

Vidensyntese om kvælstofudvaskning fra vintersæd kontra efterafgrøder

Forfattere: Nanna Hellum Kristensen^a, Leif Knudsen^a, Elly Møller Hansen^b, Gitte Blicher-Mathiesen^c, Lars Stoumann Jensen^d, Per Abrahamsen^d, Julie Therese Christensen^a

^a Planter og Miljø, SEGES Innovation

^b Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet

^c Institut for Ecoscience – Oplandsanalyse og miljøforvaltning, Aarhus Universitet

^d Institut for Plante- og Miljøvidenskab, Københavns Universitet

Indhold

Indledning	3
Baggrund	4
Betydning af jordtype og roddybde	4
Metodebeskrivelse: estimering af N-udvaskningspotentialet.....	6
Resultater af N-min-prøver i forskellige afgrøderækkefølger.....	6
Strømningsveje	8
Resultater	10
Udvaskningsforsøg ved Aarhus Universitet.....	10
Nitratkoncentration under vintersæd kontra bar jord i 2 meters dybde.....	25
LOOP: Målte nitratkoncentrationer og udvaskning fra marker med korn efterfulgt af vinterkorn eller efterafgrøder	33
Månedsværdier for afstrømning, udvaskning og afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer	40
Udvaskningsrisiko fra vinterhvede ved forskellige jordbearbejdningsystemer.....	42
Daisy model-simuleringer af N udvaskning i forskellige afgrøde-scenarier	44
Opsummering	47
Konklusion	50
Behov for yderligere undersøgelser.....	50
Referencer	51
Bilag 1. Nitratkoncentrationer i 1 og 2 meters dybde	55

Indledning

Efterafgrøder er et virkemiddel, som bruges på dyrkningsfladen til at reducere udvaskningen af kvælstof. Mekanismen er, at efterafgrøder optager kvælstof i efteråret, som ellers potentielt set ville udvaskes i tilfælde af afstrømning. Helt siden Vandmiljøplan 1 fra 1987 har det været diskuteret, om vintergrønne marker med vintertkorn evt. kunne have samme udvaskningsreducerende effekt som efterafgrøder. Det er i Danmark et lovkrav at have efterafgrøder på en vis andel af arealet i omdrift, og når kravet til andel af efterafgrøder bliver høj, kan det medføre ændringer i sædskiftet, da det ikke er muligt at have vintersæd på marker med efterafgrøder. Det økonomiske dækningsbidrag af vintersæd er midlertidigt større end for vårsæd, hvorved det kan have økonomiske konsekvenser for landmændene at opfylde efterafgrødekravene.

Lovgivningen baserer sig på, at udvaskningen af kvælstof reduceres mest ved brug af efterafgrøder sammenlignet med dyrkning af vintersæd sået til normal tid. I efterårsperioden er der enighed blandt forskere om, at efterafgrøder generelt reducerer udvaskningen mere sammenlignet med vintersæd, men der mangler viden om, hvorvidt efterafgrøder efterfulgt af vårsæd over et helt dyrkningssystem og under specifikke dyrkningsforhold reelt er bedre til at reducere udvaskningen end et vintersædsbaseret system, og hvorvidt dette afhænger af jordtype og klimatiske forhold (lokalitet). Diskussionen har bl.a. taget udgangspunkt i artiklen af Thorup-Kristensen et al. (2009), hvor det er fundet, at vinterhvede på en fin sandblandet lerjord (JB6) kunne optage kvælstof fra under 1 m i foråret og frem til høst af vinterhveden, mens rødderne fra vårsæden ikke nåede ned i en tilsvarende dybde. Ved efterafgrøder med efterfølgende vårsæd ligger jorden i modsætning til vintersæd bar, fra det tidspunkt efterafgrøderne nedmuldes, ofte omkring 1. november på lerjord, til begyndelsen af maj, hvor vårbyggen begynder at have en betydelig kvælstofoptagelse. Det kan undersøges, om dette eventuelt kan give anledning til en større udvaskning i forårsperioden, end den der er fra vintersæd, hvor jorden er dækket af afgrøden hele vinteren og foråret.

Det diskuteres desuden, om det kan være et problem for sammenligningen af udvaskning fra efterafgrøder og vintersæd, at målinger af udvaskning af kvælstof typisk foretages med sugeceller i 1 meters dybde. Det skyldes, at vintersæd på de mere lerede jordtyper i langt højere grad end vårsæd kan optage kvælstof under 1 meter om foråret, og derved potentielt set kan optage nitrat, der er udvasket om efteråret til under 1 meter. I disse tilfælde kan kvælstofudvaskningen i vintersæd være overvurderet. Hvorvidt en overestimering af udvaskningen finder sted ved brug af sugeceller, vil afhænge af flere faktorer herunder jordtype i underjorden, nedbørsmængde, nedbørsfordeling over efteråret og vinteren, og om marken er drænet. Jordtypen har betydning for afgrødernes mulighed for at udvikle rødder i stor dybde, nedbørsforholdene har betydning for, hvor hurtigt kvælstoffet udvaskes til under roddeybde, og jordens dræning har betydning for, om kvælstof udvaskes gennem dræn, inden afgrøderne har udviklet rødder i tilstrækkelig dybde til at optage det. Det har derfor en betydning, hvilken vandrecipient, der modtager nitrat fra jordvand. Hvis recipienten er kystvande, vil nitrat i jordvand eller i højtstående grundvand blive udledt via dræn til vandløb, og her vil røddernes dybde under 1 m ikke være så afgørende for kvælstoftransport via dræn til vandløb. Hvis recipienten er grundvand, vil vintersæds evne til at optage nitrat under 1 m give en mindre nitratbelastning til det dybere liggende grundvand end opgjort ved 1 m's dybde, men det kan være vanskeligt at estimere kvantitativt, da også strømningsforhold og denitrifikation under 1 m's dybde har en betydning for de målte nitratkoncentrationer.

I et samarbejde mellem forskere fra KU og AU samt specialister fra SEGES vil denne vidensyntese beskrive den nuværende viden på området for at afdække, hvor der er solid viden på området, samt hvor der er videnshuller, der med fordel kunne afdækkes i fremtiden. Vidensyntesen opdateres igen med nyeste viden i 2024.

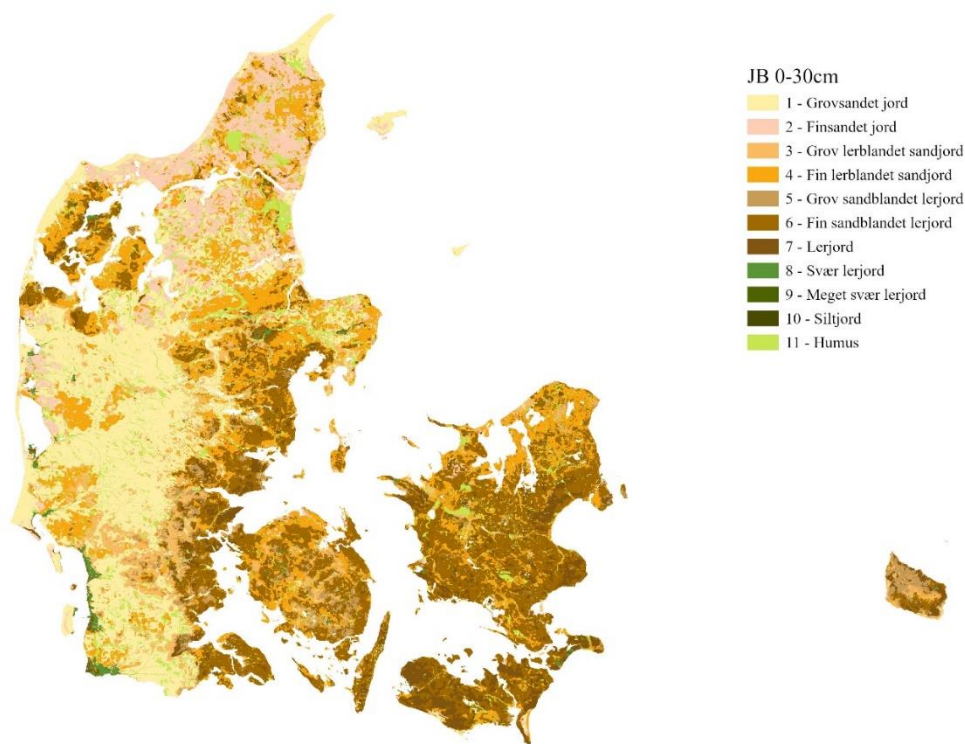
For hvert afsnit er der angivet forfatter. Indledning, opsummering og konklusion er fælles.

Baggrund

Betydning af jordtype og roddybde

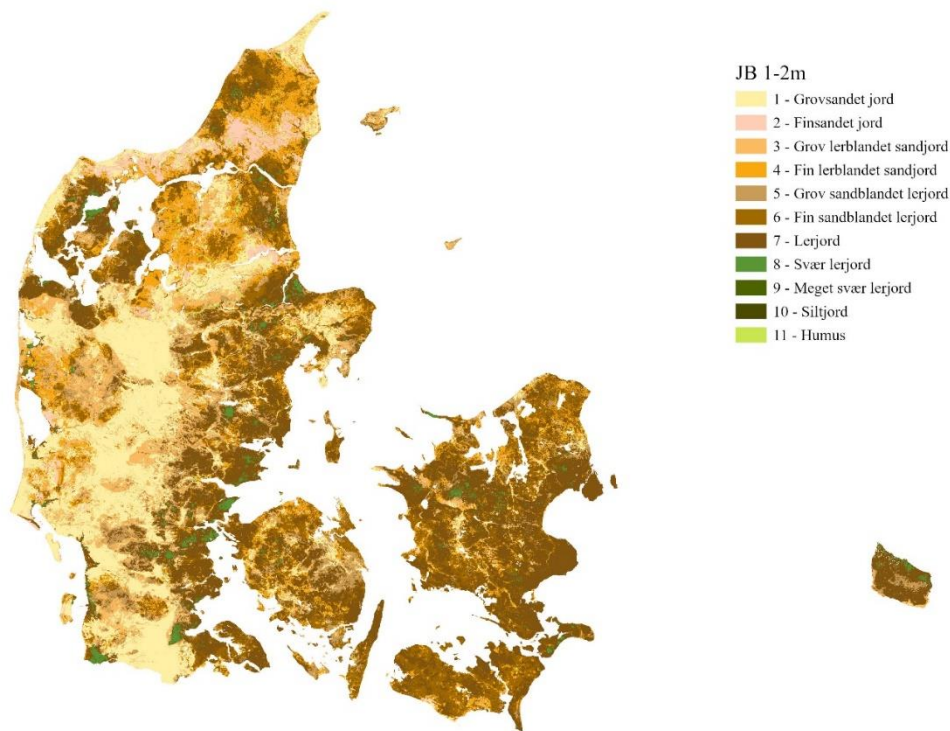
Julie Therese Christensen, SEGES Innovation

Jordens tekstur er en bestemmende faktor for jordens vandholdende evne. Jo finere tekstur, desto bedre en vandholdende evne vil jorden have. Jo større den vandholdende evne er, desto større mængde nedbør skal der til, før afstrømningen starter. Der er en god sammenhæng mellem jordens lerindhold og udvaskningen af kvælstof, hvor udvaskningen generelt er mindre, desto højere lerindholdet er (Simmelsgaard 1998). På **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** ses fordelingen af jordtyper i Danmark i de øverste 30 cm. I Vestdanmark er jorden dominerende grovsandet, i Østdanmark er den overvejende leret. I det nordlige Danmark er jorden dominerende finsandet. Figur 2 viser den prædikterede jordtype i 1-2 meters dybde, hvor det ses, at i Østdanmark er underjorden dominerende leret, og i Vestdanmark er den dominerende grovsandet.



Figur 1. Prædikteret jordtype (JB nr.) i 0-30 cm dybde

(Kilde: M.B. Greve, Aarhus Universitet, personlig meddelelse 2022; efter Adhikari et al., 2013).



Figur 2. Prædikteret jordtype (JB nr.) i 1-2 m dybde

(Kilde: M.B. Greve, Aarhus Universitet, personlig meddelelse 2022; efter Adhikari et al., 2013).

Udvaskningen er påvirket af afstrømningen fra rodzonen, der hovedsagelig er bestemt af jordtypen og vinternebbøren. I Vestdanmark er afstrømningen vinterperioden (september til april) ca. 530 mm, mens den i Østdanmark er 300 mm. Den højere nedbør i Vestdanmark kombineret med mere sandet jord vil give en betydelig større naturbestemt udvaskning end i Østdanmark.

For at afgrøder kan hindre tab af kvælstof ved at optage det, skal rødderne som minimum være i den dybde, hvor det mineralske kvælstof befinder sig. Derfor har afgrødernes roddybde stor betydning for den potentielle udvaskning. Roddybde afhænger af mange forskellige faktorer. Her kan nævnes faktorer som jordtype, vinternebbør, art, såtidspunkt, jordens penetrationsmodstand, vandtilgængelig og næringsstofstilgængelighed. På sandede jordtyper indikeres det, at afgrødernes roddybde ofte vil være begrænset, og rodudviklingen generelt ringere. På de sandede jorde er indholdet af ler og organisk stof særligt vigtige faktorer for, om jorden hæmmer rodvæksten (Andersen, 1986 og Andersen 1985), og jordtypen kan ikke alene bruges som indikator for rodudviklingen. Rodvæksten kan også hæmmes af penetrationsmodstand, og en modstand på over 3 MPa kan hæmme rodvæksten (Andersen, 1986). Herudover har arten stor betydning, og forskellige arter opnår typisk også forskellige roddybder. For eksempel Kristensen og Thorup-Kristensen (2004) som i et markforsøg med tre forskellige efterafgrødearter observerede roddybder mellem 0,6 og 2,4 m. Såtidspunkt, og dermed hvor lang tid afgrøderne har vokset, er ligeledes afgørende for, hvilke dybder rødderne kan optage kvælstof fra. Rasmussen og Thorup-Kristensen (2016) har vist, at tidligere sået vinterhvede opnåede 0,7 m dybere roddybde og en generel højere roddensitet end sent sået vinterhvede. Vinterhvede sået tidligt opnåede ligeledes en større reduktion af nitrat-N. Et studie af Thorup-Kristensen (2009) demonstrerer ligeledes, at der er forskellig tidlig udvikling i roddybder, hvor efterafgrøder opnår en større roddybde end vintersæd i efteråret. Derimod opnår vintersæden en større roddybde i foråret end den vårsæd, som efterfølger efterafgrøden.

Metodebeskrivelse: estimering af N-udvaskningspotentialiet

Julie Therese Christensen, SEGES Innovation

N-min-prøver udtaget i efteråret inden begyndende afstrømning betragtes som værende en god indikator for udvaskningspotentialiet i den kommende afstrømningsperiode. N-min er summen af nitrat-N og ammonium-N i jorden, og er dermed et udtryk for jordens indhold af mineralsk kvælstof. N-min-prøver tages ofte i 0-100 cm dybde, og prøverne skal holdes dybfrosne indtil analysetidspunktet. Oftest består en jordprøve til N-min af 16 stik. Det mest optimale tidspunkt for udtagning af N-min-prøver til forudsigelse af udvaskningsrisikoen er kort tid inden, afstrømningen begynder om efteråret (Børgesen et al 2018). Hvornår afstrømningen på et givent areal begynder afhænger af jordtype og nedbørsmængden. Generelt vil afstrømningen begynde før på de sandede jorde sammenlignet med jorde med større lerindhold, grundet sandjordes ringere vandholdende evne.

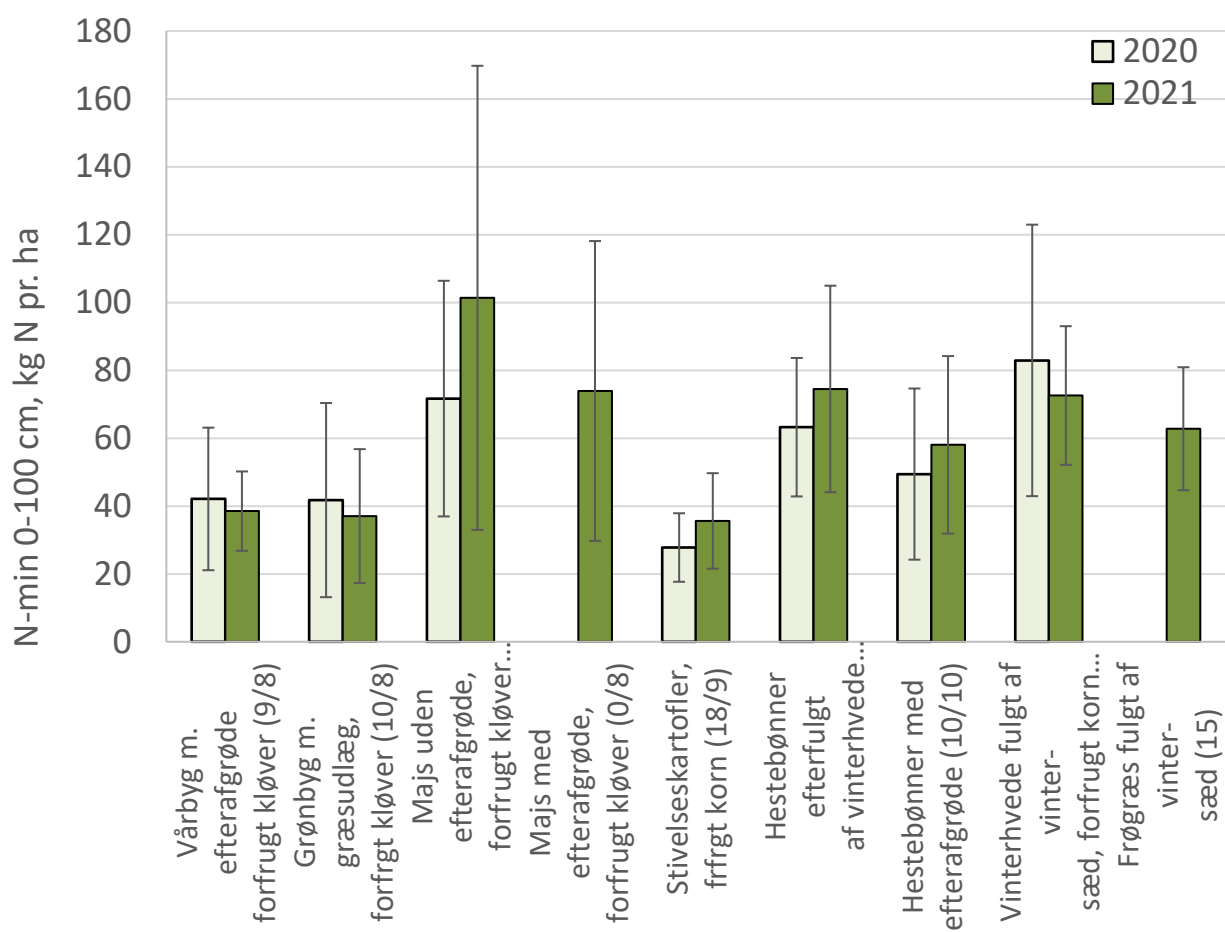
Resultater af N-min-prøver i forskellige afgrøderækkefølger

Julie Therese Christensen, SEGES Innovation

I projektet LessN blev der i efteråret 2020 og 2021 målt N-min i marker med forskellige afgrøderækkefølger. Der er over de to sæsoner udtaget N-min-prøver i 217 marker. Tidspunktet for prøveudtagningen afhang af jordtypen. For JB1 og 3 blev prøverne udtaget 1. oktober til 15. oktober, for JB 2 og 4: 15. oktober – 1. november, og for JB 5-7 var prøvetagningsperioden 1. november – 15. november. Der blev udtaget 2 N-min-prøver i hver mark, og hver prøve bestod af 8 stik. Resultaterne er et gennemsnit af de to prøver. Figur 3. viser resultaterne fra N-min-programmet. Det gennemsnitlige N-min-niveau var 61 kg N pr. ha i 2020 og 65 kg N pr. ha i 2021. Der ses generelt en stor variation i niveauet for N-min-prøverne indenfor hver af afgrøderækkefølgerne. Det gennemsnitlige niveau var mellem 40-100 kg N pr. ha i begge år.

I marker med vinterhvede fulgt af vintersæd var N-min-niveauet omkring 80 kg N pr. ha med en stor variation i de målte værdier i 2020. Sammenligneligt var N-min-niveauet for frøgræs efterfulgt af vintersæd omkring 100 kg N pr. ha i 2020 og omkring 60 kg N pr. ha i 2021. N-min-indholdet i marker med vintersæd om efteråret er ved alle forfrugter til vintersæden højere end N-min-indholdet i marker med vårbyg med efterafgrøder med forfrugt kløvergræs. N-min-indholdet under vintersæd varierer meget specielt i 2020.

I begge år findes det laveste niveau af N-min i marker med vårbyg m. efterafgrøde, grønbyg m. græsudlæg samt stivelseskartofler. Majs uden efterafgrøde havde i begge år et af de højeste N-min-niveauer set på tværs af alle afgrøderækkefølgerne, og i disse marker var der også en større variation i N-min-målingerne. Ved tolkning af resultaterne skal det tages i betragtning, at N-min-målingerne er foretaget i forskellige marker, hvorved forhold betydende for N-min-niveauet udover afgrøderækkefølge må antages at være forskellige, herunder nedbørsmængder og jordbundsforhold.



Figur 3. Resultater af N-min målt i efteråret ved forskellige afgrødefølger i hhv. 2020 og 2021. Søjlerne viser gennemsnit i de enkelte grupper. Fejllinjen angiver standardafvigelsen.

Strømningsveje

Gitte Blicher-Mathiesen, Institut for Ecoscience – Oplandsanalyse og miljøforvaltning, Aarhus Universitet

I jorden findes kvælstof som opløst og mobilt nitrat, og når vand strømmer ud af rodzonen, følger nitraten med. Der kan også være mindre mængder af opløst organisk kvælstof og ammonium i det vand, som forlader rodzonen. Udvaskning af jorden starter i efteråret, når mængden af nedbør er større end fordampningen. Vandet fra rodzonen har forskellige strømningsveje til vandløbet: i) en overfladenær afstrømning via dræn og grøfter, ii) en nedadgående afstrømning via grundvand til vandløbet og endelig også iii) en afstrømning, hvor grundvand på lavereliggende arealer "trykkes op" til vandløbet og afstrømmer via dræn og grøfter eller iv) via direkte overfladeafstrømning.

De forskellige strømningsveje er især styret af, om jorden er drænet eller grøftet, hvor dræning især sker på jord med en ler-procent på over 12 pct. omkring 1 m's dybde.

