

Vidensyntese om kvælstofudvaskning fra vintersæd kontra efterafgrøder

Forfattere: Julie Therese Christensen^a, Leif Knudsen^a, Elly Møller Hansen^b, Gitte Blicher-Mathiesen^c, Lars Stoumann Jensen^d, Per Abrahamsen^d, Maddie V. Schwartzkopff^d, Nadja Fuglkjær Bloch^a, Jorge F. Miranda-Vélez^b

^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

Vidensyntese om kvælstofudvaskning fra vintersæd kontra	1
1 Indledning	3
2 Baggrund	4
2.1 Betydning af jordtype og roddybde	4
2.2 Strømningsveje	6
3 Resultater	9
3.2 Nitratkoncentration og -udvaskning i 1 meter og 2 meters dybde i CENTS-langtidsforsøget	19
3.3 Effekt af halm og jordbearbejdning under vinterhvede i CENTS-langtidsforsøget	24
3.4 Nitratkoncentration under vintersæd kontra bar jord i 2 meters dybde.....	26
3.5 Estimering af N-udvaskningspotentialet via N-min	34
3.6 N-min-målinger under 1 meters dybde i vintersæd- og vårsædsbaserede sædskifter.....	36
3.7 LOOP: Målte nitratkoncentrationer og udvaskning fra marker med korn efterfulgt af vinterkorn eller efterafgrøder	42
Månedsværdier for aktuel afstrømning, nitratudvaskning og afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer samt nitratudvaskning og -dræntransport ved middel perkolation og drænastrømning	46
3.9 Er kvælstofudvaskningen fra vintersæd større end fra efterafgrøder efterfulgt af vårsæd?	51
4 Opsummering	66
5 Samlet konklusion.....	70
6 Behov for yderligere undersøgelser	71
7 Referencer	72
Bilag 1. Hvilken betydning har ændringer i jordens indhold af organisk stof SOM på den simulerede N-udvaskning?.....	78

1 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 vinterkorn 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 højt, kan det medføre ændringer i sædskiftet, da det ikke er muligt at have vintersæd på marker med efterafgrøder. Det økonomiske dækningsbidrag af vintersæd er imidlertid 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 eller er lige så gode til at reducere udvaskningen end et vintersædbaseret 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 meter 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 vårsæd begynder at have en betydelig kvælstofoptagelse. Det bør undersøges, om dette eventuelt kan give anledning til en større udvaskning i forårsperioden end 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 eventuelt 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 rod dybde, og jordens dræning har betydning for, om kvælstof udvaskes gennem dræn, inden afgrøderne har udviklet rødder i tilstrækkelig dybde til at optage det. Udvasningen gennem dræn stammer både fra vand og kvælstof som kommer oppe og nede fra (Møllerup, 2014). Derfor har kvælstofdynamikken under drændybde også betydning for udvaskningen.

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. En vidensyntese blev udarbejdet i første år af projektet ud fra det daværende vidensgrundlag. Nærværende vidensyntese er en opdatering af den oprindelige syntese, hvor den viden, der er fremskaffet i projektet samt anden ny viden, indgår i den opdaterede vidensyntese.

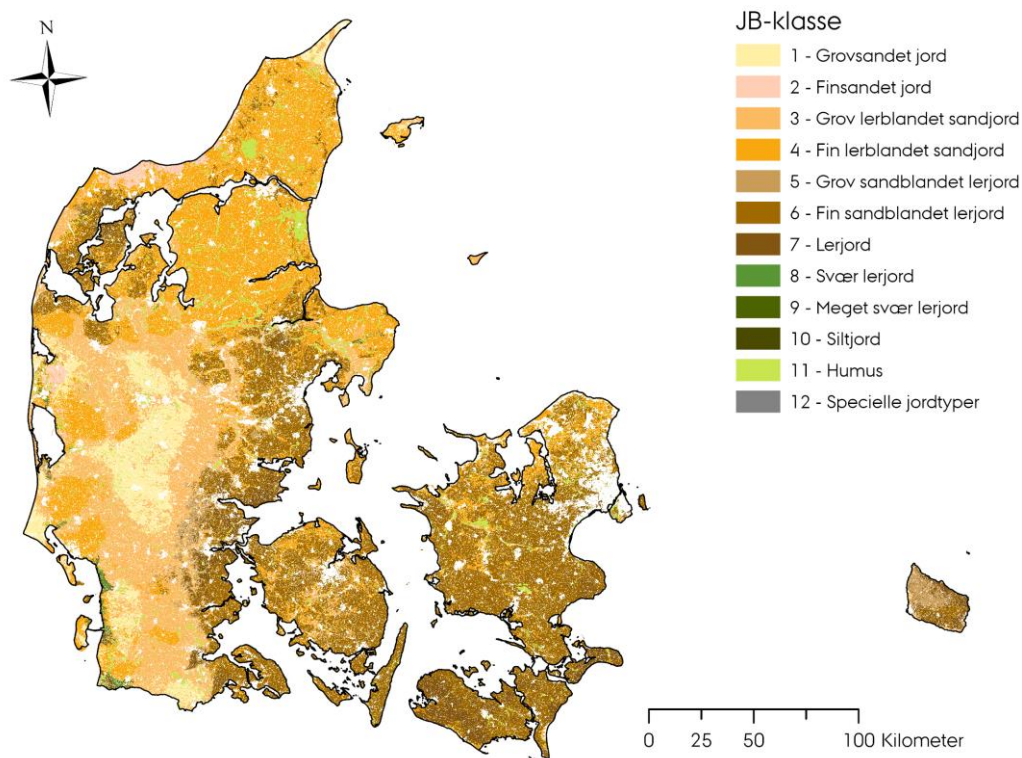
For hvert afsnit er der angivet forfatter. Indledning, opsummering og konklusion er fælles. I 2024 er vidensyntesen blevet opdateret med nye data og afsnit. Derudover er opsummering og konklusion opdateret til at inkludere nyeste viden.

2 Baggrund

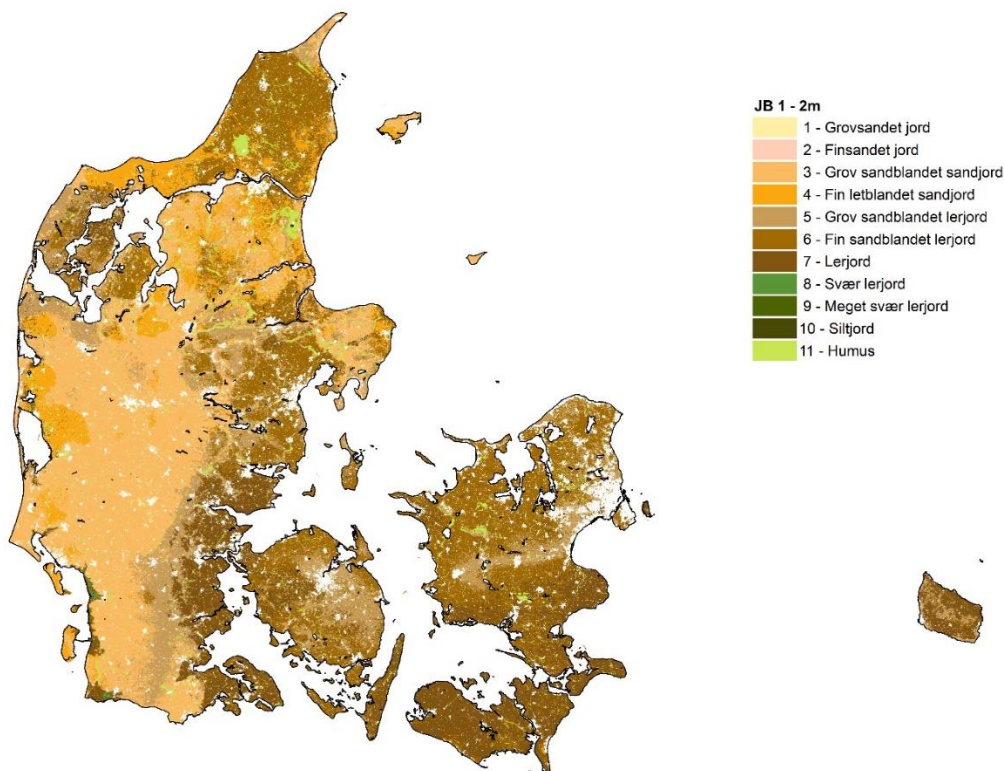
2.1 Betydning af jordtype og roddybde

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 end 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 Figur 2.1a 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 2.1b viser den prædikterede jordtype i 1-2 meters dybde, hvor det ses, at underjorden er dominerende leret i Østdanmark og dominerende leret og dominerende grovsandet i Vestdanmark.



Figur 2.1a. Prædikteret jordtype (JB nr.) i 0-30 cm dybde. (Kilde: Møller, A. B., 2024).



Figur 2.1b. Prædikeret jordtype (JB nr.) i 1-2 m dybde. (Kilde: Møller, A. B. 2024).

Udvaskningen er påvirket af afstrømningen fra rodzonen, der hovedsagelig er bestemt af jordtypen og vinternefbøren. 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. Det er sandsynligt, at nedbørs- og afstrømningsmønstre i fremtiden vil ændre sig på grund af klimaforandringer.

For at afgrøder kan forhindre 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, vinternefbør, art, såtidspunkt, jordens penetrationsmodstand, plantetilgængeligt vand 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 rodvæksten (Andersen, 1986; Andersen, 1985), og jordtypen kan ikke alene bruges som indikator for rodudviklingen. Rodvæksten kan også hæmmes af penetrationsmodstand, hvor 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 på lerjord 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 på lerjord 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 et al. (2009) demonstrerer ligeledes på lerjord, at der er forskellig tidlig udvikling i roddybder, hvor efterafgrøder opnår en større roddybde end vintersæden i efteråret. Derimod opnår vintersæden en større roddybde i foråret end den vårsæd, som efterfølger efterafgrøden.

2.2 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 fra 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 % omkring 1 meters dybde.

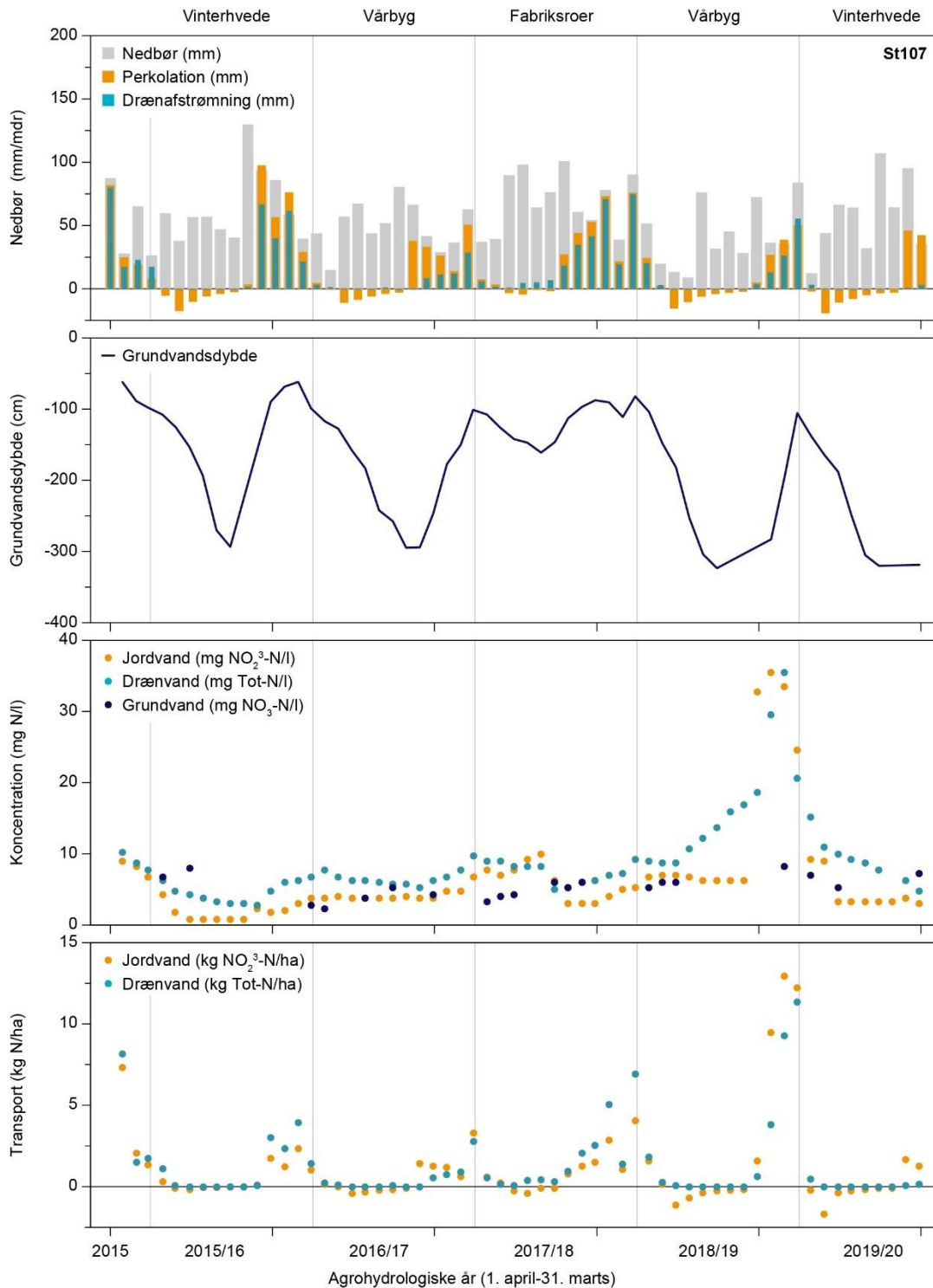
Netop drænet lerjord er i fokus i denne vidensyntese, herunder om efterafgrøder nedbringer udvaskning ift. dyrkning af vinterkorn. Drænede jorde er i fokus, fordi myndighedernes krav om dyrkning af efterafgrøder især skal nedbringe udledningen af kvælstof til kystvande. På drænede jorde vil effekten af at dyrke efterafgrøder forventeligt 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 fra disse afgrødekombinationer 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.

I Figur 2.2a vises nedbør, perkolation og drænafstrømning, målt grundvandsstand, målte nitratkoncentrationer i jord- og grundvand samt totalt kvælstof for drænvand samt nitratudvaskning og transport af totalt kvælstof i drænvand opgjort pr. måned for st107 for de agrohydrologiske år 2015/16-2019/20. Sugecellerne ligger i LOOP 1 på Lolland. Af figuren ses, at perkolation for jordvand starter i efteråret før drænvandsafstrømning, og når grundvandsstanden når op omkring drændybde på ca. 1 m under terræn, vil drænene begynde at afstrømme. Den målte nitratkoncentration i jordvand og totalt kvælstof i drænvand følger samme dynamik og niveau. Når drænene afstrømmer, ligger de målte måneds nitratudvaskning for jordvand tæt på kvælstoftransporten, dog lidt større forskel mellem drænvand og jordvand i måneder med høj transport.

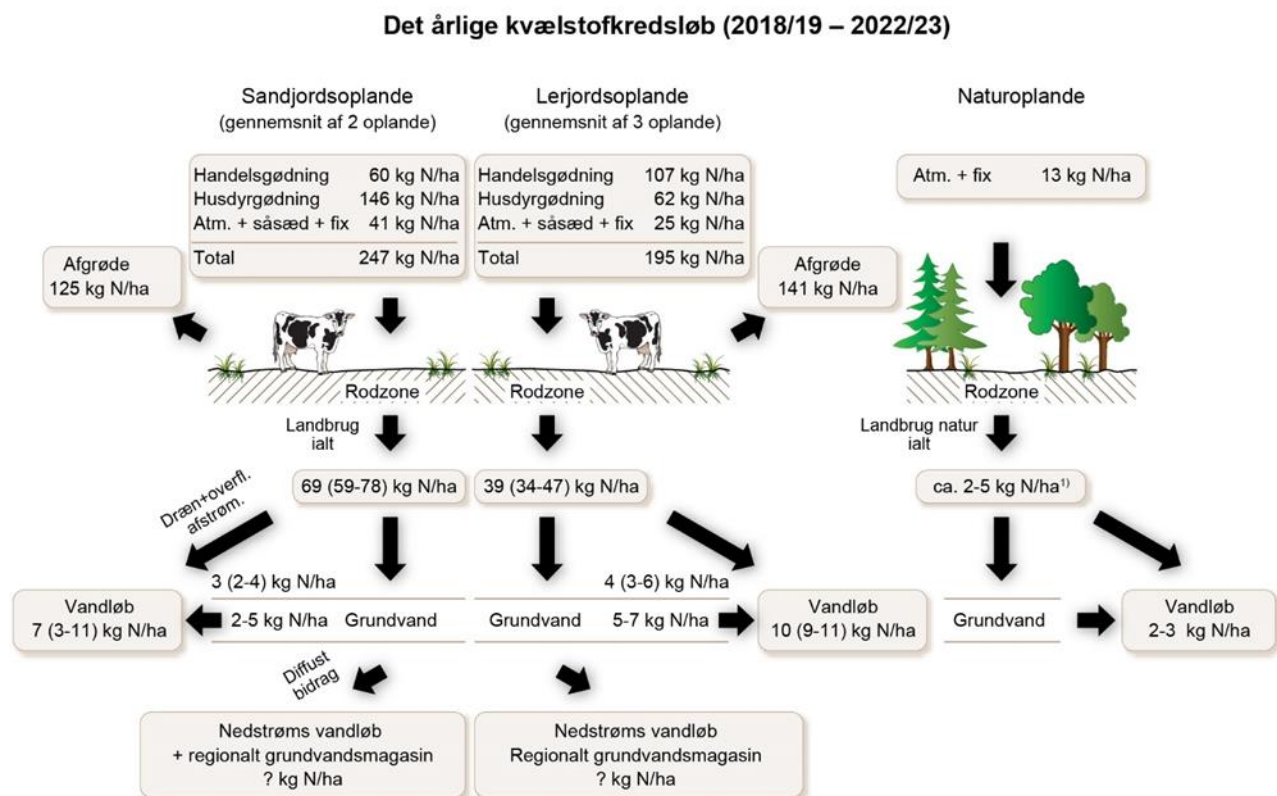
For st.107 afstrømmer mellem 65 % og 178 % af nitratudvaskning fra rodzonen som totalt kvælstof til dræn og opgjort for agrohydrologiske år for perioden 2015/16-2018/20 (Thorsen og Blicher-Mathiesen, 2023). Som median afstrømmer 79 % af nitratudvaskningen som totalt kvælstof til drænene for st.107, opgjort for perioden 1993/94-2020/21. Der er stor variation imellem drænsystemer, hvor meget vand og kvælstof der afstrømmer via dræn. For otte marker med målinger i sugeceller og dræn varierer andelen af nitrat, der strømmer som totalt kvælstof i drænene, mellem 16 % og 84 %. Andel af nedbør, der afstrømmer via dræn, er empirisk modelleret på målte afstrømningsdata for 38 drænstationer med i alt 345 årsværdier for drænafstrømning (agrohydrologiske år, 1. april til 31. marts) (Frederiksen et al., 2023). Modellen viste, at drænene starter med at afstrømme, når nedbørsmængden er nået en tærskel på 543 mm, og herefter afstrømmer gennemsnitligt 48 % af nedbøren gennem drænene, opnået med R^2 på 0,57 og $P < 0,0001$.

Nitratkvælstof kan således godt passere drændybden uden at blive udvasket. Det kan senere udvaskes, når grundvandsspejlet stiger, hvis det ikke optages af dybe rødder, denitrificeres eller er nedvasket til det dybere grundvand.



Figur 2.2a. Nedbør, perkolations og drænastrømning (øverst), dernæst målt grundvandsstand (næst øverst), målte nitrat koncentrationer i jord- og drænavand samt totalt kvælstof i drænavand nitratudvaskning for jordvand og total kvælstoftransport for drænavand alle data er opgjort pr. måned for st107 og vist for agrohydrologiske år, 1. april til 31. marts og vist med lodrette streger for 2015/16-2019/20. Koncentrationer i grundvandet er målt i ca. 2,5-3 m dybde. Afgrøde for høståret er vist øverst på figuren.

I seneste landovervågningsrapport er vist gennemsnittet af fem års data for elementerne i kvælstofmarkbalancen, den modelberegnete nitratudvaskning fra rodzonen, den overfladenære afstrømning via dræn til vandløb samt kvælstoftransporten i vandløb (Blicher-Mathiesen et al., 2024). Data dækker perioden 2018/19-2022/23 og er opgjort for to sandjords og tre lerjordsoplande. Den gennemsnitlige årlige modelberegnete (NLES5) kvælstofudvaskning fra rodzonen for de seneste fem år er ca. 39 kg N/ha på lerjorde og ca. 69 kg N/ha på sandjorde. På såvel ler- som sandjordene er udvaskningen mindre end nettotilførslen, idét der sker tab gennem ammoniakfordampning ved udbringning af husdyrgødning og denitrifikation. Udvasnkningen er væsentligt større fra sandjordene end fra lerjordene. Til trods herfor er den gennemsnitlige årlige nitrattransport i vandløbene på 10 kg N/ha for lerjordsoplandene højere end udledningen i de to sandjordsopland (hhv. ca. 3,1 og 11 kg N/ha for de to oplandstyper). Dermed er andelen af rodzoneudvaskningen af nitrat, der når frem til vandløbene væsentligt højere i lerjordsoplandene. Dette skyldes, at vandafstrømningen på lerjordene sker gennem de øvre jordlag og via dræn, mens vandafstrømningen på de to sandjordsoplande i landovervågningen i højere grad sker gennem de dybere jordlag, hvor der forekommer en betydelig kvælstofreduktion. Opgørelsen viser, at den overfladenære afstrømning via bl.a. dræn giver et forholdsvist stort kvælstofbidrag til vandløbstransporten på lerjordsoplandene og et mindre bidrag på de to sandjordsoplande.



Figur 2.2b. Schematisering af kvælstofkredsløbet i hhv. dyrkede lerjords- og sandjordsoplande samt for naturoplande for årene 2018/19-2022/23. Kvælstofbalancen er fra interviewundersøgelsen 2018-2022, mens udvaskningen er modelberegnet for alle marker i oplandene med N-LES5 med et gennemsnitsklima for perioden fra 1990/91 til 2009/10.

¹⁾Intervalleret for naturarealer, 2-5 kg N ha⁻¹, henviser til udvaskningen fra hhv. 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).

3 Resultater

3.1 Udvaskningsforsøget VIRKN ved Aarhus Universitet

Elly Møller Hansen, Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet

Nærværende afsnit er ændret i forhold til afsnittet "Udvaskningsforsøg ved Aarhus Universitet" publiceret i den tidligere version af videnssynthesen (Kristensen et al., 2022), så udvaskningsmålinger i CENTS i 1 og 2 meters dybde er opdateret i et selvstændigt afsnit "Nitratkoncentration og -udvaskning i 1 meter og 2 meters dybde i CENTS-langtidsforsøget ved Aarhus Universitet". Nedenstående afsnit omhandler udelukkende udvaskningsmålinger i 1 meters dybde og 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 meters dybde. Derved vil vinterhvede kunne reducere udvaskningen mere end antaget på basis af udvaskningsmålinger i 1 meters dybde. Det har derfor bl.a. betydning, hvor hurtigt der forekommer afstrømning og dermed udvaskning af nitrat til under vinterhvedens roddybde. For eksempel kan store mængder nedbør i efteråret medføre tidlig udvaskning af nitrat til en dybde, hvor vinterhveden ikke kan optage det. Samme problemstilling gælder for efterafgrøder, men forskelle i etableringshastighed, overvintring, kvælstofoptag, roddybde og pløjetidspunkt kan betyde, at kvælstofoptag og udvaskning påvirkes forskelligt for vintersæd og for efterafgrøder.

I nærværende afsnit søges problemstillingen belyst med resultater fra et markforsøg med udvaskningsmålinger i 1 meters dybde og ved diskussion af forhold, der kan have betydning ved vurdering af udvaskning fra større dybde. Markforsøget er udført under forskellige projektnavne. Det drejer sig om Stigende N-forsøget under det tidligere GUDP-projekt, VIRKN ("Intelligente virkemidler til reduktion af nitratudvaskningen"), som blev gennemført fra efteråret 2015 til foråret 2019. I forsøget indgik parceller med både vintersæd og vårsæd. Fra 2019 blev vintersædsparcellerne videreført i GUDP-projektet N-Tool-Precise ("Bedre kvælstofudnyttelse og indtjening med satellitbestemt kvælstofoptagelse i kvælstofmodellen N-Tool-Precise"), men fortsatte tillige med vårsædsparcellerne 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.

Materialer og metoder

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 vintersæd sået tidligt og til normal tid samt vårsæd efterfulgt af forskellige efterårsbevoksninger. Desuden indgik fire til seks niveauer af kvælstofgødskning (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. (2021a).

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 var 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 af 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. store nedbørsmængder på tidspunktet for tidlig såning. Alle år blev der på Flakkebjerg benyttet Latitude-bejdset udsæd af vinterhvede. I foråret 2020 udviste vinterhveden 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, så 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:

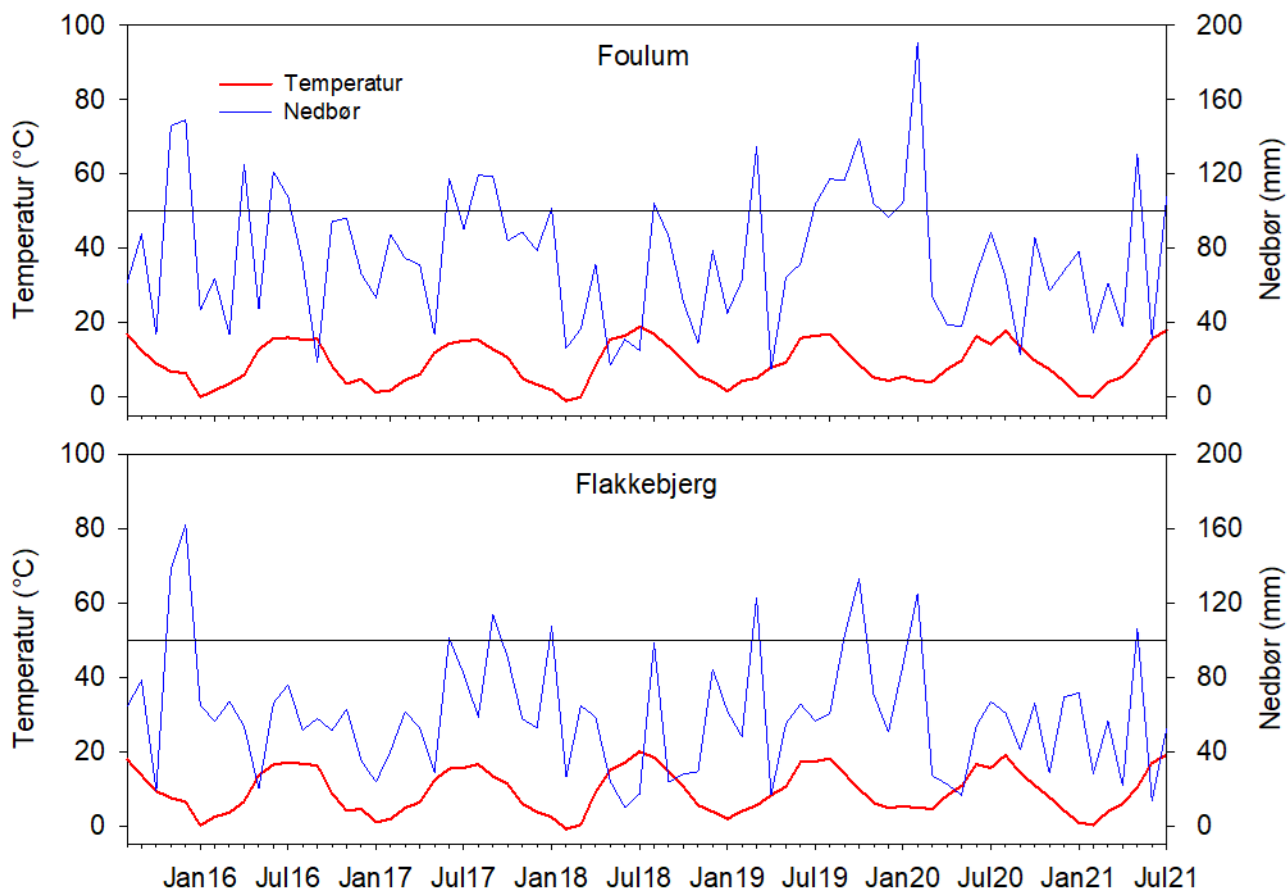
- Vårbyg med efterafgrøde t.o.m. 2019/20, derefter sort jord.
- Vårbyg med sort jord.
- Vårbyg med spildkorn og ukrudt t.o.m. 2019/20, derefter efterafgrøde.

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.

Vejrforhold

I Figur 3.1a er vist temperatur og nedbørsforhold ved Foulum og Flakkebjerg gennem forsøgsperioden. 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 nedbørsrig periode. Tørkeperioder optræder ifølge Richmond & Mueller-Dombois (1972), når nedbørskurven skærer temperaturkurven (empirisk bestemt).

Det fremgår af Figur 3.1a, at vejrforholdene varierede betydeligt fra år til år i forsøgsperioden og mellem de to lokaliteter. Generelt faldt megen nedbør i sensommeren 2017 og 2019, mens sensommeren 2018 var forholdsvist tør efter en ligeledes tør sommer.



Figur 3.1a. Månedlig middeltemperatur og summeret nedbør for Foulum og Flakkebjerg. Principperne for figuren er forklaret i teksten.

Bestemmelse af nitratudvaskning

I forsøgene blev koncentrationen af nitrat-kvælstof (nitrat-N, mg/l) bestemt efter udtagning af jordvand fra to sugeceller i hver parcel i 1 meters dybde. 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 meters dybde blev estimeret vha. en vandbalancemodel (Olesen & Heidmann, 1990). Jordvandet fra de to sugeceller i hver parcel blev som hovedregel blandet før nitrat-analyse. Udvasningen af nitrat-N (kg N/ha) fra 1 meters dybde er beregnet ved at kombinere koncentrationen af nitrat-N i jordvandet med afstrømningen.

