

Innovationsplatform for virkemidler til begrænsning af drænvand

Foreløbige resultater vedrørende fjernelse af kvælstof og fosfor i en mættet randzone

Projektrapport.

Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 4. april 2022 | **25**



AARHUS
UNIVERSITY

DCE - DANISH CENTRE FOR ENVIRONMENT AND ENERGY

STØTTET AF

Promilleafgiftsfonden for landbrug

Datablad

Fagligt notat fra DCE – Dansk Center for Miljø og Energi

Kategorien: Rådgivningsnotat

Titel: Innovationsplatform for virkemidler til begrænsning af drænvand

Undertitel: Foreløbige resultater vedrørende fjernelse af kvælstof og fosfor i en mættet randzone

Forfattere: Astrid Ledet Maagaard, Rasmus Jes Petersen, Brian Kronvang, Niels Bering Ovesen, Joachim Audet, Carl Christian Hoffmann og Dominik Henrik Zak

Institution: Institut for Ecoscience

Faglig kommentering: Hans Estrup Andersen

Kvalitetssikring, DCE: Signe Jung-Madsen

Sproglig kvalitetssikring: Anne Mette Poulsen

Ekstern kommentering: Ingen

Rekvirent: Promilleafgiftsfonden

Bedes citeret: Maagaard, A., Petersen, R.J., Kronvang, B., Ovesen, N.B., Audet, J. Hoffmann, C.C. & Zak, D.H. 2022. Innovationsplatform for virkemidler til begrænsning af drænvand. Foreløbige resultater vedrørende fjernelse af kvælstof og fosfor i en mættet randzone. Aarhus Universitet, DCE - Dansk Center for Miljø og Energi, 23 s. – Fagligt notat nr. 2022|25
https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2022/N2022_25.pdf

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Forsidefoto: Niels Bering Ovesen

Antal sider: 23

Indhold

Indhold	3
1 Baggrund	4
2 Materiale og metoder	5
2.1 Undersøgelsesområdet Ulvskov	5
2.2 Vandføring, prøvetagning og analyse	6
2.3 Hydraulisk ledningsevne	7
2.4 Vegetationsundersøgelse og planternes næringsstofoptagelse	7
3 Resultater og diskussion	9
3.1 Tilførsel af drænvand, hydraulisk ledningsevne og grundvandsstand	9
3.2 Ændringer i vandkvaliteten	11
3.3 Fjernelse af næringsstoffer	13
4 Konklusioner og fremtidsudsigter	15
5 Tak	16
6 Formidling af resultater	17
7 Referencer	18
Bilag 1 undersøgelse af plantediversitet	20
Bilag 2 abstract and proceeding	21

1 Baggrund

Den globale befolkning forventes at stige med tre milliarder i løbet af de næste to årtier, hvilket øger presset på naturens ressourcer (Scanlon et al. 2017), og som følge af dette vil stigningen i den globale efterspørgsel efter rent vand sandsynligvis overstige de tilgængelige ressourcer med 40 % inden 2030 i et business-as-usual-scenarie (WWAP, 2015). I Europa falder en stigende efterspørgsel efter vand og et stort pres på de akvatiske økosystemer fra landbrugssektoren sammen med reduceret tilgængelighed af vand på grund af klimaændringerne, der medfører højere evapotranspiration og reduceret vandlagring under mere ekstreme nedbørshændelser. På trods af en betydelig indsats for at mindske anvendelsen af gødning og indføre den bedste arealanvendelse og forvaltningspraksis (Lam et al., 2011) er der stadig problemer med næringsstofforurening, og disse forværres nu af klimaændringernes indvirkning på landskabets hydrologi. Fra 2009 er der blevet introduceret vandområdeplaner med henblik på at opfylde kravene i EU's vandrammedirektiv, der har til formål at beskytte alle terrestriske overfladevandsområder, og som fastsætter miljømål for alle vandområder med henblik på at opnå god økologisk tilstand (Chave, 2001). Ifølge vandrammedirektivet skal alt vand, herunder overflade- og grundvand, have en god kvalitet inden år 2027. Dette kan dog være en udfordring, da disse mål potentielt kan påvirke landbruget, industrien og husholdningerne, da overholdelse af vandrammedirektivet kan medføre store investeringer og sætte grænser for landbrugs- og industriproduktionen. I Danmark kom der fokus på forringelsen af vandmiljøet at i slutningen af 1980'erne, bl.a. som følge af en begivenhed, der fik stor dækning i medierne: En gruppe fiskere sejlede i havn med en fangst af døde hummere. Hummerne var døde som følge af eutrofiering og iltsvind. Fire årtier efter lever en stor del af de danske kystvande ikke op til kravet om god økologisk tilstand (Petersen m.fl., 2021). Ifølge den danske politiske aftale "Aftale om grøn omstilling af dansk landbrug", der blev vedtaget den 4. oktober 2021, er det planen at reducere den årlige totale kvælstoftilførsel til havet med ca. 1.500 t ved hjælp af kollektive virkemidler herunder skovrejsning samt restaurering og etablering af vådområder (Hoffmann et al., 2020). Ifølge den politiske aftale forventes en stigning i antallet af konstruerede vådområder i Danmark inden for de næste par år. Mættede randzoner er et nyt drænvirkemiddel i dansk sammenhæng. Navnet kommer fra det engelske "saturated buffer zone" (SBZ), som henviser til en vandmætning af jorden. Denne nye teknologi er blevet testet i USA siden 2010 (Jaynes & Isenhardt, 2014) og har vist, at etableringen af et simpelt design til vandmætning i den ripariske zone har en lovende indvirkning på fjernelse af næringsstoffer (Jaynes & Isenhardt, 2019).

Dette faglige notat giver et overblik over fjernelsen af næringsstoffer i en ny mættet randzone, der blev etableret i forbindelse med projektet "Innovationsplatform for virkemidler til begrænsning af drænvand" for overvågningsåret 2021. Det skal bemærkes, at resultaterne er foreløbige, således at de nuværende konklusioner skal yderligere underbygges og støttes af igangværende dataanalyser. Projektet er finansieret af "Promilleafgiftsfonden for Landbrug" og fortsætter frem til 2023. Det er et samarbejdsprojekt mellem SEGES og Institut for Ecoscience ved Aarhus Universitet (AU-ECOS), der har det overordnede formål at udvikle og optimere virkemidlerne til begrænsning af næringsstoffer i dræned landbrugslandskaber. SEGES står for udvælgelsen og opførelsen af det mættede randzone-anlæg og den endelige rapportering til Promilleafgiftsfonden. AU-ECOS står for overvågningsprogrammet, der omfatter vand- og jordprøvetagning, kemiske analyser, dataanalyser og den endelige kvalitetssikring.

2 Materiale og metoder

Undersøgelsen af to mættede randzoner nær Gylling og Ulvskov påbegyndtes i marts 2019. Undersøgelsen omfattede målinger af vandføringen og grundvandsstanden, vandprøvetagning ved indløbet, langs vandløbs- og piezometer-transekter, jordanalyser, tracer-forsøg med bromid, bestemmelse af hydraulisk ledningsevne ved slug-tests, vegetationsundersøgelser og plantehøst (for nærmere oplysninger se tabel 1 og afsnittene nedenfor). For denne overvågningsperiode sluttede undersøgelsen i Ulvskov i december 2021. Undersøgelsen i Gylling blev afbrudt i slutningen af 2020, da den høje grundvandsstand i området samt en formodet lav vandinfiltrationskapacitet i den stærkt nedbrudte tørv i jordoverfladen (ned til 1 m) forhindrede infiltration af drænvand ind i randzonen. Resultaterne fra Gylling er derfor ikke medtaget i notatet. I stedet blev en ny, fuldt instrumenteret mættet randzone, Bondevad, etableret nær Odder (se afsnit 4) fra oktober til december 2021.