Netop drænet lerjord er i fokus i denne vidensyntese, om efterafgrøder nedbringer udvaskning ift. dyrkning af vinterkorn. Drænede jorde er i fokus, fordi myndighedernes krav om dyrkning af efterafgrøder især skal nedbringe udledningen af kvælstof til kystvande. På drænede jorde vil effekten af at dyrke efterafgrøder forventelig have en stor effekt på nitrattransport til dræn, men det er her vigtigt at se på referencen, altså om effekten af efterafgrøde alene ses i forhold til korn efterfulgt af barjord, eller til korn efterfulgt af vinterkorn, som dyrkningsforholdene i dag er på mange plante- og svinebrug.

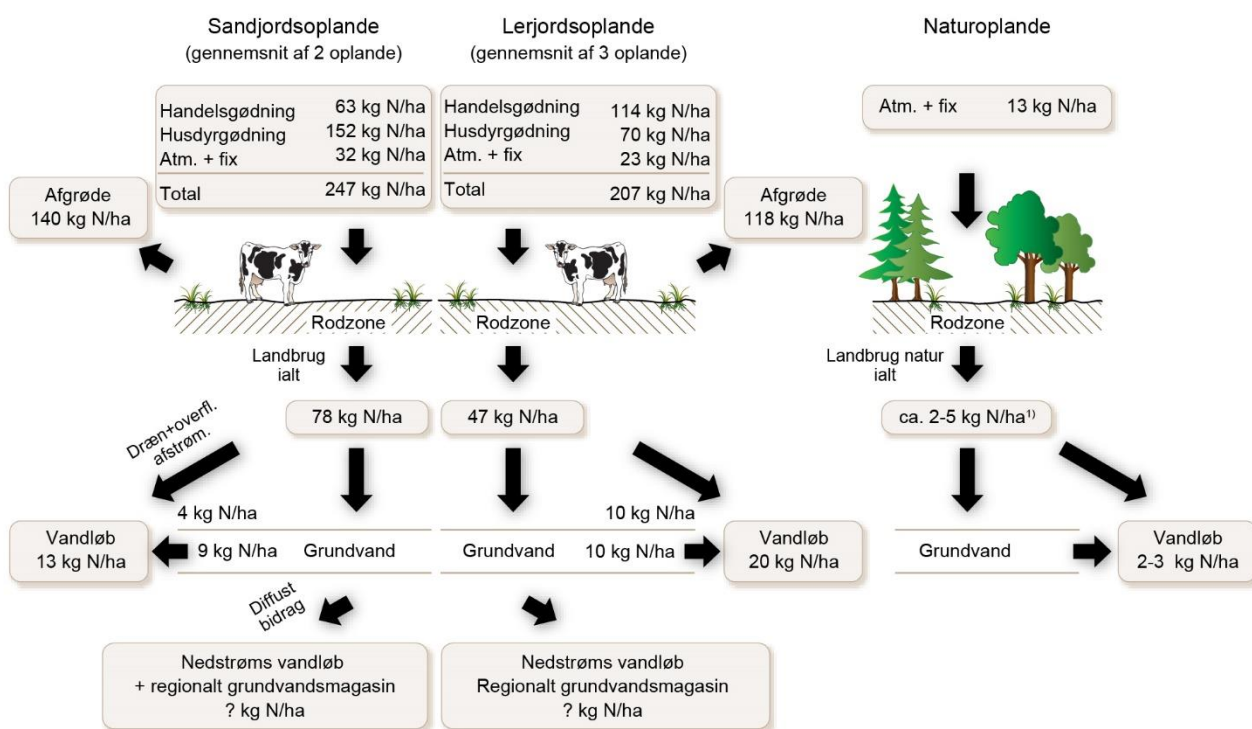
Målte nitratkoncentrationer og nitratudvaskning i både jord og drænvand vil derfor kunne give os indsigt i, om efterafgrøder giver lavere nitratudvaskning, end hvis der i stedet dyrkes vinterkorn.

De overordnede strømningsmønstre for vandet har betydning for, hvor meget kvælstof der strømmer af til vandløbene.

På data fra Landovervågning er fem års data opgjort for to sandjords- og tre lerjordsoplande for elementerne; kvælstof-markbalance, nitratudvaskning fra rodzonen, den overfladenære afstrømning til vandløb samt kvælstoftransporten i vandløb og vist i Figur 4. (Blicher-Mathiesen et al., 2021). For de tre lerjordsoplande er den årlige nettotilførsel (totaltilført minus fraført med afgrøde) til marken ca. 89 kg N ha⁻¹. Den modelberegnete udvaskning (N-LES) fra rodzonen i oplandet har i perioden udgjort ca. 47 kg N ha⁻¹ år⁻¹. Det diffuse kvælstoftab til vandløbene for de dyrkede arealer har udgjort ca. 20 kg N ha⁻¹ år⁻¹; det svarer til, at der gennemsnitlig er godt 42 pct. af rodzoneudvaskningen, som er nået til vandløbene. Der er dog stor forskel imellem lerjordsoplandene.

I sandjordsoplandene er den årlige nettotilførsel til marken ca. 107 kg N ha⁻¹ år⁻¹. Den modelberegnete udvaskning (N-LES4) fra rodzonen i oplandet er opgjort til ca. 78 kg N ha⁻¹ år⁻¹. Det diffuse kvælstoftab til vandløbene for de dyrkede arealer har udgjort ca. 19 kg N ha⁻¹ fra oplandet i Nordjylland (LOOP 2) og ca. 7 kg N ha⁻¹ fra oplandet i Sønderjylland (LOOP 6). Med en gennemsnitlig modelberegnet udvaskning på 73 (LOOP 2) og 84 (LOOP 6) for de to oplande, svarer det til, at henholdsvis 26 og 8 pct. af rodzonens nitratudvaskningen er nået ud til vandløbene.

Det årlige kvælstofkredsløb (2015/16 – 2019/20)



Figur 4. Skemativering af kvælstofkredsløbet i henholdsvis dyrkede lerjords- og sandjordsoplande samt for naturoplande for årene 2015/16-2019/20. Kvælstofbalancen er fra interviewundersøgelsen 2015-2020, mens udvaskningen er modelberegnet for alle marker i oplandene med N-LES4 med et gennemsnitsklima for perioden fra 1990/91 til 2009/10. Vandløbstransport for total-N er korrigeret for spildevandsudledning, dvs. transporten repræsenterer den diffuse udledning fra dyrkede arealer inkl. spredt bebyggelse og baggrundsbidrag og opgjort som tabet fra det dyrkede areal. 1) Intervallet for naturarealer, 2-5 kg N ha⁻¹, henviser til udvaskningen fra henholdsvis gammel natur og gammel skov.

Overordnet set strømmer vand fra rodzonen via forskellige strømningsveje til grundvandet på sand- og lerjord. På sandjord sker størstedelen af afstrømningen til vandløb via grundvand, mens det på lerjord er en langt mindre andel, fordi en stor del afstrømmer via dræn og grøfter (Petersen et al. 2021).

Resultater

Udvaskningsmålinger

Udvaskningsforsøg ved Aarhus Universitet

Elly Møller Hansen, Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet

Afsnittet indeholder både publicerede og upublicerede data.

Indledning

Ifølge Thorup-Kristensen et al. (2009) kan vinterhvede fra foråret og frem til høst optage kvælstof fra under 1 m dybde. Derved vil vinterhvede kunne reducere udvaskningen mere end antaget på basis af udvaskningsmålinger i 1 m dybde. Det har derfor bl.a. betydning, hvor hurtigt der forekommer afstrømning og dermed udvaskning af kvælstof til under vinterhvedens roddybde. For eksempel kan store mængder nedbør i efteråret medføre tidlig udvaskning af nitrat til en dybde, hvor afgrøder eller efterafgrøder ikke kan optage det.

I nærværende afsnit søges problemstillingen belyst med resultater fra to markforsøg, hvor der er bestemt bl.a. nitratudvaskning gennem en årrække. Det ene markforsøg er udført under forskellige projektnavne. Det drejer sig om Stigende N-forsøget under det tidligere GUDP-projekt, VIRKN ("Intelligente virkemidler til reduktion af kvælstofudvaskningen"), som blev gennemført fra efteråret 2015 til foråret 2019. I forsøget indgik parceller med både vintersæd og vårsæd. Fra 2019 blev vintersædparcellerne videreført i GUDP-projektet N-Tool-Precise ("Bedre kvælstofudnyttelse og indtjening med satellitbestemt kvælstofoptagelse i kvælstofmodellen N-Tool-Precise"), men fortsatte tillige med vårsædparcellerne efter samme grundlæggende forsøgsplan som i VIRKN. Fra og med efteråret 2020 blev vårbygparcellerne i forsøget delvist ændret for at indgå som en del af GUDP-projektet LessN ("Lavemissionssædskifter til målrettet kvælstofindsats"). Resultater fra alle tre projekter indgår i den følgende beskrivelse, som tager udgangspunkt i Hansen et al. (2021), hvori der er vist data til og med udvaskningsåret 2018/19.

Det andet markforsøg, som indgår, er en del af CENTS-forsøget, som blev påbegyndt i 2002 (Hansen et al., 2015), og hvor der fra 2019 er fortaget målinger af nitratkoncentrationer i 1 og 2 m dybde i et enkelt sædskifte.

Materialer og metoder

VIRKN og N-Tool-Precise

I projekterne VIRKN og N-Tool-Precise blev der i perioden fra efteråret 2015 til foråret 2020 bestemt udvaskning i markforsøg på lokaliteterne Foulum (fin lerblandet sandjord, JB4, ikke drænet) og Flakkebjerg (fin sandblandet lerjord, JB6, drænet). Hvert år blev sået vintersæd tidligt og til normal tid samt vårsæd efterfulgt af forskellige efterårsbevoksninger. Desuden indgik 4-6 niveauer af kvælstofgødsning (0N – 1,5N), hvoraf udelukkende forsøgsled gødet efter normen i 2016 (1N) er medtaget i beskrivelsen nedenfor. Resultater fra 2016 til 2019 er præsenteret i Vogeler et al. (2021).

I VIRKN og N-Tool-Precise indgik følgende fem forsøgsled:

- Normalt sået vintersæd
- Tidligt sået vintersæd
- Vårbyg med efterafgrøde
- Vårbyg med sort jord
- Vårbyg med spildkorn og ukrudt

Der blev som udgangspunkt dyrket vinterhybridrug som vintersæd på Foulum og vinterhvede på Flakkebjerg. Gødningsmængden til 1N på Foulum svarede til 171 kg N/ha (vinterrug) og 143 kg N/ha (vårbyg) og på Flakkebjerg til 202 kg/ha (vinterhvede) og 151 kg N/ha (vårbyg).

På Foulum blev der som efterafgrøde hovedsagelig dyrket alm. rajgræs sået som udlæg om foråret. Dog var efterafgrøden på Foulum olieræddike i 2015/16 og 2019/20. På Flakkebjerg bestod efterafgrøden hvert år af olieræddike spredt før høst af vårbyg. På begge lokaliteter blev der med henblik på at opnå en ensartet bestand af spildkorn spredt frø af vårbyg umiddelbart efter høst. På Foulum blev parceller med vårbyg pløjet om foråret, mens de på Flakkebjerg blev pløjet i november.

Alle forsøgsled blev gennemført i blokforsøg med fire gentagelser. Forsøgene var fastliggende, dvs. at hver parcel hvert år blev dyrket med den samme afgrøde og tilført samme kvælstofmængde. At forsøgene er fastliggende med ensidig dyrkning af vintersæd betyder, at de senere år af forsøgsperioden først og fremmest er relevante for en praksis, hvor der er mere fokus på dyrkning af vintersæd end på et varieret sædskifte med dyrkning vårsæd og efterafgrøder.

For både Foulum og Flakkebjerg var der afvigelser fra forsøgsplanen. På Foulum blev normalt og tidligt sået vinterrug i 2018/19 gødet med 50 kg N/ha over 1N. I 2015/16 og 2019/20 var efterafgrøden olieræddike, mens der i 2016/17 var alm. rajgræs i forsøgsleddet vårbyg med spildkorn og ukrudt. I 2019/20 udviklede vinterrugen sig dårligt pga. skadedyrsangreb, hvorfor rugen blev fjernet og erstattet af havre, der blev sået 14. maj 2020 efter en fræsning af parcellerne. Vinterrugen var tilført startgødning (50 kg N/ha) men blev ikke yderligere gødet, inden den blev fjernet. Den efterfølgende havre forblev ugødet og blev høstet 5. august 2020 inden modenhed.

På Flakkebjerg i 2017/18 blev tidligt sået og normalt sået vinterhvede sået samtidigt pga. for store nedbørsmængder på tidspunktet for tidlig såning. Alle år blev der på Flakkebjerg benyttet Latitude-bejdset udsæd af vinterhvede. I foråret 2020 udviste vinterhveden dog tegn på goldfodsyge, og der blev i 2020/21 sået vinterrug ved begge såtidspunkter.

LessN

Fra 2020 blev to af VIRKN-forsøgsleddene med vårbyg ændret, således at vårbyg med efterafgrøde blev ændret til vårbyg med sort jord, mens vårbyg med spildkorn og ukrudt blev ændret til vårbyg med efterafgrøde (udlæg af alm. rajgræs på Foulum og olieræddike spredt før høst på Flakkebjerg). De tidligere forsøgsled med vårbyg efterfulgt af sort jord fortsatte uændrede. I LessN indgik således følgende tre forsøgsled:

- Vårbyg med efterafgrøde t.o.m. 2019/20, derefter sort jord
- Vårbyg med sort jord
- Vårbyg med spildkorn og ukrudt t.o.m. 2019/20, derefter efterafgrøde

Ved overgangen til LessN blev gødningstilførslen til alle forsøgsled med vårbyg reduceret med 17 kg N/ha til 126 kg N/ha ved Foulum og 134 kg N/ha ved Flakkebjerg for at tage hensyn til en eventuel eftervirkning af de forudgående efterafgrøder. Bortset fra ovenstående ændringer blev forsøget udført efter samme plan og metode, som beskrevet for VIRKN og N-Tool-Precise.

CENTS

Markforsøget CENTS blev i 2002 etableret på Foulum (fin lerblandet sandjord, JB4, ikke drænet) med fire sædskifter (R2-R5), fire forskellige intensiteter af jordbearbejdning og tre forskellige efterårsbevoksninger,

efterafgrøde, spildkorn og ukrudt samt jord holdt sort vha. herbicidbehandling (Hansen et al., 2015). Siden januar 2019 har der i R5 været udtaget jordvand fra sugeceller nedsat i 1 og 2 m dybde i 2017 til bestemmelse af nitratudvaskning. I R5 blev der fra 2003 til 2006 år dyrket vårbyg (med udlæg af græs som efterafgrøde), ærter, vinterhvede samt vinterhvede (med græsudlæg som efterafgrøde). Fra 2007 til 2015 blev der hvert år dyrket vårbyg med olieræddike som efterafgrøde udspredd før høst. Afgrøderne dyrket siden 2016 er vist i Tabel 1. Halmen blev snittet og efterladt i parcellerne.

Som standardbehandling er der hvert år dyrket efterafgrøde i alle jordbearbejdnings (storparceller), når jorden ikke var bevokset med en vinterafgrøde. Dog har der i jordbearbejdning 3 siden 2017 været dyrket bælplanteblandinger som efterafgrøde-standardbehandling (Tabel 2). Forsøgsdesignet muliggør, at der i underparceller i hver jordbearbejdnings-storparcel kan indlægges andre forsøgsled end standardbehandlingen. I efteråret 2017 blev etableret to nye forsøgsled i underparceller, som hidtil var blevet dyrket med standardbehandling: 1. Spildkorn og ukrudt og 2. Sort jord (herbicidbehandlet). Underparceller med standardbehandlingen fortsatte med dyrkning af efterafgrøder, når jorden ikke var bevokset med vinterafgrøder (Tabel 1).

I 2016 blev jordbearbejdning 3 ændret til direkte såning (Tabel 2), og fra efteråret 2017 blev der som standardbehandling i denne jordbearbejdning dyrket kvælstoffikserende efterafgrødeblandinger (uden olieræddike eller andre korsblomstrede arter).

Tabel 1. Oversigt over afgrødefølgen i R5 fra 2016. Afgrødefølgen før 2016 er beskrevet i teksten.

Høstår	Afgrøde, høstet	Efterårsbevoksning i høståret
2016	Havre	Vinterhvede
2017	Vinterhvede	Efterafgrøde/spildkorn og ukrudt/sort jord
2018	Vårbyg	Efterafgrøde/spildkorn og ukrudt/sort jord
2019	Vårbyg	Efterafgrøde/spildkorn og ukrudt/sort jord
2020	Havre	Vinterhvede
2021	Vinterhvede	Efterafgrøde/spildkorn og ukrudt/sort jord
2022	Vårbyg	Efterafgrøde/spildkorn og ukrudt/sort jord

Tabel 2. Jordbearbejdning og efterafgrøder i R5.

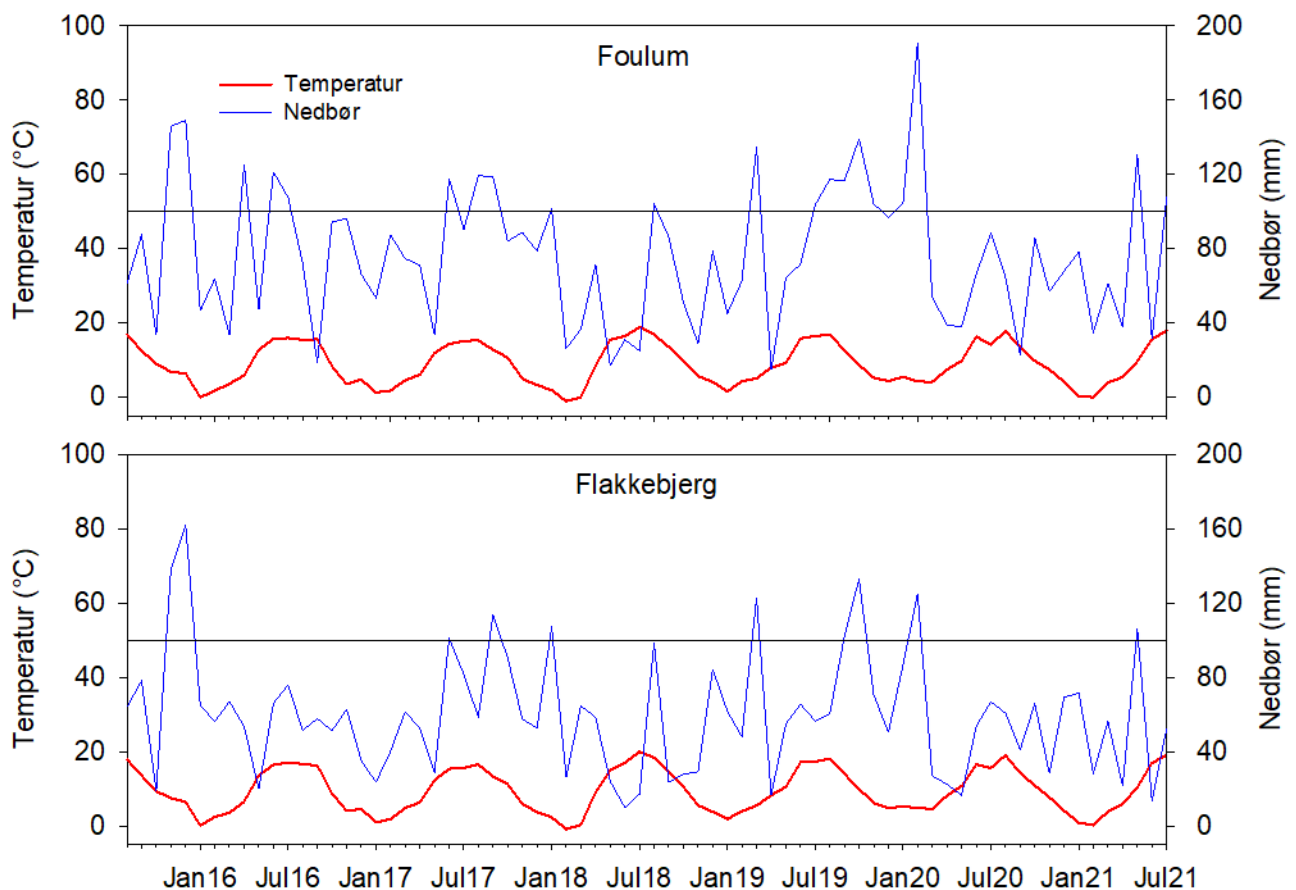
Nummer, jordbearbejdning	Jordbearbejdning	Efterafgrøde
1	Pløjning siden 2002	Ikke-kvælstoffikserende siden 2002
2	Stubbearbejdning 8-10 cm siden 2002	Ikke-kvælstoffikserende siden 2002
3	Direkte såning fra 2016 (Stubbearbejdning 3-4 cm 2002-2006 Stubbearbejdning til 18-20 cm 2006- dybde 2015)	Kvælstoffikserende efterafgrødeblandinger siden 2017 (ikke-kvælstoffikserende 2002-2016). Blandingerne har alle år etableret sig dårligt.
4	Direkte såning siden 2002	Ikke-kvælstoffikserende siden 2002

I R5-sædskifte indgår således i alt fire jordbearbejdnings- og tre forskellige efterårsbevoksninger, efterafgrøde, spildkorn og ukrudt samt sort jord (Tabel 2), dvs. i alt 12 forsøgsled. Alle forsøgsled forekommer i fire gentagelser.

Vejrforhold

I Figur 5 er vist temperatur og nedbørsforhold ved Foulum og Flakkebjerg gennem forsøgsperioden for de forskellige projekter. Principperne for opbygning af figuren er beskrevet af Richmond & Mueller-Dombois (1972, på baggrund af Walter, 1957). Akserne er tegnet således, at $10^{\circ}\text{C} = 20\text{ mm}$. Nedbør på 100 mm er markeret med en vandret linje. Hvor nedbørskurven befinder sig over 100 mm, indikerer det en nedbørsig periode. Tørkeperioder optræder ifølge Richmond & Mueller-Dombois (1972), når nedbørskurven skærer temperaturkurven (empirisk bestemt).

Det fremgår af Figur 5, at vejrforholdene varierede betydeligt fra år til år i forsøgsperioden og mellem de to lokaliteter. Generelt faldt meget nedbør i sensommeren 2017 og 2019, mens sensommeren 2018 var forholdsvis tør efter en ligeledes tør sommer.



Figur 5. Månedlig middeltemperatur og summeret nedbør for Foulum og Flakkebjerg. Principperne for figuren er forklaret i teksten.

Bestemmelse af nitratudvaskning

I alle forsøgene blev koncentrationen af nitrat-kvælstof (nitrat-N, mg/l) bestemt efter udtagning af jordvand fra to sugeceller i hver parcel i 1 m dybde. Derudover var der i CENTS placeret sugeceller i 2 m dybde ligeledes med to sugeceller pr. parcel. Fra alle sugeceller blev der i perioder med afstrømning, dvs. hovedsageligt i efterårs- og vintermånederne, udtaget jordvand ca. hver anden uge.