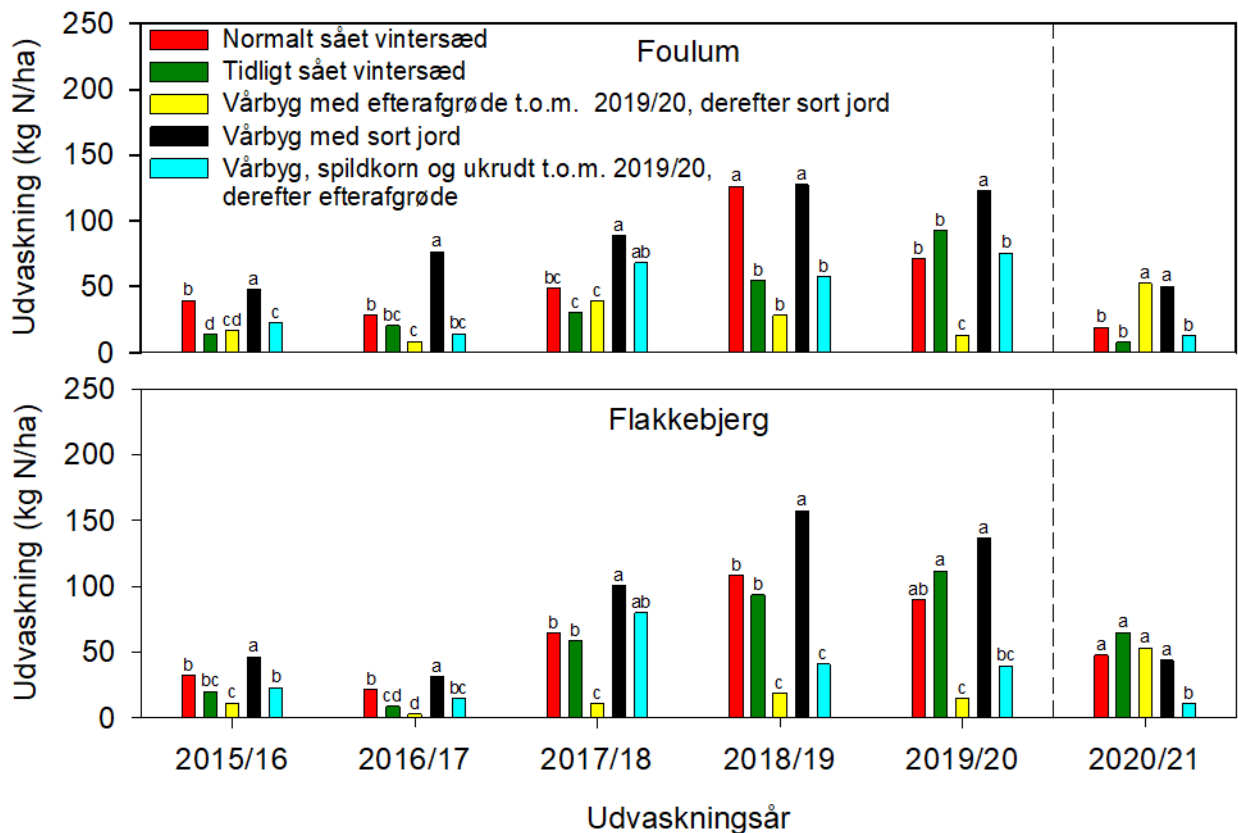
Resultater og diskussion

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. Udvasnkningen er i Figur 3.1b vist på årlig basis og i Figur 3.1c og 3.1d på månedsbasis.

Som det fremgår af Figur 3.1b, har der på begge lokaliteter været stor variation i den årlige udvaskning. Udvasnkningen 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 udvasnkning end parceller med sort jord (Figur 3.1b). Efter tørken i sommeren 2018 var der i 2018/19 særlig stor udvasnkning fra vårbyg med sort jord og normalt sået vintersæd på begge lokaliteter.

I 2015/16 og 2018/19 var der på Foulum signifikant mindre udvasnkning fra tidligt sået vinterrug end fra normalt sået vinterrug. På Flakkebjerg var forskellen mellem tidlig og normal såning af vinterhvede kun signifikant i 2016/17. I alle år til og med 2018/19 var der dog på begge lokaliteter tendens til mindre udvasnkning ved tidlig såning end ved normal såning. Såning af vinterhvede på Flakkebjerg blev i 2017/18 ikke gennemført som planlagt pga. ugunstige vejrforhold for tidlig såning. Såningen for begge forsøgsled blev derfor udført til normal tid.

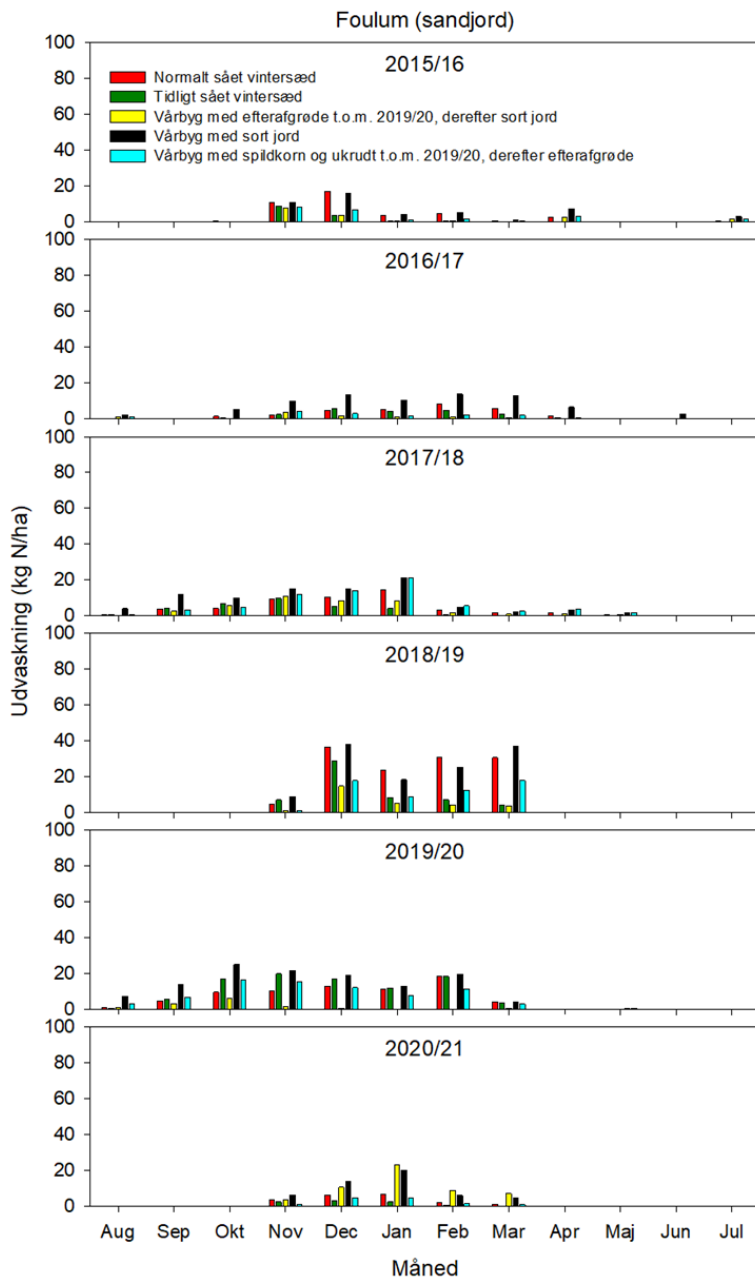
Udvasnkningen fra efterafgrøden var på begge lokaliteter generelt lavere end fra normalt sået vintersæd, men forskellen var ikke signifikant i alle tilfælde. Udvasnkningen for tidligt sået vinterrug på Foulum var oftest ikke signifikant forskellig fra udvasnkningen fra vårbyg med efterafgrøde. På Flakkebjerg var udvasnkning fra parceller med efterafgrøde og tidligt sået vinterhvede ikke signifikant forskellig de to første år, men fra og med 2017/18 var udvasnkningen fra parceller med efterafgrøde signifikant mindre end for tidligt sået vintersæd (Figur 3.1b).



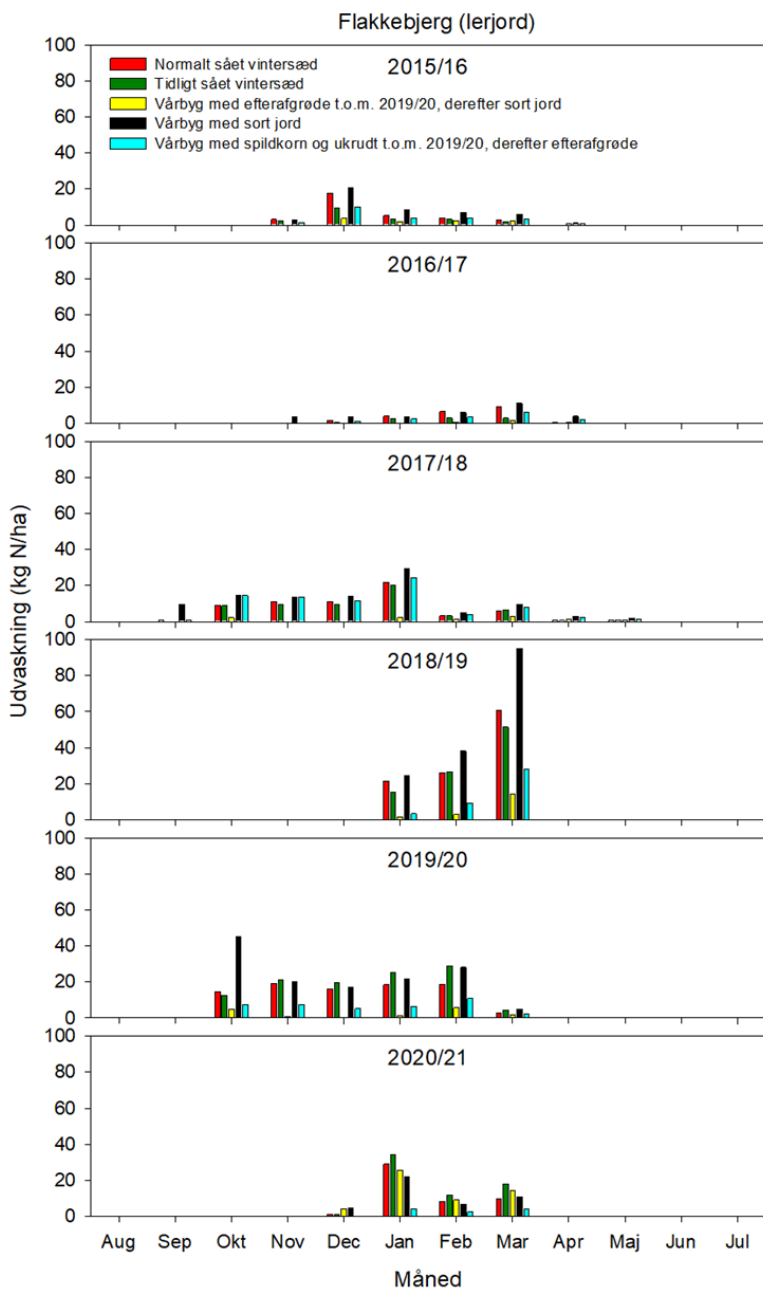
Figur 3.1b. Total årlige udvaskning (1. august til 31. juli) fra VIRKN, N-Tool-Precise, LessN (1N), 2015 til 2021 på Foulum og Flakkebjerg. For hver lokalitet og hvert udvaskningsår er værdierne adskilt vha. Duncans metode, så to værdier med forskellige bogstaver er signifikant forskellige. Bemærk, at efterårsbevoksningen i forsøgsled med vårbyg blev ændret i efteråret 2020 (markeret med stiplede linje). Se endvidere bemærkninger til forsøgsbehandlingerne i teksten.

Som det fremgår af Figur 3.1c og 3.1d, 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 3.1a), 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 3.1d).

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 3.1c. Månedlig kvælstofudvaskning fra forsøg (som i Figur 3.1b) ved gødskning 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 3.1d. Månedlig kvælstofudvaskning fra forsøg (som i Figur 3.1b) 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.

Udvaskning ved dyrkning af efterafgrøde fra 2015/16 til 2018/19 varierede ved Foulum fra 10-38 kg N/ha og ved Flakkebjerg fra 3-21 kg N/ha (Tabel 3.1a). For normalt sået vintersæd på både Foulum og Flakkebjerg varierede udvaskningen betydeligt mere, dvs. fra 29-65 kg N/ha for normalt sået vinterrug på Foulum og fra 22-110 kg N/ha for normalt sået vinterhvede på Flakkebjerg. Den største udvaskning blev målt i vintersæd efter den meget tørre vækstsæson i 2018 (Figur 3.1a). Det viser, at under vækstbetingelserne i 2018 har vintersæden haft betydelig mindre kapacitet til at reducere udvaskningen i sammenligning med efterafgrøder. I gennemsnit af alle fire udvaskningssæsoner ved Foulum og Flakkebjerg var udvaskningen ved dyrkning af efterafgrøde hhv. 231 og 11 kg N/ha, mens udvaskningen i samme periode i gennemsnit var hhv. 45 og 57

kg N/ha fra normalt sået vintersæd. Som gennemsnit af alle år var merudvaskningen ved dyrkning af normalt sået vintersæd ved Foulum og Flakkebjerg hhv. 22 og 46 kg N/ha i forhold til dyrkning af efterafgrøde (Tabel 3.1a).

Tabel 3.1a. Årlig udvaskning fra vårbyg med efterafgrøde og fra normalt sået vintersæd samt merudvaskning fra vintersæd i forhold til byg med efterafgrøde. Begge afgrøder var gødet ved kvælstofnormen (1N).

	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	Gns.
Foulum, nitratudvaskning (kg N/ha)					
Efterafgrøde	15	10	38	30	23
Vintersæd	39	29	47	65	45
Merudvaskning	24	19	9	35	22
Flakkebjerg, nitratudvaskning (kg N/ha)					
Efterafgrøde	11	3	9	21	11
Vintersæd	32	22	63	110	57
Merudvaskning	21	19	54	89	46

De månedlige udvaskningsopgørelser ved Foulum og Flakkebjerg (Figur 3.1c og 3.1d) viser generelt, at der har været størst udvaskning i efterårs- og vintermånederne (september til februar) og kun begrænset udvaskning i forårsmånederne marts, april og maj. I 2018/19 var der dog på begge lokaliteter forholdsvis stor udvaskning i marts. Ved Foulum har der i enkelte tilfælde fundet en lille udvaskning sted i sommermånederne juni og juli. Modelanalyser har vist, at nogle vandområder er særligt følsomme over for sommerudledning af kvælstof, f.eks. Erichsen et al. (2021), hvor det dog pointeres, at følsomhed over for sommerudledning af kvælstof ikke er ensbetydende med, at udledning i andre perioder af året ikke har betydning. Desuden viser førnævnte modelanalyse af Erichsen et al. (2021), at det blot er enkeltstående vandområder, dvs. 18 ud af 109 vandområder, hvor kvælstofudledning i sommermånederne (her angivet som maj til september) potentielt kan have stor betydning.

De månedlige udvaskningsopgørelser ved både Foulum og Flakkebjerg (Figur 3.1c og 3.1d) viser for efterårsmånederne 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 og 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 hhv. 87 og 189 kg N/ha i overjordisk biomasse (Vogeler et al., 2021a). Til sammenligning optog normalt sået vinterhvede ved 1N og 1,5N hhv. 10 og 13 kg N/ha, mens tidligt sået vinterhvede optog hhv. 18 og 25 kg N/ha (Vogeler et al., 2021a). Hvorvidt vinterhveden i løbet af foråret 2019 skulle have været i stand til at optage væsentlige

mængder kvælstof fra under 1 meters 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 meters dybde. Det er desuden uvist, hvor meget kvælstof der evt. kan være blevet udvasket gennem dræn i løbet af efteråret eller vinteren og dermed gjort utilgængeligt for vinterhveden.

I VIRKN-forsøget på Foulum og Flakkebjerg er der udelukkende nedsat sugeceller i 1 m dybde, og sammenligning med nitratkoncentrationer i større dybde er derfor udelukket. Principielt skal der på lerjorden (JB6) på Flakkebjerg 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 meters 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 meters dybde, og det, der evt. måles i 2 meter. Et lysimeterforsøg gennemført på Jyndevad 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.

Christensen (2011) fremfører med henvisning til Thorup-Kristensen et al. (2009), at vinterhvede ikke når at udvikle sig tilstrækkeligt til at kunne 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 Årsløv 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 forbehold, 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 meters 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 roddebyden typisk ikke mere end 60-70 cm (Askegaard og 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 roddebyde og dermed må anses for at være utilgængelig.

Delkonklusioner

I VIRKN-forsøget med udvaskningsmåling i 1 meters dybde og mulighed for direkte sammenligning mellem vårbyg med efterafgrøde og enten vinterhvede (Flakkebjerg) eller vinterrug (Foulum) var udvaskningen fra efterafgrøder generelt signifikant lavere end fra normalt sået vintersæd, dog var forskellen ikke signifikant i 2017/18 ved Foulum. I gennemsnit af fire udvaskningssæsoner (fra 2015/16 til 2018/19) ved Foulum og Flakkebjerg var udvaskningen ved dyrkning af efterafgrøde hhv. 23 og 11 kg N/ha, mens udvaskningen i gennemsnit var hhv. 45 og 57 kg N/ha fra normalt sået vintersæd. Som gennemsnit af årene var merudvaskningen ved dyrkning af normalt sået vintersæd 22 og 46 kg N/ha i forhold til dyrkning af efterafgrøde ved hhv. Foulum og Flakkebjerg. Generelt var der størst udvaskning i efterårs- og vintermånederne og kun begrænset udvaskning i forårmånederne marts, april og maj. Ved Foulum var der i enkelte tilfælde en lille udvaskning i sommermånederne juni og juli.

3.2 Nitratkoncentration og -udvaskning i 1 meter og 2 meters dybde i CENTS-langtidsforsøget

Jorge F. Miranda-Vélez og Elly Møller Hansen, Aarhus Universitet Institut for Agroøkologi

Beskrivelse af CENTS-langtidsforsøget

Nedenstående beskrivelse er et uddrag fra afsnittet "Udvaskningsforsøg ved Aarhus Universitet" (Hansen, 2022) i den tidligere version af videnssynthesen (Kristensen et al., 2022). Markforsøget CENTS blev i 2002 etableret på Foulum (fin lerblandet sandjord, JB4, ikke drænet) og Flakkebjerg (fin sandblandet lerjord, JB6, ikke drænet) (Hansen et al., 2015). Siden 2016 består forsøgsdesignet på Foulumgård af fire sædskifter (R2-R5), tre forskellige intensiteter af jordbearbejdning (pløjet, harvning og direkte såning) og tre forskellige efterårsbevoksninger (efterafgrøde, spildkorn og ukrudt samt jord holdt sort vha. herbicidbehandling). I R5 blev der fra 2003 til 2006 hvert år dyrket vårbyg med udlæg af græs som efterafgrøde, ærter, vinterhvede samt vinterhvede med græsudlæg som efterafgrøde. I samme sædskifte blev der fra 2007 til 2015 hvert år dyrket vårbyg med olieræddike som efterafgrøde udsprede før høst. Afgrøderne dyrket i R5 siden 2016 er vist i Tabel 3.2a. Halmen blev snittet og efterladt i parcellerne. Som standardbehandling er der hvert år dyrket olieræddike (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*) som efterafgrøde, når jorden ikke er bevoset med en vinterafgrøde.

Tabel 3.2a. Oversigt over afgrødefølgen i R5 fra 2016. Afgrødefølgen før 2016 er beskrevet i teksten. Efter afgrøden er olieræddike udsprede kort før eller efter høst.

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
2023	Vårbyg	Efterafgrøde/spildkorn og ukrudt/sort jord

Siden januar 2019 har der i R5 været udtaget jordvand fra sugeceller nedsat i 1 og 2 meters dybde til måling af nitratkoncentrationen i jordvand. Formålet var at undersøge, om vintersæd har et kvælstofoptag under 1 meters dybde, som er den dybde, hvor der normalt er installeret sugeceller til bestemmelse af N-udvaskning. De parceller, der fik installeret sugeceller i to dybder, omfatter forskellige jordbearbejdningsintensiteter samt forskellige efterårsbevoksninger (olieræddike som efterafgrøde, ukrudt og spildkorn samt sort jord).

Analyse af nitratudvaskning i dybe sugellemålinger

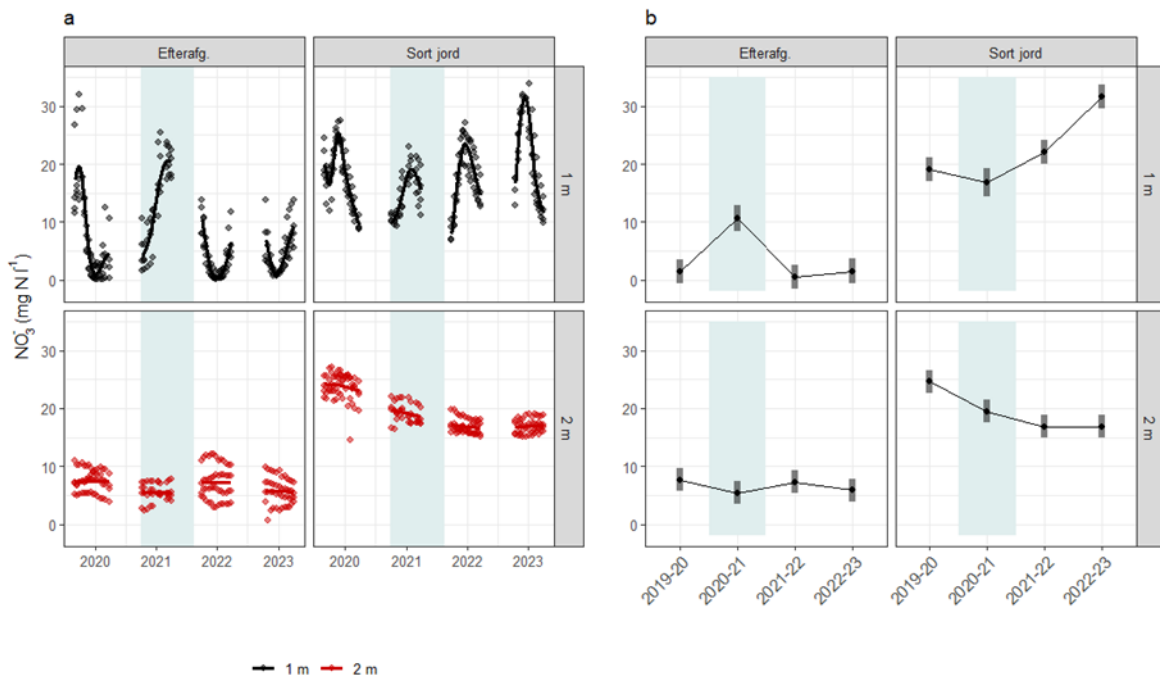
I denne analyse blev nitratkoncentrationer og udvaskning undersøgt i 1 og 2 meters dybde i perioden 2019-2023, hvor der fra efteråret 2020 til sommeren 2021 var vinterhvede. Der fokuseres på pløjede parceller samt efterafgrøder eller sort jord om efteråret. Formålet med dette er at forenkle analysen og holde fokus på dybe rødders effekt på nitrat. Sammenligningen mellem parceller med efterafgrøder og sort jord i to dybder forventes at kunne belyse effekten af dybe rødder fra vinterhvede og efterafgrøder på nitratudvaskningen.

Den målte nitratkoncentration i jordvandet følger forskellige mønstre i 1 meter og 2 meters dybde (Figur 3.2a). I 1 meters dybde er der hvert år tydelige nitratoppe under sort jord med klare stigninger om efteråret og vinteren og fald, der tyder på lave koncentrationer i sommerperioderne, selvom der ikke blev taget jordvandsprøver i sommermånederne på grund af lav jordfugtighed. Effekten af efterafgrøder er ligeledes tydelig i 1 m dybde, når man sammenligner med sort jord, idét nitratkoncentrationerne under efterafgrøderne falder til næsten nul om vinteren og stiger igen om foråret. I vinteren 2020-2021 med vinterhvede stiger nitratkoncentrationerne om efteråret og vinteren, ligesom under sort jord. Da alle behandlinger i sædskiftet blev tilsået med vinterhvede, er det ikke muligt at analysere yderligere, om stigningen i denne periode udelukkende skyldes en mindre effektiv N-optag af vinterhveden sammenlignet med olieræddike, eller om der har været andre påvirkninger (f.eks. nedbørsmængde eller -fordeling, temperatur, forfrugt osv.).

Nitratkoncentrationer i 2 meters dybde følger et anderledes mønster, hvor der er meget lidt variation i løbet af sæsonen, og nitratkoncentrationerne forbliver næsten konstante mellem årene, med et lille fald fra 2020 til 2022 under sort jord (Figur 3.2a).

Overordnet set viser den statistiske analyse ved hjælp af generaliserede additive modeller (GAMs) (Pedersen et al., 2019) ikke en signifikant forskel i jordens nitratkoncentrationer mellem 1 meter og 2 meters dybde, i gennemsnit på tværs af år og efterafgrøder/sort jord ($t = 0,07$, $df = 680$, $p = 0,942$). Det vil sige, at der generelt set ikke blev fundet noget klart bevis for en konsekvent fjernelse af nitrat under nedvaskning fra 1 til 2 meters dybde.

Nitratkoncentrationerne under efterafgrøder (i gennemsnit over de to dybder og alle år) var signifikant lavere ($15,9 \pm 0,52$ mg N l⁻¹) end under sort jord ($t=-30,54$, $df=680$, $p=<0,001$). Figur 3.2 (b) viser de modellerede underliggende effekter af forskellige år, efterafgrøder/sort jord og dybde på nitrat i jorden, når man ser bort fra variationer igennem sæsonen. Denne analyse viser, at jordens nitratkoncentrationer i 1 meters dybde generelt var højere under sort jord end under efterafgrøder. Desuden var nitratkoncentrationen i 2020-21, hvor der blev sået vinterhvede, signifikant højere end alle år med efterafgrøder. Ligeledes var nitratkoncentrationer i 2 meters dybde signifikant højere under sort jord end under efterafgrøder, men der var ingen signifikant forskel i nitratkoncentrationer i 2020-2021 og andre år. Faktisk er de fleste år inden for hver efterårsbevoksning ikke signifikant forskellige fra hinanden i 2 meters dybde.

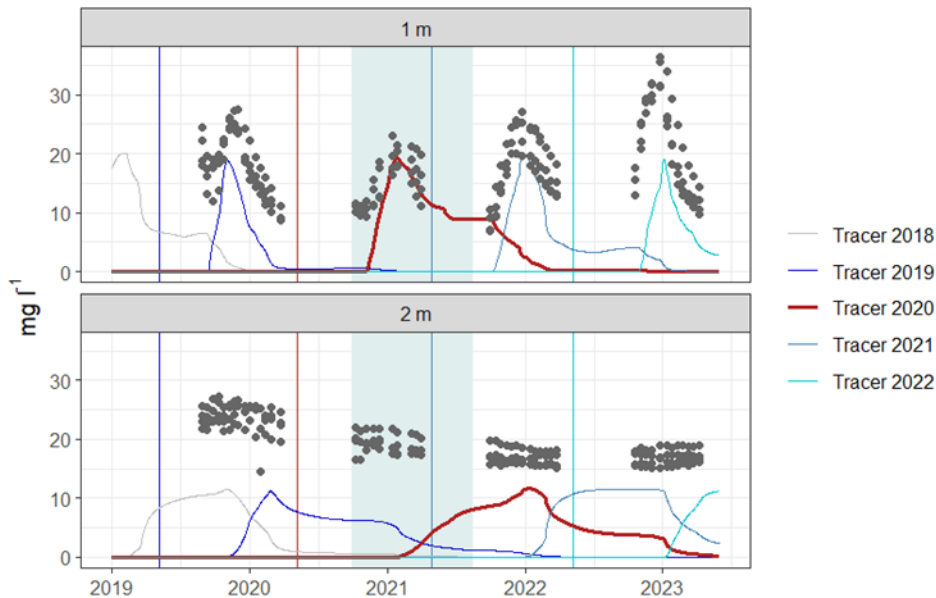


Figur 3.2a. Nitratkoncentrationer i jordvand fra sugeceller i 1 meter (øverst) og 2 meters dybde (nederst) i pløjede parceller med dels efterafgrøde og sort jord. Plot "a" viser målingerne (punkter) og en tilpasset linje for at fremhæve variationer i sæsonen (linjer). Plot "b" viser estimer af gennemsnitsnitratkoncentration samt 95 % konfidensintervaller for hver vintersæson, efterafgrøder/sort jord og 1 m/2 m dybde, hvor variationen inden for sæsonen er taget i betragtning. Det fremhævede område indikerer perioden med vinterhvide i parcellen.

Simuleringer af transport af opløste stoffer gennem Foulumgaard-jord udført ved hjælp af Daisy-modellen (Hansen et al., 2012) giver en mulig forklaring på de meget forskellige mønstre i nitrat, der er observeret i 1 meter og 2 meters dybde. Her fokuseres udelukkende på sort jord for at kunne vurdere stoftransport og potentielt kvælstofoptag i vinterhvide og ses bort fra kvælstofoptag og -mineralisering af efterafgrøder. Som det fremgår af Figur 3.2b, svarer de nitrat-toppe, der måles under sort jord hvert efterår og vinter i 1 meters dybde, meget godt til den simulerede udvaskning af en konservativ tracer (dvs. ingen kemiske omdannelser, ingen adsorption til jord og ingen optag af planterødder), der udbringes samtidig med gødskning om foråret. Men i 2 meters dybde har de simulerede tracere ikke blot været meget længere tid om at nå måledybden (næsten to år for traceren, der blev udbragt i foråret 2020), men de har også spredt sig meget og bevæger sig ikke længere som veldefinerede toppe. I 2 meters dybde visere simulerede tracere sig som lange uregelmæssige bølger, der overlapper hinanden. Denne lighed mellem nitratmålingerne og den simulerede transport af tracere i 2 meters dybde tyder derfor på, at nitrat, der ikke optages af afgrøder eller immobiliseres af mikroorganismer, i stor grad spredes på vej ned mellem 1 meter og 2 meters dybde. Det betyder, at nitrat fra forskellige år blandes, hvorved nitrat-toppene og dermed sæsonvariationen udviskes. Dette understøttes af resultater fra målinger af bromidtracere i sugeceller i 1 meter og 2 meters dybde udført under det danske varslingssystem for udvaskning af pesticider til grundvand (VAP) (Badawi et al., 2023) mellem 1999 og 2021. For jordtyper sammenlignelige med Foulumgaard (JB 5/6) fandt Badawi et al. (2023), at koncentrationen af bromidtracere, der blev tilført om foråret (april og maj) i forskellige år, toppede i 2 meters dybde mere end et år senere end i 1 meters dybde, og tracertoppen var blevet meget bredere.

