

Et kvælstofudledningskort

Udledningen af kvælstof til overfladevand sker både fra punktkilder og diffuse kilder i et opland, herunder især fra landbrugsarealer. Muligheden for at etablere et kvælstofudledningskort på lokal skala (200-1200 ha) i 3 pilotoplande er blevet undersøgt. Kan det gøres? Og med hvilke usikkerheder. Og hvordan kan data anvendes til at undersøge den lokale grundvandsretention af kvælstof?

SOFIE G. W. VAN'T VEEN, ANE
KJELDGAARD, HENRIK TORNBJERG,
JØRGEN WINDOLF, NIELS B. OVESEN,
GITTE BLICHER-MATHIESEN &
BRIAN KRONVANG

Ved anvendelse af 2 års intensive måledata fra vandløb er et kvælstofudledningskort for 3 mindre pilotoplande blevet udarbejdet. Kvælstofudledningen fra landbrugsarealerne i pilotoplandene er blevet målt ved at etablere en hovedstation (hydrometristation) ved udløbene fra oplandene og synkronstationer inde i oplandet, for at analysere for forskelle i afstrømning og kvælstofudledning meget lokalt.

Kvælstofemissionerne fra dyrkede arealer i hvert delopland beregnes ved en kildeopsplitning af de målte kvælstoftransporter i vandløbene. Konceptet for en kildeopsplitning er nærmere forklaret i boks 1. Kvælstofudledningen fra de enkelte deloplande er herefter blevet sammenholdt med den beregnede udvaskning af nitrat, og der er etableret et lokalt kvælstofretentionskort over omsætningen af nitrat i grundvand.

Målemetoder

De tre oplande, som afvander til Jegstrup Bæk ved Viborg, Odder Å ved Fillerup syd for Aarhus og Saltø Å syd for Slagelse, er nærmere beskrevet i /3/. I hvert opland er der udført målinger ved en hovedstation som beskrevet i /4/ og ved et antal synkronstationer (tabel 1). Vandprøver er ved synkronstationerne udtaget hver uge i det første måleår (år 1: okt. 2014 til okt. 2015) samt hver 14. dag i det andet måleår (år 2: okt. 2015 til okt. 2016). Desuden er øjebliksvandføringen målt ca. hver 14. dag. For hver synkronstation er der etableret

BOKS 1

Kildeopsplitning af kvælstoftransporten fra et opland

Kildeopsplitningen af kvælstoftransporten fra et opland gennemføres ved anvendelse af en massebalance ligning /1/.

$$T_o = L_E - L_E R_L + P_E - P_E R_P + B_E - B_E R_B + A_E - A_E R_A$$

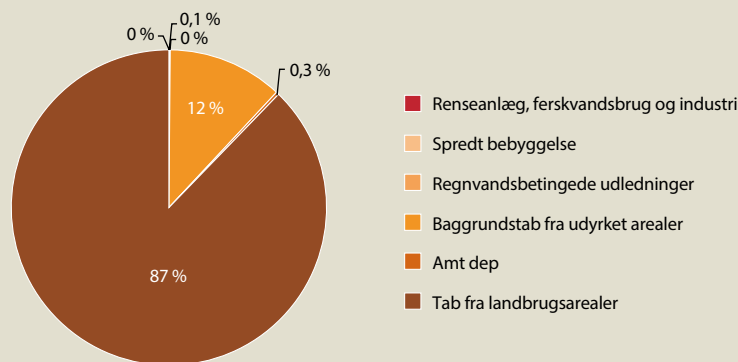
Hvor:

T_o = Total kvælstoftransport ud af et opland. L_E = Udledninger (emissioner) fra det dyrkede areal i oplandet til ferskt overfladevand. P_E = Udledninger (emissioner) af total kvælstof til ferskt overfladevand fra alle punktkilder i oplandet (rensning, særskilte industrielle udledninger, ferskvandsdambrug, spredt bebyggelse og regnvandsbetingede udledninger). B_E = Udledninger (emissioner) fra alle naturarealer i oplandet til ferskt overfladevand, hvorfra der naturligt altid vil være en baggrundsemission af total kvælstof. A_E = Den atmosfæriske deposition direkte på åbne vandoverflader i oplandet. R_x = Retentionen af total kvælstof i overfladevand i oplandet.