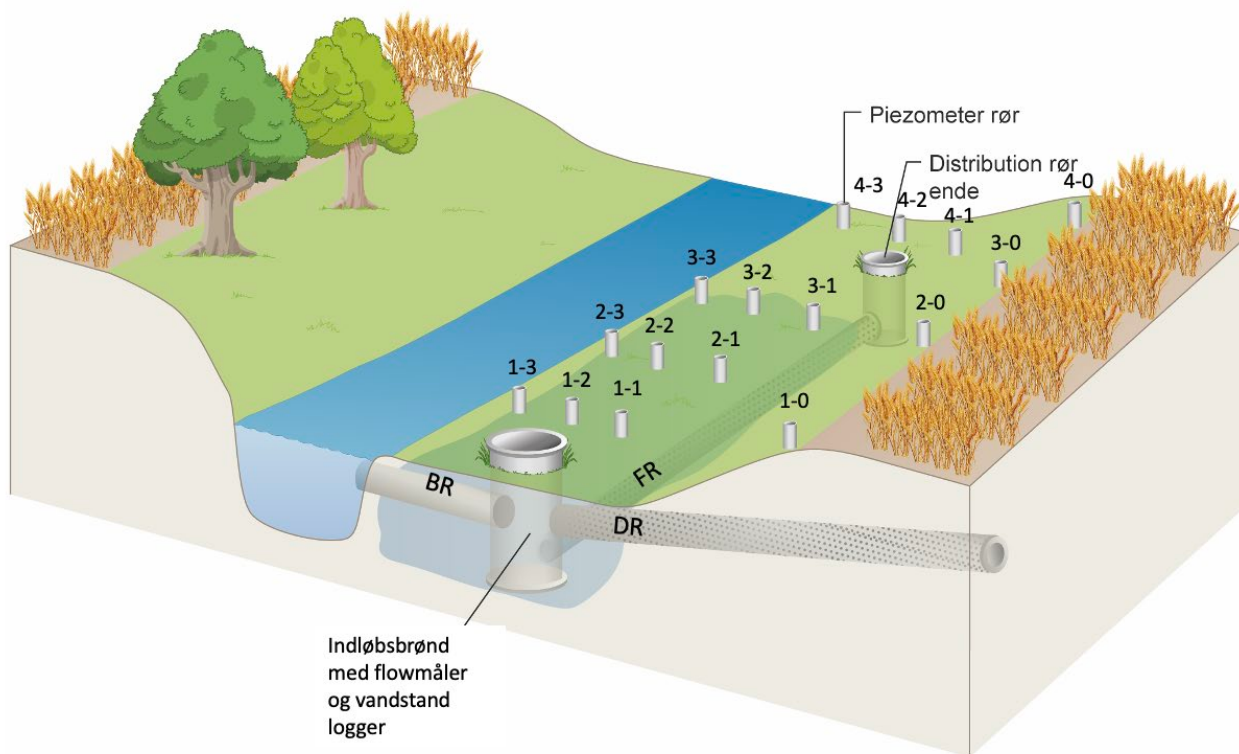
Tabel 1. Oversigt over undersøgelser foretaget i de to projektområder Gylling og Ulvskov (N: kvælstof, P: fosfor, C: kulstof).

Aktivitetstype	Mål	Sted (periode)
Kontinuerlige vandføringsmålinger	Kvantificering af tilstrømningen af drænvand på daglig basis	Gylling (10/2019 – 12/2020) Ulvskov (09/2019 – 12/2021)
Målinger af grundvandsstanden (hver tredje uge, kontinuert for udvalgte piezometre)	Tidslige og rumlige ændringer i grundvandsstanden	Gylling (10/2019 – 12/2020) Ulvskov (09/2019 – 12/2021)
Jordanalyse	Sammensætningen af grundstoffer (metaller, næringsstoffer og C); P-fraktioner (vandopløseligt fosfor og redox-følsomt P); vandekstraherbart organisk C, jordtekstur	Gylling (03/2019 – 02/2020) Ulvskov (09/2019 – 12/2021)
Vandanalyse (på daglig basis i indløbet vha. ISCO-prøvetagere og for alle prøvetagningssteder hver tredje uge vha. punktprøver)	Opløst N og P (nitrat, nitrit, ammonium, totalt opløst kvælstof, opløseligt reaktivt P og total opløst P); opløst organisk C, fysiske-kemiske parametre (elektrisk ledningsevne, pH, ilt, temperatur)	Gylling (10/2019 – 12/2020) Ulvskov (09/2019 – 12/2021)
Tracer-eksperiment med bromid over 2 til 4 uger (prøvetagning hver time eller ugentligt)	Bestemmelse af vandets strømningsveje og estimering af vandets opholdstid	Gylling (12/2019 – 02/2020) Ulvskov (11/2019; 11/2020)
Slug-tests (en dag)	Bestemmelse af hydraulisk ledningsevne og vandføring	Ulvskov (12/2021)
Vegetationsundersøgelse og plantehøst	Analyse af plantearter og bestemmelse af næringsstoffer (N og P) og optagelse af C	Ulvskov (10/2021 – 11/2021)

2.1 Undersøgelsesområdet Ulvskov

Den mættede randzone ligger ved skoven Ulvskov, nær Odder, og er opkaldt efter denne. Området er karakteriseret som næringspåvirket højstaudesump. Drænvand kommer til randzonen fra et opland bestående af et landbrugsareal på 4,5 ha. Først løber drænvandet ind i en fordelerbrønd ved indløbet, forsynet med en vandføringsmåler (flowmeter) og et hævet bypass-rør. Vandet ledes til randzonen gennem et 80 m langt perforeret fordelerrør (et PE-nedløbsrør, indvendig diameter 92 mm), der løber parallelt med vandløbet på ca. 20

m afstand. Herved løber drænvand fra marken ind i fordelerrøret, der ligger ca. 0,5 m under jordoverfladen, ind i randzonen, hvilket – ideelt set – hæver vandstanden i randzonens jord op til jordoverfladen. I randzonen er der installeret fire transekter, hvor 'transekt 4' er en kontroltransekt, der er placeret i en naturlig våd del af randzonen, da jordoverfladen er ca. 0,5 lavere end i den forvaltede randzone. Alle transekter består af fire piezometerrør (f.eks. 1-0, 1-1, 1-2, 1-3), og det første piezometer placeres mellem kanten af marken og fordelerrøret for at tage højde for tilførsel af lavt grundvand (Figur 1).



Figur 1. Illustration af den instrumenterede mættede randzone. Drænrøret (DR) ledes til et fordelerrør (FR), der leder drænvand til randzonen, indtil denne er mættet, hvilket afhænger af mængden af infiltrerende vand i løbet af året (Carstensen et al., 2020). Vandoverskuddet ledes til vandløbet gennem et bypass-rør (BR), der er forbundet med det gamle drænrør i fordelerbrønden. I randzonen er der tre transekter med piezometre, og i en naturligt vådere del af den ripariske zone er der et kontroltransekt (4-0, ..., 4-3).

2.2 Vandføring, prøvetagning og analyse

Randzonen er instrumenteret med en solopladet vandføringsmåler (Krohne flowmeter) ved indløbet med henblik på kontinuerligt at måle gennemstrømningen af drænvand fra marken. Derudover logføres vandstanden i fordelerbrønden kontinuerligt for at registrere perioder med udledning af drænvand til vandløbet via bypass-røret (Figur 1). Udledning via bypass-røret forekom, når vandstanden i fordelerbrønden var højere end højden af bypass-røret. Bypass-udledningen blev bestemt ved at sammenholde vandføringen og vandstanden i perioder hvor vandstanden oversteg højden på bypass-røret. Over tid faldt strømmingen af drænvand i randzonen til ca. 1 L/s enten på grund af den lavere vandoptagelseskapaletet i jorden i randzonen og/eller tilstopning af fordelerrøret med fine jordpartikler. Fordelerrøret blev rensset med en højtryksslange den 2. december 2021 for at øge infiltrationen af drænvand og dermed mindske bypass-udledningen. Da effekten af rensningen ikke var

særlig stor, anses tilstopningen af selve fordelerrøret som værende ubetydelig. Dog kan tilstopning af jordens porer omkring fordelerrøret muligvis også mindske vandinfiltrationen.