Dette har den konsekvens, at årlige N-udvaskningsberegninger baseret på målinger i 2 meters dybde er næsten meningsløse, da prøverne sandsynligvis indeholder udvasket nitrat fra forskellige sæsoner og oftest

ikke et fuldstændigt gennembrud af nitrat fra et enkelt år. Derfor er det ikke muligt direkte at udlede effekten af vinterafgrøder (vinterhvede i dette tilfælde) på N-udvaskning i 2 meters dybde ved at sammenligne år med efterafgrøder efterfulgt af vårsæd med et års vinterafgrøde. Et alternativ kunne være at integrere nitrat-målinger over flere år for at forsøge at fange forskelle i langsigtede udvaskningstendenser, men det ville kræve samtidige forsøgsbehandlinger med og uden vinterafgrøder, som ikke er blevet foretaget i CENTS-eksperimentet og så vidt vides heller ikke andre steder.



Figur 3.2b. Nitratkoncentrationer (punkter) i 1 meter og 2 meters dybde og simulerede gennembrudskurver for konservative tracere beregnet af Daisy-modellen (farvede kurver). Lodrette streger indikerer tidspunktet, hvor den simulerede tracer blev tilført Daisy-modellen. Det fremhævede område indikerer perioden med vinterhvede i parcellen.

Et alternativ til at undersøge effekten af vinterafgrøder på N-udvaskning ud fra de tilgængelige data er at sammenligne den totale N-udvaskning fra målinger i 1 meter og 2 meters dybde. Ved hjælp af Daisy-simuleret stoftransport og vandafstrømning er det muligt at definere tidsperioder, hvor den samlede tracerudvaskning i 1 meter og 2 meters dybde er nogenlunde ens. Hvis der i de samme perioder er en væsentlig forskel i N-udvaskningen målt i CENTS-forsøget i de to dybder, vil det indikere, at der er sket et betydelig N-optag i vinterhvede under 1 meters dybde, forudsat at ingen af de efterfølgende forårssåede afgrøder er i stand til at optage betydelige mængder nitrat under 1 meters dybde. Derfor har vi defineret to perioder, hvor den simulerede udvaskning af tracere er 161,7 kg ha⁻¹ og 162,7 kg ha⁻¹ i hhv. 1 meter og 2 meters dybde (i simuleringer med Daisy blev der udbragt 50 kg ha⁻¹ tracer i foråret 2019, 2020 og 2021). Perioderne er 11-09-2019 til 22-12-2022 for 1 meters dybde og 31-12-2019 til 07-04-2023 for 2 meters dybde. I løbet af de samme perioder blev den samlede N-udvaskning beregnet ved hjælp af simuleret daglig afstrømning fra Daisy og afstrømningsvægtede daglige nitratkoncentrationer beregnet som beskrevet af Vogeler et al. (2020). Hvis man antager, at udvasket nitrat fra forårets kvælstofgødskning fulgte det samme transportmønster som de simulerede tracere, kan de valgte perioder antages at dække alle vinterens N-optagelseseffekter af vinterhvede. I gennemsnit over gentagelser i forsøget var den samlede N-udvaskning over de valgte tidsperioder 259 kg N ha⁻¹ i 1 meters dybde og 264 kg N ha⁻¹ i 2 meters dybde. Denne beregning viser en meget lille forskel i nitratudvaskning mellem de to dybder, og de to værdier vurderes derfor som nogenlunde ens.

De tilgængelige data fra CENTS-forsøget kan ikke støtte hypotesen om, at vinterhvede optager betydelige mængder nitrat i dybder under 1 meter om vinteren og frem til forår. Denne analyse er dog ikke tilstrækkelig til at konkludere med sikkerhed, at der ikke findes en betydelig optagelse sted, hovedsageligt på grund af mangel på direkte samtidige sammenligninger mellem udvaskning under vinterhvede og efterafgrøder. Beregninger udført ved hjælp af data fra CENTS og understøttet af Daisy-modellering tyder dog på, at effekten af N-optagelse vha. dybe vinterhvederødder på N-udvaskning på den givne lokalitet er lille og ikke overstiger den naturlige baggrundsvariation. Dette synes ikke umiddelbart at stemme overens med simulering af nitrat-udvaskning for Foulum i afsnit 3.9 i denne rapport, hvor der for vinterhvede estimeres et gennemsnitligt nitratoptag under 1 meters dybde på 6 kg N ha⁻¹ år⁻¹. Resultaterne fra CENTS forekommer dog at være på linje med tendensen i de øvrige simuleringer i afsnit 3.9, hvor det hovedsageligt er på lerjorde (JB6 og JB7), at der estimeres betydelige nitratoptag for vinterhvede under 1 meter. Fremtidige eksperimenter er nødvendige for at kunne bestemme størrelsen af N-optag via dybe vinterhvederødder, både ved direkte sammenligninger af nitratkoncentrationer i jorden og total N-udvaskning under 1 meters dybde samt ved mærkning med N-isotoper og efterfølgende planteklip.

Delkonklusioner

- Nitratmålinger i CENTS-forsøget sammen med simulering af tracere med Daisy tyder på, at nitrat spredes betydeligt under nedvaskning mellem 1 og 2 meters dybde, og at målinger i 2 meters dybde ofte indeholder en blanding af nitrat fra flere år. Dette gør år-til-år-sammenligninger af nitratudvaskning fra vintersæd og efterafgrøder i 2 meters dybde meget vanskelige og ofte upålidelige.
- Sammenligning af udvaskningsmængder fra perioden 2019-2023 i CENTS-forsøget med hjælp af Daisy simuleringer fandt ikke en betydelig forskel i nitratudvaskning mellem 1 og 2 meters dybde. Dette tyder på ingen eller minimalt nitratoptag under 1 meters dybde i forsøget, hvor der blev dyrket vinterhvede i 2020-2021.

3.3 Effekt af halm og jordbearbejdning under vinterhvede i CENTS-langtidsforsøget

Jorge F. Miranda-Vélez og Elly Møller Hansen, Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet

Afsnittet indeholder både publicerede og upublicerede data.

I den tidligere version af denne vidensyntese (Kristensen et al., 2022) blev de potentielle effekter af jordbearbejdning på nitratudvaskning under vinterafgrøder diskuteret, herunder samspillet mellem jordbearbejdning og fjernelse af halm på marken i afsnittet "Udvaskningsrisiko fra vinterhvede ved forskellige jordbearbejdningssystemer" (Knudsen, 2022). Nærværende afsnit bygger videre på netop omtalte afsnit ved at undersøge to hovedhypoteser: 1) at indarbejdning af halm i jorden ved pløjning fører alt andet lige til lavere nitratudvaskning under den efterfølgende vinterafgrøde sammenlignet med pløjning uden halm, og 2) at direkte såning med efterladelse af halm på jordoverfladen fører til højere nitratudvaskning under den efterfølgende vinterafgrøde sammenlignet med pløjning med indarbejdning af halm. Disse to hypoteser er baseret på rationalet, at indarbejdning af kulstofrig halm i jorden ved pløjning øger mikrobernes immobilisering af mineralisk kvælstof, som dermed ikke umiddelbart kan udvaskes. Derfor vil enten fjernelse af halm efter høst eller manglende indarbejdning af halm i jorden under direkte såning i teorien føre til højere nitratudvaskning om vinteren. Selvom dette ræsonnement i princippet gælder for både forårs- og vinterafgrøder, er tidspunktet for jordbearbejdning forud for såning af vinterafgrøder om efteråret afgørende for den potentielle effekt på nitratudvaskningen om vinteren, da dyrkningsforholdene om efteråret har stor effekt på nitratudvaskningen (f.eks. Askegaard et al., 2011; Miranda-Vélez & Vogeler, 2022).

For at undersøge de ovennævnte hypoteser blev resultater fra CENTS-forsøget, udført af Institut for Agroøkologi ved Aarhus Universitet, ved Foulumgård og Flakkebjerg, analyseret. Resultaterne bestod af nitratudvaskning beregnet ud fra sugecellemålinger af nitrat-N i jordvandet i 1 meters dybde og udtaget mellem 2004 og 2023. Udvaskning blev summeret pr. år med start i september. I analysen indgik tre sædskifter: et, der var domineret af vintersæd (R2), og to alsidige sædskifter med vinter- og vårsæd (R3 og R4). De to alsidige sædskifter var identiske bortset fra håndtering af halm efter høst, hvor halmen blev fjernet i det ene og efterladt på marken i det andet. I alle tre sædskifter blev der dyrket efterafgrøde før vårsæd. I analysen indgik desuden tre jordbearbejdningsintensiteter: pløjning, harvning og direkte såning. I sæsoner med efterafgrøder før vårsæd blev der pløjet eller harvet om foråret (april) på Foulumgård, mens der på Flakkebjerg blev pløjet om vinteren (november til december) og harvet om foråret (marts til april). I sæsoner med en vinterafgrøde blev der pløjet og harvet om efteråret (ultimo august til primo oktober) før såning på begge lokationer.

Statistisk analyse af den samlede nitratudvaskning pr. sæson blev udført ved hjælp af en generaliseret lineær mixed model (GLMM) med afgrødetype (vinter- eller vårsæd), jordbearbejdning, sædskifte og lokalitet som prædiktorvariabler med fuld vekselvirkning. Analysen, der omfattede 18 års data, viste, at jordbearbejdningens intensitet ikke havde en signifikant effekt på nitratudvaskningen og heller ikke vekselvirkede med afgrødetype, sædskifte eller lokalitet. Som følge heraf kan det konkluderes, at der ikke var en signifikant effekt af nedpløjning af halm på nitratudvaskning under vinterhvede kontra pløjning uden halm (1. hypotese). Ligeledes var der ikke signifikante forskelle på nitratudvaskning under vinterhvede mellem nedpløjning, harvning eller ingen indarbejdning (ved direkte såning) af efterladt halm (2. hypotese).

Baseret på denne analyse understøtter forsøgsresultaterne fra CENTS ikke hypotesen om, at indarbejdning af halm i jorden ved pløjning efter høst reducerer nitratudvaskningen under den efterfølgende vinterafgrøde. Ligeledes understøtter disse resultater ikke, at reduceret jordbearbejdning fører til højere udvaskning under vinterafgrøder, hvor halmen er blevet efterladt på markoverfladen. Disse resultater gælder for CENTS-forsøget ved både Foulumgård og Flakkebjerg.

En potentiel forklaring på denne mangel på signifikante effekter ved at indarbejde halm i jorden ved pløjning kan være dårlig synkronisering af forskellige processer. Muligvis har omsætning af halm i jorden været for langsom til at øge mikrobiel immobilisering af nitrat betydeligt i overjorden, inden nitraten er blevet udvasket til dybere jordlag af regn om efteråret. Det er blevet påvist, at halm iblandet jord nedbrydes hurtigere og i højere grad end halm, der efterlades på overfladen (f.eks. Christensen, 1986; Curtin et al., 2008), og at det fører til immobilisering af N i jorden i månederne efter indarbejdelse (Cheshire et al., 1999). Trods dette er det ikke givet, at disse processer vil finde sted på det rigtige tidspunkt og i tilstrækkeligt omfang til at medføre målbare reduktioner i udvaskningen i praksis.

Delkonklusioner

- Nitratudvaskningsmængder baserede på 18 års data i CENTS-forsøget viser, at hverken jordbearbejdningens intensitet eller halmretention før såning af vintersæd har en signifikant effekt på nitratudvaskning i den følgende vinter.

3.4 Nitratkoncentration under vintersæd kontra bar jord i 2 meters dybde

Forfattere: Ashley Montcalm og Nanna Hellum Kristensen, 2022, SEGES Innovation

Redigeret af Julie Therese Christensen, 2024, 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.

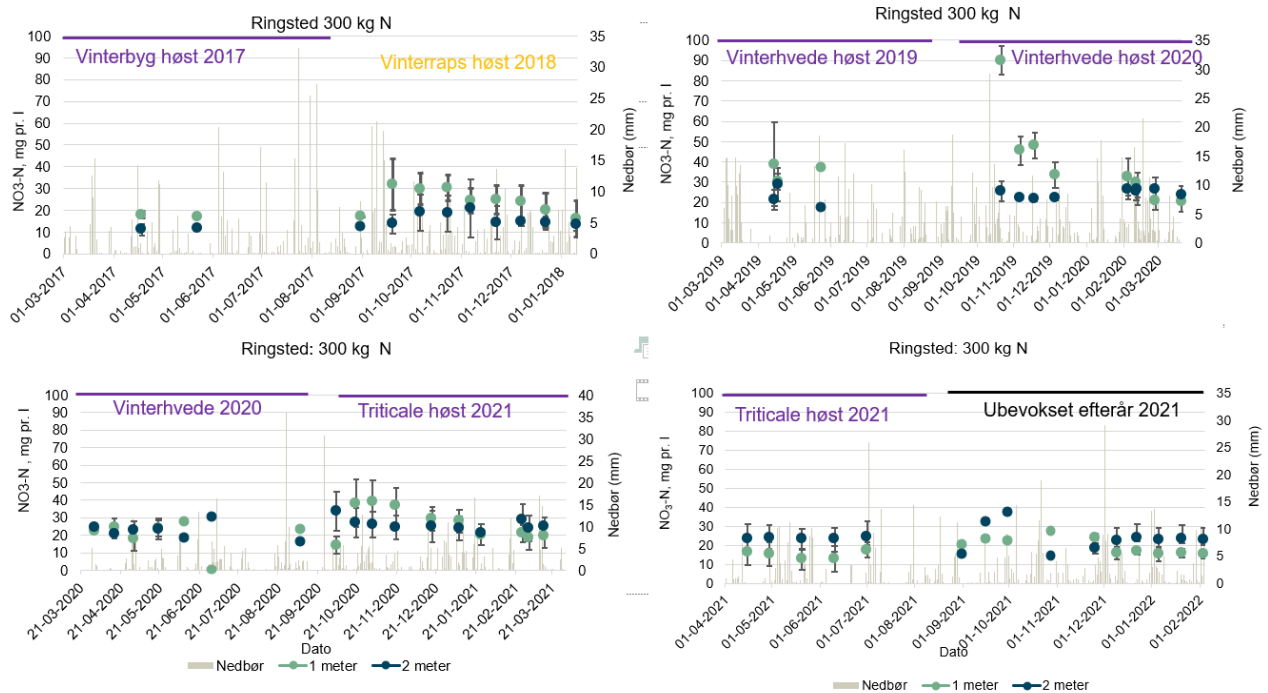


Figur 3.4a. Kortet viser placeringen af de tre forsøg, hvor der indgår målinger af nitratkoncentrationer i både 1 og 2 meters dybde.

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.

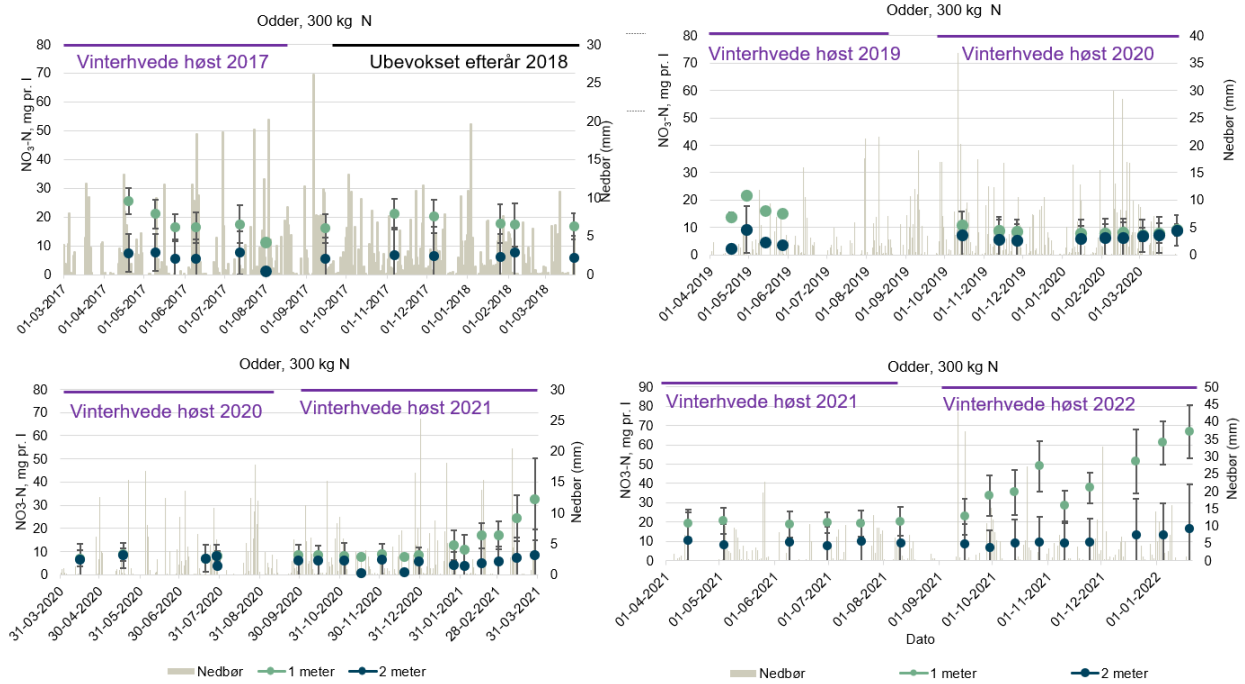
Sædskifteforsøget er designet med et raps-korn-sædskifte med to N-niveauer. Sugecellerne i 2 meters dybde er nedgravet i parceller tilført kvælstof hhv. efter normen og 1,5 x norm. Forsøgsdesign og resultater fra sædskifteforsøget er nærmere beskrevet i en særskilt rapport (Kristensen & Montcalm, 2022).

I Figur 3.4b 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.



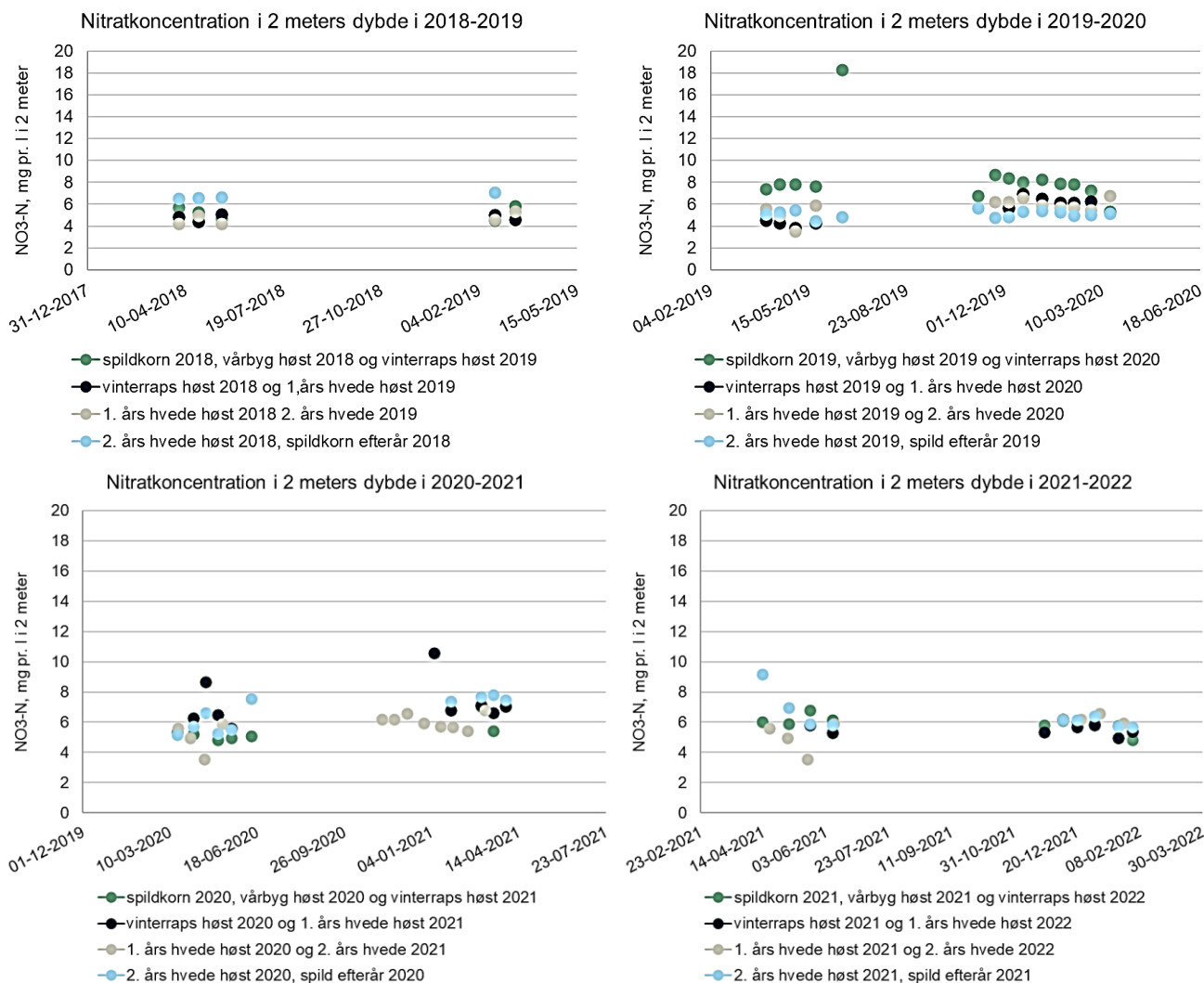
Figur 3.4b. Nitratkoncentrationer målt i hhv. 1 og 2 meters dybde i forsøg med stigende mængder kvælstof i Ringsted. I leddene er der givet 300 kg N pr. ha til vintersæd og 200 kg N pr. ha til vårsæd.

I Figur 3.4c 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 $\text{NO}_3\text{-N}$ mg pr. l, hvilket er lavere end i Ringsted. Det er primært koncentrationen i 1 meters dybde, som varierer, og den stiger typisk i løbet af efteråret under vintersæd.



Figur 3.4c. 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.

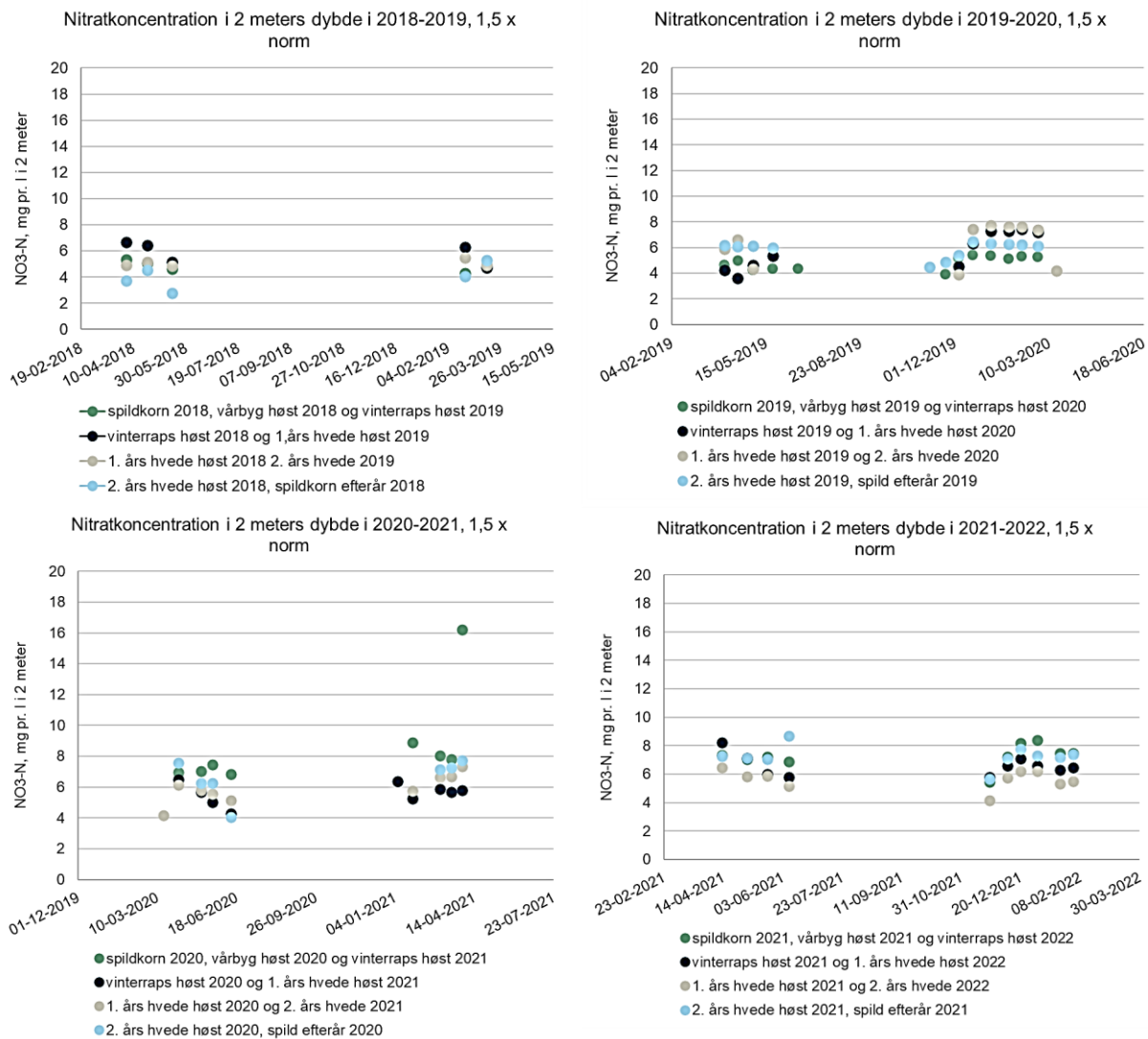
I sædskifteforsøget er der flere kombinationer, og de forskellige efterårsdækker kan sammenlignes i det samme år.



Figur 3.4d. Nitratkoncentrationer målt 2 meters dybde i sædskifteforsøget på Lolland ved 1x norm.

Figur 3.4d 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. Det er 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 3.4e. Nitratkoncentrationer målt 2 meters dybde i sædskifteforsøget på Lolland ved 1,5 x norm.

Delkonklusion

- I alle forsøg var nitratkoncentrationen i 2 meters dybde relativt stabil over tid og 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" af Kristensen & Montcalm (2022). 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 forsøgsparceller, 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 normgødsning og 1,5 gange normgødsning. Alle efter- og mellemafgrøder har været olieræddike. 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 bulkkes 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 normgødsning. 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 3.4a ses effekten af efterafgrøde og mellemafgrøde på udvaskningen i de enkelte år.

Tabel 3.4a. Beregnet udvaskning i alle forsøgsår i sædskifteforsøget på Lolland.

Afgørden 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									
Vinterraps	18	3	2	31	102	9	23	41	74
1. års vinterhvede	22	4	10	16	26	8	28	29	63
2. års vinterhvede		14	28	27	61	10	14	24	52
Efterafgrøder	18	12	14	13	38	4	14	12	15
Spildkorn og ukrudt	15	20	27	37	94	7	15	21	18
Mellemafgrøde	27	13	25	16	43	7	13	24	65

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. Udvasning 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 i Figur 3.4f.

Afgørde til høst	Efterårsdække	Udvaskning som gennemsnit af 2018-2022			
		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	

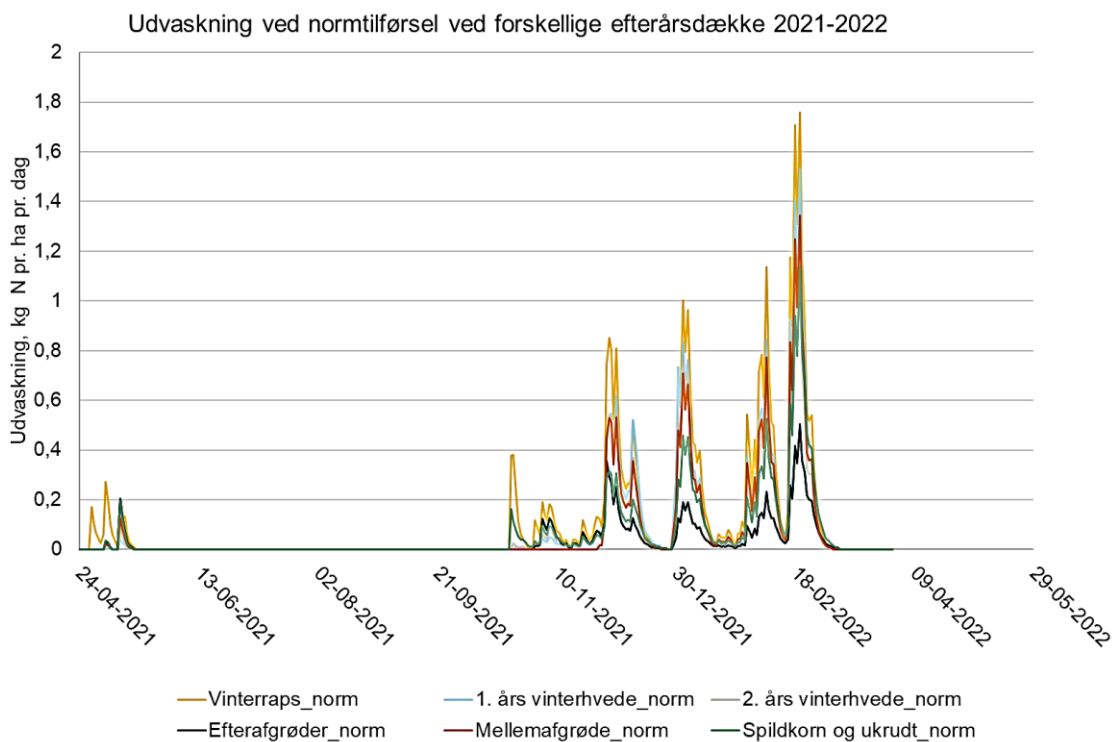
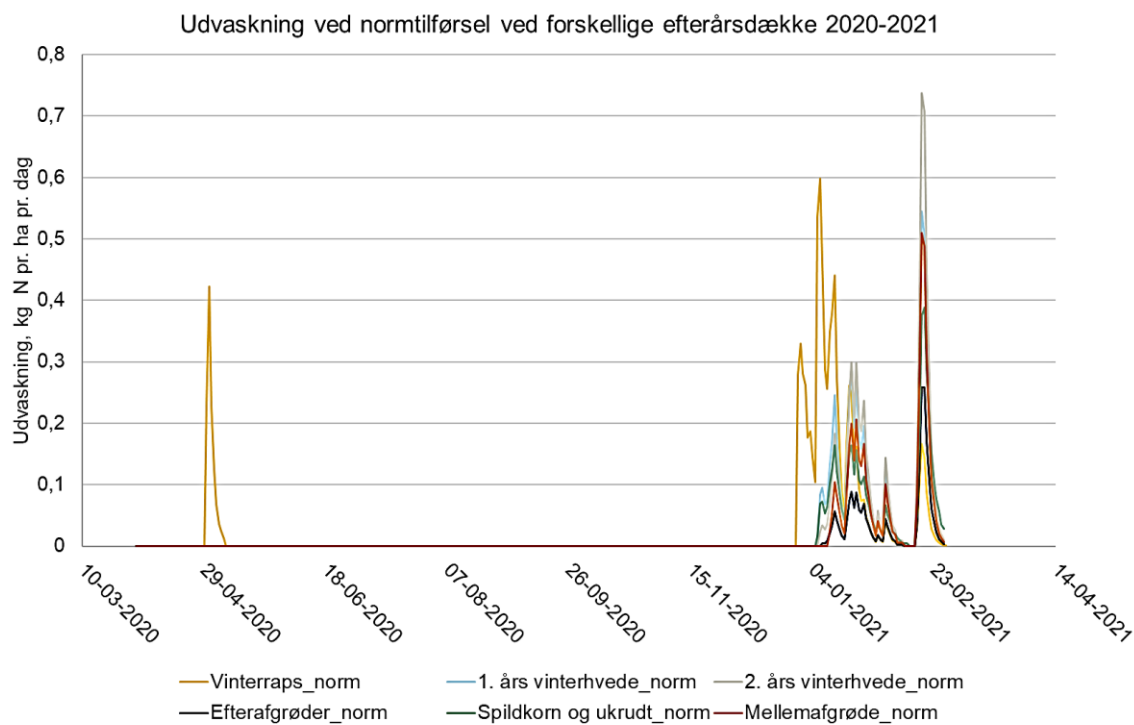
Figur 3.4f. Udvaskning målt med sugeceller i 1 meters dybde i et kornrapssædskifte på Lolland.

