

DRIVHUSGASEMISSIONER FRA LAVBUNDSJORDE – BETYDNINGEN AF NÆRINGSSTOFFER OG PLANTESAMFUND

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 719 2026

AARHUS
UNIVERSITET
DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

DRIVHUSGASEMISSIONER FRA LAVBUNDSJORDE – BETYDNINGEN AF NÆRINGSSTOFFER OG PLANTESAMFUND

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 719 2026

Joachim Audet, Sara Bjerrum, Thea Meier Marker,
Freja Nordby Haarder, Rasmus Jes Petersen,
Jesper Erenskjold Moeslund & Dominik Zak

Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience

AARHUS
UNIVERSITET
DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Titel:	Drivhusgasemissioner fra lavbundsjorde – betydningen af næringsstoffer og plantesamfund
Forfattere:	Joachim Audet, Sara Bjerrum, Thea Meier Marker, Freja Nordby Haarder, Rasmus Jes Petersen, Jesper Erenskjold Moeslund & Dominik Zak
Institution:	Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	https://dce.au.dk
Udgivelsesår:	November 2026
Redaktion afsluttet:	5. november 2026
Faglig kommentering:	Carl Christian Hoffmann
Kvalitetssikring, DCE:	Henriette Hossy
Ekstern kommentering:	Der er ikke modtaget kommentarer
Finansiel støtte:	Styrelsen for Grøn Arealomlægning og Vandmiljø
Bedes citeret:	Audet, J., Bjerrum, S., Marker, T.M., Haarder, F.N., Petersen, R.J., Moeslund, J.E. & Zak, D. 2026. Drivhusgasemissioner fra lavbundsjorde – betydningen af næringsstoffer og plantesamfund. Statusrapport. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 42 s. - Videnskabelig rapport nr. 719
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Sammenfatning: Rapporten undersøger, hvordan næringsstoftilgængelighed, plantemateriale og hydrologi påvirker drivhusgasemissioner fra vådlagte, næringsrige lavbundsjorde, baseret på et felteksperiment, et laboratorieforsøg med næringsstofberigelse og et mesokosmosforsøg med strøelse fra tre vådområdearter. Næringsstoffer havde kun begrænset og formentlig indirekte effekt, mens plantematerialets mængde og kvalitet var en langt stærkere drivkraft; højproduktive arter som dunhammer bidrog potentielt mest pr. arealenhed. Topjordsfjernelse gav højere CH_4-emission, men effekten kunne ikke adskilles fra højere jordfugtighed. Resultaterne samles i en konceptuel ramme, der peger på, at emissionsmodeller bør suppleres med mål for kulstofsubstrat og vegetation. Remote sensing er endnu ikke præcis nok til at erstatte feltdata.

Emneord:	lavbundsjorde, vådlægning, drivhusgasser, metan, topjordsfjernelse, næringsstoffer, plantemateriale, remote sensing
Foto forside:	Henrik Stenholt
ISBN:	978-87-7648-097-4
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	42

Indhold

Forord **5**

Sammenfatning **6**

Summary **7**

1 Baggrund og formål **8**
1.1 Konceptuel ramme 9

2 Materiale og metoder **11**
2.1 Studieområde 11
2.2 Forsøgsdesign 12
2.3 Måling af drivhusgasflux 14
2.4 Hydrologiske og miljømæssige målinger 15
2.5 Jord- og planteanalyser 16
2.6 Statistiske analyser 16

3 Resultater **18**
3.1 Effekten af topjordsfjernelse og næringsstoftilførsel på drivhusgasdynamikker 18
3.2 Effekten af næringsstoftilførsel 21
3.3 Effekten af plantematerialets kvalitet på kulstofomsætning 23
3.4 Overordnede miljømæssige kontrolfaktorer 25

4 Diskussion **27**
4.1 Hovedresultater og syntese 27
4.2 Næringsstoftilgængelighed som drivkraft for drivhusgasemissioner 28
4.3 Vegetationskvalitet og effekter af kulstofsubstrater 28
4.4 En konceptuel ramme for regulering af drivhusgasser i vådlagte tørvejorde 30
4.5 Potentiel brug af remote sensing 32
4.6 Implikationer for restaurering af tørvejorde og klimamitigering 35
4.7 Styrker, begrænsninger og fremtidig forskning 36

5 Konklusion **38**

6 Referencer **39**

Forord

Denne statusrapport er udarbejdet som led i projektet "*Betydningen af jordens næringsstofindhold og plantesamfund for drivhusgasemissioner fra lavbundsjorde*", som gennemføres af Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience, for Styrelsen for Grøn Arealomlægning og Vandmiljø (SGAV). Projektet har til formål at forbedre forståelsen af, hvordan næringsstoftilgængelighed og plantesamfund påvirker emissioner af drivhusgasser fra vådlagte lavbundsjorde, og at bidrage til grundlaget for en mere præcis model til estimering af disse emissioner.

Rapporten præsenterer resultater fra laboratorieforsøg, feltmålinger og en gennemgang af den relevante litteratur. Arbejdet er udført i overensstemmelse med god videnskabelig praksis og med henblik på at understøtte beslutningsgrundlaget for udtagning af lavbundsjorde.

Sammenfatning

Udtagning og vådlægning af lavbundsjorde er et centralt virkemiddel i den nationale klimaindsats, men de modeller, der i dag bruges til at estimere drivhusgasemissioner fra vådlagte arealer, baserer sig primært på gennemsnitligt grundvandsspejl som eneste forklarende variabel. Denne rapport samler resultater fra felt- og laboratorieundersøgelser samt en gennemgang af den internationale litteratur, gennemført ved Aarhus Universitet, med det formål at undersøge, hvilken rolle næringsstoftilgængelighed (kvælstof og fosfor), plantemateriale og hydrologi spiller for drivhusgasdynamikken i vådlagte, næringsrige lavbundsjorde – og dermed bidrage til et mere robust vidensgrundlag end grundvandsspejlet alene kan give.

Undersøgelsen kombinerede et felteksperiment (Studie 1) med næringsstoftilførsel og topjordsfjernelse (TSR) i en vådlagt lavmose ved Strande Enge, et laboratorieforsøg (Studie 2) med gradueret næringsstofberigelse af jord fra samme lokalitet, og et mesokosmosforsøg (Studie 3), hvor jord blev inkuberet med strøelse fra tre almindelige vådområdeplanter (dunhammer (*Typha latifolia*), lyse-siv (*Juncus effusus*) og mosarten *Rhytidiadelphus squarrosus*) fra en vådlagt lavmose ved Vejrumbro.

En væsentlig konklusion er, at det ikke var muligt at adskille effekten af topjordsfjernelse på CH_4-emissionen fra de hydrologiske forskelle mellem områderne, idet TSR-arealerne også havde højere og mere stabil jordfugtighed end arealerne uden topjordsfjernelse. Det understreger, at fremtidige evalueringer af topjordsfjernelse som virkemiddel bør ske med eksplicit kontrol for vandstand. Det kan dog ikke udelukkes, at topjordsfjernelse også har en selvstændig substrateffekt: fjernelsen af det øverste, stærkt omsatte tørvelag blotlægger dybereliggende, mindre omsat tørv, som potentielt er et mere tilgængeligt kulstofsubstrat for metanogene mikroorganismer end den oprindelige topjord – en mekanisme, der ville trække i samme retning som hydrologieffekten og derfor er vanskelig at adskille fra denne med det foreliggende datagrundlag.

Plantematerialets mængde og kvalitet viste sig at være en langt mere betydende faktor for kulstofomsætningen end næringsstoftilførsel. Ud over forskelle i strøelsens nedbrydelighed viste en opskalering til feltniveau, at højproduktive arter som dunhammer potentielt bidrager langt mere til det samlede drivhusgasbudget end lavproduktive arter, selv hvor emissionen pr. gram plantemateriale er sammenlignelig.

Resultaterne samles i en konceptuel ramme, hvor jordfugtighed/grundvandsspejl, kulstofsubstratets mængde og kvalitet, næringsstoftilgængelighed og mikrobiel konkurrence om elektronacceptorer indgår som et hierarki af faktorer frem for én enkelt dominerende variabel. Rammen er en hypotesegenererende syntese og endnu ikke en kvantitativ, implementerbar emissionsmodel – det kræver flerårige data og et bredere eksperimentelt design, som er skitseret i rapportens anbefalinger til fremtidig forskning, herunder studier der kan adskille effekten af topjordsfjernelse fra hydrologi. Et litteraturstudie af remote sensing-baserede metoder peger desuden på et fremtidigt potentiale for regional kortlægning af biomasse og fugtighedsforhold, men viser samtidig, at de nuværende metoder endnu ikke er tilstrækkeligt præcise til at erstatte feltbaserede data.

Summary

Peatland rewetting is a key measure in national climate policy, but current models used to estimate greenhouse gas emissions from rewetted organic soils rely mainly on mean water table depth as the sole explanatory variable. This report synthesises findings from field- and laboratory-based studies, together with a review of the international literature, conducted at Aarhus University, examining the roles of nutrient availability, plant material and hydrology in greenhouse gas dynamics of rewetted, nutrient-rich lowland soils, with the aim of contributing a more robust evidence base than water table alone can provide.

The study combined a field experiment (Study 1) testing nutrient addition and topsoil removal (TSR) at a rewetted fen at Strande Enge, a laboratory incubation (Study 2) testing nutrient enrichment of soil from the same site, and a mesocosm experiment (Study 3) incubating soil with litter from three common wetland plant species (cattail (*Typha latifolia*), soft rush (*Juncus effusus*), and the moss *Rhytidiadelphus squarrosus*) from a rewetted fen at Vejrumbro.

Contrary to the project's original hypothesis, nutrient addition had only a limited and likely indirect effect on greenhouse gas production, both in the field and in the laboratory: neither CH_4 nor CO_2 production was nutrient-limited under the conditions tested, and only the highest nitrogen loading produced a transient increase in N_2O. Topsoil removal, by contrast, had a pronounced effect – but in the opposite direction to what was expected: both field and laboratory data showed unexpectedly higher CH_4 production in TSR than in non-TSR soils. This effect was likely linked to TSR areas having higher and more stable soil moisture than non-TSR areas, meaning that the effect of topsoil removal could not be separated from that of hydrology.

The quantity and quality of plant material proved a far stronger driver of carbon turnover than nutrient addition. Beyond differences in litter decomposability, scaling emissions to field level showed that highly productive species such as cattail potentially contribute far more to the overall greenhouse gas budget than low-productivity species, even where emissions per gram of plant material are comparable.

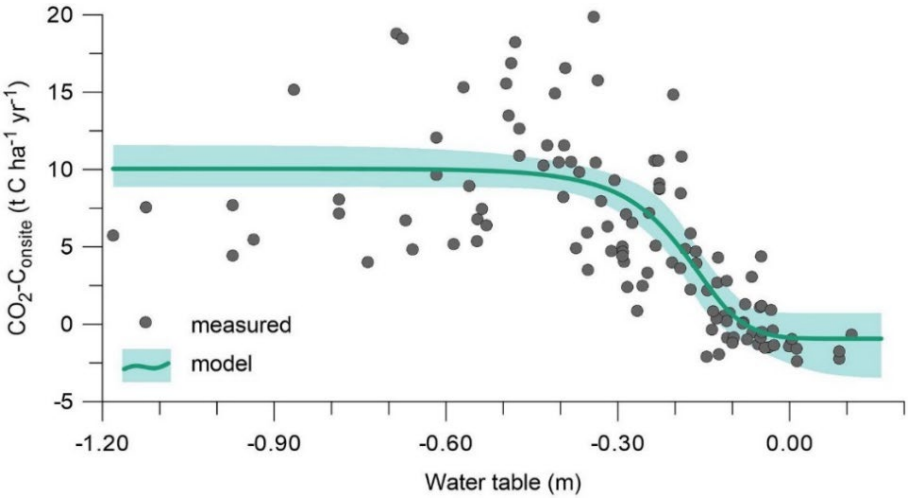
The findings are synthesised into a conceptual framework in which soil moisture/water table, the quantity and quality of carbon substrate, nutrient availability, and microbial competition for electron acceptors act as a hierarchy of controls rather than a single dominant variable. This framework is a hypothesis-generating synthesis rather than a quantitative, implementable emission model – developing the latter requires multi-year data and a broader experimental design, as outlined in the report's recommendations for future research, including studies able to separate the effect of topsoil removal from that of hydrology. A literature review of remote sensing-based methods further points to future potential for regional mapping of biomass and moisture conditions, but also shows that current methods are not yet sufficiently precise to replace field-based data.

1 Baggrund og formål

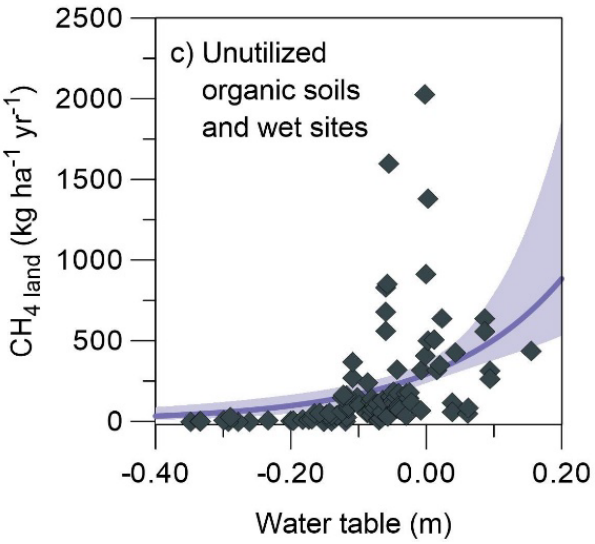
Udtagning og vådlægning af lavbundsjorde udgør et centralt virkemiddel i den nationale indsats for reduktion af drivhusgasemissioner. Disse arealer er karakteriseret ved højt indhold af organisk materiale og har derfor et betydeligt potentiale for emission af kuldioxid (CO_2) og metan (CH_4), særligt under anaerobe forhold. De eksisterende modeller, der anvendes til at estimere emissioner fra vådlagte lavbundsjorde, er imidlertid begrænsede i deres forklaringsgrad, idet de primært baserer sig på gennemsnitlig vandstand som eneste inputparameter. Figur 1.1 og 1.2 bygger på en international meta-analyse (Tiemeyer et al., 2020); det historiske danske nationale drivhusgasregnskab for lavbundsjorde har derimod primært baseret sig på emissionsfaktorer knyttet til jordens indhold af organisk kulstof (kategorierne >12 % og 6-12 % OC), mens den nyeste danske emissionskortlægning kombinerer information om både organisk kulstofindhold og grundvandsspejl. De eksisterende tilgange dækker således allerede både vandstand og kulstofindhold som forklarende variable – hvad der mangler, og hvad nærværende rapport adresserer, er en systematisk inddragelse af næringsstoftilgængelighed og plantesammensætning som selvstændige forklarende faktorer.

Flere studier peger på, at næringsstoftilgængelighed, herunder især fosfor, kan have en væsentlig indflydelse på CH_4-emissioner (Huth et al., 2020; Kim et al., 2015). Tilsvarende effekter er dokumenteret i lavvandede søer og reservoirer (Beaulieu et al., 2019; Davidson et al., 2018; Davidson et al., 2015), og det er derfor plausibelt, at lignende mekanismer gør sig gældende i vådlagte lavbundsjorde. Figur 1.1 og Figur 1.2 illustrerer henholdsvis responsen af CO_2- og CH_4-emissioner fra organiske jorde i forhold til det gennemsnitlige årlige grundvandsspejl, og understreger den betydelige variation, som ikke fanges af nuværende modeller.

Projektet forventes at bidrage til en mere robust og videnskabeligt funderet vurdering af klimaeffekten ved udtagning af lavbundsjorde, og dermed styrke beslutningsgrundlaget for fremtidig arealforvaltning og klimaregulering.



Figur 1.1. Respons af CO_2-C-emissioner fra organiske jorde i forhold til det gennemsnitlige årlige grundvandsspejl (Tiemeyer et al., 2020).



Figur 1.2. Respons af metanemissioner fra organiske jorde (CH_4-land) i forhold til det gennemsnitlige årlige grundvandsspejl (WT) for udyrkede organiske jorde og våde (dvs. semi-naturlige og vådlagte) lokaliteter. De grå bånd viser 95 % bootstrap konfidensintervaller (Tiemeyer et al., 2020).

De specifikke mål omfatter:

- Kvantificering af næringsstoftilgængelighedens betydning for drivhusgasemissioner gennem kontrollerede laboratorieforsøg med tørvejord fra forskellige lokaliteter.
- Feltbaserede målinger af CO_2- og CH_4-emissioner på tværs af gradienter i næringsstoftilgængelighed og vandspejlsdynamik, med anvendelse af plantebaserede indikatorer.
- Udvikling og validering af remote sensing metoder til estimering af biomasseproduktion og næringsbalance, med henblik på regional og national kortlægning af drivhusgasemissioner.
- Udarbejdelse af en ny emissionsmodel, der integrerer flere variable og sammenlignes med eksisterende modeller for vådlagte lavbundsjorde.

1.1 Konceptuel ramme

Denne rapport undersøger, hvordan restaureringstiltag og næringsstofdynamikker påvirker drivhusgasemissioner fra vådlagte moser. Vådlægning gennem hævning af vandstanden reducerer generelt den aerobe nedbrydning af tørv og dermed emissionen af CO_2, men kan samtidig fremme produktionen af CH_4 under iltfrie forhold. Tilgængeligheden af næringsstoffer kan desuden påvirke både mikrobielle processer og vegetationsudvikling og dermed ændre udvekslingen af CO_2, CH_4 og lattergas (N_2O) mellem økosystemet og atmosfæren.

