 1986 til 2018. Seks-marks sædskiftet bestod af to år med kløvergræs fra 1987 til 2006. I 2006 blev eksperimentet opdelt i to (markeret med den vertikale linje); det ene sædskifte fortsatte med to år med kløvergræs, mens antal år med kløvergræs blev øget til fire i det andet sædskifte. Standardfejlen er angivet (n=60). (b) Ændringsgraden i kulstof i jorden for sædskiftet med to år med kløvergræs i hele forsøgsperioden.

plantebiomasse mest muligt. I en landbrugs-sammenhæng peges der især på en større brug af flerårige afgrøder som græs, der opretholder fotosyntesen en større del af året og afsætter mere kulstof i plantedele, som ikke høstes eller fjernes, herunder især i rodsystemet /2/.

Opgørelse af driftstiltagenses kulstoflagringspotentiale

En pålidelig opgørelse af driftstiltagenses kulstoflagringspotentiale kræver mange og gode oplysninger. Først og fremmest er man afhængig af langvarige markforsøg, hvor tiltagene er undersøgt over et langt tidsrum, idet jordens kulstofindhold kun ændrer sig langsomt, dvs. over en længere årrække. Langvarige markforsøg defineres ofte som værende opretholdt i mere end 20 år. Derudover kræves målinger af kulstofindhold og volumenvægt ved etablering af forsøget, dels regelmæssige målinger indtil der opstår en ny balance (eller ligevægt) mellem kulstoftilførsel og -fratørsel. Sådanne forsøg er sjældne og derfor værdifulde. To af disse forsøg er for nyligt blevet benyttet til at opgøre pålidelige kulstoflagringspotentialer for græs i om drift /3/, halmnedmuldning og efterafgrøder /4/.

Det økologiske kvægbrugssædskifte forsøg ved Foulumgård

Forsøget blev anlagt i 1987, hvor et seksmarks sædskifte med to år med kløvergræs blev indført på et areal med korn dyrkning som forhistorie. I 2006 blev eksperimentet opdelt i to; det ene sædskifte fortsatte med to år med kløvergræs, mens antal år med kløvergræs blev øget til fire i det andet sædskifte. Der blev udtaget jordprøver og målt kulstofindhold løbende i 0-20 cm jordlaget, og der blev udtaget uforstyrrede volumenfaste jordprøver til bestemmelse af volumenvægt i 2020. På figur 1a ses kulstof i jord som funktion af år i perioden 1986-2018 for de to sædskifter med forskellig græsandel. For sædskiftet med 1/3 kløvergræs i hele perioden steg kulstof i jord indtil en ny ligevægtstilstand blev opnået. Den nye ligevægtstilstand blev opnået efter 20 år, hvorefter kulstof i jord ikke ændrede sig yderligere. Den gennemsnitlige årlige lagring af kulstof ved at omlægge et areal, som tidligere blev brugt til korn dyrkning, til et sædskifte med 1/3 kløvergræs blev bestemt til 0,25 tons $ha^{-1} \text{år}^{-1}$. Dog er det værd at bemærke, at ændringen i kulstoflagring er størst i starten og aftager med tiden (figur 1b).

Den høje årlige kulstoflagring (ændringsgraden) i de første år er godt nyt i en klimasammenhæng, idet der er brug for virkemidler med en markant og hurtig effekt. Den dårlige



Figur 2. Fjernelse af halm sammenlignet med tilførsel af 12 tons halm ha^{-1} (Foto: Johannes L. Jensen).

nyhed er, at træerne ikke vokser ind i himlen. Efter 20 år har virkemidlet ikke længere en opbyggende effekt, men sædskiftet med 1/3 kløvergræs skal alligevel fastholdes for at opretholde niveauet. Hvis man f.eks. omlægger til korn dyrkning, vil kulstofindholdet i jorden hurtigt falde igen. I 2006 blev græsandelen i sædskiftet øget fra 1/3 til 2/3, hvilket medførte en lineær stigning i kulstof i jord, og der var endnu ikke tegn på en ny ligevægtstilstand (figur 1a). Det svarer til en ændring på 0,20 tons $ha^{-1} \text{år}^{-1}$, når man øger græsandelen i sædskiftet fra 1/3 til 2/3 i den 13 år lange periode.

Halm- og efterafgrødeforsøget ved Askov

En introduktion af flerårige afgrøder i sædskiftet såsom græs kan i mange tilfælde være vanskelig. I kornrige sædskifter kan kulstofindholdet øges ved f.eks. etablering af efterafgrøder eller ved at nedmulde halm fra kornafgrøder i stedet for at fjerne den. Efterafgrøder etableres i eller efter hovedafgrøden, som typisk er korn, og dyrkes primært for at reducere kvælstofudvaskningen i efterår og vinter, men via fotosyntesen bidrager de også med ekstra tilførsel af organisk materiale til jorden.

Halm- og efterafgrødeforsøget ved Askov blev anlagt i 1981 med ensidig vårbyg, som blev tilført 0, 4, 8 eller 12 tons halm $ha^{-1} \text{år}^{-1}$ (figur 2).

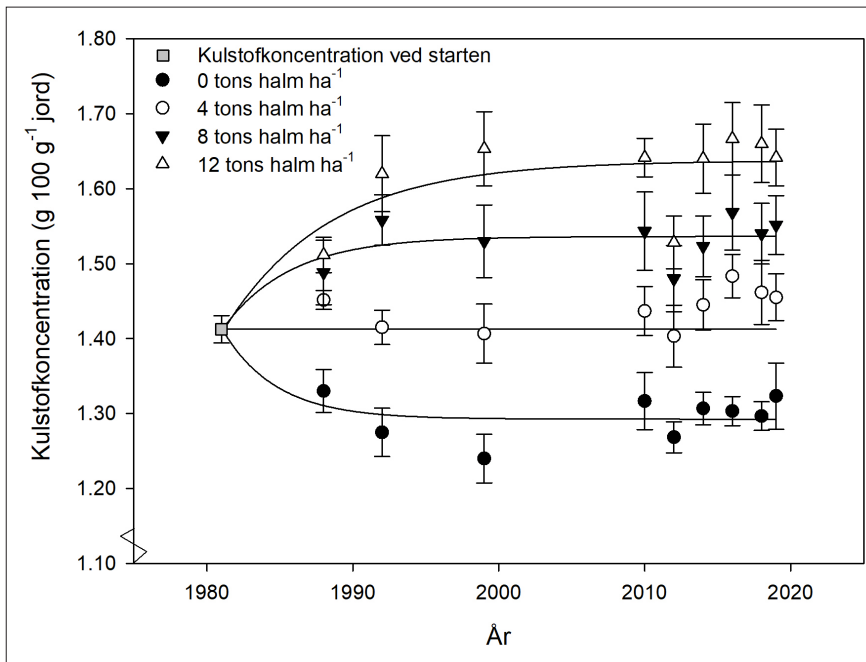
Halmbehandlingerne blev kombineret med dyrkning af efterafgrøder, enten undersøet rajgræs eller ingen efterafgrøde. Der blev udtaget jordprøver og målt kulstofindhold løbende i 0-20 cm jordlaget, og der blev udtaget

jordprøver til bestemmelse af volumenvægt i 2020. På figur 3 ses kulstofkoncentrationen i jord som funktion af år i perioden 1981-2019 for de fire halmmængder. Fjernelse af halm medførte et fald i jordens kulstofindhold, mens nedmuldning af 4 tons halm $ha^{-1} \text{år}^{-1}$ opretholdt kulstofindholdet i jorden. Nedmuldning af 8 eller 12 tons halm $ha^{-1} \text{år}^{-1}$ medførte en stigning i jordens kulstofindhold.

Igen observeres en større ændring i de første år efter indførelse af nye driftsforanstaltninger. I dette tilfælde blev den nye ligevægt allerede opnået efter 10-15 år. Det tog længere tid før en ny ligevægt blev opnået, når 12 tons halm blev nedmuldet sammenlignet med 8 tons halm, hvilket viser, at jo større ændringen er med hensyn til kulstoftilførsel, desto længere tid tager det at opnå den nye ligevægtstilstand. En undersøet rajgræsefterafgrøde i vårbyg øgede den gennemsnitlige årlige lagring med 0,21 tons $ha^{-1} \text{år}^{-1}$ og en ny ligevægt blev opnået efter 16 år. Effekten af en efterafgrøde svarede til nedmuldning af 4 tons halm.

Perspektivering

De ovenstående eksempler tydeliggør, at det fulde kulstoflagringspotentiale af et driftstiltag er bestemt af både den tid, det tager at opnå en ny ligevægt, samt den totale ændring i kulstoflageret. Ydermere er jordens kulstofindhold ved ændring af driftstiltag betydende for potentialet for yderligere lagring. I ovenstående eksempler var kulstofindholdet på omkring 1,5 %, hvilket er det gennemsnitlige indhold i danske mineraljorde. De langvarige gødningsforsøg ved Askov forsøgsstation



Figur 3. Kulstofkoncentration i jord i 0-20 cm for tilførsel af fire halm mængder (0, 4, 8 og 12 tons ha^{-1} $\text{\AA}r^{-1}$) i perioden 1981 til 2019. Standardfejlen er angivet ($n=8$ for 1981 og $n=6$ for 1988-2019).

viser, at selv i et fire-marks sædskifte med græs og tilførsel af gylle, var der et fald i jordens kulstofindhold i perioden 1924-2016 /5/. Dette kan forklares ved et forholdsvis højt kulstofindhold forud for opdyrkningen af marken i 1801. På den anden side kan der findes meget høje potentialer for yderligere lagring i jorde med meget lavt kulstofindhold /6/. Jordtypen har ligeledes en effekt på kulstoflagringspotentialer af et driftstiltag. Mere lerede jorde (stor andel af partikler mindre end $2 \mu m$) kan bedre stabilisere tilført orga-

nisk materiale via interaktioner med jordens fine partikler end sandede jorde.

Slutteligt er det værd at bemærke, at det er mindst lige så vigtigt at beskytte jorde med et stort kulstofindhold snarere end at øge kulstofindholdet yderligere, idet det generelt er hurtigere at tabe kulstof end at opbygge kulstof /7/. Derfor bør fokus i lige så høj grad være på at bibeholde permanente græsmarker, vådlægge lavbunds- og tørvejorde og bevare skov.

Referencer

- /1/ 4p1000.org
 - /2/ Janzen, H. H., van Groenigen, J. K., Powlson, D. S., Schwinghamer, T., van Groenigen, J. W. (2022). Photosynthetic limits on carbon sequestration in croplands. *Geoderma*, 416, 115810.
 - /3/ Jensen, J. L., Beucher, A. M., Eriksen, J. (2022). Soil organic C and N stock changes in grass-clover leys: Effect of grassland proportion and organic fertilizer. *Geoderma*, 424, 116022.
 - /4/ Jensen, J. L., Eriksen, J., Thomsen, I. K., Munkholm, L. J., Christensen, B. T. (2022). Cereal straw incorporation and ryegrass cover crops: The path to equilibrium in soil carbon storage is short. *European Journal of Soil Science*, 73, e13173.
 - /5/ Christensen, B. T., Thomsen, I. K., Eriksen, J. (2022). The Askov long-term field experiment (1894–2021) represents a unique research platform. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185, 187–201.
 - /6/ Machmuller, M., Kramer, M., Cyle, T., Hill, N., Hancock, D., Thompson, A. (2015). Emerging land use practices rapidly increase soil organic matter. *Nature Communications* 6, 6995.
 - /7/ Jensen, J. L., Schjøning, P., Watts, C. W., Christensen, B. T., Obour, P. B., Munkholm, L. J. (2020). Soil degradation and recovery – Changes in organic matter fractions and structural stability. *Geoderma*, 364, 114181.
- JOHANNES L. JENSEN (jlj@agro.au.dk) er postdoc ved Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet, Blichers Allé 20, 8830 Tjele. LARS J. MUNKHOLM (lars.munkholm@agro.au.dk) og JØRGEN ERIKSEN (jorgen.eriksen@agro.au.dk) er professorer samme sted.

Biokul – et klimamæssigt kinderæg

Som alle der kunne se fjernsyn eller gik i biografen i 1990'erne ved, så får man hele tre ting hvis man køber et kinderæg. Det lyder jo besnærende, og det lykkedes da også reklamen, at overbevise en del forældre om at de skulle købe sådan et til deres børn. Tre-ting-på-en-gang eller tre-fluer-med-et-smæk er altså noget der appellerer til vores indre købmand, og selvom børnene fra 90'erne i dag er blevet ældre, så skal der stadig tages stilling til produkter der hævder at give adskillige fordele. Produktion og anvendelse af biokul er et højaktuelt eksempel på et nyt kinderæg, der udråbes til at rumme op til flere fordele i forhold til at løse klodens – og især landbrugets – klimaudfordringer. I denne artikel stiller vi derfor os selv følgende spørgsmål:

Er biokul et klimamæssigt kinderæg?

SANDER BRUUN, TOBIAS PAPE THOMSEN,
DORETTE MÜLLER-STÖVER &
LARS ELSGAARD

Biokullets historie

Biokul er et trækulagtigt produkt, som dannes ved pyrolyse af biomasse. Der er sådan set ikke noget nyt ved trækul. Det dannes som et restprodukt i de fleste brande, fx i skovbrande og når heden blev brændt af i gamle dage. Det er også blevet produceret til industrielle formål i hundredvis af år. Det nye er, at nogle har fået den idé, at man kan producere det specifikt med det formål at putte det i landbrugsjord. Men hvorfor nu det?

Ideen om at putte biokul i jord kommer fra de så kaldte "Terra Preta do Indio" jorde som findes i Amazonasregionen. Figur 1 viser en sådan jord fra Brasilien. Terra preta betyder "sort jord" og var før 1950'erne kendt blandt lokale bønder som nogle meget frugtbare jorde, hvor man kunne opnå gode udbytter i sammenligning med de nærliggende jorde som var af ringe kvalitet. Det fik nogle forskere til at fatte interesse for jorderne og de



Figur 1. Jordprofil af en "Terra Preta" jord ved Amazonasfloden tæt på Manaus i Brasilien.



Figur 2. Tønde med biokul produceret ud fra halmpiller af Stiesdal SkyClean A/S.

fandt ud af, at de indeholdt store mængder af trækul, som var mange år gammelt. De fandt også andre ting i jordene såsom potteskår, og forskerne konkluderede, at de måtte være dannet af den præcolumbianske befolkning i området, ved at tilføre trækul og andre organiske materialer så som fiskeben. Herfra opstod ideen om at forbedre jords kvalitet ved at tilføre trækul eller biokul, som vi kalder det mere generelt, når det er lavet af forskellige slags biomasse.

I dag har vi nogle meget mere effektive måder at lave biokul på. Pyrolyse, som processen kaldes, kan udføres på forskellige anlægstyper, som alle har det til fælles, at biomasse opvarmes i en atmosfære, der indeholder meget lidt eller ingen ilt. Pyrolyseprocessen kan designes, så der samtidig med biokul også produceres gas og bio-olie, som kan bruges som

biobrændstof eventuelt efter opgradering til specifikke formål. Den del af biomassen som ikke bliver til gas eller bio-olie ender som biokul. Figur 2 viser en tønde med biokul produceret af halmpiller af Stiesdal SkyClean A/S. Stiesdal er en af flere danske virksomheder der udvikler pyrolyseteknologier til behandling af forskellige biomasser til energi og biokul.

Det er en vigtig pointe, at vi kan anvende en lang række forskellige biomasser til at producere biokul. Vi kan således bruge biomasser, som ellers ikke har de store anvendelsesmuligheder. Dette inkluderer organiske affaldsfraktioner og afgrøderester som fx spildevandsslam, græspulp fra grønne bioraffinaderier, grøde fra vandløb, organiske reststrømme fra fødevarerindustrien, den faste fraktion af husdyrgødning, have-park affald,

afgasset biomasse fra biogasanlæg og halm og høstede efterafgrøder.

Fordele ved anvendelse af biokul på landbrugsjord

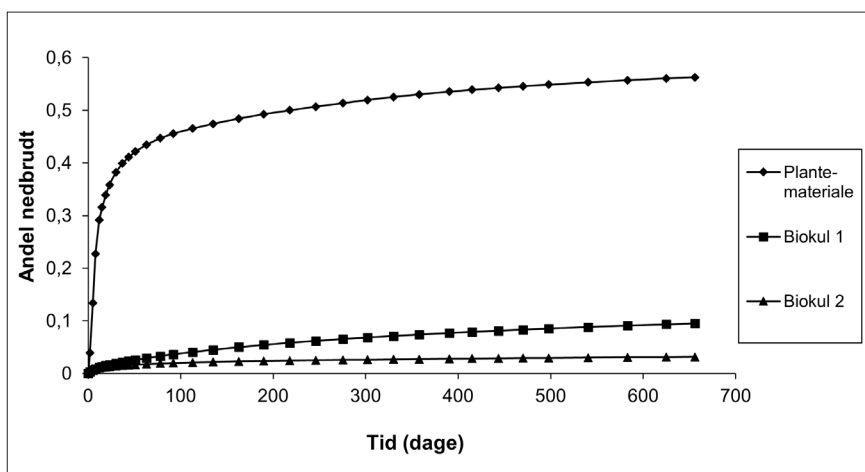
Vi har allerede indikeret, at biokul potentielt kan forbedre jordens egenskaber og produktivitet. Dette er tydeligt i tropenerne, hvor de oprindelige Terra Preta jorder findes. I de typiske udpinte og forsurede tropiske jorde hjælper biokullet med at forbedre egenskaber såsom: at øge kationbytningskapaciteten, hæve pH, og øge jordens vandholdende evne. Desuden tilføres der – afhængig af udgangsmaterialets sammensætning – også næringsstoffer såsom fosfor og kalium. Det er dog tvivlsomt om vi kan opnå de samme effekter i Danmark hvor kationbytningskapaciteten i mange jorde allerede er høj, pH løbende bliver reguleret (ved kalkning) og næringsstoffer bliver tilført efter behov. Der er dog stadig muligt, at man kan forbedre den vandholdende evne af nogle sandede jorde og dermed forbedre dyrkningssikkerheden. Det arbejdes der blandt andet med i projektet BioAdapt, hvor det bliver undersøgt og optimeret, hvordan tilførslen af finkornet biokul til grovsandede underjorde kan forbedre jordens vandholdende evne og planternes rodvækst. Der kan også være positive effekter relateret til biokuls mulige indvirkning på jordens tæthed og densitet. Endelig er det blevet fremført, at større partikler af biokul i jorden vil kunne skabe forbedret habitat for mikroliv, en slags landbrugsjordens koralrev. Disse effekter er dog ikke velundersøgte i dansk jord, og det er måske heller ikke hér, vi skal finde de største effekter af dette klimamæssige kinderæg. Det er dog noget, som det vil være interessant at få mere viden om.