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 3.4g, hvor den daglige udvaskning er vist for to år med hhv. 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.

Delkonklusion

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 3.4g. Tidlig udvaskning i to udvaskningsår ved forskellige efterårdsdækker med kvælstoftilførsel efter norm.

3.5 Estimering af N-udvaskningspotentialiet via N-min

Julie Therese Christensen, SEGES Innovation

Resultatet af N-min-prøver udtaget i efteråret inden begyndende afstrømning betragtes som en god indikator for udvaskningspotentialiet i den kommende afstrømningsperiode. N-min er summen af nitrat-N og ammonium-N i jorden og dermed et udtryk for jordens indhold af mineralsk kvælstof. N-min-prøver tages ofte i 0-100 cm dybde og 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 sandjordens ringere vandholdende evne.

N-min-prøver i forskellige afgrøderækkefølger

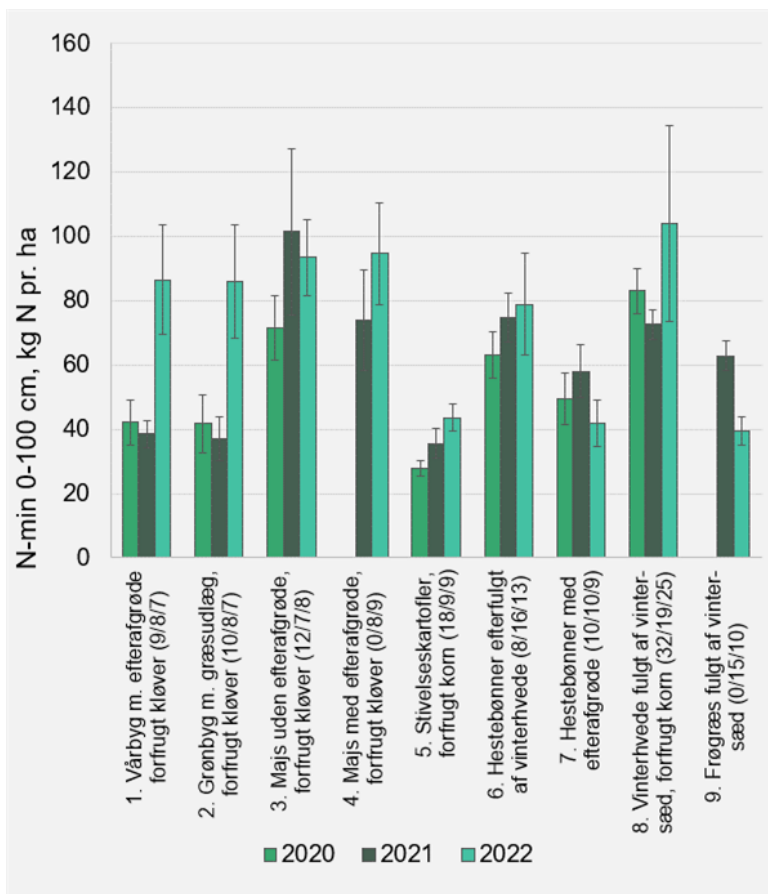
I projektet LessN blev der i efteråret 2020, 2021 og 2022 målt N-min i marker med forskellige afgrøderækkefølger. Der er over de tre sæsoner udtaget N-min-prøver i 302 marker. Tidspunktet for prøveudtagningen afhæng af jordtypen. For JB1 og 3 blev prøverne udtaget 1. oktober til 15. oktober, for JB2 og 4 blev prøverne udtaget 15. oktober til 1. november, og for JB 5-7 var prøvetagningsperioden 1. november til 15. november. Der blev udtaget to N-min-prøver i hver mark, og hver prøve bestod af otte stik. Resultaterne er et gennemsnit af de to prøver. Figur 3.5a viser resultaterne fra N-min-programmet. Der ses generelt en stor variation i niveauet for N-min-prøverne inden for 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 i 2020 og 2021, og i 2022 var niveauet lidt over 100 kg N pr. ha. I 2020 og 2021 var niveauet i markerne med vintersæd efterfulgt af vintersæd markant højere end i marker med vårbyg med efterafgrøde forfrugt kløver. Dette var dog ikke gældende i 2022, hvor målingerne i vårbyg med efterafgrøde havde et næsten dobbelt så høj N-min sammenlignet med årene før.

I alle år findes det laveste niveau af N-min i marker med vårbyg med efterafgrøde, grønbyg med græsudlæg samt stivelseskartofler. Det lave N-min-indhold i vårbyg med efterafgrøder er på trods af, at forfrugten var kløvergræs. Majs uden efterafgrøde havde i begge år et af de højeste N-min-niveauer set på tværs af alle afgrøderækkefølgerne. 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, jordbundsforhold og husdyrgødningshistorik.

Delkonklusion

- Hvis N-min-indholdet sent efterår betragtes som et udtryk for den potentielle udvaskning gennem vinteren, viser målingerne i 2020/2021 et væsentlig større udvaskningspotentialie for vintersæd om efteråret end fra efterafgrøder. Det er derimod på samme niveau i 2022.



Figur 3.5a. Resultater af N-min målt i efteråret ved forskellige afgrødefølger i hhv. 2020, 2021, og 2022. Søjlerne viser gennemsnit i de enkelte grupper. Fejllinjen angiver standardafvigelsen.

3.6 N-min-målinger under 1 meters dybde i vintersæd- og vårsædsbaserede sædskifter

Nadja Fuglkjær Bloch, SEGES Innovation

Kvælstofudvaskningen fra afgrødefølger, med enten vintersæd efter vintersæd eller vårsæd efterfulgt af efterafgrøder, er normalt blevet belyst med sugeceller placeret i 1 meters dybde. Tidligere undersøgelser har dog vist, at vinterhvede på lerjord kan optage kvælstof fra under 1 meter. Det har medført en diskussion om, hvorvidt kvælstofudvaskningen fra vintersæd er overvurderet i forhold til vårbyg med efterafgrøder, fordi en del af det kvælstof, som registreres udvaskes i vintersæd, optages fra under 1 meters dybde.

I nærværende afsnit belyses denne problemstilling med resultater fra tre års målinger af mineralsk kvælstof (N-min) ned til 150 cm's dybde. I 2022, 2023 og 2024 blev N-min målt ned igennem jordsøjlen på i alt 33 marker, der varierer i jordtype og klima og er placeret i Vestjylland, Fyn, Langeland, Sjælland, Lolland, Falster og Møn. Jordtypen (JB) var mellem 3 og 7. N-min målinger for de individuelle marker kan findes i Bloch (2024). N-min blev målt tre gange om året i 2022 og 2023 – i foråret, lige efter høst og i efteråret – hver gang ned til en dybde på 150 cm og inddelt i lag af 25 cm. I 2024 blev N-min målt to gange – i foråret og lige efter høst.

Indholdet af N-min i foråret blev målt primo til medio marts inden den første gødskning og inden eventuel såning af vårsæd. Forårsmålingen er et udtryk for, hvor meget mineralsk kvælstof der er tilgængeligt ved vækststart, og det er påvirket af udvaskningen og planteoptag i løbet af efterår- og vinterperioden. N-min i foråret på arealer, der har været bevokset med efterafgrøder, kan derfor afspejle det kvælstof, som stammer fra mineraliseringen af efterafgrøden, hvis denne er destrueret eller udvintret i løbet af efterår og vinter.

Målingen af N-min efter høst af afgrøden blev foretaget ultimo august til medio september og viser, hvor effektivt afgrøden har været til at tømme jorden for nitrat i løbet af vækstsæsonen samt nitrat fra mineralisering frem til måletidspunktet fra det tidspunkt, hvor afgrøden ophørte med at optage kvælstof.

Målingen af N-min i efteråret blev foretaget ultimo oktober til primo november. N-min afspejler her, om efterårsbevoksningen med vintersæd eller efterafgrøder har været i stand til at optage det kvælstof, der mineraliseres i efterårsperioden. N-min udtrykker på dette tidspunkt også, hvor meget kvælstof der potentielt kan udvaskes i løbet af vinteren som følge af overskudsnedbør. Måling af N-min i oktober og november kan også være påvirket af afstrømningen af vand fra høst til måletidspunktet, såfremt afstrømningen er startet tidligt. En sådan afstrømning vil ske på sandjord ved store nedbørmængder.

I 14 marker blev der målt N-min i de samme marker i både 2023 og 2024, hvormed dynamikkerne i N-min i dybden i de enkelte marker kan følges over to vækstsæsoner. Dog medførte dette, at afgrødefølgerne i 2024 ikke helt stringent har fulgt de oprindelige udvælgelseskriterier. Ingen marker fra 2022 blev målt på i de følgende år, og markerne, som blev målt på i 2023-2024, er udelukkende lerjord, hvorimod størstedelen af markerne i 2022 var sandjord. Seks af de udvalgte marker findes endvidere i LOOP-oplandene.

Resultater

Tabel 3.6a viser resultater fra foråret og efter høst i alle tre år 2022, 2023 og 2024, inddelt efter afgrødefølge, hvoraf alle målte afgrødefølger er medtaget på trods af, at de afviger fra udvælgelseskriterierne. For at fokusere på eventuelle forskelle under 100 cm er målingerne opdelt efter jorddybderne 0-100 cm og 100-150 cm. Forårsmålingerne er taget i den førstnævnte afgrøde under kolonnen 'Afgørder', undtagen i de tilfælde, der er markeret med ¹⁾. For disse er forårsmålingen i stedet taget i bar jord eller efterafgrøden. N-min-målinger giver information om kvælstofindholdet i jorden på måletidspunktet.

I foråret blev der observeret et højere N-min-indhold i de øverste 100 cm i marker med efterafgrøder (49 kg N pr. ha) sammenlignet med vintersæd (39 kg N pr. ha), hvilket tyder på, at en del af kvælstofindholdet i efterafgrøderne på pågældende tidspunkt allerede var blevet mineraliseret. Under 100 cm var N-min-indholdet

derimod større i vintersæd sammenlignet med efterafgrøder med et gennemsnit på 15 kg N pr. ha i vinterhvede mod 9 kg N pr. ha i efterafgrøder. Der var dog ikke væsentlige forskelle mellem vinterhvede og efterafgrøder i hverken de øverste 100 cm eller under 100 cm.

Efter høst var der i de øverste 25 cm generelt høje N-min-indhold, hvilket indikerer mineralisering fra høst til det tidspunkt, hvor prøverne blev udtaget. Dette er sandsynligt, da målingerne ikke blev taget direkte efter høst. Der kan efter høst heller ikke observeres væsentlige forskelle i N-min-indholdet mellem vintersæd og vårsæd i nogen af jorddybderne. Desuden blev der i både forårs- og efterårsmålingerne generelt fundet store forskelle mellem de enkelte målinger (Tabel 3.6a; Bloch, 2024).

Tabel 3.6a. N-min (kg N pr. ha) målt i forår og efter høst i 2022-2024, inddelt i 0-100 cm og 100-150 cm samt efter afgrødefølge. Parenteser angiver minimum- og maksimumværdier for N-min.

Afgørder	2022-2024					
	Antal observationer	Forår		Antal observationer	Efter høst	
		N-min i 0-100 cm	N-min i 100-150 cm		N-min i 0-100 cm	N-min i 100-150 cm
		Kg N pr. ha			Kg N pr. ha	
Vinterhvede efter vinterhvede	7	39 (30-47)	15 (5-24)	8	57 (28-77)	10 (4-21)
Vinterhvede efter vinterraps	9	39 (15-64)	12 (5-29)	10	57 (26-83)	7 (2-16)
Vinterhvede efter vårbyg	3	23 (17-21)	17 (11-25)	3	39 (31-46)	9 (7-10)
Vinterhvede efter hvidkløverfrø	1	46	32	1	66	11
Vinterhvede efter vinterrug	0	-	-	1	70	6
Vårbyg efter efterafgrøde ¹⁾	12	49 (23-79)	9 (3-16)	10	55 (33-92)	10 (9-22)
Vårbyg efter bar jord ¹⁾	6	34 (27-50)	13 (8-18)	6	53 (24-79)	13 (9-22)
Vinterbyg efter vårbyg	1	24	12	1	33	19
Fabriksrøer efter bar jord ¹⁾	4	41 (28-55)	13 (9-19)	0	-	-

¹⁾ Forårsmåling er taget i hhv. efterafgrøde og bar jord.

Tabel 3.6b viser resultaterne af efterårsmålingerne i 2022-2023, som også her er inddelt efter afgrødefølge samt jorddybderne 0-100 cm og 100-150 cm. Også her er alle afgrødefølger medtaget, hvor målingerne er taget i førstnævnte afgrøde.

N-min-indholdet i de øverste 100 cm var i efteråret 26-35 kg N pr. ha lavere, hvor der var efterafgrøder efter vinterhvede eller vårbyg, sammenlignet med N-min, hvor efterårsbevoksningen var vinterhvede. Under 100 cm's dybde blev der observeret et højere N-min-indhold under vinterhvede sammenlignet med efterafgrøder sået efter vinterhvede – 12 kg N pr. ha kontra 7 kg N pr. ha. Dette kan skyldes en øget nedvaskning af kvælstof i løbet af efteråret til de dybere jordlag. Efterafgrøderne kan have holdt nitratkoncentrationen i de øvre lag på et lavere niveau, hvilket kan have begrænset nedvaskningen. Samme tendens ses dog ikke for efterafgrøder efter vårbyg, hvor N-min-indholdet i 100-150 cm er relativt højt, hvilket kunne stamme fra foregående afgrøde. I efterårsmålingerne var der, ligesom i forårs- og efter-høst-målingerne, generelt stor forskel mellem de enkelte målinger (Tabel 3.6b; Bloch, 2024).

Tabel 3.6b. N-min (kg N pr. ha) målt i efteråret 2022-2023, inddelt i 0-100 cm og 100-150 cm samt efter afgrødefølge. Parenteser angiver minimum- og maksimumværdier for N-min.

Afgrøder	2022-2023		
	Efterår		
	Antal observationer	N-min i 0-100 cm	N-min i 100-150 cm
		Kg N pr. ha	
Vinterhvede efter vinterhvede	3	62 (43-76)	12 (4-22)
Efterafgrøde efter vinterhvede	6	36 (25-46)	7 (3-36)
Bar jord efter vinterhvede	8	62 (20-131)	13 (6-27)
Vinterraps efter vinterhvede	1	34	39
Vinterrug efter vinterhvede	3	49 (38-69)	18 (12-23)
Efterafgrøde efter vinterrug	1	21	5
Efterafgrøde efter vårbyg	4	27 (21-36)	14 (9-19)
Vinterraps efter vårbyg	2	77 (50-104)	17 (10-24)
Vinterhvede efter vårbyg	2	59 (50-68)	19 (10-24)
Bar jord efter vårbyg	1	27	8
Vinterbyg efter vårbyg	1	63	17

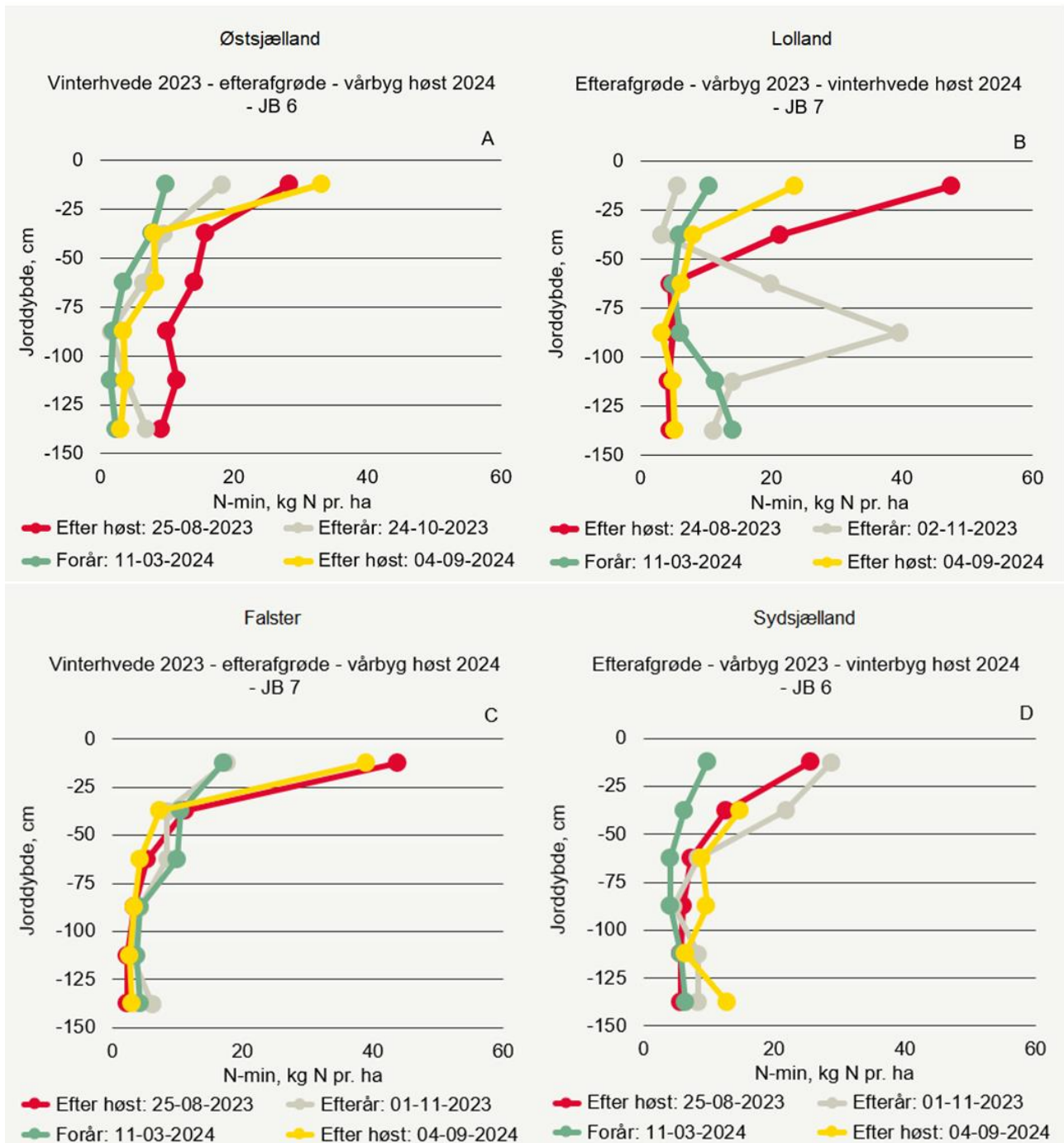
Tabel 3.6c viser de gennemsnitlige nedbørsmængder i hele landet i perioden fra 1. september til 1. november 2022 og 2023 samt klimanormalen for samme periode, beregnet på baggrund af nedbørsdata fra 1991-2020 (Danmarks Meteorologiske Institut, 2022; Danmarks Meteorologiske Institut, 2023). I 2022 var den målte nedbørsmængde 207,5 mm, hvilket var 20,7 mm under klimanormalen, som er på 228,2 mm. I 2023 var den gennemsnitlige nedbørsmængde derimod 71,2 mm højere end klimanormalen med 299,4 mm. Den højere efterårsnedbør i 2023 kan have medført en større risiko for kvælstofudvaskning før prøvetagningen i slutningen af oktober til begyndelsen af november, hvilket kan have påvirket nøjagtigheden af efterårsmålningerne.

Tabel 3.6c. Gennemsnitlige nationale nedbørsmængder (målt i mm) i perioden fra 1. september til 1. november i 2022 og 2023 samt klimanormalen for samme periode i årene 1991-2020.

Årstal	Nationale nedbørsmængde 1. september - 1. november	Klimanormal (1991-2020) 1. september - 1. november
	Millimeter, mm	
2022	207,5	228,2
2023	299,4	

I Figur 3.6a ses fire marker med prøver udtaget i 2023 og 2024. Til venstre vises mark A på Østsjælland og mark C på Falster. Mark A havde følgende afgrøderækkefølge: vinterhvede til høst i 2022, efterfulgt af vinterhvede til høst i 2023, en efterafgrøde og derefter vårbyg til høst i 2024, mens mark C havde afgrøderækkefølgen: vinterhvede til høst i 2022, vinterhvede til høst i 2023, efterfulgt af en efterafgrøde og vårbyg til høst i 2024. Til højre vises mark B på Lolland og mark D på Sydsjælland. Mark B havde afgrøderækkefølgen: vårbyg til høst i 2022, efterfulgt af en efterafgrøde, vårbyg til høst i 2023 og vinterhvede til høst i 2024, mens mark D havde afgrøderækkefølgen: vårbyg til høst i 2022, efterfulgt af en efterafgrøde, vårbyg til høst i 2023 og vinterbyg til høst i 2024. Resultaterne præsenteres fra efter høst 2023 til efter høst 2024 for bedre at følge udvaskningssæsonen.

På de fire marker ses det, at der generelt er mest kvælstof i de øverste jordlag, og målingerne efter høst viser det højeste N-min-indhold i de øverste 25 cm for mark A, B og C. Dette tyder på, at der er sket en betydelig mineralisering i perioden, hvor afgrøden ophørte med at optage kvælstof til prøvetidspunktet efter høst. I de to marker, hvor efterårsbevoksningen har været vintersæd (Lolland og Sydsjælland), er N-min-indholdet i efteråret på et højt niveau. På Østsjælland og Falster, hvor efterårsbevoksningen har været efterafgrøder, er N-min-indholdet på et lavt niveau og betydeligt lavere end N-min-indholdet lige efter høst.



Figur 3.6a. N-min målt ned til 150 cm over vækstsæsonerne 2023-2024. Figuren viser fire udvalgte marker. A på Østsjælland, B på Lolland, C på Falster og D på Sydsjælland. Overskrifterne angiver afgrøderækkefølge og jordbundstypen (JB) for hver mark. Da jordprøverne er taget på samme mark i 2023 og 2024, er afgrøderne i 2024 ikke helt stringent i forhold til de oprindelige kriterier for afgrøderækkefølgerne.

Delkonklusioner

- Nuværende resultater indikerer, at efterafgrøderne har været mere effektive til at reducere N-min-indholdet i jorden i efterårsperioden sammenlignet med markerne med vintersæd.
- Efter høst indikerer resultaterne, at der er samme mængde N-min i de dybe jordlag under vårsæd som under vintersæd. Hverken vårbyg m. efterafgrøder eller vintersæd har dermed efter vækstsæsonen efterladt væsentlige mængder kvælstof i de dybe lag.
- Ud fra disse målinger blev der fundet store variationer mellem de enkelte målinger, hvilket kan ses i minimums- og maksimumsværdierne i Tabel 3.6a og Tabel 3.6b samt i Bloch (2024). Disse variationer kan skyldes en række faktorer, såsom jordtype, vinternedbør og såtidspunkt, hvilket også beskrives i tidligere afsnit. Undersøgelsen er udført på relativt få marker og udbredelsen af konklusionerne skal derfor ske med forsigtighed.
- Der er behov for flere målinger af N-min under 100 cm eller en anden type undersøgelse for at kunne konkludere, om efterafgrøder efterfulgt af vårsæd er bedre eller lige så god til at reducere udvaskningen end afgrødefølger med vintersæd efterfulgt af vintersæd.

3.7 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

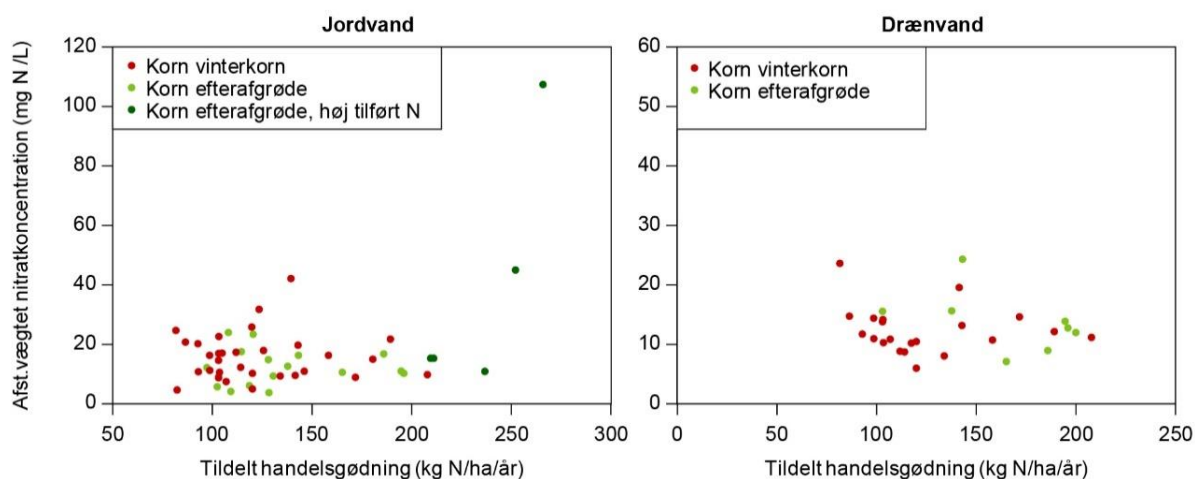
Årsværdier

I landovervågningen måles nitrat i jordvand opsamlet med sugeceller, og for en delmængde af marker med sugeceller måles desuden på drænvand opsamlet fra samme mark, som der opsamles jordvand. Målinger gennemføres på permanente stationer/mark, og det betyder, at der ikke på samme mark samtidig måles på en kombination af afgrøder eller dyrkningspraksis. En sammenligning af, hvordan hhv. 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 inddrage afstrømningens størrelse, da denne direkte påvirker størrelsen af nitratudvaskning. Derfor anvendes den afstrømningsvægtede nitratkoncentration, som beregnes som den årlige nitratudvaskning divideret med afstrømningen.

Desuden er data udvalgte således, at kun handelsgødede marker 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 med højere tildeling til vinterkorn end til vårkorn. For at gøre sammenligningen mere ensartet er data opdelt i forhold til om kornet har fået tildelt mere eller mindre end 208 kg N/ha i form af handelsgødning. I sammenligning mellem korn efterfulgt af hhv. vinterkorn og efterafgrøder er der kun anvendt observationer, hvor der er tildelt mindre end 208 kg N/ha som handelsgødning. Der er desuden den vigtige forskel, at sukkerroer er forfrugt i 24 ud af 34 jordvands-observationer for korn efterfulgt af vinterkorn, mens vårkorn er forfrugt for 13 ud af de 16 jordvands-observationerne med korn efterfulgt af en efterafgrøde, hvilket kan have betydning for nitratomsætning og transport i rodzonen (observationer med forfrugt, type af efterafgrøde og gødningsinput er vist i Blicher-Mathiesen og Thorsen, 2024). Anvendte typer af efterafgrøder omfatter både gul sennep og andre korsblomstrede, olieræddike, korn, græs og en blanding af rug, vårbyg, korsblomstret og honningurt. Efterafgrøderne er alle opløjet omkring 1. november, nogle lidt før eller efter.

Tabel 3.7a. Middel samt standardafvigelse (stdv.) for afstrømning (Afst.), nitratudvaskning og afstrømningsvægtet nitratkoncentration (Afst.v.konc.) målt for korn efterfulgt af hhv. vinterkorn eller en efterafgrøde. Data er opgjort for jordvand opsamlet med sugeceller samt for marker med målt drænvand. Både jordvand og drænvand er indsamlet og målt ifm. landovervågningen. Alle kornafgrøder har fået tildelt handelsgødning under 208 kg N/ha. Igen af de viste værdier er signifikant forskellige mellem vinterkorn og efterafgrøder.

	Jordvand							Drænvand						
	An- tal obs	Aktuel perkolation			Middel perk.			Antal obs	Aktuel drænastrømning			Middel afst.		
		Perk.	Udvask.	Afst.v. konc.	Udvask.	Afst.v. konc.	Udvask.		Afst.	Transport	Afst.v. konc.	Transport	Afst.v. konc.	Transport
Korn efterfulgt af:	Mid- del (mm)	Mid- del (kg N/ha/år)	stdv.	Middel (mg N/l)	stdv.	Middel (kg N/ha/år)	Middel (mm)	Middel (kg N/ha/år)	stdv.	Middel (mg N/l)	stdv.	Middel (kg N/ha/år)		
Vinterkorn	31	179	27,6	16,2	15,8	8,0	28,8	21	131	16,4	10,2	11,7	3,7	15,2
Efterafgrøde	14	250	30,8	12,2	13,7	6,1	27,6	9	104	13,5	6,0	14,0	5,1	14,4
Middel	45	215						31	235					



Figur 3.7a. Relation mellem tildelt handelsgødning og afstrømningsvægtet nitratkoncentration i hhv. jordvand (tv.) og drænvand (th.) for hhv. korn efterfulgt af vinterkorn og korn efterfulgt af en efterafgrøde begge med tildelt handelsgødning under 208 kg N/ha og endelig korn efterfulgt af en efterafgrøde 'Korn efterafgrøde høj' med tildelt handelsgødning over 208 kg N/ha, sidstnævnte observationer indgår kun i figurer med jordvand.

