

Intelligente bufferzoner

Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 12. March 2019

Sofie G. W. van't Veen, Dominik Zak, Niels B. Ovesen og Brian Kronvang
Institut for Bioscience, Aarhus Universitet

Henning S. Jensen
Biologisk Institut, Syddansk Universitet

Støttet af:
Miljø- og Fødevareministeriet
Antal sider: 36

Faglig kommentering:
Joachim Audet
Kvalitetssikring, centret:
Signe Jung-Madsen



AARHUS
UNIVERSITET

DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Tel.: +45 8715 0000
E-mail: dce@au.dk
<http://dce.au.dk>

Indhold

1. Indledning og formål	3
2. Konstruktion af en IBZ	4
3. De undersøgte anlæg og gennemførte målinger	6
4. Resultater	8
4.1 Fillerup IBZ1	8
4.2 Fillerup IBZ2	14
4.3 Sillerup IBZ	21
4.4 Lillerup IBZ	25
4.5 Kvælstofretention i alle undersøgte IBZ'er	29
4.6 Fosforretention i alle undersøgte IBZ'er	30
4.7 Hvad koster det at etablere en IBZ?	31
5. Konklusion	32
5.1 Taksigelser	33
6. Referencer	35

1. Indledning og formål

Dette notat beskriver effekterne af virkemidlet intelligente bufferzoner (IBZ) til målrettet rensning af drænvand for kvælstof (N) og fosfor (P). Desuden IBZ'er opsamle vand fra overfladisk afstrømning og tilbageholde sediment, organisk kvælstof og P, der ellers for en stor dels vedkommende ender i vandløb og søer.

Fødevare- og Landbrugspakken, der blev indført i december 2015, indeholder planer om en målrettet regulering af landbrugets kvælstofemissioner. Dette indebærer kompensationsforslag til indførsel af målrettede drænvirkemidler allerede fra 2019 til reduktion af udledningerne af N fra landbrugsarealerne. De målrettede drænvirkemidler forventes at skulle reducere N-tilførsningen til kystvandene med 3800 tons (Miljø- og Fødevareministeriet, 2015). Udvikling og test af nye drænvirkemidler er derfor nødvendigt for at kunne tilbyde en bred vifte af målrettede virkemidler, som landmændene kan vælge imellem

Desuden er der brug for at udvikle nye virkemidler til at reducere P-belastningen af overfladevand fra det åbne land, hvor især P-tab via drænvand og overfladisk afstrømning er problematisk (Kronvang et al., 2017; Poulsen & Rubæk, 2015). Samtidig er der med udsigten til et vådere klima i fremtiden behov for at udvikle nye metoder til at forsinke vandafstrømningen fra dræn til vandløb, hvilket kan være med til at forhindre oversvømmelser (Wiborg et al., 2014, Kronvang et al., 2017).