Så hvis biokul ikke har de vilde effekter på udbytterne på de fleste jorde i Danmark, hvilke andre fordele kunne der så være ved at tilføre det til landbrugsjord? Jo, det kulstof som findes i biokullet er meget stabilt. Det vil sige, at biokul nedbrydes meget langsomt af mikroorganismer i jorden. Dermed kan en stor del af kulstoffet bindes i flere hundrede til tusinde år. Man betegner dette som en kulstof-negativ teknologi, fordi biomassen, som blev anvendt til at producere biokullet, har sit kulstof fra CO₂, der for nyligt blev fixeret fra atmosfæren gennem fotosyntese, og dette kulstof bliver langtidsparkeret i jorden efter omdannelsen til biokul og dermed ikke frigivet som CO₂ igen. Figur 3 viser resultaterne af et forsøg, hvor nedbrydningen af kulstoffet i to forskellige slags biokul er sammenlignet med nedbrydningen af plantemateriale. Som det ses, nedbrydes plantematerialet meget

hurtigere end biokul, der dermed bidrager til at binde kulstof i jorden i lang tid. Biokul giver os dermed en mulighed for, at landbruget kan få et mindre klimaaftryk, hvis vi ellers kan binde nok kulstof i biokullet.

Udover lagring af kulstof, giver biokul også mulighed for at reducere andre drivhusgasser som metan og lattergas. Lattergas dannes især i marker i forbindelse med dyrkning af afgrøder og som en konsekvens af anvendelsen af kvælstofgødning. Metan udledes især i forbindelse med lagring af husdyrgødning. Så hvordan kan biokul sænke udledningerne af metan? Det kan det, hvis man laver biokul af fx fast staldgødning eller den faste fraktion af gylle eller afgasset biomasse fra biogasanlæg. Ved at fjerne den faste fraktion kan man sænke indholdet af organisk materiale i gyllen, som er det der fører til dannelse af metan. Hvis man bruger den faste fraktion til pyrolyse og produktion af biokul, så undgår man emissioner af metan fra lagringen af denne fraktion. Herudover vil tilførsel af gylle normalt fremme de processer, der danner lattergas i jorden, hvilket kan begrænses ved at fjerne noget af det tilgængelige organiske materiale i gyllen og stabilisere det i form af biokul.

Derudover er det en særlig – og ofte påvist – egenskab ved biokul, at det påvirker omsætningen af kvælstof i jorden på en måde så mikroorganismene frigiver mindre lattergas /1/. Præcist hvordan denne effekt opstår vides ikke med sikkerhed. Mulige forklaringer inkluderer at biokul faciliterer elektron-overførslerne i jorden, således at reduktionen af lattergas til frit kvælstof, som er en harmløs atmosfærisk gas, stimuleres. Det er også vist, at biokul kan binde nitrat i jorden og dermed begrænse denitrifikationen. En af de mere velunderbyggede forklaringer er, at biokul ved at hæve jordens pH øger effektiviteten af det enzym, der omdanner lattergas til frit kvælstof. Dette er i overensstemmelse med danske studier som fandt en sammenhæng mellem pH i jorde tilført forskellige mængder biokul og andelen af den totale denitrifikation, som havde lattergas som slutprodukt (figur 4). I det samme studie observeredes dog ikke nogen nedsat frigivelse af lattergas i behandlinger med biokul i et markforsøg /3/. Det kan muligvis skyldes klimaet i det pågældende år eller jordtypen, men det kan også skyldes de anvendte typer af biokul eller det undersøgte dyrkningsystem. Så længe vi mangler kendskab til de bagvedliggende mekanismer, er det svært at forudsige under hvilke forhold og med hvilke typer biokul, der kan forventes en betydelig reduktion af frigivelsen af lattergas fra dyrkede jorder efter tilførsel af biokul. Derfor under-



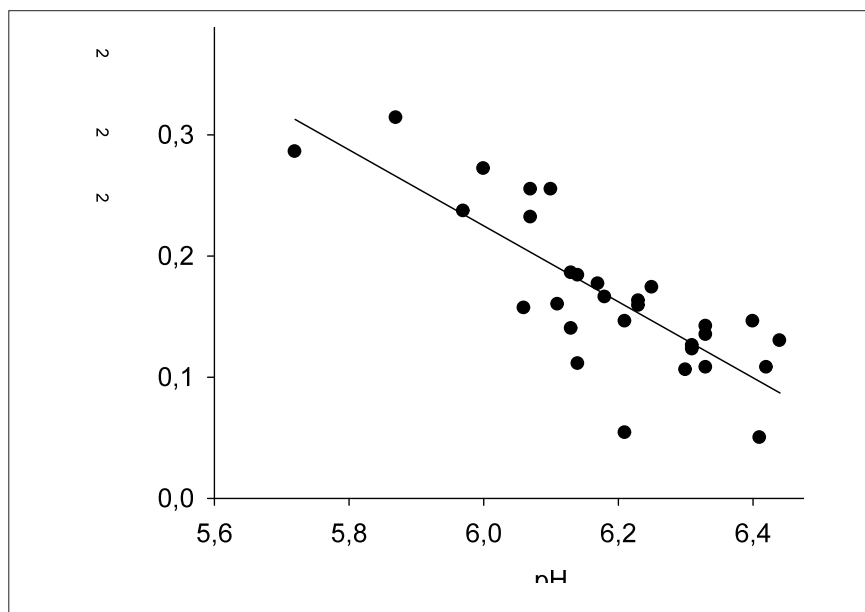
Figur 3. Frigivelse af CO₂ fra plantemateriale og to forskellige slags biokul produceret ved to forskellige temperaturer (Baseret på /2/).

søges disse mekanismer i det nystartede forskningsprojekt MitiChar. Ved at identificere mekanismerne er det håbet, at dette kan bruges til at finde måder at optimere produktionen af biokul, så vi opnår maksimal reduktion af lattergasudslip fra markerne.

Er biokul så et kinderæg?

Er produktion og anvendelse af biokul så et klimamæssigt kinderæg? Ja, vi kan jo i hvert fald konkludere, at der er mindst 3 potentielle klimafordele: (i) Biokul kan binde kulstof meget lang tid i jorden og dermed forhindre at kulstoffet slipper ud som CO₂, (ii) Pyrolyse af biologisk aktive biomasser kan forhindre emission af metan under lagring, og endelig kan (iii) tilførsel af biokul til landbrugsjord potentielt reducere mængden af lattergas, som dannes i forbindelse med

anvendelsen af kvælstofgødning i markerne. Derudover er der klimagevinsten ved øget produktion af bioenergi fra anvendelse af den gas og bio-olie, der også produceres i pyrolysen. Hvordan effekterne fordeler sig i kinderæggets samlede klimaeffekt afhænger meget af omstændighederne, og det er noget af det, som der arbejdes med i forskningsprojekterne STABIL og LowHigh, som undersøger hele kæden for behandling af husdyrgødning og hvordan pyrolyse kan anvendes til at forbedre håndteringen af husdyrgødningen og afgasset biomasse. I 2021 undersøgte et studie halm-pyrolyses klimafodafttryk i Danmark, og det blev vurderet at pyrolyse af 1 ton halm ville give en klimaeffekt på omkring 1 ton CO₂-ækvivalenter i forhold til effekten ved at nedmulde halmen direkte. Effekten var fordelt næsten ligeligt imellem effekten af at binde



Figur 4. Effekt af pH i jordprøver fra markforsøg med biokul på andelen af N₂O dannet ved denitrifikation til lattergas (N₂O) og frit kvælstof (N₂) i laboratorie inkubationer (Baseret på /3/)

kulstof i jorden og effekten af at substituere fossil energi med bioenergi /4/. I dette studie var effekten på lattergasemissioner fra jorden ikke inkluderet, da der stadig mangler robuste data for danske forhold

Men var der ikke også noget med en overraskelse?

Som nogle måske husker, så var den sidste ting, som man fik når man købte et kinderæg en overraskelse. Man vidste jo ikke hvad for noget legetøj, der var inde i ægget. Og det er selvfølgelig relevant at spørge, om vi også får en overraskelse, hvis vi investerer bredt i biokul og binder store mængder af kulstof på den måde? For der er helt bestemt fordele, men der er også potentielle ulemper. Som tidligere nævnt er biokul på ingen måde noget, der er nyt i miljøet, og det findes i dag overalt, men i begrænsede mængder. Vi bør derfor undersøge nøje, hvad der sker, når der tilføres store mængder, og det undersøges bl.a. i projekterne BioStore og EOM4SOIL. Vi bør være sikre på, hvad vi tilfører. Biokulet skal produceres under kontrollerede forhold, så man i meget stor udstrækning undgår dannelsen af forskellige polycykliske aromatiske hydrocarboner (tjærestoffer) og dioxin, som er meget giftigt. Man ved i dag rigtig meget om produktion og anvendelse af biokul, men mange af effekterne afhænger af komplicerede og kontekstspecifikke faktorer /5/. Derfor er det vigtigt, at alle muligheder for uheldige overraskelser såsom negative miljø- og systemeffekter undersøges grundigt og under realistiske forhold inden storskala implementering af teknologien rulles ud for alvor.

Relevante projekter

Stabil: Reduktion af drivhusgasudledninger og øget kulstoflagring i jord via stabilisering af gødningsfibre som biochar. Finansieret af GUDP. Kontakt: Sander Bruun, sab@plen.ku.dk

BioAdapt: Biochar as a tool for climate adaptation in crop production on coarse sandy soil. Finansieret af GUDP. Kontakt: Dorette Müller-Stöver, dsst@plen.ku.dk

LowHigh: Low emissions and high energy production in manure handling chains. Finansieret af Innovationsfonden gennem Agri-FoodTure. Kontakt: Torkild Birkmose, tsb@seges.dk

MitiChar: Mitigation of climate impacts from plant production with biochar from straw and biogas digestates. Finansieret af Innovationsfonden gennem AgriFoodTure. Kontakt: Sander Bruun sab@plen.ku.dk

BioStore: Biochars for soil carbon storage and sustainable agriculture. Finansieret af Innovationsfonden gennem INNO-CCUS. Kontakt: Dorette Müller-Stöver, dsst@plen.ku.dk

EOM4SOIL: External organic matters for climate mitigation and soil health. Finansieret af EU Horizon 2020 under EJP Soil programmet. Kontakt: Lars Elsgaard, lars.elsgaard@agro.au.dk

SkyClean Scale-up: Finansieret af pyrolysepuljen 2022. Kontakt: Dorette Müller-Stöver, dsst@plen.ku.dk

Referencer

/1/ Borchard, N., Schirrmann, M., Cayuela, M.L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J.M., Fuertes-Mendizábal, T., Sigua, G., Spokas, K., Ippolito, J.A., Novak, J., 2019. Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 651, 2354–2364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.060>

/2/ Bruun, S., Jensen, E.S., Jensen, L.S., 2008. Microbial mineralization and assimilation of black carbon: Dependency on degree of thermal alteration. *Org. Geochem.* 39, 839–845. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2008.04.020>

/3/ Thers H, Abalos D, Dörsch P, Elsgaard L., 2020. Nitrous oxide emissions from oilseed rape cultivation were unaffected by flash pyrolysis biochar of different type, rate and field ageing. *Sci Total Environ* 724, 138140. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138140.

/4/ Thomsen, T. P., 2021. Climate Footprint Analysis of Straw Pyrolysis & Straw Biogas: Assessment of the Danish climate crisis mitigation potential of two new straw management options. Roskilde Universitet. <https://forskning.ruc.dk/da/publications/klimaaftryk-franvendelse-af-halm-i-pyrolyse-og-biogas-en-analyse>

SANDER BRUUN er lektor på Københavns Universitet hvor han arbejder med landbrugets påvirkninger af klimaet og teknologier der kan bruges til at reducere påvirkningerne. Adresse: Institut for Plante- og Miljøvidenskab, Thorvaldsenvej 40, 1871 Frederiksberg C, e-mail: sab@plen.ku.dk

TOBIAS PAPE THOMSEN er lektor på Roskilde Universitet hvor han bl.a. arbejder med udvikling og analyse af nye klimavenlige værdikæder baseret på produktion og anvendelse af biokul. Adresse: Institut for Mennesker og Teknologi, Universitetsvej 1, Bygning 02.1, 4000 Roskilde, e-mail: tpapet@ruc.dk

DORETTE MÜLLER-STÖVER er lektor på Københavns Universitet og arbejder med organiske restprodukter med fokus på deres gødningseffekt og potentiale for kulstoflagring i jorden. Adresse: Institut for Plante- og Miljøvidenskab, Thorvaldsensvej 40, 1871 Frederiksberg C, e-mail: dsst@plen.ku.dk

LARS ELSGAARD er lektor på Aarhus Universitet og undersøger mikrobielle processer i jorden, der bidrager til optagelse og frigivelse af drivhusgasser samt næringsstoffer. Adresse: Institut for Agroøkologi, Blichers Allé 20, 8830 Tjele, e-mail: lars.elsgaard@agro.au.dk

Det danske fødevareerhverv har en vision om at være klimaneutralt i 2050.

Sammen med vores medlemmer vil vi vise, at der findes en økonomisk bæredygtig vej til en klimaneutral fødevareproduktion.

Vi repræsenterer en værdikæde med tyngde og vilje til at finde løsninger på verdens klimaudfordringer i tæt samspil med resten af Danmark.

Læs mere på lf.dk/klima



Tørvejordernes fremtidsudsigter

Udbredelsen af tørvejorderne i Danmark svinder under udledning af store mængder CO₂ til atmosfæren. Dette sker som et følge af menneskelige aktiviteter, herunder afvanding af og dyrkning af jorden. Som konsekvens har vi set et fald i udbredelsen af tørvejorderne fra 118.162 ha i 1975 til 70.500 ha i 2010 for jorder i omdrift. Nøglen til at bremse denne udvikling ligger i vådlægning af tørvejorderne, så nedbrydningen af organisk stof bremses.

CECILIE HERMANSEN, LIS WOLLESEN DE JONGE & MOGENS HUMLEKROG GREVE

Hvad er tørv?

På lavbundsgrunde, som ikke afvandes, ligger grundvandsstanden tæt ved overfladen hele eller dele af året. På grund af den høje grundvandsstand sker den mikrobielle nedbrydning af organisk stof meget langsomt, og i nogle tilfælde går den helt i stå /1/. Derfor ses der for lavbundsgrunde ofte et højt indhold af ophobet organisk kulstof i jorden, bestående af døde planterester. Generelt skelnes der imellem kulstofrige jorder (6-12% C) og tørvejorder (>12% C). I Den Danske Jordklassificering anvendes en grænse på 6% kulstof og en tykkelse på minimum 20 cm som definitionen på kulstofrige jorde (Humus jorder). Til sammenligning anvender IPCC en grænse på minimum 12% og en tykkelse på minimum 30 cm til at definere tørvejorde /2/. I Danmark er det ikke unormalt at tørv i nogle områder er dybere end 5 m, de fleste tørvejorder er dog under 1 meter tykke.

Hvordan karakteriseres tørv?

I 2010 blev der i forbindelse med SINKS-1 projektet gennemført et omfattende feltarbejde for at kortlægge tørvens udbredelse i Danmark. I forbindelse med denne kortlægning blev 10.000 punkter, på lavbundsarealer i hele Danmark, besøgt og karakteriseret (Figur 1a).

I hvert punkt blev vegetationen registreret, og der blev taget billeder af selve punktet og omgivelserne. Tørvedybden blev målt med et sonderingsbor, som er et langt tyndt spyd, der kan gennemtrænge kulstofrige jorder og tørvejorder ned til 5-6 m dybde (Figur 1b). Boret kan ikke gennemtrænge mineralske lag som sand og ler, hvilket gør boret egnet til måling af tørvedybden. Derudover blev der udtaget op til fire intakte jordkerner i dybdeinterval-lerne 0-30, 34-64, 68-98 og 102-132 cm. På disse jordkerner blev der i feltet bestemt materialetype og -farve og desuden blev der målt pH, ledningsevne og grundvandsdybde. Derudover blev tørvens omsætningsgrad bestemt på en skala fra 1 til 5. En værdi på 1 angiver tørv der ikke er omsat og derfor har en frisk og velbevaret plantestruktur, og en værdi på 5 angiver den højeste omsætningsgrad for tørv,

hvor der ses ingen eller meget få spor af plantestruktur i prøven. Efter feltarbejdet bestemmes der i laboratoriet volumenvægt samt total C og N på de udtagne jordprøver.

Historisk udvikling i udbredelsen af tørvearealer

I SINKS-1 projektet blev arealet af tørvejorder med over 12% kulstof i 2010 opgjort til 107.000 ha, hvoraf 70.500 ha var i omdrift som landbrugsarealer (Figur 2). Til sammenligning udgjorde tørvejorder i 1975 178.317 ha af Danmarks areal. Heraf var 118.162 ha i omdrift /3,4/. Derved svandt de samlede arealer med tørv 71.317 ha på 35 år, hvoraf tørvearealer på jorder i omdrift svandt 47.662 ha.

Menneskelige aktiviteter har bevirket at udbredelsen af kulstofrige jorder og tørvejorder er svundet. Historisk har tørv haft flere anvendelsesformål. Under 1. og 2. verdenskrig blev tørv udgravet og anvendt som brændsel, og omkring 1980 blev det udbredt at anvende udgravet tørv til havebrug /1/. Derudover blev det i Danmark udbredt at afvande lavbundsgrunde men henblik på at dyrke siden middelalderen. Oprindeligt blev afvandingen kun ud-



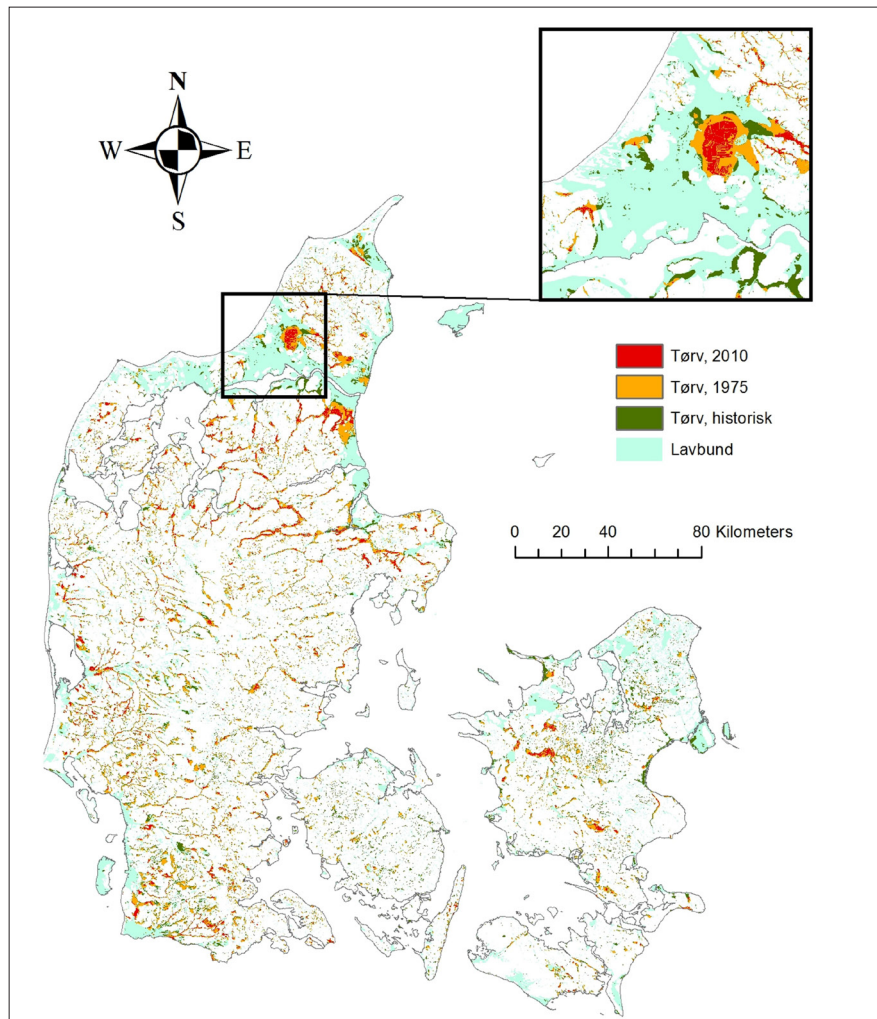
Figur 1: a) Feltarbejde under karakterisering af tørv samt udtagning af jordprøver på lavbundsgrunde under SINKS-2 projektet. b) Overblik over udstyr til feltarbejdet, foto: Søren Bent Torp.

ført med grøfter, men sidenhen er det også blevet udbredt at anvende en kombination af drænrør og grøfter på lavbund. Ved at sænke grundvandsstanden kan tørvejorderne anvendes til landbrug og disse jorder er gode landbrugsjorder med god vand- og næringstofforsyning. /1/. Når grundvandsstanden sænkes tilføres der ilt (O_2) til jorden, hvilket bevirker at mikroorganismer i jorden (bakterier, svampe og arkæer) begynder en aerob nedbrydning af det organiske stof under udledning af store mængder kuldioxid (CO_2). Derved bliver tørven ved afvanding af grundvandet en kilde til udledning af drivhusgasser. Det estimeres at lavbundsarealerne i Danmark står for omkring 10% af den samlede drivhusgasemission.