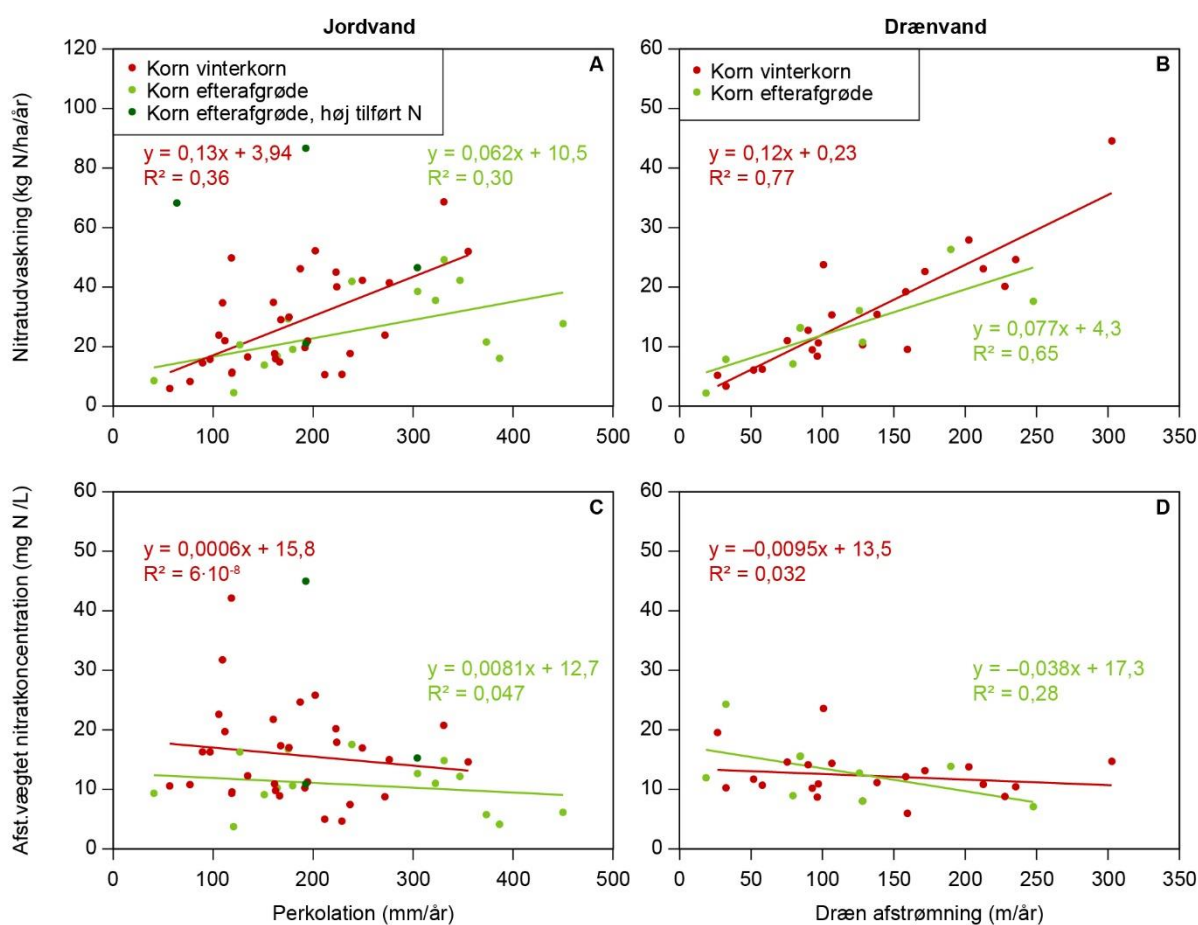
Fordeling af korntyper ikke er ens for de to grupper; korn efterfulgt af hhv. vinterkorn og efterafgrøder. Der forekommer mere vinterkorn, som efterfølges af efterafgrøder, og derfor mere vårkorn i gruppen, der efterfølges af vinterkorn.

For målinger af både jord- og drænvand er der flere observationer i gruppen korn efterfulgt af vinterkorn (n=31 for jordvand og n=22 for drænvand) end korn efterfulgt af efterafgrøder (n=14 for jordvand og 10 for drænvand), begge grupper har handelsgødningstildeling i intervallet 135-208 kg N/ha. Det gør det sværere stringent at sammenholde de to afgrødekombinationer, da der kan være forskel i nitratudvaskning mellem vår og vinterkorn.

Derfor er den afstrømningsvægtede nitratkoncentration plottet ift. tildelt handelsgødning i Figur 3.7a.

Af figuren ses, at den afstrømningsvægtede nitratkoncentration for de to kombinationer nogenlunde ligger inden for samme udfaldsrum, 3,8-17 mg/L for korn efterfulgt af en efterafgrøde og 5-42 mg N/l for korn efterfulgt af korn, når gødningstildelinger ligger under 208 kg N/ha, mens nitratkoncentrationen er større, 15-18 mg N/l for tre ud af fire observationer af korn efterfulgt af en efterafgrøde, når tildeling af handelsgødning er over 208 kg N/ha.

Sammenligning af nitrat udvaskning og de afstrømningsvægtede koncentrationer er gennemsnitligt højere udvaskning men lavere nitratkoncentrationer for korn efterfulgt af en efterafgrøde end efterfulgt af vinterkorn for jordvand, hhv. 31 og 28 kg N/ha i udvaskning (Tabel 3.7a). Da den gennemsnitlige perkolation er højere for korn efterfulgt af en efterafgrøde end korn efterfulgt af korn, hhv. 250 mm mod 179 mm, bliver den afstrømningsvægtede nitratkoncentration lidt lavere, 14 mg N/l for efterafgrøde mod 16 mg N/l for korn efterfulgt af vinterkorn. Der kunne dog ikke påvises en signifikant forskel mellem de to dataserier.



Figur 3.7b. Relation mellem afstrømning og nitratudvaskning for jordvand (A) og drænvand (B) og relation mellem afstrømning og afstrømningsvægtet nitratkoncentration for jordvand (C) og drænvand (D) opgjort for korn efterfulgt af hhv. vinterkorn og en efterafgrøde.

For drænvand er den gennemsnitlige udvaskning lavere for korn efterfulgt af en efterafgrøde end korn efterfulgt af korn, hhv., 12 kg N/ha end 16 kg N/ha, men heller ikke her kunne der beregnes en signifikant forskel. For den afstrømningsvægtede nitratkoncentration i drænvand er den gennemsnitlige koncentration lavere,

12 mg N/l for korn efterfulgt af vinterkorn end den gennemsnitlige koncentration på 14 mg N/l for korn efterfulgt af en efterafgrøde og forskellen er ikke signifikant. Den lavere afstrømningsvægtede nitratkoncentration for korn efterfulgt af vinterkorn kan primært tilskrives en højere middelfafstrømning for denne afgrødefølge på 131 mm/år mod 104 mm/år for korn efterfulgt af en efterafgrøde.

Da den gennemsnitlige perkolation og afstrømning ikke er ens for de to afgrødekombinationer, hvor der bl.a. er flere observationer med høj perkolation for korn efterfulgt af en efterafgrøde end efterfulgt af vinterkorn, er relationen mellem perkolation og nitratudvaskning for jordvand samt drænastrømning og nitrattransport i drænen vist i Figur 3.7a og b. For drænvand ses en god relation mellem afstrømning og nitratudvaskning for både korn efterfulgt af vinterkorn med R^2 på 0,77 og for korn efterfulgt af en efterafgrøde med en R^2 på 0,65 (Figur 3.7b). For jordvand er relationen mellem perkolation og nitratudvaskning mindre med R^2 på 0,36 og 0,30 for korn efterfulgt af hhv. vinterkorn og en efterafgrøde. De forholdsvis gode relationer gør det rimeligt at opgøre en middel for perkolation og drænastrømning for hele datasættet og anvende disse til at beregne en nitratudvaskning og nitratdrænttransport ved middelperkolation og drænastrømning. Herved tages der højde for, at perkolation og drænastrømning ikke er ens i de to afgrødegrupper. Årsudvaskning af nitrat ved middelperkolation er stort set ens for de to afgrødegrupper, 27,6 kg N/ha for korn efterfulgt af en efterafgrøde og 28,8 kg N/ha for korn efterfulgt af vinterkorn (tabel 3.7a). Og årsdrænttransport af nitrat ved middelfafstrømning er stort set ens for de to afgrødegrupper, 14,4 kg N/ha for korn efterfulgt af en efterafgrøde og 15,2 kg N/ha for korn efterfulgt af vinterkorn.

Månedsværdier for aktuel afstrømning, nitratudvaskning og afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer samt nitratudvaskning og -dræntransport ved middel perkolation og drænastrømning

Gennemsnitlig afstrømning, nitratudvaskning og afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer er opgjort for både drænvand og jordvand for hver måned for de to afgrødefølger korn efterfulgt af hhv. vinterkorn og af efterafgrøder og vist som Box-plot i Figur 3.8a og som månedsmiddel i Tabel 3.8a. Af figuren ses, at både afstrømning og nitratudvaskning er størst i vintermånederne december, januar og februar, herefter aftager disse – dog stadig med relativ høje værdier for marts, en del lavere i april og med nærmest ingen afstrømning og nitratudvaskning i de øvrige forårsmåneder. Afstrømning og udvaskning er fortsat lav frem til november for jordvand og til december for drænvand. Som forventet starter afstrømningen før for jordvand, idét afstrømning fra rodzonen medfører, at grundvandsstanden stiger, og først når grundvandet når op over drændybden, begynder afstrømningen gennem drænene.

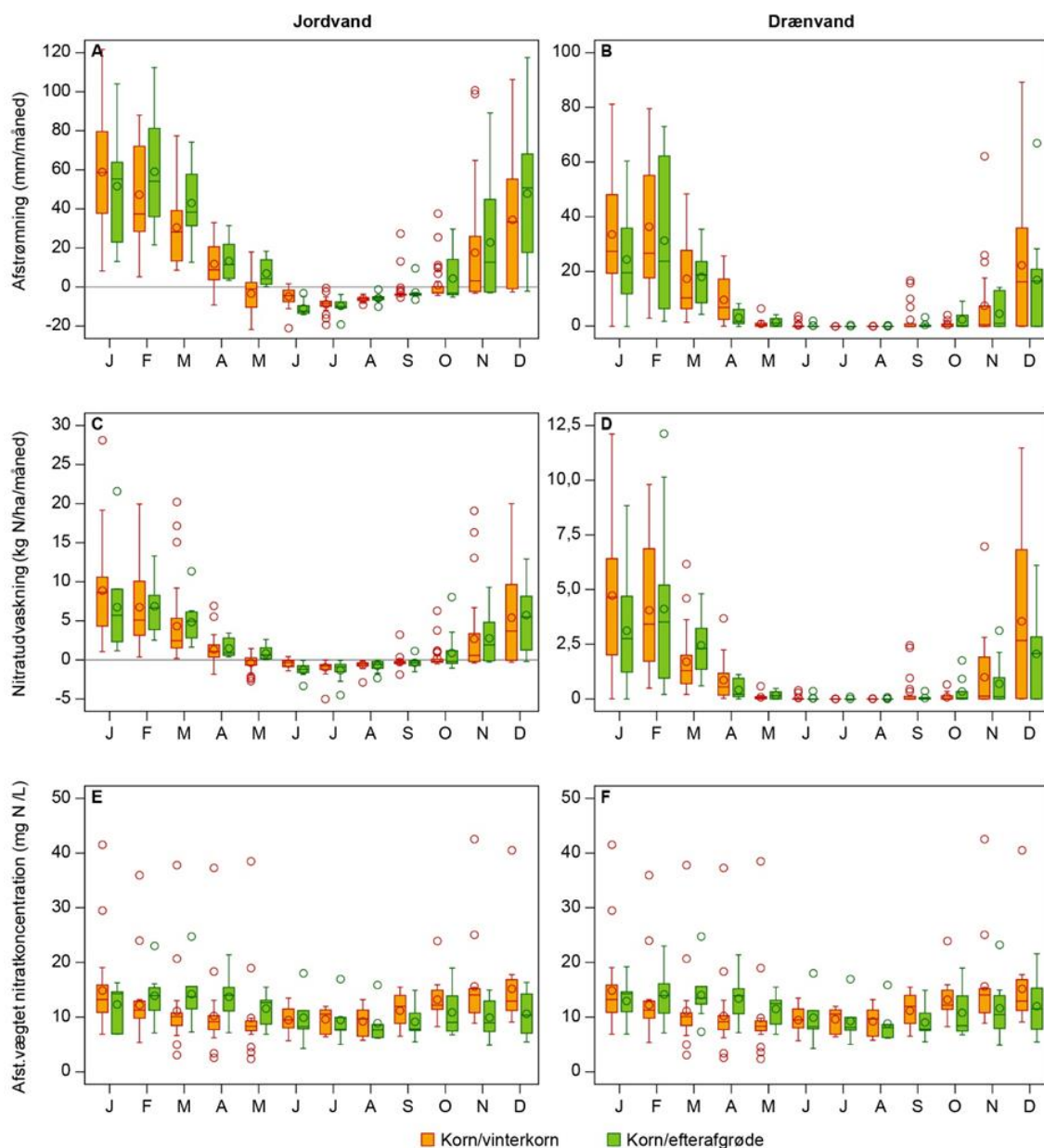
Der er gennemført en statistisk t-test på, om der er forskel på de ovennævnte månedsværdierne mellem korn efterfulgt af hhv. vinterkorn eller af efterafgrøde på log-transformerede data i statistikprogrammet SAS. Den statistiske test viste, at der ikke er signifikant forskel på de viste månedsværdier for nitratudvaskning og koncentrationer, hverken for jord- og drænvand.

Figuren og data i Tabel 3.8a viser, at der for jordvand er lavere månedsmiddel opgjort for afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer for efterafgrøder i december, januar og februar. I marts er koncentrationer ens for de to afgrødefølger, og i april er den afstrømningsvægtede konc. Lavere, når korn efterfølges af vinterkorn end af en efterafgrøde.

For drænvand er der lavere månedsmiddel for afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer opgjort for efterafgrøder i oktober til januar og lavere koncentrationer for vinterkorn end for efterafgrøder i februar, marts og april. Reelt er der kun betydelig afstrømning i februar og marts, og i marts og april er den opgjorte nitratudvaskning lavere for korn efterfulgt af vinterkorn end efterfulgt af efterafgrøde.

Lavere koncentrationer i oktober til december er forventet, idét efterafgrøder under normale omstændigheder optager overskud af nitrat, mens vinterkorn ofte først etableres i september og ofte ikke når tilsvarende biomasse som efterafgrøderne i disse måneder. 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. Lidt afhængig af temperatur mineraliseres den nedpløjede biomasse af efterafgrøder og kan evt. give anledning til øgede nitratkoncentrationer i februar og de første forårsmåneder. Det er derfor vigtigt at vide, om dyrkning af efterafgrøder kan give anledning til en større nitratudvaskning i forårsperioden end fra vintersæd, hvor jorden er dækket af afgrøden hele vinteren og foråret.

Generelt er der stor variation i de viste månedsværdier for nitratudvaskning og afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer for både jord- og drænvand, og det skal understreges, om antallet af observation for dræn kun omfatter 22 og ti hydrologiske år med afgrødefølgen korn efterfulgt af hhv. 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, der har parallelt sædskifte af korn efterfulgt af vinterkorn kontra efterafgrøde. Herved vil sammenligningen mellem de to afgrødefølger følge samme år og dyrkningsforhold, som det tidligere er nævnt, ikke forekommer i LOOP-dataene.

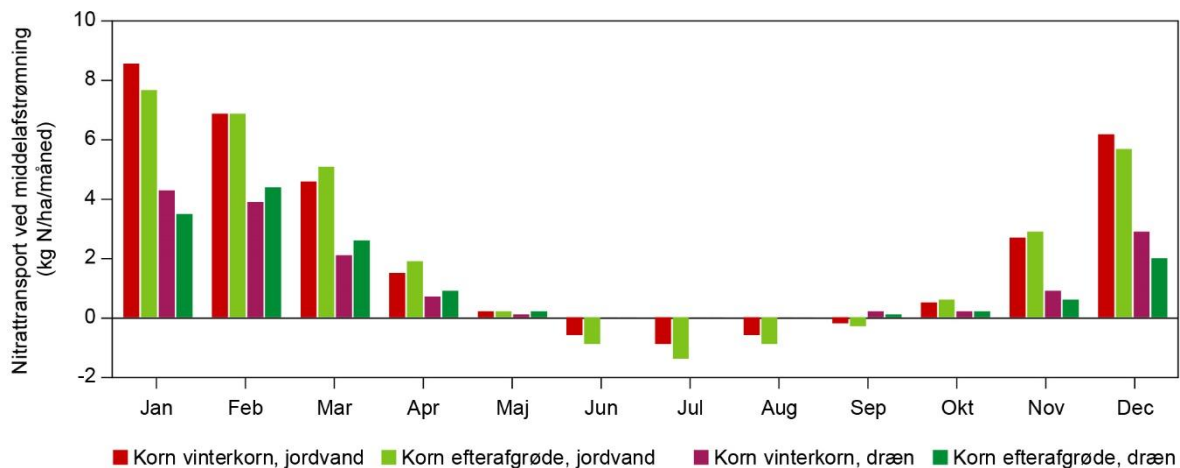


Figur 3.8a. Box-plot af månedsværdier for afstrømning, nitratudvaskning og afstrømningsvægtet nitratkoncentration for jord- og drænvand opdelt i de to afgrødefølger korn efterfulgt af hhv. vinterkorn og efterafgrøder. Den statistiske test viste, at der ikke er signifikant forskel på de viste månedsværdier.

I Figur 3.8b vises nitratudvaskning for jordvand og transport for drænvand opgjort ved middel for perkolation og drænafstrømning for hver måned. Nitratudvaskning ved middelperkolation for de to afgrødegrupper er stort set ens for de to måneder november og februar, lidt lavere for efterafgrøder i december og januar og lidt højere i marts end for korn efterfulgt af vinterkorn. Årsudvaskning af nitrat ved middelperkolation er stort set ens for de to afgrødegrupper, 27,6 kg N/ha for korn efterfulgt af en efterafgrøde og 28,8 kg N/ha for korn efterfulgt af vinterkorn (Tabel 3.8a).

For dræn er nitrattransporten ved månedsmiddel for drænafstrømning lavere for efterafgrøder i november, december og januar, men højere i februar og marts end for korn efterfulgt af vinterkorn. Årsdræntransport af

nitrat ved middelfaststrømning er stort set ens for de to afgrødegrupper, 14,4 kg N/ha for efterafgrøder og 15,2 kg N/ha for korn efterfulgt af vinterkorn. I de opgjorte data indgår eftervirkning af efterafgrøder ikke specifikt, idét landmanden har mulighed for at regulere, hvordan eftervirkningen skal indgå i forbrug af gødning enten året efter eller til andre afgrøder. Det skal tages forbehold herfor ved sammenligningen af data for de to afgrødekombinationer.



Figur 3.8b. Månedsmiddel for nitratudvaskning for jordvand ved middelperkolation og nitrat transport ved middelfaststrømning for drænvand opdelt på afgrødefølgerne korn efterfulgt af hhv. vinterkorn og efterafgrøde.

Tabel 3.8a. Middel månedsafstrømning, nitratudvaskning og afstrømningsvægtet nitratkoncentration for jord- og drænvand opdelt på afgrødefølgerne korn efterfulgt af hhv. vinterkorn og efterafgrøde. Middel, der er lavest for de afstrømningsvægtede nitrat konc., er angivet med fed skrift for månederne oktober til april. Data er desuden plottet i box-plot i Figur 3.8a.

		jan	feb	marts	april	maj	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec	årssum
Afstrømning (mm)														
Korn, vi.korn	Jordvand	60,2	47,3	30,2	11,7	-4,2	-4,8	-8,4	-5,9	-2,0	0,7	17,5	36,2	179
Korn, efterafgr.	Jordvand	57,1	56,7	45,5	15,5	7,4	-6,7	-8,5	-5,5	-2,2	7,6	26,7	56,6	250
Korn, vi.korn	Dræn	33,6	36,4	17,3	9,8	0,9	0,4	0,0	0,0	2,5	0,6	7,5	22,4	131
Korn, efterafgr.	Dræn	24,0	27,9	19,6	3,5	1,8	0,3	0,1	0,1	0,5	2,4	3,7	15,7	100
Middel	Jordvand	58,6	52,0	37,8	13,6	1,6	-5,8	-8,5	-5,7	-2,1	4,2	22,1	46,4	214
Middel	Drænvand	28,8	32,2	18,5	6,6	1,4	0,3	0,0	0,1	1,5	1,5	5,6	19,0	115
Nitrat udv. (kg N/ha/md)														
Korn, vi.korn	Jordvand	9,3	6,8	4,4	1,3	-0,5	-0,5	-0,8	-0,6	-0,2	0,1	2,6	5,6	27,6
Korn, efterafgr.	Jordvand	7,0	7,0	6,2	2,1	1,0	-0,9	-1,5	-0,9	-0,4	1,5	3,5	6,2	30,8
Korn, vi.korn	Dræn	4,7	4,0	1,7	0,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	1,0	3,5	16,4
Korn, efterafgr.	Dræn	2,9	3,2	2,6	0,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,4	1,6	11,9
Afstv. Nitratkonc. (mg N/l)														
Korn, vi.korn	Jordvand	14,7	13,2	12,1	10,9	10,3	10,5	10,2	9,8	9,9	11,1	12,0	13,3	
Korn, efterafgr.	Jordvand	13,2	13,3	13,4	14,0	14,1	15,7	16,4	16,2	16,1	14,5	13,2	12,4	
Korn, vi.korn	Dræn	14,9	12,2	11,1	10,3	9,8	9,5	9,6	9,3	11,2	13,2	15,6	15,2	
Korn, efterafgr.	Dræn	12,2	13,6	14,1	13,4	11,5	9,9	9,3	8,9	9,1	11,2	10,0	10,7	
Nitrat udv. og transport v. middelfast. (kg N/ha)														
Korn, vi.korn	Jordvand	8,6	6,9	4,6	1,5	0,2	-0,6	-0,9	-0,6	-0,2	0,5	2,7	6,2	28,8
Korn, efterafgr.	Jordvand	7,7	6,9	5,1	1,9	0,2	-0,9	-1,4	-0,9	-0,3	0,6	2,9	5,7	27,6
Korn, vi.korn	Dræn	4,3	3,9	2,1	0,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,9	2,9	15,2
Korn, efterafgr.	Dræn	3,5	4,4	2,6	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,6	2,0	14,4

Delkonklusioner

Årlige målinger af nitratudvaskning fra rodzonen på handelsgødet vår- og vinterkorn viste højere nitratudvaskning for korn efterfulgt af efterafgrøde end korn efterfulgt af vinterkorn, mens det omvendte var gældende for den afstrømningsvægtede nitratkoncentration. Ingen af disse forskelle er dog ikke signifikante. I analysen indgik 31 årlige målinger af korn efterfulgt af vinterkorn og 14 årlige målinger af korn efterfulgt af efterafgrøde. Den gennemsnitlige nitratudvaskning udgjorde 28 og 31 kg N/ha for korn efterfulgt af hhv. vinterkorn og efterafgrøder. De gennemsnitlige afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer for de samme afgrødefølger udgjorde hhv. 15,8 og 14,0 mg N/l for hhv. vinterkorn og efterafgrøder.

For 31 målinger i drænvand var den afstrømningsvægtede nitratkoncentration gennemsnitligt lidt lavere, 11,7 mg N/l, for korn efterfulgt af korn end gennemsnittet på 14,0 mg N/l for korn efterfulgt af en efterafgrøde. Nitratudvaskning fra dræn var lidt lavere for korn efterfulgt af efterafgrøde, gennemsnitlig 13,5 kg N/ha mod 16,4 kg N/ha for korn efterfulgt af vinterkorn, men forskellen var ikke signifikant.

Årsudvaskning af nitrat for jordvand ved middelperkolation er stort set ens for de to afgrødegrupper, 27,6 kg N/ha for korn efterfulgt af en efterafgrøde og 28,8 kg N/ha for korn efterfulgt af vinterkorn. Årsdræntransport af nitrat ved middelfaststrømning er stort set ens for de to afgrødegrupper, 14,4 kg N/ha for korn efterfulgt af en efterafgrøde og 15,2 kg N/ha for korn efterfulgt af vinterkorn. I de opgjorte data indgår eftervirkning af efterafgrøder ikke specifikt, idét landmanden har mulighed for at regulere, hvordan eftervirkningen skal indgå i forbrug af gødning enten året efter eller til andre afgrøder. Det skal tages forbehold herfor ved sammenligningen af data for de to afgrødekombinationer.

For månedsværdier var der ikke er signifikant forskel på nitratudvaskning og dræntransport og ej heller for afstrømningsvægtet nitratkoncentration opgjort for jordvand eller drænvand. 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 observation for dræn kun omfatter 21 og ni hydrologiske år med afgrødefølgen korn efterfulgt af hhv. vinterkorn og efterafgrøde. De viste data og den statistiske analyse 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, så sammenligningen mellem de to afgrødefølger følger samme år og dyrkningsforhold.

3.9 Er kvælstofudvaskningen fra vintersæd større end fra efterafgrøder efterfulgt af vårsæd?

Simulering af N-udvaskning i forskellige afgrøde-scenarier med den nykalibrerede Daisy-model

Maddie Schwartzkopff, Lars Stoumann Jensen og Per Abrahamsen

Institut for Plante- og Miljøvidenskab, Københavns Universitet

1 Tabel 3.9b Baggrund

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 (Styczen et al., 2020a, 2020b; Styczen & Abrahamsen, 2017), COMMIT (Petersen & Abrahamsen, 2021) og StyrN (Rashid et al., 2022a, 2022b), hvor scenarier med vårsæd med og uden efterafgrøder er sammenlignet med vintersæd. Ikke alle projekter havde udvaskning af kvælstof som primært fokus, men da Daisy baserer sig på massebalancer, bliver kvælstofudvaskning beregnet som en del af disse, 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).

Det er imidlertid vigtigt at bemærke, at gyldigheden af simuleringer-resultater fra enhver agroøkostem-model er afhængig af, at de enkelte delmoduler er velkalibrerede under alle de forhold, som scenarierne dækker. For Daisy gælder det i denne sammenhæng især afgrøde-modulerne (såvel hovedafgrøder som efterafgrøder). De fleste af hovedafgrøderne i Daisys standardbibliotek er kalibreret på flere datasæt, men ofte på enkelte lokaliteter (få jordtyper, dræningsforhold, grundvandsstand) og med data fra få forsøgsår (lille variation i vejr). For efterafgrødemodellerne har forsøgsdata til kalibrering hidtil været begrænsede, og der har derfor i de seneste år foregået forsøg i andre projekter (LessN, CatCap) for at tilvejebringe bedre data til kalibrering.

For at få afgrødemodeller, der opfører sig korrekt også under mere variable forhold (forskellige jorde, dræning, vejr, management), er det imidlertid vigtigt at anvende ensartede typer af forsøgsdata fra flere lokaliteter/markere og flere år, når man kalibrerer afgrødemodellerne. Det kan være udfordrende at finde sådanne store datasæt men nødvendigt, da man ellers let vil komme til at justere på afgrødeparametre for at kompensere for forhold, der er specifikke for den enkelte mark eller det enkelte år, og

resultatet risikerer at blive en afgrødemodel, der er mindre robust overfor variable forhold og dermed mindre egnet til scenariemodellering.

Det overordnede mål for scenariemodelleringen præsenteret i det efterfølgende var at undersøge, om efterårsdække i form af vintersæd kan være lige så effektivt til at reducere kvælstof (N)-udvaskning som efterafgrødedække efterfulgt af vårsæd over et helt sædskifte (seks år) på tværs af forskellige lokaliteter (med forskel i jordtyper, klimatiske forhold og andel af husdyrgødning).

Metode

Kvælstofudvaskning er en funktion af vejr, jord, og dyrkningspraksis, herunder valget af afgrøder og sædskifte. I indeværende projekt var formålet at teste indflydelsen af dyrkningspraksis, specifikt andelen af efterafgrøder og vintersæd i sædskiftet. For at få de mest realistiske forudsigelser valgte vi fire marker (lokaliteter med en forskellig jordtype, jordprofil egenskaber, klima og gødningspraksis) og fire afgrøder, hvor flere af Daisys afgrødemodeller for nylig er blevet kalibreret (Schwartzkopff et al., in prep.) på nye flerårige forsøg på forskellige lokaliteter med målte data for en række centrale parametre gennemført i regi af projekterne VirkN og LessN (Vogeler et al., 2020; Vogeler et al., 2021a; Vogeler et al., 2021b, og også beskrevet i kapitel 3.1 i denne rapport. Kalibreringen er foretaget på baggrund af målinger af afgrødernes fænologi (udviklingsstadiet på BBCH-skalaen), kvælstof i planten under vækst, høstudbyttet, herunder tørstof og kvælstof i både kerner og strå, mineralsk kvælstof i jorden (N-min) samt nitrat i jordvand ved 1 m dybde (sugeceller). Data til kalibrering er fra forsøgsperioden 2015 til 2022.

Valg af marker

De fire marker, hvorfra data havde været anvendt til kalibrering af afgrødemodellerne, valgte vi også at anvende til analyse af forskellige afgrøde-scenarier (Tabel 3.9a, Figur 3.9a). Dette gjorde vi dels fordi vi havde gode jorddata på alle fire marker, og fordi de repræsenterer et spænd i forhold til dyrkningsforhold (jordtyper og klima) i Danmark.

Det er imidlertid vigtigt at pointere, at de fire marker ikke repræsenterer de enkelte jordtyper generelt, men specifikke marker, hvor vi har detaljerede data for jordbundsforhold, kvælstofdynamik og vejr i simuleringsperioden. Vi har bevidst ikke valgt at kombinere de fire forskellige jordtyper med forskellige klimaer og gødningstyper, da det ville betyde en betydelig ekstrapolation ift. de data, afgrødemodellerne er kalibreret på. Det betyder, at resultaterne fra disse fire marker ikke nødvendigvis er repræsentative for andre marker med samme jordtype, anden gødningstype, eller dyrkningspraksis – og man skal derfor være påpasselig med at generalisere resultater fra disse.

Tabel 3.9a. Karakteristika for de fire scenarielokaliteter, inkl. jordtype, tekstur, vandstatus, max. rod-
dybde og normalnedbør.