Figuren viser et eksempel fra Saltø Å opland over den procentmæssige andel af de forskellige udledninger der indgår i kvælstoftransporten fra oplandet. I Saltø Å opland er overfladevandsretentionen estimeret til 4 % ud fra den nationale kvælstofmodel /2/.

Det vil sige, at den målte transport (T_o) er summen af alle kilders udledning fratrukket retentionen, som hver enkelt kilde har været påvirket af på vejen igennem ferskvandssystemet i oplandet. Den samlede mængde kvælstof, der er fjernet via den retention, som hver enkelt kilde har været udsat for, benævnes ofte R_o , som er opgjort i procent. Beregningen af emissionen af total kvælstof fra dyrkede arealer kan derfor estimeres ved hjælp af følgende ligning, hvor det antages, at alle kilder er udsat for samme retention:

$$L_E = T_o / (1 - R_o) - P_E - B_E + A_E$$



Kildeopsplitning af den totale kvælstoftransport. Eksempel fra Saltø Å pilotopland.

en lineær sammenhæng til vandføringen ved hovedstationen målt den samme dag. De opstillede sammenhænge har generelt en høj forklaringsværdi, hvor flertallet har en $R^2 > 0,9$, dog har enkelte en R^2 på ned til 0,7. Sammenhængene er anvendt ved hver synkronstation til at beregne en døgnmiddelvandføring for de 2 måleår ud fra døgnmiddelvandføringen ved hovedstationen. Transporten af total kvælstof (TN) og nitrat-N ($\text{NO}_3\text{-N}$) er beregnet ved lineær interpolation og er blevet biaskorrigeret med de afvigelser, som er beskrevet i /4/, hvor en gennemsnitlig underestimering i størrelsesordenen -2,7 til 0,9 % blev konstateret for de 3 vandløb. Afgrænsningen af oplandene er sket i ArcGIS under hensyntagen til viden om drænforhold indsamlet fra landmændene i områderne. Data om arealanvendelse er fra BaseMap /5/ og data om udledning fra punktkilder i deloplandene er hentet fra spildevandsdatabasen ved Miljøstyrelsen. Nitratudvaskning er beregnet med NLES4 modellen som årlige udvaskninger i de 2 agrohydrologiske år 2014-15 og 2015-16. Gennemsnittet for kvælstofretentionen i grundvand for deloplandene i de 2 måleår er beregnet ud fra forskellen mellem gennemsnitligt tab af total kvælstof fra dyrkede arealer til vandløbskant og gennemsnitlig udvaskning fra rodzonen fra dyrkede arealer i de 2 måleår /6/.

Deloplandenes størrelse i Jegstrup Bæk opland varierer mellem 448 ha og 1183 ha, og dyrkningsgraden mellem 54 % og 77 %. For Odder Å opland varierer deloplandene fra 132 ha op til 692 ha med dyrkningsgrad fra 14 % til 72 %. Deloplandene i Saltø Å varierer fra 266 ha til 992 ha, og dyrkningsgraden varierer mellem 55 og 94 % (Tabel 1).

Kvælstoftab fra dyrkede arealer i deloplande

I figur 1 fremgår resultaterne af de 2 års målinger for hvert af de deloplande, der fremkommer fra synkronmålestationerne i de 3 pilotoplande. Generelt er vandafstrømningen størst i oplandet til Odder Å. Samtidig ses det, at kvælstoftabet fra de dyrkede arealer og de vandføringsvægtede koncentrationer af kvælstof er langt større i de mere detailldrænedede oplande til Odder Å og Saltø Å end i det mere sandede og nærmest ikke-drænedede opland til Jegstrup Bæk (Fig. 1). Derudover er der konstateret en generel stigning fra år 1 til år 2 på ca. 0,5 mg N/l i koncentrationen af organisk kvælstof i vandløbene i de 3 pilotoplande, mest udtalt for deloplandene i Odder Å. Organisk kvælstof er i denne artikel defineret som total-N fratrukket nitrat-N.

Der er generelt ikke de store forskelle mellem 1. og 2. års målinger af afstrømningen i

Tabel 1. Oversigt over deloplande i de 3 pilotstudieområder.