Rapporten bygger på en syntese af resultater fra tre feltbaserede og laboratoriebaserede studier gennemført ved Ecoscience, Aarhus Universitet, suppleret med en gennemgang af den internationale litteratur. Studierne undersøgte forskellige, men komplementære, aspekter af drivhusgasdynamikker i vådlagte tørveområder, herunder effekterne af topjordsfjernelse, næringsstoftilgængelighed og vegetationens betydning for kulstofomsætningen.

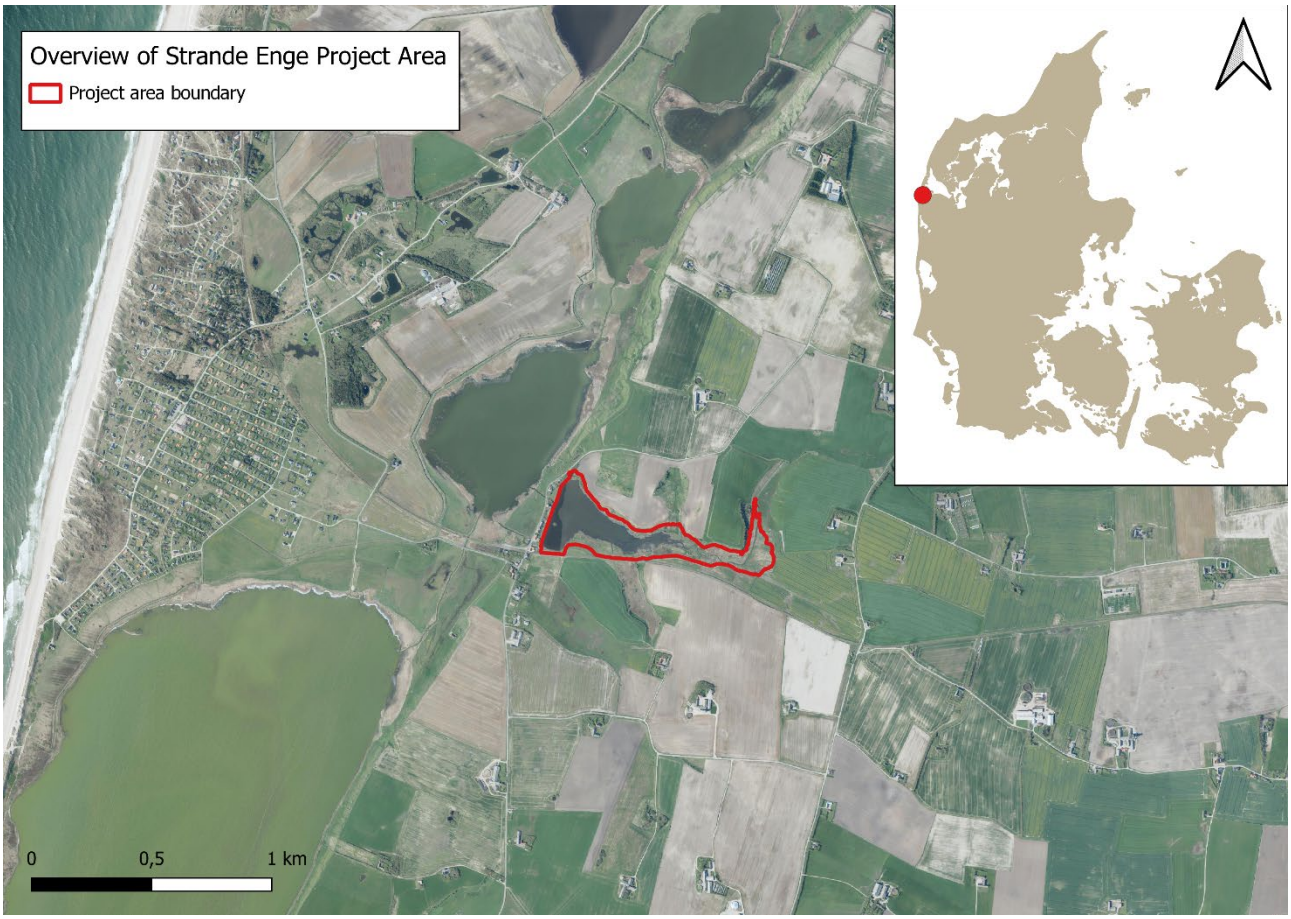
For at belyse disse sammenhænge kombinerer syntesen resultater fra både felt- og laboratorieundersøgelser. Et feltforsøg undersøgte effekten af næringsstoftilsætning i vådlagte områder med og uden topjordsfjernelse (Studie 1; Marker, 2025). Et laboratorieforsøg fokuserede på jordens mikrobielle respons på kontrollerede tilsætninger af kvælstof og fosfor (Studie 2; Haarder, 2025), mens et mesokosmosforsøg undersøgte betydningen af plantemateriale

omsætning fra forskellige vådområdearter for produktionen af drivhusgasser (Studie 3; Bjerrum, 2026). Samlet bidrager de tre studier til en bedre forståelse af de mekanismer, der regulerer emissionerne af CO_2, CH_4 og N_2O i vådlagte, næringsrige tørveøkosystemer.

2 Materiale og metoder

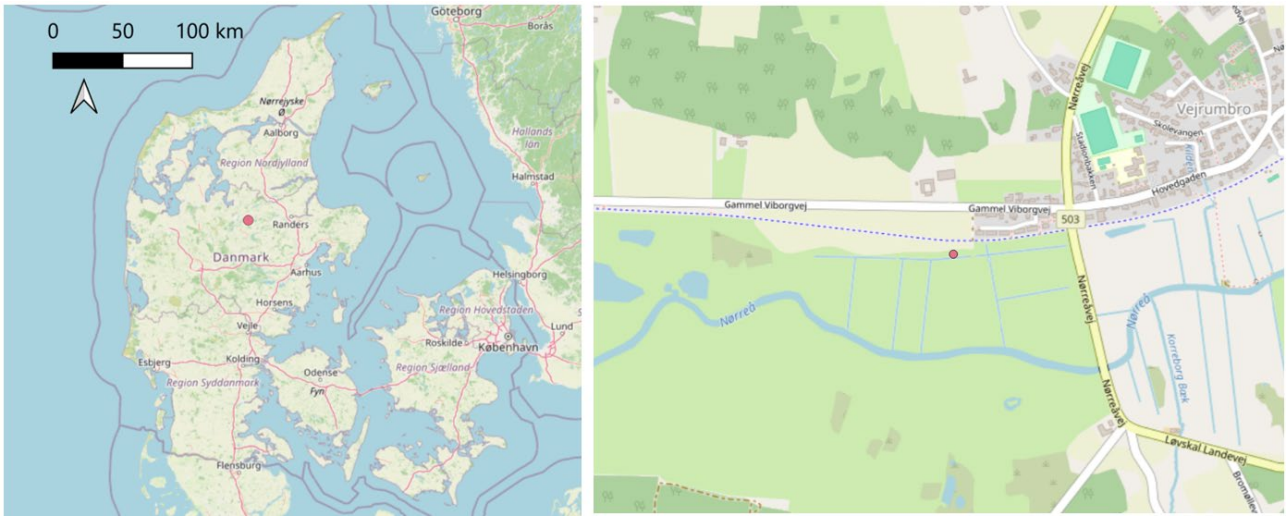
2.1 Studieområde

Undersøgelserne blev gennemført i to danske, vådlagte lavmoser beliggende i henholdsvis Vest- og Midtjylland. Hovedparten af undersøgelserne blev udført i Strande Enge nær Lemvig (Studie 1 og 2; 56,57°N, 8,17°E), hvor området blev vådlagt i 2022 ved lukning af dræn, opfyldning af grøfter og genetablering af naturlige hydrologiske forhold. En del af området fik samtidig fjernet de øverste 30 cm jord (topjordsfjernelse (TSR)), mens tilstødende områder blev efterladt med intakt topjord (NTSR). Området repræsenterer en næringsrig, vådlagt lavmose med markante forskelle i hydrologi, vegetation og jordegenskaber mellem TSR- og NTSR-områderne (Figur 2.1).



Figur 2.1. Oversigt over projektområdet Strande Enge. Hovedkortet viser det præcise område (rød afgrænsning) på et ortofoto, mens indsatskortet viser områdets placering i Danmark (Studie 1 og 2; Marker, 2025).

Derudover blev et vådlagt lavmoseområde ved Vejrumbro i Midtjylland (56,44°N, 9,55°E) anvendt til laboratorieundersøgelser (Studie 3) af forskellige planters betydning for drivhusgasproduktion (Figur 2.2). Området blev vådlagt gennem gradvis hævning af vandstanden ved blokering af dræn og grøfter.



Figur 2.2. Projektområdets beliggenhed i Vejrumbro, Jylland, Danmark (Studie 3; Bjerrum, 2026).

2.2 Forsøgsdesign

2.2.1 Studie 1: Felteksperiment med næringsstoftilførsel

I Strande Enge blev der etableret 16 permanente forsøgsplots i foråret 2025 (Figur 2.3). Otte plots blev placeret i TSR-området og otte i NTSR-området. Inden for hvert system modtog halvdelen af plottene en næringsstofbehandling (NP), mens den anden halvdel fungerede som kontrol. Dette resulterede i fire behandlinger: TSR-kontrol, TSR-NP, NTSR-kontrol og NTSR-NP.

Næringsstoftilførselen bestod af kvælstof og fosfor svarende til 100 kg N ha^{-1} $år^{-1}$ og 10 kg P ha^{-1} $år^{-1}$. Kvælstof blev tilført som en blanding af NH_4Cl og KNO_3 i forholdet 3:1 mellem NH_4^+-N og NO_3^--N, mens fosfor blev tilført som K_2HPO_4. Næringsstofferne blev tilført ved hjælp af modificerede dialysesamlere, der sikrede en gradvis frigivelse til porevandet.



Figur 2.3. Oversigt over studieområdet inden for projektområdet Strande Enge. Kortet til højre viser studieområdets placering (rød firkant) inden for det større projektområde (afgrænset med rødt). Hovedkortet viser de eksperimentelle plots (cirkler) med fire forskellige behandlinger, der kombinerer topjordsfjernelse (TSR), ingen topjordsfjernelse (NTSR), næringsstoftilsætning (NP) og kontrol. Sorte trekanter angiver placeringen af piezometre. Området afgrænset med sort markerer zonen med TSR-behandling (Studie 1; Marker, 2025).

2.2.2 Studie 2: Laboratorieforsøg med næringsstofberigelse

For at undersøge de mikrobielle effekter af næringsstofberigelse blev jordkerner indsamlet fra både TSR- og NTSR-områderne i Strande Enge og inkuberet under kontrollerede, anaerobe forhold i laboratoriet. Jordkernerne blev eksponeret for fire forskellige næringsstofniveauer: kontrol, lav, mellem og høj belastning. Behandlingerne bestod af tilsætning af NH_4Cl, KNO_3 og K_2HPO_4 svarende til kvælstofbelastninger på 10, 40 og 100 kg N ha^{-1} $år^{-1}$ ved et N:P-forhold på 10:1. Inkubationerne blev gennemført ved 21 °C i 14 dage.

2.2.3 Studie 3: Laboratorieforsøg med plantebiomasse

I Vejrumbro blev homogeniseret tørvejord inkuberet sammen med plantemateriale fra tre almindelige vådområdearter: dunhammer (*Typha latifolia*), lyse-siv (*Juncus effusus*) og mosarten Plæne-kransemos *Rhytidiadelphus squarrosus*. Formålet var at undersøge, hvordan planternes kvalitet som kulstofkilde påvirker produktionen af drivhusgasser. Fem replikater blev etableret for hver planetype samt en kontrol uden biomassetilførsel. Ét replikat af dunhammer blev udeladt af analyserne af gasproduktionen på grund af utilstrækkelig datadækning. Inkubationerne blev gennemført under anaerobe forhold i 15 dage.

2.3 Måling af drivhusgasflux

2.3.1 Feltmålinger

Fluxer af CO_2, CH_4 og N_2O blev målt hver anden uge fra april til august 2025 ved hjælp af transparente kamre koblet til LI-COR gasanalysatorer (Figur 2.4). CO_2- og CH_4-koncentrationer blev målt med en LI-7810, mens N_2O blev målt med en LI-7820. Koncentrationsændringer blev registreret kontinuerligt under kammermålingerne og anvendt til beregning af fluxer.

CO_2-udveksling blev målt under både lys- og mørkeforhold, hvorved nettoøkosystemudveksling (NEE), økosystemrespiration (Reco) og bruttoprimærproduktion (GPP) kunne beregnes. CH_4- og N_2O-fluxer blev målt under lysforhold.



Figur 2.4. Opstilling til gasmålinger i felten (Studie 1; Marker, 2025).

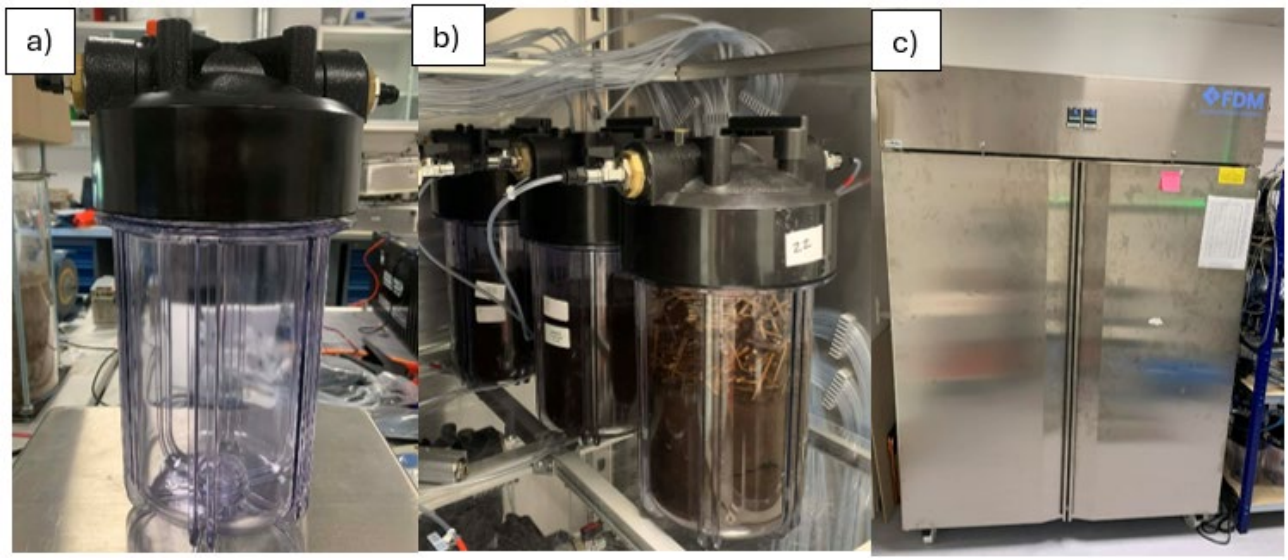
2.3.2 Laboratoriemålinger

I laboratorieforsøgene med næringsstoffer blev gasprøver udtaget gentagne gange fra inkubationernes headspace og analyseret ved hjælp af gaskromatografi. Koncentrationer af CH_4, CO_2 og N_2O blev anvendt til beregning af daglige og kumulative gasproduktioner (Figur 2.5).

I planteinkubationerne blev CO_2- og CH_4-produktionen målt automatisk ved hjælp af et Mini Mesocosm-system koblet til en Los Gatos Research gasanalysator (Figur 2.6). Systemet overvågede kontinuerligt koncentrationsændringer i de enkelte inkubationskamre under konstant skylning med N_2-gas. Fluxerne blev efterfølgende normaliseret til enten jord- eller biomassemængde.



Figur 2.5. Forsøgsopstilling, der viser **til venstre** en plexiglaskerne (⌀ 46 mm) med 3 mm huller indsat i jorden på undersøgelseslokaliteten i Strande Enge; og **til højre jordkernen** placeret i et 0,5 L inkubationsglas indeholdende 235 mL næringsopløsning og forseglet med et låg forsynet med et butylgummiseptum (Studie 2; Haarder, 2025).



Figur 2.6. Laboratorieopstilling, der viser: a) et tomt mini-mesokosmos, b) et mini-mesokosmos med jord, vand og plantemateriale tilsluttet forsøgsopstillingen, og c) temperaturkammeret, hvori mini-mesokosmerne blev placeret under eksperimentet (Studie 3; Bjerrum, 2026).

2.4 Hydrologiske og miljømæssige målinger

Porevand blev indsamlet med dialysesamlere installeret i hvert forsøgsplot (Studie 1) og analyseret for indhold af total opløst kvælstof (TDN) og total opløst fosfor (TDP) (Marker, 2025).

Jordfugtighed og jordtemperatur blev registreret kontinuerligt i hvert forsøgsplot (Studie 1) ved hjælp af sensorer placeret cirka 10 cm under

jordoverfladen (Dragino LSE01 LoRaWAN Soil Moisture & EC Sensor, Dragino Technology, Shenzhen, China). Vegetationssammensætningen i TSR- og NTSR-områderne blev kortlagt ved artsregistreringer.

2.5 Jord- og planteanalyser

Jordprøver blev analyseret for tørstofindhold, organisk stof og tør volumenvægt.

Plantemateriale fra Vejrumbro (Studie 3) blev analyseret for indhold af kulstof og kvælstof (C:N-forhold). Til karakterisering af det opløste organiske stof (DOM) i porevandet efter inkubation blev der anvendt excitation-emissionsmatrix (EEM) fluorescensspektroskopi (Horiba Aqualog), som måler fluorescensintensiteten over et gitter af excitations- og emissionsbølgelængder og dermed muliggør detektion af protein-, humus- og mikrobielt afledte fluoroforer. Fra disse data blev det biologiske indeks (BIX) beregnet som forholdet mellem fluorescensintensiteten ved excitation 310 nm og emission 380 nm (svarende til den såkaldte M-top) og fluorescensintensiteten ved samme excitation og emission 430 nm (C-toppen) (Huguet et al., 2009). BIX anvendes som et mål for andelen af nyproduceret, autoktont (mikrobielt afledt) DOM i en prøve; høje værdier (typisk > 1) indikerer en overvejende biologisk oprindelse, mens lave værdier afspejler mere humificeret eller terrestrisk afledt materiale.