Lokalitet	Horisont	Ler	Silt	Sand	Humus	C:N	Volumevægt
Jordtype, vand-status, max roddybde, nedbør, koord.		(<0.002 mm) (Pct.)	(0.002-0.02 mm) (Pct.)	(0.02-2.0 mm) (Pct.)	(Pct.)		(g/cm ³)
Holstebro:	Ap (0-30 cm)	7.7	7.1	85.2	7.8	27	1.23
JB1, udrænet, højt grund-	Bhs (30-47 cm)	4.1	1.3	94.6	1.7	16	1.63
vand, vandet, max roddybde	Bs (47-90 cm)	2.2	0.7	97.1	0.7	-	1.70
50 cm.	C (90-120 cm)	3.1	1.1	95.8	0.5	10	1.59
Nedbør 970 mm/år 56.37 °N, 8.45 °E							
Foulum:	A (0-36 cm)	6.7	9.4	81.0	2.9	-	1.54
JB4, udrænet, dybt grund-	A (36-57 cm)	6.7	8.6	83.1	1.6		1.42
vand, max roddybde 120 cm.	B2 (57-98 cm)	9.2	6.8	83.8	0.2		1.75
Nedbør 830 mm/år.	C1 (98-132 cm)	9.4	8.2	82.3	0.1		1.86
56.30 °N, 9.35 °E	C2 (132-200 cm)	11.4	8.1	80.4	0.1		1.92
Flakkebjerg:	A (0-20 cm)	10.9	16.1	73.0	2.8	-	1.64
JB6, drænet, højt grundvand,	Ap (20-25 cm)	10.9	16.1	73.0	2.8		1.73
max roddybde 200 cm.	B1 (25-45 cm)	13.7	12.7	73.6	1.1		1.57
Nedbør 610 mm/år.	B2 (45-80 cm)	17.4	12.3	70.3	1.1		1.60
55.20 °N, 11.23 °E	B3 (80-125 cm)	28.7	21.2	50.1	0.7		1.67
	B4 (125-150 cm)	22.8	16.8	60.4	0.4		1.69
	C (150-250 cm)	18.0	24.0	58.0	0.8		1.87
Guldborg:	Ap (0-28 cm)	25.6	20.9	53.5	1.6	9	1.64
JB7, drænet, højt grundvand,	BE (28-45 cm)	32.7	12.8	54.5	0.6	7	1.74
max roddybde 200 cm.	Bt(g) (45-91 cm)	58.5	3.6	37.9	0.4	4	1.67
Nedbør 620 mm/år.	BC(g) (91-139 cm)	36.2	7.8	56.0	0.6	9	-
54.85 °N, 11.73 °E	C(g) (16-170 cm)	33.0	10.5	56.5	0.1	-	1.67

Sædskiftescenarier

Otte seksårige sædskifter/afgrødefølger blev konstrueret (Tabel 3.9b) med varierende niveauer af efterårsdække og efterafgrødedække. Hovedafgrøderne var vinterhvede og vårbyg, og efterafgrøderne var rajgræs (RG) og olieræddike (OR). Dyrkningspraksis blev beskrevet i overensstemmelse med lovkrav og almindelige regional landbrugspraksis i Danmark.

Vårbyg blev sået 5. april og høstet 15. august. Vinterhvede blev sået 20. september og høstet 15. august. 99 % af kornet blev høstet, 98 % af halmen blev fjernet, og 8 cm stub blev efterladt på marken. Rajgræs blev undersøet i vårbyggen 10. april, og olieræddiken blev sået 20. august. På de sandede jorde, Foulum og Holstebro, blev efterafgrøderne nedmuldet ved pløjning 1. februar, mens de på de lerede jorde, Flakkebjerg og Guldborg, blev nedmuldet ved pløjning 1. november. Pløjedybden var 18 cm.

Hovedafgrøderne blev gødet i henhold til lovkrav, men N-tildelinger er generelt ikke fratrukket den lovpligtige eftervirkning af efterafgrøden (Landbrugsstyrelsen, 2023). For sædskifte 6 er der dog også tilføjet simuleringer, hvor N-tildelingen er reduceret med den lovpligtige eftervirkning af efterafgrøden,

17 kg N/ha/år for Flakkebjerg og Guldborg og 25 kg N/ha/år for Holstebro og Foulum. For at repræsentere geografisk variation i gødningskilde blev Foulum og Holstebro gødet med standard svinegylle (til harmoni-N, 170 kg total-N/ha/år) og mineralsk ammoniumnitratgødning (50 % ammonium), mens Flakkebjerg og Guldborg kun blev gødet med mineralsk ammoniumnitrat. Gyllen blev overfladeudbragt i vinterhvede og nedfældet i 10 cm dybde inden såning i vårbyg. Vinterhvede fik en delt N-gødningstildeling; i Foulum og Holstebro blev gyllen udbragt 15. april, og det resterende N (forskul mellem harmoni-N og norm-N) blev tilført som mineralsk N 15. marts. I Flakkebjerg og Guldborg blev 50 kg N/ha tilført 15. marts, og det resterende blev tilført 15. april. Vårbyg fik delt N-gødningstilførsel i Foulum og Holstebro, hvor gylle blev udbragt 15. marts, og det resterende N blev tilført som mineralsk N ved såning af SB. I Flakkebjerg og Guldborg blev der givet mineralsk N til norm ved såning. I Holstebro blev der vandet med 25 mm/dag ved lavt jordvandindhold (vandpot. < pF3).

Tabel 3.9b. Scenariosædskifter. Alle vårbyg med efterafgrøder er simuleret med både rajgræs og olieræddike; vinterhvede med efterafgrøde er simuleret med olieræddike.

Sædskifte nr.:	1	2	3	4	5	6	7	8
Efterafgrødedække (%)	0 %	0 %	17 %	50 %	83 %	100 %	83 %	17 %
Efterårs-dække (%)	100 %	0 %	17 %	50 %	83 %	100 %	100 %	83 %
År 1	Vinterhvede	Vårbyg	Vårbyg	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg m. efterafgr.
År 2	Vinterhvede	Vårbyg	Vårbyg	Vårbyg	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg
År 3	Vinterhvede	Vårbyg	Vårbyg	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg m. efterafgr.	Vinterhvede
År 4	Vinterhvede	Vårbyg	Vårbyg	Vårbyg	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg m. efterafgr.	Vinterhvede
År 5	Vinterhvede	Vårbyg	Vårbyg	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg	Vinterhvede
År 6	Vinterhvede	Vårbyg	Vårbyg m. efterafgr.	Vårbyg	Vårbyg	Vårbyg m. efterafgr.	Vinterhvede m. efterafgr.	Vinterhvede

De seksårige sædskifter blev gentaget fem gange, hvoraf den første blev brugt som en opvarmningsperiode til at initialisere modellens puljer og blev ikke medregnet i resultaterne – altså bruges de efterfølgende 24 års data fra hvert sædskiftescenarie i resultaterne.

Vejrdata blev trukket fra DMIs 10x10 km grid-database for perioden 18. april 2012 til 18. april 2022. Vejrdataet blev gentaget tre gange. Daglige vejrdata med maksimum-, minimum- og gennemsnitstemperatur [°C], nedbør [mm] og global stråling [W/m²] blev brugt til modellen.

Efter hvert sædskifte (seks år) blev indholdet af jordens organiske stof (SOM) i jorden genindstillet til den oprindelige parameterisering. Det betyder, at vi ikke simulerer en langtidseffekt af det valgte sædskifte, men til gengæld at resultaterne fra hvert sædskifte statistisk kan behandles som individuelle observationer. Detaljer om den oprindelige parameterisering af SOM og jordprofil kan findes i Schwartzkopff et al. (upubliceret). For at teste effekten af genindstilling af SOM-puljerne, blev der skabt scenarier for sædskifte 1, 2 og 6 (med RG og OR), hvor der enten ikke blev genindstillet eller blev genindstillet efter hver vækstsæson. Det samlede antal simuleringer var 434, svarende til 13.888 simuleringsår.

Resultater

Hvad er effekten af en enkelt efterafgrøde (17 %) i kontinuert vårbyg?

Regnet som gennemsnit for hele sædskiftet (seks år), reduceres kvælstofudvaskning med mellem 1 til 8 kg N/ha ved at introducere et enkelt år med efterafgrøder (Tabel 3.9c). For det ene år med efterafgrøde vil det sige, at udvaskningen er reduceret med mellem 6 til 48 kg N/ha. Det skal dog bemærkes, at dette er ved en N-tilførsel i året efter efterafgrøden, der ikke er reduceret med den lovpligtige eftervirkning, hvilket også gælder de efterfølgende afsnit (men i Tabel 3.9g er effekten af reduceret N tildeling inddraget). Olieræddiken er generelt mere effektiv til at reducere udvaskningen end rajgræs undersøgt i vårbyg. Standardafvigelsen, som er et udtryk for årsvariationen, er betydeligt større end effekten af efterafgrøden.

Tabel 3.9c. Gennemsnitlig årlig ændring i udvaskning [kg N/ha] ved 1 meter over seks år ved et års efterafgrøde i sædskifte (sædskifte 2 minus 3).

Ændring i N udvaskning (Sædskifte 2-3) [kg N/ha]	HOLSTEBRO: JB1		FOULUM: JB4		FLAKKEBJERG: JB6		GULDBORG: JB7	
	Olieræddike	Rajgræs	Olieræddike	Rajgræs	Olieræddike	Rajgræs	Olieræddike	Rajgræs
Gennemsnit	-4	-1	-6	-4	-4	-4	-8	-6
Standardafvigelse	± 13	± 4	± 27	± 20	± 12	± 12	± 17	± 15

Hvad er effekten af et 'hul' i efterafgrødedækket et år ud af seks?

Kvælstofudvaskningen øges ved at have et 'hul' i et ellers 100 % efterafgrødedække, altså at have et enkelt år uden efterafgrøde ud af seks i vårbyg med efterafgrøde – det øges med mellem 2 til 12 kg N/ha som gennemsnit over de seks år (Tabel 3.9d). Det vil sige med 12 til 72 kg N/ha i det år, hvor der ingen efterafgrøde er. Standardafvigelsen, altså årsvariationen, er ligeledes her stor. Det skal pointeres, at merudvaskningen ved et 'hul' i efterafgrødedækket (Tabel) er større end udvaskningsreduktionen ved at introducere en enkelt efterafgrøde (Tabel 3.9b). Det betyder, at der sker en opbygning af organisk materiale som følge af tilførslen af plantemateriale fra nedmuldet efterafgrøder, når der er flere år med efterafgrøder i sædskiftet. Den opbygning øger naturligt også mængden af mineralsk kvælstof i jorden, idét det organiske materiale nedbrydes og frigiver mobilt kvælstof, som er i risici for at blive udvasket. Denne effekt er større for olieræddike end for rajgræs, idét olieræddike typisk opbygger en større over- og underjordisk biomasse.

Tabel 3.9d. Gennemsnitlig årlig ændring i udvaskning [kg N/ha] ved 1 meter over seks år ved et år uden efterafgrødedække i sædskiftet (sædskifte 6 minus 5).

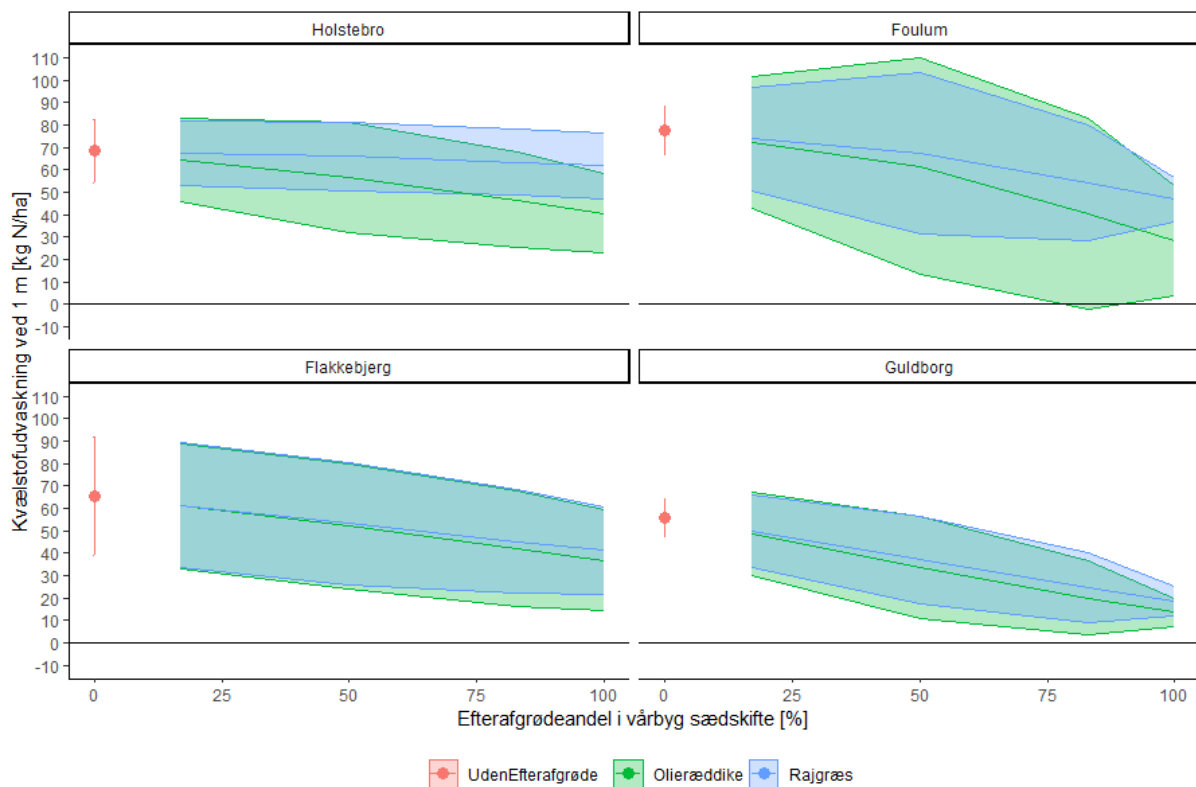
Ændring i N udvaskning (Sædskifte 6 – 5) [kg N/ha]	HOLSTEBRO: JB1		FOULUM: JB4		FLAKKEBJERG: JB6		GULDBORG: JB7	
	Olieræddike	Rajgræs	Olieræddike	Rajgræs	Olieræddike	Rajgræs	Olieræddike	Rajgræs
Gennemsnit	+6	+2	+12	+7	+5	+4	+6	+6
Standardafvigelse	± 14	± 4	± 39	± 25	± 13	± 12	± 15	± 14

Hvad er sammenhængen mellem stigende efterafgrødedække og udvaskning?

Vi har sammenlignet udvaskning i en meters dybde fra fem forskellige sædskifter, alle med vårbyg som hovedafgrøde, men med vekslende andel af efterafgrøder: hhv. 0/6 (0 %), 1/6, 3/6, 5/6, og 6/6 (100 %) år med efterafgrøder. I 3/6 sædskiftet er der efterafgrøder i alternerende år. Det tillader at beregne udvaskning som funktion af efterafgrødeandelen over hele sædskiftet.

Som det kan ses af Figur 3.9b falder udvaskningen med stigende andel efterafgrøde og effekten er tæt på lineær på Flakkebjerg og Guldborg, mens på Holstebro og Foulum får vi lidt større effekt, når vi lukker de sidste huller i afgrødedækket som også diskuteres i det foregående afsnit. På de mere sandede jorde er olieræddike mere effektiv end rajgræs til at reducere udvaskning, og det hænger sammen med roddybden i jorden, og hvornår udvaskningen sker. I Holstebro er den maksimale roddybde (som er bestemt i forbindelse med jordkarakterisering) 50 cm, og udvaskningen sker primært i september og oktober (Figur 3.9c). Afgrøden har på dette tidspunkt et relativt lille rodnet (uafhængigt om det er en efterafgrøde eller vinterafgrøde), og når det så også er begrænset i dybden, er N-optaget særdeles begrænset. Samtidig bevæger vandet, og derved også kvælstoffet, sig forholdsvis hurtigt i jorden pga. den sandede tekstur, så afgrøden ikke kan nå at optage det. I Foulum er den maksimale roddybde 120 cm, og udvaskningen er fordelt over flere måneder som følge af langsommere vandtransport forårsaget af højere ler-indhold. Når olieræddiken er mere effektiv på de to lokaliteter (Holstebro, Foulum), skyldes det formentligt, at den er i stand til at udvikle en kraftigere pælerod, der er hurtigere og mere effektiv til at optage kvælstof end rajgræsset. På de mere lerede jorde er der mindre forskel mellem de to efterafgrøder, sandsynligvis fordi vand- og kvælstofbevægelsen er langsommere.

Den store standardafvigelse (ses som farvet bånd i Figur 3.9b) er igen et udtryk for årsvariation over de ti års vejrdata (fra 2012 til 2022). I nogle år vil efterafgrøderne være enormt effektive til at reducere udvaskning, mens de i andre år kun vil gøre ganske lille forskel sammenlignet med vårbyg uden efterafgrøde. Det hænger sammen med vejrforholdene i det pågældende år, idét dyrkningspraksis ikke ændrer sig imellem årene. Hvis efterafgrøden har favorable forhold, altså tilpas fugt ved fremspiring, nok residualkvælstof efter vårbyggen, og et mildt efterår nedbør- og temperaturmæssigt, vil den være i stand til næsten at reducere udvaskningen til nul. Hvorimod, hvis efteråret er koldt og vådt med dårlige fremspiringsforhold, vil udvaskningsreduktionen være begrænset.



Figur 3.9b. Gennemsnitlig årlig kvælstofudvaskning [kg N/ha] ved 1 m ved stigende efterafgrødeandel i vårbyg sædskifte (sædskifter 2 til 6). Båndet indikerer standardafvigelse som udtryk for årsvariation.

Kan vinterhvede erstatte olieræddike som efterårsdække?

I Holstebro, Foulum, og Guldborg øges udvaskningen ved at erstatte vårbyg med olieræddike med vinterhvede i et enkelt år (Tabel 3.9e) – hhv. med 2, 9 og 3 kg N/ha over det seksårige sædskifte, dvs. med 12, 54 og 18 kg N/ha/år i det år, ændringen sker.

I Flakkebjerg reduceres udvaskningen derimod med 1 kg N/ha over de seks år, altså med 6 kg N/ha for det enkelte år med vinterhvede i stedet for vårbyg med olieræddike. Årsagen til resultatet i Flakkebjerg skyldes sandsynligvis to ting; det første, at der i den jordprofil, der er brugt til simuleringerne, er et mere kompakt underjordslag (som er målt i forbindelse med jordkarakterisering af nabomark til forsøgsarealet) i 20-45 cm dybde. Dette gør, at det kan tage længere tid for rodudviklingen ned i dybden, og derved forsinkes afgrødens (såvel vinterhvedes som efterafgrødes) evne til at optage kvælstof i dybden i efteråret. Den anden årsag er, at efterafgrøden på denne lokalitet nedmuldes i november måned, hvorved N-optaget naturligvis stoppes. Vinterhveden, derimod, har tiden til at udvikle sit rodnet hen over efteråret (om end langsomt) og vinteren samt et forspring over vårbyg i det tidlige forår ift. tidlig kvælstofoptag. Det tidlige perspektiv er derved særdeles vigtigt, når man opgør kvælstofudvaskning.

Tabel 3.9e. Gennemsnitlig årlig ændring i udvaskning [kg N/ha] ved 1 m over seks år ved at erstatte et års vårbyg m. olieræddike med vinterhvede efterfulgt af olieræddike (sædskifte 6 minus 7).

Ændring i N udvaskning (Sædskifte 6 – 7) [kg N/ha]	HOLSTEBRO: JB1	FOULUM: JB4	FLAKKEBJERG: JB6	GULDBORG: JB7
	Olieræddike	Olieræddike	Olieræddike	Olieræddike
Gennemsnit	+2	+9	-1	+3
Standard afvigelse	± 14	± 37	± 14	± 12

Er udvaskning den samme ved samme efterårsdække men forskelligt efterafgrødedække?
Tendensen i

Tabel 3.9e3.9e ses også ved sammenligning af efterårsdække (i begge tilfælde 83 %, dvs. fem ud af de seks år) og efterafgrødedække på hhv. 83 % (sædskifte 5, vårbyg med efterafgrøde i fem af seks år) eller 17 % (sædskifte 8, fire år vinterhvede, 1 år vårbyg m. efterafgrøde og 1 år vårbyg), (Tabel 3.9f).

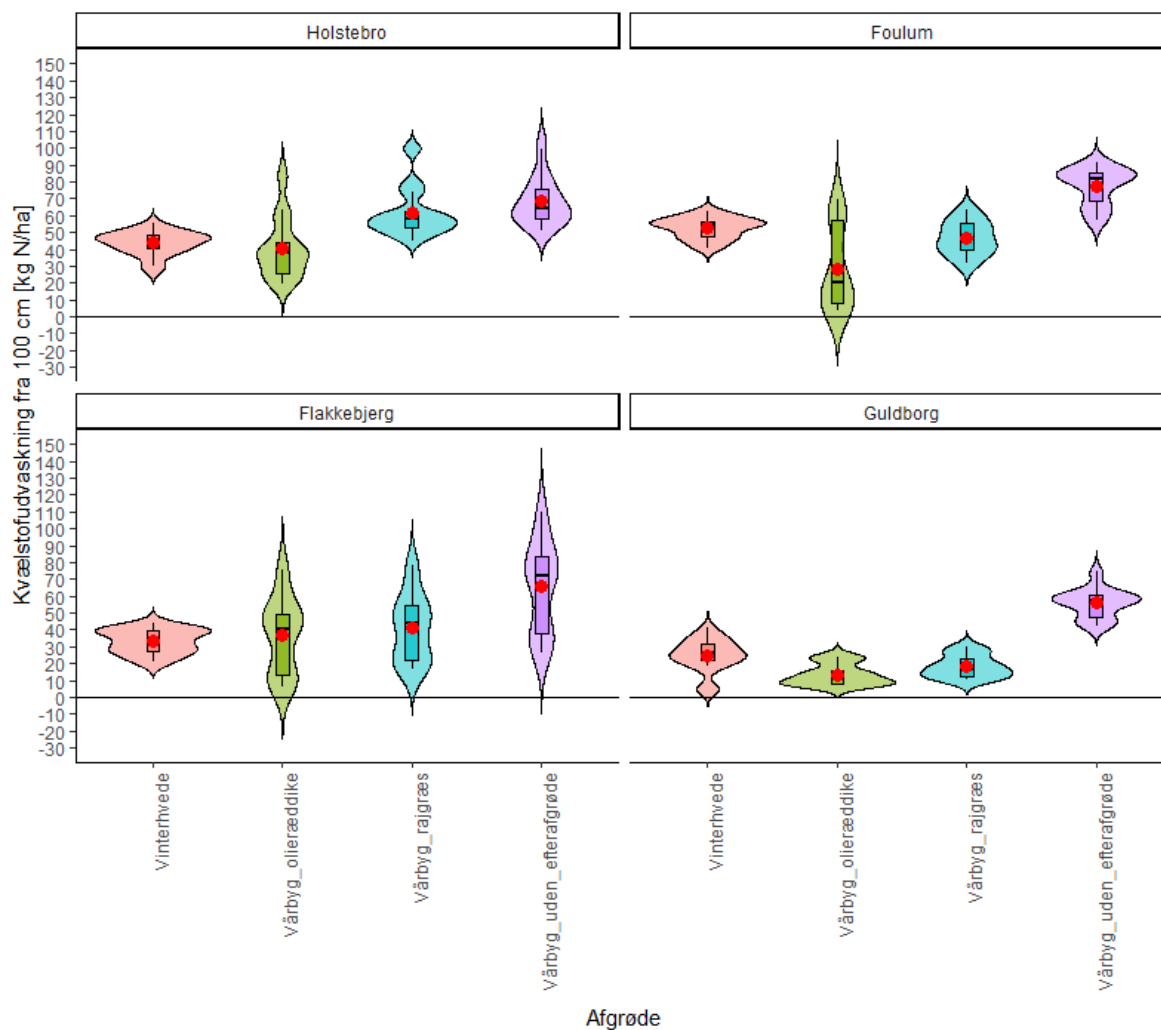
I alle lokaliteter, Flakkebjerg undtaget, er der en merudvaskning ved vinterhvededomineret sædskifte på mellem 1 til 15 kg N/ha/år. Det skal pointeres, at merudvaskningen ikke er proportionel med den øgede andel af vinterhvede fra 1/6 til 4/6 års vinterhvede i sædskiftet. I Flakkebjerg skyldes reduktionen i udvaskning med vinterhvede samme forhold som omtalt i foregående afsnit. Den forholdsvise lille forskel mellem vårbyg- og vinterhvede-dominerede sædskifter skyldes, at på trods af højere udvaskning fra vinterhvede i efteråret, har den i løbet af den resterende vækstperiode generelt samme eller lavere udvaskning end vårbyg med efterafgrøde. Det gælder dog ikke i Foulum, hvor olieræddiken er relativt mere effektiv – men også associeret med langt højere standard afvigelse (årsvariation).

Tabel 3.9f. Gennemsnitlig årlig ændring i udvaskning [kg N/ha] ved 1 m over seks år ved samme efterårsdække (83 %), men forskelligt efterafgrødedække (hhv. 83 % og 17 %, sædskifte 5 minus 8).

Ændring i N udvaskning (Sædskifte 5 – 8) [kg N/ha]	HOLSTEBRO: JB1	FOULUM: JB4	FLAKKEBJERG: JB6	GULDBORG: JB7
	Olieræddike	Olieræddike	Olieræddike	Olieræddike
Gennemsnit	+1	+15	-3	+8
Standard afvigelse	± 20	± 47	± 21	± 21

Giver vårbyg med efterafgrøde mindre udvaskning end vinterhvede?

I nogle af lokaliteterne (Holstebro og Flakkebjerg) giver vinterhvede samme eller lavere kvælstofudvaskning end vårbyg med efterafgrøde, særlig hvis man sammenligner med rajgræs. Olieræddiken er på tværs af lokaliteterne mere effektiv til at reducere udvaskningen. Det er dog vigtigt at have den årsvariationen med i overvejelserne, som vist af Figur 2.9d. Her vises den statistiske fordeling af gennemsnitlig årlig udvaskning for sædskifte 1, 2, og 6. Hver "violin" i figuren udregnes af nogle tusinder datapunkter (modellen har samlet set kørt i alt 13.888 modelår), og violinens kontur viser den statistiske fordeling af de datapunkter i henhold til y-aksen. For eksempel for vinterhvede i Holstebro kan udvaskningen variere fra 20 til 70 kg N/ha/år, men densiteten (og gennemsnittet) ligger omkring 45 kg N/ha/år. Det vil sige, at i de fleste år ligger udvaskningsniveauet deromkring, men der vil være år, hvor det har været 20 eller 70 kg N/ha/år. Yderpunkterne skal imidlertid ikke forstås som egentlige resultatværdier, hertil henvises til boxplots indeni figurene. Her vises median, 25 %- og 75 %-kvartiler som bokse, og maksimum og minimum som 'halerne'.

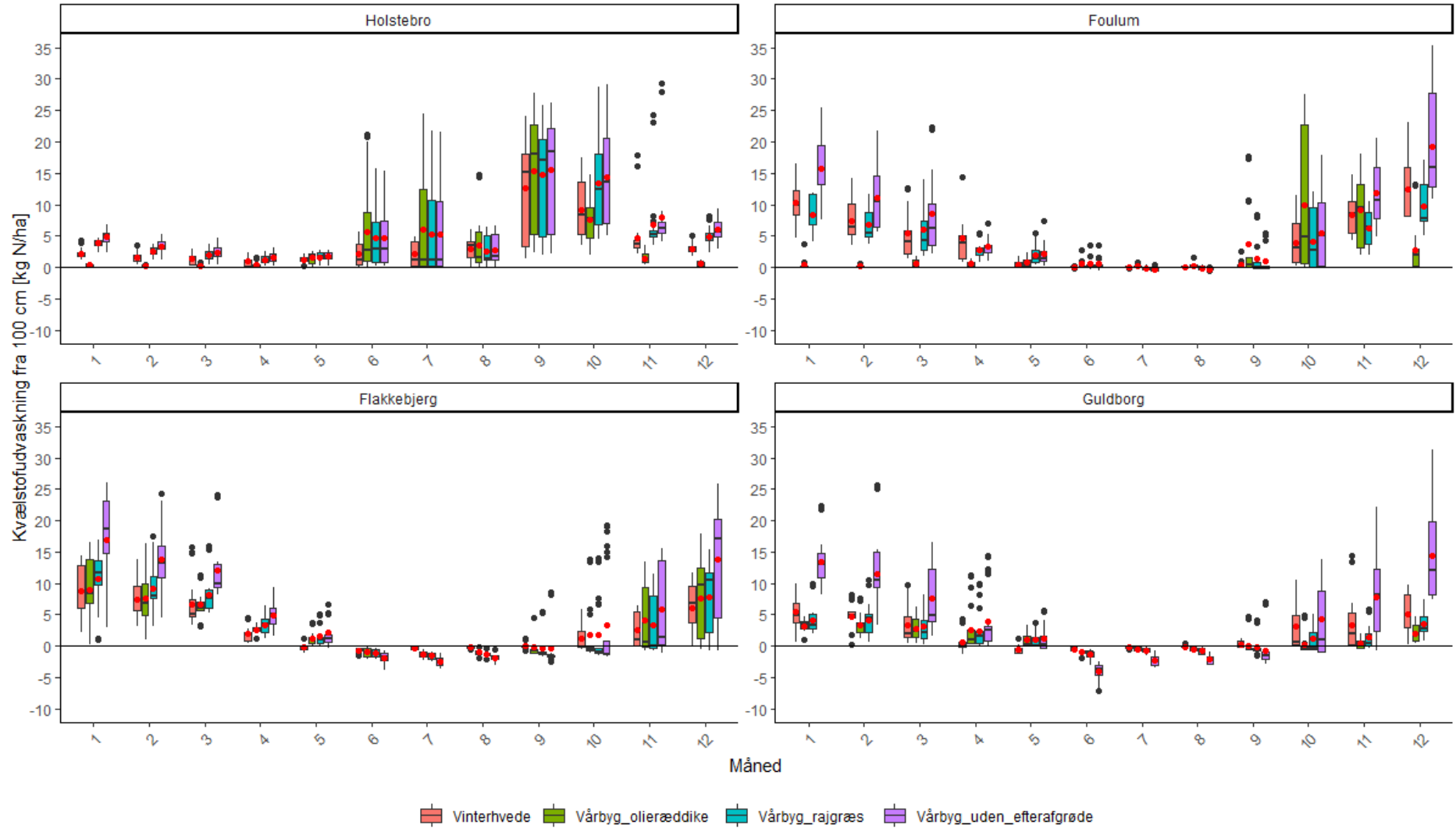


Figur 2.9d. Violinplot af årlig kvælstofudvaskning [kg N/ha/år] fra 1 m for sædskifte 1 (kontinuert vinterhvede), 6 (kontinuert vårbyg med hhv. olieræddike eller rajgræs efterafgrøde) og 2 (kontinuert vårbyg uden efterafgrøde). Violinfigurer viser den statistiske fordeling af resultaterne over årene, boxplots indeni viser median og interkvartil-bredder og maksimum-minimum værdier, og den røde plet angiver gennemsnittet.