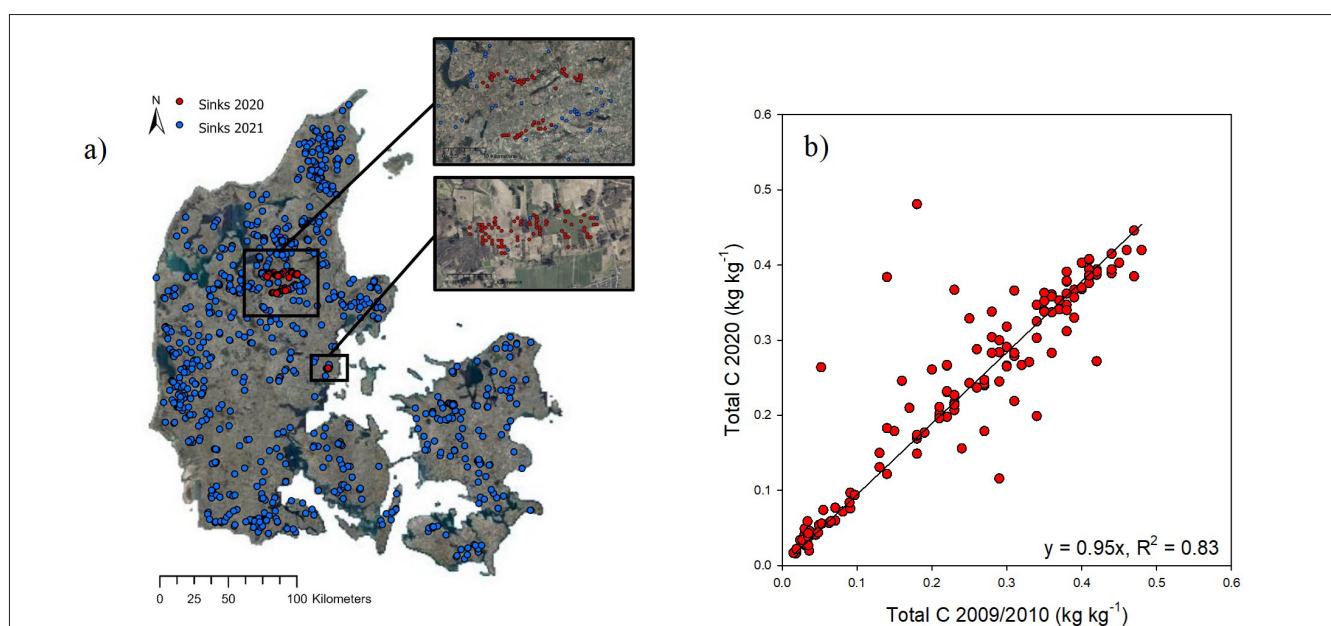
Når der ikke er ilt til stede i jorden, kan den mikrobielle nedbrydning af organisk stof foregå anaerobt under udledning af metan (CH_4) og lattergas (N_2O). Udledningen af CH_4 hæmmes, hvis der er et overliggende iltet jordlag, da en type af bakterier kaldet metanotrofer vil oxidere CH_4 til CO_2 . Disse mekanismer bevirker, at der vådlægning af tørvejorder kan forekomme en udledning af CH_4 , men helt generelt vil en vådlægning af tørvejorde mindske det samlede udslip af drivhusgasser /1/.

Fremtiden for udbredelse af tørv

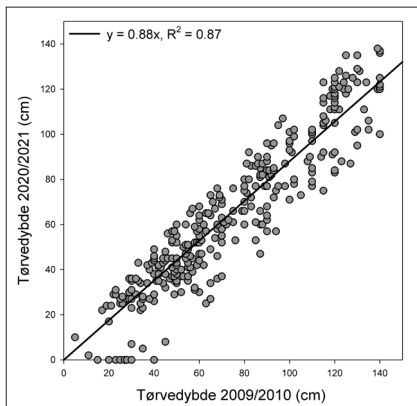
Siden SINKS kortlægningen af tørven i 2010 er udbredelsen af tørvejorderne fortsat svundet. For at få vished om tørvejordernes nuværende tilstand og udbredelse blev der igangsat et SINKS-2 projekt. Projektet har til formål at opdatere det eksisterende tørvekort. Derfor blev 1000 af de oprindelige SINKS-1 punkter genbesøgt i 2020 og 2021 (Figur 3a), for at undersøge udviklingen i



Figur 2. Udbredelse af lavbundsgrunde i Danmark, den historiske beliggenhed af tørv, samt distributionen af tørv i hhv. 1975 og 2010 /3/.



Figur 3: a) Lavbundspunkter som blev genbesøgt i hhv. 2020 og 2021. b) Total kulstof (C) koncentration ($kg\ C/kg\ tørstof$) i 139 prøver udtaget i de øverste 30 cm i SINKS-2 lavbundspunkter genbesøgt i 2020.



Figur 4: Tørvedybden i hhv. 2009/2010 og 2020/2021.

tørvens karakteristika gennem de sidste 10 år. For punkterne som blev genbesøgt i 2020 (udtaget omkring Nørre å, Skals å og Odder, Figur 3a), indikerer de foreløbige resultater at der sker et fald i kulstofkoncentrationen

på gennemsnitligt 5 % i den øverste prøve (Figur 3b), som blev udtaget i dybdeintervallet 0-30 cm. Derudover indikerer de indledende resultater for tørvedybden en gennemsnitlig nedgang i tørvedybden på 12% fra 2009/2010 til 2020/2021 for tørvedybder i intervallet 0 til 140 cm (Figur 4). Når flere resultater fra SINKS-2 projektet foreligger, vil det kunne siges mere nøjagtigt hvordan tørvens har udviklet sig over de sidste 10 år.

Perspektivering

Nøglen til at mindske emissionen af drivhusgasser fra lavbundsjordene ligger i at vådlægge jorderne, så den mikrobielle omsætning af det organiske stof begrænses. I oktober 2021 blev der i regeringen indgået en aftale om grøn omstilling af dansk landbrug. I denne aftale blev der fremsat en ambition om at tage 100.000 ha lavbundsjord ud af drift inden 2030, hvoraf

50.500 ha skal vådlægges.

På trods af at vådlægning er et omkostnings-effektivt klimatiltag, med gode miljømæssige sideeffekter, går vådlægningen af humus jorderne meget langsomt. Der er i øjeblikket vådlagt langt under 10.000 ha. De nuværende ordninger er frivillige og omstændige og det går tydeligt vist for langsomt. I 2023 skal der laves en evaluering af de nuværende ordninger og nye instrumenter er nødvendige for at nå vores mål om en vådlægning af de 100.000 ha.

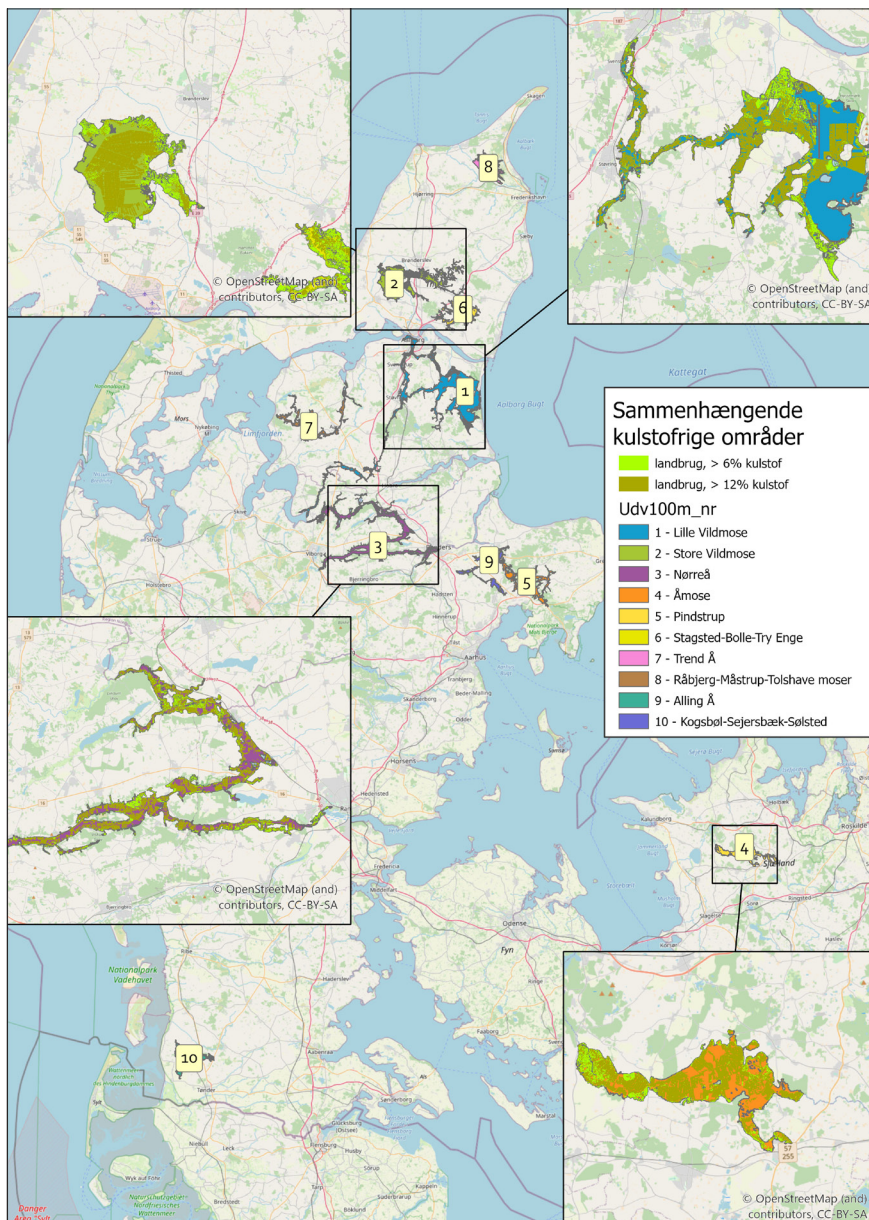
Udtagning af sammenhængende humusjorder som centralt virkemiddel

Det er mest omkostningseffektivt af vådlægge store sammenhængende lavbundsarealer. Vi vil derfor foreslå at udpege de 10 største sammenhængende arealer med humusjorder som nationale lavbundsreservater /1/ (Figur 5). Formålet med udpegningen vil være at fokusere den nationale indsats for at fremskynde vådlægningen i Danmark. Dette vil kunne opnås hvis alle nationale og lokale aktører prioriterer deres indsats til disse områder, og politikerne samtidig etablerer de lovgivningsmæssige og økonomiske rammer for vådlægningen. De 10 største sammenhængende humusarealer dækker mere end 30.000 ha.

Referencer

- /1/ Greve, M.H., M.B. Greve, Y. Peng, B.F. Pedersen, A.B. Møller, P.E. Lærke, L. Elsgaard, C.D. Børgensen, J.L. Bak, J.A. Axelsen, S. Gyldenkerne, G.J. Heckrath, D.H. Zak, M.T. Strandberg, P.H. Krogh, B.V. Iversen, E.M. Sørensen, C.C. Hoffmann. 2021. Vidensyntese om kulstofrig lavbundsjord. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.
- /2/ IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Udgivet: IGES, Japan.
- /3/ Gyldenkerne, S. and P. Frederiksen. The Danish SINKS project. Final report on the Danish monitoring project for Land Use, Land Use Change and Forestry under the Kyoto Protocol. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi.
- /4/ Greve, M.H., O.F. Christensen, M.B. Greve, and R.B. Kheir. 2014. Change in peat coverage in Danish Cultivated soils during the past 35 years. Soil Science. 179: 250-257.
- /5/ de Jonge, L.W., O.H. Jacobsen, and P. Moldrup. 1999. Soil water repellency: Effects of water content, temperature, and particle size. Soil Sci. Soc. Am. J. 63:437-442.

CECILIE HERMANSEN, postdoc ved Institut for Agroøkologi, cecilie.hermansen@agro.au.dk; LIS WOLLESEN DE JONGE, professor i jordfysik ved Institut for Agroøkologi, lis.w.de.jonge@agro.au.dk; MOGENS HUMLEKROG GREVE, professor i jordfysik, greve@agro.au.dk.



Figur 5. På figuren ses en afgrænsning af de 10 største arealer som tilsammen dækker mere end 30000 ha humusrige landbrugsarealer.



Hvor er naturhistorierne?

Det er dog det herligste tidsfordriv, at agte på dyrenes færden og liv," sang Hans Vilhelm Kaalund (1818-1885) for nogle menneskealder siden /1/. Og han fortsatte: "hver med sin egen drift og natur." 72 år senere indførte amerikanske Grinnell /2/ begrebet "niche" om det samme: Den måde, en art udnytter, fungerer og overlever på i sit levested. Ordet "niche" var måske ikke særlig velvalgt, da det alt for let opfattes som et fysisk rum, en "hylde," som arten lever i. Men den økologiske niche rækker langt videre, som Kaalund skrev. Arternes forskellighed er ikke kun noget med små prikker og hår og farver. Det er i høj grad deres adfærd, fysiologi og andre egenskaber. Enkelt sagt er nichen artens "levevis," eller "erhverv," mens det rumlige levested, "adressen," kaldes habitatet /2/. Et dansk bidrag til fornyelse og udvikling af disse vigtige økologiske begreber er, at Dansk Sprognavn (se retskrivningsordbogen), har besluttet, at habitatet på dansk retteligt skal være intetkøn, altså habitatet.

Al respekt for de mange og lange arts-lister, hvad enten de er fra "bioblitz" eller miljøovervågninger. Men hvor er naturhistorierne, hvor er de dokumenterede iagttagelser om "arternes egen drift og natur," der, måske, kan afsløre, om ikke alt, så dog glimt af en kausal sammenhæng mellem arten og dens habitat? Et eksempel på kausal sammenhæng havde vi i det gamle saprobieindeks: De røde mygglarver og børsteorme har hæmoglobin, der gør, at de kan overleve, selv om forureningen har brugt vandløbets ilt. Tilsvarende kausale sammenhænge er, stort set, fraværende og ukendte i vores nuværende vandløbs-indices, se argumentation og referencer i /3/.

I mine yngre dage i en fjern fortid undersøgte jeg, inspireret af min professor, Kaj Berg (1899-1972), i små strømakvarier adfærd hos to flade vandløbs-døgnfluer, *Heptagenia sulphurea*, der lever på sten, og *H. fuscogrisea*, der lever på vandplanter /4/. I bl. a. forskelle på kløerne fandt jeg en mulig forklaring på denne forskel i habitat, en forklaring, der endnu ikke er modsagt. En nyhed er dog, at *H. fuscogrisea* nu hedder *Kageronia fuscogrisea*. Så blev vi så kloge. Med forbehold for, at

jeg kan have overset nye undersøgelser, er det vel et eksempel på, at der er langt mellem naturhistorier, som er baseret på iagttagelser og eksperimenter.

Det er ikke nogen nyhed, at skal vi forstå, hvordan naturen og dens skabninger fungerer, så skal vi spørge naturen selv, ikke bygge på vores egne meninger. Det er formuleret og praktiseret af Abraham Trembley (1704-1784), den eksperimentelle biologis fader /5/. Han undersøgte ferskvandspolypens "sjæl" og egenskaber gennem vel tilrettelagte og gennemtænkte forsøg, utvivlsomt påvirket af hans uddannelse som matematiker. Selv nutidens stamcelleforskning var han tæt på.

Det er ikke let at eftergøre Trembleys avancerede eksperimenter, jeg skal i hvert tilfælde ikke forsøge. Men mindre kan gøre det, hvis man fx vil undersøge, hvordan døgnfluen *Rhitrogena* holder fast på stenene i Højen bæks stride strøm, det eneste sted, hvor den findes i Danmark. Den standhaftige myte er, at dens store gæller fungerer som en sugeskive. Til trods for, at det er usandsynligt, og at det overbevisende er afvist mere end én gang, så optræder myten stadig, selv i den nyeste litteratur /6/. Nej: *Rhitrogena*, som andre døgnfluer, holder fast med kløerne i de små ujævnheder, fx døde kiselalgeskaller, på stenene. Det er let at efterprøve: Sæt en *Rhitrogena*-larve, (nogle kalder dem nymfer), ned i et lille hjemmelavet akvarium, hvor det ene glasvindue er ridset med et stykke sandpapir (figur 1). Skab så en passende strøm i akvariet, enten med en luftstrøm eller med lille motordrevet propel: Larven sætter sig pænt til rette på den ridsede glasrude, så man kan se den fra undersiden (figur 2): Den opfører sig som en blind person på en klatrevæg: "Hænderne", der ikke har fat i en ridse, søger frem og tilbage efter et holdepunkt.