Afstrømningen af jordvand fra 1 m dybde blev estimeret vha. en vandbalancemodel (Olesen & Heidmann, 1990). Jordvandet fra de to sugeceller i hver parcel blev som hovedregel blandet før nitrat-analyse. Udvas-kningen af nitrat-N (kg N/ha) fra 1 m dybde er beregnet ved at kombinere koncentrationen af nitrat-N i jord-vandet med afstrømningen.

Resultater

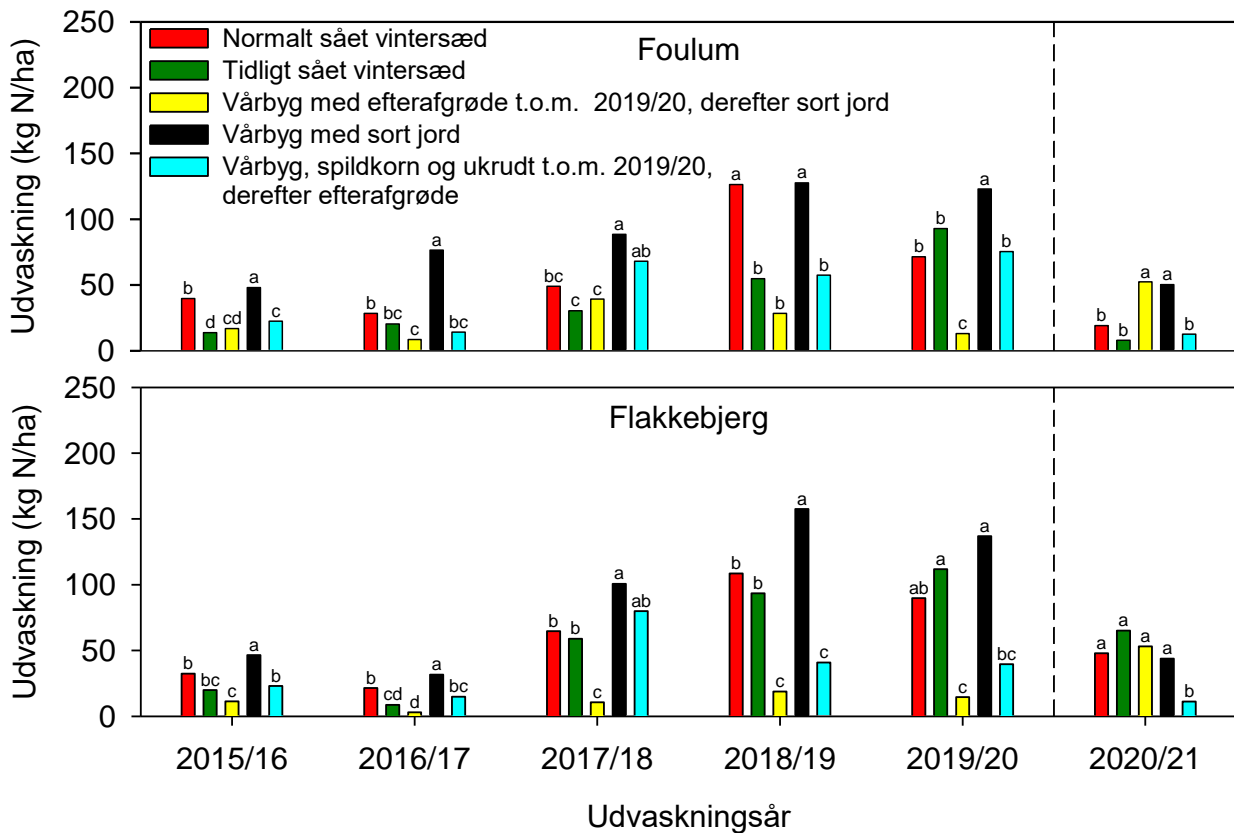
Årlig kvælstofudvaskning (VIRKN, N-Tool-Precise, LessN)

I VIRKN og de efterfølgende projekter (N-Tool-precise og LessN) kan udvaskningen fra normalt og tidligt sået vintersæd direkte sammenlignes med udvaskningen fra vårbyg med og uden efterafgrøde. Udvas-kningen er i Figur 6 vist på årlig basis og i Figur 7 og 8 på månedsbasis.

Som det fremgår af Figur 6, har der på begge lokaliteter været stor variation i den årlige udvaskning. Udvas-kningen fra vårbyg med sort jord, som havde samme behandling alle år, var generelt større end fra de øvrige forsøgsled. Parceller med efterafgrøde havde alle år på begge lokaliteter signifikant mindre udvas-kningen end parceller med sort jord (Figur 6), til trods for at olieræddike som efterafgrøde på Flakkebjerg blev pløjet om efteråret. Efter tørken i sommeren 2018 var der i 2018/19 særlig stor udvaskning fra vårbyg med sort jord og normalt sået vintersæd på begge lokaliteter.

I 2015/16 og 2018/19 var der signifikant mindre udvaskning fra tidligt sået vinterrug på Foulum end fra nor-malt sået vinterrug. På Flakkebjerg var forskellen mellem tidlig og normal såning af vinterhvede kun signifi-kant i 2016/17. I alle år til og med 2018/19 var der dog på begge lokaliteter tendens til mindre udvaskning ved tidlig såning end ved normal såning. Såning af vinterhvede på Flakkebjerg blev i 2017/18 ikke gennem-ført som planlagt pga. ugunstige vejrforhold for tidlig såning. Såningen for begge forsøgsled blev derfor ud-ført til normal tid.

Udvaskningen fra efterafgrøden var på begge lokaliteter generelt lavere end fra normalt sået vintersæd, men forskellen var ikke signifikant i alle tilfælde. Udvas-kningen for tidligt sået vinterrug på Foulum var oftest ikke signifikant forskellig fra udvaskningen fra vårbyg med efterafgrøde. På Flakkebjerg var udvaskningen fra par-celler med efterafgrøde og tidligt sået vinterhvede ikke signifikant forskellige de to første år, men fra og med 2017/18 var udvaskningen fra parceller med efterafgrøde signifikant mindre end for tidligt sået vintersæd (Fi-gur 6).

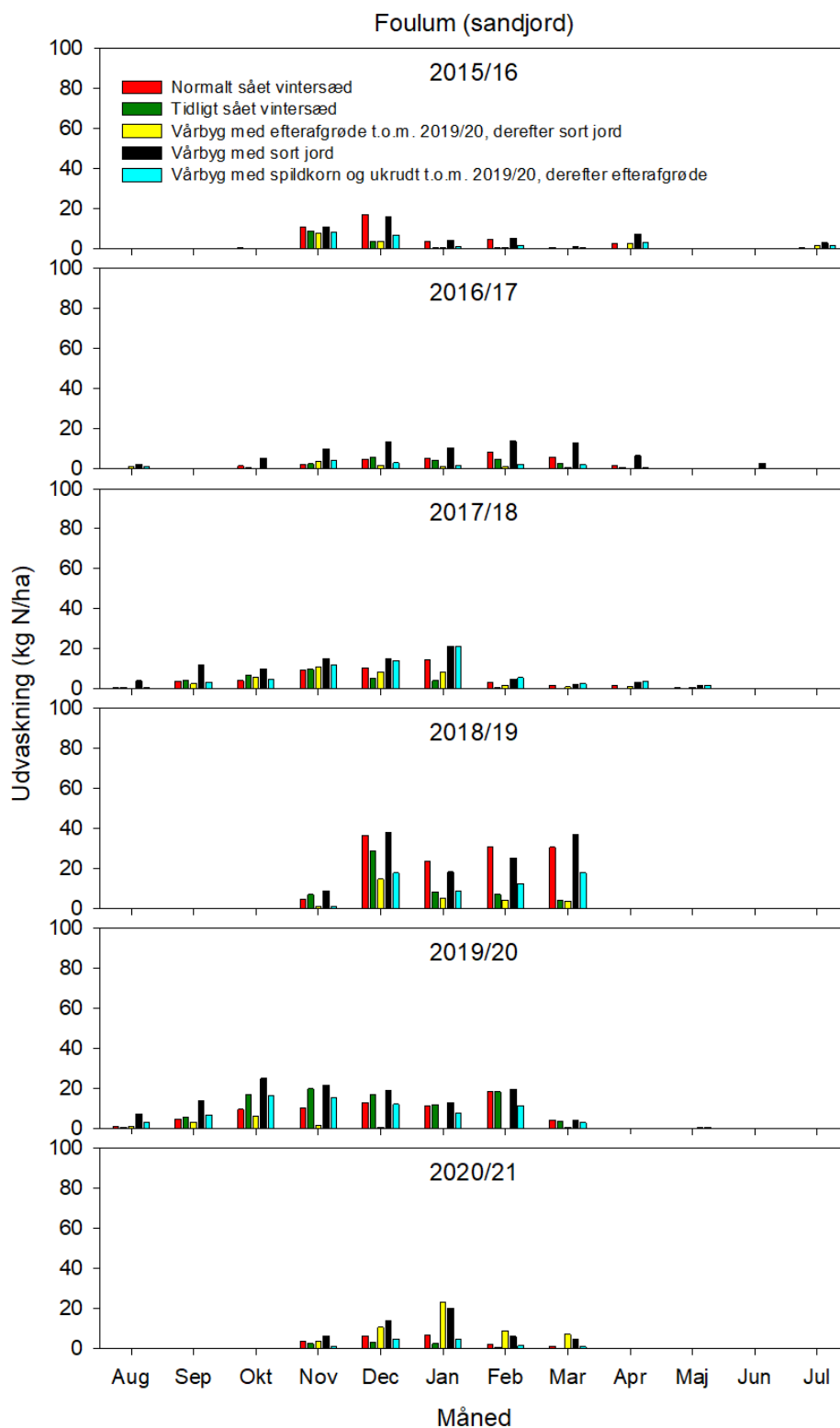


Figur 6. Total årlige udvaskning (1. august til 31. juli) fra VIRKN, N-Tool-Precise, LessN (1N), 2015 til 2021 på Foulum og Flakkebjerg. For hver lokalitet og hvert udvaskningsår er værdierne adskilt vha. Duncans metode, således at to værdier med forskellige bogstaver er signifikant forskellige. Bemærk at efterårsbevoksningen i forsøgsled med vårbyg blev ændret i efteråret 2020 (markeret med stiplede linje). Se endvidere bemærkningerne til forsøgsbehandlingerne i teksten.

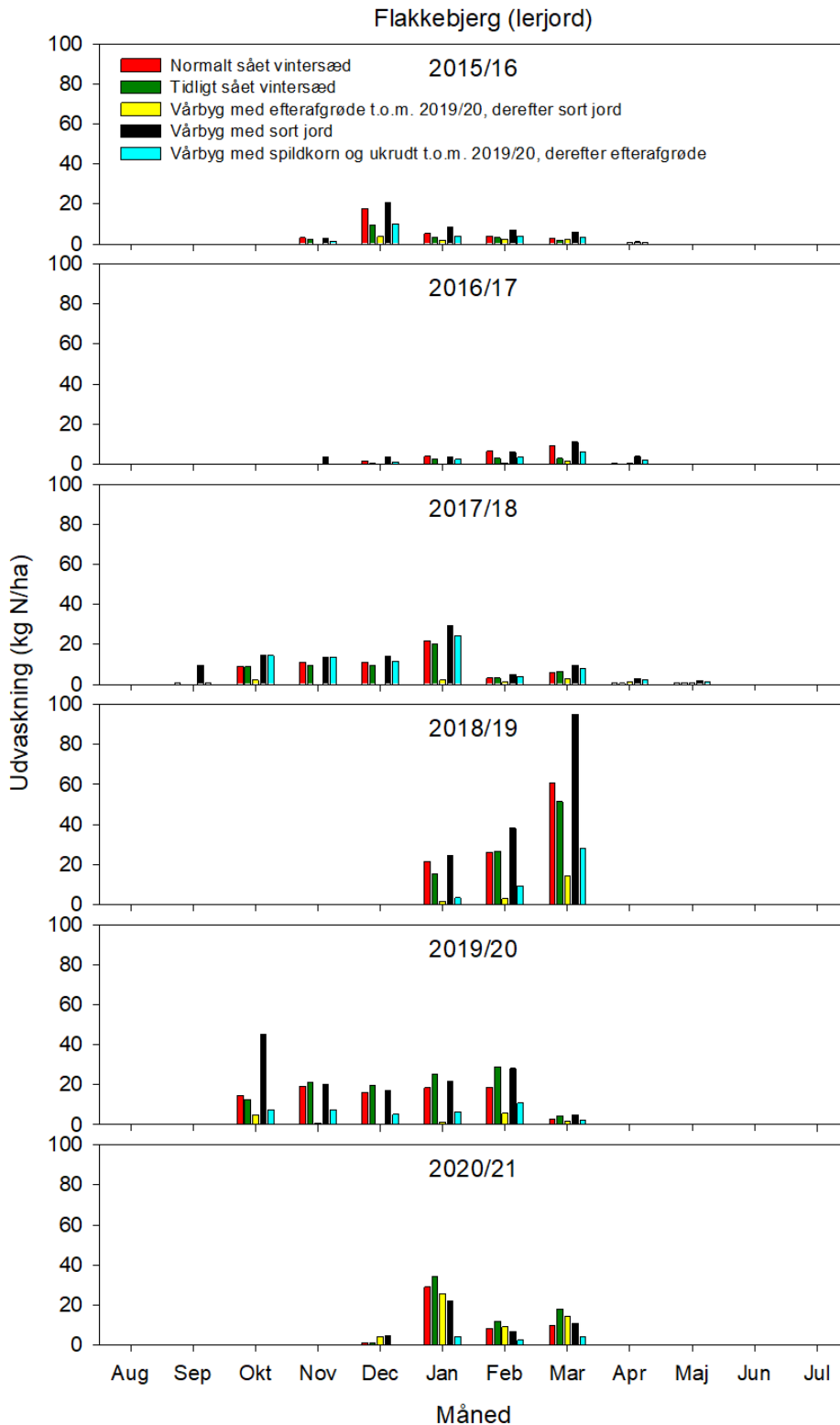
Tidsligt forløb af udvaskningen (VIRKN, N-Tool-Precise, LessN)

Som det fremgår af Figur 7 og 8, viser den månedlige opgørelse af udvaskningen, at der var stor forskel på, hvornår udvaskningen begyndte i de enkelte år. På Foulum i 2017/18 og 2019/20 begyndte udvaskningen allerede i august, hvor der i sensommeren faldt store mængder nedbør (Figur 5), som forårsagede afstrømning og dermed udvaskning. I de fleste af de øvrige år ved Foulum begyndte udvaskningen i november, mens udvaskningen på Flakkebjerg generelt begyndte senere, typisk i november-december. Ved Flakkebjerg i 2018/19 begyndte udvaskningen dog først i januar (Figur 8).

Generelt var der størst udvaskning i efterårs- og vintermånedene. Det stemmer overens med, at der sædvanligvis er størst afstrømning på denne tid af året samtidigt med, at der kan være høje koncentrationer af nitrat pga. frigivelse af mineralsk kvælstof fra afgrøderester og fra jordens pulje af organisk stof eller pga. efterladt gødningskvælstof som f.eks. efter tørken i 2018.



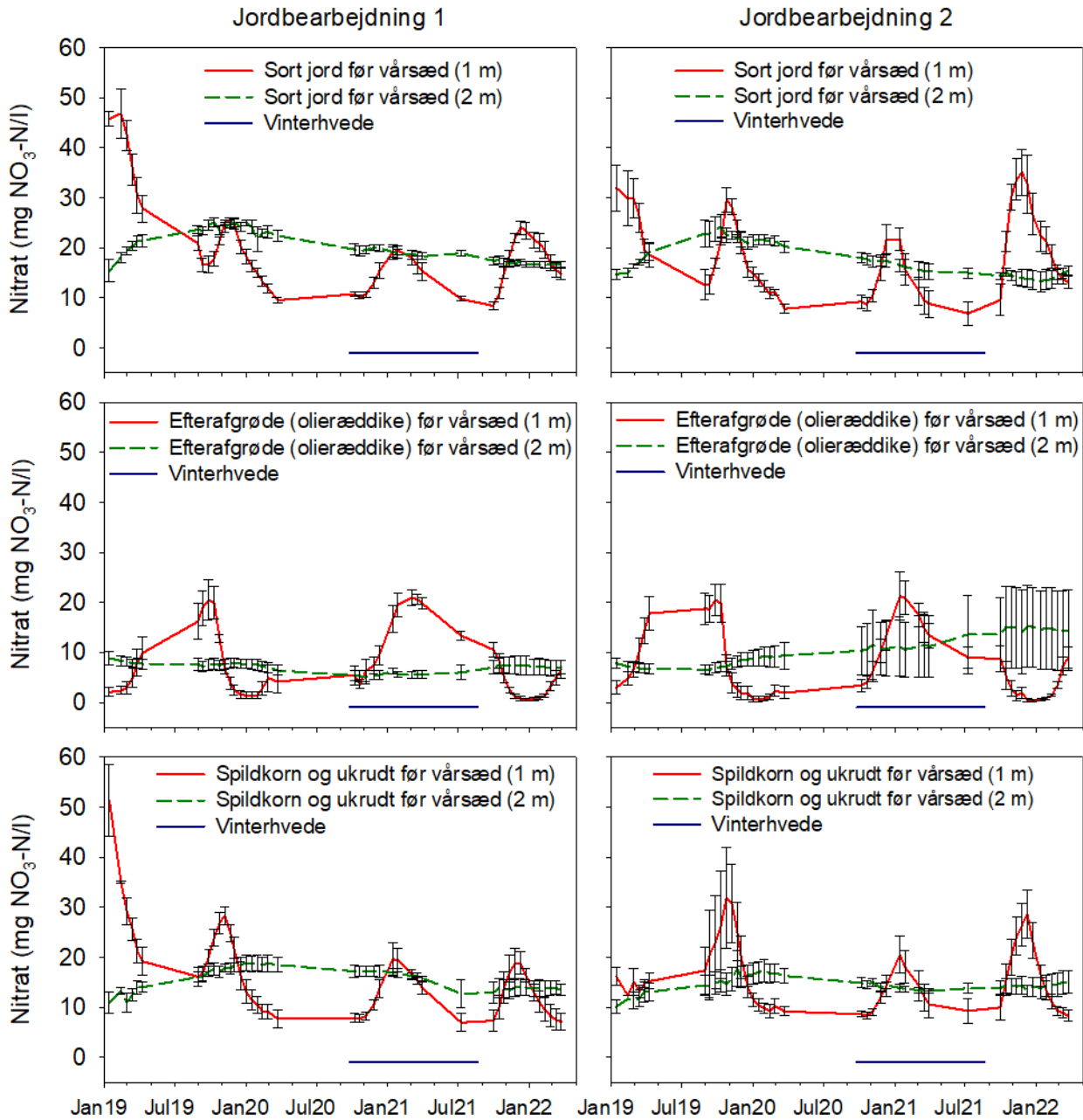
Figur 7. Månedlig kvælstofudvaskning fra forsøg (som i Figur 6) ved gødsning efter normen (1N) på Foulum fra 2015/16 til 2020/21. Der blev dyrket vinterrug som vintersæd. Vårbyg blev pløjet tidligt forår. Bemærk at efterårsbevoksningen i forsøgsled med vårbyg blev ændret i efteråret 2020. For yderligere detaljer vedrørende forsøget henvises til teksten.



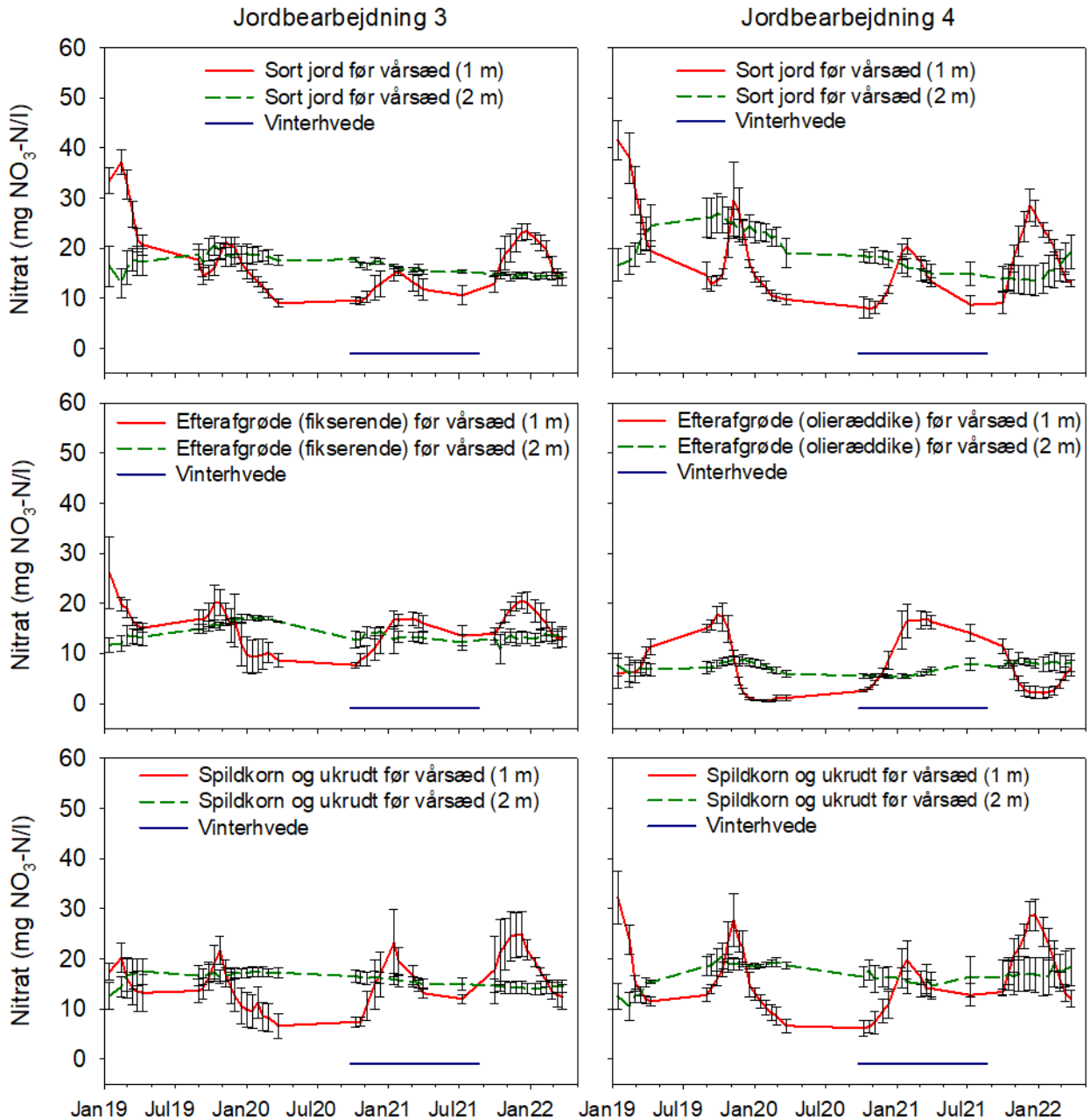
Figur 8. Månedlig kvælstofudvaskning fra forsøg (som i Figur 6) ved gødsning efter normen (1N) på Flakkebjerg fra 2015/16 til 2020/21. Der blev dyrket vinterhvede som vintersæd bortset fra 2020/21, hvor der blev dyrket vinterrug. Vårbyg blev pløjet efterår. Bemærk at efterårsbevoksningen i forsøgsled med vårbyg blev ændret i efteråret 2020. For yderligere detaljer vedrørende forsøget henvises til teksten.