Der blev taget vandprøver hvert 30. minut ved hjælp af automatiske ISCO-prøvetagere ved drænets indløbsbrønd, og disse blev puljet til daglige prøver. Desuden blev der taget punktprøver hver 3. uge i indløbet, udløbet, vandløbet og i piezometerrørene. Alle vandprøver blev håndteret og analyseret i laboratoriet i henhold til Dansk Standard/Europæisk Standard for totalt kvælstof (TN), totalt opløst fosfor (TDP), opløseligt reaktivt fosfor (SRP), nitrat ($\text{NO}_3\text{-N}$) og ammonium (NH_4^+). Massebalanceberegninger for P- og N-former er udelukkende baseret på punktprøver, da både fosfat- og nitratkoncentrationerne kan falde under opbevaring i ISCO-flasker uden køl på grund af hhv. sorption og denitrifikation.

2.3 Hydraulisk ledningsevne

Ved Ulvskov blev den hydrauliske ledningsevne målt ved hjælp af slug-tests ("falling head", reduktion af grundvandsstanden) i alle mættede piezometre ifølge metoden beskrevet af Bouwer & Rice (1976). Den hydrauliske ledningsevne i grundvandet blev målt manuelt i alle piezometre hver 3.-4. uge, mens timeværdier blev målt i piezometrene U3-3 og U4-3 vha. ventilerede AquiLite ATP00 tryksensorer (AquiTronic, Tyskland). Grundvandsstrømningen mellem udvalgte piezometre blev beregnet vha. Darcys ligning for mættet vandstrømning vha. daglige værdier for grundvandets hydrauliske ledningsevne interpoleret mellem manuelle målinger samt målt vandstand i rørene. Dataene kræver yderligere kvalitetssikring, og resultaterne er derfor ikke medtaget i denne rapport.

2.4 Vegetationsundersøgelse og planternes næringsstofoptagelse

I oktober 2021 blev alle plantearter registreret i 1x1 m kvadrater ved hvert piezometer i randzonens transekter og kontroltransekt (Figur 2). Efterfølgende blev registreringen fuldført for resten af randzonen, hvor X plantearter blev observeret (bilag 1). Registreringen kan være ufuldstændig på grund af vanskeligheder med vegetationsbestemmelse på denne tid af året.

Den samlede overjordiske biomasse af planter blev høstet fra 1 m²-store områder ved piezometerrørene 2-3 for alle transekter. Biomasseprøverne blev tørret i syv dage ved lufttemperatur (Figur 2), og en større delprøve (50-90 g) blev efterfølgende tørret til konstant masse i en ovn i 24 timer ved 45 °C for at bestemme den tørre biomasse.

Nettooptagelsen af næringsstoffer blev beregnet ud fra næringsstokkoncentrationerne i de overjordiske planterester og biomassedata (Jabłońska et al., 2021). Planternes optagelse af næringsstoffer og kulstof (C) blev beregnet ved hjælp af følgende ligning (1):

$$\text{NUP} = \text{PL}_{\text{N/P/C}} \times \text{DM} \times 10000 \quad (1)$$

hvor NUP er planternes optagelse af næringsstoffer og kulstof (kg ha^{-1}), $\text{PL}_{\text{N/P/C}}$ er koncentrationerne af hhv. kvælstof, fosfor og kulstof i de tørrede planterester (kg kg^{-1} tørret masse), og DM er den tørrede masse af den overjordiske biomasse af planter (kg ha^{-1}) indsamlet i et areal på 1 m² (se ovenfor).

Dataene brugt i biomasseberegningerne henviser til hhv. nettoproduktion af den overjordiske biomasse og nettooptaget af næringsstoffer.

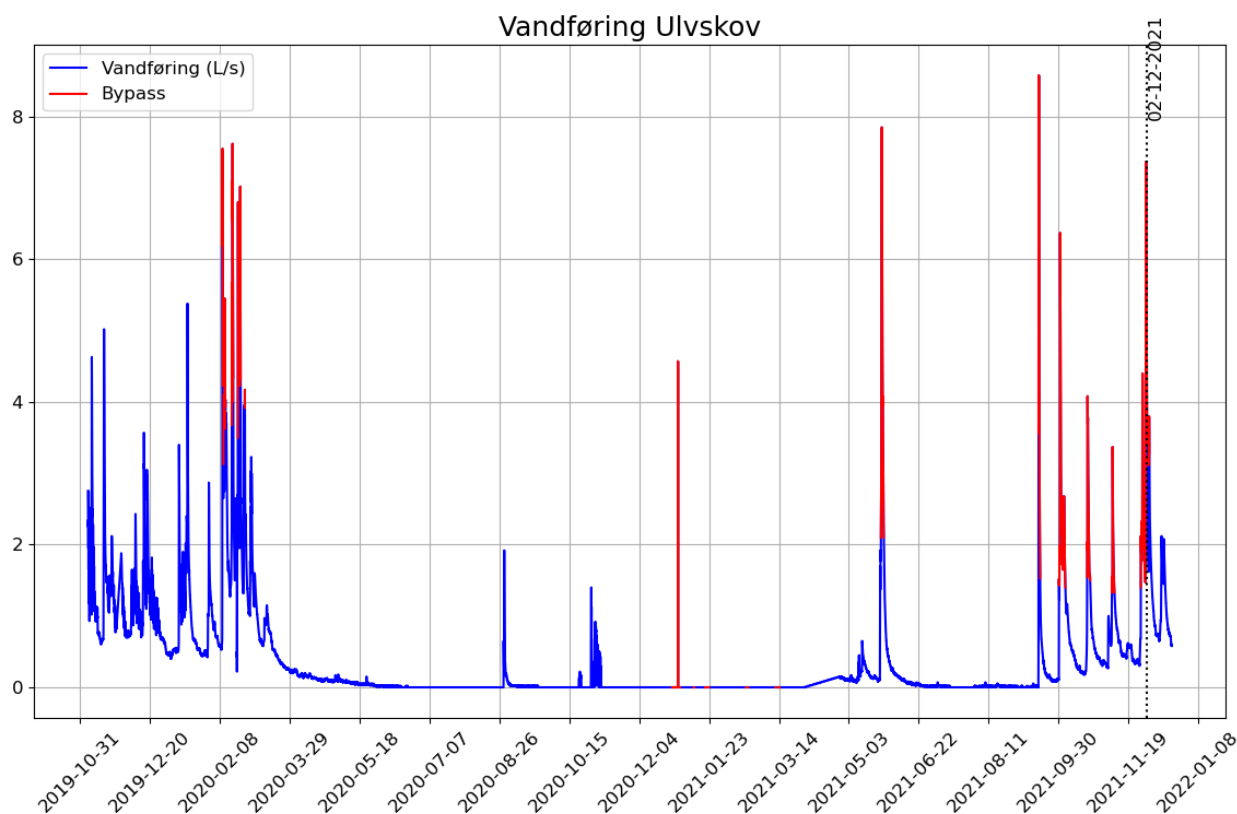


Figur 2. Høst af den overjordiske biomasse i de tre transekter i den mættede randzone og i kontroltransektet. Bemærk, at vegetationen omkring piezometerrørene i udkanten af marken (Figur 1) ikke blev høstet.

3 Resultater og diskussion

3.1 Tilførsel af drænvand, hydraulisk ledningsevne og grundvandsstand

Fordelerbrønden ved Ulvskov fik tilført 0 til 8,6 L/s drænvand (time gennemsnit) i projektperioden 29.09.2019 – 29.11.2021. Den maksimale mængde vand, der infiltrerede randzonen, faldt dog betydeligt i overvågningsperioden (Figur 3).