Mesteren i at fortælle naturhistorier, fundet på iagttagelser og forsøg, var Jean Henri Fabre (1823-1907): "- thi insekterne interesserer mig langt mere, naar de er i færd med



Figur 1: Ridset strømakvarium

deres arbejde, end naar de er stukket på nåle i et skab, skrev han i /7/. Den bog er stadig værd at læse! Og hans råd værd at følge.

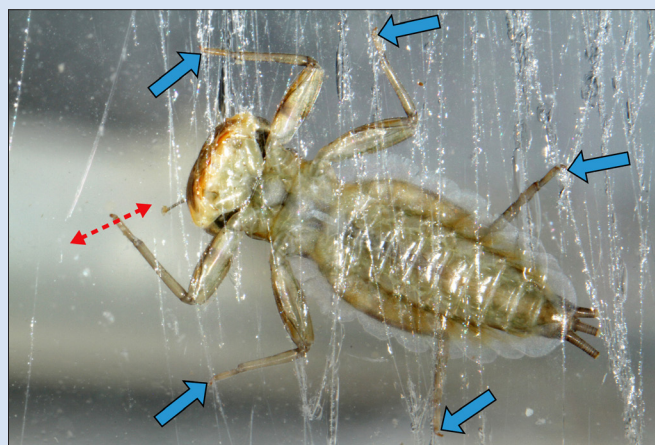
Vi skal ikke spises af med myter, gætterier og ekspertvurderinger, når det handler om tilstand og udvikling i vores natur. Det kan ikke siges klarere end udtrykt af professor Christian Damgaard, DCE, Århus Universitet i Altinget 22. februar i år: *Det er at stikke blå i øjnene på den interesserede offentlighed og det politiske system at bævde, at man kan lave troværdige økologiske prognoser ved hjælp af generelle og kvalitative ekspertvurderinger.*

Vi skal have fakta. Ikke meninger. Det er politikernes opgave: Hvad vil med naturen? Så må vi andre levere troværdige løsninger.

Referencer:

- /1/ Kaalund, H.V. 1845: Fabler for børn.
- /2/ Odum, E. P.1971: Fundamentals of Ecology.
- /3/ Madsen, B.L. 2013: 13 år med EU- vandrammedirektivet. Har det givet os bedre vandløb. *Aktuel Naturvidenskab* 5, s.46-48.
- /4/ Madsen, B.L. 1968: A comparative Ecological investigation of two related Mayfly Nymphs. *Hydrobiologia* 31,s.337-349
- /5/ Madsen, B.L. 2016: Den eksperimentelle biologis fader. *Aktuel Naturvidenskab*, 3, s.36-40.
- /6/ Sand-Jensen, K. og Schou, J.C 2019: Så forandret: Danmarks natur gennem 200 år.
- /7/ Fabre, J-H 1915: Instinktets mysterier.

Bent Lauge Madsen



Figur 2: *Rhitrogena* har fat med 5 ben, Det sjette søger fodfæste (halenokkerne mistede den i propellen, sorry).

Flerårige afgrøders rolle i klimakampen

Flerårige afgrøder har et permanent rodnet og en lang vækstsæson. De kan derfor øge kulstoffangsten og reducere tabet af næringsstoffer sammenlignet med enårige afgrødesystemer og er oplagte bidrag til et mere klimavenligt landbrug. Hidtil har kun græs og kløver fyldt i landskabet og kun som foder til drøvtyggere. Men bioraffinering kan bidrage med nye produkter – og hvorfor ikke dyrke flerårigt korn?

UFFE JØRGENSEN, POUL ERIK LÆRKE &
HENRIK BRINCH-PEDERSEN

Det er velkendt, at flerårige afgrøder har positive effekter på klima og miljø i sammenligning med enårige afgrøder /1,2/. Men det har hidtil været svært at finde profitable markeder for produktion af flerårige afgrøder i landbruget i større omfang – ud over de græsmarker, som udnyttes til kvægfodring. Der har heller ikke været noget økonomisk incitament for landmænd til at dyrke afgrøder med positive klima- og miljøeffekter. Derfor var kun ca. 23 % af det danske landbrugsareal (gennemsnit af 2019-21) udnyttet til flerårige afgrøder, når juletræer, frugttræer og brakarealer medregnes. Nu ser markedet for græsmarksafgrøder ud til at kunne ændre sig med udvikling af bioraffinering af grønne afgrøder til proteinfoder, fødevarer, materialer og bioenergi /3/. Kulstofkreditter for klimavenlig landbrugsdrift sælges allerede på det private marked, og der forventes et EU-certificeret kulstofkreditmarked fra 2023.

De første to kommercielle grønne bioraffinaderier er igangsat i 2020 og 2021 på henholdsvis en større økologisk gård, Ausumgaard (www.ausumgaard.dk) og i et samarbejde mellem flere aktører i Biorefine Denmark A/S (www.biorefine.dk). Hovedprodukterne er til at begynde med et proteinkoncentrat med ca. 50% protein, som kan erstatte soja til fodring af enmavede husdyr /3/, samt biogas produceret fra resten af kløvergræsset. Der arbejdes samtidigt intenst både på forskningssiden (www.cbio.au.dk) og hos kommer-

cielle aktører på at udvikle en proteinkvalitet, som kan udnyttes til human ernæring, mens fiberfraktionen forsøges udviklet til emballage, tekstiler, aktivt kul m.m. Endvidere kan den pressede fiberfraktion udnyttes til kvægfoder – i nogle tilfælde med højere foderværdi end det friske græs, formentlig fordi fiberen er ”fortyngt” i bioraffinaderiet /3/.

Bidrag til reduceret drivhusgasudledning

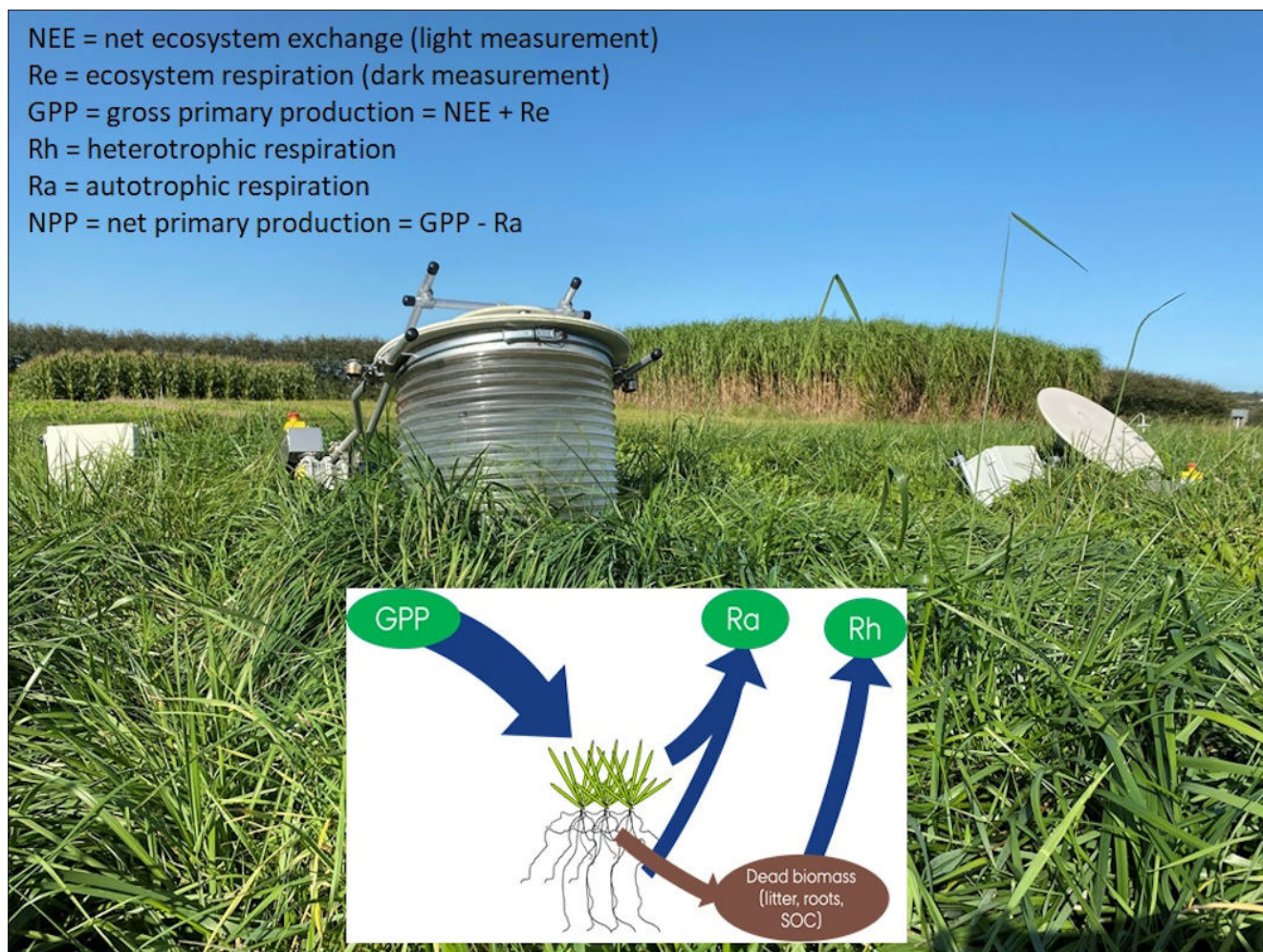
Planter optager CO₂ fra luften via fotosyntese. De fleste forædlede afgrøder har en meget effektiv fotosyntese og derfor høj biomasseproduktion, når de vokser optimalt. Imidlertid udnytter enårige afgrøder kun solens indstråling til fotosyntese i en relativt kort periode af året. Flerårige afgrøder er derimod grønne det meste af året og producerer derfor biomasse i en større del af vækstsæsonen. En stor andel af det kulstof, der fikses via fotosyntesen, afsættes særligt i flerårige afgrøder i underjordisk biomasse i form af rhizomer og rødder.

Det er vanskeligt præcist at kvantificere, hvor meget ekstra kulstof der bliver lagret under flerårige afgrøder sammenlignet med enårige afgrøder. Det skyldes at ændringerne i jordens kulstofindhold er små set i forhold til den store pulje af kulstof, der i forvejen findes i jorden. Derfor tager det typisk 5-10 år før ændringer i jordens kulstofindhold, som følge af ændret dyrkningssystem, kan registreres på baggrund af jordprøver. Dertil kommer, at jorden typisk bliver mere komprimeret, når der dyrkes flerårige afgrøder i sammenligning med systemer, der omfatter enårige afgrøder i et sædskifte. Direkte sammenligninger kræver

derfor udtagning af jordprøver med ækvivalent masse, hvilket er en stor udfordring /4/.

Derfor arbejdes også med direkte målinger af nettoudledning af CO₂ fra afgrøden og jorden ved hjælp af kamre, der dækker et mindre areal. Disse kamre lukker automatisk flere gange i løbet af døgnnet i en periode på nogle minutter (figur 1). Herved måles både nettofotosyntese og -respiration, og teoretisk set er det muligt at kvantificere, hvor meget biomasse der produceres under jorden og på længere sigt vil bidrage til kulstofopbygning i jorden. Målingerne bidrager også til at udvikle bedre matematiske modeller, der kan beskrive forskellige dyrkningssystemers biomasseproduktion og respiration på baggrund af meteorologiske data og målinger af fotosynteseaktiv overjordisk vegetation (bladareal).

I projektet GrassTools, der støttes af Innovationsfonden, forsøger vi at blive klogere på spillet mellem de mange faktorer, som påvirker den samlede reduktion i drivhusgasudledningen, og på hvordan græsmarker kan give størst muligt bidrag til reduktion i landbrugets udledninger af klimagasser. Med fokus på at udvikle og realisere ny viden, som kan optimere græsmarksproduktionen, undersøger vi bl.a. mulighederne for at vælge græs- og kløversorter med særligt stor kulstofafsætning i jorden, og for at iblande urter der, ud over bidrag til biodiversitet, måske kan styrke græsmarkens resiliens. Endelig ønsker vi at forbedre gødskningsvejledningen i græsmarker, således at udledning af lattergas samt tab af kvælstof ved denitrifikation og nitratudvaskning minimeres.



Figur 1. Kulstofbalancen for et økosystem består af delelementer, som skal måles særskilt, hvis alle processer skal forstås og kvantificeres. Her måles netto CO_2 udvekslingen fra jord og planter (NEE) med et transparent autokammer (fleksibelt rør), som indeslutter både afgrøde og et veldefineret jordareal i 3 min. Efterfølgende måles respirationen fra jord og planter under mørke forhold (R_e), hvor et ikke-lysgennemtrængeligt kammer omslutter det transparente kammer. Begge type målinger udføres automatisk 4 gange i døgnet for at beskrive døgnvariationen. I baggrunden ses majs og elefantgræs, som er to afgrøder med den særlige C4-fotosyntese, men den ene er enårig, den anden flerårig (Foto Poul Erik Lærke).

Er klimaeffekten ved lagring af kulstof i jorden permanent?

Det stigende kulstofindhold i jorden ved omlægning til flerårige afgrøder fortsætter i en årrække indtil en ny ligevægt indtræder. De første år er stigningen kraftig (specielt ved start fra en kulstoffattig jord), men senere aftager stigningen mod et nyt ligevægtsniveau. Ud over udgangsniveau for jordens kulstofindhold, har afgrødens produktivitet og klimaet formentlig størst indflydelse på raten og tidshorisonten for stigningen, hvortil kommer mindre effekter af forskellig management /5/. Det nye ligevægtsniveau kan indtræde efter 20-100 år, hvilket betyder at vi ved omlægning af sædskifter med enårig afgrøder til flerårige afgrøder kan forvente en reduktion i atmosfærens CO_2 -indhold i de kommende 20-50 år, hvor det netop er vigtigt at opnå hurtige klimaeffekter med billige teknologier. Herefter må vi antage, at nye teknologier til sikring af

negative emissioner bliver udviklet. Men det er vigtigt, at når et nyt ligevægtsniveau er nået, skal det fastholdes ved fortsat dyrkning af flerårige afgrøder. Etablering af en industri til grøn bioraffinering eller andre lokale industrielle udnyttelser af flerårige afgrøder vil kunne bidrage til at fastholde en forretning for landmanden ved kontinuert dyrkning.

Flerårige afgrøders bidrag til klimatilpasning

Det permanente dække af jorden med flerårige afgrøder samt et permanent rodsystem reducerer risikoen for jorderosion drastisk og dermed også risikoen for tab af fosfor ved jorderosion på skrånende arealer /2/. Fraværet af årlig pløjning og stigende indhold af organisk stof i jorden betyder, at der kan dannes og vedligeholdes flere makroporer i jorden under flerårige afgrøder, skov m.m., end under enårig afgrøder. Det betyder, at

jordens infiltrationskapacitet for vand forbedres, og en metaanalyse har fundet i gennemsnit 60% øget kapacitet ved introduktion af flerårige afgrøder /6/. Det kan bidrage til, at fremtidig mere heftig regn kan infiltreres i jorden og sikre grundvandsdannelse i stedet for at strømme af overfladen med risiko for jorderosion. Endelig er flerårige afgrøder oftest ganske tørketolerante, og græsser har vist øget genvækst efter en tørkeperiode /7/.

Muligheder med græs

Det er afgørende at analysere de mere overordnede effekter af en omlægning i dyrkningspraksis på nationale såvel som globale klimabalancer. Hvis nuværende fødevarerproducerende arealer med enårig afgrøder omlægges til flerårige brakmarker eller energiafgrøder, vil der ikke nødvendigvis kunne opnås en netto reduktion i drivhusgasudledningen. Det skyldes risikoen for indirekte arealændrin-



Figur 2 Flerårig byg *Hordeum bulbosum*, første vækstår. (A) Planten stammer fra et enkelt frø. Talrige lange stængler og buskning. (B) Blomstrende aks med støvdragere af *Hordeum bulbosum*, som er selv-inkompatibel og skal bestøves af en anden plante. Fotograf: Claus Krogh Madsen (AU).

ger, idet globale markedsforhold formentlig vil medføre, at andre arealer vil blive udnyttet til at producere de manglende fødevarer, og dette kan føre til skovrydningen eller ompløjning af vedvarende græsarealer, hvorfra store drivhusgasemissioner må forventes. Hvis derimod omlægningen kan sikre øget netto-kulstofbinding som følge af øget udnyttelse af dyrknings sæsonen til fotosyntese, samtidigt med at en del af produktionen udtrækkes i et bioraffinaderi til fødevarerproduktion, kan risikoen for indirekte arealændringer undgås eller reduceres, samtidigt med at andre produkter fra bioraffinaderiet kan bidrage til at fortrænge fossilt baserede produkter. Det er åbenlyst vanskeligt at gennemføre sådanne beregninger, og andre samfundsændringer,

såsom reduceret forbrug af animalske fødevarer eller krav om braklægning eller andre markante tiltag for at reducere nitratudvaskning til sårbare recipienter, kan ændre den referencesituation, man sammenligner med. I de nationale regnskaber for drivhusgasudledning indgår disse indirekte effekter da heller ikke, mens de ændrede dyrkningsformers effekt vil indgå direkte i det nationale regnskab.

Græs, kløver og lucerne er kendte græsmarksafrøder, som kan dyrkes med et større markedspotentiale via de grønne bioraffinaderier. Til foderanvendelse har det typisk været almindelig rajgræs, der har været dyrket. Men strandsvingel og krydsninger mellem de to arter (rajsvingel) kan være betydeligt mere produktive og på den måde sikre større årlig

kulstoffangst og produktion /3/. Kvæg har vanskeligere ved at fordøje strandsvingel end rajgræs, og derfor indgår den kun i begrænset omfang i de mest brugte græsblandinger til foder. Erfaringer fra AU's bioraffinaderi viser dog, at proteinekstraktion fra strandsvingel sker effektivt og giver et produkt med en højt proteinindhold (Morten Ambye-Jensen, pers. medd.), hvilket peger på behovet for ændret fokus på forædling til bioraffinering i forhold til forædling alene til kvægfoder.

Kløver og lucerne har ud over samme fordele som græsserne den egenskab, at de i symbiose med kvælstof-fikserende bakterier optager kvælstof fra luften og dermed ikke behøver tilførsel af kvælstofgødning. Da fremstilling af mineralisk kvælstofgødning har en betydelig energiomkostning er det også en klimafordel – i det mindste så længe fremstillingen sker på basis af fossil energi. Blandinger af græs og bælgplanter (kløvergræs) har en god bufferkapacitet for regulering af kvælstofbalancen i jorden over tid, og kan bidrage til at omsætte husdyrgødning (og evt. næringsstoffer fra spildevand) effektivt, uden at det fører til væsentlige overskud af kvælstof med risiko for dannelse af lattergas.

Andre flerårige afgrøder

Træagtige afgrøder har nogle af de samme klima- og miljømæssige fordele som græsser, selvom kulstofflagringen ser ud til at være lidt lavere under fx energipil og skov end under græs /2/. I skov sker også lagring af kulstof i den vedmasse, som opbygges i stammerne, og det vurderes at skovrejsning på landbrugsjord kan lagre mellem 4 og 21 ton CO₂/ha/år under danske forhold /2/. Her må igen diskuteres effekter af indirekte arealændringer, hvis landbrugsjord udtages til skovdyrkning.