Nitratkoncentrationer i 1 og 2 m dybde (CENTS)

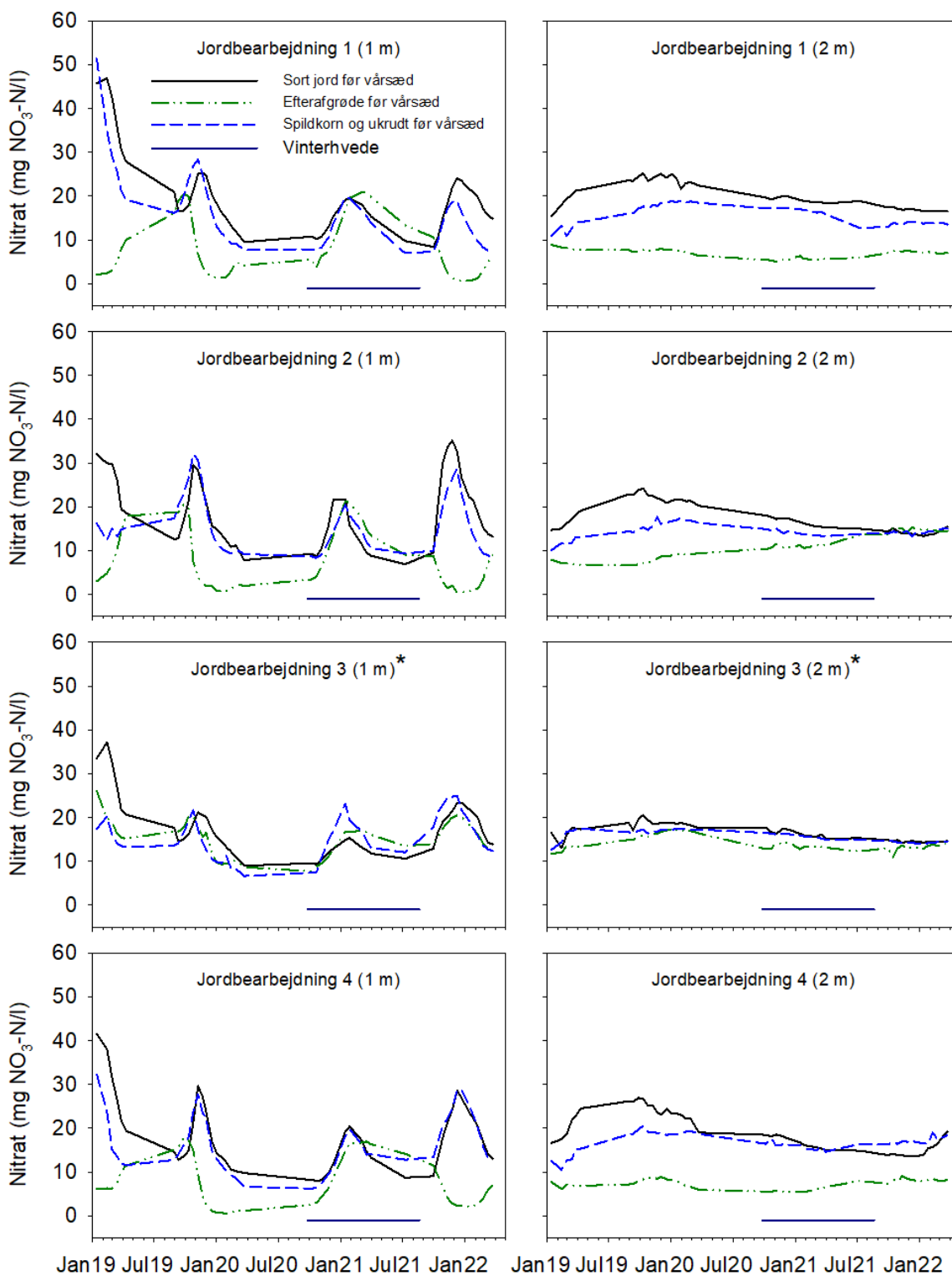
I CENTS var der generelt en stigning i nitratkoncentrationen i 1 m dybde om efteråret, når jorden var holdt sort, og et fald, når jorden var bevokset med efterafgrøder (Figur 9 og 10). Parceller med spildkorn og ukrudt udviste oftest et mindre fald i koncentration end parceller med efterafgrøde (Figur 9 og 10). Dette fremgår dog mere tydeligt i Figur 11, hvor alle tre efterårsbevoksninger for hver jordbearbejdning og dybde er vist i samme del-figur. I jordbearbejdning 3, hvor der som efterafgrøde blev benyttet kvælstoffikserende efterafgrødeblandinger, som etablerede sig dårligt, ligger de tre efterårsbevoksninger dog på omtrent samme niveau i både 1 og 2 m dybde (Figur 11). Dette bekræfter den ringe etablering af efterafgrødeblandingerne, som tilsyneladende ikke har været i stand til at reducere nitratkoncentrationen nævneværdigt i sammenligning med olieræddike som efterafgrøde i de øvrige jordbearbejdninger. De gennemsnitlige nitratkoncentrationer målt i hvert forsøgsled i fire gentagelser fremgår af Tabel 3.



Figur 9. Nitratkoncentration i jordvand udtaget vha. sugeceller i 1 og 2 m dybde fra januar 2019 til foråret 2022 for forskellige efterårsbevoksninger, når der ikke har været dyrket vinterhvede i perioden (angivet med den blå vandrette linje). For beskrivelse af jordbearbejdning 1 og 2 henvises til Tabel 1. Lodrette linjer angiver standardfejlen (standard error of mean).



Figur 10. Nitratkoncentration i jordvand udtaget vha. sugeceller i 1 og 2 m dybde fra januar 2019 til foråret 2022 for forskellige efterårsbevoksninger, når der ikke har været dyrket vinterhvede i perioden (angivet med den blå vandrette linje). For beskrivelse af jordbearbejdning 3 og 4 henvises til Tabel 1. Bemærk at i jordbearbejdning 3 blev der som efterafgrøde benyttet kvælstoffikserende blandinger, som etablerede sig dårligt. Lodrette linjer angiver standardfejlen (standard error of mean).



Figur 11. Nitratkoncentration i jordvand som vist i Figur 9 og 10 men opdelt på jordbearbejdning og dybde (1 eller 2 m). Der blev benyttet olieræddike som efterafgrøde undtagen i jordbearbejdning 3 (markeret med *), hvor der som efterafgrøde blev benyttet kvælstoffikserende blandinger, som etablerede sig dårligt.

Tabel 3. Gennemsnit af målte nitratkoncentrationer 1 og 2 m dybde i samme periode som vist i Figur 9 og 10 for jordbearbejdning 1-4, tre forskellige efterårsbevoksninger før vårsæd og fire gentagelser. Manglende værdier (75 ud af 4320) er udeladt, dvs. der er ikke inkluderet interpolerede værdier.

Jordbearbejdning	Efterårsbevoksning før vårsæd	1 m dybde	2 m dybde
1	Sort jord	19,8	20,1
	Efterafgrøde, olieræddike	7,6	7,0
	Spildkorn ukrudt	15,9	15,7
2	Sort jord	18,5	17,8
	Efterafgrøde, olieræddike*	7,6	10,6
	Spildkorn ukrudt	15,8	14,6
3	Sort jord	17,2	16,6
	Efterafgrøde, kvælstoffikserende**	15,3	14,2
	Spildkorn ukrudt	15,4	15,8
4	Sort jord	17,7	19,2
	Efterafgrøde, olieræddike	7,4	7,3
	Spildkorn ukrudt	16,5	17,0

* En forholdsvis høj værdi for jordbearbejdning 2 i 2 m dybde skyldes en enkelt parcel, hvor koncentrationen begyndte at stige kraftigt i begyndelsen af 2020. ** Dårligt etableret kvælstoffikserende blandinger som efterafgrøde.

Diskussion

De månedlige udvaskningsopgørelser ved både Foulum og Flakkebjerg (Figur 7 og 8) viser eksempler på, at afstrømningen kan begynde, før efterafgrøder eller vintersæd kan forventes at have udviklet rødder til effektiv kvælstofoptagelse, som f.eks. omtalt af Hansen & Djurhuus (1997). Tidlig afstrømning forekom ved Foulum i 2016/17, 2017/18 og 2019/20, mens det ved Flakkebjerg specielt forekom i 2017/18. Hvor stor betydning tidlig afstrømning kan have for udvaskningen afhænger af flere forhold, ikke blot nedbørsmængden og -fordelingen, men også f.eks. temperaturforhold. Høje temperaturer omkring høst af kornafgrøder fremmer således frigivelsen af nitrat ved mineralisering af rødder/planterester samt af jordens indhold af organisk stof på et tidspunkt, hvor kornafgrøden har stoppet kvælstofoptagelsen.

I år hvor der forekommer sen afstrømning, som f.eks. ved Flakkebjerg 2018/19, er der længere tid til, at vintersæd og efterafgrøder kan optage kvælstof, inden det udvaskes til under roddybde. Hvor stor en optagelse og dermed udvaskningsreduktion, der finder sted, afhænger bl.a. af såtidspunktet for vintersæd og efterafgrøde, af deres væksthastighed og kapacitet til kvælstofoptagelse samt af den plantetilgængelige kvælstofmængde i jorden. Ved Flakkebjerg 2018/19 formåede efterafgrøden at optage betydeligt mere kvælstof end vinterhveden i løbet af efteråret 2018, hvor olieræddike ved 1N og 1,5N i oktober optog henholdsvis 87 og 189 kg N/ha i overjordisk biomasse (Vogeler et al., 2021). Til sammenligning optog normalt sået vinterhvede ved 1N og 1,5N henholdsvis 10 og 13 kg N/ha, mens tidligt sået vinterhvede optog henholdsvis 18 og 25 kg N/ha (Vogeler et al., 2021). Hvorvidt vinterhveden i løbet af foråret 2019 skulle have været i stand til at optage væsentlige mængder kvælstof fra under 1 m dybde og derved reducere udvaskningen yderligere i forhold til efterafgrøden, der blev destrueret 19. november 2018, kan ikke bedømmes ud fra de foreliggende udvaskningsmålinger i 1 m dybde. Det er desuden uvist, hvor meget kvælstof der evt. kan være blevet udvasket gennem drænen i løbet af efteråret eller vinteren og dermed gjort utilgængeligt for vinterhveden.

I CENTS blev jordvandet indhold af nitrat bestemt vha. sugeceller installeret i to dybder. Det tidsmæssige forløb af koncentrationerne i 1 og 2 m dybde vil bl.a. afhænge af jordtype og nedbørsmængde. På lerjord skal der mere nedbør til at nedvaske nitrat til en given dybde, end der skal på en sandjord. Under forudsætning af at hele nitratmængden blev tilført jordoverfladen ved markkapacitet beregnede Bennetzen (1978), at der på en lerjord svarende til JB6 i teorien skulle 250 mm afstrømning til at udvaske halvdelen af en nitratmængde til under 1 m dybde. På grovsandet jord skulle der under de samme betingelser blot 150 mm til at opnå samme udvaskning. I praksis vil hele nitratmængden dog ikke nødvendigvis befinde sig ved jordoverfladen, når afstrømningen begynder om efteråret. Men nitrat, der stammer fra mineralisering af jordens indhold af organisk stof efter høst af hovedafgrøden, vil overvejende befinde sig i de øvre jordlag. Eventuelt efterladt gødningsnitrat eller nitrat, der stammer fra tidligere mineralisering af organisk stof, kan være nedvasket til større dybde og vil derfor kunne udvaskes hurtigere end nitrat fra de øvre jordlag.

Der kan generelt forventes en vis tidsmæssig forskydning mellem det nitrat, der måles i sugeceller i 1 m dybde og det, der måles i 2 m. Et lysimeterforsøg gennemført på Jyndeved Forsøgsstation i 1988-89 illustrerer den tidsmæssige forskydning på en sandjord med ringe vandholdende kapacitet (Hansen, 1991). I forsøget blev der opsamlet jordvand i sugeceller installeret i 120 cm dybde i lysimeterkar, hvorfra drænvandet blev opsamlet i en dybde svarende til ca. 160 cm, dvs. der var en forskel i afstand på ca. 40 cm. Under de pågældende nedbørsforhold sås en tydelig tidsforskydning, og koncentrationen af nitrat i lysimeterkar med grovsandet jord var bedst korreleret med koncentrationen i drænvand seks uger senere. Olesen (1989) beskriver sommeren 1988 som tør og solrig frem til slutningen af juni, hvorefter resten af sommeren var præget af nedbør, hvilket betød, at afstrømningen allerede begyndte i august (Hansen, 1991). I juli-december faldt der således 576 mm nedbør mod normalen (1931-60) på 462 mm.

Den ovenstående tidsmæssige forskydning er vanskelig at se i koncentrationsmålingerne foretaget i CENTS (Figur 9, 10 og 11), hvor koncentrationer målt i 1 m dybde steg og faldt afhængigt af efterårsbevoksningen, mens koncentrationen i 2 m dybde lå forholdsvis konstant i næsten alle forsøgsled. De gennemsnitlige koncentrationsmålinger i 1 og 2 m dybde ved de tre forskellige efterårsbevoksninger i hver af fire jordbearbejdningsbehandlinger er vist med angivelse af standardfejl (standard error of mean) i Figur 9 og 10. I de fleste tilfælde har standardfejlen været forholdsvis lille, men i et enkelt tilfælde har der dog været store værdier for standardfejl, nemlig i jordbearbejdning 2 i 2 m dybde ved efterafgrøde før vårsæd. Den store standardfejl skyldes en enkelt parcel, hvor koncentrationen af ukendt årsag begyndte at stige i begyndelsen af 2020. De øvrige tre parceller udviste ingen stigning i koncentration.

Nitratkoncentrationen i 2 m dybde lå forholdsvis konstant i næsten alle forsøgsled, men dog på forskellige niveauer afhængigt af efterårsbevoksningen (Figur 11). Da CENTS-forsøgsmarken på Foulum ikke er drænet, kan det udelukkes, at drænafstrømning kan have udjævnet det tidsmæssige forløb. De gennemsnitlige nitratkoncentrationer for hver behandling i 1 og 2 m dybde i hele måleperioden udviser da heller ikke store forskelle (Tabel 3).

I 2020/21 blev der dyrket vinterhvede i alle parceller uanset jordbearbejdning og tidligere efterårsbevoksning i sædskiftet. I alle tilfælde forekom der en top i nitratkoncentrationen i 1 m dybde i løbet af efteråret og vinteren 2020/21 (Figur 11). Koncentrationerne i 2 m dybde i den efterfølgende periode (indtil foråret 2022) synes dog at være relativt upåvirket af vinterhvededyrkingen. Det første års målinger tyder således ikke på, at vinterhveden har optaget betydelige mængder kvælstof under 1 m dybde, men forsøget fortsætter efter samme forsøgsplan med dyrkning af vårbyg til høst i 2022 (Tabel 1) og i 2023.

Christensen (2011) fremfører med henvisning til Thorup-Kristensen et al. (2009), at vinterhvede ikke når at udvikle sig tilstrækkeligt til, at den kan opsamle en større mængde kvælstof i efteråret, men at vinterhveden til gengæld kan opsamle en stor mængde kvælstof i dybere jordlag i foråret og frem til høst. Det stemmer overens med, at det i Thorup-Kristensen et al. (2009) konkluderes, at der i forsøget på lerjord (JB6) ved Årslev blev nedvasket nitrat til dybe jordlag, men at meget nitrat stadig var tilgængelig for hvedens dybe rødder under hvedens primære vækstsæson. I avisartiklen af Christensen (2011) er dog udeladt et væsentligt forhold, som findes i Thorup-Kristensen et al. (2009), hvor det pointeres, at på en mere sandet jord eller ved større nedbørsmængder vil nitrat kunne nedvaskes til endnu større dybde, og at meget af nitraten under disse forhold vil kunne udvaskes til under vinterhvedens roddybde. Under disse omstændigheder anbefaler Thorup-Kristensen et al. (2009) dyrkning af vårsæd efter en efterafgrøde som en mere miljøvenlig metode i stedet for dyrkning af vinterhvede. Desuden kan det bemærkes, at en del af afstrømningen på leret jord vil finde sted gennem dræn, som oftest er placeret i 1 m dybde. På drænet jord vil en del af nitraten derfor udvaskes via dræn, hvorved det bliver utilgængeligt for de efterfølgende afgrøder.

De ovenfor refererede pointer i Thorup-Kristensen et al. (2009) bekræfter, at når risikoen for nitratudvaskning ved dyrkning af vintersæd i sammenligning med efterafgrøder skal vurderes, spiller jordtypen samt nedbørsfordeling og -mængde en betydelig rolle. I den forbindelse er det væsentligt at være opmærksom på, at roddybden ikke blot er afgrødebestemt, men også bestemt af jordens tekstur. På grovsandet jord og på jord med grovsand i underjorden, er roddybden typisk ikke mere end 60-70 cm (Askegaard & Eriksen, 2007; Petersen et al., 2015). Et udestående spørgsmål er derfor, hvor ofte der i forskellige dele af landet forekommer udvaskning af nitrat til en dybde, hvor vintersædens rødder ikke kan nå at optage nitraten, inden den når under vintersædens roddybde og dermed må anses for at være utilgængelig.

Nitratkoncentration under vintersæd kontra bar jord i 2 meters dybde

Forfatter: Ashley Montcalm og Nanna Hellum Kristensen, SEGES Innovation

SEGES har gennemført en række sugecelleforsøg med stigende mængder kvælstof, hvor kvælstofkoncentrationen er målt i 1 meters dybde. I tre forsøg er kvælstofkoncentrationen også målt i 2 meters dybde i udvalgte parceller. Placering og jordtype fra de tre forsøg fremgår af kortet.

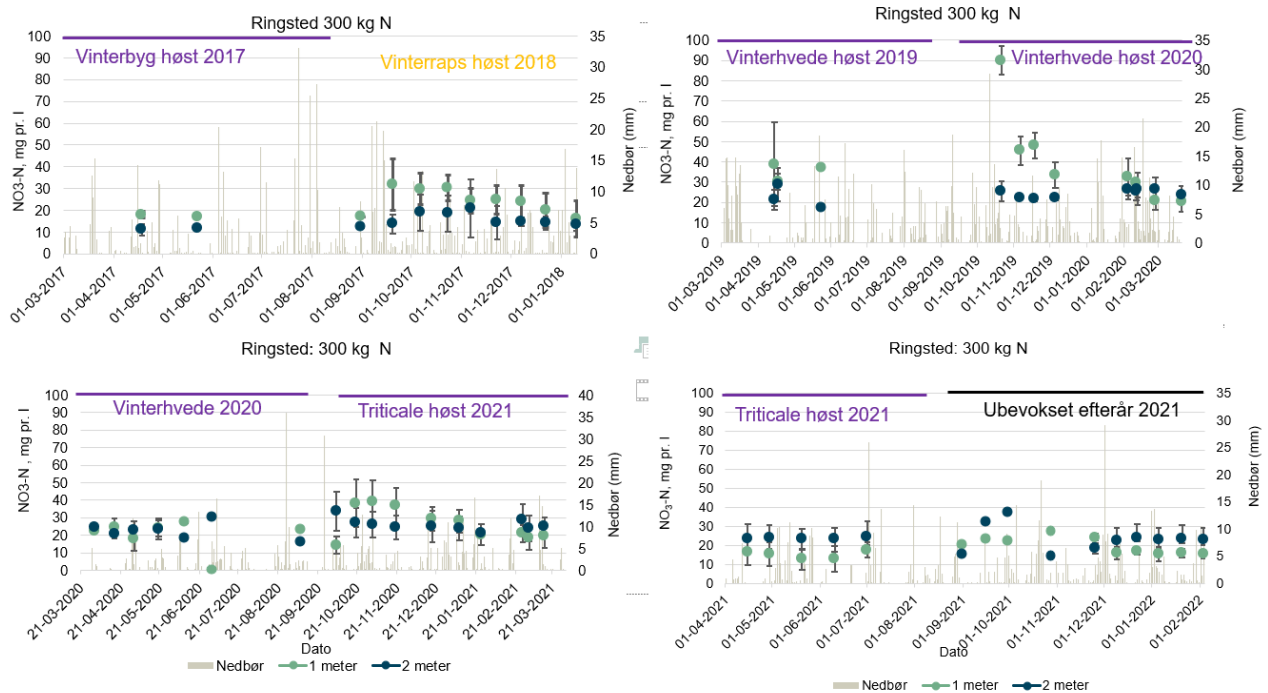


Kortet viser placeringen af de tre forsøg, hvor der indgår målinger af nitratkoncentrationer i både 1 og 2-meters dybde.

De to forsøg med stigende mængder kvælstof har primært været dyrket med vintersæd og i enkelte år med vårsæd. Sugecellerne er kun nedgravet i 2 meters dybde i de parceller, som har været tilført ca. 300 kg N pr. ha til vintersæd og 200 kg N pr. ha til vårsæd.