For at estimere den enkelte plantearts overjordiske primærproduktion blev vegetationen høstet i fem plots à 1 m² pr. plantetype i slutningen af juli 2026. Forud for høst blev plantedækningen registreret i hvert plot. Den høstede biomasse blev vejet og tørret ved 60 °C, hvorefter tørvægten blev anvendt som indeks for artens gennemsnitlige overjordiske produktivitet (g tørstof m^{-2}). Da biomassen er målt på ét tidspunkt, repræsenterer den en standing crop og ikke en årlig produktionsrate. Ved beregning af de estimerede daglige fluxer af CO_2 og CH_4 (Tabel 3.4) blev der antaget 100 % dække af den pågældende plantetype; de angivne feltfluxer repræsenterer derfor et øvre skøn for den daglige emission fra et areal domineret fuldstændigt af én vegetationstype, snarere end en direkte måling af faktiske feltemissioner under naturlig, blandet vegetation.

2.6 Statistiske analyser

Alle statistiske analyser blev gennemført i R (R Core Team, 2023, 2025). Feltdata (Studie 1) blev analyseret med lineære mixed-effect modeller (LMM) i pakken lmerTest (Kuznetsova et al., 2017), hvor behandling (næringsstoffer versus kontrol) og system (TSR versus NTSR) indgik som faste effekter, mens plot blev behandlet som en tilfældig effekt for at tage højde for gentagne målinger. CH_4- og N_2O-fluxer blev log-transformerede, og signifikans blev vurderet med type III ANOVA med Satterthwaites metode.

Data fra næringsstofinkubationerne (Studie 2) blev analyseret med LMM i pakken nlme (Pinheiro et al., 2025). Jordtype og næringsstofbehandling indgik som faste effekter, inkubationsglas som tilfældig effekt, og tidslig autokorrelation inden for hvert glas indgik i modellerne. Responsvariablene var log-transformerede, normaliserede headspace-koncentrationer af CH_4, CO_2 og N_2O. Modeller blev sammenlignet med AIC og likelihood ratio-test, og interaktioner blev ikke bibeholdt i de endelige modeller, da de ikke forbedrede dem signifikant. Parvise sammenligninger mellem næringsstofniveauer blev udført med pakken emmeans (Lenth, 2025).

I planteinkubationerne (Studie 3) blev generaliserede additive modeller (GAM) estimeret med pakken mgcv til at beskrive tidslige ændringer i CO_2- og CH_4-produktionen mellem plantetyperne. Modellerne blev baseret på daglige gennemsnitsfluxer pr. replikat (mg gas g^{-1} substrat dag^{-1}) og inkluderede plantetype og en separat glat tidskurve for hver plantetype som faste effekter samt replikat som tilfældig effekt. Den fulde model (Model 1 for CO_2 og Model 2 for CH_4) havde formen flux (log-modulus) ~ substrattype + s(inkubationsdag, by = substrattype, k = 7) + s(replikat, bs = "re"), hvor substrattype er kontrol og de tre plantetyper, estimeret med Gaussisk fejlfordeling og REML. Hver komponents bidrag blev vurderet ved at sammenligne forklaret varians (justeret R^2) for den fulde model med fire reducerede modeller: uden substrattype (Model 3), uden substrattype-specifikke tidskurver (Model 4), uden inkubationstid (Model 5) og uden replikat (Model 6). Da fluxene indeholdt både positive og negative værdier, blev de log-modulus-transformerede (sign(x) × log(|x| + 1)). Forskelle mellem tidskurver blev undersøgt med pakken itsadug. Forskelle i C:N-forhold og BIX mellem plantetyperne blev testet med envejs-ANOVA efterfulgt af Tukeys HSD-test.

Antagelserne om normalfordelte residualer og ensartet varians vedrører modellernes residualer og ikke de rå data. I Studie 1 blev log-transformationen af CH_4- og N_2O-fluxer anvendt for at stabilisere variansen og normalisere residualerne. I Studie 2 viste residualerne enkelte afvigelser fra normalitet, men LMM er robuste over for sådanne afvigelser (Schielzeth et al., 2020). I Studie 3 blev modelantagelserne vurderet visuelt med gam.check (QQ-plot, histogram og residualplots samt k-indeks og concurvity); residualerne viste afvigelser i halerne, og for CH_4 også let krumning og stigende spredning ved høje værdier, hvorfor tidskurverne bør fortolkes med forsigtighed. Der henvises til Zuur et al. (2009) for mixed-effect modeller og Wood (2017) for GAM som metodisk baggrund.

3 Resultater

3.1 Effekten af topjordsfjernelse og næringsstoftilførsel på drivhusgasdynamikker

Topjordsfjernelse (TSR) medførte markante ændringer i jordens biogeokemiske egenskaber og drivhusgasemissioner sammenlignet med områder, hvor tørvejorden var intakt (NTSR). På tværs af både feltmålinger og laboratorieforsøg var TSR-jorde generelt karakteriseret ved lavere næringsstofindhold, men uventet højere metanproduktion end NTSR-jorde.

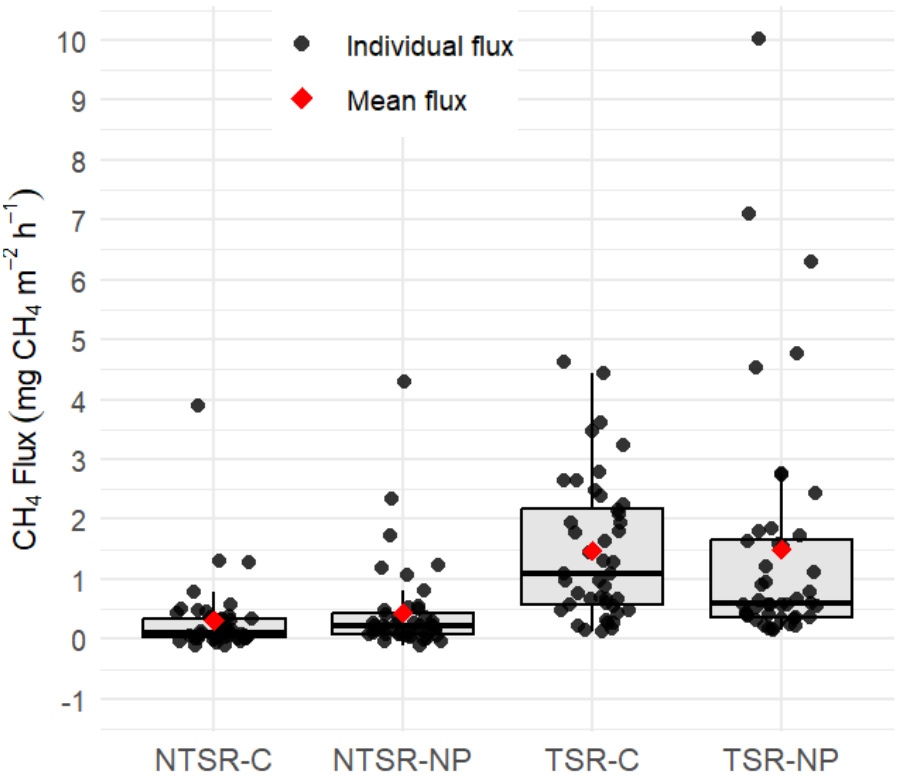
Feltmålingerne (Studie 1) viste overraskende højere CH_4-emissioner fra TSR-områder end fra NTSR-områder, med en medianflux på 1,09 mg CH_4 m^{-2} h^{-1} i TSR-kontrol mod 0,10 mg CH_4 m^{-2} h^{-1} i NTSR-kontrol – det modsatte af den forventede effekt af fjernelse af det næringsrige øverste tørvelag (Figur 3.1). TSR-arealerne udviste desuden højere og mere stabil jordfugtighed end NTSR-arealerne gennem hele prøvetagningsperioden (Figur 3.3), hvilket betyder, at effekten af topjordsfjernelse ikke kunne adskilles fra de hydrologiske forskelle i det eksperimentelle design. Et tilsvarende mønster for CH_4 blev observeret i laboratorieinkubationerne (Studie 2), hvor den kumulative CH_4-produktion var omkring ti gange højere i TSR-jorde end i NTSR-jorde gennem hele inkubationsperioden (uddybet i afsnittet om næringsstoftilførsel, Figur 3.4). TSR- og NTSR-arealerne adskilte sig desuden i vegetationssammensætning: TSR-arealerne var domineret af lyse-siv (*Juncus effusus)*, mens NTSR-arealerne var domineret af mere tætvoksende græsser og halvgræsser, primært krybhvene (*Agrostis stolonifera)*, rørgræs (*Phalaris arundinacea)* og håret star (*Carex hirta)*.

CO_2-fluxerne viste mere variable responser, hvor både hydrologiske forhold og tilgængeligheden af organisk substrat bidrog til de observerede forskelle mellem behandlingerne (Figur 3.2). N_2O-emissionerne var generelt lave på tværs af alle behandlinger og udviste betydelig tidslig variation.

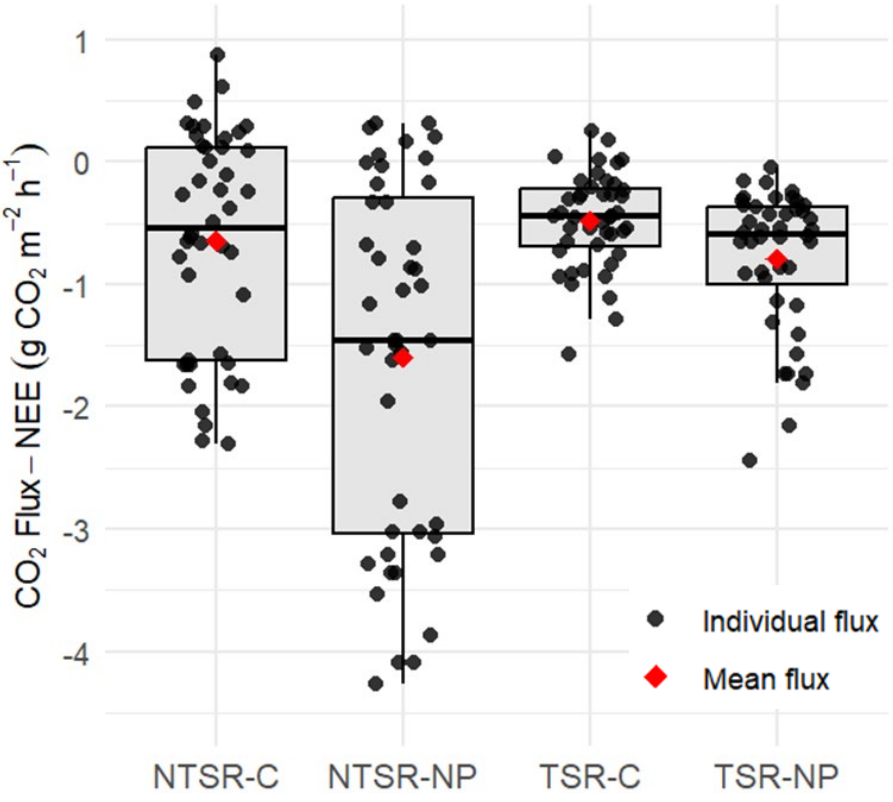
I felteksperimentet (Studie 1) blev effekten af topjordsfjernelse (System: TSR vs. NTSR) og næringsstoftilførsel (Behandling: NP vs. kontrol) testet med lineære mixed-effect modeller (Tabel 3.1). Der blev her anvendt ét næringsstofniveau mod en kontrol; de graduerede niveauer indgår i laboratorieforsøget (Tabel 3.2). Næringsstoftilførsel havde ingen signifikant effekt på CH_4 ($p = 0{,}90$) eller N_2O ($p = 0{,}61$). Topjordsfjernelse havde derimod en tydelig effekt: CH_4-fluxen var ca. tre gange højere i TSR end i NTSR (estimat 1,08 på ln-skala, $p < 0{,}001$), mens N_2O-fluxen var ca. 60 % lavere (estimat −0,94, $p < 0{,}001$). For CO_2 (GPP) havde både system og næringsstoftilførsel signifikante, uafhængige effekter (begge $p < 0{,}001$): GPP var lavere i TSR og højere med næringsstoftilførsel. For CO_2 (NEE) var interaktionen mellem system og behandling signifikant ($p = 0{,}03$): næringsstoftilførsel øgede nettooptaget tydeligt i NTSR (−0,95 g CO_2 m^{-2} h^{-1}), men kun svagt i TSR (−0,95 + 0,64 = −0,31 g CO_2 m^{-2} h^{-1}, summen af de to estimater). CH_4- og N_2O-estimater er baseret på naturlige logaritmer og udtrykker proportionale forskelle, mens CO_2-estimater er angivet i g CO_2 m^{-2} h^{-1}.

Tabel 3.1. Resultater fra lineære mixed-effect modeller (LMM) for effekten af topjordsfjernelse (System: TSR vs. NTSR) og næringsstoftilførsel (Behandling: NP vs. kontrol) på drivhusgasfluxer i felteksperimentet ved Strande Enge (Studie 1; Marker, 2025). I felteksperimentet blev der kun anvendt ét næringsstofniveau (100 kg N og 10 kg P ha^{-1} $år^{-1}$) sammenlignet med en kontrol uden tilførsel; de graduerede næringsstofniveauer (10, 40 og 100 kg N ha^{-1} $år^{-1}$) indgår i laboratorieforsøget (Tabel 3.2). Estimaterne angiver forskellen i forhold til referenceniveauet (NTSR, kontrol), som indgår i intercept. System × Behandling angiver, om effekten af næringsstoftilførsel afhænger af systemet; leddet er kun vist for CO_2 (NEE). Plot indgik som tilfældig effekt for at tage højde for gentagne målinger. CO_2-estimater er angivet i g CO_2 m^{-2} h^{-1} (NEE: negative værdier = nettooptag; GPP: positive værdier = bruttooptag). CH_4 og N_2O er ln-transformerede, og estimaterne udtrykker derfor proportionale forskelle. df = frihedsgrader (Satterthwaite). Fed skrift markerer p < 0,05.

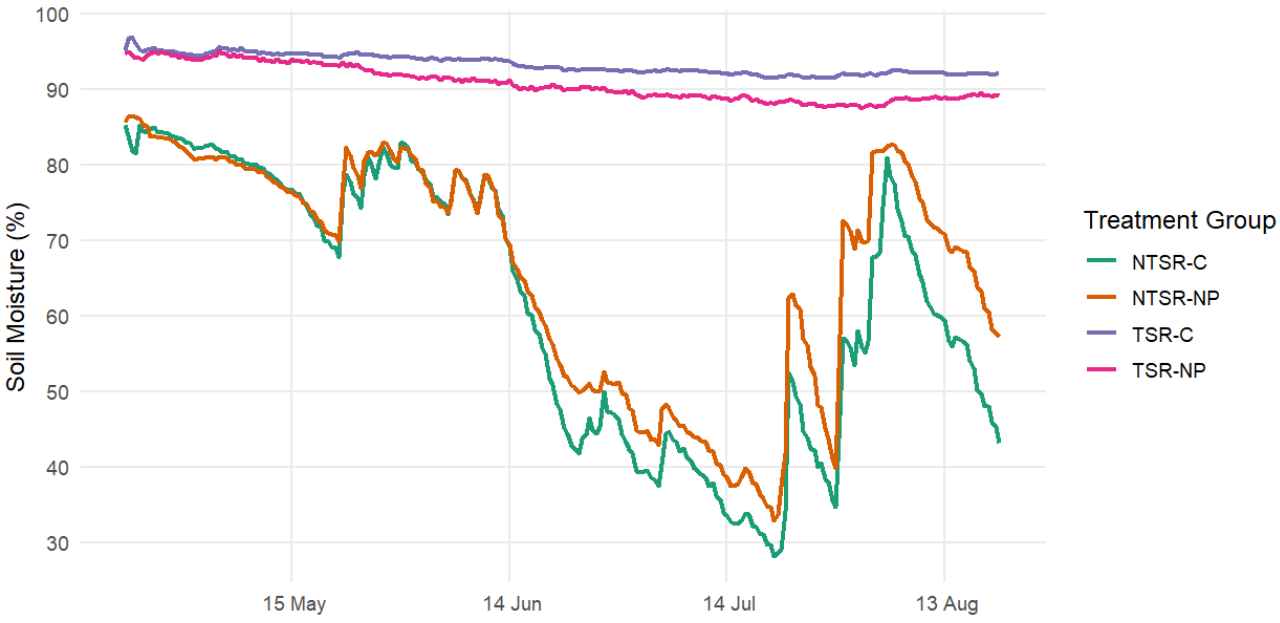
Model	Fast effekt	Estimat	SE	Df	t	p
CO_2 (NEE)	Intercept (NTSR, kontrol)	−0,64	0,14	12	−4,61	**<0,001**
	System (TSR vs. NTSR)	0,16	0,19	12	0,84	0,41
	Behandling (NP vs. kontrol)	−0,95	0,19	12	−4,80	**<0,001**
	System × Behandling	0,64	0,28	12	2,39	**0,03**
CO_2 (GPP)	Intercept (NTSR, kontrol)	2,33	0,15	157	14,99	**<0,001**
	System (TSR vs. NTSR)	−1,39	0,17	157	−7,74	**<0,001**
	Behandling (NP vs. kontrol)	0,64	0,17	157	3,60	**<0,001**
CH_4 (ln)	Intercept (NTSR, kontrol)	−0,92	0,20	13	−4,57	**<0,001**
	System (TSR vs. NTSR)	1,08	0,23	13	4,67	**<0,001**
	Behandling (NP vs. kontrol)	0,02	0,23	13	0,11	0,90
N_2O (ln)	Intercept (NTSR, kontrol)	−2,42	0,16	13	−15,05	**<0,001**
	System (TSR vs. NTSR)	−0,94	0,16	13	−5,06	**<0,001**
	Behandling (NP vs. kontrol)	0,09	0,18	13	0,51	0,61



Figur 3.1. Boksplot, der viser CH_4-fluxen (mg CH_4 m^{-2} h^{-1}) for de fire behandlingsgrupper: NTSR-C (kontrol, ingen topjordsfjernelse), NTSR-NP (næringsstofbehandling, ingen topjordsfjernelse), TSR-C (kontrol, topjordsfjernelse) og TSR-NP (næringsstofbehandling, topjordsfjernelse). Y-aksen repræsenterer CH_4-fluxen, hvor positive værdier angiver nettoudledning af CH_4. Hver boks viser interkvartilområdet (1. til 3. kvartil), og medianen er angivet med den vandrette linje. Sorte prikker repræsenterer individuelle fluxmålinger, mens røde diamanter angiver den gennemsnitlige flux for hver gruppe. Figuren viser rå, utransformerede fluxer; de statistiske analyser blev udført på ln-transformerede værdier, jf. Tabel 3.1 (Studie 1; Marker, 2025).