Gennemgående for alle lokaliteterne, på nær Guldborg, er, at variationen af udvaskningen i vårbyg er meget stor (mest med olieræddike). Det hænger sammen med den tidlige dynamik af kvælstofudvaskningen. I nogle år vil der være et mildt efterår, hvor efterafgrøderne får godt fat, mens der i andre år vil være dårligere vækstbetingelser. Vinterhveden viser imidlertid meget mindre variation, hvilket vi tilskriver vinterhvedens langsommere efterårsvækst, hvor den optager relativt lidt kvælstof og derfor er mindre påvirket af dårlige vækstbetingelser i efteråret. Til gengæld vil den oftest være i stand til at optage kvælstof hurtigere og i større mængder i foråret end vårbyggen (sået i april), der først skal i gang med at danne et rodnet. Tidligere studier (Thorup-Kristensen et al. 2009) har vist, at vårbyg har potentiale til at nå samme roddybde og N-optag som vinterhvede, men at det alene er den korte vækstsæson, som gør, at den oftest ikke når at opfylde det potentiale. Det skal bemærkes, at den variation i vinterhveden kan være underestimeret i modellen, idét den ikke er fuldt i stand til at simulere effekten af roddød under vandmættede forhold (som vi ofte ser i vintermånederne).

Figur 3.9c3.9c viser den gennemsnitlige månedlige udvaskning, hvor det ses på tværs af lokaliteter, at olieræddiken er mere effektiv end vinterhvede i efteråret. I Foulum reduceres udvaskning stort set til nul i vinterperioden. I oktober er der dog forholdsvis høj udvaskning fra olieræddiken, hvilket hænger

sammen med et højere residualt kvælstofs-niveau. I Flakkebjerg og Guldborg ses det tydeligt fra november/december, efter efterafgrøden er nedmuldet, at forskellen udlignes mellem vinterhvede og vårbyg med efterafgrøde, hvilket bidrager til den relativt lille forskel i Figur 23.9c.



Figur 3.9c. Månedlig kvælstofudvaskning [kg N/ha/måned] for de fire lokaliteter med sædskifte 1 (kontinuert vinterhvede), 6 (kontinuert vårbyg med hhv. olieræddike eller rajgræs efterafgrøde) og 2 (kontinuert vårbyg uden efterafgrøde). Den røde plet angiver gennemsnitsværdien, og boxplots variationen over de 24 år som modellen er kørt for.

Er kvælstofudvaskning fra 1 meters dybde repræsentativt for total kvælstofudvaskning fra marken?

Om kvælstofudvaskningen ved 1 meter er repræsentativt for den totale udvaskning fra marken afhænger af, om der kan ske rodvækst under 1 meter (Tabel 3.9g). I Holstebro, hvor den maksimale rodvækst kun sker ned til 0,5 meter, er udvaskningen den samme ved 2 meter som ved 1 meter.

I Foulum kan rødder potentielt vokse ned til 1,2 meter, og her er der gennemsnitligt 6 kg N/ha optag om året fra under 1 meter i vinterhveden. Olieræddiken optager intet kvælstof i de 50 cm mellem 1 meters-grænsen og den maksimale roddybde, på trods af at den har betydeligt lavere udvaskning end vinterhveden (hhv. 28 og 45 kg N udvaskning/ha i 2 meter). Det er således et udtryk for, at vinterhveden henter kvælstoffet i dybden i den primære vækstsæson om sommeren.

I Flakkebjerg og Guldborg er optaget i hhv. 13 og 8 kg N/ha om året fra under 1 meter i vinterhveden, og hhv. 0 og 2 kg N/ha i olieræddiken. I Flakkebjerg bliver N-udvaskningen fra 2 meter derfor mindst fra vinterhveden (19 vs. 46 kg N/ha), mens den i Guldborg stadig bliver højere (16 vs. 12 kg N/ha). Her er det muligt, at olieræddiken på begge lokaliteter ville være i stand til at hente mere kvælstof i dybden, hvis ikke den blev nedmuldet allerede i november.

Selvom vi altså kan simulere, under hvilke forhold afgrødernes og efterafgrødernes N-optagelse fra under 1 meter betyder noget eller ej, er det, som det fremgår af kapitel 3.2 ofte ikke muligt at måle effekter af dette under markforhold og i forsøg.

Tabel 3.9g. Gennemsnitlig årlig kvælstofudvaskning [kg N/ha] ved 1 meter og 2 meter samt afgrøde-N-optag fra 1-2 meter for de fire scenarielokaliteter og sædskifte 1, 2 og 6 (med OR eller RG), såvel uden som med reduktion af N-tildeling for lovpligtig eftervirkning af efterafgrøde, 25 kg N/ha/år for Holstebro og Foulum, 17 kg N/ha/år for Flakkebjerg og Guldborg). Standardafvigelsen er et udtryk for variation mellem år (ti års vejrdata, 2012-2022).

Lokalitet (jordtype, max. rod- dyb)	Sæd- skifte nr.	Efterafgrø- dedække [% sæd- skifte]	Hovedafgrøde og evt. efterafgrøde (+N tildelt red. for eftervirkning)	Udvaskning Standard fra 1 meter afvigelse [kg N/ha/år] [kg N/ha/år]	Udvaskning Standard fra 2 meter afvigelse [kg N/ha/år] [kg N/ha/år]	Afgrøde N optag mel- lem 1-2 me- ter [kg N/ha]
Holstebro	6	100	Vårbyg m. olieræddike	41 ± 18	41 ± 16	0
(JB1, 0,5 m)	6	100	Vårbyg m. OR (+N efterv.)	37 ± 15	37 ± 14	
	6	100	Vårbyg m. rajgræs	62 ± 15	62 ± 17	0
	6	100	Vårbyg m. RG (+N efterv.)	58 ± 12	58 ± 15	
	2	0	Vårbyg u. efterafgr.	68 ± 14	68 ± 18	0
	1	0	Vinterhvede	44 ± 7	44 ± 11	0
	6	100	Vårbyg m. olieræddike	28 ± 25	28 ± 20	0
Foulum (JB4, 1,2 m)	6	100	Vårbyg m. OR (+N efterv.)	17 ± 14	17 ± 11	
	6	100	Vårbyg m. rajgræs	47 ± 10	46 ± 17	0
	6	100	Vårbyg m. RG (+N efterv.)	37 ± 9	36 ± 13	
	2	0	Vårbyg u. efterafgr.	78 ± 11	76 ± 27	1
	1	0	Vinterhvede	53 ± 6	45 ± 15	6
	6	100	Vårbyg m. olieræddike	37 ± 22	36 ± 18	0
Flakkebjerg (JB6, 2 m)	6	100	Vårbyg m. OR (+N efterv.)	26 ± 16	25 ± 12	
	6	100	Vårbyg m. rajgræs	41 ± 20	40 ± 19	1
	6	100	Vårbyg m. RG (+N efterv.)	28 ± 13	26 ± 12	
	2	0	Vårbyg u. efterafgr.	65 ± 27	64 ± 29	1
	1	0	Vinterhvede	33 ± 7	19 ± 9	13
	6	100	Vårbyg m. olieræddike	14 ± 6	12 ± 5	2
Guldborg (JB7, 2 m)	6	100	Vårbyg m. OR (+N efterv.)	11 ± 5	8 ± 3	
	6	100	Vårbyg m. rajgræs	18 ± 7	16 ± 6	1
	6	100	Vårbyg m. RG (+N efterv.)	12 ± 6	10 ± 3	
	2	0	Vårbyg u. efterafgr.	56 ± 8	53 ± 19	2
	1	0	Vinterhvede	25 ± 10	16 ± 6	8

Hvor meget påvirkes kvælstofudvaskningen af, om N-tildelingen reduceres med den lovpligtige eftervirkning af efterafgrøder?

I sædskifte 6, kontinuert vårbyg med efterafgrøde, har vi simuleret kvælstofudvaskningen ved 1 og 2 meter såvel uden som med reduktion af gødnings-N-tildeling for lovpligtig eftervirkning af efterafgrøde, 25 kg N/ha/år for Holstebro og Foulum (som tildeles husdyrgødning) og 17 kg N/ha/år for Flakkebjerg og Guldborg (udelukkende mineralsk N).

Som det fremgår af Tabel 3.9g, betyder den reducerede N-tildeling i Holstebro relativt lidt, kun ca. 4 kg N/ha mindre N-udvaskning, uanset om det er olieræddike eller rajgræs og heller ikke forskelligt, afhængigt af udvaskningsdybden. I Foulum bliver forskellen noget større, ca. 10-11 kg N/ha mindre N-udvaskning, uanset efterafgrøde eller dybde. I Flakkebjerg bliver forskellen dog endnu større, ca. 11-14 kg N/ha mindre N-udvaskning, uanset efterafgrøde eller dybde, og her går udvaskningen med efterafgrøde faktisk fra at være større end for vinterhvede til at være lavere, målt i 1 meters dybde, mens den fortsat er lavest for vinterhvede målt i 2 meters dybde. Den absolutte forskel er i Guldborg

mindre, 3-6 kg N/ha, uanset dybde, men relativt ift. den lave gennemsnitlige udvaskning stadig 20-35 % lavere, end hvis eftervirkning ikke var medregnet. Udvasningen bestemt i 2 meters dybde bliver dermed meget lav under efterafgrøderne, 8-10 kg N/ha, tæt på det baggrundsniveau, man kan typisk finde på naturarealer.

Samlet set bliver efterafgrøderne en del bedre end vinterhvede på Foulum og Guldborg og rajgræsset faktisk næsten lige så godt som olieræddike på Flakkebjerg og Guldborg. På tværs af lokaliteterne påvirker den reducerede N-tildeling ikke tørstofudbyttet væsentligt, men N-% i kerne (råprotein indholdet) er reduceret.

Effekten af de danske efterafgrødere er altså en kombination af den direkte effekt af efterafgrøden på N-koncentration i jordvandet gennem efterår og vinter samt den indirekte effekt af lavere N-tildeling (marginaludvaskningen). Vinterhveden derimod påvirker primært N-koncentration i jordvandet gennem vinter og forår og har derfor vanskeligt ved at konkurrere med den kombinerede effekt af efterafgrøde og reduceret N-tildeling. Men hvis hveden også blev tildelt en reduceret N-rate, ville der over sædskiftet også være en tilsvarende reduceret N-udvaskning.

Analysen i Tabel 3.9g er for kontinuerte afgrødefølger, og vi har ikke analyseret de blandede sædskifter for tilsvarende effekter af, om N-eftervirkningen medregnes eller ej, men det forventes, at de relative effekter vil være stort set de samme.

Hvilken betydning har jordens organiske puljer (SOM) på udvaskning?

Som nævnt tidligere, simulerer Daisy-modellen hele N-balancen i dyrkningssystemet, og dermed vil forskelle mellem enten akkumulering eller nedslidning af jordens organiske stof (og dermed organisk bundne N) også kunne påvirke N-udvaskningen. I de scenarier vi har simuleret her, har vi efter hvert sædskifte (seks år) genindstillet indholdet i jordens organiske stofpuljer til den oprindelige parameterisering. Det har vi gjort, for at resultaterne fra hvert sædskifte statistisk kan behandles som individuelle observationer, men det betyder også, at vi ikke kan estimere en langtidseffekt af det valgte sædskifte. For at undersøge om der er en væsentlig forskellig langtidseffekt af de forskellige sædskifte-scenarier på N-udvaskningen, har vi for sædskifte nr. 1, 2 og 6 (med RG og OR) undersøgt betydningen af, om de organiske stofpuljer enten i) ikke blev genindstillet (dvs. langtidseffekt), ii) genindstillet hvert 6. år (dvs. Kun sædskifteeffekt) eller iii) blev genindstillet efter hver vækstsæson (dvs. kun afgrødeeffekt).

Resultaterne fremgår af Bilag 1 og de viser samstemmende, at det ikke har den store indflydelse på den simulerede samlede N-udvaskning, om vi genindstiller de organiske puljer hvert år, efter hvert sædskifte, eller simulerer dem kontinuert over hele perioden. Vi kan derfor konkludere, at den korte, månedlige kvælstofdynamik er afgørende for den samlede årlige N-udvaskning og ikke en langtidseffekt. Altså mere hvornår det hurtigomsættelige kvælstof bliver frigivet, hvornår afgrøden kan optage det, og hvilke vejrforhold der påvirker afgrødens vækst.

Delkonklusioner

- Ét år med efterafgrøder, ud af seks år med kontinuert vårbyg, reducerer udvaskning i forhold til vårbyg med sort jord efteråret, med 1 til 6 kg N/ha for rajgræs og 4 til 8 kg N/ha for olieræddike, som gennemsnit over seks år, dvs. i året med efterafgrøde med hhv. 8-36 og 24-48 kg N/ha for hhv. rajgræs og olieræddike.
- Et 'hul' i et efterafgrødedække, altså et år uden efterafgrøde ud af seks års kontinuert vårbyg med efterafgrøde, øger udvaskning med 2 til 7 kg N/ha for rajgræs og 5 til 12 kg N/ha for olieræddike, som gennemsnit over seks år, dvs. i året uden efterafgrøde øges udvaskningen med hhv. 12-42 og 30-72 kg N/ha for hhv. rajgræs og olieræddike.

- En stigende andel efterafgrøder i kontinuert vårbyg (fra 0 til 100 %) reducerer udvaskningen (næsten) lineært for alle lokaliteter. Olieræddike er mere effektiv end rajgræs på tværs er lokaliteter.
- Vinterhvede er som oftest dårligere til at opfange kvælstof end olieræddike fra 1 meters dybde, og vinterhvede i stedet for olieræddike som efterårsdække i et enkelt ud af seks år påvirker derfor udvaskningen mellem -1 til +9 kg N/ha, som gennemsnit over de seks år, dvs. -6 til + 54 kg N/ha/år i det år, ændringen sker. Vinterhveden giver kun lavere udvaskning end olieræddiken efterfulgt af vårbyg, når rodudviklingen går langsomt, og efterafgrøden nedmuldes tidligt (som tilladt på lerjord).
- I forhold til undersøgt rajgræs som efterafgrøde viser simuleringerne, at vinterhvede på halvdelen af markerne er lidt dårligere og på den anden halvdel lidt bedre til at opfange kvælstof fra 1 meters dybde.
- Ved samme efterårsdække (83 %), men forskelligt efterafgrødedække (17 % eller 83 %), øges udvaskningen med mellem -3 til +15 kg N/ha i det vinterhvededominerede sædskifte (17 % efterafgrøde) ift. det vårbygdominerede med efterafgrøde (83 % efterafgrøde), som gennemsnit over seks år. Selvom efterafgrøderne er bedre end vinterhveden til at optage N i efteråret, øges N-frigivelsen og udvaskningen i vinter og forår, hvis de bliver tidligt nedmuldet (som tilladt på lerjord), mens vinterhvedens tidlige forårsoptag reducerer udvaskningen – i nogle tilfælde mere end det, efterafgrøden reducerer i efteråret, derfor i nogle tilfælde lavere udvaskning i det vinterhvededominerede sædskifte.
- Om udvaskningen er den samme i 1 og 2 meter dybde afhænger af, om hoved- eller efterafgrøder kan udvikle rødder under 1 meter. Hvis ikke, som på grovsandet jord, er der ingen forskel på dybderne. Kan rødderne nå længere ned afhænger af forskellen mellem dybderne af afstrømningen, og hvor hurtigt hoved- og efterafgrødernes rødder vokser i dybden, men især hvor lang tid de har til det. Efterafgrøder, der nedmuldes i efteråret, har derfor svært ved at konkurrere med vinterhvede, der vokser ind i næste forår. Det betyder, at bestemmer vi udvaskningen ved 1 meter, er udvaskningen under vinterhvede den samme eller lavere som i vårbyg med efterafgrøde på to af de fire lokaliteter og højere på de to andre lokaliteter. Men bestemmer vi udvaskningen ved 2 meter, er udvaskningen under vinterhvede den samme eller lavere som i vårbyg med efterafgrøde på fire af de fire lokaliteter.
- Hvis N-tildelingen reduceres med den lovpligtige eftervirkning af efterafgrøderne, bliver N-udvaskningen generelt mindre (mellem 3-14 kg N/ha), hvilket betyder, at udvaskningen under efterafgrøde i nogle tilfælde går fra at være større end for vinterhvede til at være lavere. Samlet set bliver efterafgrøderne en del bedre end vinterhvede på Foulum og Guldborg og rajgræsset faktisk næsten lige så godt som olieræddike på Flakkebjerg og Guldborg. Den reducerede N-tildeling påvirker ikke tørstofudbyttet i vårbyg væsentligt, men råprotein-indholdet falder. Efterafgrødereglene virker altså ved en kombination af den direkte effekt af efterafgrøden på N-koncentration i jordvandet og den indirekte effekt af lavere N-tildeling (marginaludvaskningen).
- Den korte, månedlige kvælstofdynamik er den mest afgørende for den samlede årlige udvaskning, og i mindre grad langtidseffekter af de forskellige sædskifter på jordens organiske puljer, dvs. i højere grad, hvornår det hurtigomsættelige kvælstof bliver frigivet, hvornår afgrøden/efterafgrøden kan optage det, og hvilke vejrforhold der påvirker deres vækst.

4 Opsummering

Problematikken, der er belyst i vidensyntesen er, hvorvidt udvaskningen fra vintersæd er større end fra efterafgrøder, og om der er geografiske (herunder klimatiske og jordbundsmæssige) forskelle på sammenligningen. Det er også spørgsmålet, om udvaskningen fra vintersæd kan være overvurderet, når den baseres på målinger i 1 meters dybde, fordi roddybden i vintersæd i forårs-/sommerperioden på lerjord er mere end 1 meter. Ud over forskellen i udvaskning mellem vintersæd og vårsæd er den tidsmæssige fordeling af udvaskningen mellem de to afgrødetyper belyst.

Udvaskning målt i 1 meters dybde fra vintersæd og vårsæd med efterafgrøder

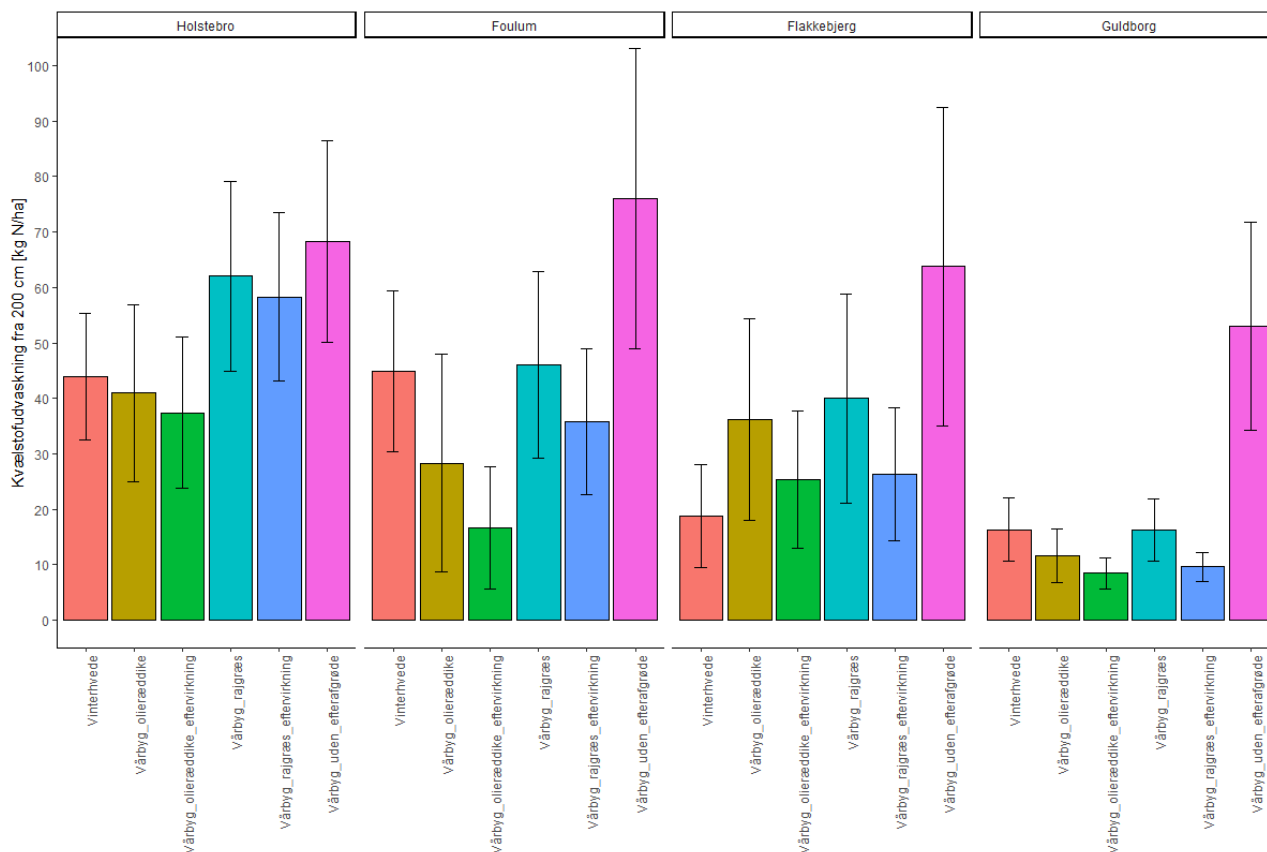
Forskellen i udvaskning er belyst i forsøg, hvor udvaskningen er målt med sugeceller, hvor der både indgår vårbyg med efterafgrøder og vinterhvede eller vinterrug. Der er gennemført forsøg på Foulum og Flakkebjerg i perioden 2015/16 til 2019/20. Vinterhvede på Flakkebjerg og vinterrug på Foulum er dyrket kontinuert i samme plot og sammenlignet med vårsæd med efterafgrøder også dyrket kontinuert. 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 reduceres med efterafgrøder sammenlignet med ukrudt og spildkorn. Sammenlignes udvaskning fra efterafgrøder med udvaskningen med 2. års hvede var der i alle år en større udvaskning fra vinterhvede sammenlignet med eftergrøderne. Disse resultater bekræfter således resultaterne fra de to forsøg udført af Aarhus Universitet, omend det absolutte niveau for udvaskning under vintersæd var noget lavere på Lolland i forhold til Flakkebjerg. Merudvaskningen fra vintersæd er i de enkelte år vist i Tabel 4a for de tre forsøgslokaliteter. Merudvaskningen fra vintersæd svinger betydeligt mellem årene og var specielt høj på begge lokaliteter i 2018/2019, som var præget af ekstreme tørke i 2018.

Tabel 4a. Sammenstilling af forsøg med direkte sammenligning af udvaskning fra vintersæd kontra efterafgrøder. Merudvaskning ved normal sået vintersæd er beregnet i forhold til efterafgrøde efterfulgt af vårsæd.

Lokation	Foulum (AU)				Flakkebjerg (AU)				Lolland (SEGES)			
	15/ 16	16/ 17	17/ 18	18/ 19	15/ 16	16/ 17	17/ 18	18/ 19	18/ 19	19/ 20	20/ 21	21/ 22
Efterårsdække												
Efterafgrøde efterfulgt af vårsæd	15	10	38	30	11	3	9	21	12	13	4	12
<i>Gns. på lokation</i>	23				11				10			
Merudvaskning ved normal sået vintersæd	24	19	9	35	21	19	54	89	2	14	6	12
<i>Gns. på lokation</i>	22				46				9			

I Landovervågningsprogrammet indgår monitoringsmarker med sugeceller med efterafgrøder og med vinterkorn på lerjord i Østdanmark. Sammenligninger af udvaskningen kan kun foretages mellem forskellige marker, idét begge afgrødefølger ikke indgår i samme mark. Resultaterne viser, at der fra jordvandsstationerne blev målt en lavere afstrømningsvægtet koncentration fra eftergrøder end fra vinterkorn set over afstrømningsperioden. Samtidig blev udvaskningen gennem dræn målt fra en række marker. Resultatet heraf behandles under udvaskning fra 2 meters dybde.

Københavns Universitet har gennemført en række beregninger med kvælstofmodellen Daisy. Modellen blev kalibreret på ovennævnte data fra forsøg på Foulum og Flakkebjerg, Hovedresultatet af simuleringerne er vist i Figur 4a.



Figur 4a. Gennemsnitlig årlig udvaskning [kg N/ha] fra 2 meters dybde. Afgrøder er kontinuert hoved- og evt. efterafgrøde (OR eller RG, såvel uden som med reduktion af N-tildelig for lovpligtig eftervirkning af efterafgrøde, 25 kg N/ha/år for Holstebro og Foulum, 17 kg N/ha/år for Flakkebjerg og Guldborg) for de fire scenarielokaliteter. Errorbars er standardafvigelse som udtryk for variation mellem år (ti års vejrdata, 2012-2022).

Modelleringen viser, at udvaskningen af kvælstof fra 1 meters dybde er lavere fra vintersæd end fra efterafgrøder af olieræddike i Flakkebjerg, men er højere på Foulum og Guldborg. Ved Holstebro er udvaskningen på samme niveau. Udvasningen fra rajgræs udlagt i vårbyg er betydeligt højere end for olieræddike sået efter høst. Sammenlignes vinterhvede med rajgræs, er udvaskningen fra vinterhvede lavere i Holstebro og Flakkebjerg og på samme niveau i Foulum og Guldborg.

SEGES har gennemført N-min-målinger i perioden fra 2022-2024 i marker med en efterårsbevoksning med vinterkorn og efterafgrøder. Resultater af N-min-målinger til 1 meters dybde viser et lavere N-min-niveau ved bevoksning med efterafgrøder end ved vinterkorn. N-min i oktober er korreleret med udvaskningen den følgende vinter, og derfor tyder resultaterne på en lavere udvaskning fra efterafgrøder.

Udvaskning fra 2 meters dybde

Udvaskningen fra 2 meters dybde er belyst ved målinger i sugeceller installeret i hhv. 1 og 2 meters dybde på AU ved Foulum og i udvalgte forsøg gennemført af SEGES. Potentialt for udvaskning er undersøgt af SEGES ved N-min-prøver til 150 cm's dybde.

Udvaskningen målt gennem dræn i Landovervågningsoplandene kan ligeledes anvendes til en forståelse af kvælstofdynamik under 1 meters dybde, da udvaskningen gennem dræn også påvirkes af kvælstof fundet under 1 meters dybde. Udvasningen fra 2 meters dybde er desuden modelleret med Daisy.

De tilgængelige data fra CENTS-forsøget på Foulum kan imidlertid ikke støtte hypotesen om, at vinterhvede optager betydelige mængder nitrat i dybder under 1 meter om vinteren og frem til forår. Denne analyse er dog ikke tilstrækkelig til at konkludere med sikkerhed, at der ikke findes en betydelig optagelse sted, hovedsageligt på grund af mangel på direkte samtidige sammenligninger mellem udvaskning under vinterhvede og efterafgrøder. Beregninger udført ved hjælp af data fra CENTS og understøttet af Daisy-modellering tyder dog på, at effekten af N-optagelse vha. dybe vinterhvederødder på N-udvaskning på den givne lokalitet er lille og ikke overstiger den naturlige baggrundsvariation.

I SEGES' udvaskningsforsøg var nitratkoncentrationen i 2 meters dybde relativt stabil over tid og mellem afgrøder. Desuden så koncentrationen i 2 meter ikke ud til at være påvirket af, at der tilføres større mængder kvælstof. Disse sugecellemålinger i 2 meters dybde kan derfor ikke give information om forskelle i afgrødernes optagelse af kvælstof under 1 meter. Dette forklares af resultater af Daisy-simulering ved tracer, som viser, at målinger i 2 meters dybde ofte indeholder en blanding af nitrat fra flere år. Hvorfor år-til-år-sammenligninger af nitratudvaskning i 2 meters dybde er vanskelige og må i stedet laves over flere års parallel dyrkning af efterafgrøder og vintersæd.

SEGES' N-min-målinger fra 2022-2024 til 150 cm's dybde viser, at både om foråret og efter høst var N-min-indholdet fra 100-150 ikke væsentligt forskellige mellem vinterhvede og vårbyg med efterafgrøder. Efter høst var N-min-indholdet i dette lag på et lavt niveau, og hverken vårbyg med efterafgrøder eller vintersæd har således efter vækstsæsonen efterladt væsentlige mængder kvælstof i de dybe lag. N-min-målingerne kan ikke bekræfte, at vinterhvede optager mere kvælstof fra de dybe lag end vårbyg, men det skal noteres, at begge afgrøder ikke efterlader væsentlige mængder kvælstof.

Udvaskningen gennem dræn er målt i en række marker i Landovervågningsprogrammet. Dræn er på lerjord typisk placeret i 100-120 cm's dybde. Udvaskningen fra dræn sker hovedsageligt, når grundvandsstanden på grund af efterårets nedbørsoverskud overstiger drændybden. En del af udvaskningen vil derfor stamme fra kvælstof, der er vasket ned under drændybden. I sammenligningen mellem udvaskning målt med sugeceller og gennem dræn sker afstrømningen gennem dræn på et senere tidspunkt end beregnet fra sugeceller i 1 meters dybde. I modsætning til udvaskningen fra sugeceller er den afstrømningsvægtede nitratkoncentration signifikant lavere fra vinterkorn end fra efterafgrøder.

Med Daisy er udvaskningen modelleret både fra 1 og 2 meters dybde. På de lettere jorde i nedbørsrige egne (Holstebro og Foulum) er udvaskningen fra 1 og 2 meter mere eller mindre identisk, roddybden i alle afgrøder overstiger typisk ikke 1 meter, dog optager vinterhveden i Foulum 6 kg N/ha fra under 1 meter (max. roddybde 1,2 meter), og dermed bliver udvaskningen fra 2 meter tilsvarende mindre. På de to mere lerede jorde med lavere vinter nedbør (Flakkebjerg og Guldborg) er udvaskningen fra vinterhvede væsentlig lavere fra 2 end fra 1 meter, mens udvaskning fra vårbyg med efterafgrøder er næsten identiske. Det skyldes, at især vinterhvede i modellen er i stand til at optage kvælstof under 1 meters dybde, hhv. 13 og 8 kg N/ha om året fra under 1 meter i vinterhveden på Flakkebjerg og Guldborg, men i mindre grad i efterafgrøderne, der på disse jorde typisk nedmuldes allerede i det sene efterår. I Flakkebjerg bliver N-udvaskningen fra 2 meter derfor mindst fra vinterhveden (19 vs. 46 kg N/ha), mens den i Guldborg stadig bliver højere (16 vs. 12 kg N/ha). Her er det muligt, at oljeræddiken på begge lokaliteter ville være i stand til at hente mere kvælstof i dybden, hvis ikke den blev nedmuldet allerede i november.