Der er mange andre typer af flerårige afgrøder, som kan bidrage til at øge kulstofbindingen per arealenhed og samtidig øge robustheden over for ændrede klimaforhold.

Potentialet for at udnytte afgrøderne i grønne bioraffinaderier kan skabe et marked for helt nye afgrøder. Fx er brændenælder kendt for at have et højt proteinindhold og kan dyrkes som en afgrøde med forholdsvis store udbytter /8/, selvom der kun har været foretaget meget begrænset selektion fra naturlige populationer. Elefantgræs (*miscanthus*) er kraftigt voksende, da den har C₄-fotosyntese, som under lunere forhold er mere effektiv end den C₃-fotosyntese, som de fleste afgrøder i Danmark benytter. Der dyrkes i dag kun ca. 90 ha med elefantgræs primært til tækkemateriale (www.miscanthus.dk), da vi ikke i Danmark er selvforsynende med tagrør.

Endelig kan man spørge sig selv, hvorfor vi

ikke har udviklet flerårige kornafgrøder, som formentligt kunne bidrage med nogle af de samme miljø- og klimafordele, som de andre flerårige afgrøder? Flerårig rug (stauderug) har været kendt længe, men har ry for et noget mindre kerneudbytte, mens halmudbyttet er højt. Svaret er nok primært, at værdien af kulstoflagring og af reduceret nitratudvaskning ikke har indgået i prioriteringen af udvikling af nye afgrøder. Vi har dog ved AU påbegyndt forskning i flerårig byg og deres forædlingspotentiale /9/. Der findes en lang række flerårige arter, og for en del af dem er der dokumenteret genvækst og aksdannelse i op til fire år /10/. *Hordeum bulbosum* er den mest kendte flerårige byg, og det er er også den, der ligger tættest på vores dyrkede enårige byg, *Hordeum vulgare*.

Der er ikke foregået nogen egentlig forædling af flerårige bygsorter, men de vilde genotyper er en vigtig genetisk ressource for udviklingen af en flerårig bygafgrøde, herunder også en byg som kan overleve udfordrende klimabetingelser. Udviklingen af flerårig byg igennem traditionelle teknikker som hybridisering og domesticering er yderst tidskrævende og ikke tillokkende for planteforædleren. De seneste års udvikling af en række nye planteforædlingsteknikker som f. eks CRISPR/Cas har dog sat udviklingen af flerårig byg i et nyt perspektiv /9/. Vigtige egenskaber som fx reduceret strållængde, aksstruktur, kernestørrelse og resistens kan introduceres igennem få generationer.

Herefter vil det være vigtigt at teste effekten af dyrkningen af flerårige kornafgrøder på markens drivhusgasbalance i sammenligning med enårige kornafgrøder for at vurdere, om forbedringen er lige så signifikant som ved et skifte til flerårigt græs eller kløvergræs.

Referencer

- /1/ Harbo L.S., Elsgaard L. og Olesen J.E. 2021: Ændringer i dansk landbrugsjords kulstofindhold. *Vand & Jord* 28, 155-158.
- /2/ Eriksen J., Thomsen I.K., Hoffmann C.C., Hasler B., Jacobsen B.H., Baattrup-Pedersen A., Strandberg B., Christensen B.T., Boelt B., Iversen B.V., Kronvang B., Børgesen C.D., Abolos Rodriguez D., Zak D.H., Hansen E.M., Blicher-Mathiesen G., Rubæk G.H., Ørum J.E., Rasmussen J., Audet J., Olesen J.E., Elsgaard L., Munkholm L.J., Jørgensen L.N., Martinsen L., Bruus M., Carstensen M.V., Pedersen M.F., Nørremark M., Hutchings N., Gundersen P., Kudsk P., Sørensen P., Lærke P.E., Gislum R., van't Veen S.G.M., Larsen S.E., Petersen S.O., Riis T., Jørgensen U. 2020: Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus: Aarhus Universitet - DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. 454 s. (DCA rapport; Nr. 174).
- /3/ Jørgensen U., Kristensen T., Jørgensen J.R., Kongsted A.G., De Notaris C., Nielsen C., Mortensen E.Ø., Ambye-Jensen M., Jensen S.K., Stødkilde-Jørgensen L., Dalsgaard T.K., Møller A.H., Sørensen C.G., Asp T., Olsen F.L., Gylling M. 2021: Green biorefining of grassland biomass. DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. 111 s. (DCA rapport; Nr. 193).
- /4/ Chen, J., Lærke, P. E., & Jørgensen, U. 2022: Land conversion from annual to perennial crops: A win-win strategy for biomass yield and soil organic carbon and total nitrogen sequestration. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 330, [107907]. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107907>.
- /5/ Taghizadeh-Toosi, A., Olesen, J. E., Kristensen, K., Elsgaard, L., Østergaard, H. S., Lægdsmand, M., Greve, M. H., & Christensen, B. T. 2014: Changes in carbon stocks of Danish agricultural mineral soils between 1986 and 2009. *European Journal of Soil Science*, 65(5), 730-740. <https://doi.org/10.1111/ejss.12169>.
- /6/ Basche A.D., DeLonge M.S. 2019: Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PLoS ONE* 14(9): e0215702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>
- /7/ Sørensen, K. K., Lærke, P. E., Sørensen, H. B., Andersen, M. N., Kristensen, K., Münnich, C., Didion, T., Jensen, E. S., Mårtensson, L.-M., & Jørgensen, U. 2018: Biomass production and water use efficiency in perennial grasses during and after drought stress. *GCB Bioenergy*, 10, 12-27. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12464>
- /8/ Radman S., Zutic I., Coga L., Fabek S., Benko B., Toth N. 2016: Yield and Mineral Content of Stinging Nettle as Affected by Nitrogen Fertilization. *Journal of Agricultural Science and Technology* 18:1117-1128.
- /9/ Hanak, T., Madsen, C. K., & Brinch-Pedersen, H. 2022: Genome Editing-accelerated Re-Domestication (GEaReD) – a new major direction in plant breeding. *Biotechnology Journal*, e2100545. <https://doi.org/10.1002/biot.202100545>
- /10/ Westerbergh A., Lerceteanu-Köhler E., Sameri M., Bedada G., Lundquist P.-O. 2018: Towards the Development of Perennial Barley for Cold Temperate Climates – Evaluation of Wild Barley Relatives as Genetic Resources. *Sustainability* 2018, 10, 1969; <https://doi.org/10.3390/su10061969>.

Professor UFFE JØRGENSEN (uffe.jorgensen@agro.au.dk), Seniorforsker POUL ERIK LÆRKE (poule.laerke@agro.au.dk) & Professor HENRIK BRINCH-PEDERSEN (hbp@agro.au.dk) arbejder ved Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet.

1-årig Akademisk Overbygningsuddannelse i Klimatilpasning

Med uddannelsen kan du bidrage til at løse udfordringer skabt af klimaforandringer



På uddannelsen har du kurser om klimaforandringernes effekt på byerne, naturen og det åbne land, projektledelse, klimatilpasningsmetoder, miljølovgivning, bæredygtig vækst og projektværktøjer.

Du kan søge ind med en naturvidenskabelig, samfundsvidenskabelig eller teknisk bacheloruddannelse.
Studiestart: september 2022

**Læs mere om uddannelsen,
adgangskrav og jobmuligheder på
sdu.dk/nat/klimatilpasning**

ATV JORD OG GRUNDVAND

Vandområdeplaners kvantitative vurdering og målsætning

Tid: Onsdag den 21. september 2022, kl. 16.00 – 18.00

Sted: GEUS, Øster Voldgade 10, 1350 København K (online deltagelse mulig)

Vandrammedirektivet fastsætter fælles mål om kvaliteten af søer, vandløb, grundvand og kystnære hav-områder. Vandrammedirektivets mål er, at vand i Europa skal opnå god tilstand. Dette mål skulle være opfyldt i 2015, dog med mulighed for udsættelse til 2027. Tilstandsvurderinger for grundvandets kvantitet og kvalitet indgår i basisanalysen for vandområdeplanerne (2021-2027), som er et krav i EU's vand-rammedirektiv.

Der er nu udarbejdet tilstandsvurderinger for grundvandets kvantitative tilstand. Tilstandsvurderingerne er udarbejdet med ny viden fra faglige projekter og overvågningen. Resultaterne viser bl.a., at 38 % af forekomster er vurderet til at have en ukendt kvantitativ tilstand. For de forekomster, som har en ukendt tilstand, er det nødvendigt at vurdere om den nuværende og fremtidig indvinding vil påvirke tilstanden i en sådan grad, at god kvantitativ tilstand ikke kan opnås inden 2027. Det kan give udfordringer for kommuner, vandforsyninger, landbrug og industri, når nye indvindinger skal placeres og påvirkninger vurderes.

Til dette gå-hjem møde præsenteres resultater fra den kvantitative vurdering samt målsætning og krav i vandområdeplaner. Der bliver præsenteret, hvilke udfordringer kommuner har for at opnå en god kvantitativ tilstand for grundvandet. Til sidst vil der være en åben diskussion om, hvordan kommuner, vandforsyninger og andre forbrugere kan håndtere krav i vandområdeplaner.

Mødet er et "gå-hjem-møde", og deltagelse er uden beregning, men du bedes venligst tilmelde dig med en kort e-mail til atvlv@env.dtu.dk senest mandag den 19. september. Der vil være mulighed for at følge mødet online via et Teams-link, så man kan se/lytte til indlæggene og stille spørgsmål eller deltage i diskussionerne. Angiv venligst i din tilmelding, om du deltager fysisk, eller om du gerne vil følge mødet online.

Fra udviklingsprojekt til praktisk anvendelse - Erfaringer, udfordringer og nye resultater

Tid: Onsdag den 12. oktober 2022, kl. 10.00 – 16.00

Sted: DGI Byen/CPH Conference, Tietgensgade 65, København (online deltagelse mulig)

Forskning og udvikling er vigtige forudsætninger for at finde bedre løsninger til at undersøge og oprense forurenede jord og grundvand og for at kunne tackle nye udfordringer, som jævnligt opstår – f.eks. med nye problemstoffer. Den generelle

teknologiudvikling kaster også helt nye muligheder af sig – bl.a. for real-time overvågning og -dataudstilling på vand- og miljøområdet.

Men hvor meget kan vi selv styre udviklingen, hvor meget dikteres af udefrakommende rammebetingelser, og hvad skal der til, for at lovende forsknings- og udviklingsresultater kan omsættes til praktiske løsninger, som anvendes bredt i branchen?

Disse spørgsmål vil blive belyst fra forskellige vinkler på dette møde samtidig med, at resultaterne fra nogle igangværende og nyligt afsluttede spændende projekter vil blive præsenteret. Dagen vil byde på oplæg fra en række eksperter fra vand- og jordforureningsområdet, som alle har stor erfaring med at drive forsknings- og udviklingsresultater frem mod praktisk anvendelse – og som ved noget om, hvad der virker og ikke virker i den sammenhæng.

På mødet vil vi i fællesskab også diskutere og synliggøre, hvilke udfordringer vi står overfor – og hvordan vi bedst griber dem an. Mødet er for alle, som interesserer sig for udvikling og praktisk anvendelse af nye teknikker og løsninger inden for vand- og miljøområdet.

Læs mere og tilmeld dig på hjemmesiden www.atv-jord-grundvand.dk.

Injektionsbaseret afværge til oprensning af forureningsfaner - State of the art

Tid: Onsdag den 3. november 2022, kl. 10.00 – 16.00

Sted: DGI Byen/CPH Conference, Tietgensgade 65, København (online deltagelse mulig)

I de seneste år er der kommet øget fokus på håndtering af forureningsfaner, som udgør en længerevarende risiko for grundvandsressourcen på trods af, at kilden er håndteret, eller fordi det ikke er muligt at håndtere kilden. I nogle indvindingsoplunde findes desuden flere tætliggende forureningskilder, der giver anledning til en større grundvandsforurening, som måske mest effektivt oprenses samlet i grundvandsmagasinet. Typisk foretages oprensning vha. pump and treat, men dette er ikke altid den mest kosteffektive metode. Derfor er det nødvendigt at have flere metoder i værktøjskassen. Teknologier baseret på injektion af reaktanter er i de seneste år kommet i spil. På mødet vil vi samle op på erfaringer fra danske og udenlandske projekter med fokus på injektions- og dokumentationsmetoder til fordeling af reaktanter i grundvandsmagasiner.

Læs mere og tilmeld dig hjemmesiden www.atv-jord-grundvand.dk.

Fondens formål:

ATV Fonden for Jord og Grundvand er en almennyttig, erhvervsdrivende og non-profit fond, der arbejder aktivt for at fremme formidling og udveksling af viden om fagområdet jord- og grundvandsforurening. Der arbejdes med at stimulere og initiere undervisning, forskning, udvikling samt styrke den faglige debat. Konkret udmøntes Fondens arbejde i, at der årligt afholdes i størrelsesordenen 10 konferencer, møder, kurser og ekskursioner.

Bestyrelsen samt arbejdsgrupper under denne arbejder frivilligt med at opfylde Fondens formål. Fondens sekretariat varetager den løbende kontakt til Fondens brugere og bidragydere.

For generel information om aktiviteterne i ATV Jord og Grundvand og tilmelding til møderne – se www.atv-jord-grundvand.dk

Landskaber med fokus på klimaneutralitet og bæredygtighed

Landbrugslandskabet rummer store potentialer for bidrag til klimaneutralitet og en bæredygtig udvikling, hvor der i højere grad tages hensyn til samspil mellem de enkelte landskabselementers funktion og udnyttelsen af naturressourcen, med en væsentlig lavere drivhusgasudledning til følge. Vi giver eksempler på hvordan forskellige bæredygtighedsdimensioner indgår på landskabsniveau.

TOMMY DALGAARD, SIGNE NORMAND,
BERIT HASLER, PER AMBUS &
KLAUS BUTTERBACH-BAHL

Landskaberne i Danmark

De danske landskaber rummer en meget stor variation, og mange forskellige muligheder for at bidrage til klima- og bæredygtighedsmål. Det er et levested for både mennesker og natur, men også et sted for produktion af fødevarer, energi og materialer for det menneskelige samfund, og danner ikke mindst grundlag for den infrastruktur, der transporterer mennesker og varer. Landskabet er også et filter, der sørger for vi kan pumpe rent drikkevand op fra grundvandsmagasinerne, og at vand, der strømmer videre til havet via bække, søer og åer bidrager til et rent vandmiljø. Landskabet er samtidig vigtigt som et sted for produktion af fødevarer, og i stigende grad også andre biobaserede produkter. Traditionelt set høstes disse som træ og fibre fra skovene, eller læder, dun og fjer fra husdyrene, men i dag findes et væld af andre muligheder, såsom udvinding af voks fra halmen, biodiesel og andre biobaserede brændstoffer, og biogas fra husdyrgødning og planterester.

Forskningen har undersøgt, hvordan udnyttelsen af de enkelte elementer i landskabet kan forbedres, sådan at funktionerne i landskabet bedre kan udnyttes til at sikre rent vand og luft samtidig med at landbrugsproduktionen kan udvikles. Men særligt de senere år er der kommet helt nye muligheder for kombination af viden, ikke blot med de nævnte nye teknologier til at udnytte den bio-

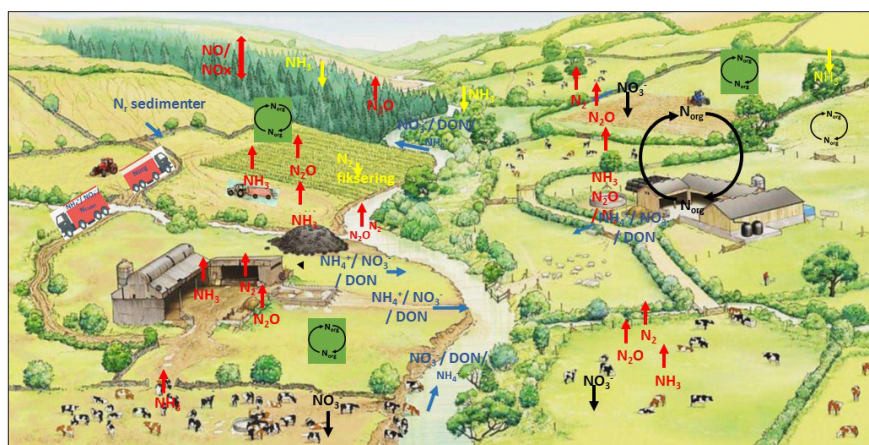
baserede produktion, men også nye digitale værktøjer til at måle på- og forstå de komplicerede mekanismer og sammenhænge i hele landskaber, og bidrage ikke alene til natur, miljø og produktionsmål, men også til klimaneutralitet og bæredygtighed bredt set.

Her kigger vi nærmere på forskningen omkring nye forskningsinitiativer på området, Sustainscapes og Land-CRAFT centrene, samt den lidt ældre forskningsalliance dNmark (Boks 1). Fokus er her særligt på landbrugslandskabet, men også med tråde til skovene, til byerne og til vores forbrugsmønsters påvirkning af klimaet og arealanvendelsen.