Figur 3.2. Boksplot, der viser CO_2-fluxen (NEE, g CO_2 m^{-2} h^{-1}) for de fire behandlingsgrupper: NTSR-C (kontrol, ingen topjordsfjernelse), NTSR-NP (næringsstofbehandling, ingen topjordsfjernelse), TSR-C (kontrol, topjordsfjernelse) og TSR-NP (næringsstofbehandling, topjordsfjernelse). Y-aksen repræsenterer nettoøkosystemets CO_2-udveksling (NEE), hvor negative værdier angiver optag af CO_2. Hver boks viser interkvartilområdet (1. til 3. kvartil), og medianen er angivet med den vandrette linje. Sorte prikker repræsenterer individuelle fluxmålinger, mens røde diamanter angiver den gennemsnitlige flux for hver gruppe (Studie 1; Marker, 2025).



Figur 3.3. Udvikling i gennemsnitlig jordfugtighed (%) over tid for de forskellige behandlingsgrupper under prøvetagningskampagnen (22. april 2025 til 20. august 2025) (Studie 1; Marker, 2025). NTSR-C = kontrol, ingen topjordsfjernelse, NTSR-NP = næringsstofbehandling, ingen topjordsfjernelse, TSR-C = kontrol, topjordsfjernelse, TSR-NP = næringsstofbehandling, topjordsfjernelse.

3.2 Effekten af næringsstoftilførsel

Tilførsel af næringsstoffer havde generelt begrænset effekt på drivhusgasemissionerne under både felt- og laboratorieforhold. Selvom næringsstofbehandlingerne resulterede i højere koncentrationer af kvælstof og fosfor i porevandet, var responsen i drivhusgasproduktionen svag og inkonsekvent.

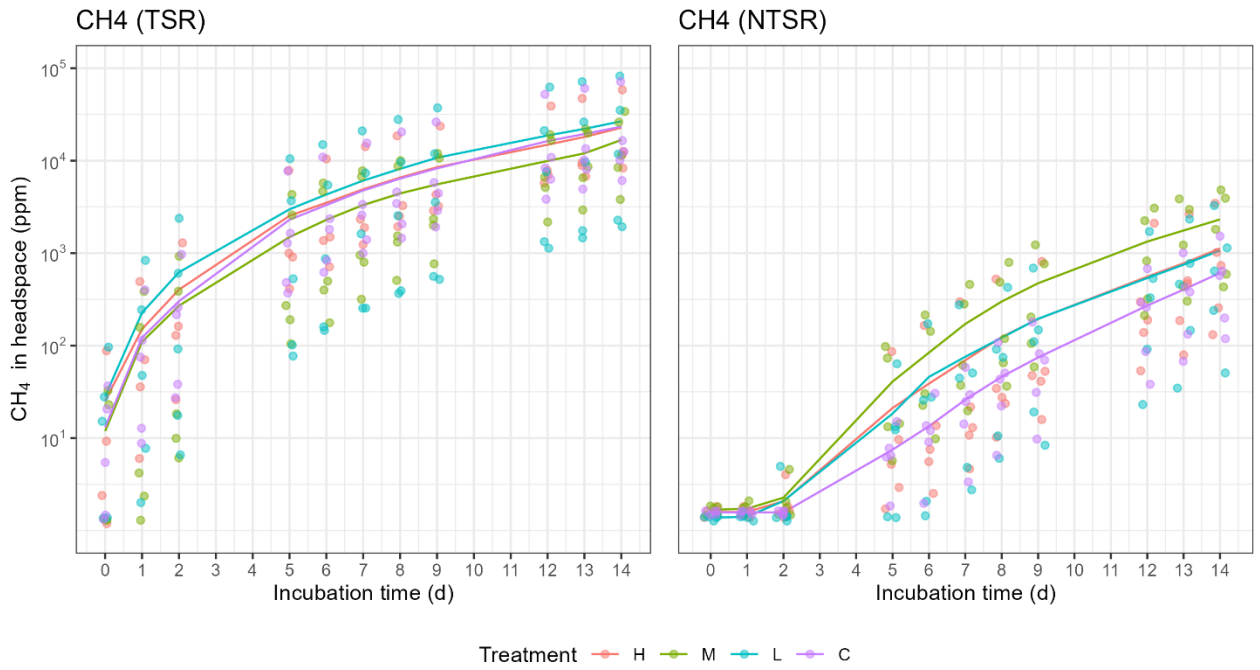
I felteksperimentet (Studie 1) førte næringsstoftilførsel ikke til højere emissioner af CH_4 eller N_2O (ingen signifikant effekt; $p = 0,90$ og $p = 0,61$; Figur 3.1, Tabel 3.1). For CO_2 øgede næringsstoftilførslen derimod det fotosyntetiske optag (GPP, $p < 0,001$), og nettooptaget (NEE) var størst i NTSR (Figur 3.2, Tabel 3.1). Forskellen mellem TSR og NTSR var langt større end effekten af næringsstoftilførslen for både CH_4 og N_2O (Tabel 3.1).

Laboratorieinkubationerne (Studie 2) viste tilsvarende begrænsede effekter af øget næringsstoftilgængelighed. Næringsstoftilførsel stimulerede ikke metanproduktionen i hverken TSR- eller NTSR-jorde, hvilket indikerer, at næringsstofmangel ikke var den primære begrænsende faktor for drivhusgasproduktionen i de undersøgte vådområder (Figur 3.4 og Figur 3.5). De statistiske modeller for laboratorieinkubationerne understøttede dette billede (Tabel 3.2). For CH_4 og CO_2 havde hverken næringsniveau (Høj, Mellem, Lav, Kontrol) eller system nogen signifikant effekt (alle $p > 0,05$), på nær en svag effekt af system på CH_4 ($p = 0,03$). For N_2O havde den højeste næringsbelastning (Høj) derimod en klar, signifikant effekt (estimat = 1,47, $p < 0,001$), mens de lavere niveauer (Mellem, Lav) ikke adskilte sig fra kontrollen. Post hoc-sammenligninger bekræftede, at det høje niveau (Høj) var signifikant forskellig fra alle øvrige niveauer, mens der ikke var forskel mellem kontrol, lav og mellem. Nitrat i inkubationsvandet blev forbrugt i alle behandlinger (fuldstændigt i lav og 60–80 % i Mellem og Høj), nitrit blev dannet i løbet af de første fem dage og var tæt på nul ved forsøgets afslutning, og N_2O blev dannet og efterfølgende forbrugt (Haarder, 2025).

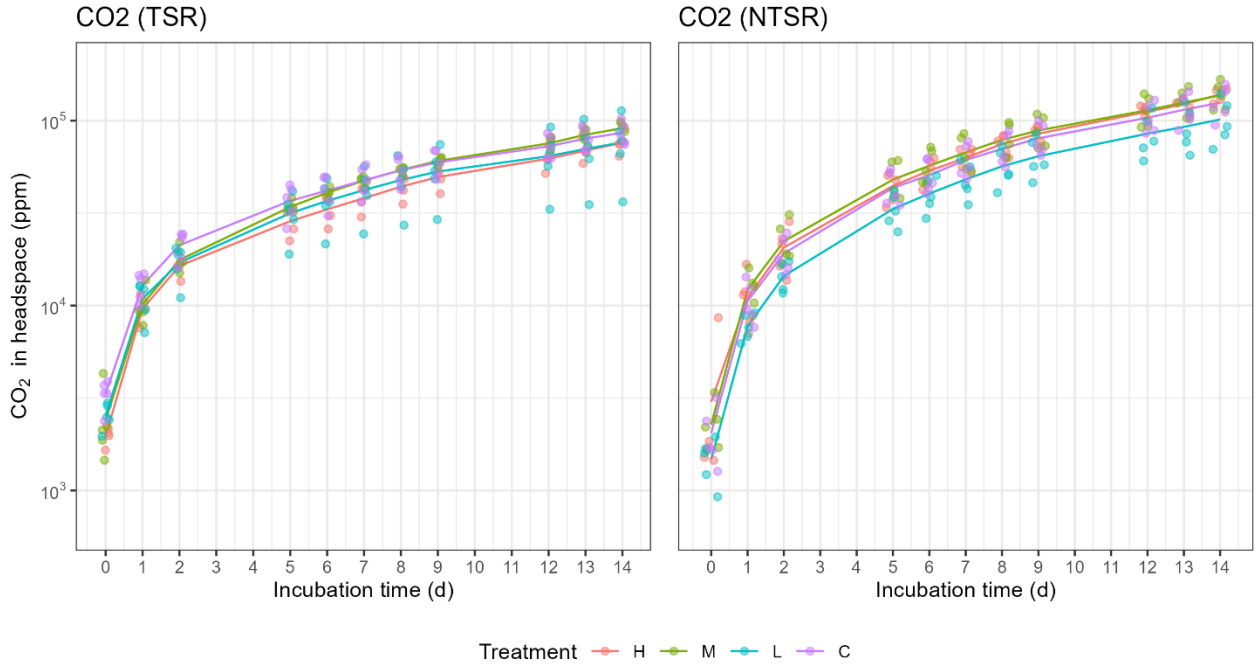
Tabel 3.2. Resultater fra lineære mixed-effect modeller (LMM) for effekten af næringsstofbehandling og jordtype på drivhusgaskoncentrationer (ppm) i headspace fra laboratorieinkubationer af tørvejord (Studie 2; Haarder, 2025). Frihedsgrader er ens på tværs af modellerne: df = 390 for intercepts og df = 34 for faste effekter. Næringsniveau, H = høj, M = mellem, L = lav.

Model	Fast effekt	Estimat	SE	df	t	p
CH_4 (ln)	Intercept	3,354	1,196	390/34	2,80	0,0053
	System (TSR)	2,423	1,082		2,24	0,0317
	H	0,133	1,551		0,09	0,9323
	M	0,222	1,508		0,15	0,8841
	L	0,014	1,508		0,01	0,9925
CO_2 (ln)	Intercept	10,01	0,530	390/34	18,9	<0,001
	System (TSR)	−0,125	0,479		−0,26	0,7947
	H	−0,074	0,687		−0,11	0,9148
	M	−0,011	0,668		−0,02	0,9872
	L	−0,235	0,668		−0,35	0,7276
N_2O (ln)	Intercept	−0,828	0,237	390/34	−3,49	<0,001
	System (TSR)	−0,340	0,214		−1,59	0,1216
	H	1,472	0,307		4,79	<0,001
	M	0,567	0,299		1,90	0,0661
	L	0,001	0,299		0,00	0,9976

Samlet set peger resultaterne på, at den mikrobielle drivhusgasproduktion i højere grad var styret af andre faktorer, herunder substrattilgængelighed og redoxforhold, end af næringsstofniveauet alene.



Figur 3.4. Plot, der viser CH_4-koncentrationen i inkubationernes headspace (ppm, logaritmisk y-akse) over 14 dages inkubation for jord med topjordsfjernelse (TSR, venstre) og uden topjordsfjernelse (NTSR, højre). Farverne angiver næringsstofbelastning: H (høj), M (mellem), L (lav) og C (kontrol). Punkterne viser de enkelte replikater (n = 5 pr. behandling og dag) og er let forskudt i x-retningen for at undgå overlap. De optrukne linjer forbinder middelværdien af de fem replikater for hver behandling på målingsdagene (dag 0, 1, 2, 5–9 og 12–14) med rette linjestykker; de angiver ikke et modelfit og ikke målinger mellem målingsdagene (Studie 2; Haarder, 2025).



Figur 3.5. Plot, der viser CO_2-koncentrationen i inkubationernes headspace (ppm, logaritmisk y-akse) over 14 dages inkubation for jord med topjordsfjernelse (TSR, venstre) og uden topjordsfjernelse (NTSR, højre). Farverne angiver næringsstofbelastning: H (høj), M (mellem), L (lav) og C (kontrol). Punkterne viser de enkelte replikater (n = 5 pr. behandling og dag) og er let forskudt i x-retningen for at undgå overlap. De optrukne linjer forbinder middelværdien af de fem replikater for hver behandling på målingsdagene (dag 0, 1, 2, 5–9 og 12–14) med rette linjestykker; de angiver ikke et modelfit og ikke målinger mellem målingsdagene (Studie 2; Haarder, 2025).

3.3 Effekten af plantematerialets kvalitet på kulstofomsætning

I modsætning til næringsstoftilførslen havde kvaliteten af plantematerialet i planteinkubationerne (Studie 3) en markant effekt på kulstofomsætningen og produktionen af drivhusgasser. Analyser af plantematerialets kemiske sammensætning viste tydelige forskelle i C:N-forhold mellem de tre arter i det plantemateriale, der blev anvendt i inkubationerne (høstet i april): lyse-siv (*Juncus effusus;* 32,5) og plæne-kransemos (*Rhytidiadelphus squarrosus;* 35,3) havde lave og ikke signifikant forskellige C:N-forhold, mens dunhammer (*Typha latifolia)* havde et markant højere C:N-forhold (79,3; envejs-ANOVA: $F(2,6) = 244$, $p = 1{,}79\times10^{-6}$; Tukey: $p < 0{,}001$ for forskellen til hver af de to øvrige arter, som ikke adskilte sig fra hinanden, $p = 0{,}538$).

Tilsætning af strøelse stammende fra de tre typer vådområdeplanter til homogeniseret tørvejord resulterede i store forskelle i produktionen af både CO_2 og CH_4 (Figur 3.6). Sammenlignet med kontrolbehandlingen uden tilsat plantemateriale, hvor gasproduktionen var minimal for begge gasser, viser dette, at langt størstedelen af den målte CO_2- og CH_4-produktion i disse inkubationer stammede fra det tilsatte plantemateriale snarere end fra jordens eget organiske kulstoflager. Letomsætteligt plantemateriale stimulerede den mikrobielle aktivitet og øgede kulstofmineraliseringen betydeligt, mens mere svært nedbrydeligt materiale gav svagere responser.

Effekten var særligt udtalt for metanproduktionen. Nogle plantetyper førte til væsentligt højere CH_4-produktion end kontrolbehandlingerne uden tilsætning af strøelse, hvilket understreger betydningen af let tilgængeligt organisk kulstof for metanogene processer (Figur 3.6).

Sammensætningen af det opløste organiske stof (DOM) i porevandet efter inkubation adskilte sig mellem plantetyperne. BIX-indekset, som angiver andelen af nyproduceret, mikrobielt afledt DOM, var signifikant højere for *Juncus effusus* end for både *Rhytidiadelphus squarrosus* og *Typha latifolia* (envejs-ANOVA mellem de tre plantetyper: $F(2,12) = 25{,}14$, $p = 5{,}12\times10^{-5}$; Tukey-test: $p = 7{,}4\times10^{-5}$ og $p = 3{,}1\times10^{-4}$), mens *Rhytidiadelphus squarrosus* og *Typha latifolia* ikke adskilte sig fra hinanden ($p = 0{,}625$; Figur 3.7). Sammen med forskellene i C:N-forhold tyder dette på, at plantematerialets kemiske sammensætning påvirkede de mikrobielle processer og dermed drivhusgasproduktionen.

De generaliserede additive modeller (GAM) bekræftede, at både vegetationstype og tidslig udvikling bidrog væsentligt til at forklare variationen i gasproduktionen, med Kontrol (ren jord uden plantemateriale) som referenceniveau (Tabel 3.3). Modellerne blev baseret på daglige gennemsnitsfluxer pr. replikat ($n = 294$) for at reducere autokorrelation mellem gentagne målinger inden for samme dag. For CO_2 havde alle tre plantetyper signifikant højere flux end Kontrol (alle $p < 0{,}001$), med den største effekt for *Juncus effusus*, efterfulgt af *Typha latifolia* og *Rhytidiadelphus squarrosus*. Modellen forklarede 94,9 % af variationen i CO_2-fluxen. For CH_4 havde *Juncus effusus* og *Typha latifolia* begge signifikant højere flux end Kontrol (begge $p < 0{,}001$), mens *Rhytidiadelphus squarrosus* ikke adskilte sig signifikant fra Kontrol ($p = 0{,}079$) — hvilket tyder på, at mosarten bidrog forholdsvis lidt til metanproduktionen ud over jordens egen baggrundsflux. Modellen forklarede 95,2 % af variationen i CH_4-fluxen. Sammenligning med reducerede modeller viste, at inkubationstid bidrog væsentligt til begge modellers forklaringskraft (uden tidsleddet faldt den forklarede varians til hhv. 63,7 % for CO_2 og 58,8 % for CH_4), og at plantetype-specifikke tidskurver forbedrede modellerne yderligere (uden disse faldt den

forklarede varians til hhv. 73,3 % og 84,3 %; Tabel 3.3). Efterfølgende parvise sammenligninger af de tidslige forløb viste, at *Rhytidiadelphus squarrosus* adskilte sig signifikant fra *Juncus effusus* gennem stort set hele inkubationsperioden for begge gasser, mens *Typha latifolia* og *Juncus effusus*' tidslige forløb konvergerede i midten af perioden, men divergerede igen mod slutningen, hvor *Typha latifolia* havde de højeste CH_4-fluxe.