Oplands ID	Station nr.	Vandløbs navn	Oplands-areal (ha)	Dyrkningsgrad (%)
1	19000042	Hovedstation, Tingvad bro	541	77
2	19000043	Jegstrup Bæk, Viborg	448	68
3	19000044	Jegstrup Bæk, Jegstrupvej	1183	54
	Samlet opland Jegstrup bæk		2173	63
1	27000552	Hovedstationen, OS Odder by	202	59
2	27000003	Odder Å, Naturstyrelsen	692	72
3	27000277	Dyrehave Bæk, Bjørnegrotten	217	71
4	27000557	Odder Å Lundsgaard	543	55
5	27000810	Ulvskov Bæk, Vandværket	132	54
	Samlet opland Odder Å		1786	57
1	57000643	Hovedstation, Ting Jellinge bro	485	79
2	57000878	Pibergrøft	403	87
3	57001034	Ellebæk	298	88
4	57001035	Maglemose rende	266	94
5	57001036	Piber å	347	83
6	57001037	Snogebæk	945	55
7	57001038	Snogebæk Tilløb	992	80
	Samlet opland Saltø Å		3737	77

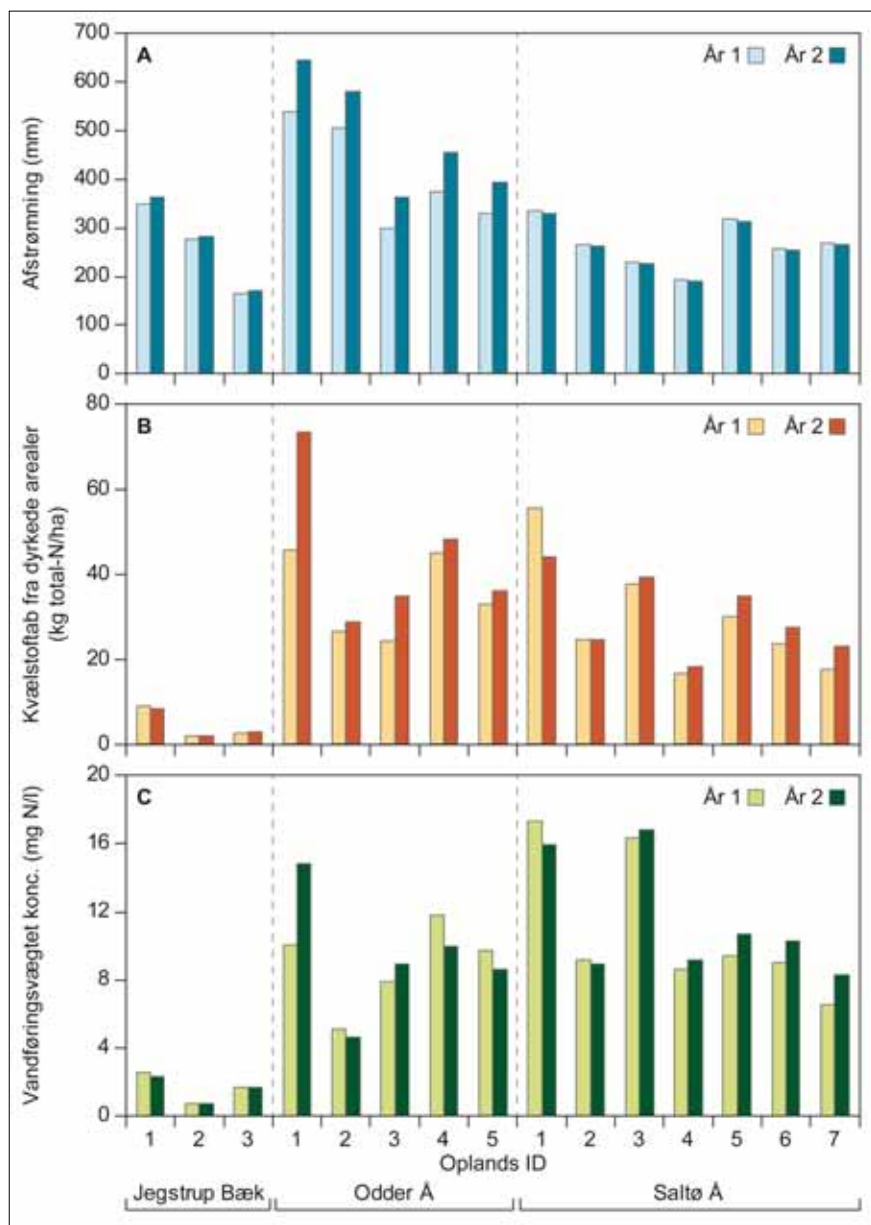
deloplandene i Jegstrup Bæk og Saltø Å (<5 %). Derimod stiger afstrømningen i Odder Å fra år 1 til år 2 i alle deloplande med 10-20 % (Fig. 1). Der er givetvis tale om, at grundvandsmagasiner fyldes op efter det tørre forår og sommer 2014, da der ikke er væsentlige forskelle i vinternedbøren i de 2 måleår (Østjylland: år 1: 446 mm; år 2: 432 mm. Hele landet år 1: 245 mm; år 2: 223 mm /7/).