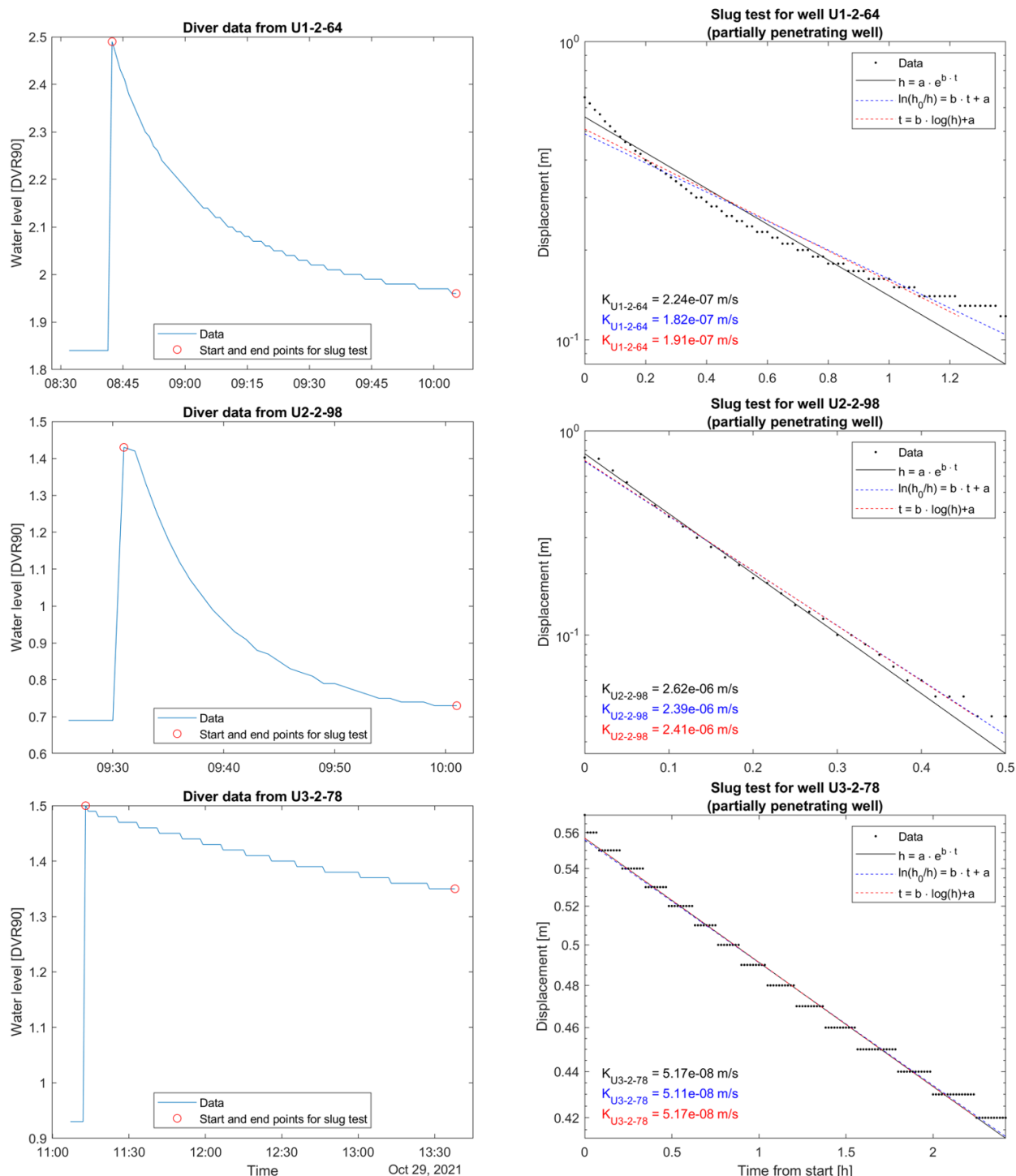


Figur 3. Vandføring og bypass-udledning for Ulvskov i hele overvågningsperioden. Den blå linje viser vandføringen, og den røde linjer angiver, hvornår bypass-udledningen fandt sted. Den stiplede linje viser datoen (02-12-2021), hvor fordelerrøret blev rensat for at mindske bypass-udledningen.

Allerede efter et par måneder af den første dræningssæson (september 2019 – marts 2020) faldt den maksimale mængde vand, der infiltrerede den mættede randzone, fra 5 L/s til ca. 4 L/s, og i den tredje drænperiode, der begyndte i september 2021, faldt mængden yderligere til ca. 1 L/s. Eftersom fine partikler aflejrede sig i fordelerbønden og i bønden for enden af fordelerrøret, opstod der mistanke om tilstopning, som det er påvist for andre konstruerede vådområder (Wang et al., 2021). Rensning af fordelerrøret med en højtryksslange bidrog til at øge infiltrationen og mindske bypass-udledningen (Figur 3). Før rensningen begyndte bypass-udledningen, når vandføringen ved indløbet nåede op på 1,3-1,5 L/s, men en vandføring på 2,1 L/s ved indløbet et par dage efter rensningen ikke førte til bypass-udledning. Det er imidlertid for tidligt at konkludere, hvorvidt infiltrationen er genoprettet til den oprindelige kapacitet. Udover tilstopning i selve fordelerrøret kan mindsket infiltration skyldes, at tilstopningen ikke kunne fjernes helt i fordelerrørets ydre sfære, og/eller at en højere vandmætning i randzonen reducerede vandinfiltrationskapaciteten.

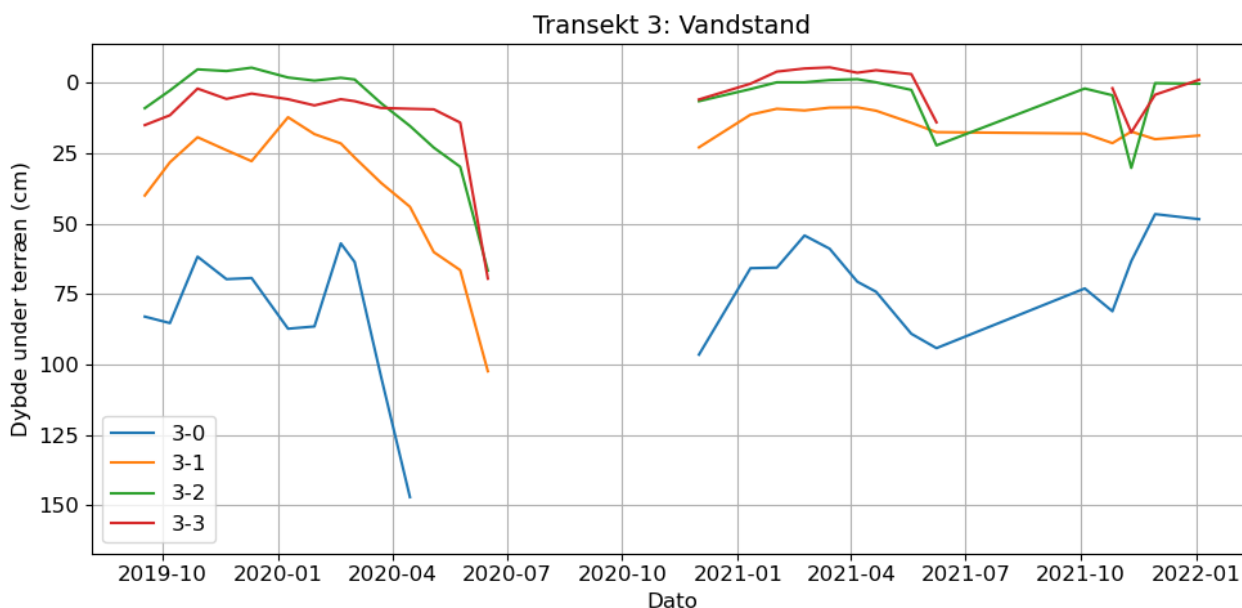
Hvis infiltrationen ikke forbedres, vil en betydelig del af drænvandet strømme ud i vandløbet via bypass-røret uden at blive rensat i randzonen (Figur 3).

Bemærk, at den mættede hydrauliske ledningsevne (K_{sat}) adskilte sig med to størrelsesordener i randzonen. I transekt 2 blev den højeste K_{sat} på 20,66 cm/dag eksempelvis observeret midt i randzonen, hvilket var næsten 50 gange højere end i midten af transekt 3 (0,46 cm/dag) (se Figur 4). Ved hjælp af forskellen i vandstand mellem rørene kan grundvandsstrømningen beregnes, og også denne vil variere med flere størrelsesordener (beregningerne er i gang).