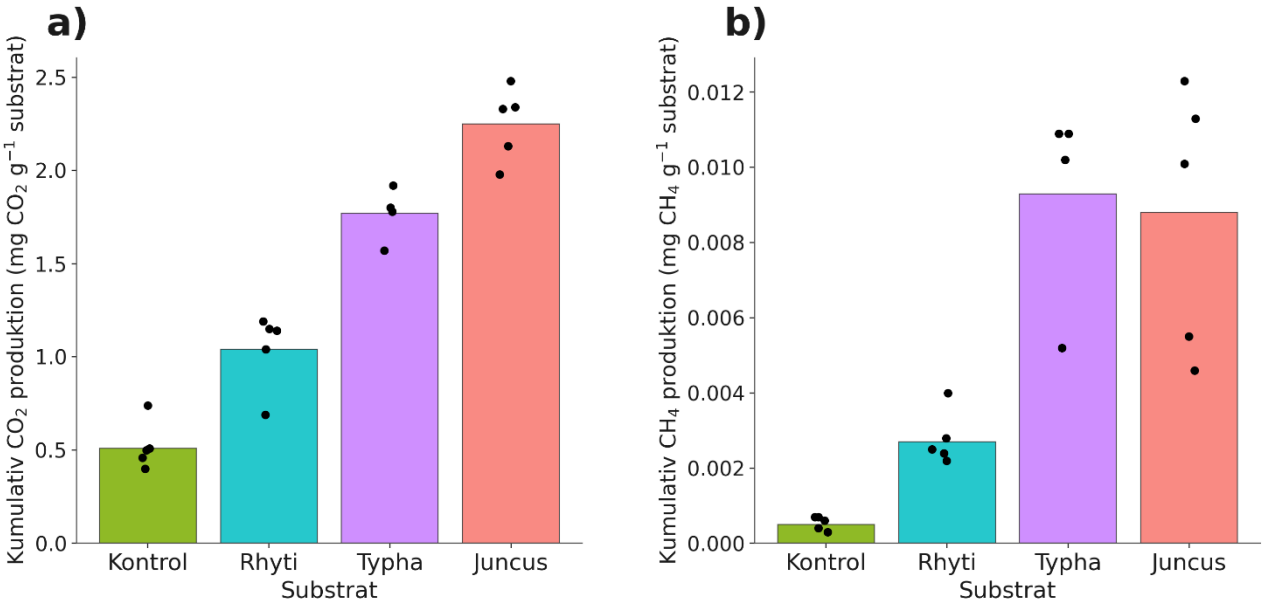
Tabel 3.3. GAM-modelresultater, planteinkubation (Studie 3; Bjerrum, 2026), baseret på daglige gennemsnitsfluxer pr. replikat (n = 294) for at reducere autokorrelation mellem gentagne målinger inden for samme dag. Modelstruktur og alternative modeller (Model 3–6) er beskrevet i afsnittet om statistiske analyser. Parametriske led (baseline-forskelle, reference = Kontrol):

Respons	Led	Estimat	SE	t	p
CO_2	Intercept (Kontrol)	0,0319	0,00379	8,43	<0,001
	J. effusus	0,0974	0,00535	18,19	<0,001
	R. squarrosus	0,0397	0,00538	7,38	<0,001
	T. latifolia	0,0719	0,00568	12,67	<0,001
CH_4	Intercept (Kontrol)	$3{,}04\times10^{-5}$	$6{,}18\times10^{-5}$	0,49	0,623
	J. effusus	$5{,}23\times10^{-4}$	$8{,}73\times10^{-5}$	5,99	<0,001
	R. squarrosus	$1{,}54\times10^{-4}$	$8{,}74\times10^{-5}$	1,76	0,079
	T. latifolia	$5{,}60\times10^{-4}$	$9{,}26\times10^{-5}$	6,04	<0,001

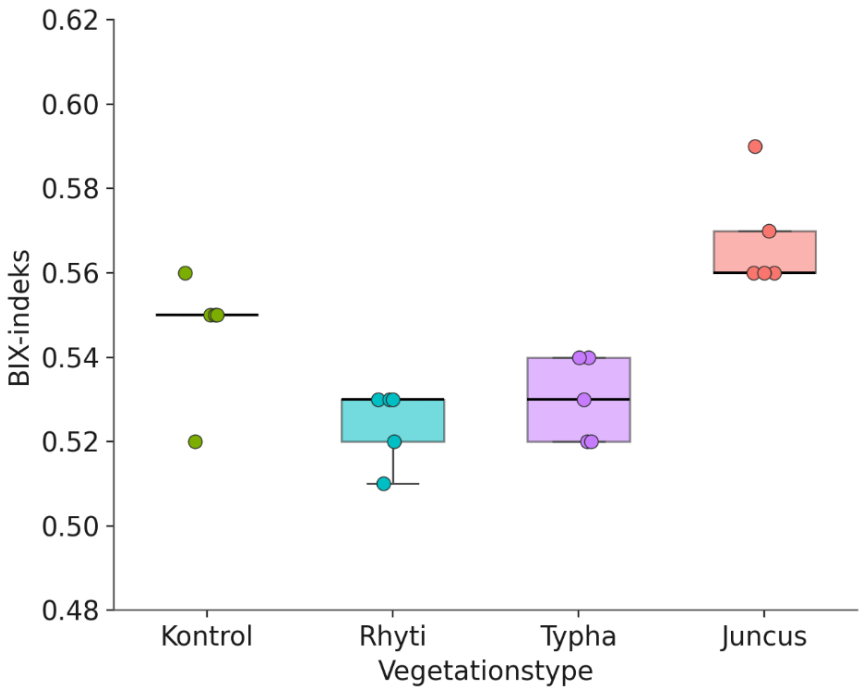
Bidrag af modelkomponenter til forklaret varians:

Respons	Model	Forklaret varians (%)
CO_2	Fuld model	94,9
	Uden tidsled	63,7
	Uden substrat-specifik tidskurve	73,3
CH_4	Fuld model	95,2
	Uden tidsled	58,8
	Uden substrat-specifik tidskurve	84,3

Modelfit: CO_2: forklaret varians = 94,9 %, n = 294. CH_4: forklaret varians = 95,2 %, n = 294.



Figur 3.6. Kumulativ a) CO_2- og b) CH_4-produktion (mg gas g^{-1} substrat) fra jordinkubationer uden tilsat plantemateriale (Kontrol) og med strøelse fra tre vådområdeplanter: mosarten *Rhytidiadelphus squarrosus*, dunhammer (*Typha latifolia*) og lyse-siv (*Juncus effusus*), akkumuleret over inkubationsperioden. Søjler viser gennemsnit, punkter viser individuelle replikater (n = 5, undtagen *Typha latifolia* hvor n = 4) (Studie 3; Bjerrum, 2026).



Figur 3.7. BIX-indeks (biologisk indeks) i porevand efter inkubation, for jord uden tilsat plantemateriale (Kontrol) og med strøelse fra tre vådområdeplanter: *Rhytidiadelphus squarrosus*, *Typha latifolia* og *Juncus effusus* (n = 5 pr. behandling). Højere værdier indikerer en større andel af nyproduceret, mikrobielt afledt opløst organisk stof (DOM) (Studie 3; Bjerrum, 2026).

For at vurdere den mulige betydning af disse forskelle på økosystemniveau blev de gennemsnitlige daglige CO_2- og CH_4-fluxer pr. g vegetation kombineret med et mål for hver arts feltproduktivitet (Tabel 3.4). Dette viste, at *Typha latifolia* kun havde moderat højere flux pr. g vegetation end *Rhytidiadelphus squarrosus* og *Juncus effusus*, men en produktivitet på 809,9 g m^{-2} – omkring 8 gange højere end *Juncus effusus* (102,9 g m^{-2}) og 46 gange højere end *Rhytidiadelphus squarrosus* (17,6 g m^{-2}). Når flux pr. g vegetation blev opskaleret med produktivitetsindekset, gav dette markant højere estimerede daglige feltfluxer for *Typha latifolia* end for de øvrige arter, både for CO_2 (477,9 mg m^{-2} dag^{-1} mod 67,8 for *Juncus effusus* og 7,5 for *Rhytidiadelphus squarrosus*) og CH_4 (3,204 mg m^{-2} dag^{-1} mod 0,309 for *Juncus effusus* og 0,027 for *Rhytidiadelphus squarrosus*; Tabel 3.4). Disse feltfluxer er baseret på en antagelse om 100 % dække af den pågældende plantetype og repræsenterer derfor et teoretisk øvre skøn for den daglige emission snarere end en forventet emission under naturlige, blandede vegetationsforhold.

Tabel 3.4. Gennemsnitlig produktivitet samt gennemsnitlig daglig CO_2- og CH_4-flux pr. g plantemateriale for de tre plantetyper fra planteinkubationerne (Figur 3.6), korrigeret for jordens egen baggrundsflux (dvs. med fluxen fra de rene jordkontroller fratrukket), samt de tilsvarende estimerede daglige feltfluxer beregnet som produktivitet × flux pr. g vegetation dag^{-1} (Studie 3; Bjerrum, 2026).5

Plantetype	Gennemsnitlig produktivitet (g m^{-2})	Gennemsnitlig CO_2-flux (mg gas g^{-1} vegetation dag^{-1})	Gennemsnitlig CH_4-flux (mg gas g^{-1} vegetation dag^{-1})	Potentiel CO_2-flux i felt (mg gas m^{-2} dag^{-1})	Potentiel CH_4-flux i felt (mg gas m^{-2} dag^{-1})
R. squarrosus	17,6	0,427	0,00151	7,5	0,027
T. latifolia	809,9	0,590	0,00396	477,9	3,204
J. effusus	102,9	0,659	0,00300	67,8	0,309

3.4 Overordnede miljømæssige kontrolfaktorer

På tværs af de tre studier viste resultaterne, at drivhusgasdynamikker i højere grad blev styret af kulstoftilgængelighed, jordfugtighed og -temperatur end af næringsstofniveauer alene.

Metanproduktionen var højest under vandmættede forhold og ved høj tilgængelighed af organisk substrat, og var desuden højere i TSR-jorde end i NTSR-jorde i både felt- og laboratoriedata, formentlig som følge af højere jordfugtighed på TSR-arealerne. I felteksperimentet (Studie 1) steg CH_4-fluxen signifikant med jordfugtigheden ($p < 0,01$), med en tydelig stigning over ca. 80 % jordfugtighed, mens jordtemperatur ikke havde nogen signifikant effekt. N_2O, NEE og GPP var påvirket af både jordfugtighed og jordtemperatur (N_2O $p < 0,01$; NEE og GPP $p < 0,001$): højere temperatur gav større CO_2-optag og højere GPP, mens højere jordfugtighed gav mindre nettooptag og lavere GPP (Marker, 2025).

Samlet indikerer resultaterne, at restaureringsrelaterede ændringer i mængden og kvaliteten af organisk materiale udgør en vigtigere faktor for drivhusgasproduktionen end kortvarige ændringer i næringsstoftilgængeligheden. Topjordsfjernelse reducerede N_2O-emissionen og økosystemrespirationen, men medførte uventet højere metanproduktion end intakt topjord, mens forskelle i vegetationssammensætning og organisk substrat havde stor betydning for kulstofomsætningen og de resulterende drivhusgasemissioner.

4 Diskussion

4.1 Hovedresultater og syntese

De tre studier giver tilsammen et mere nuanceret billede af drivhusgasdynamikker i vådlagte, næringsrige lavbundsjorde, end det gennemsnitlige grundvandsspejl alene kan forklare. Et gennemgående resultat er, at næringsstoftilgængelighed – på trods af projektets udgangshypotese – kun spillede en begrænset og indirekte rolle for CO_2- og CH_4-produktionen, både i felten og under kontrollerede laboratorieforhold. I stedet pegede alle tre studier på kulstoftilgængelighed og -kvalitet samt jordfugtighed/vandmætning som de primære styrende faktorer.

Et markant og til dels uventet fund er retningen af topjordsfjernelsens (TSR) effekt på CH_4: både feltmålingerne og laboratorieinkubationerne viste højere CH_4-produktion i TSR end i NTSR – det modsatte af den oprindelige hypotese om, at TSR ville reducere emissionerne ved at fjerne næringsrigt og kulstofrigt materiale (Figur 3.1, 3.4). Denne effekt hang tilsyneladende sammen med, at TSR-arealerne i begge studier (Studie 1 og 2) havde højere og mere stabil jordfugtighed end NTSR-arealerne (Figur 3.3), hvilket betyder, at effekten af TSR ikke kunne adskilles fra hydrologien i det eksperimentelle design – en central begrænsning, der diskuteres nærmere nedenfor. Samtidig var CH_4-fluxene fra TSR i absolutte tal i den lave ende sammenlignet med litteraturværdier for tilsvarende genvådede, næringsrige tørvejorde: medianfluxen i TSR var 1,09 mg CH_4 m^{-2} h^{-1} i kontrolplots og 0,58 mg CH_4 m^{-2} h^{-1} med næringstilførsel, mod en IPCC-standardemissionsfaktor på 3,3 mg CH_4 m^{-2} h^{-1} (288 kg CH_4 ha^{-1} $år^{-1}$) og årsgennemsnit på 1,4–6,1 mg CH_4 m^{-2} h^{-1} (120–537 kg CH_4 ha^{-1} $år^{-1}$, omregnet) i en genvådet mose i Nordøsttyskland (Kalhori et al., 2024). De højeste værdier i mosen blev målt 3–4 år efter genvådning. Det tyder på, at fjernelsen af det næringsrige, letomsættelige topjordslag godt kan have en dæmpende effekt på metanproduktionen, i tråd med resultater fra andre studier af topjordsfjernelse i genvådede tørvejorde (Quadra et al., 2023) – blot overskygget i denne sammenligning af forskelle i vandstand. Dette resultat står i kontrast til Huth et al. (2020), der fandt en ca. 100 gange lavere CH_4-emission ved topjordsfjernelse i et sammenligneligt vådlagt moseareal, hvor vandstanden blev holdt konstant på tværs af alle behandlinger. Det understreger, at den observerede stigning i nærværende studie sandsynligvis afspejler den utilsigtede forskel i jordfugtighed mellem TSR- og NTSR-arealerne snarere end en generel effekt af topjordsfjernelse i sig selv.

Plantemateriale viste sig at være en langt mere betydende faktor for kulstofomsætningen end næringsstoftilførsel. I mesokosmosforsøget varierede den kumulative produktion mellem de testede plantearter med en faktor på ca. 2 for CO_2 og ca. 3 for CH_4 (Figur 3.6), hvilket er en betydeligt større effektstørrelse end den, der blev observeret for næringsstofbehandlingerne i både felt- og laboratorieforsøgene. Samlet indikerer resultaterne, at fremtidige emissionsmodeller for vådlagte lavbundsjorde bør inddrage substrattilgængelighed (mængde og kvalitet af organisk materiale) og vandmætning som centrale variable, snarere end at basere sig på gennemsnitligt grundvandsspejl alene. Det skal dog bemærkes, at det endnu er uafklaret, om et gennemsnitligt mål for vandmætning er tilstrækkeligt, eller om den tidslige dynamik – herunder hyppigheden og varigheden af perioder med høj vandmætning – har selvstændig betydning for drivhusgasproduktionen. Dette spørgsmål kan ikke besvares med det foreliggende datagrundlag, men bør indgå i fremtidige undersøgelser.

4.2 Næringsstoftilgængelighed som drivkraft for drivhusgasemissioner

På tværs af felt- og laboratorieforsøgene var der bemærkelsesværdig konsistens i fraværet af en direkte næringsstofeffekt på CO_2- og CH_4-produktionen. I felteksperimentet (Studie 1) stimulerede næringsstoftilførsel den fotosyntetiske CO_2-optagelse (GPP), men uden effekt på økosystemrespiration, CH_4 eller N_2O. I laboratorieinkubationerne (Studie 2) med gradueret næringsstofbelastning (10–100 kg N ha^{-1} $år^{-1}$) var CH_4- og CO_2-produktionen ligeledes upåvirket af næringsniveau i både TSR- og NTSR-jord (Figur 3.4, 3.5), mens kun den højeste kvælstofbelastning gav en forbigående stigning i N_2O-produktionen.