Tabet af kvælstof fra dyrkede arealer og de vandføringsvægtede koncentrationer er nærmest ens i de 2 måleår i Jegstrup Bæk og Saltø Å oplandene, dog med mindre udsving i enkelte deloplande (Fig. 1). Mest udtalt er ændringen i opland 1 og 3 i Odder Å oplandet, hvor tabet af kvælstof fra dyrkede arealer stiger med henholdsvis 61 % og 43 %, mens den vandføringsvægtede koncentration stiger med 34 % og 19 % fra det 1. til 2. måleår (Fig. 1). Den relativt store stigning i de 2 deloplande i Odder Å kan kun delvist forklares med stigningen i afstrømningen. I delopland 1 er en stor andel af stigningen forårsaget af en stigning i koncentrationen af organisk kvælstof i vandløbet, mens en mindre del er fra stigning i nitrat-N. I delopland 1 er der da også beregnet en større stigning (42 %) i rodzoneudvaskningen af nitrat-N fra år 1 til år 2, mens stignin-

gen i organisk N både kan stamme fra udledninger fra punktkilder og andre aktiviteter, som rydning af skov mv. i nærheden af vandløbet, da en stor del af deloplandet består af skov (34 %). I Saltø Å oplandet er der observeret en mindre stigning i tab af kvælstof fra dyrkede arealer og den vandføringsvægtede koncentration af kvælstof i nogle deloplande og fald i andre (Fig. 1). Ændringerne kan ikke umiddelbart forklares ud fra en ændret udvaskning af nitrat fra år 1 til år 2, men kan hænge sammen med den generelle stigning i koncentrationen af organisk kvælstof i vandløbene, som kan skyldes flere faktorer såsom større udledning fra punktkilder, sløjfning af randzonerne etableret i 2012 i foråret 2016, mv.

Etablering af et kvælstofudledningskort

Et lokalt kvælstofudledningskort for dyrkede arealer baseret på et gennemsnit af de to års målinger for de 3 pilotoplande fremgår af figur 2. Kortet viser kvælstofudledningen til vandløbskant i hvert af de små deloplande. Kvælstofudledningen fra de dyrkede arealer til overfladevand i Jegstrup Bæk er forholdsvis lille fra alle deloplande (<3 kg N/ha), hvilket



Figur 1. Forskelle mellem de to måleår i afstrømning, kvælstoftab fra dyrkede arealer efter biaskorrektur af kvælstoftransporten og vandføringsvægtet koncentration i de 3 pilotoplande.

også er tilfældet med de vandføringsvægtede koncentrationer af kvælstof (Fig. 2). Afstrømningen varierer en del mellem de enkelte deloplande, hvilket formentlig kan relateres til indflydelsen fra befæstede arealer i den østlige del og beliggenheden af kildepladser med vandindvinding nord for oplandet.

I Odder Å er både afstrømningen og den totale kvælstofudledning fra de dyrkede arealer til overfladevand relativt stor og med en stor rumlig variation fra henholdsvis 330-591 mm og fra 28-59 kg N/ha (Fig. 3). Den resulterende vandføringsvægtede koncentration i det afstrømmende vand fra dyrkede arealer har derfor også en relativ stor variation mellem deloplandene på 5-11,4 mg N/l (Fig. 3).