Figur 4. Tid for fald i vandstand efter vandtilførsel (slug-test) til bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne (HYC) i midten af de mættede randzoner: piezometerrørene 1-1, 2-1, 3-1 (venstre kolonne). Tre forskellige modeller blev anvendt til beregning af HYC (højre kolonne); p.t. anvendes den lineære tilgang.

Eftersom vandføringen varierede betydeligt i løbet af drænsæsonen og gik helt i stå et par måneder efter denne (Figur 3), varierede grundvandsstanden ligeledes med adskillige decimeter i løbet af året. Udsvingene i grundvandsstanden var imidlertid mere udprægede i randzonens øvre zone, tættest på marken (Figur 5). Fuld vandmætning af jorden op til nogle få centimeters oversvømmelse dog kun sted i randzonens nedre del. Høje vandstande blev observeret i 2021 i hele transekt 3. Som tidligere nævnt kan dette delvist forklare den reducerede infiltrationskapacitet i denne overvågningsperiode. Forskelle i grundvandsstanden ledsages af forskellige redox-tilstande (ikke målt i denne undersøgelse), som er bestemmende for de biogeokemiske processer, der regulerer næringsstoffjernelsen (se nedenfor).

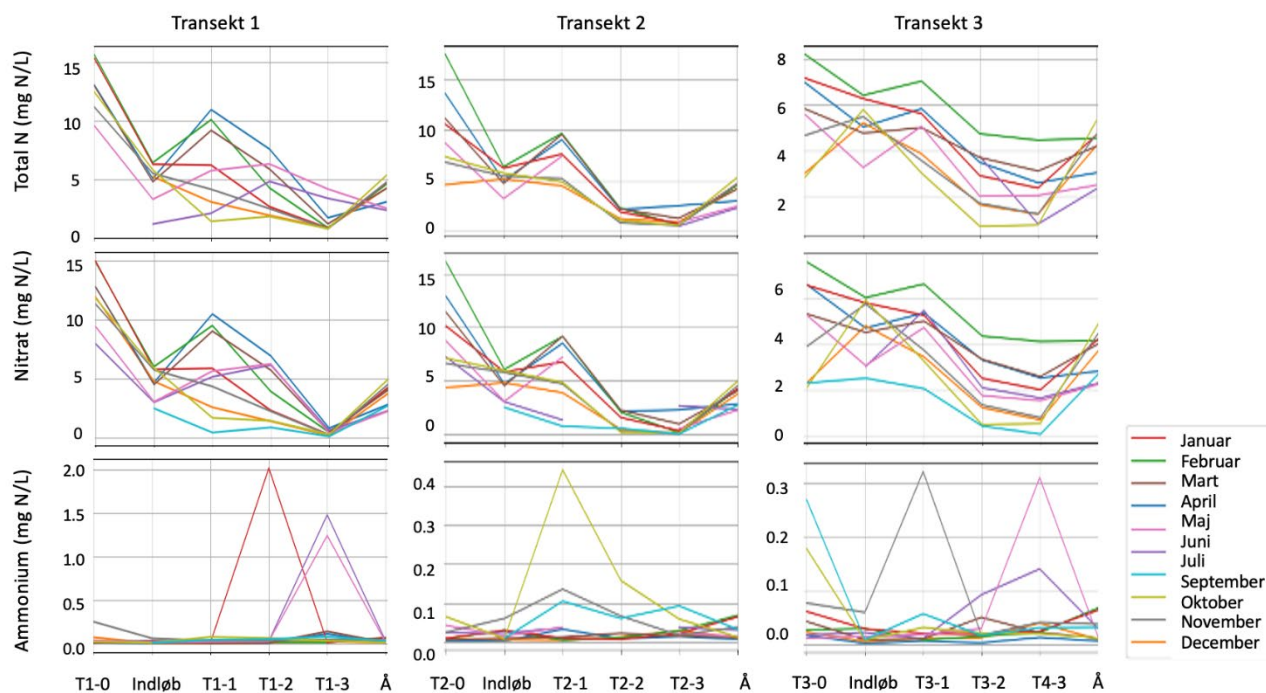


Figur 5. Tidsmæssige ændringer i grundvandsstanden i forhold til jordoverfladen i transekt 3. Det første punkt (3-0) ligger i udkanten af marken (se Figur 1), der ikke er påvirket af drænvandet, men af lavt grundvand.

3.2 Ændringer i vandkvaliteten

Samlet set blev der fundet et tydeligt mønster for ændringerne i vandkvaliteten, i den undersøgte randzone. Vandkvaliteten blev forbedret for både kvælstof- og fosforformer (Figur 6 og 7). Andelen af nitrat af den totale kvælstofmængde (TN) var højere end 90 % i de fleste af de vandprøver, der blev udtaget i overvågningsperioden. Fosfat (målt som opløseligt reaktivt fosfor) var i de fleste målinger lig med mængden af total opløst fosfor (kun lejlighedsvis analyseret). Dette betyder, at koncentrationen af opløst organisk fosfor var ubetydelig. Mere specifikt – for størstedelen af prøvetagningernes vedkommende var nitratkoncentrationerne højest i det lave grundvand stammende fra nabomarken og varierede mellem 1,1 og 22,7 mg N/L (Tabel 2). De gennemsnitlige nitratkoncentrationer i drænvandet varierede mellem 0,9 og 10,5 mg N/L. Interessant nok var nitratkoncentrationerne i piezometerrørene i den øvre del af randzonen nær fordelerrøret (< 3 m) ca. to gange højere end i drænvandet under nogle af prøvetagningerne (Figur 6). Selv om disse resultater ikke er analyseret i detaljer, kan de tolkes som en blandingseffekt af lige dele grundvand og drænvand (se transekt 1 og 2 i Figur 6). Grundvandsstanden i denne opadskrånende del af randzonen var for det meste adskillige decimeter under jordoverfladen, hvilket indikerer, at denitrifikationen her var mindre end i den nedre del af randzonen, hvor grundvandsstanden var tæt

på overfladen i hovedparten af drænsæsonen (Figur 5). Nitratkoncentrationen faldt faktisk (med få undtagelser) betydeligt til væsentligt lavere værdier end 1 mg N/L, ved det sidste punkt i randzonens transekter (Tabel 2). Slutte­ligt blev der registreret 3-10 gange højere nitratkoncentrationer i det tilstø­dende vandløb. Højere ammoniumkoncentrationer (> 1 mg N/L) på nogle af randzonens prøvetagningspunkter understreger betydningen af N-minerali­seringsprocesser. De målte ammoniumkoncentrationer oversteg imidlertid ikke det målte fald i nitratkoncentrationerne i randzonen.

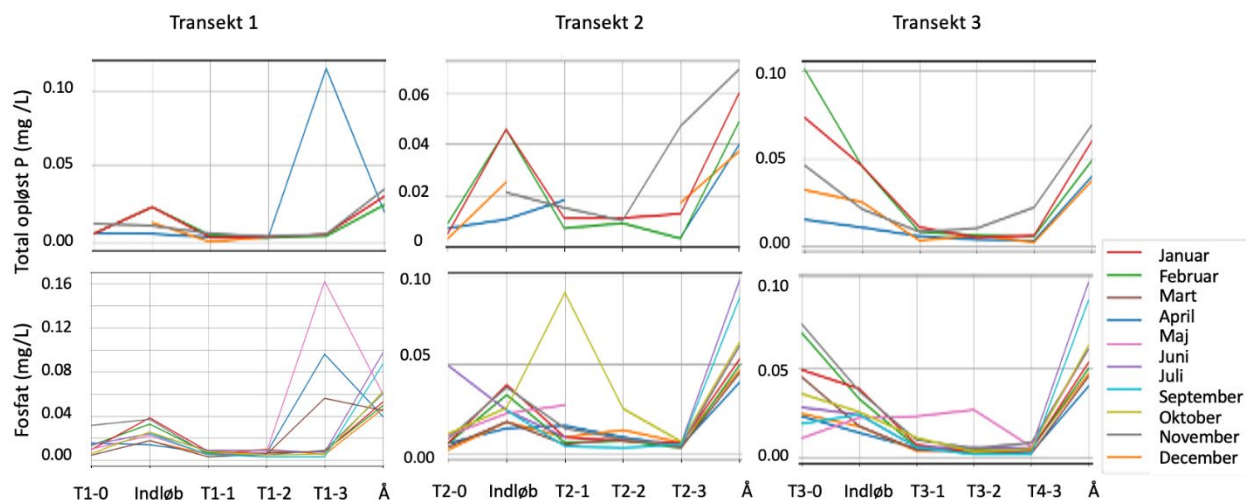


Figur 6. Total kvælstof (TN), nitrat og ammonium som månedlige gennemsnitskoncentrationer i de tre transekter i den mættede randzone, i indløbet og i vandløbet. Det første transekt-punkt repræsenterer det lave grundvand før fordelerrøret, indløbet repræsenterer drænvandet, og i vandløbet blev der taget prøver opstrøms for den mættede randzone.