Dette mønster peger samstemmende på, at den mikrobielle omsætning i begge systemer var begrænset af kulstofsubstrat snarere end af kvælstof eller fosfor. En mulig forklaring på den manglende CH_4-respons er konkurrence om elektronacceptorer: Det tilførte nitrat (NO_3^-) er en energimæssigt mere favorabel elektronacceptor end CO_2, hvilket kan give denitrificerende og jernreducerende mikroorganismer en konkurrencefordel over metanogener og forsinke eller undertrykke metanogenesen (Achtnich et al., 1995; Kim et al., 2015). Denitrifikation blev ikke målt direkte, men var sandsynligvis aktiv: nitrat blev forbrugt, nitrit blev dannet og igen forbrugt, og N_2O blev dannet og efterfølgende forbrugt (Haarder, 2025). Alligevel var CH_4-produktionen ikke lavere i de tilførte behandlinger end i kontrollen, og i M- og H-behandlingerne var 20–40 % af nitraten fortsat til stede ved forsøgets afslutning. Det taler imod, at nitratkonkurrence eller hæmning fra denitrifikationens mellemprodukter var den primære styrende faktor, og tyder på, at denitrifikation og metanogenese i et vist omfang fandt sted samtidig, sandsynligvis i forskellige mikromiljøer eller tidsvinduer i jordkernerne. Da nitrat blev målt i vandet over jorden og ikke i porerne, kan dette dog ikke afgøres ud fra de foreliggende data. Fraværet af en næringsstofrespons tyder på, at hverken kvælstof eller fosfor var begrænsende for den mikrobielle aktivitet, og at kulstoftilgængelighed i højere grad styrede produktionen. Det er formentlig kun en del af forklaringen: den store variation mellem replikater og det begrænsede antal replikater (n = 5) kan også have skjult mindre effekter af næringsstoftilførsel.

Et andet gennemgående tema er tidsskalaen. I felteksperimentet var stigningen i fotosyntetisk aktivitet (GPP) som følge af næringstilførsel synlig allerede i første vækstsæson, men uden at det (endnu) havde afsat sig som øget plantebiomasse eller substrat for mikrobiel nedbrydning. Det er sandsynligt, at en eventuel næringseffekt på drivhusgasemissionerne først vil manifestere sig over flere sæsoner, efterhånden som den øgede primærproduktion oversættes til strøfald og organisk materiale, der kan omsættes mikrobielt. Dette stemmer overens med, at netop plantemateriale – snarere end uorganiske næringsstoffer – viste sig at være en betydende faktor i mesokosmosforsøget (se næste afsnit), og understreger at næringsstoffers effekt på drivhusgasemissioner fra vådlagte lavbundsjorde sandsynligvis er indirekte og forsinket, drevet af vegetationsudvikling, frem for en umiddelbar mikrobiel stimulering.

4.3 Vegetationskvalitet og effekter af kulstofsubstrater

Hvor næringsstoftilførsel havde begrænset effekt, viste plantematerialets kvalitet sig at være en betydende faktor for både CO_2- og CH_4-produktionen. Da kontrolbehandlingen uden tilsat plantemateriale udviste minimal gasproduktion (Figur 3.6), tyder dette på, at jordens eget organiske kulstoflager bidrog forholdsvis lidt til den samlede produktion, og at plantestrøelse var den afgørende kulstofkilde for den mikrobielle omsætning i disse inkubationer. I

inkubationsforsøget med strøelse fra *Typha latifolia*, *Juncus effusus* og *Rhytidiadelphus squarrosus* var den kumulative CO_2-produktion markant højere fra *Juncus effusus* end fra *Rhytidiadelphus squarrosus*, med *Typha latifolia* liggende herimellem, mens *Typha latifolia* og *Juncus effusus* havde sammenlignelig og markant højere kumulativ CH_4-produktion end *Rhytidiadelphus squarrosus* (Figur 3.6). Dette mønster afspejler til dels forskelle i strøelsens kemiske sammensætning: *Juncus effusus*-materialet havde et lavt C:N-forhold, på niveau med *Rhytidiadelphus squarrosus*, hvilket typisk er forbundet med mere letomsætteligt materiale, mens *Typha latifolia* havde et markant højere C:N-forhold og dermed forventeligt mere langsomt omsætteligt materiale. *Rhytidiadelphus squarrosus* (mosset) afveg dog fra dette mønster, idet det – på trods af et C:N-forhold tæt på *Juncus effusus*' – konsekvent gav den laveste gasproduktion. Dette peger på, at C:N-forholdet alene ikke er tilstrækkeligt til at forklare nedbrydeligheden, og at strukturelle egenskaber ved mosvæv (f.eks. højt ligninindhold, som er kendt for at nedsætte mikrobiel nedbrydningshastighed sammenlignet med cellulose- og sukkerrigt materiale (Keddy, 2023)) sandsynligvis spillede en selvstændig rolle.

Karakteriseringen af det opløste organiske stof (DOM) i porevandet understøtter delvist denne fortolkning. *Juncus effusus*-behandlingerne havde et signifikant højere BIX-indeks end de to øvrige plantetyper (jf. Resultater, Figur 3.7), hvilket viser en højere andel af nyproduceret, mikrobielt afledt DOM. Dette er i overensstemmelse med en mere aktiv mikrobiel omsætning af *Juncus effusus*-strøelsen, som også havde den højeste CO_2-produktion. BIX-mønsteret følger dog ikke gasproduktionen fuldt ud: *Typha latifolia* og *Rhytidiadelphus squarrosus* kunne ikke skelnes på BIX, men *Typha latifolia* havde en CH_4-produktion på niveau med *Juncus effusus* og langt over *Rhytidiadelphus squarrosus* (Figur 3.6, Tabel 3.3). BIX kan derfor ikke alene forklare forskellene i gasproduktion mellem plantetyperne.

Et vigtigt supplerende perspektiv fremkommer, når disse per-gram-fluxer kombineres med data for de tre arters feltproduktivitet (Tabel 3.4). *Typha latifolia* havde kun moderat højere eller sammenlignelig flux pr. g plantemateriale end *Rhytidiadelphus squarrosus* og *Juncus effusus*, men en produktivitet, der var omkring 8 gange højere end *Juncus effusus*' og 46 gange højere end *Rhytidiadelphus squarrosus*'. Opskaleret til feltniveau fremstår *Typha latifolia* derfor som en langt større potentiel daglig kilde til både CO_2 og CH_4 pr. arealenhed end de øvrige arter — hvilket indikerer, at det ikke er substratkvaliteten alene, men i mindst lige så høj grad artens biomasseproduktion, der afgør en plantearts betydning for økosystemets samlede drivhusgasbudget. I områder domineret af højproduktive arter kan den samlede emission derfor være betydeligt større, end per-gram-forsøg alene ville antyde — en pointe med direkte betydning for, hvordan vegetationssammensætningen på restaurerede arealer påvirker det samlede klimaaftryk (jf. afsnit om implikationer for restaurering).

To forbehold er dog værd at fremhæve. For det første er feltestimaterne i Tabel 3.4 baseret på en antagelse om 100 % dække af den pågældende art; i praksis vil TSR- og NTSR-arealer typisk bestå af blandede plantesamfund, hvilket vil dæmpe den fulde effekt af enkeltarters høje produktivitet på det samlede areals emission. For det andet er produktivitet ikke en fast artsegenskab, men afhænger i høj grad af næringsstoftilgængeligheden på voksestedet — hvilket betyder, at de enkelte arters relative bidrag til drivhusgasbudgettet potentielt kan ændre sig over tid i takt med næringsstatus, i tråd med den indirekte og forsinkede næringseffekt beskrevet ovenfor.

Disse fund har en vigtig implikation for fortolkningen af feltresultaterne: TSR-arealerne i Strande Enge var domineret af *Juncus effusus*, mens NTSR-arealerne var domineret af mere tætvoksende græsser og halvgræsser. Givet at *Juncus effusus* i mesokosmosforsøget viste sig at være en af de arter, der bidrog mest til CH_4-produktion pr. g plantemateriale, er det sandsynligt, at den observerede højere CH_4-emission fra TSR i felten – ud over hydrologiske forskelle – også kan hænge sammen med den specifikke vegetationssammensætning på TSR-arealerne. Vegetationssammensætning bør derfor betragtes som en selvstændig, og til dels gensidigt påvirkende forklaringsfaktor ved siden af topjordsfjernelse og hydrologi.

4.4 En konceptuel ramme for regulering af drivhusgasser i vådlagte tørvejorde

Resultaterne fra de tre studier og internationale litteratur kan samles i en konceptuel model, hvor drivhusgasemissioner fra vådlagte, næringsrige lavbundsjorde reguleres i et hierarki af faktorer frem for af én enkelt dominerende variabel:

1. **Jordfugtighed/grundvandsspejl** sætter de overordnede redoxbetingelser og dermed det fysiologiske "vindue" for metanogenese. Data fra feltekspermentet viste, at CH_4-fluxen steg signifikant med jordfugtigheden, med en tydelig stigning over ca. 80 % jordfugtighed (afsnit 3.4; Marker, 2025), hvilket understøtter tidligere beskrivelser af en tærskel- eller "tænd/sluk"-lignende effekt. I overensstemmelse hermed havde TSR-arealerne både højere og mere stabil jordfugtighed (Figur 3.3) og højere CH_4-flux (Figur 3.1) end NTSR-arealerne. Sammenhængen med grundvandsspejl indgår ikke i de analyser, der er præsenteret her; tærsklen ved et grundvandsspejl omkring −20 cm hviler derfor på litteraturen (se nedenfor). Dette er i overensstemmelse med den internationale litteratur om grundvandsspejlets kontrollerende rolle for drivhusgasbalancen i tørvejorde: Evans et al. (2021) fandt på tværs af 41 lokaliteter, at hver 10 cm reduktion i det effektive grundvandsspejl reducerede den samlede opvarmningseffekt indtil et niveau omkring 30 cm under overfladen, og at yderligere hævning af vandstanden fortsat havde en afkølende nettoeffekt, indtil grundvandsspejlet lå inden for 10 cm af overfladen. Tilsvarende viste Tiemeyer et al. (2020) en markant ikke-lineær respons i både CO_2- og CH_4-emissioner omkring dette niveau (Figur 1.1, 1.2). Grundvandsspejl omkring −20 cm ligger dermed inden for det interval, hvor internationale studier konsekvent finder den stejleste del af emissionsresponsen, hvilket understøtter, at den her observerede tærskeleffekt for jordfugtighed sandsynligvis afspejler samme underliggende mekanisme.

2. **Kulstofsubstratets mængde og kvalitet** – styret dels af historisk lagret organisk materiale, som reduceres ved TSR (Harpenslager et al., 2015; Quadra et al., 2023), dels af løbende tilførsel fra plantemateriale i form af strøelse og rodeksudater (Hahn-Schöfl et al., 2011; Girkin et al., 2025) – bestemmer, hvor meget af det potentiale, som vandmætningen åbner op for, der reelt omsættes til CO_2 og CH_4. Dette var den faktor, der bedst forklarede variationen mellem plantetyperne i mesokosmosforsøget, og som sandsynligvis også bidrager til forskellen mellem TSR og NTSR ud over den rene hydrologiske effekt.

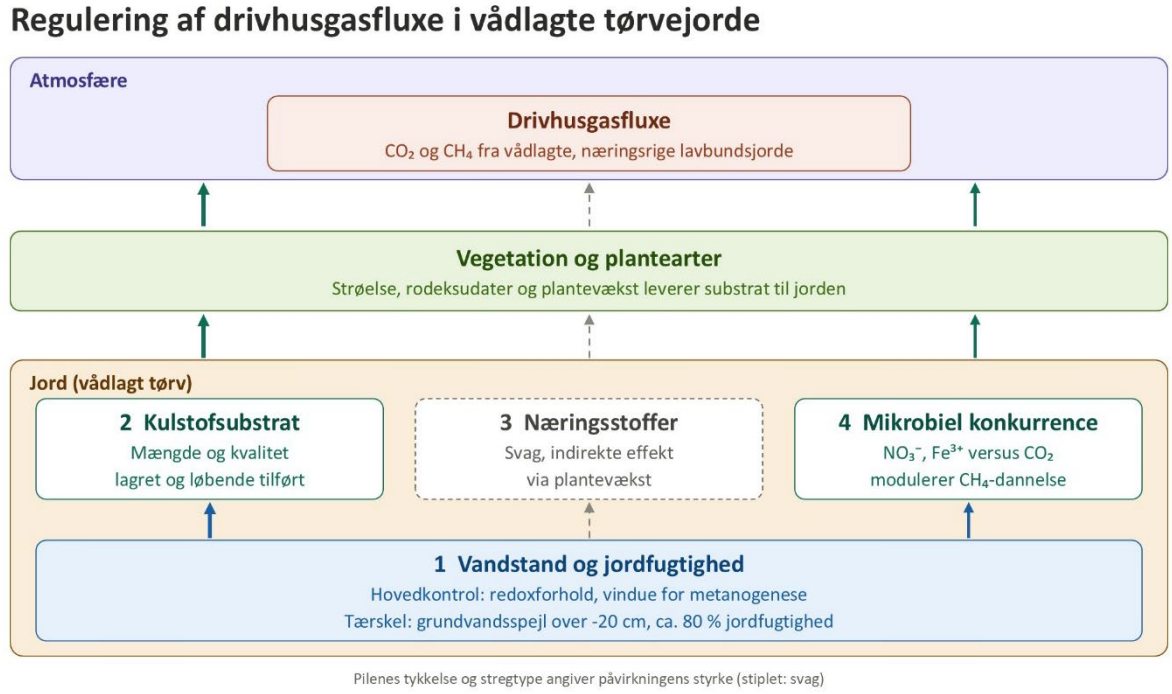
3. **Næringsstoftilgængelighed** har i denne undersøgelse kun en svag og formentlig indirekte effekt, medieret via plantevækst og fremtidig substrattilførsel snarere end en umiddelbar mikrobiel stimulering. Under de betingelser, der blev testet her (kortvarig, uorganisk næringstilførsel), var hverken CO_2- eller CH_4-produktionen næringsbegrænset.

4. **Mikrobiel konkurrence om elektronacceptorer** (NO_3^-, Fe^{3+} versus CO_2 som elektronacceptor for metanogenese) fungerer som en modulerende mekanisme, der kan forklare, hvorfor tilførsel af nitrat i nogle tilfælde kan undertrykke eller forsinke metanproduktionen selv i øvrigt gunstige forhold.

Denne firetrins-model adskiller sig fra de eksisterende emissionsmodeller nævnt i indledningen, som primært bruger gennemsnitligt grundvandsspejl som eneste prædiktor (Figur 4.1). Den foreslåede ramme peger på, at en mere præcis model bør inkludere mål for substrattilgængelighed (f.eks. organisk stofindhold, C:N-forhold i topjord og vegetation) som en selvstændig variabel ved siden af hydrologi, mens direkte mål for uorganisk næringsstofniveau tillægges mindre vægt, medmindre der er tale om langsigtede (flerårige) effekter medieret via vegetationsudvikling.

Det skal understreges, at denne firetrins-model er en konceptuel syntese af de mønstre, der er observeret på tværs af de tre studier, og ikke en kvantitativ eller implementerbar emissionsmodel.

Datagrundlaget dækker én vækstsæson i felten og kortvarige laboratorieinkubationer med et begrænset antal replikater og plantearter, hvilket ikke er tilstrækkeligt til at parameterisere eller validere en model, der kan anvendes til egentlig emissionsestimering. At opstille en sådan model vil kræve flerårige data, en bredere gradient af substrat- og vegetationstyper samt eksperimentelt design, der kan adskille de fire faktorers effekter fra hinanden (jf. anbefalingerne i afsnittet om styrker og begrænsninger nedenfor). Rammen skal derfor primært læses som en hypotesegenererende struktur for fremtidig modeludvikling, ikke som et færdigt værktøj.



Figur 4.1. Konceptuel model for regulering af drivhusgasfluxer (CO_2 og CH_4) fra vådlagte, næringsrige lavbundsjorde, baseret på resultaterne fra de tre studier i denne rapport. Modellen præsenterer et hierarki af fire faktorer snarere end én enkelt dominerende variabel: (1) vandstand og jordfugtighed udgør hovedkontrollen ved at sætte de overordnede redoxbetingelser og dermed det fysiologiske "vindue" for metanogenese, med en tærskeleffekt omkring et grundvandsspejl over -20 cm eller ca. 80 % jordfugtighed; (2) kulstofsubstratets mængde og kvalitet – både historisk lagret og løbende tilført via vegetationen – bestemmer, hvor meget af dette potentiale der reelt omsættes til CO_2 og CH_4; (3) næringsstoftilgængelighed har en svag og overvejende indirekte effekt, medieret via plantevækst; og (4) mikrobiel konkurrence om elektronacceptorer (NO_3^-, Fe^{3+} versus CO_2) modulerer metandannelsen. Pilenes tykkelse og stregtype angiver den relative styrke af hver faktors indflydelse (stiplet = svag/indirekte effekt). Modellen er en hypotesegenererende syntese og ikke en kvantitativ, implementerbar emissionsmodel.

4.5 Potentiel brug af remote sensing

Der er ikke udført eksperimenter med remote sensing i dette projekt. Vi har i stedet udført et litteraturstudie for at undersøge mulighederne og begrænsningerne ved at bruge remote sensing til at estimere (1) jordfugtighed/grundvandsspejl, (2) biomasse og (3) næringsstoftilgængelighed. For alle tre faktorer gælder det at de helt store fordele vil være at man får data på national skala og for hele områder (flader) og ikke kun for punktmålinger. DCE har for nylig publiceret en rapport der afdækker mulighederne for at bruge alternative – til feltarbejde – datakilder til overvågning af habitatnatur og biodiversitet generelt (Moeslund et al., 2026). Rapporten omhandler bl.a. forskellige remote sensing datakilder og vi henviser hertil for en dybere oversigt og mere detaljeret introduktion til remote sensing data. Konklusionerne i Moeslund et al. (2026) kan ikke umiddelbart overføres til dette projekt fordi vurdering af habitattilstand er væsentligt forskelligt fra den viden man har brug for til vurdering af drivhusgasemission både hvad angår de præcise parametre, men også hvad angår den rumlige skala man har brug for informationerne på.