Stofstrømme med Sinks og Sources i landskabet

Figur 1 viser et eksempel på stofstrømme i forhold til kvælstof (N), og de sinks (til at

fange eller opsamle N) og sources (dvs. kilder til N) som findes i landbrugslandskabet. Kvælstofomsætningen er helt central for at forstå landbruget og det landskab det indgår i, og dermed mulighederne for at bidrage til klimaneutralitet, sådan som det diskuteres nærmere i denne artikel. Kvælstof indgår i alle proteiner og essentielle aminosyrer, og er helt afgørende for landbrugsproduktionen gennem ernæring af planter og dyr. Kvælstof indgår i kemiske forbindelser såsom nitrat (NO_3^-) der, foruden af være et plantenæringsstof, forurener vandmiljøet; eller ammoniak, (NH_3) der spredes gennem luften og bl.a. påvirker helbredet med luftvejslidelser såsom astma, og kvaliteten af sårbare naturområder, der ikke kan tåle næringsstofpåvirkningen fra den atmosfæriske afsætning af ammoniak. Kredsløbet omfatter desuden organiske



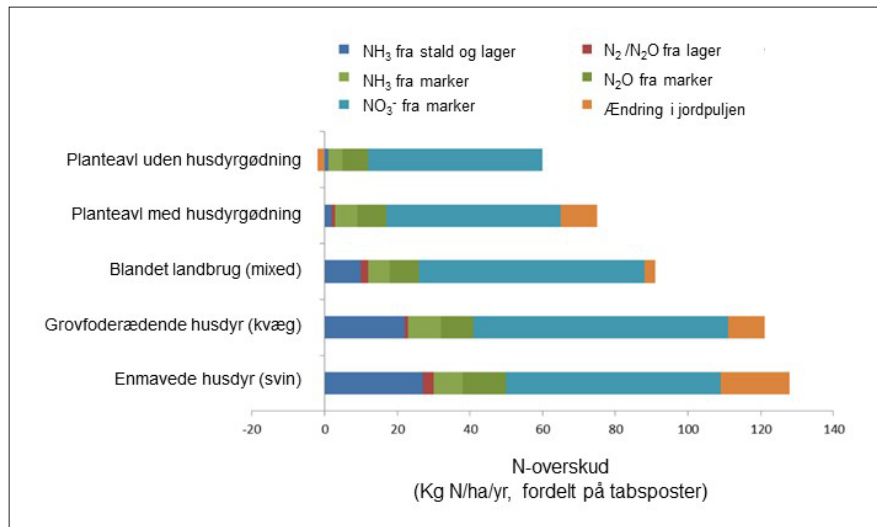
Figur 1: De mange kvælstofstrømme i landbrugslandskabet, og de forskellige kilder til tab/forurening (sources, markeret med opadgående pile) eller elementer til at opsamle de forskellige kvælstof-forbindelser (sinks, markeret med nedadgående pile), som kan være til gavn for produktion (fx i kvælstoffikserende afgrøder), belaster miljøet (som ved afsætning af ammoniak i naturområder) eller påvirker drivhusgasbalancen /1, 2/.

forbindelser (N_{org} og DON) og udvekslingen af fødevarer, foder, gødning og andre kvælstofholdige materialer, der transporteres ind og ud af jordbrugslandskabet (figur 1). Men ikke mindst påvirker kvælstofomsætningen udledningen af lattergas (N_2O), som er en kraftig drivhusgas. Lattergas udledes både ved direkte N_2O emissioner i landskabet (figur 1), og udledes desuden indirekte via drivhusgasemissioner fra de led af omsætningen, der foregår uden for landskabet. Ydermere spiller kvælstofomsætningen sammen med udslip af andre væsentlige drivhusgasser såsom metan og kuldioxid, og kuldioxid kan bindes eller frigives i forbindelse med at kulstof kan lagres eller nedbrydes i jorden, og derved påvirkes de samlede muligheder for at opnå klimaneutralitet for et givet landskab.

Kaskade- og kædebetraktninger

En vigtig pointe i forhold til opgørelsen af virkemidler til at opnå klimaneutralitet er, at udledninger i én del af landskabet kan påvirke en hel kæde af udledninger, og at udledninger i én del af landskabet kan have betydeligt større miljø- og biodiversitetseffekter end i andre dele af landskabet (fx hvis der i denne del findes større områder med sårbar natur). Det er således ikke lige meget, hvor i landskabet et tab af ammoniak finder sted, og dermed er det ikke lige meget, hvordan væsentlige kilder til udledning af ammoniak fra fx husdyrbrug placeres, eller hvor, hvornår og hvordan husdyrgødningen spredes på markerne. Og der er bestemt forskel på, hvordan forskellige virkemidler og aktiviteter i landskabet påvirker udledningen af de forskellige kvælstofforbindelser (tabel 1). Tiltag som reducerer ammoniakfordampningen forventes samtidig at reducere lattergasudledningen (det kunne fx være Målrettet placering af tekniske løsninger til at opsamling ammoniakken fra staldanlæg, så den kan udsprede på marker og erstatte anden gødning der), og kan dermed bidrage til en udvikling mod klimaneutralitet, mens andre tiltag (i tabel 1 fx Beplantning omkring store punktkilder) kan have den modsatte effekt.

Der er meget stor forskelle på udledninger af kvælstof og drivhusgasser fra forskellige typer af landbrugsbedrifter, hvor der generelt er en høj udledning fra bedrifter med husdyr, men en lavere udledning fra rene plantebedrifter (figur 2). Samtidig er der en stor forskel på, hvilke typer af udledninger de forskellige produktionstyper giver anledning til, og undersøgelser ^{4/} viser som et eksempel, at en bedre fordeling af husdyrgødningen mellem de forskellige typer af bedrifter kan give en bedre udnyttelse af kvælstoffet, og dermed



Figur 2: Fordeling af udledninger fra forskellige bedriftstyper i et dansk landbrugslandskab ved Bjerringbro, hvor de største overskud, og dermed de største udledninger af kvælstofforbindelser og tilhørende drivhusgaspåvirkning, relateres til bedrifter med det største husdyrhold og udspredding af husdyrgødning per arealenhed ^{4/}.

Boks 1: Eksempler på væsentlige forskningsinitiativer omkring bæredygtig landskabsudvikling.



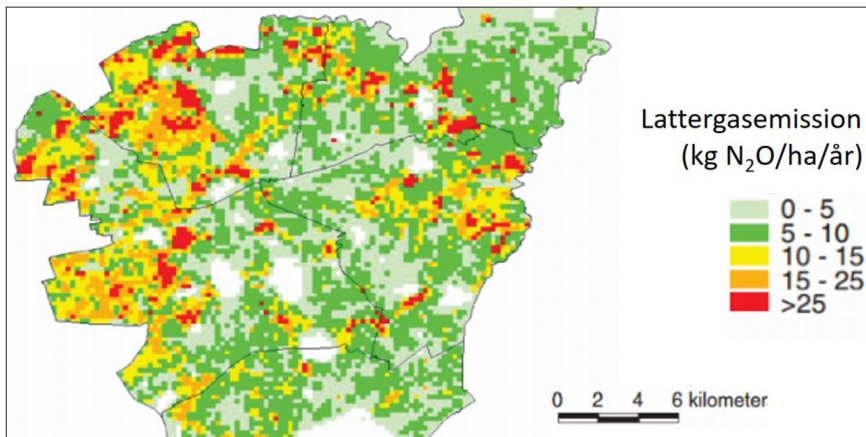
Pionercenter, som over de kommende mere end 10 år iværksætter omfattende forskning i 1) En fundamental forståelse og måling af samspil mellem drivhusgas- og næringsstofstrømme i foranderlige landskaber, med sunde økosystemer baseret på en agro-økologisk tilgang. 2) Virkemidler i landskabet, som bidrager til robuste klimatilpassede og bæredygtige jordbrugssystemer med en optimal produktion i samspil med ambitiøse mål for reduceret tab af næringsstoffer og drivhusgasser (klimaneutralitet på landskabsskala), samt beskyttelse af biodiversiteten. 3) Værktøjer til at fremme effektive metoder til at monitorere, verificere og rapportere emissioner på landskabsskala med hensyntagen til såvel de sociale, økonomiske og miljømæssige betingelser i kulturlandskabet, herunder potentialerne for øget produktivitet, klimaneutralitet og bæredygtighed i bred forstand.



Center for Bæredygtige Landskaber i en Foranderlig Verden har til formål at gentænke landskaber og genskabe biodiversitet i en verden med øgede klimaforandringer og ressourcebehov. Forskningen tager udgangspunkt i et historisk perspektiv på landskabet, og en prioritering af flere, samtidige bæredygtighedsmål (såsom FN's verdensmål omkring klimaindsatser, liv på land, ansvarlig forbrug og produktion samt bæredygtige byer og lokalsamfund. Der indsamles store mængder data og tidsserier, f.eks. via satellit og dronofotos samt jord og DNA-prøver, i kombination med kortdigitalisering, spørgeskemaundersøgelser og historiske statistik.



Tværfaglig national alliance mellem forskere, videnskabsmyndigheder og offentlige myndigheder, til udforskning af nye veje og ideer omkring kvælstofanvendelse, med bæredygtige løsninger på udfordringerne, der både skal forbedre ressourceeffektivitet og folkesundhed samt sikre en mindre miljø- og klimabelastning. Forskningen er foregået omkring en række pilotområde landskaber, idet netværket og dataindsamling siden den officielle projektafslutning, foruden i ovenstående centre, er videreført ifm. en lang række nationale og internationale forskningsprojekter og myndighedsopgaver ^{1/}, ^{2/}.



Figur 3: Fordeling af lattergas-emissioner i et hollandsk landbrugslandskab, hvor særligt intensive områder for udledninger er vist med rødt /5/.

en lavere samlet udledning.

Tilsvarende kan der være meget stor variation mellem udledningerne, og dermed potentialet for at reducere kvælstof og drivhusgasudledningerne, herunder gennem binding i jorden, i de forskellige dele af landskabet. Figur 3 viser således variationen i den estimerede lattergasudledning for et enkelt år i et hollandsk landskab med intensivt landbrug og husdyrproduktion /5/. Som det ses, er der nogle meget betydelige hot spots (dvs. områder med særlig stor udledning), og tiltag til målrettet at adressere disse, kan have en meget stor effekt. Det er nemlig sådan, at udledningerne hænger tæt sammen med naturgrundlaget, dvs. foruden f.eks. temperatur og timing af godskning osv., vil vådere områder og områder med højt indhold af organisk stof i jorden kunne give anledning til relativt større tab, og en smart håndtering til disse forhold vil kunne have en stor effekt (eksemplificeret med tiltag som Digital arealanvendelses-plan-

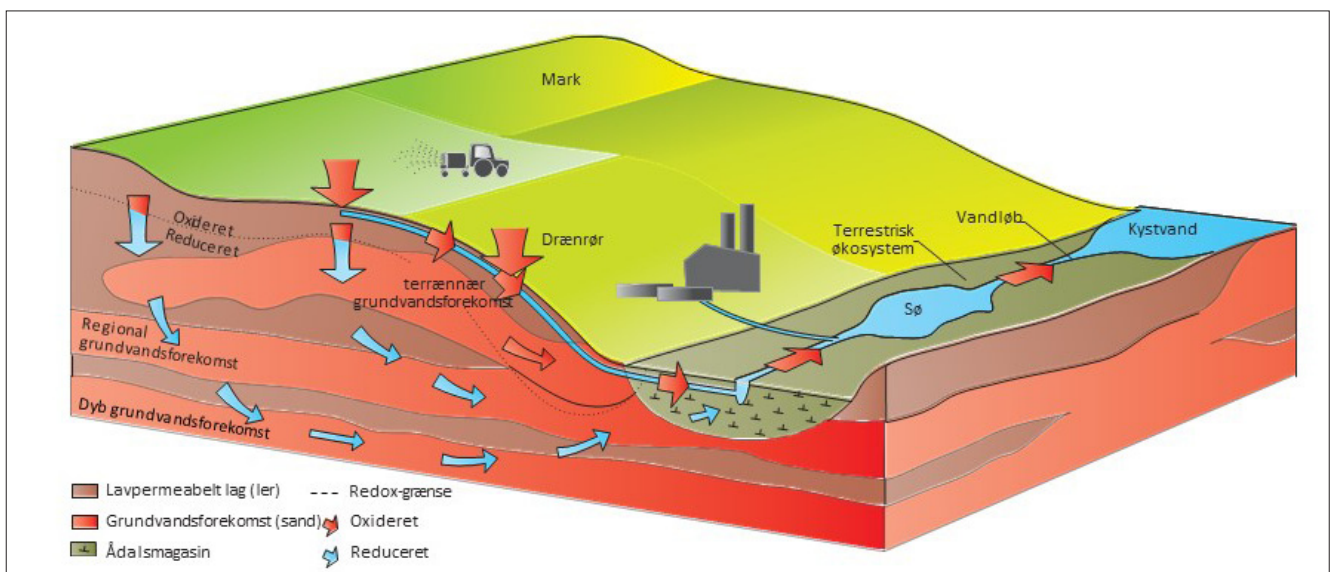
lægning og Målrettet placering af tekniske løsninger i landskabet i tabel 1). Samtidig er der mulighed for synergi med andre funktioner i landskabet, hvis disse områder fx har et særligt potentiale for øget naturværdi. For at kunne håndtere dette i praksis er der behov for kortlægning af disse funktioner på landskabsniveau (Boks 1).

Klimaneutralitet og landskabsscenerier for en bæredygtig udvikling i fremtiden

Der er et stort potentiale for bedre at udnytte mulighederne for på landskabsniveau at prioritere nye klimatiltag, samtidig med at den eksisterende driftsledelse tilpasses mhp. generelt lavere udledninger af drivhusgasser såvel som af kvælstof og andre næringsstoffer til miljøet, på vejen mod klimaneutralitet og andre bæredygtigheds mål.

Eksemplet i figur 2 viser, foruden at der er stor forskel mellem bedriftstyper, at der kan

været et betydeligt potentiale for at opbygge jordpuljen, både som vist med kvælstof, men samtidig også med kulstof og derved ved fangst af drivhusgassen kuldioxid, og derved at reducere den del af kvælstoffet, der ellers ville være tabt til miljøet. Det samme potentiale som der ses for kvælstof, gælder således også for opbygning af kulstof, idet kulstof (C) fanget i jorden direkte nedsætter den mængde kuldioxid (CO₂), der ellers ville være undsluppet som en drivhusgas til atmosfæren, og i disse år går det stærkt med nye teknologier til at fremme denne udvikling. Dette gælder fx gennem indbygning af kulstof fra halm og/eller fra bioforgasset gylle i biokul (gennem pyrolyse, dvs. kemisk spaltning ved stærk opvarmning), eller gennem noget så simpelt som dyrkning af efterafgrøder eller halmnedmulning. I øvrigt er det en større diskussion, hvad den reelle betydning af at opbygge puljerne i jorden er, ikke mindst fordi det er noget, der foregår over mange år, og effekten ikke er den samme på kort som på lang sigt. Ligeledes kan man diskutere hensigtsmæssigheden af at omdanne kvælstof i jordbrugslandskabet til frit, ikke reaktivt kvælstof (dvs. kategorien N₂ i tabel 1, svarende til den form kvælstof har, i de 78% af indholdet i den luft vi indånder) fra de såkaldte reaktive former for kvælstof (dvs. de øvrige former i tabel 1). Måske ville det være bedre at recirkulere næringsstofferne? Men det store spørgsmål er selvfølgelig så, hvor meget der kan recirkuleres hhv. i marken, inden for bedriften, i landskabet eller i hele samfundet? Og hvad der overordnet set er bedst for klimaet og miljøet, og med hvilke økonomiske gevinster eller omkostninger? I hvert fald kræver det meget energi at få kvæl-



Figur 4: Illustration af transporten af vand og dermed opløst kvælstof til vandmiljøet fra et typisk dansk landbrugslandskab med dyrkede marker, dræn og tekniske anlæg. Som det ses, er der stor forskel på, hvor stor en andel af vandet fra de forskellige marker, der løber gennem den reducerede zone (røde til blå pile), hvorved reaktive kvælstofforbindelser, såsom nitrat, omsættes, så de ikke forurener vandmiljøet. Ifølge /6/ redigeret efter /1/.

Tabel 1: Eksempler på kvælstof-virkemidler til prioritering på landskabsniveau, med indikeret miljøeffekt fordelt på forskellige typer af tab fra jordbrugssystemet og de tilhørende landskabsselementer. For hver type af tab (ammoniak NH_3 , lattergas N_2O osv.) er indikeret, om der forventes et øget (↑) eller et reduceret (↓) udslip, om effekten afhænger meget af forholdene (?), eller om der vurderes begrænsede effekter af virkemidlet (~) ifølge /1/, der har en mere detaljeret gennemgang af tiltagene.

| | NH_3 | N_2O | NO | NO_3^- | N_2 | Total |
|----------------------------------------------------------------------|--------|--------|-------|----------|-------|-------|
| Flerårige afgrøder | ~ | ↑↓ | ? | ↓↓ | ↑↓ | ↓ |
| Efterafgrøder/fangafgrøder | ~ | ↑↓ | ↑↓ | ↓ | ~? | ↓ |
| N_2 -fixerende afgrøder (i parentes inkl. jordpuljæendring) | ~ ↓ | ↓(↑) | ↓(↑)? | ↓(↑) | ~? | ↓(?) |
| Skovlandbrug | ↓ | ~↑ | ~ ↑ | ↑↓ | ~3 | ↓ |
| Vådområder | ~? | ↑? | ~? | ↓↓? | ↑? | ↓? |
| Paludikultur i vådområder | ~? | ↑ | ↓? | ↓? | ↓? | ↓? |
| Organiske lag til øget denitrifikation | ~ | ↑ | ↑ | ↑↑ | ↑↑ | ↑ |
| Dræning (* modsat ved blokerede dræner) | ~ | ↓* | ↓ | ↑* | ↓ | ~? |
| Marine virkemidler | ~ | ~ | ~ | ↓ | ↑ | ↓? |
| Skovrejsning og læhegn | ↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↓↓ | ↑ | ↓↓ |
| Braklægning/ ugødet græs | ~ | ~ ↓ | ~ ↓ | ↓↓ | ↓ | ↓↓ |
| Beplantning omkring store punktkilder | ↓ | ↑ | ↑ | ↑↓ | ~? | ↑↓? |
| Miljø-smart placering af husdyrfaciliteter og udendørs hold | ↓ | ~ | ~ | ↓ | ~ | ↓ |
| Digital arealanvendelses-planlægning | ↓ | ↓ | ↓ | ↓↓ | ↓ | ↓↓ |
| Blandet plante- og husdyrbrug med cirkulære systemer (Mixed farming) | ↓↓ | ↓↓ | ↓↓? | ↓↓ | ↓↓? | ↓↓ |
| Måltrettet placering af tekniske løsninger i landskabet | ↓↓ | ↓↓ | ↓? | ↓↓ | ↓? | ↓ |

stoffet tilbage på en reaktiv form, som planterne vil kunne udnytte som gødning (fx nitrat), og man bør spørge sig, hvad den overordnede drivhusgasbalance og ressourceøkonomi er ved de forskellige former for løsninger? Et område, hvor forskningen viser, der kan være et stort potentiale for nye løsninger, er en bedre udnyttelse af de arealanvendelses- og ressourceinputmæssige prioriteringer på landskabsniveau.

I Danmark kan der mange steder drages nytte af, at kvælstof der udvaskes, naturligt reduceres når det passerer den såkaldte reducere zone i grundvandet under landbrugslandskaberne (figur 4 /6/). Særligt i landskaber hvor der er et stort potentiale for dette, og variationen mellem marker er stor, kan dette bruges til effektivt at afbøde de hot spots til kvælstofforurening, der er fra intensiv landbrugsproduktion /1/. I disse år satses der hårdt på at udnytte disse muligheder optimalt, som en kost-effektiv måde til at nå de betydelige mål, der er sat for en reduceret udledning til det sårbare vandmiljø /3/, men der er ikke nogen automatisk sammenhæng mellem kvælstofeffekt og reduceret klimabelastning, måske endda tvært imod? Men en forbedret

ressourceudnyttelse er dog generelt godt for begge dele, især hvis de indirekte effekter på produktion andre steder i verden medtages. Her er værktøjer til håndtering af hele landskaber centrale, og nye måder til at håndtere kvælstofudvaskningen, samtidig med at udfordringerne omkring klimaneutralitet og generelle bæredygtighedsspørgsmål, er under stadig udvikling. Det er bestemt muligt at komme langt med landskabsskala tiltag, og disse kan med fordel benyttes til at designe fremtidens klimaneutral landskaber. Men der vil helt sikkert blive behov for forskellige løsninger til at nå dette mål i forskellige landskaber, og for forskellige produktionsformer. Spørgsmålet er ikke blot, hvordan vandmiljøhensyn kan kombineres med klimahensyn, men også hvilke socioøkonomiske omkostninger og/eller fordele de forskellige løsninger indebærer, og hvordan de på landskabsniveau kan spille sammen med målene om en øget biodiversitet? Alt sammen noget der arbejdes videre med ifm. de nævnte centerinitiativer (boks 1). Og det spændende bliver hvordan alt dette kan udvikles sig i praksis, i virkelighedens landskaber, og i et foranderligt klima og en foranderlig virkelighed.