Afstrømningen er i oplandet til Saltø Å i intervallet 191-331 mm med størst afstrømning i

de nederste oplande i hovedløbet af Saltø Å. Tilvæksten i afstrømning skyldes formentlig, at et større område med lavbundsjord er afvandet med en pumpestation. Tabet af kvælstof fra dyrkede arealer til vandløbskant varierer fra 17-50 kg N/ha (Fig. 3). Den vandføringsvægtede koncentration i det afstrømmende vand fra dyrkede arealer varierer med ca. en faktor 2 inden for oplandet (7-17 mg N/l) med de højeste koncentrationer i det vestlige delopland 3 og det sydligste delopland 1 (Fig. 3). I det sidste er der fundet et relativt højt organisk kvælstofindhold (34 %).

Usikkerhed ved etablering af et kvælstofudledningskort

I kvælstofudledningskortet i figur 3 er der hvert år korrigeret for den bias (afvigelse),

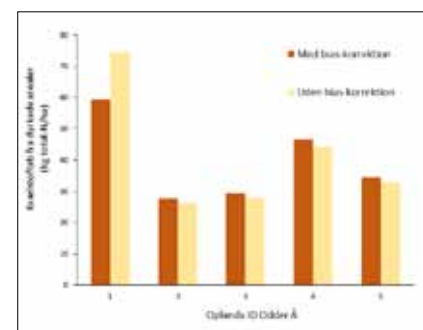
som fremkommer ved, at der ved synkronstationerne er udtaget punktprøver til analyse af kvælstof, som det er vist i /4/. Er der tale om måling ud fra en 14. dags strategi til bestemmelse af den årlige kvælstoftransport ved en synkronstation, er der en forventet bias i form af en underestimering af kvælstofudledningen beregnet for Jegstrup Bæk på gennemsnitlig -0,3 %, Odder Å på -4,7 %, og Saltø Å på -2,7 %. Betydningen af den bias, som fremkommer ved stoftransportberegningen ud fra punktprøver før og efter bias-korrektion er vist i figur 2 for deloplandene i Odder Å oplandet.

Hvor præcist det resulterende kvælstoftab er og dermed også den vandføringsvægtede koncentration af kvælstof er bestemt, er nærmere beskrevet i /4/. I de 3 pilotoplande er der konstateret en gennemsnitlig præcision på bestemmelse af den årlige kvælstoftransport ved en 14. dags prøvetagningsstrategi udtrykt som et 95 % konfidens interval på 3,1 % i Jegstrup Bæk, 3,3 % i Saltø Å og 5,0 % i Odder Å.