I modsætning til kvælstof var fosforkoncentrationerne i grundvandet for det meste lavere end i drænvandet, men de varierende dog betydeligt gennem overvågningsperioden (Tabel 2). Som oftest var fosforkoncentrationerne lavest allerede i den øvre del af randzonen for så at stige igen i den nedre del af randzonen (Figur 7). Dette fænomen kan igen relateres til forskelle i hhv. grundvandsstand og/eller redox-forhold. Mens en lavere grundvandsstand i den øvre del af randzonen favoriserer sorption af fosfor på metaloxider, fremmer en højere grundvandsstand eller vandmætning af jorden den reductive opløsning af jern(III)-forbindelser og samtidig frigivelse af bundet fosfor (Zak et al., 2018). På trods af denne interne frigivelse af P var fosforkoncentrationerne på det sidste punkt i transekterne i gennemsnit ti gange lavere end i vandløbsvandet og ca. fem gange lavere end i drænvandet (Tabel 2).

Tabel 2. Næringsstofkoncentrationer i punktprøver for de fire transekter som middel-, minimum- og maksimumværdier i mg/L (se prøvetagningspunkterne i Figur 1).

	1-1	Inlet	1-2	1-3	1-4	Stream
TDP	0.013 (0.003-0.025)	0.033 (0.007-0.054)	0.006 (0-0.011)	0.006 (0.001-0.017)	0.072 (0.004-0.446)	0.051 (0.033-0.081)
PO ₄ -P	0.016 (0.002-0.049)	0.026 (0.005-0.069)	0.006 (0.002-0.015)	0.006 (0.002-0.013)	0.041 (0.003-0.473)	0.057 (0.031-0.125)
TN	13.343 (7.133-17.580)	5.100 (1.140-10.820)	6.079 (0.708-12.240)	4.201 (0.920-8.747)	1.523 (0.472-5.738)	4.063 (2.275-6.638)
NH ₄ -N	0.073 (0-0.871)	0.022 (0-0.182)	0.027 (0-0.228)	0.242 (0-6.000)	0.249 (0.005-2.400)	0.030 (0-0.181)
NO ₃ -N	12.642 (6.350-17.340)	4.910 (0.918-10.459)	5.626 (0.171-11.877)	3.814 (0.635-8.608)	0.381 (0.131-1.151)	3.753 (1.993-6.411)
	2-1	Inlet	2-2	2-3	2-4	Stream
TDP	0.006 (0.002-0.012)	0.033 (0.007-0.054)	0.013 (0.007-0.018)	0.010 (0.009-0.011)	0.014 (0.001-0.047)	0.051 (0.033-0.081)
PO ₄ -P	0.009 (0.002-0.049)	0.026 (0.005-0.069)	0.021 (0.004-0.167)	0.010 (0.002-0.042)	0.005 (0.002-0.010)	0.057 (0.031-0.125)
TN	10.929 (4.634-23.940)	5.100 (1.140-10.820)	7.462 (2.165-10.880)	1.693 (0.780-2.532)	1.072 (0.239-3.461)	4.063 (2.275-6.638)
NH ₄ -N	0.023 (0-0.206)	0.022 (0-0.182)	0.107 (0.004-0.875)	0.055 (0.007-0.274)	0.030 (0.002-0.110)	0.030 (0-0.181)
NO ₃ -N	9.984 (4.351-22.725)	4.910 (0.918-10.459)	5.796 (0.654-10.211)	0.949 (0.079-2.399)	0.717 (0-5.256)	3.753 (1.993-6.411)
	3-1	Inlet	3-2	3-3	3-4	Stream
TDP	0.064 (0.015-0.159)	0.033 (0.007-0.054)	0.008 (0.002-0.016)	0.005 (0.002-0.010)	0.007 (0.001-0.022)	0.051 (0.033-0.081)
PO ₄ -P	0.045 (0.004-0.116)	0.026 (0.005-0.069)	0.009 (0.001-0.040)	0.006 (0.001-0.068)	0.005 (0.001-0.015)	0.057 (0.031-0.125)
TN	5.571 (1.905-10.600)	5.100 (1.140-10.820)	4.902 (1.852-8.893)	2.697 (0.584-5.875)	2.207 (0.388-6.264)	4.063 (2.275-6.638)
NH ₄ -N	0.076 (0.003-0.598)	0.022 (0-0.182)	0.065 (0.002-1.119)	0.027 (0-0.128)	0.066 (0.006-0.846)	0.030 (0-0.181)
NO ₃ -N	4.701 (1.102-9.743)	4.910 (0.918-10.459)	4.570 (1.973-8.346)	2.142 (0.155-5.544)	1.720 (0.020-5.930)	3.753 (1.993-6.411)
	4-1	Inlet	4-2	4-3	4-4	Stream
TDP	0.170 (0.007-1.390)	0.033 (0.007-0.054)	0.015 (0.004-0.038)	0.005 (0.001-0.011)	0.008 (0.003-0.017)	0.051 (0.033-0.081)
PO ₄ -P	0.079 (0.005-1.210)	0.026 (0.005-0.069)	0.011 (0.002-0.030)	0.005 (0-0.018)	0.007 (0.002-0.016)	0.057 (0.031-0.125)
TN	5.418 (1.982-11.000)	5.100 (1.140-10.820)	2.880 (0.981-5.282)	1.232 (0.245-2.213)	0.669 (0.334-2.064)	4.063 (2.275-6.638)
NH ₄ -N	0.067 (0-1.160)	0.022 (0-0.182)	0.045 (0.003-0.235)	0.024 (0.003-0.192)	0.054 (0.005-0.130)	0.030 (0-0.181)
NO ₃ -N	5.080 (0.615-10.206)	4.910 (0.918-10.459)	2.469 (0.937-5.104)	0.894 (0.192-1.834)	0.098 (0-0.287)	3.753 (1.993-6.411)



Figur 7. Total opløst fosfor og fosfat som månedlige gennemsnitskoncentrationer i de tre transekter i den mættede randzone, i indløbet og i vandløbet. Det første punkt repræsenterer det lave grundvand før fordelerrøret, indløbet repræsenterer drænvandet, og i vandløbet blev der taget prøver opstrøms før den mættede randzone.

3.3 Fjernelse af næringsstoffer

Ifølge de første massebalanceberegninger fungerede den mættede randzone som et effektivt dræn for N og P i drænvandet. Gennem hele den ca. toårige overvågningsperiode var importen af TN via drænvand 130 kg og af fosfat 0,98 kg P. I løbet af perioden blev der i randzonen fjernet 105 kg nitrat-N og 0,7 kg fosfat-P, svarende til reduktionseffektiviteter på hhv. 87 % og 76 %. Disse reduktionseffektiviteter er højere end for noget andet virkemiddel til reduktion af næringsstoffer i drænvand (Hoffmann et al., 2020). Ud over de

tidligere diskuterede biogeokemiske processer (denitrifikation, sorption/desorption) kan en stor del af kvælstof- og fosforfjernelsen forklares ved planteoptagelse. Planternes næringsstofoptagelse var i gennemsnit 14,9 g N/m² og 1,6 g P/m² sammenlignet med den årlige fjernelse af næringsstoffer i randzonen på ca. 52 g N/m² og 0,4 g P/m² (randzonens størrelse: ca. 1000 m²). Det betyder, at omkring 30 % af fjernelsen af N og den totale fjernelse af P kan forklares ved planteoptagelse. Hvad denne sammenligning angår, skal det bemærkes, at den mættede randzone ikke alene fjernede næringsstoffer ved indløbet af drænvand via fordelerrøret, men også fra det grundvand, der kom direkte fra den tilstødende mark. Indtil videre er sidstnævntes bidrag dog ikke kvantificeret.