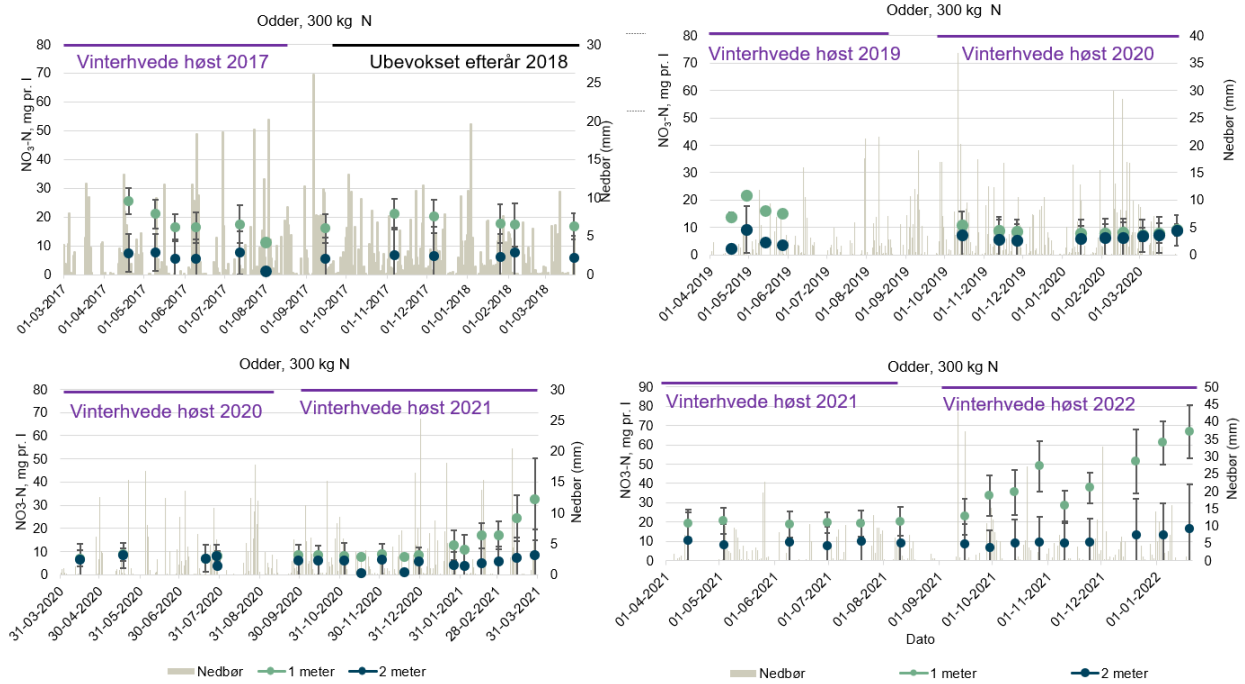
Sædskifteforsøget er designet med et raps-korn-sædskifte med to N-niveauer. Sugecellerne i 2 meters dybde er nedgravet i parceller tilført kvælstof henholdsvis efter normen og 1,5 x norm. Forsøgsdesign og resultater fra sædskifteforsøget er nærmere beskrevet i en særskilt rapport, som kan findes på LandbrugsInfo.

I Figur 12 ses udvalgte resultater fra Ringsted. Arealet i Ringsted er drænet, men der ligger kun dræn i dele af forsøget. Generelt er koncentrationen i 2 meters dybde relativt stabil og ligger i alle år på omkring 10-30 mg pr. l, hvorimod koncentrationen i 1 meter er faldende i løbet af efteråret. Fordi der kun indgår en behandling om året, er det svært at afgøre effekten af afgrøder, og forskellene er sandsynligvis mest en effekt af variation mellem år og ikke variationen mellem efterårsdækker.



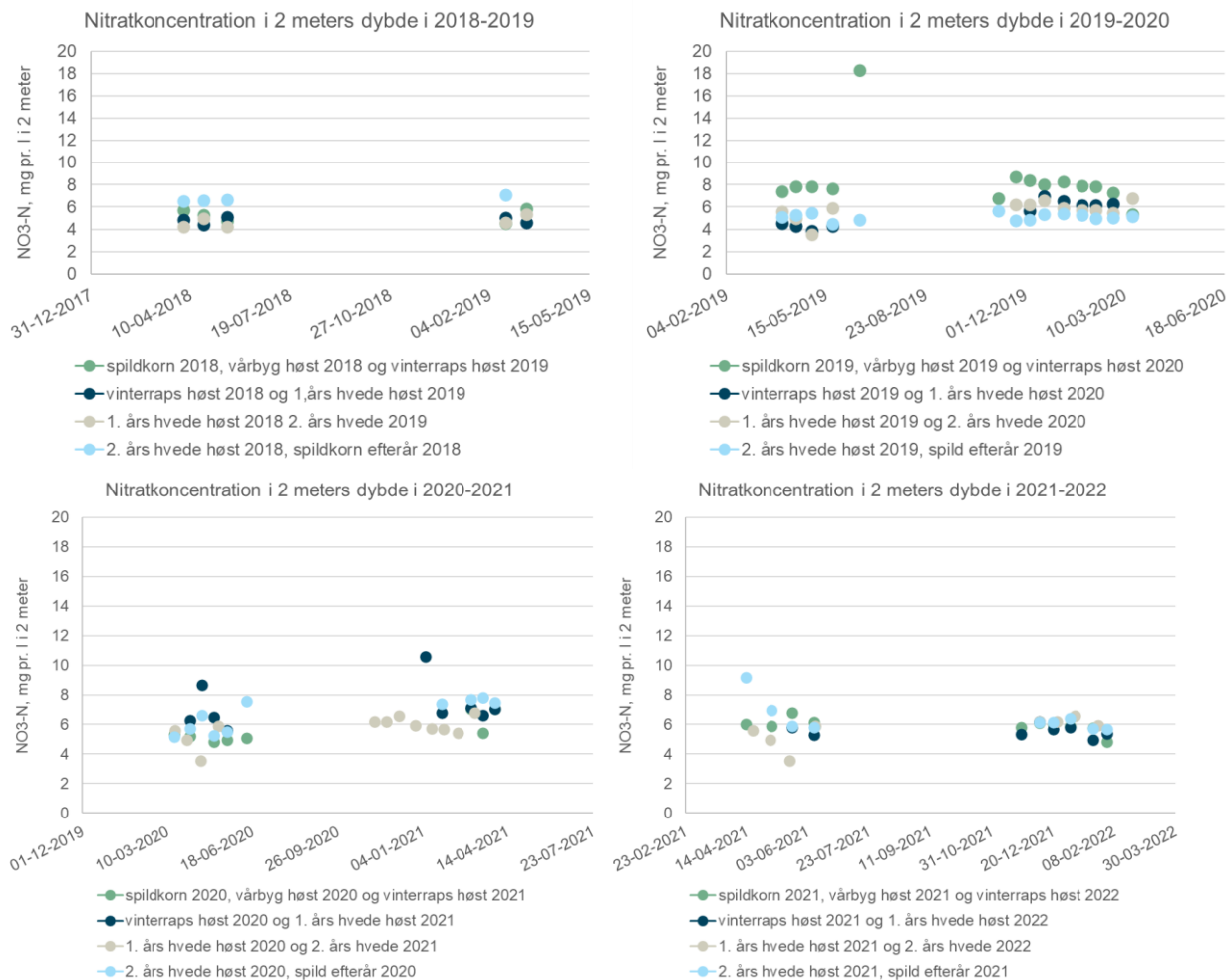
Figur 12. Nitratkoncentrationer målt i hhv. 1 og 2 meters dybde i forsøg med stigende mængder kvælstof i Ringsted. I leddene er der givet 300 kg N pr. ha til vintersæd og 200 kg N pr. ha til vårsæd.

I Figur 13 ses samme figur for forsøget ved Odder. Forsøgsarealet ved Odder er ikke drænet. Ved Odder ses på samme måde, at koncentrationen er rimelig stabil i 2 meter, omkring 5-10 NO₃-N mg pr. l, hvilket er lavere end i Ringsted. Det er primært koncentrationen i 1 meters dybde, som varierer, og den stiger typisk løbet af efteråret under vintersæd.



Figur 13. Nitratkoncentrationer målt i hhv. 1 og 2 meters dybde i forsøg med stigende mængder kvælstof i Odder. I leddene er der givet 300 kg N pr. ha til vintersæd og 200 kg N pr. ha til vårsæd.

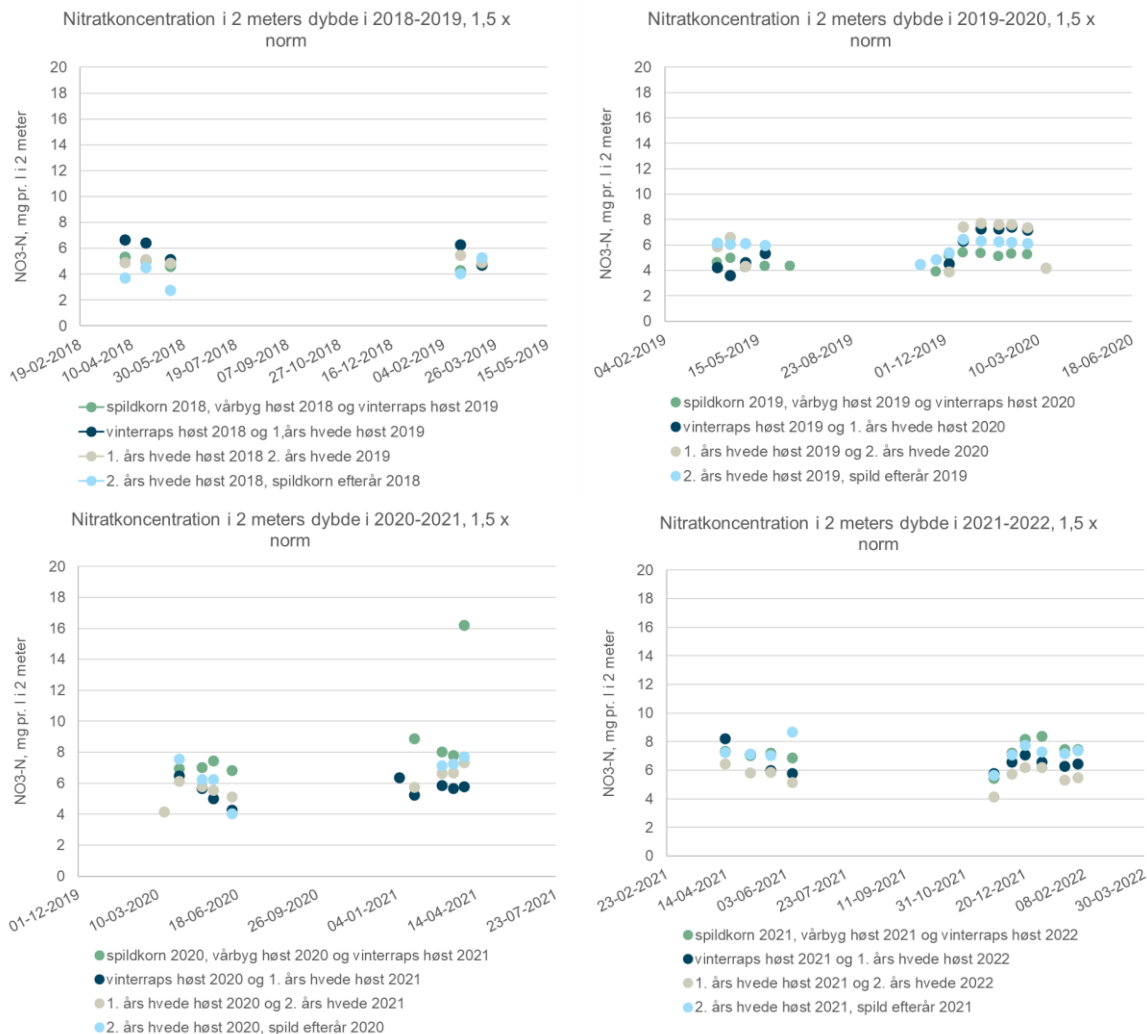
I sædskifteforsøget er der flere kombinationer, og de forskellige efterårsdækker kan sammenlignes i det samme år.



Figur 14. Nitratkoncentrationer målt 2 meters dybde i sædskifteforsøget på Lolland ved 1x norm. Der er lavet flere målinger, som er vist i bilag 1.

Figur 14 viser nitratkoncentrationer ved forskellige afgrødefølger i 2 meters dybde ved tilførsel af kvælstof efter norm. Her ses ligeledes en stabil koncentration i 2 meters dybde over tid også på tværs af afgrødekombinationer.

Dog ses i foråret i 2021 en tendens til, at nitratkoncentrationen i 2 meters dybde falder under vinterhvede og frem mod høst. Det kunne indikere, at vinterhveden optager kvælstof fra under 1 meter. Som vist i bilag 1 er der store variationer, og derfor er det ikke sandsynligt, at det er et reelt fald. Derfor er det svært på baggrund af disse resultater at konkludere, at vinterhveden i højere grad reducerer nitratkoncentration i dybe jordlag i forhold til ukrudt og spildkorn.



Figur 15. Nitratkoncentrationer målt 2 meters dybde i sædskifteforsøget på Lolland ved 1,5 x norm. Der er lavet flere målinger, som er vist i bilag 1.

I alle forsøg var nitratkoncentrationen i 2 meters dybde relativt stabil over tid og sammenlignelig mellem afgrøder, mens koncentrationen i 1 meter varierer. Desuden ser koncentrationen i to meter ikke ud til at være påvirket af, at der tilføres større mængder kvælstof. Selv på arealer, hvor der ikke drænes, er koncentrationen i to meter ikke påvirket af afgrøden.

Effekt af efterafgrøder på udvaskningen i et sædskifte med korn og raps på Lolland

Afsnittet om sædskifteforsøget er uddrag fra rapporten: "Udvaskning i et sædskifte med korn og raps på Lolland" på [LandbrugsInfo](#). I afsnittet er fokus på effekten af efterafgrøder på udvaskning i 1 meters dybde.

Metode og materiale

Sædskifteforsøget er anlagt tæt på Holeby forsøgsstation af VKST, Holeby. Jordtypen er i 2017 kategoriseret som en JB7, og er anlagt i foråret 2017. For at få en ensartet opstart af forsøget blev der i 2017 dyrket vårbyg i alle forsøgspareller, og i efteråret 2017 er de enkelte afgrøder i sædskiftet etableret til høst 2018. Derfor belyser udvaskningsmålinger i måleåret 1. april 2017 til 31. marts 2018 alene effekten af efterårsbevoksning på kvælstofudvaskningen. Gangen i sædskiftet er raps-vinterhvede-vinterhvede-vårbyg. Sædskiftet køres både med og uden efter- og mellemafgrøder og ved normgødskning og 1,5 gange normgødskning.

Alle afgrøder og behandlinger er til stede hvert år i forsøget, og der indgår således i alt 16 forsøgsled. Forsøget er anlagt som blokforsøg med fire gentagelser. Blokkene udgøres af forskellige hovedafgrøder.

Kvælstofudvaskningen er målt med sugeceller nedgravet i 1 meters dybde i alle parceller. Der er nedgravet to sugeceller i hver parcel, og der udtages vandprøver fra begge sugeceller, som bulkes til en prøve. Nitratkoncentrationen måles herefter i denne vandprøve. Til at beregne udvaskningen fra 1 meters dybde er daglige klimadata hentet fra DMI. På baggrund af nedbørs- og fordampningsdata er afstrømningen beregnet i EVACROP. Afstrømningen er beregnet for de enkelte led, fordi der indgår forskellige afgrøder. Kvælstofudvaskningen er beregnet ud fra den modellerede afstrømning og nitratkoncentrationen.

Nitratudvaskning i sædskifteforsøget

Udvaskningen er relativ lav i forsøget, og er på tværs af de fem udvaskningssæsoner 17 kg N pr. ha ved normgødskning. Den årlige udvaskning er stærkt påvirket af nedbøren i januar og februar, hvor høje nedbørsmængder resulterer i de højeste udvaskninger. Ved at øge kvælstoftilførslen fra normen til 1,5 gange norm øges udvaskningen med ca. 140% svarende til 19 kg N pr. ha i merudvaskning pr. år.

Selvom udvaskningen er lav i forsøget viser resultaterne, at den reduceres med efterafgrøder. I tabel 4 ses effekten af efterafgrøde og mellemafgrøde på udvaskningen i de enkelte år.

Tabel 4. Beregnet udvaskning i alle forsøgsår i sædskifteforsøget på Lolland. Afgrøden til høst i 2017 var vårbyg i alle led.	2017-2018	2018-2019		2019-2020		2020-2021		2021-2022	
	norm	norm	1,5 x norm	norm	1,5 x norm	norm	1,5 x norm	norm	1,5 x norm
Efterårsdække	18	3	2	31	102	9	23	41	74
Vinterraps	22	4	10	16	26	8	28	29	63
1. års vinterhvede		14	28	27	61	10	14	24	52
2. års vinterhvede	18	12	14	13	38	4	14	12	15
Efterafgrøder	15	20	27	37	94	7	15	21	18
Spildkorn og ukrudt	27	13	25	16	43	7	13	24	65
Mellemafgrøde									

I det første udvaskningsår er den største udvaskning fundet med mellemafgrøden og vinterhvede. I de efterfølgende år reducerer efterafgrøder udvaskningen i forhold til ukrudt og spildkorn. Udvaskning fra 2. års vinterhvede varierer årene imellem, men i alle år er udvaskningen fra 2. års vinterhveden større end fra efterafgrøden ved normtilførsel. Mellemafgrøden har i de fleste år reduceret udvaskningen i forhold til spildkorn, men effekten er ikke stabil over årene.

For at undersøge den gennemsnitlige effekt er der lavet en sammenstilling af resultater fra de fire fulde forsøgsår 2018-2019 til og med 2021-2022, som ses af figur 16.

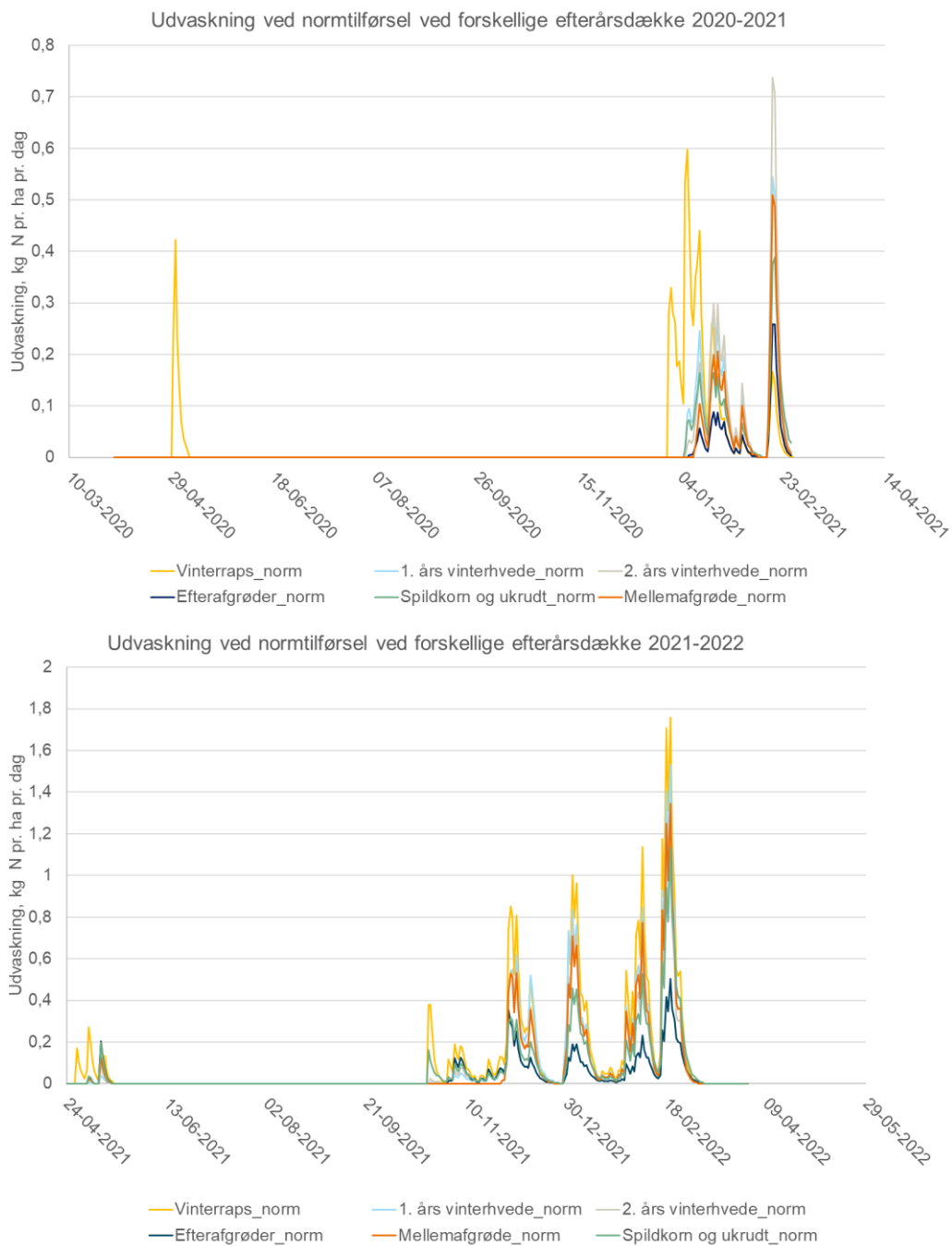
Figur 16. Udvaskning målt med sugeceller i 1 meters dybde i et kornrapssædskifte på Lolland.

		Udvaskning som gennemsnit af 2018-2022			
Afgrøde til høst	Efterårsdække	Udvaskning ved norm, kg N pr. ha		Udvaskning ved 1,5 x norm	
<i>1 forsøg</i>					
Vinterraps	1. års hvede (tidlig)	14	ab	22	b
1. års hvede (tidlig)	2. års v.hvede	19	a	39	ab
2. års v.hvede	Efterafgrøde	10	b	20	b
1. års hvede (tidlig)	Mellemafgrøde	15	ab	37	ab
2. års v.hvede	Stub og spildkorn	21	a	38	ab
Vårbyg	Vinterraps	21	a	50	a
Som gennemsnit af alle afgrøder		17		37	

Effekten af efterafgrøderne på den relative udvaskning er i samme størrelsesorden på tværs af gødningsniveauer. Som gennemsnit resulterer efterafgrøden i en årlig udvaskningsreduktion på ca. 50% i forhold til både ukrudt og spildkorn og 2. års hveden sået til normal tid.

Effekten af efter- og mellemafgrøder over tid kan ses i figur 17, hvor den daglige udvaskning er skitseret for to år med henholdsvis høj og lav udvaskning. Selvom efterafgrøden er destrueret i efterår/vinterperioden, reducerer den også udvaskningen i februar sammenlignet med vinterhvede og spildkorn som efterårsdækker i begge år. I 2020-2021 sker udvaskningen stort set kun i starten af 2020, mens der i 2021-2022 sker en større udvaskning i løbet af efteråret. Dog ses den udvaskningsreducerende effekt af efterafgrøden først i december 2021. I 2019-2020 har efterafgrøden derimod allerede en udvaskningsreducerende effekt fra efteråret 2019.

Resultatet tyder således på, at det kvælstof efterafgrøden har optaget ikke udvaskes i 1 meters dybde efter mineralisering, og dermed sandsynligvis ikke tabes ud af rodzonen inden vårbyggen kan nå at udnytte det.



Figur 17. Tidslig udvaskning i to udvaskningsår ved forskellige efterårsdækker med kvælstoftilførsel efter norm.