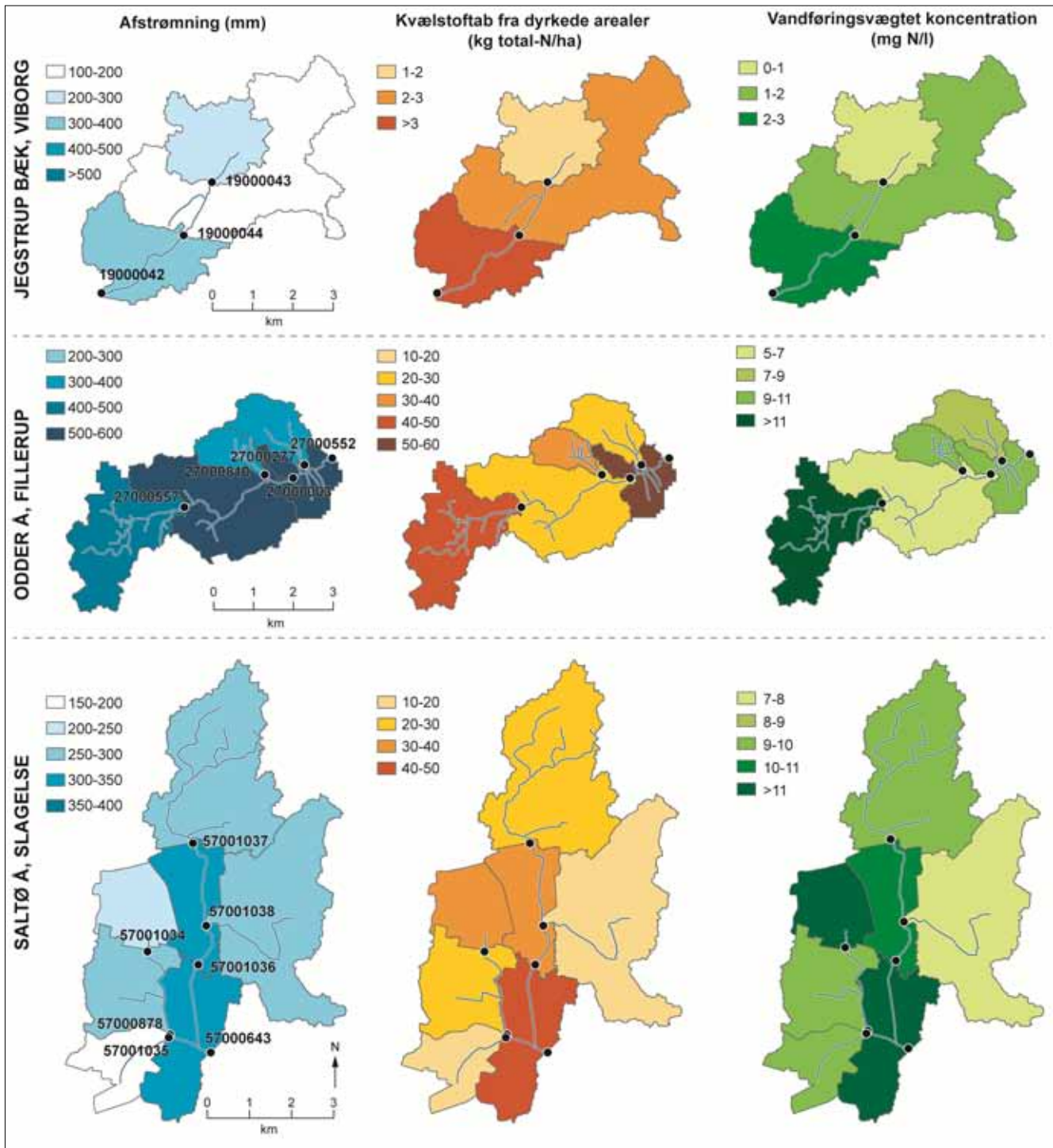
Beregnet kvælstofretention i grundvand

Resultaterne af den beregnede kvælstofretention i grundvand i deloplandene til Jegstrup Bæk viser, at retentionen er større end 80 % i alle deloplande (Fig. 4). I deloplandene til Odder Å er der derimod en stor variation i den beregnede kvælstofretention ud fra synkronmålingerne, der varierer fra at være mindre end 0 til intervallerne 20-40 % og 40-60 % (Fig. 4). I Saltø Å varierer kvælstofretentionen ligeledes mellem deloplandene (Fig. 4). Den gennemsnitlige grundvandsretention i hver af de 3 pilotoplande er beregnet til 93 % i Jegstrup Bæk oplandet, 30 % i Odder Å og 36 % i Saltø Å. Kvælstofretentionen i grundvand er i dette tilfælde beregnet ud fra 2 års data.

Det fremgår i en analyse af betydningen af antal måleår ved retentionsberegninger /6/, at middelfvigelsen fra "den sande retention" ved brug af 2 års data er på 10 %. Antallet af



Figur 2. Forskel på gennemsnitligt kvælstoftab fra dyrkede arealer mellem de to måleår i Odder Å deloplande henholdsvis med og uden biaskorrektur af de årlige kvælstoftransporter.



Figur 3. Gennemsnit mellem de 2 års måledata fra deloplände i de 3 pilotoplände. Der er vist afstrømning, tab af total kvælstof fra dyrkede arealer til vandløbskant beregnet ved hjælp af kildeopsplitning og vandføringsvægtet koncentration af total kvælstof fra dyrkede arealer efter biaskorrektion af kvælstoftransporten.

måleår har altså en stor betydning for sikkerheden ved beregning af retentionen. Ved brug af 10 års måledata opnås en middelfvigelse fra "den sande retention" på 4% /6/. Derudover er grundvandsretentionen beregnet alene ved at sammenholde udvaskningen af nitrat-N fra rodzonen med emissionen af total N fra dyrkede arealer ved vandløbskanten. Betydningen af emissionen af organisk kvælstof er derfor ikke inkluderet. Det fremgår dog, at organisk kvælstof i nogle deloplände er af stor

betydningen, f.eks. i delopländ 1 i Odder Å, hvor nitrat-N kun gennemsnitligt udgør 66 % i de 2 måleår og ved delopländ 1 i Saltø Å, hvor nitrat-N tilsvarende kun udgør 73 %. Begge deloplände er derfor markeret med en negativ retention i grundvandet, som ikke er reel (Fig. 4). Andre udfordringer ved beregning af grundvandsretentionen er beskrevet i /6/.