I nedenstående nævnes en række remote sensing datakilder. Disse gennemgås i Moeslund et al. (2026) og derfor medtages ikke en detaljeret gennemgang her.

4.5.1 Jordfugtighed/grundvandsspejl

Jordfugtighed

Det er generelt umådeligt vanskeligt at estimere jordfugtighed med remote sensing og det gælder for så vidt estimering af stort set alt der findes nede i jorden – de fleste remote sensing instrumenter kan simpelthen ikke se ned i jorden men registrerer kun hvad der findes på og over jordoverfladen. De alternative datakilder, der kan komme i betragtning til estimering af jordfugtighed, er lidar (fly- eller dronebåren laserscanning af landskabet), SAR (Synthetic Aperture Radar – radardata, typisk fra satellit) og forskellige fugtighedsindekser baseret på spektrale data fx Normalized Difference Water Index (NDWI, typisk fra satellit eller luftfotos fra fly, Bao et al. 2018; Huang et al. 2025).

Radar er følsom over for både jordens og vegetationens fugtighed, men giver til enhver tid et øjebliksbillede, hvor man for drivhusgasser i højere grad har brug for kendskab til de tidslige mønstre og persistensen af høj fugtighed end blot de gennemsnitlige overordnede fugtighedsforhold, givet den tærskelignende sammenhæng mellem jordfugtighed og CH_4-emission, der er beskrevet i denne rapport (jf. afsnittet om konceptuel ramme). Der er begrænset erfaring med brugen af SAR til at estimere overordnede fugtighedsforhold, men se fx Millard og Richardson (2018) og Takada et al. (2009). Som ophav til SAR-data vil man enten bruge Sentinel-1 (satellit) eller data fra private udbydere af SAR-data i højere opløsning. Sidstnævnte er temmelig dyrt.

Med lidar er det muligt at beregne et såkaldt wetness-indeks baseret på mikrotopografien, som har nogen overensstemmelse med den gennemsnitlige jordfugtighed. Selvom et lidarbaseret topografisk wetness-indeks formentlig er den remote sensing datakilde, der vil give de mest fintopløselige estimater af jordfugt (< 0,5 m), er selve estimaterne næppe sikre nok til brug ifm. drivhusgasemissionsberegninger (Hardy et al. 2012; Moeslund et al. 2013a; Moeslund et al. 2013b). Det skyldes bl.a. at topografiske wetness-indekser udelukkende er baseret på topografien, og derfor ikke tager højde for fx jordens evne til at holde på fugtighed, der varierer betragteligt med jordens fysiske og organiske sammensætning (herunder tekstur for mineraljorde og omsætningsgrad/bulkdensitet for tørvejorde, som ikke har en veldefineret kornstørrelse).

Et jordfugtsmål baseret på topografisk wetness er således relativt statisk, fordi terrænet sjældent ændrer sig (dog undtaget topjordsfjernelse), og derfor vil man ikke kunne se øget jordfugt ved fx vådlægning med denne metode.

I åbne landbrugslandskaber og på bar jord, findes der forholdsvis gode remote sensing-baserede metoder baseret på satellitdata til at estimere jordens fugtighed i opløsning ned til ca. 30 m (Huang et al. 2025). Omvendt er der i naturområder ringe evidens for brugen af de forskellige fugtighedsindekser, man kan aflede af satellitdata til at estimere jordfugtighed, og selv den nyeste forskning indenfor feltet viser, at remote-sensing-baserede data ikke er tilstrækkeligt højt korrelerede med den faktiske jordbundsfugtighed til at kunne erstatte feltinventering (dvs. direkte målinger og registreringer foretaget i felten) på tilfredsstillende vis (Bao et al. 2018; Huang et al. 2025). Fx viste Moeslund og Damgaard (2024), at spektrale data fra Sentinel-2 havde en forholdsvis lav korrelation med NOVANA-overvågningens vegetationsplots' gennemsnitlige jordbundsfugtighed (Ellenberg F) på tværs af Danmark (R^2 = 26 %).

Et interessant studie fra Storbritannien demonstrerer, hvordan man med ret billigt hardware kan måle vandstress i kunstige tørvemostuer i et kontrolleret miljø (Stuart et al. 2022). Med stationære hyperspektrale sensorer kan forskerne se, om tørvemosserne er vandstressede flere uger før man kan se det med det blotte øje. Vi vurderer, at denne metode muligvis kan videreudvikles, så sensorerne kan bæres af droner, og man vil i så fald kunne få indsigt i ændringer i tørvemossers vandstress – som er tæt forbundet med den generelle hydrologi – over tid ved gentagne overflyvninger. Metoden vil kræve en del videreudvikling, og også en del feltarbejde (droneflyvninger) for at kunne give brugbare data til drivhusgasemissionsberegninger, men den vil potentielt kunne give et helhedsbillede af niveauet og variationen i vandstress i et givet tørvemoseområde.

Dertil kommer, at de drivhusgasrelevante ændringer i jordfugtighed i denne undersøgelse indtræffer inden for et forholdsvist snævert interval (omkring 80 %, jf. afsnit om konceptuel ramme), hvilket er særligt vanskeligt at opløse præcist med de nuværende remote sensing-baserede metoder. Vi vurderer, at der reelt ikke findes jordfugtsestimater baseret på remote sensing, der kan give tilstrækkeligt gode data til drivhusgasemissionsberegninger.

Grundvandsspejl

Det er muligt, at man måske kan estimere vandstandsændringer med SAR (radar) fra satellitter, navnlig i den åbne natur. Mikrobølger (radar) er sensitive over for jord- og løvfugtighed, og det kan man udnytte til at estimere vandstanden i et givet område. Eksempelvis viste svenske forskere for nogle år siden, hvordan man kan følge vandstanden i svenske tørvemoser med en nøjagtighed på 86 % ved at bruge en kombination af radar (L-båndet) og lidar (Torbick et al. 2012). I Danmark har vi en lignende tilgængelighed til data, og det er gratis at bruge dem. Der findes også eksempler på, at full-waveform lidar-data kan bruges til at overvåge oversvømmelse i ådale; her rapporteres der tillige om høj nøjagtighed (89 %; Malinowski et al. 2016), men udfordringen er, at lidar som regel ikke opdateres så ofte som SAR, navnlig full-waveform lidar, som i dag ikke er nemt tilgængeligt. For at udvikle den SAR-baserede metode til et operationelt niveau kræves en del udvikling, men vi vurderer, at det kan give god mening at lave et pilotforsøg med denne for at afdække mulighederne.

4.5.2 Biomasse

Der er mange eksempler på anvendelse af remote sensing til at estimere biomasse. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) er det mest anvendte og det kan bruges både med spektrale data fra satellitter og ofte også data fra flyfotos (kræver infrarød kanal og det er der ofte i nyere luftfotos for Danmark). Mange studier har fundet en sammenhæng mellem NDVI – som dybest set måler hvor grønt der er – og biomassen på et givet sted (Mutanga et al. 2023; Netsianda & Mhangara 2025). Fx demonstrerede Li og kolleger at NDVI kunne forklare mellem 84 og 87 % af variationen i biomasse i vådområder i Kina (Li et al. 2021), og det er vores vurdering, at det formentlig er omtrent de bedst mulige resultater man kan forvente også i Danmark. Ulempen er, at denne sammenhæng mellem NDVI og biomasse er afhængig af forskellige andre faktorer bl.a. habitattype og sæson (Mutanga et al. 2023; Lumbierres et al. 2017). Derudover kan NDVI mættes ved forholdsvist lave biomasser og derefter flader den ud (Mutanga et al. 2023), så det bliver vanskeligt at estimere især når vegetationen er tæt og der er høj biomasse. Derfor vil det kræve en del kalibreringsarbejde at gå videre med denne metode, hvis den skal blive relevant for drivhusgasemissionsberegninger.

En anden mulighed for estimering af biomasse er at bruge lidar til at estimere vegetationshøjde, og ud fra disse estimater beregne den omtrentlige biomasse i et givet område. DCE arbejder p.t. på en vegetationshøjdemodel for SGAV som en del af projektet Digital Naturovervågning (DNO), hvor vi anvender nationale lidar-data kombineret med flyfotos til at estimere vegetationshøjde, vegetationsdækning (urter, vedplanter, dværgbuske) samt blankt vand og bar jord på naturarealer. Dette arbejde er i en valideringsfase og derfor vides det p.t. endnu ikke, hvor gode forudsigelser man vil kunne forvente. Hovedbegrænsningen ved denne metode er, at lidar-data p.t. kun opdateres ca. hvert 5. år, så man kan ikke få nye opdaterede biomassekort oftere end dét med denne metode.

4.5.3 Næringsstoftilgængelighed

Ligesom for jordfugtighed gælder det, at næringsstofferne i jorden ikke kan ses direkte med remote sensing. Man er derfor nødt til at estimere næringsstofforholdene indirekte via vegetationen, og her er der to grundlæggende forskellige tilgange: (1) man ser på planternes artssammensætning, som afspejler de generelle forhold på voksestedet over år til årtier, eller (2) man forsøger at måle næringsstofindholdet i løvet direkte, hvilket giver et øjebliksbillede. Begge tilgange bygger på reflektans fra planterne, men de fortæller noget forskelligt om tid.

Hvilken af de to der er mest relevant her, afhænger af, hvordan næringsstofferne virker. Som beskrevet i afsnit 4.2 er næringsstoffernes effekt på drivhusgasemissionerne sandsynligvis indirekte og forsinkede, og træder igennem via vegetationens udvikling over noget tid frem for en umiddelbar mikrobiel stimulering. Virker næring på den måde, er plantens aktuelle næringsindhold ikke i sig selv særlig interessant, hvorimod de generelle akkumulerede forhold er det – de siger nemlig noget om, hvor produktiviteten og dermed substratgrundlaget må forventes at vokse i de kommende år.

Akkumulerede næringsforhold

I felten beskrives de akkumulerede forhold typisk ved gennemsnitlige Ellenberg-indikatorværdier for næringsstof, eventuelt kombineret med reaktionstallet som en næringsratio (Ellenberg N/Ellenberg R; Ellenberg et al. 2001).

Der findes en del forsøg på at estimere akkumulerede næringsforhold (eutrofieringsgrad) via remote sensing, også i fin opløsning (Schmidtlein 2005; Möckel et al. 2016; Moeslund et al. 2019; Moeslund & Damgaard 2024), men nøjagtighederne er generelt ringe til medium (op til 66 % forklaret variation), og i Moeslund et al. (2026) vurderes metoderne ikke at kunne erstatte feltinventering på prøvefeltsniveau.

Som nævnt indledningsvis kan den vurdering dog ikke uden videre overføres hertil, da drivhusgasemissioner ikke estimeres på plotniveau men på større rumlig skala. En remote sensing-baseret Ellenberg-værdi er reelt en artskortlægning efterfulgt af en omregning til gennemsnitlig Ellenberg-værdi, og det svage led er første trin. I Moeslund et al. (2026) konkluderes det, at identifikation af plantearter med remote sensing er usikker (især på større arealer) og fungerer i bedste fald i få udvalgte habitattyper og kun for nogle arter, og der findes ingen studier, som for danske habitater har opnået operationel nøjagtighed. Små, tæt sammenflettede urter kan slet ikke skelnes ved de opløsninger, der er praktisk tilgængelige (Simpson et al. 2024).

Hvis artssammensætningen er simpel og bestående af få store arter eller arter der vokser klonalt som fx tagrør (*Phragmites australis*), en del star-arter (*Carex spp.*), lyse-siv (*Juncus effusus*) mm. er opgaven nemmere, og det er muligt, at det faktisk gør sig gældende på en del relevante vådområder, hvor man ønsker at studere drivhusgasemissioner. Vi vurderer, at en grov kortlægning af dominerende vegetationstyper er mere realistisk end en egentlig artsliste, men understreger samtidig, at dette ikke er dokumenteret for danske lavbundsarealer, og at det vil kræve et selvstændigt udviklings- og valideringsarbejde. SGAV har i en del år arbejdet med et naturtypegenkendelsessystem der vha. bl.a. remote sensing kan kortlægge hvor i landskabet de forskellige habitatnaturtyper er. Det er muligt, at dét system kan bruges i denne sammenhæng.

Næringsstofindhold i løvet

Den anden tilgang er at estimere indholdet af kvælstof og fosfor i løvet direkte ud fra spektrale data. Det er forsøgt mange gange, særligt i landbruget, men resultaterne i naturlige, blandede plantesamfund er ikke særlig gode. Et stort amerikansk studie på tværs af habitattyper nåede ca. 66 % nøjagtighed for N i løv med flybårne hyperspektrale data, men kun ca. 20 %, når metoden blev brugt på vegetation, modellen ikke havde set før (Farella et al. 2022), og et kinesisk studie med dronebårne hyperspektrale data og lidar nåede 53 % for N og 44 % for P (Yang et al. 2024). Mest afklarende er nok et kontrolleret drivhusforsøg fra Belgien med naturlige arter fra mesotrofe græslandstyper, hvor det slet ikke var muligt at finde robuste sammenhænge mellem bladreflektans og løvets N- og P-indhold, fordi artsidentitet og struktur fuldstændigt dominerede reflektanssignalet (Moeneclaey et al. 2022). Hertil kommer, at de fleste af metoderne kræver hyperspektrale data, som ikke er frit tilgængelige i Danmark og derfor skal indsamles med drone. Vi vurderer på den baggrund, at direkte estimering af løvets næringsindhold ikke er realistisk i denne kontekst.

4.6 Implikationer for restaurering af tørvejorde og klimamitigering

Resultaterne har flere implikationer for praksis. For det første kunne effekten af TSR i denne undersøgelse ikke adskilles fra hydrologien, hvilket viser, at evalueringer af TSR som klimavirkemiddel bør ske med eksplicit kontrol for eller stratificering på jordfugtighed/vandstand — ellers risikerer man at tilskrive TSR en effekt (positiv eller negativ), der reelt skyldes stedspecifikke hydrologiske forskelle. Fremtidige restaureringsprojekter, der ønsker at

anvende TSR som virkemiddel, bør derfor sikre sammenlignelige hydrologiske forhold mellem TSR- og referenceområder, eller eksplicit måle og modellere jordfugtighed som kovariat.

For det andet peger den stærke effekt af plantemateriale på, at vegetationsstyring kan være et undervurderet virkemiddel i forvaltningen af vådlagte lavbundsjorde. Dette gælder ikke kun forskelle i flux pr. g plantemateriale, men i mindst lige så høj grad artens produktivitet: opskaleringen til feltniveau (Tabel 3.4) viste, at højproduktive arter som *Typha latifolia* potentielt bidrager langt mere til det samlede drivhusgasbudget end lavproduktive arter som f.eks. mosarter, selv når flux pr. g materiale er sammenlignelig eller lavere. Aktiv styring af vegetationsudviklingen — f.eks. ved at modvirke dominans af højproduktive, hurtigtvoksende arter, eller ved høst og fjernelse af biomasse (Jabłońska et al., 2021; Kandel et al., 2019) — kan derfor potentielt reducere de samlede emissioner fra vådlagte arealer, særligt på længere sigt, hvor øget plantevækst fra næringstilførsel ellers vil generere mere biomasse og dermed et større substratgrundlag.

For det tredje betyder det svage og indirekte forhold mellem næringsstofniveau og drivhusgasemission ikke, at næringsstoffer er uden betydning på længere sigt. Næringsrige arealer forventes at understøtte mere produktiv vegetation over tid, hvilket – i lyset af, at plantematerialets mængde og kvalitet var den stærkeste drivkraft for drivhusgasproduktionen i denne undersøgelse (jf. Tabel 3.4 og afsnittet om vegetationskvalitet) – kan resultere i højere drivhusgasemissioner på længere sigt, efterhånden som den øgede biomasseproduktion omsættes til strøfald og organisk substrat.

4.7 Styrker, begrænsninger og fremtidig forskning

En central styrke ved denne rapport er triangulering på tværs af tre komplementære tilgange — feltmålinger, kontrollerede næringsstofinkubationer og et kontrolleret plantemateriale-eksperiment — som tilsammen giver et mere robust billede, end noget af studierne ville have gjort hver for sig. At det samme overordnede mønster (svag direkte næringseffekt, stærk substrat-/hydrologieffekt) genfindes både i felten og under to forskellige laboratorieopsætninger, styrker tilliden til konklusionerne.

Samtidig er der en række væsentlige begrænsninger. For det første var TSR- og NTSR-arealerne i felteksperimentet ikke tilfældigt fordelt med hensyn til hydrologi, hvilket betyder, at TSR-effekten ikke kan adskilles fuldstændigt fra effekten af jordfugtighed — en begrænsning, der bør adresseres i fremtidige studier gennem et design, hvor TSR og vandstand varieres uafhængigt af hinanden, eller gennem statistisk kontrol for jordfugtighed som kovariat. For det andet dækker feltmålingerne kun én vækstsæson, hvilket begrænser mulighederne for at vurdere år-til-år-variation og forsinkede effekter af næringstilførsel, som diskuteret ovenfor. For det tredje var laboratorieinkubationerne af relativt kort varighed (14–15 dage), og gasproduktionen var i flere tilfælde stadig stigende ved forsøgets afslutning, hvilket introducerer usikkerhed ved ekstrapolering til årlige emissionsbudgetter. For det fjerde blev kun tre plantearter testet i mesokosmosforsøget, og resultaterne kan derfor ikke uden videre generaliseres til andre vådområdearter eller til blandede vegetationssamfund, som det typisk ses i felten. Endelig blev de overjordiske plantedele fjernet i næringsstofinkubationerne, hvilket betyder, at rodeksudater og anden rodmedieret påvirkning af mikrobiel aktivitet — som andre studier har peget på som potentielt vigtig for CH_4-produktionen (Quadra et al., 2023; Vroom et al., 2022) — ikke er fanget i disse forsøg.