4 Konklusioner og fremtidsudsigter

Resultaterne af denne toårige overvågning af en mættet randzone viser, at det undersøgte anlæg ved Ulvskov, var særdeles effektivt, eftersom fjernelsen af nitrat og fosfat var så høj som hhv. 87 % og 76 %. Disse høje effektivitetsrater skal dog tolkes med forsigtighed, da grundvandsstrømningen viste sig at være temmelig uregelmæssig og således varierede med to størrelsesordener inden for de undersøgte transektter, hvilket gør de nuværende fjernelsesestimater usikre. Desuden blev det påvist, at vandinfiltrationskapaciteten faldt i løbet af de tre drænsæsoner, hvilket skal tages i betragtning både med hensyn til dimensionering og konstruktion af mættede randzoner samt deres vedligeholdelse. En anden mættet randzone nær Odder, Bondesvad, blev instrumenteret med henblik på overvågning fra 2022 til 2023 for at øge vores viden om begrænsninger og fordele ved brug af mættede randzoner som virkemiddel til reduktion af drænvand i ripariske randzoner. Interessant er det, at planter synes at spille en central rolle for tilbageholdelse af næringsstoffer, hvilket indikerer, at høst og fjernelse af planter ved afslutning af vækstsæsonen kan minimere frigivelsen af næringsstoffer efter plantens død og nedbrydning. Desuden medfører høst at jorden ikke bliver overmættet med fosfor over tid. Slutteligt er der brug for bedre viden om, hvor mættede randzoner er det optimale valg frem for typer af konstruerede vådområder under hensyntagen til aspekter såsom jordtype, hældning, størrelse og muligvis også vegetation.

5 Tak

Vi takker Marlene Venø Skjærbæk, Henrik Stenholt, Carsten Brian Nielsen og Dorte Nedergaard for deres store hjælp med prøvetagning i felten og de omfattende vand- og jordanalyser. Mange tak til Tinna Christensen for værdifuld grafisk assistance. Projektet er finansieret af PAF drænfilterprojektet "SEGES innovationsplatform for drænvirkemidler".

6 Formidling af resultater

Resultaterne af projektet blev præsenteret på to internationale møder i 2021 (se resumé - bilag 2). En videnskabelig publikation, baseret på de omfattende data indhentet i dette projekt, er p.t. under udarbejdelse.

7 Referencer

- Bouwer, H., & Rice, R. C. (1976). A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, 12(3), 423–428.
<https://doi.org/10.1029/WR012i003p00423>
- Carstensen, M. V., Hashemi, F., Hoffmann, C. C., Zak, D., Audet, J., & Kronvang, B. (2020). Efficiency of mitigation measures targeting nutrient losses from agricultural drainage systems: A review. *AMBIO*, 49(11), 1820–1837.
- Chave, P.A. (2001). The EU Water Framework Directive, an introduction. IWA publishing, 208 p.
- Hoffmann, C. C., Zak, D., Kronvang, B., Kjaergaard, C., Carstensen, M. V., & Audet, J. (2020). An overview of nutrient transport mitigation measures for improvement of water quality in Denmark. *Ecological Engineering*, 155, [105863].
- Jabłońska, E., Winkowska, M., Wiśniewska, M., Geurts, J., Zak, D., & Kotowski, W. (2021). Impact of vegetation harvesting on nutrient removal and plant biomass quality in wetland buffer zones. *Hydrobiologia*, 848(14), 3273–3289.
- Jaynes, D. B., & Isenhardt, T. M. (2014). Reconnecting Tile Drainage to Riparian Buffer Hydrology for Enhanced Nitrate Removal. *Journal of Environmental Quality*, 43(2), 631–638. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.08.0331>
- Jaynes, D. B., & Isenhardt, T. M. (2019). Performance of Saturated Riparian Buffers in Iowa, USA. *Journal of Environmental Quality*, 48(2), 289–296.
- Lam, Q. D., Schmalz, B., & Fohrer, N. (2011). The impact of agricultural best management practices on water quality in a North German lowland catchment. *Environ. Monit. Assess.* 183:351–379.
<https://doi.org/10.2134/jeq2018.03.0115>
- Petersen, R. J., 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 the total Environment*, 787, [147619].
- Scanlon, B. R., Ruddell, B. L., Reed, P. M., Hook, R. I., Zheng, C., Tidwell, V. C., Siebert, S. (2017). The food-energy-water nexus: Transforming science for society. *Water Resour. Res.* 53: 3550–3556.
- Wang, H., L. Sheng, & J. Xu, (2021). *Clogging mechanisms of constructed wetlands: A critical review*. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126455.
- WWAP, (2015). The United Nations world water development report 2015. Water for a sustainable world. United Nations World Water Assess. WaProgr., Paris.

Zak, D., Kronvang, B., Carstensen, M., Hoffmann, C. C., Kjeldgaard, A., Larsen, S. E., Audet, J., Egemose, S., Jorgensen, C. A., Feuerbach, P., Gertz, F., & Jensen, H. S. (2018). Nitrogen and Phosphorus Removal from Agricultural Runoff in Integrated Buffer Zones. *Environmental Science & Technology*, 52(11), 6508-6517.

Bilag 1 undersøgelse af plantediversitet

Table A1. Plantearter observeret i den mættede randzone "Ulvskov" i oktober 2021.

Dansk navn	Latinsk navn
Lådden Dueurt	<i>Epilobium hirsutum</i>
Skovkogleaks	<i>Scirpus sylvaticus</i>
Almindelig Mjødurt	<i>Filipendula ulmaria</i>
Eng-Nellikerod	<i>Geum rivale</i>
Stor nælde	<i>Urtica dioica</i>
Ager-Padderok	<i>Equisetum arvense</i>
Eng-rævehale	<i>Alopecurus pratensis</i>
Rørgræs	<i>Phalaris arundinacea</i>
Knop-siv	<i>Juncus conglomeratus</i>
Lyse-siv	<i>Juncus effusus</i>
Almindelig Rapgræs	<i>Poa trivialis</i>
Gul fladbælg	<i>Lathyrus pratensis</i>
Mose-Bunke	<i>Deschampsia cespitosa</i>
Rød-El	<i>Alnus glutinosa</i>
Hassel	<i>Corylus avellana</i>
Alm. Rajgræs	<i>Lolium perenne</i>
Lav Ranunkel	<i>Ranunculus repens</i>
Angelik	<i>Angelica sylvestris</i>
Hundegræs	<i>Dactylis glomerata</i>
Kær-tidsel	<i>Cirsium palustre</i>
Ager-Tidsel	<i>Cirsium arvense</i>
Brombær	<i>Rubus sect. Rubus</i>
Vand-Mynte	<i>Mentha aquatica</i>
Burre-Snerre	<i>Galium aparine</i>
Almindelig Milturt	<i>Chrysosplenium alternifolium</i>
Almindelig Mangeløv	<i>Dryopteris filix-mas</i>

Bilag 2 abstract and proceeding



10 – 15 OCTOBER 2021 | Christchurch, New Zealand

„Saturated and integrated buffer zones as novel drainage mitigation measures in Denmark“

Dominik Zak, Mette Vodder Carstensen, Sofie Gyritia Madsen van't Veen, Rasmus Jes Petersen, Brian Kronvang

Department of Bioscience, Aarhus University, Vejløsvej 25, 8600 Silkeborg, Denmark