Kvælstofudledning og målsætninger

Der foreligger pt. ingen målsætninger eller

krav for kvælstofudledningen til vandløbskanten i et vandløb på lokal geografisk skala. Det eneste officielle, som de lokale målinger kan holdes op imod, er målsætningerne på kystvandsopländsniveau. Herefter kan anvendelse af retentionen i overfladevand og grundvand fra det officielle N-retentionskort på ID15 niveau bringe målsætningen ind i delopländet i det samlede kystvandsopländ /2/.

Sammenlignes udledningskortets kvælstoftab med målsætningen for kystvandene til de

3 pilotoplande i 2027 ifølge vandområdeplanerne, fremgår det overordnet set, at målsætningen for Jegstrup Bæk allerede opfyldes selv efter en beregnet normaliseret kvælstofudledning med referenceperioden 2000-2015. Derimod er der behov for en stor reduktion af den normaliserede kvælstofudledning fra de dyrkede arealer i både Odder Å (ca. 70 %) og Saltø Å (ca. 50 %) (Tabel 2). Ses der på udlædningskortets kvælstoftab inden for hvert pilotopland i forhold til målsætningen, fremgår det, at alle deloplande i Jegstrup Bæk opfylder målsætningen (Fig. 3). I Odder Å er delopland 2 med et tab på 28 kg N/ha det delopland som er tættest på at opfylde målsætningen. I Saltø Å er delopland 4 med et tab på 17 kg N/ha tæt på at opfylde målsætningen på 10,7 kg N/ha (Tabel 2). I dette delopland skal der altså ikke anvendes lige så mange virkemidler, som i eksempelvis delopland 1, hvor tabet er på 50 kg N/ha (Fig. 3). Kvælstofudledningskortet kan altså bruges til at målrette virkemidler mod de deloplande, hvor effekten af virkemidlerne er størst.

Konklusion og perspektivering

Målingerne af kvælstofemission i vandløb giver en god mulighed for via udarbejdelse af et kvælstofudledningskort fra dyrkede arealer at få overblik over de lokale "hot spot" områder på en skala ned til 200-400 ha deloplande. Dette kræver vel og mærke, at de hydrologiske oplande kan afgrænses med en rimelig stor sikkerhed.

Den lokale grundvandsretention af kvælstof kan derefter bestemmes ud fra synkronmålinger, selvom der skal tages højde for, dels at der skal måles i flere år, og dels at der kan være lokale forhold, som betinger, at der kan findes vandløbsoplande med en lav andel nitrat-N ud af total kvælstof (66-73%). Resultaterne fra både Odder Å og Saltø Å viser tydeligt, at der kan være meget store variatio-

Tabel 2. Tabellen viser målsætningsopfyldelse for 2027 i de 3 slutrecipienter til pilotoplandene fra vandområdeplanerne 2015-2021 /8/ og /9/. Derudover fremgår en beregnet normaliseret kvælstofudledning fra de dyrkede arealer fratrukket overfladevandsretentionen for referenceperioden 2000-2015.

Pilotopland	Kystvandoplandsniveau (slutrecipient)	Max gns. udledning fra landbrugsarealer ved målbelastning 2027 ifølge vand-områdeplaner 2015-2021, (kg N/ha)	Normaliseret kvælstofudledning fra de dyrkede arealer fratrukket retention (kg N/ha)
Jegstrup Bæk	Hjarbæk fjord	9,7	3,7
Odder Å	Norsminde fjord	6,6	19,4
Saltø Å	Karrebæk fjord	10,7	21,9