På denne baggrund peger vi på følgende prioriteter for fremtidig forskning: (i) flerårige feltundersøgelser, der eksperimentelt adskiller effekten af TSR fra effekten af vandstand; (ii) inkubationsforsøg med et bredere udvalg af plantearter og blandede strøelsessammensætninger for at undersøge, om effekterne fra rene arter kan overføres til naturlige plantesamfund; og (iii) videreudvikling af den fjernmålingsbaserede tilgang skitseret i projektbeskrivelsen, med henblik på at koble vegetations- og fugtighedsdata til regionale emissionsestimater.

5 Konklusion

Denne rapport har, på tværs af tre feltbaserede og laboratoriebaserede studier samt en gennemgang af den internationale litteratur, undersøgt, hvordan næringsstoftilførsel, plantemateriale og hydrologi styrer drivhusgasemissioner fra vådlagte, næringsrige lavbundsjorde. Resultaterne viser samstemmende, at tilførsel af kvælstof og fosfor – i modsætning til projektets udgangshypotese – kun spillede en begrænset og formentlig indirekte rolle for både CO_2- og CH_4-produktionen, mens kulstofsubstratets mængde og kvalitet, herunder plantematerialets sammensætning, samt jordfugtighed viste sig at være de primære drivkræfter. Plantematerialets betydning viste sig desuden ikke kun at afhænge af substratkvalitet, men i mindst lige så høj grad af den enkelte arts produktivitet: højproduktive arter som *Typha latifolia* fremstod som en potentielt langt større kilde til drivhusgasser pr. arealenhed end lavproduktive arter, hvilket peger på vegetationsstyring som et virkemiddel i forvaltningen af vådlagte arealer. Et centralt fund er, at effekten af topjordsfjernelse på CH_4-emissionen i denne undersøgelse ikke kunne adskilles fra hydrologiske forskelle mellem områderne, hvilket understreger, at fremtidige evalueringer af topjordsfjernelse som virkemiddel bør ske med eksplicit kontrol for vandstand. Samlet peger resultaterne på, at eksisterende emissionsmodeller, der alene baserer sig på gennemsnitligt grundvandsspejl, bør suppleres med mål for substrattilgængelighed og vegetationssammensætning for at opnå en mere robust forklaringskraft.

Det skal i den forbindelse understreges, at projektets oprindelige mål om at udarbejde en ny, kvantitativ emissionsmodel til sammenligning med eksisterende modeller ikke er indfriet fuldt ud inden for rammerne af denne rapport. Det, der præsenteres, er en konceptuel ramme, der identificerer og prioriterer de centrale forklaringsfaktorer (afsnit 4.4), men som — grundet datagrundlagets omfang (én vækstsæson, kortvarige inkubationer, begrænset antal replikater og plantearter) — endnu ikke kan parametriseres eller valideres som en implementerbar model. Udvikling af en egentlig kvantitativ model forudsætter det flerårige og bredere datagrundlag, der er skitseret i afsnittet om fremtidig forskning.

Rapporten bidrager dermed med et mere nuanceret og videnskabeligt funderet grundlag for vurdering af klimaeffekten ved udtagning og vådlægning af lavbundsjorde, og peger samtidig på centrale videnshuller – herunder behovet for flerårige studier, der kan adskille effekten af topjordsfjernelse fra hydrologi – som bør adresseres i den videre indsats på området. Litteraturstudiet af remote sensing-baserede metoder peger på et fremtidigt potentiale for regional overvågning af biomasse og fugtighedsforhold, men understreger samtidig, at metoderne endnu ikke er tilstrækkeligt modne til at erstatte feltbaserede målinger i vurderingen af drivhusgasemissioner fra lavbundsjorde.

6 Referencer

Achtnich, C., Bak, F., & Conrad, R. (1995). Competition for electron donors among nitrate reducers, ferric iron reducers, sulfate reducers, and methanogens in anoxic paddy soil. Biology and Fertility of Soils, 19(1), 65-72. https://doi.org/10.1007/bf00336349

Bao, Y., Lin, L., Wu, S., Deng, K. A. K., & Petropoulos, G. P. (2018). Surface soil moisture retrievals over partially vegetated areas from the synergy of Sentinel-1 and Landsat 8 data using a modified water-cloud model. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 72, 76–85.

Beaulieu, J. J., DelSontro, T., & Downing, J. A. (2019). Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. Nature Communications, 10(1), 1375. https://doi.org/10.1038/s41467-019-09100-5

Bjerrum, S. (2026). Effects of plant litter on greenhouse gas production in laboratory incubations of soil from a rewetted riparian fen [Speciale, Aarhus University, Department of Biology]. Aarhus, Denmark.

Davidson, T. A., Audet, J., Jeppesen, E., Landkildehus, F., Lauridsen, T. L., Sondergaard, M., & Syväranta, J. (2018). Synergy between nutrients and warming enhances methane ebullition from experimental lakes. Nature Climate Change, 8(2), 156–160. https://doi.org/10.1038/s41558-017-0063-z

Davidson, T. A., Audet, J., Svenning, J. C., Lauridsen, T. L., Sondergaard, M., Landkildehus, F., Larsen, S. E., & Jeppesen, E. (2015). Eutrophication effects on greenhouse gas fluxes from shallow-lake mesocosms override those of climate warming. Global Change Biology, 21(12), 4449-4463. https://doi.org/10.1111/gcb.13062

Ellenberg, H., Weber, H. E., Düll, R., Wirth, V., & Werner, W. (2001). Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa (3rd ed.). Erich Goltze GmbH & Co KG.

Evans, C., Peacock, M., Baird, A., Artz, R., Burden, A., Callaghan, N., Chapman, P., Cooper, H., Coyle, M., & Craig, E. (2021). Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. Nature, 593(7860), 548-552.

Farella, M. M., Barnes, M. L., Breshears, D. D., Mitchell, J., van Leeuwen, W. J. D., & Gallery, R. E. (2022). Evaluation of vegetation indices and imaging spectroscopy to estimate foliar nitrogen across disparate biomes. Ecosphere, 13, e3992.

Girkin, N. T., Siegenthaler, A., Lopez, O., Stott, A., Ostle, N., Gauci, V., & Sjögersten, S. (2025). Plant root carbon inputs drive methane production in tropical peatlands. *Scientific Reports, 15*(1), 3244.

Haarder, F. M. N. (2025). Nutrient Effects on Greenhouse Gas Production in Laboratory Incubations of Rewetted Fen Soils [Speciale, Aarhus University, Department of Biology]. Aarhus, Denmark.

Hahn-Schöfl, M., Zak, D., Minke, M., Gelbrecht, J., Augustin, J., & Freibauer, A. (2011). Organic sediment formed during inundation of a degraded fen grassland emits large fluxes of CH_4 and CO_2. Biogeosciences, 8(6), 1539–1550.

Hardy, A. J., Barr, S. L., Mills, J. P., & Miller, P. E. (2012). Characterising soil moisture in transport corridor environments using airborne LIDAR and CASI data. Hydrological Processes, 26, 1925–1936.

Harpenslager, S. F., van den Elzen, E., Kox, M. A. R., Smolders, A. J. P., Ettwig, K. F., & Lamers, L. P. M. (2015). Rewetting former agricultural peatlands: Topsoil removal as a prerequisite to avoid strong nutrient and greenhouse gas emissions. Ecological Engineering, 84, 159–168.

Huang, J., Sehgal, V., Alvarez, L. V., Brocca, L., Cai, S., Cheng, R., Cheng, X., Du, J., El Masri, B., Endsley, K. A., Fang, Y., Hu, J., Jampani, M., Kibria, M. G., Koren, G., Li, L., Liu, L., Mao, J., Moreno, H. A., Rigden, A., Shi, M., Shi, X., Wang, Y., Zhang, X., & Fisher, J. B. (2025). Remotely Sensed High-Resolution Soil Moisture and Evapotranspiration: Bridging the Gap Between Science and Society. Water Resources Research, 61, e2024WR037929.

Huguet, A., Vacher, L., Relexans, S., Saubusse, S., Froidefond, J. M., & Parlanti, E. (2009). Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. Organic Geochemistry, 40(6), 706-719. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.03.002

Huth, V., Günther, A., Bartel, A., Hofer, B., Jacobs, O., Jantz, N., Meister, M., Rosinski, E., Urich, T., Weil, M., Zak, D., & Jurasinski, G. (2020). Topsoil removal reduced in-situ methane emissions in a temperate rewetted bog grassland by a hundredfold. Science of the Total Environment, 721, 137763. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137763

Jabłońska, E., Winkowska, M., Wiśniewska, M., Geurts, J., Zak, D., & Kotowski, W. (2021). Impact of vegetation harvesting on nutrient removal and plant biomass quality in wetland buffer zones. Hydrobiologia, 848(14), 3273-3289. https://doi.org/10.1007/s10750-020-04256-4

Kalhori, A., Wille, C., Gottschalk, P., Li, Z., Hashemi, J., Kemper, K., & Sachs, T. (2024). Temporally dynamic carbon dioxide and methane emission factors for rewetted peatlands. Communications Earth & Environment, 5(1), 62

Kandel, T. P., Lærke, P. E., Hoffmann, C. C., & Elsgaard, L. (2019). Complete annual CO2, CH4, and N2O balance of a temperate riparian wetland 12 years after rewetting. Ecological Engineering, 127, 527-535. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.019

Keddy, P. A. (2023). Wetland Ecology: Principles and Conservation (3 ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009288675

Kim, S. Y., Veraart, A. J., Meima-Franke, M., & Bodelier, P. L. E. (2015). Combined effects of carbon, nitrogen and phosphorus on CH4 production and denitrification in wetland sediments. Geoderma, 259-260, 354-361. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.015

Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest package: Tests in linear mixed effects models. Journal of Statistical Software, 82(13), 1-26. https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13

Lenth, R. V. (2025). emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means. R package version 1.11.1. https://CRAN.R-project.org/package=emmeans

Li, C., Zhou, L., & Xu, W. (2021). Estimating Aboveground Biomass Using Sentinel-2 MSI Data and Ensemble Algorithms for Grassland in the Shengjin Lake Wetland, China. Remote Sensing, 13(8), 1595.

Lumbierres, M., Méndez, P. F., Bustamante, J., Soriguer, R., & Santamaría, L. (2017). Modeling Biomass Production in Seasonal Wetlands Using MODIS NDVI Land Surface Phenology. Remote Sensing, 9(4), 392.

Malinowski, R., Höfle, B., Koenig, K., Groom, G., Schwanghart, W., & Heckrath, G. (2016). Local-scale flood mapping on vegetated floodplains from radiometrically calibrated airborne LiDAR data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 119, 267–279.

Marker, T. M. (2025). Greenhouse Gas Fluxes in a Rewetted Danish Fen: Effects of Topsoil Removal and Nutrient Enrichment [Speciale, Aarhus University, Department of Biology]. Aarhus, Denmark.

Millard, K., & Richardson, M. (2018). Quantifying the relative contributions of vegetation and soil moisture conditions to polarimetric C-Band SAR response in a temperate peatland. Remote Sensing of Environment, 206, 123–138.

Moeneclaey, I., Baeten, L., Verheyen, K., & Van Coillie, F. (2022). Disentangling the effects of phosphorus, nitrogen and species identity on the vegetation reflectance spectrum. Applied Vegetation Science, 25, e12688.

Moeslund, J. E., Arge, L., Bøcher, P. K., Dalgaard, T., Ejrnæs, R., Odgaard, M. V., & Svenning, J.-C. (2013a). Topographically controlled soil moisture drives plant diversity patterns within grasslands. Biodiversity and Conservation, 22, 2151–2166.

Moeslund, J. E., Arge, L., Bøcher, P. K., Dalgaard, T., Odgaard, M. V., Nygaard, B., & Svenning, J.-C. (2013b). Topographically controlled soil moisture is the primary driver of local vegetation patterns across a lowland region. Ecosphere, 4, Article 91.

Moeslund, J. E., & Damgaard, C. F. (2024). Predicting Abiotic Soil Characteristics Using Sentinel-2 at Nature-Management-Relevant Spatial Scales and Extents. Remote Sensing, 16, 3094.

Moeslund, J.E., Nygaard, B. & Bladt, J. (2026). Alternative datakilder til overvågning af terrestriske naturtyper. Opdateret screening af muligheder for NOVANA-programmet. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 89 s. - Videnskabelig rapport nr. 716

Moeslund, J. E., Zlinszky, A., Ejrnæs, R., Brunbjerg, A. K., Bøcher, P. K., Svenning, J.-C., & Normand, S. (2019). Light detection and ranging explains diversity of plants, fungi, lichens, and bryophytes across multiple habitats and large geographic extent. Ecological Applications, 29, e01907.

Mutanga, O., Masenyama, A., & Sibanda, M. (2023). Spectral saturation in the remote sensing of high-density vegetation traits: A systematic review of progress, challenges, and prospects. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 198, 297–309.

Möckel, T., Löfgren, O., Prentice, H. C., Eklundh, L., & Hall, K. (2016). Airborne hyperspectral data predict Ellenberg indicator values for nutrient and moisture availability in dry grazed grasslands within a local agricultural landscape. Ecological Indicators, 66, 503–516.

Netsianda, A., & Mhangara, P. (2025). Aboveground biomass estimation in a grassland ecosystem using Sentinel-2 satellite imagery and machine learning algorithms. Environmental Monitoring and Assessment, 197(2), Article 138.

Pinheiro, J., Bates, D., & R Core Team. (2025). nlme: Linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3.1-168. https://CRAN.R-project.org/package=nlme

Quadra, G. R., Boonman, C. C. F., Vroom, R. J. E., Temmink, R. J. M., Smolders, A. J. P., Geurts, J. J. M., Aben, R. C. H., Weideveld, S. T. J., & Fritz, C. (2023). Removing 10 cm of degraded peat mitigates unwanted effects of peatland rewetting: a mesocosm study. Biogeochemistry, 163(1), 65-84. https://doi.org/10.1007/s10533-022-01007-6

R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/

R Core Team. (2025). R: A language and environment for statistical computing (Version 4.5.1). R Foundation for Statistical Computing. https://www.r-project.org/

Schielzeth, H., Dingemanse, N. J., Nakagawa, S., Westneat, D. F., Allegue, H., Teplitsky, C., Réale, D., Dochtermann, N. A., Garamszegi, L. Z., & Araya-Ajoy, Y. G. (2020). Robustness of linear mixed-effects models to violations of distributional assumptions. Methods in Ecology and Evolution, 11(9), 1141-1152. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13434

Schmidtlein, S. (2005). Imaging spectroscopy as a tool for mapping Ellenberg indicator values. Journal of Applied Ecology, 42, 966–974.

Simpson, G., Nichol, C. J., Wade, T., Helfter, C., Hamilton, A., & Gibson-Poole, S. (2024). Species-Level Classification of Peatland Vegetation Using Ultra-High-Resolution UAV Imagery. Drones, 8, 97.

Stuart, M. B., Davies, M., Hobbs, M. J., McGonigle, A. J. S., & Willmott, J. R. (2022). Peatland Plant Spectral Response as a Proxy for Peat Health, Analysis Using Low-Cost Hyperspectral Imaging Techniques. Remote Sensing, 14, 3846.

Takada, M., Mishima, Y., & Natsume, S. (2009). Estimation of surface soil properties in peatland using ALOS/PALSAR. Landscape and Ecological Engineering, 5, 45–58.

Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E. A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Gensior, A., Giebels, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Laggner, A., Leiber-Sauheitl, K., Peichl-Brak, M., & Drösler, M. (2020). A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. Ecological Indicators, 109, 105838. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838

Torbick, N., Persson, A., Olefeldt, D., Frolking, S., Salas, W., Hagen, S., Crill, P., & Li, C. (2012). High Resolution Mapping of Peatland Hydroperiod at a High-Latitude Swedish Mire. Remote Sensing, 4(7), 1974–1994.

Vroom, R. J. E., van den Berg, M., Pangala, S. R., van der Scheer, O. E., & Sorrell, B. K. (2022). Physiological processes affecting methane transport by wetland vegetation – A review. Aquatic Botany, 182, 103547. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2022.103547

Wood, S. N. (2017). Generalized additive models: An introduction with R (2nd ed.). Chapman and Hall/CRC.

Yang, Y., Dong, J., Tang, J., Zhao, J., Lei, S., Zhang, S., & Chen, F. (2024). Mapping Foliar C, N, and P Concentrations in An Ecological Restoration Area with Mixed Plant Communities Based on LiDAR and Hyperspectral Data. Remote Sensing, 16, 1624.

Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). Mixed effects models and extensions in ecology with R. Springer.

DRIVHUSGASEMISSIONER FRA LAVBUNDSJORDE – BETYDNINGEN AF NÆRINGSSTOFFER OG PLANTESAMFUND

Rapporten undersøger, hvordan næringsstoftilgængelighed, plantemateriale og hydrologi påvirker drivhusgasemissioner fra vådlagte, næringsrige lavbundsjorde, baseret på et felteksperiment, et laboratorieforsøg med næringsstofberigelse og et mesokosmosforsøg med strøelse fra tre vådområdearter. Næringsstoffer havde kun begrænset og formentlig indirekte effekt, mens plantematerialets mængde og kvalitet var en langt stærkere drivkraft; højproduktive arter som dunhammer bidrog potentielt mest pr. arealenhed. Topjordsfjernelse gav højere CH_4-emission, men effekten kunne ikke adskilles fra højere jordfugtighed. Resultaterne samles i en konceptuel ramme, der peger på, at emissionsmodeller bør suppleres med mål for kulstofsubstrat og vegetation. Remote sensing er endnu ikke præcis nok til at erstatte feltdata.

ISBN: 978-87-7648-097-4
ISSN: 2244-9981