Referencer

1. UN-ECE (2021) Guidance document on integrated sustainable nitrogen management. Agriculture, Food and Environment (Section VI: Land-use and landscape management, Dalgaard T and Butterbach-Bahl K, eds. P. 152-185). Economic Commission for Europe Executive Body for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. ECE/EB.AIR/149. 198 p. https://unece.org/sites/default/files/2021-04/Advance%20version_ECE_EB.AIR_149.pdf. United Nations, Economic and Social Council.
2. Se fx www.mapfield.dk, www.fairway-project.eu, www.mixed-project.eu, www.inms.international eller <http://www.clrtap-tfrn.org/>
3. Westcountry Rivers Trust (2022) Illustration fra <http://www.westcountryrivers.co.uk> er modificeret på basis af Creative Common License <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.
4. Dalgaard, T, Hutchings N, Dragosits U, Olesen JE, Kjeldsen C, Drouet JL and Cellier P (2011) Effects of farm heterogeneity and methods for upscaling on modelled nitrogen losses in agricultural landscapes. *Environmental Pollution* 159 (2011) 3183-3192.
5. Cellier P, Durand P, Hutchings N, Dragosits U, Theobald M, Drouet JL, Oenema O, Bleeker A, Breuer L, Dalgaard T, Duret S, Kros H, Loubet B, Olesen JE, Mérot P, Viaud V, de Vries W and Sutton MA (2011) Nitrogen flows and fate in rural landscapes. In: Sutton MA, Howard CM, Erisman JW, Billen G, Bleeker A, Grennfelt P, Grinsven H and Grizzetti B (eds.) *The European Nitrogen Assessment*. Chapter 11. P. 229-248. Cambridge University Press. ISBN 978-1-10700-612-6.
6. Hinsby K, Condeso de Melo MT and Dahl M (2008) European case studies supporting the derivation of natural background levels and groundwater threshold values for the protection of dependent ecosystems and human health. *Science of The Total Environment* 401 (1) 1-20.

TOMMY DALGAARD, professor og sektionsleder, Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet, Tjele (tommy.dalgaard@agro.au.dk). UN-ECE TFRN Co-chair, Sustain-scape.org co-director og Land-CRAFT Co-PI, med fokus på forskning i bæredygtig udvikling af agroøkologiske systemer og landskaber. MIXED-project.eu koordinator og leder af dNmark.dk forskningsalliancen.

SIGNE NORMAND, professor, Institut for Biologi, Aarhus Universitet, Sustainscapes.org direktør og Land-CRAFT Co-PI, formand for Biodiversitetsrådet.

BERIT HASLER, professor og sektionsleder, Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet, Roskilde. Land-CRAFT Co-PI. PER LENNART AMBUS, Professor, Københavns Universitet, Sektion for Geografi, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning. Center for Permafrost Stabil Isotop Facilitet ansvarlig og Land-CRAFT Co-PI.

KLAUS BUTTERBACH-BAHL, professor og Land-CRAFT Pioneer center direktør, Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi, Aarhus.

Plantebaserede fødevarer som klimavirkemiddel

Mere plantebaseret fødevarereproduktion og -forbrug har et stort potentiale til at reducere det globale klimaaftryk. Omstillingen til et mere plantebaseret fødevarerystem kræver at forbrugerne omlægger deres kostvaner til at spise flere planter og mindre kød, og at det er attraktivt for landmændene at omlægge fra produktion af foderafgrøder og husdyr til produktion af afgrøder til human konsum

CHRISTIAN BUGGE HENRIKSEN

Fordele ved plantebaseret fødevarereproduktion og -forbrug

Det er efterhånden veldokumenteret at der vil være en stor gevinst ved mere plantebaseret fødevarereproduktion og -forbrug for klima, miljø og menneskelig sundhed /1/. En tredjedel af de globale drivhusgasemissioner kommer fra vores fødevarerystem /2/ og heraf kommer 57% fra animalsk baserede fødevarer /3/. Disse emissioner består primært af metan (CH₄), lattergas (N₂O) og kuldioxid (CO₂). Metan dannes af bakterier der lever under iltfrie forhold, fx i fordøjelsessystemet på kvæg og andre drøvtyggere, i gyllesystemer og oversvømmede rismarker. Lattergas dannes i jorden ved nitrifikation og denitrifikation og øges ved stigende tilførsel af kvælstof i form af husdyrgødning og kunstgødning. Endelig udledes der kuldioxid, f.eks. i forbindelse med fældning af skov og opdyrkning af naturarealer, især på den sydlige halvkugle.

Det højere klimaaftryk for animalske fødevarer bliver meget tydeligt når man foretager en direkte sammenligning af forskellige typer fødevarer. For fødevarer produceret i Europa er emissionerne af klimagasser fra en hakkebøf på 125 gram således 5 gange større end for en tilsvarende svinekotelet, 6 gange større end for en tilsvarende kyllingefilet og mere end 40 gange større end for tørrede ærter og bønner.

Sidste år udarbejdede en række danske forskningsinstitutioner en køreplan for bæredygtig omstilling af det danske landbrugs- og fødevarerystem med input fra mere end 200 eksperter på tværs af de danske forsknings- og vidensinstitutioner (AgriFoodTure Roadmap). Her har vi beregnet at dyrkningen af mellem 100.000 og 150.000 ha med proteinrige afgrøder kan anvendes til fremstilling af skånsomt forarbejdede plantebaserede fødevarer af høj kvalitet til erstatning af forbrug på mellem 315.000 og 525.000 tons kød (40% oksekød, 40% svinekød og 20% kyllingekød), og dermed reduceres de globale drivhusgasemissioner mellem 5.2 og 12.6 mill. ton CO₂-ækvivalenter /4/. Dette svarer til mellem 30% og 72% af de nuværende emissioner fra dansk landbrug. Dansk landbrug beslaglægger 2.6 millioner ha, hvoraf kun ca. 10% anvendes direkte til produktion af fødevarer til mennesker, hvorimod hovedparten anvendes til foder til husdyr.

En øget plantebaseret fødevarereproduktion og -forbrug vil kunne mindske presset på jord- og vandressourcer. Mens vi i Danmark anvender 80% af landbrugsarealet til husdyr- og foderproduktion er det globale gennemsnit 77% og på tilsvarende vis går 41% af landbrugets vandforbrug til produktion af foder. I vores AgriFoodTure roadmap vil en dansk produktion af proteinafgrøder og plantebaserede fødevarer, der erstatter forbruget af kød, kunne reducere det globale behov for arealer til produktion af foder med mellem 0,8 og 4,7 millioner ha, hvilket samtidig vil give mere

plads til natur og biodiversitet.

Sidst, men ikke mindst viser adskillige studier at et højt forbrug af rødt kød og forarbejdet kød giver øget risiko for sukkersyge, hjertekarsygdomme, cancer og tidligere død.

Den tredobbelte gevinst for klima, miljø og sundhed er den direkte årsag til at EAT Lancet kommissionen i 2019 kom med deres anbefalinger til en fortrinnsvis plantebaseret kost, den såkaldte "Planetary Health Diet" /5/, som efterfølgende har dannet grundlag for en opdatering af de nationale kostråd. Ifølge de nye nationale kostråd skal vi højst spise 350 gram kød om ugen og især begrænse indtaget af okse- og lammekød. Til gengæld skal vi spise og 600 gram grøntsager og frugt, 100 gram bælgfrugter og 30 gram nødder om dagen. I gennemsnit spiser vi 1 kg kød om ugen – så der er et stykke vej igen.

Samfundsmæssigt kan godt betale sig at gå den vej. Ifølge beregninger foretaget af Institut for Fødevarer- og Ressourceøkonomi på Københavns Universitet vil vi kunne undgå 1.000 dødsfald om året, vinde 27.000 raske leveår og spare 10 milliarder kroner hvis den danske befolkning efterlevede de nye nationale kostråd. På tilsvarende vis har Klimarådet beregnet at det forbrugsbaserede klimaaftryk vil kunne reduceres med mellem 2,6 og 3,9 mill. ton CO₂-ækvivalenter, svarende til mellem 29% og 41% hvis alle i Danmark omlagde deres fødevarerforbrug til de nye kostråd.

En global omstilling af fødevarerforbruget til EAT Lancet kommissionens Planetary Health Diet vil kunne reducere det globale klimaaf-

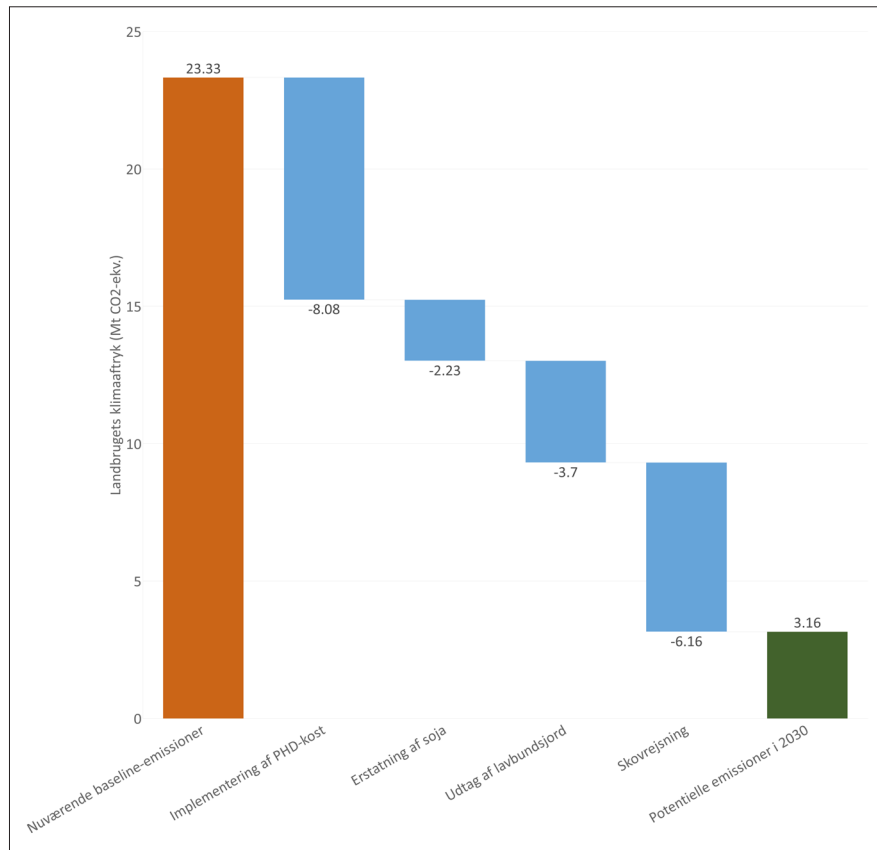
tryk med 23% og for både Europa, Nordamerika, store dele af Sydamerika samt Australien vil reduktionen være mere end 50% /6/. Hvis dansk landbrug skulle tilpasse sig en verden som efterlevede kostråd svarende til EAT Lancet kommissionens anbefalinger og samtidig beholde den samme relative andel af den globale produktion af animalske fødevarer ville det betyde at vi skulle reducere de nuværende bestande af slagtekyllinger, æglæggende høns, svin og kødkvæg med hhv. 11%, 46%, 64% og 79% /7/. Til gengæld ville vi kunne reducere klimaaftrykket fra landbruget med 86% medregnet de indirekte emissioner der er forbundet med import af sojafoder som i omstillings-scenariet erstattes med græs og lokalt dyrkede bælgplanter (se figur 1).

Hvad med lækage-effekter?

Et ofte fremført argument imod en mere målrettet omstilling fra animalsk fødevarerproduktion til plantebaseret fødevarerproduktion er at det vil medføre lækage: Hvis vi reducerer den animalske produktion så vil markedskræfterne sørge for at denne reducerede produktion vil blive kompenseret af øget produktion et andet sted i verden, som ikke vil være i stand til at producere de animalske fødevarer lige så effektivt som vi gør her i Danmark, hvilket i givet fald vil betyde øget globalt klimaaftryk.

Det er korrekt at vores animalske produktion er meget effektiv og blandt de mest effektive i verden, men flere lande har en næsten lige så effektiv animalsk produktion som Danmark. World Resources Institute har således beregnet at en 50% reduktion af den danske landbrugseksport vil medføre en lækage svarende til 1,7 Mt CO₂-ækvivalenter i produktionssleddet, og hvis man udelukkende ser på svinekød vil en flytning af den danske produktion til lande som Polen, Tyskland, Frankrig, USA og Spanien medføre en lækage på 0,9 mill. ton CO₂-ækvivalenter i gennemsnit. Det er betydeligt lavere end den tilsvarende klimagevinst der vil være ved at øge produktionen af plantebaserede fødevarer der kan erstatte forbruget af kød.

Et andet argument for at vi ikke skal reducere den animalske produktion i Danmark er at efterspørgslen efter kød vil stige i takt med at verdens befolkning øges til over 8,5 milliarder mennesker frem mod 2030 og middelklassen vil vokse. Mens befolkningstilvæksten ganske givet vil øge efterspørgslen efter både animalske og plantebaserede fødevarer er der imidlertid tegn på at forbruget af kød i Europa stagnerer, ligesom der er tegn på at Generation Z, som via de sociale medier påvirker hinanden på tværs af landegrænser, spiser mere plantebaseret end tidligere generationer. Der



Figur 1. Potentiel reduktion af drivhusgasemissioner ved omstilling af dansk landbrug til global implementering af EAT Lancet kommissionens Planetary Health Diet /7/

bør arbejdes målrettet for at styrke denne trend og dermed understøtte en global omstilling til et mere plantebaseret fødevarerforbrug.

Samtidig viser den seneste fremskrivning fra OECD og FAO at der frem mod 2031 må forventes faldende realpriser på kød, og at Kinas import af svinekød vil blive mindre i takt med at deres egen produktion kommer tilbage på samme niveau som før det omfattende udbrud af svinepest. Det vil medføre øget konkurrence for den danske svinebranche.

Mens der således er usikkerhed om mulighederne for indtjening på det globale marked for svinekød, som forventes at vokse med 4% om året frem mod 2027 /8/, er der gode indtjeningsmuligheder på det globale marked for plantebaserede fødevarer, som forventes at vokse med 12% om året frem mod 2027 /9/ (se figur 2). Hvis det således lykkedes Danmark at opnå en andel af det globale marked for plantebaserede fødevarer på mellem 1% og 3% – vi har lige nu en andel af det globale marked for animalske fødevarer på 3% – vil det ifølge de beregninger vi har foretaget i AgriFoodTure Roadmap – svarende til en markedsværdi på mellem 4,5 og 14,5 milliarder kroner. Hvis der i stedet anvendes en markedsfremskrivning frem mod 2030 fore-

taget af Bloomberg Intelligence vil markedsværdien kunne være helt oppe på mellem 20 og 60 milliarder kroner.

Det vil med andre ord kunne gøre dansk landbrug mere robust hvis der i højere grad sættes på plantebaseret fødevarerproduktion, og vi ser da også allerede at store landbrugsvirksomheder som Arla og Danish Crown er trådt ind på markedet for plantebaserede fødevarer. Arla har således allerede opnået en markedsandel på 5% med deres serie af Jörd plantedrikke, og Danish Crown forventer at op til 20% af deres omsætning vil komme fra plantebaserede fødevarer inden for de næste 5 år.

Med nogle af verdens dygtigste landmænd, som er meget omstillingsparate og klar til at møde efterspørgslen har Danmark alle forudsætninger for at blive verdensførende inden for plantebaserede fødevarer.

Hvordan lykkes omstillingen til et mere plantebaseret fødevarer-system?

For at lykkes med omstillingen til et mere plantebaseret fødevarer-system skal vi først og fremmest arbejde for at forbrugerne omlægger deres kostvaner til at spise flere planter og mindre kød, og dernæst skal vi gøre det lettere for landmændene at omlægge fra produktion af foderafgrøder og husdyr til produktion

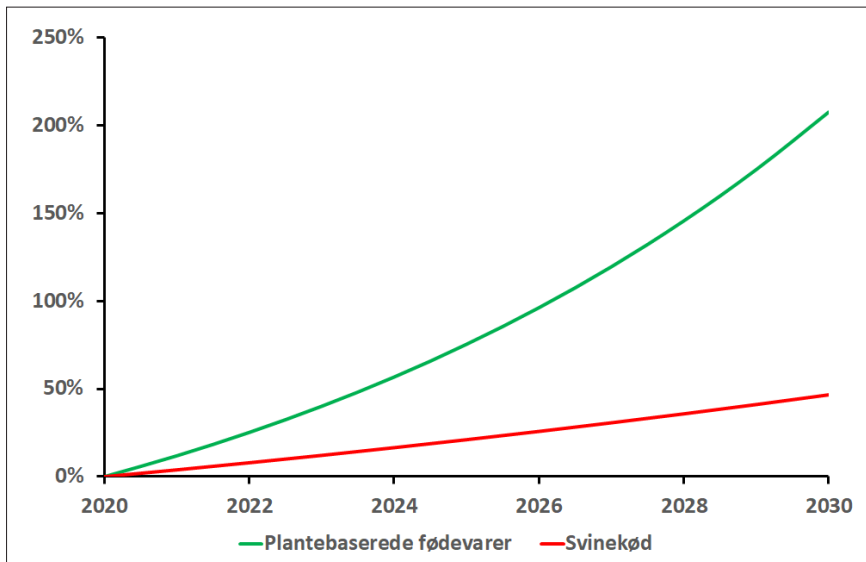


Figure 2. Forventet sammensat årligvækstrate for hhv. plantebaserede fødevarer og svinekød

af afgrøder til human konsum.

For forbrugerne skal det plantebaserede alternativ være attraktivt, let og normalt. For at være mere attraktive skal de plantebaserede fødevarer først og fremmest smage godt. Her vil det være afgørende at vi arbejder målrettet for at øge kvaliteten af de råvarer der anvendes til plantebaserede fødevarer. Mange af de afgrøder, der i dag anvendes til plantebaserede fødevarer, har fortrinsvis været dyrket som foderafgrøder. Det betyder at planteforædlingen hidtil har fokuseret på at optimere udbytte og foderkvalitet. Der er derfor behov for at forædlerne skifter gear og fokuserer på at optimere smag, ernæring og funktionalitet. Dette arbejder vi med i AQRIFood projektet (www.aqrifood.dk) hvor vi i den første fase dyrker forskellige sorter af havre, ært og hestebønne og måler på deres ernæringsmæssige, funktionelle og sensoriske kvalitet, således at vi allerede næste år vil kunne sige til landmændene hvilke sorter de skal dyrke for at kunne lave aftaler med fødevarer-virksomhederne, der efterspørger råvarer af høj kvalitet som vil muliggøre en mere skånsom forarbejdning af de plantebaserede fødevarer.