LOOP: Målte nitratkoncentrationer og udvaskning fra marker med korn efterfulgt af vinterkorn eller efterafgrøder

Gitte Blicher-Mathiesen, Institut for Ecoscience – Oplandsanalyse og miljøforvaltning, Aarhus Universitet

I landovervågningen måles nitrat i jordvand opsamlet med sugeceller, og desuden måles der på drænvand opsamlet fra samme mark, som der opsamles jordvand fra. Målinger gennemføres på permanente stationer/mark, og det betyder, at der ikke samtidig måles på en kombination af afgrøder eller dyrkningspraksis. En sammenligning af, hvordan henholdsvis efterafgrøde kontra dyrkning af vinterkorn påvirker nitratudvaskning, kan derfor ikke opgøres med data for samme år og lokalitet/mark. Sammenligningen gennemføres derfor for særskilte årsobservationer for korn efterfulgt af vinterkorn og korn efterfulgt af en efterafgrøde. Da disse målinger ikke er for samme mark og år, er det hensigtsmæssigt at vurdere afstrømningens størrelse, da denne påvirker udvaskningen. Hertil anvendes den afstrømningsvægtede nitratkoncentration, som reelt beregnes som den årlige nitratudvaskning divideret med afstrømningen.

Desuden er der analyseret på dyrkningsforholdene således, at det kun er handelsgødede marker, der indgår i sammenligningen. Kornafgrøden kan enten være vårbyg til malt, vårbyg til foder, vinterhvede, vinterhvede til brød og vinterbyg. Disse kornafgrøder tildeles forskellige mængder af handelsgødning og for at gøre sammenligningen mere ensartet, er der data opdelt ift. om kornet har fået tildelt mere eller mindre end 200 kg N/ha som handelsgødning. Der er desuden den vigtige forskel, at forfrugt er sukkerroer i 22 ud af 27 observationer for korn efterfulgt af vinterkorn, mens forfrugt udgør vårkorn, vinterkorn og kartofler for de 13 jordvandsobservationerne med korn efterfulgt af en efterafgrøde (Tabel 6 og 7). Anvendte typer af efterafgrøder omfatter både gul sennep og andre korsblomstrede, olieræddike, korn, græs, og en blanding af rug, vårbyg, korsblomstret og honningurt (Tabel 8). Efterafgrøderne er ompløjet omkring 1. november nogle lidt før og efter.

Af datasammenstillingen i Tabel 5 ses, at for jordvand er der 27 og 13 observationer for korn efterfulgt af henholdsvis vinterkorn og efterafgrøder. Den gennemsnitlige nitratudvaskning udgør ca. 29 kg N/ha for begge efterårsbevoksninger, men da afstrømningen er større for korn med efterafgrøde end for korn efterfulgt af vinterkorn, udgør den afstrømningsvægtede nitratkoncentration 16,4 og 11,4 mg N/L for henholdsvis korn vinterkorn og korn efterafgrøde. Ses alene på de marker, hvor der både er målt på jordvand og drænvand, udgør de tilsvarende data for nitratudvaskning ca. 25 kg N/ha for jordvand begge bevoksninger, og udvaskning/transport til dræn udgør 17,0 og 14,5 kg N/ha for korn efterfulgt af henholdsvis vinterkorn og efterafgrøde. De afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer udgør 14,5 og 12,4 mg N/L for jordvand og 11,7 og 14,0 mg N/L for drænvand også for korn efterfulgt af henholdsvis vinterkorn og efterafgrøde.

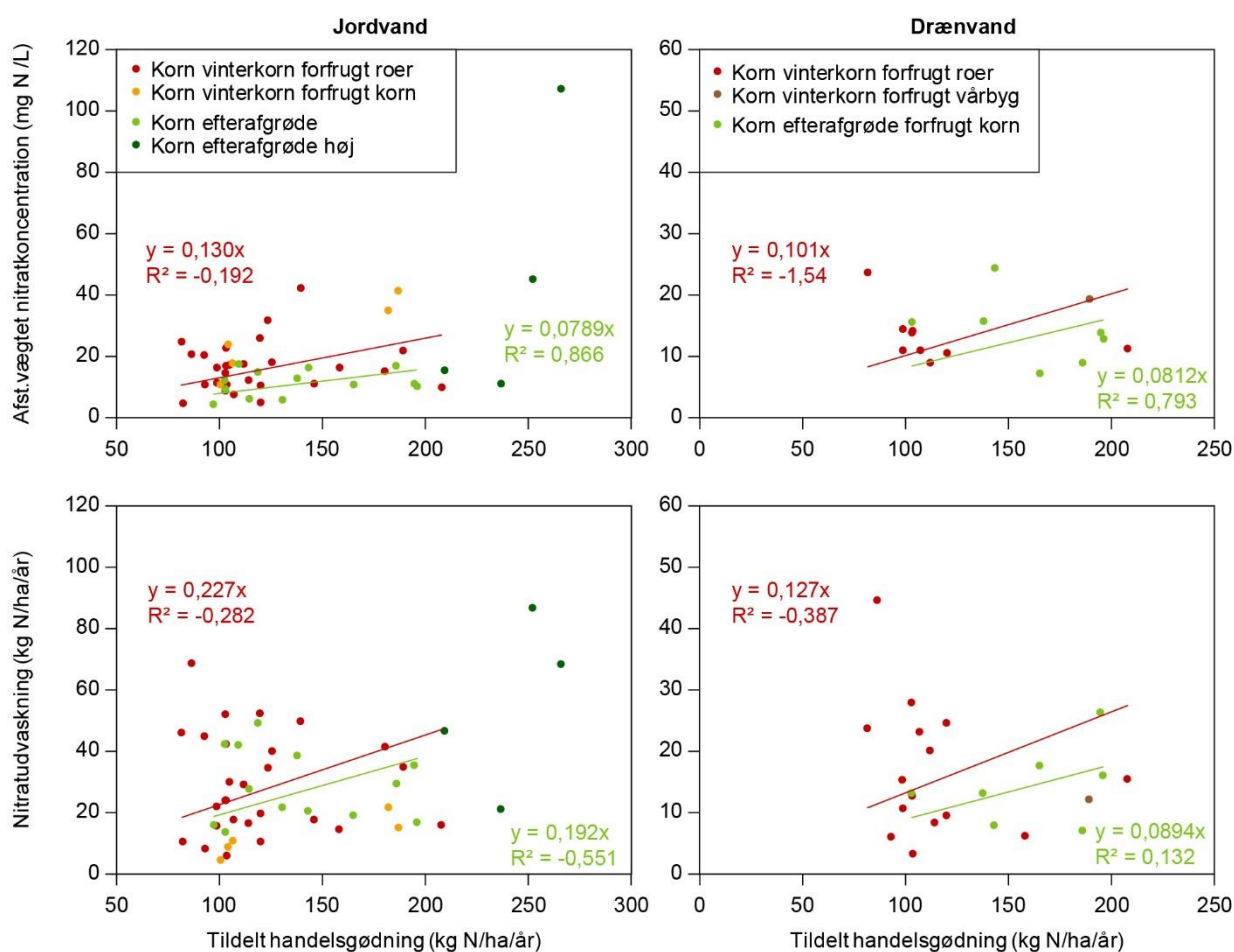
Tabel 5. Afstrømning, nitratudvaskning og afstrømningsvægtet nitratkoncentration målt for korn efterfulgt af henholdsvis vinterkorn eller en efterafgrøde. Data er opgjort for jordvand opsamlet med sugeceller samt for jordvand, hvor der for samme mark også er målt på drænvand indsamlet i fra landovervågningen. Alle afgrøder har fået tildelt handelsgødning under 200 kg N/ha.

Afgørde efter korn	Antal obs.	Jordvand					Drænvand				
		Perk. Middel	Udvaskning stdv.	Afst.v. konc. Middel	Afst.v. konc. stdv.	Afst. Middel	Udvaskning stdv.	Afst.v. konc. Middel	Afst.v. konc. stdv.		
		(mm)	(kg N/ha/år)	(mg Nitrat-N/l)	(mm)	(kg N/ha/år)	(mg Nitrat-N/l)				
Vinterkorn	27	185	29,3	16,0	16,4	8,1					
Efterafgrøde	13	273	29,9	11,3	11,4	4,1					
Vinterkorn	16	172	25,1	16,7	14,5	8,3	138	17,0	10,2	11,7	3,7
Efterafgrøde	7	203	24,8	9,0	12,4	2,8	121	14,5	6,0	14,0	5,1

Fordelingen af korntyper ikke er ens for de to grupper; korn efterfulgt af henholdsvis vinterkorn og efterafgrøder. Der er mere vinterkorn i gruppen med efterafgrøder og derfor mere vårkorn i gruppen med vinterkorn efter korn, og derfor er både nitratudvaskning og den afstrømningsvægtede nitratkoncentration plottet ift. tildelt handelsgødning i Figur 18.

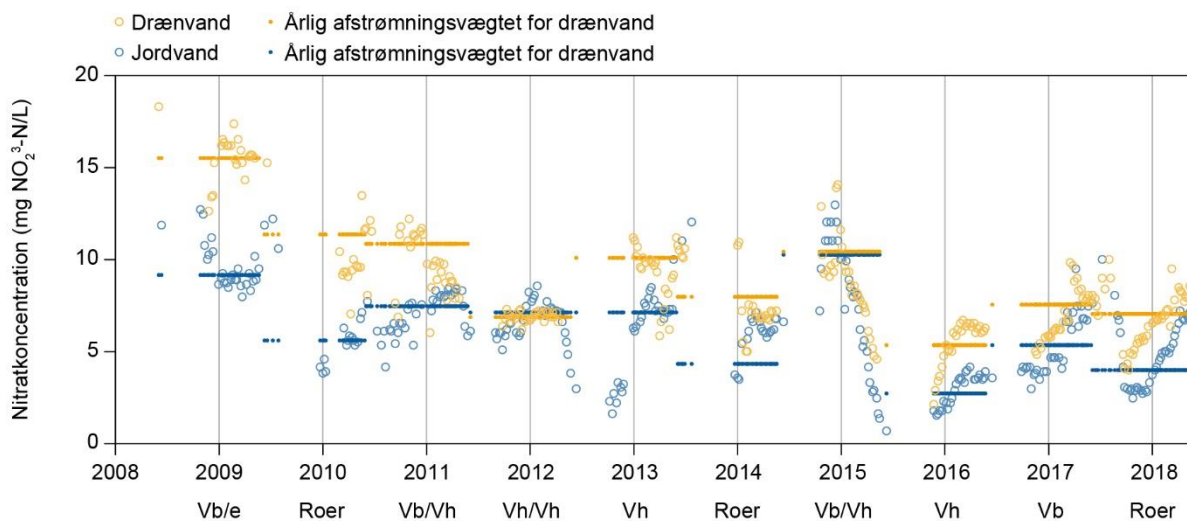
Af figuren ses, at nitratudvaskning for de to kombinationer nogenlunde ligger inden for samme udfaldsrum, når gødningstildelinger ligger under 208 kg N/ha, mens tildeling over de 208 kg N/ha giver større nitratudvaskning for tre ud af fire observationer af korn efterfulgt af en efterafgrøde.

For målinger af både jord- og drænvand er der flere observationer i gruppen korn efterfulgt af vinterkorn (n=16) end efterfulgt af efterafgrøder (n=7), begge grupper har handelsgødningstildeling i intervallet 135-200 kg N/ha. Det gør det relativt mere uens at sammenholde de to afgrødekombinationer. Korn efterfulgt af en efterafgrøde ligger med en lidt lavere relation mellem tildelt handelsgødning og udledning til dræn end korn efterfulgt af vinterkorn, men der kan ikke opgøres en signifikant forskel hverken i nitratudvaskning eller i afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer mellem de to afgrødekombinationer både for jord- og drænvand. Ses der på de afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer (Figur 18, nederst), ligger relationen mellem tildelt handelsgødning og de målte afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer lavere, både opgjort for jordvand og for drænvand, men også for disse er der ikke signifikant forskel.



Figur 18. Relation mellem tildelt handelsgødning og nitrat udvaskning (øverst) og afstrømningsvægtet nitratkoncentration nederst i henholdsvis jordvand (tv.) og drænvand (th.) for henholdsvis korn efterfulgt af vinterkorn, korn efterfulgt af en efterafgrøde begge med tildelt handelsgødning under 200 kg N/ha og endelig korn efterfulgt af en efterafgrøde med tildelt handelsgødning over 200 kg N/ha, sidstnævnte observationer indgår kun i de to figurer med jordvand.

I Figur 19 vises målte nitratkoncentration i jord og drænvand for st107 for årene 2008-2017. Generelt ligger de målte nitratkoncentrationer relativt lavt mellem 1 og 19 mg N/L med lidt højere koncentrationer i drænvand end i jordvand i det her viste eksempel. Der er relativt lave nitratkoncentrationer efter sukkerroer i 2010, 2014 og 2018. Efter roer dyrkes vårbyg og herefter igen vinterhvede. Før roer dyrkes vårbyg og i et enkelt år, 2008 vårbyg med efterafgrøde.



Figur 19. Målte nitratkoncentrationer i jord- og drænvand for st107. Orange og blå linje udgør de årlige afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer, og under hvert årstal er angivet afgrøde for høståret før udvaskningen i det efterfølgende hydrologiske år. Afgrødeteksten er forkortet, Vb er Vårbyg efterfulgt af bar jord, Vh er vinterhvede efterfulgt af bar jord, VB/e er vårbyg efterfulgt af en efterafgrøde, Vb/Vh er vårbyg efterfulgt af en vinterhvede

Tabel 6. Afgrøde, forfrugt og kvælstof input og høst samt afstrømning, nitratudvaskning og afst.vægtede nitratkoncentrationer i jord- og drænvand for korn efterfulgt af vinterkorn.

Korn vinterkorn				Jordvand				Dræn							
Afgrøde	Forfrugt	Strn.	Hyår	Perk. (mm)	Udv. (kg N/ha/år)	Afst.v.konc (mg N/L)	Afst. (mm)	Udv. (kg N/ha/år)	Afst.v.konc (mg N/L)	Balance	Dep.	Såsæd (kg N/ha/år)	Nfiks. (kg N/ha/år)	Han	Høst
Vårbyg, malt	Fabriksroer	105	200001	57	6,0	10,6	32,6	3,4	10,3	127,5	20	2	2	104	118
Vårbyg, malt	Fabriksroer	103	200001	77	8,3	10,8	51,9	6,1	11,7	113,9	17	2	2	93	108
Vinterhvede	Fabriksroer	105	201314	89	14,6	16,3	58,0	6,2	10,7	27,8	13	2	2	158	133
Vårbyg, malt	Fabriksroer	103	200910	134	16,5	12,3	96,4	8,4	8,7	133,1	15	2	2	114	88
Vårbyg	Fabriksroer	102	199192	212	10,6	5,0	159,5	9,6	6,0	144,0	20	2	2	120	103
Vårbyg, malt	Fabriksroer	103	199798	194	21,9	11,3	97,2	10,7	11,0	120,6	18	2	2	99	86
Vårbyg, malt	Fabriksroer	105	200304	106	23,9	22,6	90,1	12,8	14,2	124,2	17	2	2	103	108
Vårbyg	Fabriksroer	103	200304	97	15,8	16,3	106,7	15,4	14,4	118,6	16	2	2	99	97
Vinterhvede	Fabriksroer	105	199192	162	15,9	9,8	138,3	15,4	11,2	233,8	22	2	2	208	150
Vinterhvede	Vårkorn	105	201920	160	34,9	21,8	158,4	19,2	12,2	9,2	14	2	2	189	182
Vårbyg	Fabriksroer	105	201415	168	29,1	17,3	227,8	20,1	8,8	-9,2	16	2	2	112	123
Vårbyg, malt	Fabriksroer	107	201011	237	17,7	7,5	212,7	23,1	10,9	126	15	2	2	107	104
Vårbyg, malt	Fabriksroer	105	199798	187	46,2	24,7	100,8	23,8	23,6	103,6	18	2	2	82	98
Vårbyg	Fabriksroer	107	201415	192	19,7	10,3	235,4	24,6	10,5	10,8	16	2	2	120	111
Vårbyg	Fabriksroer	104	199495	355	52,0	14,6	202,5	27,9	13,8	128,0	21	2	2	103	116
Vårbyg	Fabriksroer	105	199495	331	68,7	20,8	302,6	44,6	14,7	111,4	21	2	2	86	99
Vårbyg, malt	Fabriksroer	104	199798	223	45,0	20,2				114,7	18	2	2	93	105
Vårbyg, malt	Fabriksroer	104	201011	249	42,3	17,0				122,1	15	2	2	103	119
Vårbyg	Fabriksroer	104	201617	118	49,8	42,2				156,4	13	2	2	139	115
Vårbyg	Fabriksroer	104	201920	202	52,2	25,8				137,7	14	2	2	120	141
Vårbyg	Fabriksroer	102	201213	176	29,9	17,0				5,9	14	2	2	105	101
Vårbyg	Fabriksroer	104	201314	109	34,7	31,8				-1,1	13	2	2	123	127
Vårbyg	Fabriksroer	102	201516	224	40,1	17,9				21,5	14	2	2	126	106
Vårbyg, malt	Vinterkorn	401	201213	229	10,7	4,7				-16,2	14	2	2	82	100
Vårbyg	Vinterkorn	401	201415	272	23,9	8,8				0,8	16	2	2	103	104
Vårbyg	Vinterkorn	401	201617	161	17,7	11,0				41,6	13	2	2	146	106
Vinterhvede	Vinterraps	405	201718	276	41,5	15,0				-4,5	13	2	2	180	187

Tabel 7. Kornafgrøde, forfrugt og kvælstof input og fraførsel med høst samt afstrømning, nitratudvaskning og afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer i jord- og drænvand for korn efterfulgt af efterafgrøde.

Korn efterafgrøde				Jordvand			Dræn			Balance	Dep.	Såsæd	Nfiks.	Han	Høst
Afgrøde	Forfrugt	stnr	Hyd. år	Perk. (mm)	Udv. (kg N/ha/år)	Afst.v.konc. (mg N/L)	Afst (mm)	Udv. (kg N/ha/år)	Afst.v.konc. (mg N/L)						
Vinterhvede	Vinterkorn	103	201920	175	29,4	16,8	79,4	7,1	9,0	38,7	14	2	2	186	149
Vårbyg	Vårkorn	406	201819	127	20,6	16,3	32,5	7,9	24,3	40,3	13	2	2	143	105
Vårbyg til malt	Vårkorn	107	200809	151	13,8	9,2	84,4	13,1	15,5	20	14	2	2	103	85
Vårbyg	Vårkorn	406	201718	304	38,6	12,7	84,6	13,2	15,6	22,6	13	2	2	138	117
Vinterhvede	Vårkorn	103	200405	164	16,8	10,3	126,0	16,1	12,8	46,8	15	2	2	196	151
Vinterhvede	Vårkorn	105	201516	179	19,1	10,6	247,6	17,6	7,1	37,1	14	2	2	165	130
Vinterhvede (brød)	Vårkorn	103	200102	322	35,6	11,0	189,9	26,4	13,9	44,6	16	2	2	195	152
Vinterbyg	Vårkorn	401	201516	373	21,6	5,8				-8,6	14	2	2	131	141
Vårbyg til malt	Vinterkorn	405	200405	347	42,3	12,2				5,2	15	2	2	102	99
Vårbyg	Kartofler	204	201415	386	16,1	4,2				4,7	16	2	2	97	95
Vårbyg	Vårkorn	405	201415	239	41,9	17,6				9,8	16	2	2	109	101
Vårbyg	Vårkorn	204	201516	450	27,7	6,2				30	14	2	2	115	87
Vårbyg	Vinterkorn	405	201920	331	49,2	14,9				14,9	14	2	2	119	106

Tabel 8. Afgrøde, forfrugt, type af efterafgrøde og tidspunkt for ompløjning samt monitorering i jord- og drænvand eller kun jordvand for afgrødekombinationen korn efterfulgt af en efterafgrøde.

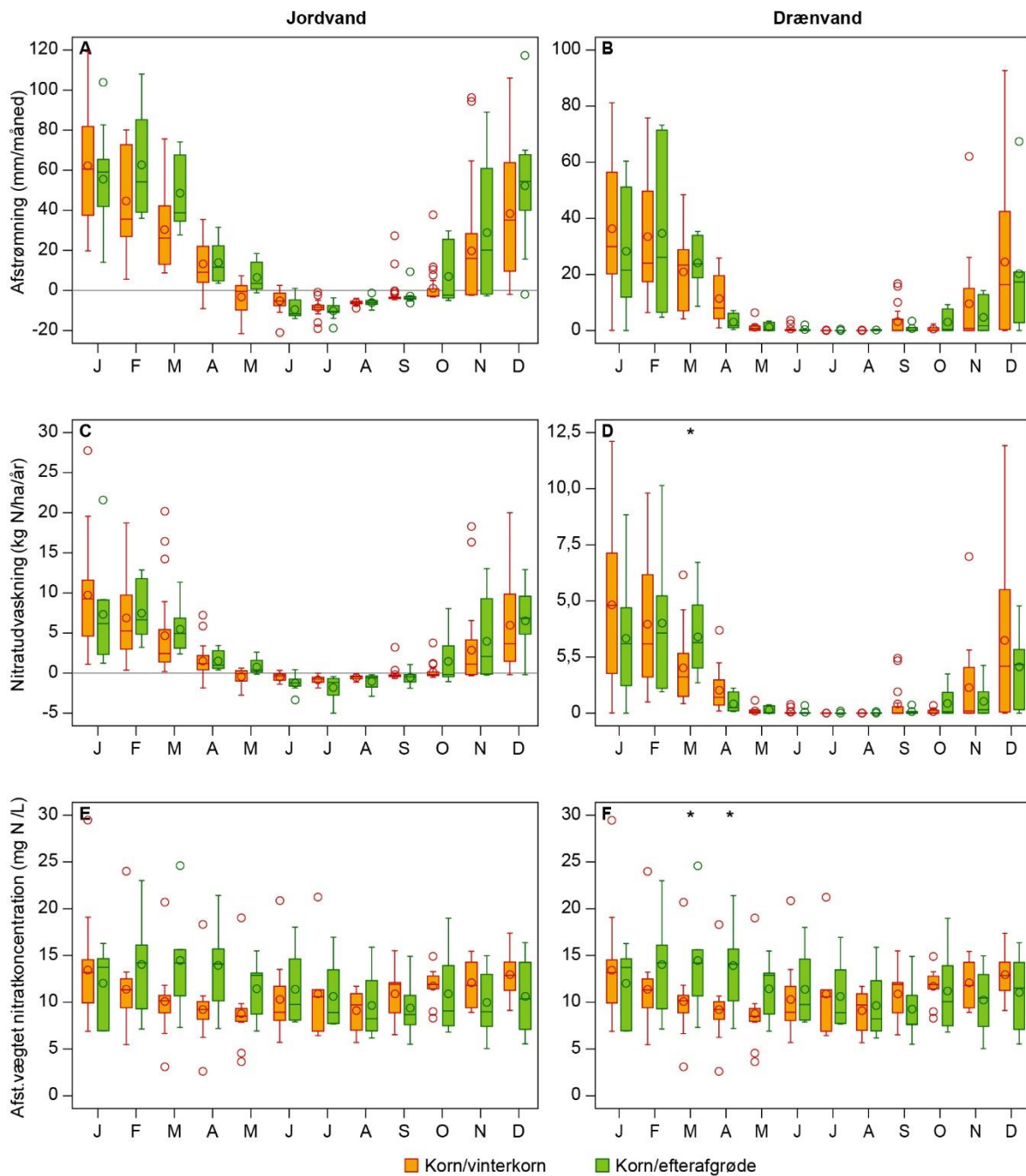
Korn efterafgrøde						
Afgrøde	Forfrugt	stnr	Hyd.. år	Efterafgrøde	Pløjetid	Monitorering
Vinterhvede	Vinterkorn	103	201920	Pligtig efterafgr. korsblomstr.(nedm.)	13. nov.	jord- og drænvand
Vårbyg	Vårkorn	406	201819	Pligtig efterafgr. korsblomstr.(nedm.)	1. nov.	jord- og drænvand
Vårbyg til malt	Vårkorn	107	200809	Pl.+MFO, bl. rug/vårbyg/korsbl./hon.urt	26. okt.	jord- og drænvand
Vårbyg	Vårkorn	406	201718	6% efterafgr græs(nedm.)udlægslet efterår	1. nov.	jord- og drænvand
Vinterhvede	Vårkorn	103	200405	6% efterafgr græs(nedm.)udlægslet efterår	1. nov.	jord- og drænvand
Vinterhvede	Vårkorn	105	201516	6% efterafgr- græs(nedm.)udl.forår	25. nov.	jord- og drænvand
Vinterhvede (brød)	Vårkorn	103	200102	6% efterafgr. gul sennep(nedm.)	15. okt.	jord- og drænvand
Vinterbyg	Vårkorn	401	201516	Pligtig efterafgr. olieræddike(nedm.)	30. marts	Jordvand
Vårbyg til malt	Vinterkorn	405	200405	Pligtig efterafgr. græs(nedm.)udl.forår	1. nov.	Jordvand
Vårbyg	Kartofler	204	201415	Pligtig efterafgr./korn(nedm.)s.1/8	1. nov.	Jordvand
Vårbyg	Vårkorn	405	201415	Pligtig efterafgr. græs(nedm.)udl.forår	25. nov.	Jordvand
Vårbyg	Vårkorn	204	201516	Pligtig efterafgr./korn(nedm.)s.1/8	24. nov.	Jordvand
Vårbyg	Vinterkorn	405	201920	Pligtig efterafgr. græs(nedm.)udl.forår	15. nov.	Jordvand

Månedsværdier for afstrømning, udvaskning og afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer

Gennemsnitlig afstrømning, nitratudvaskning og afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer er opgjort for både drænvand og jordvand for hver måned for de to afgrødefølger korn efterfulgt af henholdsvis vinterkorn og af efterafgrøder, box-plot for disse er vist i figur 20. Der er gennemført en statistisk T-test på log-transformerede data i SASm, der er forskel på de ovennævnte månedsværdierne mellem korn efterfulgt af henholdsvis vinterkorn eller af efterafgrøde. Den statistiske test viste, at der ikke er signifikant forskel på de viste månedsværdier på nær for nitratudvaskning fra dræn i marts og afstrømningsvægtet nitratkoncentration i dræn i marts og april angivet med * øverst i figur 5 med $p < 0,05$. Så selv om middel for de afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer i dræn, som forventet er lavere for korn efterfulgt af efterafgrøde end for vinterkorn i september-december og lavere for jordvand i november og december, viste den statistiske analyse, at disse forskelle ikke er signifikante.