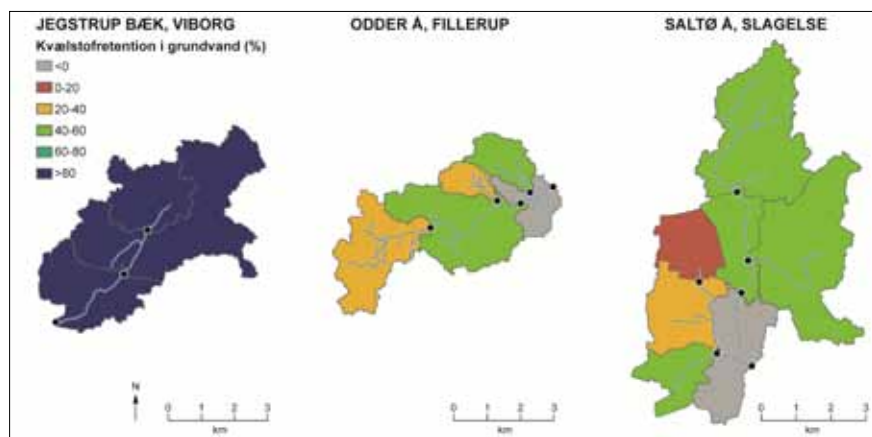
ner i retentionen af nitrat i grundvand inden for et større opland. De store forskelle i grundvandsretention betyder, at der er stor forskel på effekten af kvælstofvirkemidler på dyrkningsfladen mellem de enkelte deloplande. Dette betyder, at vandløbsmålinger over en årrække fremadrettet kan udnyttes til at kalibrere kvælstofretentionen på lokal skala. Det vil kunne understøtte en optimering af målretningen af virkemidler, som efterafgrøder, minivådområder mv. mod de deloplande, hvor effekten af virkemidlerne er størst, under den kollektive og den nye målrettede regulering.

Referencer

- /1/ Poulsen J.R., Tornbjerg H., Windolf J., Larsen S.E., Kronvang B., Højberg A.L. 2016; Vandløbsmålinger som grundlag for emissionsbaseret kvælstofregulering, Institut for Bioscience, Aarhus Universitet
- /2/ Højberg, A. L., Windolf, J., Børgesen, C. D., Troldborg, L., Tornbjerg, H., Blicher-Mathiesen, G., Kronvang, B., Thodsen, H., Ernsten, V. 2015; National kvælstofmodel. Oplandsmodel til belastning og virkemidler, kortleverancer. GEUS, DCE og DCA, Aarhus Universitet
- /3/ Hvid S. K. 2018; Projektbaggrund og pilotoplande, Vand & Jord, 2018, nr. 4.
- /4/ van't Veen S. G. W., Tornbjerg H., Windolf J., Kjeldgaard A., Ovesen N. B., Poulsen J. R. & Kron-

vang, B. 2018; Hvordan måles kvælstof i vandløb?, Vand & Jord, 2018, nr. 4.

- /5/ Levin, G., Iosub, C.-I. & Jepsen, M.R. 2017; Basemap02. Technical documentation of a model for elaboration of a land-use and land-cover map for Denmark. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 64 pp. Technical Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 95 <http://dce2.au.dk/pub/TR95.pdf>
 - /6/ Christensen I. M. V. og Højberg A. L. 2018; Udfordringer ved estimering af lokal nitratretention, Vand & Jord, 2018, nr. 4.
 - /7/ Rubek F., 2016; Vejret i Danmark, Danmarks Meteorologiske Institut. <https://www.dmi.dk/vejrer/arkiver/maanedsaesonaar/vejret-i-danmark-vinteren-2015-2016/>
 - /8/ Ørum, J. E., Kjærgaard, C., & Thomsen, I. K. 2017; Landbruget og vandområdeplanerne: omkostninger og implementering af virkemidler i oplandet til Norsminde Fjord. Institut for Fødevarer- og Ressourceøkonomi, Københavns Universitet. IFRO Rapport, Nr. 258
 - /9/ Hvid S. K. 2018; Personlig kommunikation, SEGES
- S. VAN'T VEEN er videnskabelig assistent, B. KRONVANG er professor, G. BLICHER-MATHIESEN er seniorrådgiver, N. OVESEN er akademisk medarbejder, A. KJELDGAARD er IT-medarbejder, H. TORNBERG er akademisk medarbejder, J. WINDOLF er emeritus, alle fra Bioscience, Aarhus Universitet.



Figur 4. Beregnet retention i grundvand i deloplande. Kortene viser den gennemsnitlige kvælstofretention i grundvand for de 2 måleår i deloplandene beregnet ud fra biaskorrigeret kvælstoftransport til beregning af tab af total kvælstof fra dyrkede arealer.