Hvornår på året sker udvaskningen fra vårsæd med efterafgrøder og vinterhvede?

Forsøgene på Foulum og Flakkebjerg, resultaterne fra Landovervågningsoplande og modelleringerne med Daisy viser de månedlige udvaskninger af kvælstof.

Resultaterne viser entydigt, at om efteråret frem til 1. december er udvaskningen mindst fra efterafgrøder. Det skyldes den hurtigere vækst af efterafgrøder sammenlignet med vinterkorn. Om foråret fra marts til april er udvaskningen derimod den samme eller større fra efterafgrøder end fra vinterkorn. Det kan skyldes, at efterafgrøder nedmuldes sent efterår eller der mineraliseres kvælstof over vinteren, der i forårs månederne bliver udsat for udvaskning, mens vinterhveden fortsætter sin rodvækst og dermed er i stand til at optage kvælstof, der ellers er blevet vasket dybere ned.

Udvaskningsprofilen over året kan være vigtigt i de kystvande, hvor tilførsel af kvælstof om foråret har større betydning for påvirkning af algevækst end tilførsler om efteråret.

Daisy-modellens scenarie-simuleringer med de ny-kalibrerede afgrødemodeller viser også, at udvaskningen er højest fra bar jord, og bekræfter, at efterafgrøderne generelt reducerer udvaskningen mere end vintersæd, især når man også reducerer N-tildelingen til den efterfølgende afgrøde med den lovpligtige eftervirkning af efterafgrøden. På de jorde, hvor vintersæden har mulighed for at opnå dybere rodudvikling, vil vintersæden imidlertid kunne optage mere kvælstof over forår og sommer, og dermed kan der være situationer, hvor den samlede årlige kvælstofudvaskning i gennemsnit ikke nødvendigvis højere end for efterafgrøderne. Desuden tyder scenariesimuleringerne over mange år på mindre variabilitet i effekten af vintersæd end af efterafgrøderne, som er mere følsomme overfor vejrforhold i de enkelte år (etablering og kort vækstsæson inden nedmuldning).

5 Samlet konklusion

Vidensyntesen skulle som udgangspunkt belyse, om nitratudvaskningen fra vintersæd er større end fra efterafgrøder. Resultaterne af nuværende målinger tyder på, at nitratudvaskningen fra 1 m dybde i de fleste tilfælde er større fra vintersæd end fra efterafgrøder. Der er dog indikationer på, at det under visse forhold, særligt på leret jord og under nedbørsfattige forhold, kan forekomme, at nitratudvaskningen fra vintersæd kan være den samme eller evt. mindre end fra efterafgrøder. Der findes dog endnu ikke tilstrækkelige målinger til at kunne give en generel beskrivelse af, hvor og hvornår dette kan være tilfældet.

Et underliggende spørgsmål i Vidensyntesen var, om vintersæd er i stand til at optage nitrat fra under 1 m dybde fra foråret og frem til høst, hvorfor vintersæden vil kunne reducere udvaskningen mere end antaget på basis af udvaskningsmålinger i 1 m dybde. Det fremgår af nedenstående punkter, at resultaterne peger i forskellige retninger, og Vidensyntesen bidrager ikke til entydige svar på dette spørgsmål.

Det vil kræve yderligere specifikke og målrettede forsøg og analyser at afdække de fysiske og klimatiske forhold, som skal være til stede, for at vintersædens kvælstofoptagelse under 1 meter kan betinge, at efterafgrøder kan erstattes af vintersæd med samme udvaskningsreducerende effekt som efterafgrøder.

- Fra 1 meters dybde viser sugecellemålinger i markforsøg og N-min-målinger, at udvaskningen fra vinterkorn er større end fra efterafgrøder, men forskellen er relative lille for nogle lokaliteter. Modellering med Daisy viser samme resultat for tre ud af fire modellerede lokaliteter. Resultater fra sugecelle- og drænvandsmålinger i Landovervågningsoplande viser små forskelle.
- Fra 2 meters dybde kan udvaskningen vanskeligt bestemmes ud fra de eksisterende sugecellemålinger. Modelleringer med Daisy viser, at på nedbørfattige lerede lokaliteter er udvaskningen i 2 meters dybde fra vinterkorn lavere eller på samme niveau som fra vårbyg med efterafgrøder.
- Gennem dræn er der i Landovervågningsoplande på lerede jorder i Østdanmark målt en højere udvaskning fra vinterkorn end fra vårbyg med efterafgrøder. Mens den målte afstrømningsvægtede nitratkoncentration er lavere fra vinterkorn end for efterafgrøder. Ingen af forskellene er signifikante.
- Resultater fra Landovervågningsoplande og modelleringer viser, at om efteråret er udvaskningen fra vinterkorn større end fra vårsæd med efterafgrøder. Om foråret er udvaskningen fra lerede jorde i Østdanmark derimod i nogle tilfælde lidt større fra vårsæd og efterafgrøder end fra vinterkorn. Udvasningsomfanget i forårsperioden er imidlertid begrænset.
- Sugeceller i 2 meters dybde og N-min-målinger har ikke kunne vise, at vinterhvede optager væsentlige mængder kvælstof under 1 meters dybde. Daisy-modellen estimerer en vis kvælstofoptagelse under 1 meters dybde på lerede jorder, hvilket er årsagen til en estimeret lavere udvaskning fra 2 meter end fra 1 meter på disse jordtyper.

6 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 dræned lerjorde behov for yderligere undersøgelser. Samtidig er der behov for bedre at kunne kvantificere forskellen i udvaskning på forskellige jordtyper, nedbørsregioner og i forskellige dyrkningsssystemer. 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 et område med lerjord og med lav vinternedbør og ét i Østjylland i et område med lerjord og høj vinternedbør. Forsøgene anlægges i marker, der er systemdræned, og hvor det er praktisk muligt at anlægge forsøg med direkte sammenligning af korn-efterafgrøde og korn-vinterkorn i fire gentagelser og med målebrønde til opsamling af drænvand.

Måling af kvælstofoptagelse om foråret under 1 meters dybde i vintersæd

Videnssynthesen indikerer, at sådanne undersøgelser ikke kan foretages ved blot at etablere sugeceller i 2 meters dybde i almindelige sædskifter. Undersøgelsen bør derfor gennemføres med ¹⁵N mærket kvælstof, som placeres i forskellige dybder på forskellige tidspunkter. Undersøgelsen gennemføres på flere jordtyper med forskellig gradient af ler i de dybere jordlag og med tilpassede afgrødefølge, som sikrer mod interferenser fra tidligere år.

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. Udvasningen bør måles i forsøgene med placering af sugeceller i 1 til 2 meters dybde. Forsøgene skal supplere det relativt sparsomme forsøgsgrundlag, den nuværende viden hviler på (forsøg på primært tre lokaliteter). Det foreslås, at forsøgene etableres på minimum seks lokaliteter.

Forbedring af mekanistiske modeller

Det er vigtigt, at evt. nye forsøg planlægges med henblik på at indsamle de nødvendige data for at sikre yderligere forbedring af de mekanistiske modeller, såsom Daisy og evt. APSIM. Dette skal gøres ved at inkludere flere data i kalibrering og evaluering/validering. Dette vil kunne forbedre beskrivelsen af, hvad der sker under 1 meters dybde, men også forbedre modellernes evne til at beskrive den tidlige N-dynamik såvel i jordens N puljer som hoved- og efterafgrødernes N optag.

Afsluttende kommentar

Det er sandsynligt, at nedbør- og afstrømningsmønstre i fremtiden vil ændre sig, så afstrømningen og tidspunktet for afstrømning vil ændre sig. Derfor bliver derfor vigtigt, at de kvælstofreducerende virkemidler tilpasses hertil.

Det er vigtigt at huske, at efterafgrøder også har andre formål end at modvirke kvælstofudvaskning. De bidrager bl.a. til plantediversitet, tilfører frisk organisk materiale til jordens mikroorganismer og giver kulstofinput til en biologisk aktiv og sund jord, begrænser erosion og modvirker jordpakning. Disse forskellige funktioner skal derfor afvejes af både landmænd og myndigheder når der tager stilling til virkemidler.

7 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. *Tidsskrift for Planteavl's Specialserie*.
- Andersen, M.N. (1985). Planternes tørkeresistens, rodudvikling og vandforråd på sandjord. Beretning nr. S 1775. Statens Planteavlsvforsøg. *Tidsskrift for Planteavl's 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. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jpln.200625222>
- Askegaard, M., Olesen, J.E., Rasmussen, I.A., & Kristensen, K. (2011). Nitrate leaching from organic arable crop rotations is mostly determined by autumn field management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 142(3-4), 149-160. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.04.014>
- Badawi, N., Karan, S., Haarder, E. B., Gudmundsson, L., Hansen, C. H., Nielsen, C. B., Plauborg, F., & Kørup, K. (2023). *The Danish Pesticide Leaching Assessment Programme* (Monitoring Results, Issue. GEUS). https://www.vap.dk/wp-content/uploads/2023/01/Test-af-cyazofamid-og-udvaskning-af-DMS-og-DMSA-2023-01-06_Samlet.pdf
- Bennetzen, F. (1978). Vandbalance og kvælstofbalance ved optimal planteproduktion. 3. Modeller og resultater. *Tidsskrift for Planteavl* 82, 191-220, Aarhus Universitet.
- Blicher-Mathiesen, G., Thorsen, M., Wienke, J., Petersen, J., Andersen, H.E., Frederiksen, R.F., Jensen, P.G., Hansen, B. og Thorling, L. (2024). *Landovervågningsoplände 2024*. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt center for Miljø og Energi, 294s. - Videnskabelig rapport nr. 628. https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Videnskabelige_rapporter_600-699/SR628.pdf
- Blicher-Mathiesen, G. og Thorsen, M. (2024). *Opdateret notat om nitratudvaskning og koncentrationer i jord- og drænvand opgjort for korn efterfulgt af vinterkorn eller efterafgrøder*. Data er indsamlet i Landovervågningen. Aarhus Universitet. – Nationalt center for Miljø og Energi DCE-notat.
- Bloch, N.F. (2024). *N-min data. Tabelbilag til vidensyntese*. https://projekt.seges.dk/-/media/segessinovation/promilleafgiftsfonden-for-landbrug/promilleafgiftsfonden-for-landbrug-2024/108558/pm_24_108558_ap2_n_min_data_tabelbilag_.ashx
- Børgeesen, C.D., Piil, K., Vinther, F.P. og Hvid, S.K. (2018). Sådan måles potentiale for kvælstofudvaskning. *Vand og jord*, 25, 150-153. http://vand-og-jord.dk/wp-content/uploads/2021/03/VJ-4_18_N-udvaksn-s150-153.pdf
- Cheshire, M.V., Bedrock, C.N., Williams, B.L., Chapman, S.J., Solntseva, I. & Thomsen, I. (1999). The immobilization of nitrogen by straw decomposing in soil. *European Journal of Soil Science*, 50(2), 329-341. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1999.00238.x>

- Christensen, B.T. (1986). Barley straw decomposition under field conditions: Effect of placement and initial nitrogen content on weight loss and nitrogen dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 18(5), 523-529. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(86\)90010-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(86)90010-6)
- Christensen, E.K. (2019, 23. marts). Drænledninger lægges tættere og dybere end tidligere. *Effektivt Landbrug*. <https://effektivtlandbrug.landbrugnet.dk/artikler/tema/draening/draenledninger-laegges-taettere-og-dybere-end-tidligere.aspx>
- Christensen, J. (2011, 18. marts). Vinterhveden når dybere end vi regner med. *Maskinbladet, Markbrug*,
- Curtin, D., Francis, G.S., & McCallum, F.M. (2008). Decomposition rate of cereal straw as affected by soil placement. *Australian Journal of Soil Research*, 46, 152-160. <https://doi.org/10.1071/SR07085>
- 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.
- Danmarks Meteorologiske Institut. (2022). *Sammendrag: Efterår 2022*. https://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Afrapportering/Seasonsammendrag/Sammendrag_2022_efteraar.pdf
- Danmarks Meteorologiske Institut. (2023). *Sammendrag: Efterår 2023*. https://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Afrapportering/Seasonsammendrag/Sammendrag_2023_efter%C3%A5r.pdf
- Erichsen, A.C., Nielsen, S.E.B., Timmermann, K., Højberg, A., Eriksen, J. og Pedersen, B.F. (2021). *Muligheder for optimeret regulering af N- og P-tilførslen til kystvandene med fokus på tilførslen i sommerhalvåret*. Analyse og kvantificering. Miljø- og Fødevarerministeriet, Teknisk notat, december 2021.
- Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B. og Jacobsen, B. (2020). *Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vand*. Aarhus Universitet – DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA-rapport nr. 174. <https://pure.au.dk/portal/da/publications/virkemidler-til-reduktion-af-kv%C3%A6lstofbelastningen-af-vandmilj%C3%B8et>
- Frederiksen, R.R., Larsen, S.E., Blicher-Mathiesen, G. & Kronvang, B. (2023). Development and application of a parsimonious statistical model to predict tile flow in minerogenic soils. *Agri. Water Management* 281: 108244. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108244>
- Greve, M.H. (2015). *Notat vedr. nyt JB-kort*. Aarhus Universitet – DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. https://pure.au.dk/ws/files/87283129/F_lgebrev_og_Besvarelse_Notat_vedr._nyt_JB_kort_28012015.pdf
- Gyldengren, J.G., Abrahamsen, P., Olesen, J.E., Styczen, M., Hansen, S. & Gislum, R. (2020). Effects of winter wheat N status on assimilate and N partitioning in the mechanistic agroecosystem model DAISY. *J Agro Crop Sci.* 2020; 206: 784–805. <https://doi.org/10.1111/jac.12412>
- 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 Planteavls-forsøg.

- Hansen, E.M. (2022). Udvaskningsforsøg ved Aarhus Universitet. I: Kristensen, N.H., Knudsen, L., Hansen, E.M., Blicher-Mathiasen, G., Jensen, L.S., Abrahamsen, P. og Christensen, J.T. (2022). *Vidensyntese om kvælstofudvaskning fra vintersæd kontra efterafgrøder, side 10-24.*
- Hansen, E.M. og 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(3), 868-881. <https://doi.org/10.2134/jeq2014.11.0482>
- Hansen, E.M., Vogeler, I. og 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. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1317-1333. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.42244>
- 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.
- Knudsen, L. (2022). Udvaskningsrisiko fra vinterhvede ved forskellige jordbearbejdningsystemer. I: Kristensen, N.H., Knudsen, L., Hansen, E.M., Blicher-Mathiasen, G., Jensen, L.S., Abrahamsen, P. og Christensen, J.T. (2022). *Vidensyntese om kvælstofudvaskning fra vintersæd kontra efterafgrøder, side 42-43.*
- Kollas, C., Kersebaum, K. C., Nendel, C., Manevski, K., Müller, C., Palosuo, T., Armas-Herrera, C. M., Beaudoin, N., Bindi, M., Charfeddine, M., Conradt, T., Constantin, J., Eitzinger, J., Ewert, F., Ferrise, R., Gaiser, T., de Cortazar-Atauri, I. G., Giglio, L., Hlavinka, P., ... Wu, L. (2015). Crop rotation modelling - A European model intercomparison. *European Journal of Agronomy*, 70, 98-111. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.06.007>
- Kristensen, H.L. & 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), 529-537.
- Kristensen, N.H., Knudsen, L., Hansen, E.M., Blicher-Mathiasen, G., Jensen, L.S., Abrahamsen, P., og Christensen, J.T. (2022). *Vidensyntese om kvælstofudvaskning fra vintersæd kontra efterafgrøder*. https://www.landbrugsinfo.dk/-/media/landbrugsinfo/public/8/6/a/kvalstofudvaskning_etterafgroder_vidensyntese.pdf
- Kristensen, N. H. & Montcalm, A. (2022). Udvaskning i et sædskifte med korn og raps på Lolland. Rapport. SEGES Innovation. https://www.landbrugsinfo.dk/basis/3/6/7/godskning_udvaskning_sadskifte_korn_raps
- Landbrugsstyrelsen. (2023). *Vejledning om gødsknings- og harmoniregler: Planperioden 1. august 2023 til 31. juli 2024*. Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri, Landbrugsstyrelsen. ISBN 978-87-7120-103-1

https://lbst.dk/Media/638530089529495881/Vejledning_om_goedskning_og_harmoniregler_2023_2024.pdf

- Laub, M., Ali, R.A., Demyan, M.S., Nkwain, Y.F., Poll, C., Högy, P., Poyda, A., Ingwersen J., Blagodatsky S., Kandeler E., Cadisch G., (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., Børgesen, C. D., Li, X., Andersen, M. N., Abrahamsen, P., Hu, C., & Hansen, S. (2016). Integrated modelling of crop production and nitrate leaching with the Daisy model. *MethodsX*, 3, 350-363. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2016.04.008>
- Miranda-Vélez, J.F. & Vogeler, I. (2022). Autumn Tillage Reduces the Effect of Plant Cover on Topsoil Nitrogen Leaching. *Nitrogen*, 3(2), 186-196. <https://doi.org/10.3390/nitrogen3020014>
- Møllerup, M., Abrahamsen, P., Petersen, C.T. & Hansen, S. (2014). Comparison of simulated water, nitrate, and bromide transport using a Hooghoudt-based and a dynamic drainage model. *Water Res Res* 50, 1080-1094. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2012WR013318>
- Møller, A.B. (2024) JB-kort i 10 m opløsning. Version 1.1. Aarhus Universitet. Efter Møller A.B., Greve M.H., Beucher A.M., 2024a. Opdateret jordbundstypekort. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet.
- 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. og Heidmann, T. (1990). EVACROP. Et program til beregning af aktuell fordampning og afstrømning fra rodzonen. Version 1.01. *Arbejdsnotat nr. 9, Afdeling for Plantevækst og Jord, Forskningscenter Foulum*, 65 sider.
- 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., Kersebaum, K. C., Angulo, C., Hlavinka, P., Moriondo, M., Olesen, J. E., Patil, R., Ruget, F., Rumbaur, C., Takác, J., Trnka, M., Bindi, M., Caldag, B., Ewert, F., Ferrise, R., Mirschel, W., Saylan, L., Siska, B., & Rötter, R. (2011). Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *European Journal of Agronomy*, 35(3), 103-114. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.05.001>
- Pedersen, E. J., Miller, D. L., Simpson, G. L. & Ross, N. (2019). Hierarchical generalized additive models in ecology: an introduction with mgcv. *PeerJ*, 7, e6876. <https://doi.org/10.7717/peerj.6876>
- Petersen, C., Hansen, E. og 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_kongresbi-lag_web.pdf

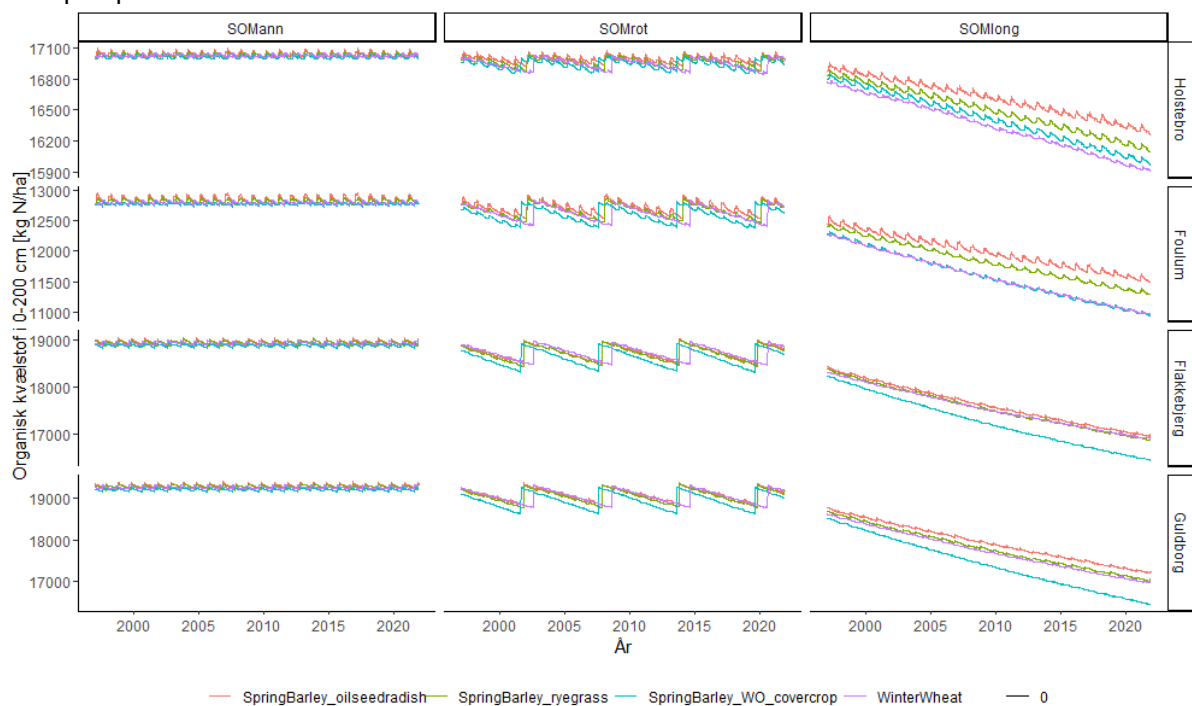
- Petersen, C.T. & Abrahamsen, P. (2021). *Predicting effects of soil compaction on crop yield and nitrogen dynamics*. Report, University of Copenhagen, Department of Plant and Environmental Sciences, 45 pp. <https://daisy.ku.dk/about-daisy/projects/commit/>
- Petersen, J.R., Blicher-Mathiesen, G., Rolighed, 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, K. (2016). Does earlier sowing of winter wheat improve root growth and N uptake? *Field Crops Research*, 196, 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.05.009>
- 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*, 230, 185-195.
- Schwartzkopff, M.V., Abrahamsen, P., Hansen, E.M., Eriksen J. & Jensen L.S. (unpubl.) The role of autumn coverage in nitrate leaching: a multi-site, multi-climate Daisy scenario analysis comparing catch crops and winter cereals. *In prep*.
- Simmelsgaard, S.E. (1998). The effect of crop, N-level, soil type and drainage on nitrate leaching from Danish soil. *Soil Use and Management*, 14, 30-36.
- Smith, P., Smith, J.U., Powelson, D.S., McGill, W.B., Arah, J.R.M., Chertov, O.G., Coleman, K., Franko, U., Froking, S., Jenkinson, D.S., Jensen, L.S., Kelly, R.H., Klein-Gunnewiek, H., Komarov, A.S., Li, C., Molina, J.A.E., Mueller, T., Parton, W.J., Thornley, J.H.M., & Whitmore, A.P. (1997). A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 81, 153-225. <http://dvjb.dtv.dk/cgi-bin/fulltext/elsevier/ohl0129a/00167061/sz972714/97000876.pdf>

- Styczen, M.E. og Abrahamsen, P. (2017). *Årsager til faldende proteinindhold i kerne fra ca. 1990 til 2015: Modelanalyse og resultater*. 128 sider. Rapport, Københavns Universitet, Institut for Plante- og Miljøvidenskab. <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>
- Thorsen, M. & Blicher-Mathiesen, G. (2023). Afstrømning og kvælstofkoncentrationer i jord-, dræn- og grundvand. 93 sider. Notat fra Natinalt center for Miljø og Energi nr. 58, 2023. https://dce.au.dk/leadadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2023/N2023_58.pdf
- Vogeler, I., Hansen, E.M., Nielsen, S., Labouriau, R., Cichota, R., Olesen, J.E., & Thomsen, I.K. (2020). Nitrate leaching from suction cup data: Influence of method of drainage calculation and concentration interpolation. *Journal of Environmental Quality*, 49(2), 440-449. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20020>
- Vogeler, I., Jensen, J.L., Thomsen, I.K., Labouriau, R. & Hansen, E.M. (2021a). Fertiliser N rates interact with sowing time and catch crops in cereals and affect yield and nitrate leaching. *European Journal of Agronomy* 124, 126244. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126244>
- Vogeler, I., Thomsen, I.K., Taube, F., Poulsen, H.V., Loges, R., & Hansen, E.M. (2021b). Effect of winter cereal sowing time on yield and nitrogen leaching based on experiments and modelling. *Soil Use and Management*, 38(1), 663-675. <https://doi.org/10.1111/sum.12747>
- Walter, H. (1957). Wie kann man den Klimatypus anschaulich darstellen? *Die Umschau in Wissenschaft und Technik*, 24, 751-753.
- Yin, X., Kersebaum, K.-C., Beaudoin, N., Constantin, J., Chen, F., Louarn, G., Manevski, K., Hoffmann, M., Kollas, C., Armas-Herrera, C.M., Baby, S., Bindi, M., Dibari, C., Ferchaud, F., Ferrise, R., de Cortazar-Atauri, I.G., Launay, M., Mary, B., Moriondo, M., ... Olesen, J.E. (2020). Uncertainties in simulating N uptake, net N mineralization, soil mineral N and N leaching in European crop rotations using process-based models. *Field Crops Research*, 255, Article 107863. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107863>

Bilag 1. Hvilken betydning har ændringer i jordens indhold af organisk stof SOM på den simulerede N-udvaskning?

I simuleringerne beskrevet i kapitel 3.9 har vi tilbagestillet mængden af organisk stof til den oprindelige parameterisering (totalt indhold og puljeinddeling) hvert sjette år, dvs. efter hvert sædskiftegennemløb (SOMrot). Dette er nødvendigt for at kunne behandle de enkelte år statistisk som uafhængige observationer. Vi har også forsøgt at tilbagestille de organiske puljer årligt (SOMann) eller helt at undgå at tilbagestille de organiske puljer (SOMlong) for at vurdere langtidseffekten af sædskiftet.

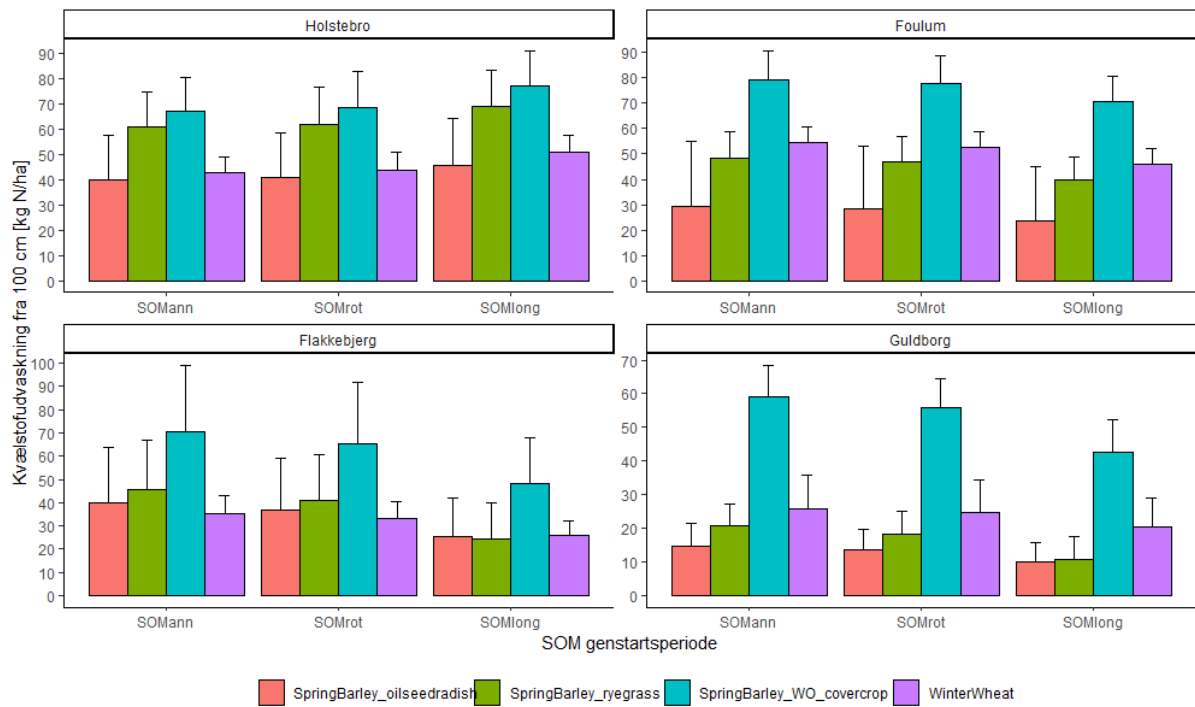
Effekten på den organiske pulje af kvælstof vises i **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**, hvor vi ser mængden af organisk kvælstof i jorden som funktion af tid. Det kan ses af figuren, at alle fire sædskifter udpiner jorden på alle fire marker. Generelt giver vårbyg uden efterafgrøde det største fald. Undtagelsen er Holstebro, hvor vinterhveden giver lidt mindre organisk N. Vårbyg med olieræddike er på alle marker det sædskifte, der er bedst til at holde på det organiske kvælstof. Faldet i organisk kvælstof vil være ledsaget af et tilsvarende fald i lagret kulstof, i forholdet ca. 11 kg C for hvert kg N. Fra et klimaperspektiv er det ikke ideelt.



Figur A. Organisk kvælstof [kg N/ha] over hele tidsperioden (24 år) ved de tre forskellige frekvenser for tilbagestilling af organisk-puljer. SOMann: hvert år, SOMrot: efter hvert seksårigt sædskifte (som gjort i resten af resultaterne), og SOMlong: slet ikke (altså simuleres langtidseffekt over 24 år).

Men som det fremgår af **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**, har det imidlertid ikke den store indflydelse på den simulerede samlede udvaskning, om vi genindstiller de organiske puljer hvert år, ved hvert sædskifte, eller simulerer dem kontinuerligt over hele perioden.

Vi konkluderer derfor, at det er den korte, månedlige, kvælstofdynamik, som er afgørende for den samlede årlige udvaskning, og ikke en langtidseffekt. Altså mere hvornår det hurtigomsættelige kvælstof bliver frigivet, hvornår afgrøden kan optage det, og hvilke vejrforhold der påvirker afgrødens vækst.



Figur B. Gennemsnitlig årlig kvælstofudvaskning [kg N/ha] for de fire lokaliteter som funktion af organisk-pulje genstartstid. SOMann genstartes hvert år, SOMrot efter hvert seksårigt sædskifte, og SOMlong slet ikke (altså 24 år).