Derimod viste statistikken, at der er signifikant lavere afstrømningsvægtet nitratkoncentration i marts og april for afgrødefølgen korn efterfulgt af vinterhvede end korn efterfulgt af en efterafgrøde.

Generelt er der stor variation i de viste månedsværdier for nitratudvaskning og afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer for både jord- og drænvand, og det skal understreges, at antallet af observationer for dræn kun omfatter 16 og syv hydrologiske år med afgrødefølgen korn efterfulgt af henholdsvis vinterkorn og efterafgrøde. De viste data og statistiske analyser viser dog, at effekten af efterafgrøder ift. vinterkorn bør analyseres nærmere, og gerne med målinger der i højere grad end hidtil afdækker betydningen af lokale forhold som specifikke sædskifter og lav nedbør og med et forsøgsdesign med parallelt sædskifte af korn efterfulgt af vinterkorn kontra efterafgrøde, således at sammenligningen mellem de to afgrødefølger følger samme år og dyrkningsforhold.



Figur 20. Box-plot af månedsværdier for afstrømning, nitratudvaskning og afstrømningsvægtet nitratkoncentration for jord- og drænvand opdelt i de to afgrødefølger korn efterfulgt af henholdsvis vinterkorn og efterafgrøder. Den statistiske test viste, at der ikke er signifikant forskel på de viste månedsværdier på nær for nitratudvaskning fra drænen i marts og afstrømningsvægtet nitratkoncentration i drænen i marts og april angivet med * øverst i figur E og F hvor * angiver at $p < 0,05$.

Udvaskningsrisiko fra vinterhvede ved forskellige jordbearbejdningsystemer

Leif Knudsen, SEGES Innovation

Håndtering af planterester og jordbearbejdning i perioden fra høst af afgrøden, forud for vintersæd til vintersæden etableres, må forventes at have indflydelse på udvaskningen om efteråret og vinteren efter. Jo kraftigere og jo tidligere jorden bearbejdes af stubharvningen, jo mere kvælstof må forventes frigivet fra jorden ved den større omsætning af organisk stof. Samtidig vil kraftig jordbearbejdning også hindre kvælstofoptagelsen i spildfrø og ukrudt. En overfladisk jordbearbejdning efter høst, hvor jorden ikke røres yderligere før etablering af vintersæden, kan fremprovokere fremspiring af spildfrø og ukrudt og dermed have en udvaskningsreducerende effekt. Jordbearbejdning på arealer med snittet halm sikrer en opblanding af halm i jorden, hvilket vil øge halmens immobilisering af kvælstof og alt andet lige reducere udvaskningsrisikoen. Kemisk bekæmpelse af ukrudt og spildkorn i perioden fra høst til etablering af vintersæd vil også påvirke udvaskningen ved at påvirke kvælstofoptagelsen i ukrudt og spildkorn. I forbindelse med direkte såning foretages stort set altid en kemisk nedvisning af ukrudt og spildkorn, og hvis den foretages tidlig, vil kvælstofoptagelsen i ukrudt og spildkorn blive minimal.

Jordbearbejdningen og såmetoden vil påvirke udviklingen af vintersæden om efteråret. Direkte såning frem for pløjning forud for såning vil alt andet lige give en langsommere udvikling af vintersæden, fordi kvælstofmineraliseringen reduceres, og dermed en mindre kvælstofoptagelse om efteråret. Den hurtigere udvikling efter pløjning kan netop skyldes den større frigørelse af kvælstof end ved direkte såning. Omvendt kan der også argumenteres for, at pløjefri dyrkning øger vandgennemstrømningen gennem makroporer, og flere mikroorganismer øger omsætningen af organisk stof. Disse forhold kan øge risikoen for udvaskning i pløjefri systemer. (Landbrugsinfo, https://www.landbrugsinfo.dk/-/media/landbrugsinfo/public/b/0/8/rapport_reduktion_totalkvalstof_conservation_agroculture.pdf). Tabel 9 opsummerer den vurderende udvaskningsrisiko.

Sammenhængen mellem jordbearbejdning og såning er derfor meget kompleks, og der findes kun få relevante undersøgelser heraf.

Tabel 9. Vurderet udvaskningsrisiko ved forskellige jordbearbejdnings- og etableringssystemer (* øget risiko)

<i>Fra kort tid efter høst til etablering</i>	<i>Ved etablering</i>	<i>Relativ udvaskningsrisiko</i>
*Ingen eller overfladisk jordbearbejdning	Pløjning	***
	Direkte såning	**
Tidlig kemisk nedvisning	Pløjning	****
	Direkte såning	***
Kraftig stubbearbejdning eller tidlig pløjning	Pløjning	*****
	Direkte såning	****

Forsøg med effekt af jordbearbejdning på udvaskningen fra vintersæd

I Virkemiddelkataloget 2020 (Eriksen et al. 2020) angives på baggrund af de såkaldte CENTS forsøg på Foulum og Flakkebjerg, at der i Foulum (JB4) er fundet, "at direkte såning har givet højere udvaskning end reduceret jordbearbejdning og pløjning i et sædskifte domineret af vinterafgrøder. Derimod har reduceret jordbearbejdning (harvning 8-10 cm) og direkte såning givet lavest kvælstofudvaskning i et alsidigt sædskifte med vinter- og vårafgrøder og fjernelse af halm, mens der ikke var forskel på udvaskningen i samme sædskifte uden fjernelse af halm. På Flakkebjerg (JB6) er der generelt ingen sikker effekt af jordbearbejdning på kvælstofudvaskningen." En oversigt over resultaterne er vist i Tabel 10.

Tabel 10. Udvaskning i CENTS forsøgene 2003-2011 (Hansen et al., 2015) og 2022-2018, kg N/ha/år på tværs af sædskifter (Gengivet fra Eriksen et al. 2020).

Jordbearbejdning	Foulum (JB4)		Flakkebjerg (JB6)	
	2003-11	2011-18	2003-11	2011-18
Pløjet	42a	77a	29a	29a
Red. Jordb. (harvet 8-10 cm)	40a	65a	28a	25a
Direkte såning	45a	77a	28a	29a

Resultaterne af forsøgene viser, at der ikke har kunnet måles en mindre udvaskning ved direkte såning eller reduceret jordbearbejdning på nogle af de to lokaliteter i de respektive sædskifter. Resultaterne kan ikke bekræfte den vurderede udvaskningsrisiko i tabel 10.

Udvaskningsrisiko fra forskellige jordbearbejdningssystemer belyst ved N-min-målinger

SEGES har i perioden 2019-2020 målt N-min om efteråret i 15 pløjede, 19 harvede og 35 direkte såede marker. N-min blev målt i efteråret i 1. års vinterhvedemarker dvs. primært i vinterhvede efter vinterraps. I vinterhvede efter vinterraps er der i mange forsøg og undersøgelser målt et højt N-min og bestemt en stor kvælstofudvaskning (Montcalm og Vestergaard, 2021, https://www.landbrugsinfo.dk/-/media/landbrugsinfo/public/b/0/8/rapport_reduktion_totalkvalstof_conservation_agroculture.pdf).

Tabel 11. Sammenligning af N-min efterår i vinterhvede etableret efter forskellige jordbearbejdningssystemer (Montcalm og Vestergaard, 2021).

Såmetode	Antal marker	N-min (0-100 cm), kg N/ha
Pløjet	15	68
Harvet	19	55
Direkte såning	35	59

Der er målt et signifikant højere N-min-indhold i pløjede marker end i marker med harvning eller direkte såede marker. De største forskelle ses i øverste jordlag, hvor hovedparten af mineraliseringen finder sted.

Daisy model-simuleringer af N udvaskning i forskellige afgrøde-scenarier

Lars Stoumann Jensen og Per Abrahamsen, Institut for Plante- og Miljøvidenskab, Københavns Universitet

Det er omkostningstungt og vanskeligt at kortlægge kvælstofudvaskningen eksperimentelt i forskellige sædskifter, jordtyper og klimaer, simpelthen på grund af kompleksiteten, årsvariation, omfanget og længden af de nødvendige markforsøg. Procesbaserede modeller, som f.eks. jord-plante-atmosfære-modellen Daisy (Hansen et al., 2012; Hansen et al., 1991), kan her være nyttige alternative værktøjer til at vurdere effekten af agronomiske og miljømæssige forhold på N-dynamik og –udvaskning, forudsat at de er vel-kalibreret på de aktuelle forhold.

Daisy-modellen er blevet evalueret i en række model-sammenlignende studier (Diekkrüger et al, 1995; Smith et al., 1997; Palosuo et al., 2011; Kollas et al., 2015; Macholdt et al., 2020; Laub et al., 2021) og altid rangeret blandt de bedste modeller. Den er også blevet anvendt til at simulere virkningerne af forskellige miljøforhold og dyrkningspraksis på afgrødeproduktion og N-dynamik (Gyldengren et al., 2020; Manevski et al., 2016; Ozturk et al., 2018; Yin et al., 2020). Samlet set indikerer disse studier, at Daisy kan anvendes til vurdering af potentielle konsekvenser af afgrødefølger og sædskifter.

Daisy har været anvendt i en række forskellige projekter, bl.a. NYIELD, COMMIT og StyrN, hvor scenarier med vårsæd med og uden efterafgrøder er sammenlignet med vintersæd. Ikke alle projekterne havde udvaskning af kvælstof som primær fokus, men da Daisy baserer sig på massebalancer, bliver kvælstofudvaskning beregnet alligevel, og de kan derfor alle anvendes til at vurdere dette.

I de tre nævnte projekter fandt vi generelt, at den største udvaskning af kvælstof til dræn skete i marker med vårsæd (vårbyg) uden efterafgrøder, og den laveste udvaskning i marker med vintersæd (vinterhvede). Bemærk at der er tale om total udvaskning gennem dræn i kg N/ha over et helt sædskifte, hvilket adskiller fra punktmålinger af kvælstof i jordvand.

- Vandbalancen afhænger af sædskifte. Den potentielle fordampning for en hvedemark med fuldt plantedække er dobbelt så stor som for en mark med bar jord, så hvor lang tid en mark er dækket har stor betydning. En højere netto-nedbør vil alt andet lige give højere udvaskning men lavere koncentrationer.
- For at mindske udvaskning skal en afgrøde ideelt set både kunne "rydde op" efter den forrige afgrøde, og efterlade minimalt N til den næste. I scenarierne er der ikke forsøgt at skelne mellem de to effekter.

I COMMIT (Petersen & Abrahamsen, 2021) undersøgte vi, om en underjord, der var udsat for belastning fra tungt maskinel, gav anledning til lavere udbytter. Det skete kun første år, men på en mark blev der målt en nedgang i bladareal de efterfølgende år. Scenarierne blev kørt for den mark for at se potentiel effekt over yderlige års klima (nutidigt og fremtidigt), samt vurdere miljøeffekt. Den største (negative) effekt af jordkomprimeringen var et større tab af kvælstof til luft (denitrifikation), især i fremtidigt klima.

I NYIELD (Styczen et al., 2020a, 2020b; Styczen & Abrahamsen, 2017) forsøgte vi at finde ud af, hvorfor proteinindholdet for vårbyg og vinterhvede var faldet fra 1990 til 2015. Datagrundlag var SEGES' landsforsøg. Der blev kalibreret en byg og en hvede svarende til 1990 data og 2015 data. Derved kunne vi så prøve den gamle afgrøde men nye gødningsnormer, nyt klima, og andre forskelle. Den dominerende faktor for

vårbyg var forædling i form af nye sorter, der kan klare sig med mindre kvælstof, og den dominerende faktor for vinterhvede var direkte de ændrede gødningsnormer.

I StyrN projektet analyserede vi effekten af forskellige afgrødesekvenser og sædskifter på N-udvaskning og N-dynamik, samt betydningen af gødningstype/-mængder, jordtype og klima, for at vurdere potentialet under disse varierende forhold for at reducere N-udvaskningen med forskellige virkemidler (Rashid et al., 2022a). Vi fandt en meget stor variation mellem sædskifter i den gennemsnitlige N-udvaskning (fra 16 til 85 kg N/ha i gns. over hele sædskiftet), som i høj grad var påvirket af typen af afgrøder i de enkelte sædskifter. Rotationer med en større andel af vinterkorn og græsmarker resulterede i mindre udvaskning end sædskifter, der var domineret af vårsæd (vårbyg, majs) uden efterafgrøder. Sædskifter med kløvergræs i omdrift og vårbyg viste typisk en høj N udvaskning. Sædskifte udelukkende bestående af vårbyg og kun lovpligtig efterafgrøde i et ud af seks år havde den højeste gennemsnitlige udvaskning (tabel 5, SK1). Efterafgrøder (undersået græs eller korsblomstret sået efter høst) reducerede N-udvaskningen med op til 54% henholdsvis 33% i løbet af et enkelt udvaskningsår, og var det mest effektive virkemiddel i de samlede sædskifter. Udvasningen for sædskiftet udelukkende bestående af vinterhvede var en af de laveste, ca. 45kg N/ha i gennemsnit over hele sædskiftet – som diskuteret i Rashid et al. (2022a), er dette lidt lavere end i forskellige andre studier. Efterafgrødernes evne til at reducere udvaskningen af N varierede på tværs af sædskifter og de øvrige faktorer, men var hovedsageligt påvirket af hovedafgrøde, forfrugt og hyppighed og varighed af efterafgrøder samt varighed af efterafgrødens N-optag. Jordtypen har en klar indflydelse på udvaskningen af N under alle forhold. Sammenlignet med JB1 var N-udvaskningen 18% og 47 % lavere på JB4 henholdsvis JB6. Effekten af jordtype var mere udtalt i nogle sædskifter, men den var dog altid i den nævnte rækkefølge – og studiet inkluderede ikke en specifik sammenlignende analyse af vinter kontra vårsæd under specifikke kombinationer af klima og jordtype.

I Rashid et al. (2022b) anvendtes nogle af de samme scenarier til at undersøge den samlede N-dynamik, balancer og relevante indikatorer for N-udnyttelse. Her viste simuleringerne, at selvom der indenfor det enkelte sædskifte godt kan være en god sammenhæng mellem N-overskud og N-udvaskning, så findes denne relation ikke, når der ses på tværs af sædskifter og jordtyper – ændringen jordens pulje af organisk N er af afgørende for, om der ved det samme N-overskud sker en stor eller lav N-udvaskning.

Det er afslutningsvist vigtigt at bemærke, at gyldigheden af simuleringer-resultater fra enhver agroøkosystem-model er afhængig af, at de enkelte delmoduler er velkalibrede under alle de forhold, som scenarierne dækker. For Daisy gælder især i denne sammenhæng efterafgrøde-modulerne, som pt. undgår recalibrering i CatCap projektet; deres gyldighed i alle de forskellige scenarier i Rashid et al. (2022a) er ikke valideret.

Tabel 12. Daisy simuleret nitrat udvaskning (kg N/ha) i forskellige typer af sædskifter (PK plantebrug; S/SK svinebrug, KK og IKT kvægbrug) og effekt af forskellige virkemidler (udvalgt fra Rashid et al., 2022a). Værdierne er gennemsnit af simuleringer med forskellige jordtyper (JB1, JB4 eller JB7), klima (vest og øst Danmark) og andel af husdyrgødning (ingen, halvdelen eller fuldt op til harmonikrav, 170 kg husdyrgødnings-N/ha). Alle afgrøder er gødet med N ift. N-normer og gældende gødningsregler. Simuleringerne er gennemført med aktuelt klima fra 1990-2020 og gennemsnit (yderste højre kolonne) er over 4 gennemløb af hvert sædskifte (24 år).

Sædskifte ID Virkemiddel ¹		Afgødefølge i hvert typesædskifte						Sædskifte gns.
		År 1	År 2	År 3	År 4	År 5	År 6	
PK5	Afgøde	Vårbyg	Vinterhvede	Sukkerroer	Vårbyg	Vinterhvede	Sukkerroer	
	PK5	83	41	43	84	55	39	58
	PK5-M1	77 (ma)	40	44	78 (ma)	55	40	56
	PK5-M2	85	27 (ea-OR)	38	85	40 (ea-OR)	38	52
	PK5-M3	78 (ma)	27 (ea-OR)	39	79 (ma)	39 (ea-OR)	38	50
SK1	Afgøde	Vårbyg	Vårbyg	Vårbyg	Vårbyg	Vårbyg	Vårbyg	
	SK1	83	100	114	79	102	34 (ea-usRG)	85
	SK1-M1	39 (ea-usRG)	49 (ea-usRG)	60 (ea-usRG)	43 (ea-usRG)	69 (ea-usRG)	47 (ea-usRG)	51
	SK1-M2	68 (ea-OR)	68 (ea-OR)	98 (ea-OR)	67 (ea-OR)	87 (ea-OR)	72 (ea-OR)	77
KK1	Afgøde	Majs til ensilage	Majs til ensilage	Majs til ensilage	Majs til ensilage	Majs til ensilage	Majs til ensilage	
	KK1	72	78	95	70	88	84	81
	KK1-M1	54 (ea-usRG)	68 (ea-usRG)	87 (ea-usRG)	57 (ea-usRG)	85 (ea-usRG)	78 (grass ea-usRG)	72
IKT2	Afgøde	Grønkorn, u.s. kl.græs	Kløvergræs	Kløvergræs	Kløvergræs	Vårbyg	Vårbyg	
	IKT2	31	42	72	56	122	96	70
	IKT2-M1	41	51	77	58	68 (ea-usRG)	45 (ea-usRG)	57
S2	Afgøde	Vårbyg	Vinterraps	Vinterhvede	Vinterhvede	Ærter	Vinterbyg	
	S2	78	104	50	37	61	74 (ea-OR)	67
	S2-M1	82	73 (ts)	44	38	61	87	64
	S2-M2	82	104	45 (ma)	37	61	87	69
	S2-M3	83	104	49	24 (ea-OR)	55	88	67
	S2-M4	79	74 (ts)	39 (ma)	25 (ea-OR)	56	76 (ea-OR)	58

¹:M1, M2, M3, M4 efter sædskifte ID (fx. PK5) angiver forskellige virkemidler til reduction af N udvaskning. Type og placering af det givne virkemiddel er indikeret i parentes i det pågældende år (fx. tidlig såning (ts), efterafgrøde undersået rajgræs (ea-usRG), efterafgrøde olieræddike (ea-OR), mellemafgøde (ma; olieræddike). Effekt af et givet virkemiddel placeret et bestemt sted i et sædskifte kan beregnes ved at sammenligne værdier med og uden virkemidlet i det år, fx 83 og 77 kg N/ha er udvaskningsværdierne henholdsvis uden og med 'SDCC' virkemidlet i PK5, for vårbyg år 1. Gennemsnittet for hele sædskiftet, inkl. eftervirkningseffekter simuleret over 4 gennemløb af hvert sædskifte, kan så fås ved at sammenligne værdierne i kolonnen yderst til højre. (fx PK5 med PK5-M1).

Opsummering

Der er flere forskellige udgangspunkter og tilgange til at diskutere, hvorvidt der set over et helt dyrkningssystem er størst udvaskning ved vårsæd efterfulgt af efterafgrøder eller ved vintersæd sået til normal tid. For at klarlægge problemstillingen er der i nærværende vidensyntese samlet en række resultater fra forsøg og undersøgelser.