Vegetated buffer strips (VBSs) along watercourses have been introduced in many European countries to mitigate impacts on water quality and ecological quality of watercourses by reducing inputs of sediment and nutrients from surface runoff on intensively managed agricultural land. However, the effectiveness of VBSs was proven to be low for the retention of dissolved nutrients (NO_x , PO_4^{3-}), especially when agricultural drainage water was directly discharging to streams via tile drainage pipes. Therefore, two new drainage mitigation measures namely saturated and integrated buffer zones (SBZs and IBZs) have been implemented at test sites and studied during the last five years in Denmark for their retention efficiency for nitrogen and phosphorus. Tile drain pipes were disconnected at the sloping field margin to the riparian zone by diverting drainage water either to a buried, lateral distribution pipe running parallel to the stream (SBZ) or charging a pond combined with a sub-surface flow infiltration zone planted with vegetation (IBZ). Altogether, six sites were intensively monitored over a period of 2-5 years to evaluate the nutrient removal efficiency of SBZs and IBZs. Depending on the water inflow, physical soil characteristics, water saturation of soils and dominant vegetation type, a substantial fraction of the water can infiltrate the soil before reaching the watercourse. While the results on total nitrogen removal were promising for both systems with mean removal efficiencies between 31% and 76 % of the load, a risk of phosphorus release occurred at higher summer temperatures or if the buffer zone had organic soils.

About smaller and bigger kidneys: riparian zones as nutrient buffers in Denmark

Dominik Zak^{a,b}, Carl C Hoffmann^{a,b}, Brian Kronvang^{a,b},
Mette V Carstensen^a, Sebastian P Zacho^c, Joachim Audet^{a,b}

^a Dep. of Bioscience, Aarhus University, Denmark

^b Aarhus University, WATEC, Denmark

^c SEGES, Crops and Environment Innovation, Denmark

INTRODUCTION

In Denmark, measures reducing nitrogen (N) and phosphorus (P) losses from fields are divided into two main categories “source mitigation measures”, e.g. catch crops and fertiliser norms as well as set-a-side and afforestation, and “nutrient transport mitigation measures”, e.g. restored wetlands and a number of drainage mitigation measures (Figure 1). This paper deals with nutrient transport mitigation measures to reduce diffuse pollution from agriculture. It treats already approved measures, such as restoration of riparian wetlands, larger lowlands areas including fens and swamps, re-establishment of shallow lakes, constructed wetlands (surface flow and subsurface flow), as well as drainage mitigation measures not yet approved and still under development such as integrated buffer zones, saturated buffer zones and controlled drainage.

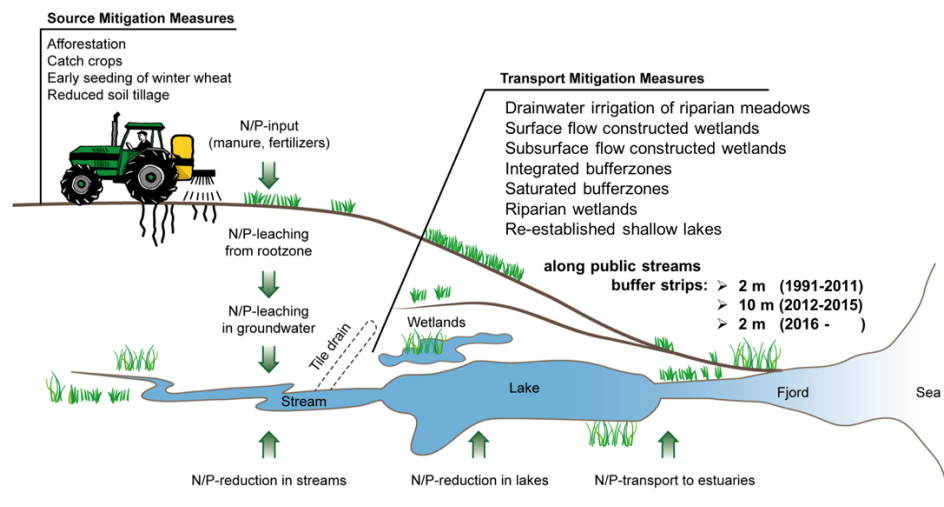


Fig. 1. Nutrient reduction efforts in Denmark since 1985.

METHODS

New nutrient transport mitigation measures cannot be implemented in Denmark until after completion of a series of steps. Whenever a new measure is proposed for use by Danish farmer advisors, it must be scientifically tested and thoroughly described. Thereafter, guidelines and national maps showing how and where to implement the measures must be made. A web-based support system for the funding of nutrient transport mitigation measures, including construction criteria, guidelines, and maps, is run by the Danish Ministry of Environment and Food (lbst.dk/tilskudsguide).

RESULTS and DISCUSSION

Wetland restoration measures have proved to be efficient at removing N, whereas the results regarding P are more variable; in fact, some sites have been observed to act as P sources, especially in the first years following rewetting (Walton et al., 2020). Overall nutrient removal rates and efficiency vary strongly for all of the studied nutrient transport mitigation measures (Table 1). It is important to note that this variation not

only reflect differences in efficiency of the mitigation measures but also differences in nutrient loading and local characteristics of the sites used for implementation (e.g. soil type, vegetation, climate) (Carstensen et al. 2020).

Table 1. Overview of absolute and relative nutrient removal efficiency (mean $\pm$ sd) of Danish nutrient transport mitigation measures (from Hoffmann et al. 2020)

	Sites	Years	Removal rate (kg ha ⁻¹ y ⁻¹)		Removal efficiency (%)	
	(n)		TN	TP	TN	TP
Restored riparian wetlands	9	9	144 $\pm$ 73	3 $\pm$ 5	37 $\pm$ 31	12 $\pm$ 15
Restored shallow lakes	11	12	159 $\pm$ 53	4 $\pm$ 6	45 $\pm$ 21	-2 $\pm$ 83
Restored swamps and fens	5	5	209 $\pm$ 77	2 $\pm$ 3	44 $\pm$ 12	11 $\pm$ 26
Drain water irrigation	10	10	139 $\pm$ 91	-0.3 $\pm$ 0.3	45 $\pm$ 22	-51 $\pm$ 49
Surface flow constr. wetland	13	44	472 $\pm$ 372	31 $\pm$ 26	23 $\pm$ 10	45 $\pm$ 20
Subsurface flow constr. wetland	3	15	7771 $\pm$ 241	34 $\pm$ 6	50 $\pm$ 13	12 $\pm$ 4
Controlled drainage	4	8	8.8 $\pm$ 6.5	2.2 $\pm$ 2.4	33 $\pm$ 13	5 $\pm$ 29
Integrated buffer zones	3	6	1661 $\pm$ 605	17 $\pm$ 15	45 $\pm$ 12	29 $\pm$ 60

CONCLUSIONS

The Danish strategy to mitigate agricultural nutrient losses has resulted in a substantial decrease in the nutrient export to fresh waters. Yet, more efforts are still required to reach the “good ecological status” stipulated in the EU Water Framework Directive. Furthermore, it is recognized that other aspects, for example, biodiversity or greenhouse gas emissions, needs to be included in monitoring schemes to support the implementation of mitigation measures.

ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful for Nordic Centre of Excellence BIOWATER, funded by Nordforsk under Project no. 82263, by the Ministry of Environment and Food of Denmark (33010-NIFA-16-649) and by PAF drænfilter-projekt “SEGES innovationsplatform for drænvirkemidler”. SupremeTech Sustainable nutrient remediation technologies grant no. 09-067280, Danish Strategic Research Council; iDRAIN-Optimised Drainage Filter Technologies grant no 3405-10-0142, GUDP (Green development and demonstration programme) also supported the work.

REFERENCES

- Carstensen, M.V., et al. 2020. Efficiency of mitigation measures targeting nutrient losses from agricultural drainage systems: A review. *Ambio* 49(11): 1820-1837.
- Hoffmann, C.C., et al. 2020. An overview of nutrient transport mitigation measures for improvement of water quality in Denmark. *Ecological Engineering*: 105863.
- Walton, C., et al., 2020. Wetland buffer zones for nitrogen and phosphorus retention: Impacts of soil type, hydrology and vegetation. *Science of the Total Environment*:138709.