For at være det lette valg skal de plantebaserede fødevarer være umiddelbart tilgængelige. De skal placeres i supermarkedet så de er lette at få øje på, der skal være mange flere valgmuligheder, og de skal være standardvalget ved konferencer og møder samt i offentlige og private kantiner. Roskilde Universitet har dokumenteret at man ved at gøre en vegetarisk frokost til standardvalg kan seksdoble antallet af konferencedeltagere som vælger den vegetariske frokost frem for en frokost med kød. De fleste forbrugere har et repertoire af nemme opskrifter baseret på kød der

fungerer og som de bruger igen og igen, og det vil derfor være vigtigt at tilbyde opskrifter, der er lige så nemme men baseret på planter, og som på samme måde kan bruges igen og igen. Her er den færdige plantefars en smutvej til nem aftensmad for den travle børnefamilie.

For at blive den nye normal skal den plantebaserede kost være det som flertallet spiser. Det kan måske umiddelbart synes langt væk, men noget tilsvarende er faktisk lykkedes med rygning. I 1950'erne var det over halvdelen af den danske befolkning der røg hver dag, mens det i 2020 kun var 13%. Omstillingen fra animalsk baseret kost til plantebaseret kost skal dog gå betydelig hurtigere end omstillingen fra rygning til ikke-rygning. Mens det i 2022 stadigvæk er flertallet der spiser kød hver dag skulle det i 2030 gerne være flertallet der højst spiser kød én eller to dage om ugen – eller maksimalt 350 gram kød om ugen som de nye kostråd anbefaler. Nyere forskning indikerer at jo mere socialt acceptabelt det bliver at spise fortrinsvist plantebaseret og jo mindre socialt acceptabelt det bliver at have et højt kødforbrug jo hurtigere vil denne omstilling kunne finde sted /10/.

I takt med at det lykkedes at få forbrugerne til at spise mere plantebaseret skal vi sørge for at det samtidig er attraktivt for danske landmænd at foretage en omstilling til mere plantebaseret fødevarerproduktion. Som udgangspunkt vil landbruget producere det som forbrugerne efterspørger, og selv formanden for Bæredygtigt Landbrug, Peter Kiær, der er én af de største svineproducenter i Danmark har erklæret sig parat til at slippe sine grise fri på mark og i skov og påbegynde en produktion af plantefars når den sidste gris er slagtet. Der er lige nu utroligt mange landmænd, som

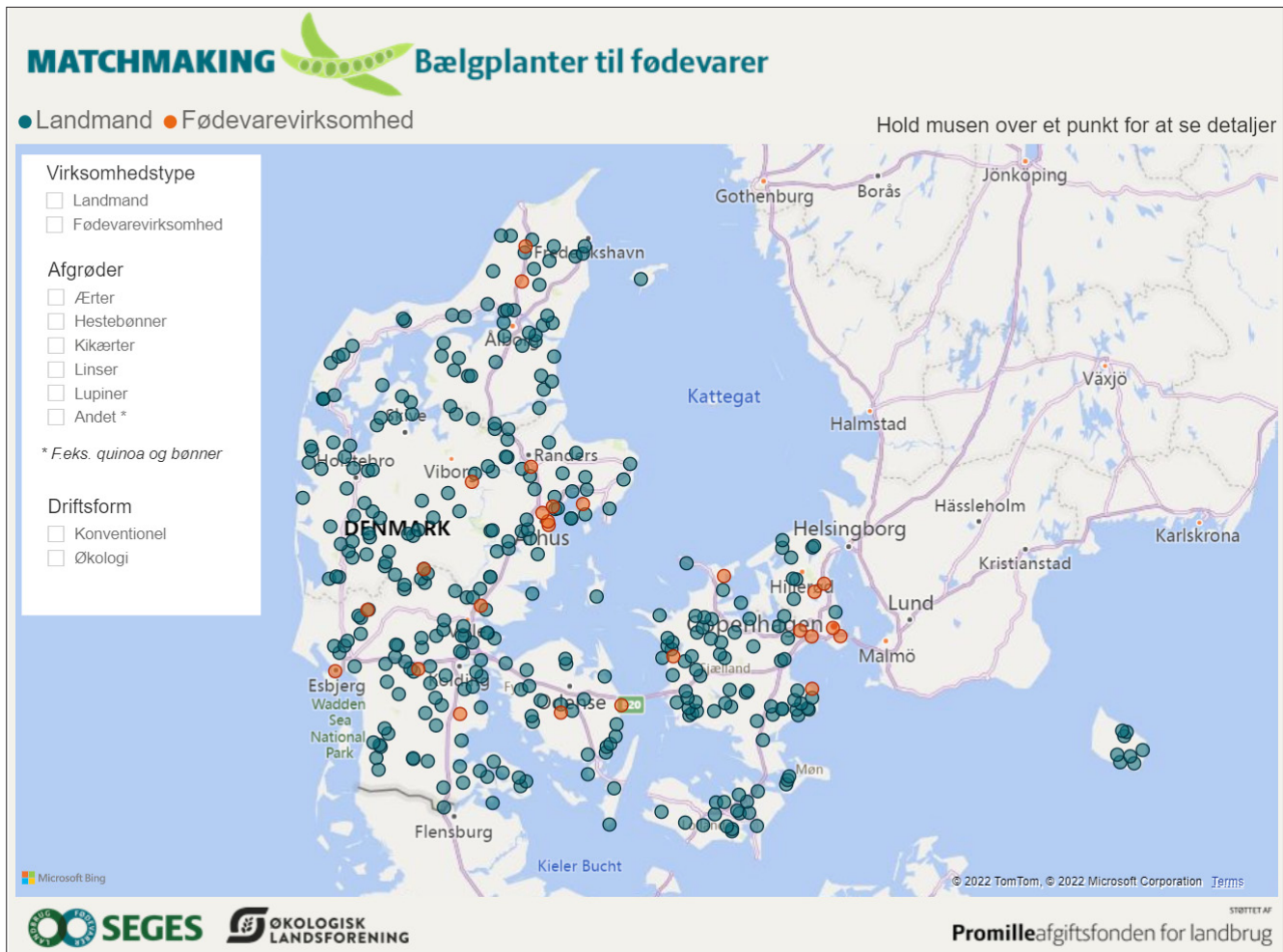
er meget interesserede i at dyrke flere bælgplanter til mennesker, hvilket hurtigt kan bekræftes ved at kigge på det digitale Danmarkskort der udgør den nye matchmaking platform for bælgplanter til fødevarer som er udviklet af SEGES og Økologisk Landsforening.

I den sammenhæng er det meget positivt, at der i aftalen om grøn omstilling af dansk landbrug fra Folketinget i oktober sidste år er afsat midler til et eco-scheme for plantebaserede fødevarer. Det vil gøre det attraktivt for foderproducenterne at dyrke proteinafgrøder til human konsum. For at understøtte den plantebaserede omstilling skal vi samtidig fjerne de teknologiske og finansielle "lock-ins", der gør det svært at omlægge fra bedrifter til udelukkende at fokusere på animalsk produktion til fortrinsvis at fokusere på plantebaseret produktion. Gældsprocenten for danske heltidsbedrifter er faldende men var i 2020 stadig 64%. Mange svineproducenter har lån i staldbygninger og gylleanlæg der skal afskrives før det giver mening at omlægge produktionen. Her kunne en statslig omlægningsfond være en mulighed.

Samtidig skal vi have etableret ERFA-grupper for landmænd og rådgivere med fokus på erfaringsudveksling inden for plantebaseret fødevarerproduktion, vi skal understøtte den faglige stolthed omkring planteproduktion til menneskeligt forbrug og vi skal offentligt anerkende landmændenes vigtige rolle for det danske samfund. Sidst men ikke mindst skal vi have udviklet dyrkningsystemer rettet mod plantebaseret fødevarerproduktion hvor bælgplanter, samdyrkning, flerårige afgrøder og skovlandbrug integreres i balancerede sædskifter som optimerer råvarekvalitet samt udnyttelse af næringsstoffer og sidestrømme.

Referencer

- 1/ Poore, J., Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* 216, pp 987–992. <https://doi.org/10.1126/science.aag0216>
- 2/ Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D. Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N. and Leip, A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food* 2, 198–209 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>
- 3/ Xu, X., Sharma, P., Shu, S. et al. Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nat Food* 2, 724–732 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00358-x>
- 4/ Olesen, J. E., Christensen, S., Jensen, P. R., Schultz, E., Rasmussen, C. (red.), Kjer, K. H. (red.), Kristensen, T. N. (red.), Gade, J. J. (red.), Haslund, S. (red.), Henriksen, C. B. (red.), Persson, M. (red.), Kryger, K. (red.), & Henriksen, L. (red.) (2021). *AgriFoodTure:*



Figur 3. Matchmaking platform for bælgplanter til fødevarer udviklet af SEGES Innovation of Økologisk Landsforening

Roadmap for sustainable transformation of the Danish Agri-Food system. (1 udg.) SEGES.

/5/ Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., Afshin, A., Murray, C. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet* (London, England), 393(10170), 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)

/6/ Semba et al (2020) Adoption of the 'planetary health diet' has different impacts on countries' greenhouse gas emissions. *Nature Food* 1, pp 481–484

/7/ Prag, A. A., & Henriksen, C. B. 2020. Transition from Animal-Based to Plant-Based Food Production to Reduce Greenhouse Gas Emissions from Agriculture - The Case of Denmark. *Sustainability*, 12(19), [8228]. <https://doi.org/10.3390/su12198228>

/8/ Allied Market Research. 2020. Pork Meat Market by Type (Chilled and Frozen), Packaging (Store Wrap, Modified Atmosphere Packaging, Vacuum Packaging, Shrink Bags, and Others), and Application (Household and Commercial): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021–2027

/9/ Meticulous Research. 2020. Plant Based Food Market by Product Type (Dairy Alternatives, Meat Substitute, Plant-Based Eggs, Confectionery), Source (Soy Protein, Wheat Protein), and Distribution Channel (Business to Business and Business to Customers) - Global Forecast to 2027

/10/ Szejda, K., Urbanovich, T., Wilks, M. (2020). Accelerating Consumer Adoption of Plant-Based Meat: An Evidence-Based Guide for Effective Practice. GFI Academic Paper. <https://gfi.org/images/uploads/2020/02/NO-HYPERLINKED-REFERENCES-FINAL-COMBINED-accelerating-consumer-adoption-of-plant-based-meat.pdf>

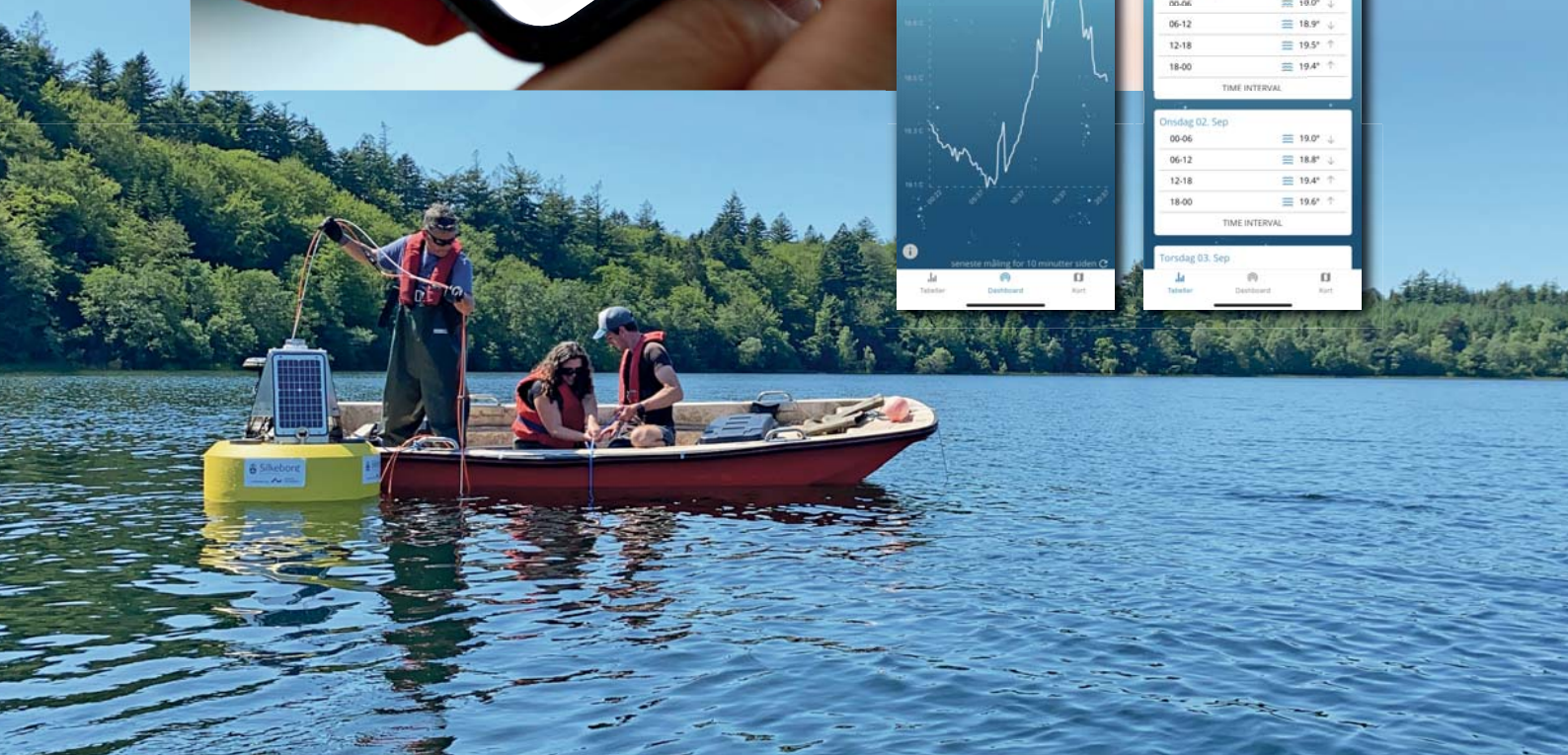
CHRISTIAN BUGGE HENRIKSEN er lektor af forskergruppeleder ved Institut for Plante- og Miljøvidenskab på Københavns Universitet, Højbakkegård Allé 30, 2630 Taastrup, e-mail: cbh@plen.ku.dk

DCE giver indblik i naturen

Almind Sø er en velbesøgt badesø ved Silkeborg. Her blev der i juni 2020 udlagt en bøje med sensorer, som gør det muligt at få livemålinger af bl.a. vandtemperatur.

Derudover indsamles data, der anvendes til modellering af søens vandkvalitet, og som gør det muligt at lave prognoser. Projektet er blandt de første til at udnytte kombinationen af en fastinstalleret bøje og modelprognoser med fokus på badevandsøer.

Borgere og besøgende kan følge de aktuelle data fra søen og badevandsudsigten via WaterWebTools.com - en spinoutvirksomhed, som er undervejs fra Aarhus Universitet i regi af InnoExplorer. Den digitale badevandsudsigt kan bruges til at planlægge den næste svømmetur eller holde øje med vandtemperaturen time for time



AARHUS
UNIVERSITET

DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi ved Aarhus Universitet yder forskningsbaseret rådgivning af myndigheder, virksomheder og organisationer og er desuden ansvarlig for Danmarks rapporter til EU og FN på natur- og klimaområdet.

Land CRAFT



- nyt pionercenter med fokus på en bæredygtig fremtid for landbruget

En grøn omlægning af de nuværende fødevarer-systemer, forvaltning af landskabet, reduktion af landbrugets miljøpåvirkninger samt tilpasning til klimaforandringer er med i visionen for Aarhus Universitets nye pionercenter Land-CRAFT.

Grøn omstilling betyder for landbruget en minimering af miljø- og klimaaftrykket. Det kræver en gennemgribende omlægning af eksisterende landbrugsmetoder og måder at forvalte landskabet på. Land-CRAFT er et nyt center på Aarhus Universitet, der netop fokuserer på landskab, landbrug, miljø og klima. Med fire skarpe forskningsområder, er målet at skabe det nødvendige videnskabelige grundlag for den grønne omstilling af landbruget:

1. Landskabsforsøg for at begrænse næringsstof- og drivhusgasstrømme
2. Digitale landskabsanalyser med droner og satellitter
3. Landskabsmodellering til simulering af vand, kulstof- og kvælstofstrømme fra landskabet
4. Samfundsøkonomi og dialog med interessenter om udnyttelse af landbrugsarealer og landskaber i den grønne omstilling

Du kan få mere information om Land-CRAFT på: <https://land-craft.dk>



Støtte til Vand & Jord via abonnement eller sponsorat

Vand & Jord har en lang tradition for formidling af forskningsresultater og anvendt praksis inden for vand, miljø, klima og natur. Vi er dermed det eneste danske naturvidenskabelige tidsskrift, der kombinerer den direkte formidling af forskningsresultater og anvendt praksis fra rådgivning og forvaltning.

Vand & Jord finder den naturvidenskabelige formidling særdeles vigtig og med en gratis elektronisk udgave, når vi ud til en langt større målgruppe, der udover den nuværende læsergruppe også omfatter danske gymnasieelever og universitetsstuderende. Vi opfordrer Vand & Jords læsere, der ønsker at modtage den gratis elektroniske version til at tilmelde sig nyhedsbrevet på Vand & Jords hjemmeside <http://vandogjord.dk>

Udgivelsen af Vand & Jord kræver ressourcer til opsætning af bladet samt til trykning og omdeling. Finansieringen sker dels via abonnementsindtægter samt sponsorater. En stor tak til de danske universiteter, virksomheder og fonde, der støtter udgivelsen af Vand & Jord via et sponsorat, samt en tak til vores trofaste abonnenter. Tidsskriftet er endnu ikke fuldt finansieret via sponsorater, og vi har derfor stadig brug for abonnementsindtægter. Vi søger derfor fortsat universiteter, virksomheder og fonde, der vil bidrage til at sikre den brede danske naturvidenskabelige formidling via et sponsorat.

Vi tilbyder to typer af sponsorater:

- (1) Sponsorat på årligt kr. 25.000 + moms. Sponsorater giver mulighed for én helsidesannonce i hvert nummer samt omtale med logo sammen med øvrige sponsorer, der støtter udgivelsen af bladet.
- (2) Sponsorat på årligt kr. 15.000 + moms. Sponsoratet giver omtale med logo sammen med øvrige sponsorer, der støtter udgivelsen af bladet.

Henvendelse vedr. sponsorat til Claus Hagebro på mail: hagebro3@hotmail.com

For private og organisationer, der ikke har mulighed for at støtte via sponsorat, vil det fortsat være muligt at støtte udgivelsen af Vand & Jord via en abonnementsaftale, se mere på <http://vandogjord.dk>