Der indgår resultater fra SEGES' sædskifte- og sugecelleforsøg, N-min målinger udtaget på forskellige landmandsmarker om foråret, efter høst og om efteråret, Aarhus Universitets sugecelleforsøg og Landovervågning samt resultater fra modellering af udvaskning med modellen Daisy. Resultaterne fra Landovervågningen og N-min målingerne er udtryk for praksisnære målinger, men svagheden ved disse målinger er, at sammenligningerne ikke laves i den samme mark, og heller ikke altid i samme år. I modsætning hertil har markforsøgene med sugeceller udført af Aarhus Universitet og SEGES den styrke, at forskellige behandlinger sammenlignes i samme mark, men de dækker til gengæld kun få lokaliteter og jordbundsforhold. Modelberegninger kan bruges til at sammenligne forskellige strategier over en lang række kombinationer af dyrkningsforhold, men det er vanskeligt eller umuligt at validere modellens gyldighed over alle disse. De forskellige undersøgelser supplerer derfor hinanden, og tilsammen udgør resultaterne derfor et omfattende og solidt grundlag for at belyse udvaskningen fra vintersæd i forhold til efterafgrøder og vårsæd i løbet af hele sæsonen i 1 meters dybde.

Udvaskningen fra vintersæd og vårsæd med efterafgrøder er målt i flere forskellige forsøg gennem flere år (Tabel 13). Resultaterne fra Aarhus Universitet viser, at udvaskningen målt med sugeceller i 1 meters dybde både i Flakkebjerg og Foulum var lavere efter efterafgrøder sammenlignet med vintersæd sået til normal tid. I SEGES' sædskifteforsøg på Lolland var der generelt lav udvaskning, men udvaskningen reduceredes med efterafgrøder sammenlignet med ukrudt og spildkorn. Sammenlignes i dette forsøg udvaskning fra efterafgrøder med udvaskningen med 2. års hvede var der i alle år en større udvaskning fra vinterhveden sammenlignet med eftergrøderne. Disse resultater bekræfter således resultaterne fra de to forsøg udført af Aarhus Universitet, om end det absolutte niveau for udvaskning under vintersæd var noget lavere på Lolland i forhold til Flakkebjerg.

Tabel 13: Sammenstilling af forsøg med direkte sammenligning af udvaskning fra vintersæd contra efterafgrøder.

Efterårs-dække	Foulum (AU)				Flakkebjerg (AU)				Lolland (SEGES)				Gns
	2015/16	16/17	17/18	18/19	15/16	16/17	17/18	18/19	18/19	19/20	20/21	21/22	
	Udvaskning, kg N pr. ha												
Efterafgrøde efterfulgt af vårsæd	15	10	38	30	11	3	9	21	12	13	4	12	15
	Merudvaskning fra normal sået vintersæd, kg N pr. ha												
Normal sået vintersæd	24	19	11	35	21	19	55	89	2	14	6	12	26

At udvaskningen er størst fra vintersæd, bekræftes af målinger gennemført i landmandsmarker i Landovervågningen og ved N-min målinger i efteråret. Nitratudvaskningen fra analysen af relevante Landovervågnings-oplande på nedbørsfattige lokaliteter var på samme niveau for både vinterkorn og efterafgrøder, og den årlige udvaskning var som gennemsnit af arealerne ca. 29 kg N/ha. Da afstrømningen var større for de udvalgte målinger af korn med efterafgrøde end for de udvalgte målinger for korn efterfulgt af vinterkorn, er

den afstrømningsvægtede nitratkoncentration signifikant større for korn efterfulgt af vinterkorn end fra efterafgrøder. Udvaskningsmålingerne fra Landovervågningen indikerer altså også, at udvaskningen er størst i vintersædsædskifter. N-min målingerne tyder på et højere N-min-niveau efter vintersæd i efteråret end ved efterafgrøder, hvilket ligeledes indikerer en højere udvaskningsrisiko.

Resultater fra markforsøgene indikerer også, at udvaskningen fra efterafgrøder på lerjord er lavere end for vintersæd, selvom efterafgrøden destrueres i efteråret. Det er vigtigt, fordi der ofte vil ske en frigørelse af kvælstof fra efterafgrøden efter destruktion, og i teorien vil denne kunne give anledning til en merudvaskning. Men den tidlige udvikling i udvaskningen på Foulum og på Flakkebjerg viser, at der ikke er en væsentlig udvaskning eller merudvaskning fra arealer, hvor der har været efterafgrøder i forhold til vintersædsarealer i perioden april til juni. En af årsagerne er, at afstrømningen på lerjord i denne periode i de fleste år er beskednen.

De fleste markforsøg og undersøgelser indikerer altså, at efterafgrøder reducerer udvaskningen sammenlignet med vintersæd. I modsætning til disse undersøgelser tyder DAISY model-simuleringer på en mindre udvaskning fra vintersædsbaserede sædskifter, i hvert fald fra de mere lerede jorde.

Den nye opgørelse af drænvandsmålingerne i Landovervågnings-oplandene viser, at der ikke er signifikant forskel på de afstrømningsvægtede koncentrationer mellem korn efterfulgt af enten efterafgrøder eller vintersæd. Der indgår dog ret få observationer i undersøgelsen, 16 målinger for korn efterfulgt af vintersæd og 7 målinger for korn efterfulgt af efterafgrøder. Opgjorte månedsploster for disse drænmålinger viser højere men dog ikke signifikant forskellige middelværdier af afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer om efteråret for korn efterfulgt af vintersæd, mens der omvendt er signifikant højere afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer for marts og april for korn efterfulgt af efterafgrøder end af vintersæd. Målingerne er primært gennemført på lerjord med flest observationer på Lolland, hvilket giver en indikation af, at der kan være en mindre effekt end hidtil forventet af efterafgrøder i områder på lerjord med lave nedbørsmængder.

Markforsøgene viser, at der også på lerjord i tørre egne er en mindre udvaskning fra 1 meters dybde fra efterafgrøder sammenlignet med vintersæd. Men forskellen er meget beskednen og knyttet til år med store afstrømninger i efterårsperioden.

I det tidlige forår indikerer resultaterne af drænvand i Landovervågnings-oplandene, at efterafgrøder på drænet lerjord ikke reducerer udvaskningen sammenlignet med vintersæd. For marts var den gennemsnitlige afstrømningsvægtede nitratkoncentration i drænen en signifikant forskel med 10,1 mg N/L for korn efterfulgt af vinterkorn og 14,5 ± 5,4 mg N/L for korn efterfulgt af en efterafgrøde. Med en middelfast afstrømning for denne måned på henholdsvis 21 og 24 mm for korn efterfulgt af henholdsvis vinterkorn og efterafgrøde medførte det en signifikant mindre nitratudvaskning fra drænen for korn efterfulgt af vinterkorn med en månedsudvaskning på 2,0 kg N/ha mod 3,4 kg N/ha for korn efterfulgt af en efterafgrøde. For april var afstrømningen relativ lav og viste ikke nogen signifikant forskel på nitratudvaskning på de to afgrødekombinationer. At vintersæden skulle have en fordel netop på lerjord, indikeres også i Thorup-Kristensen (2009), hvor resultaterne tyder på, at vintersæd i forår og sommerperioden kan opnå en dybere rodvækst end kombinationen af efterafgrøder og vårsæd, og dermed potentielt set kan optage kvælstof, der ellers i løbet af efteråret og vinteren er nedvasket til under 1 meters dybde, og som først udvaskes gennem drænene, når grundvandspejlet når drændybden.

Ud fra den generelle viden om roddeybder må det antages, at det kun er på arealer med lerjord i lagene under 1 meters dybde, at der potentielt kan forekomme en betydende optagelse af vand og kvælstof under 1 meters dybde. Det vil samtidig typisk være jorde, som er dræned. Skønsmæssigt vil dette areal udgøre fra en tredjedel til halvdelen af landbrugsarealet.

For at undersøge om vintersæden kan opnå en større optagelse under 1 meter i sommerperioden, er der i nærværende vidensyntese kigget på udvaskningen i 2 meters dybde målt med sugeceller. SEGES' sugecelleforsøg, hvor der er målt i både 1 og 2 meters dybde, viser, at der kan detekteres variation imellem forskellige afgrøder og forfrugter i 1 meters dybde, hvorimod nitratkoncentrationen i 2 meters dybde er relativt stabil på tværs af afgrøder og tid. Lignende resultater er fundet i CENTS-forsøgene på Aarhus Universitet, hvor nitratkoncentrationen var relativt konstant i 2 meters dybde, hvorimod den varierede mere målt i 1 meters dybde. I resultaterne fra CENTS-forsøgene var niveauet for nitratkoncentration afhængig af efterårsbevoksningen i både 1 og 2 meters dybde. Der er relativt få målinger med sugeceller i to meter, og det er vanskeligt at tolke resultaterne, bl.a. fordi der kan være en betydelig tidsmæssig forsinkelse mellem målinger i 1 og 2 meters dybde. Desuden kan vandspejlet være over 2 meter, hvilket kan betyde, at målingerne kan afspejle koncentrationen i en blanding af det afstrømmende og gammelt vand. Endeligt vil den varierende grundvandsstand mellem 1 og 2 meter påvirke fjernelsen af nitrat ved denitrifikation.

Konklusion

Udvaskningen fra 1 meters dybde fra korn efterfulgt af efterafgrøder er generelt set mindre end udvaskningen fra vintersæd sået til normal tid. På lerjord i Østdanmark er forskellen i udvaskningen fra efterafgrøder og vinterkorn dog lille, fordi udvaskningsniveauet generelt er lavt. Udvaskningen i forårs månederne målt med sugeceller i 1 meters dybde er fundet at være mindre eller den samme fra efterafgrøder som for vinterkorn. Målinger af nitratkoncentrationen i 2 meters dybde kan indtil videre ikke kvantificere betydningen af kvælstofoptagelse fra vintersæd under 1 meters dybde.

Drænmålinger i Landovervågnings-oplandene indikerer, at udvaskningen gennem dræn i det tidlige forår kan være større for efterafgrøder end fra vintersæd, men datagrundlaget er relativt lille og fra forskellige marker og år samt desuden med stor variation i de målte nitratkoncentrationer.

Behov for yderligere undersøgelser

Det er afgørende for valg af virkemidler på dyrkningsfladen, at forholdet mellem kvælstofudvaskning fra efterafgrøder og fra vinterkorn fastsættes korrekt på forskellige jordtyper og vinternedbør. For at få et retvisende billede af forskellen i udvaskningen fra vinterkorn og efterafgrøder, er der for drænedde lerjorde behov for yderligere undersøgelser. Samtidig er der behov for bedre at kunne kvantificere forskellen i udvaskning på forskellige jordtyper, nedbørsregioner og i forskellige dyrkningssystemer. I forlængelse af videnssynthesen foreslås følgende nye forsøgs- og forskningsaktiviteter:

Kontrollerede målinger af kvælstofudvaskning gennem dræn fra efterafgrøder og vinterkorn

Der bør gennemføres to forsøg. Ét i Østdanmark i område med lerjord og med lav vinternedbør og ét i Østjylland i område med lerjord og høj vinternedbør. Forsøgene anlægges i marker, der er systemdrænedde, og hvor det er praktisk muligt at anlægge forsøg med direkte sammenligning af korn-efterafgrøde og korn-vinterkorn i 4 gentagelser og med målebrønde til opsamling af drænvand.

Måling af kvælstofoptagelse under 1 meters dybde i vintersæd.

Videnssynthesen indikerer, at sådanne undersøgelser ikke kan foretages ved blot at etablere sugeceller i 2 meters dybde. Undersøgelsen bør derfor gennemføres med ^{15}N mærket kvælstof, som placeres i forskellig dybde. Undersøgelsen gennemføres på flere jordtyper med forskellig gradient af ler i de dybere jordlag.

Måling af jordtype- og geografiske forskelle i kvælstofudvaskning fra efterafgrøder og vinterkorn

Formålet med aktiviteten vil være at afdække, hvor stor forskellen er i udvaskning fra 1 meters dybde i udvaskning fra vinterkorn og efterafgrøder på forskellige jordtyper og nedbørsregioner. Udvaskningen bør måles i forsøgene med placering af sugeceller i 1,0 til 1,2 meters dybde. Forsøgene skal supplere det relativt sparsomme forsøgsgrundlag, den nuværende viden hviler på (forsøg på primært 3 lokaliteter). Det foreslås, at forsøgene etableres på minimum 6 lokaliteter.

Referencer

- Adhikari, K., Kheir, R.B., Greve, M.B., Bøcher, P.K., Malone, B.P., Minasny, B., McBratney, A.B., Greve, M.H., 2013. High-Resolution 3-D Mapping of Soil Texture in Denmark. *Soil Science Society of America. Journal* 77: 860-876.
- Andersen, A. 1986. Rodvækst i forskellige jordtyper. Beretning nr. S 1827. Statens Planteavlsvforsøg. Tids-kift for Planteavls Specialserie.
- Andersen, M. N. 1985. Planternes tørkeresistens, rodudvikling og vandforråd på sandjord. Beretning nr. S 1775. Statens Planteavlsvforsøg. Tidsskrift for Planteavls Specialserie.
- Askegaard, M., Eriksen, J., 2007. Growth of legume and nonlegume catch crops and residual-N effects in spring barley on coarse sand. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170, 773–780. DOI: 10.1002/jpln.200625222.
- Bennetzen, F. (1978). Vandbalance og kvælstofbalance ved optimal planteproduktion. 3. Modeller og resultater. *Tidsskrift for Planteavl* 82, 191-220, Aarhus Universitet.
- catch crop. *Soil & Tillage Research* 41, 203-219.
- Blicher-Mathiesen, G., Houlborg, T., Petersen, R.J., Rolighed, J., Andersen, H.E., Jensen, P.G., Wienke, J., Hansen, B. & Thorling, L. 2021. Landovervågningsoplande 2020. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 260 s. - Videnskabelig rapport nr. 472. <http://dce2.au.dk/pub/SR472.pdf>
- Børgesen, C. D., Piil, K., Vinther, F. P., Hvid, S. K. 2018. Sådan måles potentiale for kvælstofudvaskning. *Vand og jord. Vol. 25. Side: 150-153.* Kan tilgås her: http://vand-og-jord.dk/wp-content/uploads/2021/03/VJ-4_18_N-udvaksn-s150-153.pdf
- Christensen, E.K., 2019. Drænledninger lægges tættere og dybere end tidligere. *Effektivt Landbrug* 23. marts 2019. <https://effektivtlandbrug.landbrugnet.dk/artikler/tema/draening/draenledninger-laegges-taettere-og-dybere-end-tidligere.aspx>
- Christensen, J., 2011. Vinterhveden når dybere end vi regner med. *Maskinbladet, Markbrug*, 18. marts 2011.
- Diekkrüger, B., Söndgerath, D., Kersebaum, K., McVoy, C., 1995. Validity of agroecosystem models a comparison of results of different models applied to the same data set. *Ecol. Model.* 81 (1–3), 3–29.
- Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B. og Jacobsen, B. (2020): Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vand. DCA rapport nr. 174.
- Greve, M. H., 2015. Notat vedr. nyt JB-kort. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. Kan tilgås her: https://pure.au.dk/ws/files/87283129/F_lgebrev_og_Besvarelse_No-tat_vedr._nyt_JB_kort_28012015.pdf

- Gyldengren, J.G., et al., 2020. Effects of winter wheat N status on assimilate and N partitioning in the mechanistic agroecosystem model DAISY. *J. Agron. Crop Sci.* 1–22
- Hansen, E.M., 1991. Sammenligning af keramiske sugekopper og lysimetre med hensyn til udtagning af jordvæske til bestemmelse af NO₃-N-koncentration. *Tidsskrift for Planteavl* 95, 51-63, Statens Plan-teavls-forsøg.
- Hansen, E.M., Djurhuus, J., 1997. Nitrate leaching as influenced by soil tillage and catch crop. *Soil & Tillage Research* 41, 203-219.
- Hansen, E.M., Munkholm, L.J., Olesen, J.E., Melander, B., (2015). Nitrate leaching, yields and carbon sequestration after noninversion tillage, catch crops, and straw retention. *Journal of Environmental Quality* 44, 868-881.
- Hansen, E.M., Vogeler, I., Thomsen, I.K., 2021. Fagligt bidrag til besvarelse af spørgsmål nr. 49 og 57 fra Miljø- og Fødevarerudvalget om efterafgrøder. 13 sider. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet – til Landbrugsstyrelsen 18. november 2021. https://pure.au.dk/portal/files/226542304/Fagligt_bidrag_til_besvarelse_af_MOF_49_og_57_dato1811_2021.pdf
- Hansen, S., Abrahamsen, P., Petersen, C.T., Styczen, M., 2012. Daisy: model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE* 55, 1317–1333.
- Hansen, S., Jensen, H., Nielsen, N., Svendsen, H., 1991. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the danish simulation model DAISY. *Fertil. Res.* 27, 245–259.
- Kollas, C., et al., 2015. Crop rotation modelling—a European model intercomparison. *Eur. J. Agron.* 70, 98–111.
- Kristensen, H. L. og Thorup-Kristensen, K. (2004). Root Growth and Nitrate Uptake of Three Different Catch Crops in Deep Soil Layers. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 68, 2. Page 529-537.
- Landbrugsinfo (2019): Effekt af pløjefri dyrkning på kvælstofudvaskningen. https://www.landbrugsinfo.dk/basis/d/b/1/godskning_plojefri_dyrkning_kvaelstofudvaskning
- Laub, M., et al., 2021. Modeling temperature sensitivity of soil organic matter decomposition: splitting the pools. *Soil Biol. Biochem.* 153, 108108.
- Macholdt, J., Gyldengren, J.G., Diamantopoulos, E., Styczen, M., 2020. How will future climate depending agronomic management impact the yield risk of wheat cropping systems? A regional case study of eastern Denmark. *J. Agric. Sci.* 158, 660–675.
- Manevski, K., et al., 2016. Integrated modelling of crop production and nitrate leaching with the daisy model. *MethodsX* 3, 350–363
- Montcalm, A. og Vestergaard, A.V. (2021): Signifikant reduktion i total-kvælstof i jord ved conservation agriculture (CA). https://www.landbrugsinfo.dk/-/media/landbrugsinfo/public/b/0/8/rapport_reduktion_totalkvalstof_conservation_agroculture.pdf

Olesen, J.E., 1989. Jordbrugsmeteorologisk årsoversigt 1988. Beretning nr. S 2002-1989. Tidsskrift for Planteavl's Specialserie. Statens Planteavl'sforsøg. https://dcapub.au.dk/pub/S_beretning_2002_1989.pdf

Olesen, J.E., Heidmann, T., 1990. EVACROP. Et program til beregning af aktuel fordampning og afstrømning fra rodzonen. Version 1.01. Arbejdsnotat nr. 9, Afdeling for Plantevækst og Jord, Forskningscenter Foulum, 65 pp.

Ozturk, I., Sharif, B., Baby, S., Jabloun, M., Olesen, J.E., 2018. Long-term simulation of temporal change of soil organic carbon in Denmark: comparison of three model performances under climate change. *J. Agric. Sci.* 156, 139–150

Palosuo, T., et al., 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: a comparison of eight crop growth models. *Eur. J. Agron.* 35, 103–114.

Smith, P., et al., 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* 81, 153–225.

Petersen, C., Hansen, E., Haugaard-Nielsen, H., 2015. Effekter af halmkoks på fysiske egenskaber i grov-sandet jord. *Plantekongres 2015. Sammendrag af indlæg side 31-33.*

https://rucforsk.ruc.dk/ws/portalfiles/portal/55620180/Petersen_pl_plk_2015_kongresbilag_web.pdf

Petersen, C. T., & Abrahamsen, P. (2021). Predicting effects of soil compaction on crop yield and nitrogen dynamics. Report, University of Copenhagen, Department of Plant and Environmental Sciences, 45pp. <https://daisy.ku.dk/about-daisy/projects/commit/>

Petersen, J.R., Blicher-Mathiesen, G., Rolighed, J., Andersen, H.E. & Kronvang, B. 2021. Three decades of regulation of agricultural nitrogen losses: Experiences from the Danish Agricultural Monitoring Program. *Science of Total Environment* 787:147619. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721026905>

Rashid M.A., Bruun S., Styczen M.E., Borgen S.K., Thomsen I.K., Ørum J.E., Jensen L.S. (2022a) Scenario analysis using the Daisy model to assess and mitigate nitrate leaching from complex agro-environmental settings in Denmark. *Sci Total Environ*, 816, 151518 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151518>

Rashid M.A., Bruun S., Styczen M.E., Borgen S.K., Hviid S.K, Jensen L.S. (2022b) Adequacy of nitrogen-based indicators for assessment of cropping system performance: A modelling study of Danish scenarios. *Sci Total Environ*, 842 156942 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156927>

Rasmussen I. S., Thorup-Kristensen. 2016. Does earlier sowing of winter wheat improve root growth and N uptake? *Field Crops Research*. Vol. 196. Side 10-21.

Richmond, T. de A., Mueller-Dombois, M., 1972. Coastline Ecosystems on Oahu, Hawaii. *Vegetatio* 25, 367-400.

Thorup-Kristensen, K., Cortasa, M.S., Loges, R., 2009. Winter wheat roots grow twice as deep as spring wheat roots, is this important for N uptake and N leaching losses? *Plant and Soil* 322, 101-114.

Thorup-Kristensen, K., 2001. Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate-N content, and how can this be measured? *Plant and soil*. Vol. 230. Side 185-195.

Simmelsgaard S. E. 1998. The effect of crop, N-level, soil type and drainage on nitrate leaching from Danish soil. *Soil Use and Management*. Vol. 14. Side 30-36.

Styczen, M. E., & Abrahamsen, P. (2017). Årsager til faldende proteinindhold i kerne fra ca. 1990 til 2015: Modelanalyse og resultater (p. 128). Rapport, Københavns Universitet, Institut for Plante- og Møljøviden-skab. <https://daisy.ku.dk/publications/>

Styczen, M. E., Abrahamsen, P., Hansen, S., & Knudsen, L. (2020a). Analysis of the significant drop in protein content in Danish grain crops from 1990-2015 based on N-response in fertilizer trials. *European Journal of Agronomy*, 115, 126013. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126013>

Styczen, M. E., Abrahamsen, P., Hansen, S., & Knudsen, L. (2020b). Model analysis of the significant drop in protein content in Danish grain crops from 1990-2015. *European Journal of Agronomy*, 118, 126068. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126068>

Vogeler, I., Jensen, J.L., Thomsen, I.K., Labouriau, R., Hansen, E.M., 2021. Fertiliser N rates interact with sowing time and catch crops in cereals and affect yield and nitrate leaching. *European Journal of Agronomy* 124, 126244.

Walter, H., 1957. Wie kann man den Klimatypus anschaulich darstellen? *Die Umschau in Wissenschaft und Technik*, 24, 751-753.

Yin, X., et al., 2020. Uncertainties in simulating N uptake, net N mineralization, soil mineral N and N leaching in European crop rotations using process-based models. *Field Crop Res.* 107863

Bilag 1. Nitratkoncentrationer i 1 og 2 meters dybde

Alle figurerne i bilaget viser nitratkoncentrationer målt i 1 og 2 meters dybde i sædskifterforsøget på Lolland målt i forskellige afgrøder, år og N-niveauer.