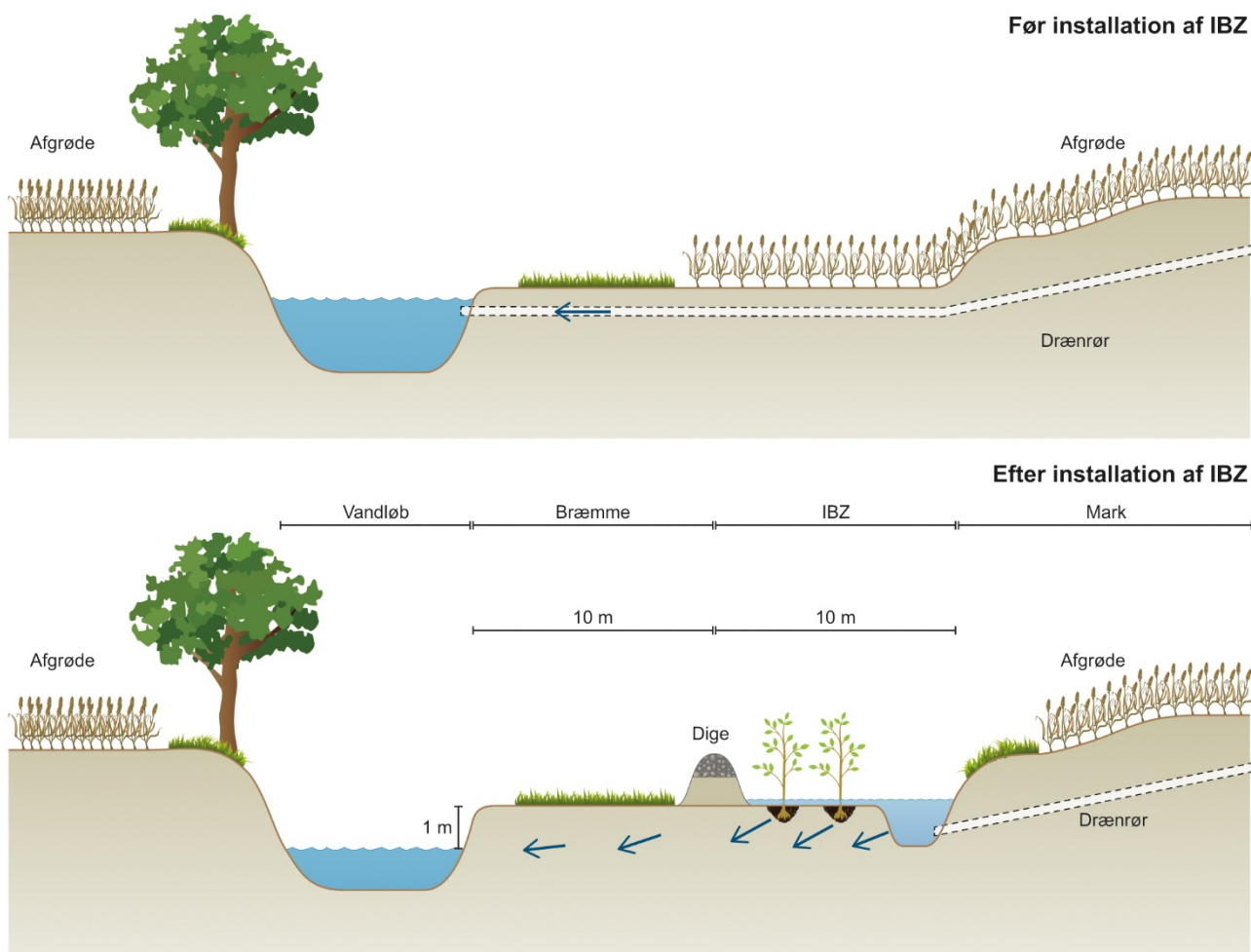
Dette notat er baseret på resultater fra Innovationsfondens forskningsprojekt 'BufferTech' (www.buffertech.dk) samt NIFA-projektet 'Intelligente bufferzoner' (IBZ). Forskningsprojektet 'Buffertech' fra 2014-2018 handlede om integrerede randzoner i Danmark. I projektet blev intelligente bufferzoner (IBZ'er) testet i forhold til virkemidlets evne til omsætning og tilbageholdelse (retention) af N og P-forbindelser i fire eksperimentelt anlagte IBZ'er: to ved Fillerup i Østjylland og to ved Spjald i Vestjylland (www.buffertech.dk) (Kronvang et al., 2017; Zak et al., 2018; Zak et al., 2019). I NIFA-projektet blev der etableret to nye fuldskalaanlæg, et ved Sillerup bæk i Sønderjylland og et ved Lillerup ved Horsens. Resultaterne i nærværende notat stammer primært fra de to nye fuldskalaanlæg og de to testanlæg i Fillerup, hvor målingerne fortsatte frem til slutningen af 2018 med det formål at undersøge effekten af IBZ'erne tre år efter, at virkemidlet blev installeret med henblik på at undersøge betydningen af alder for IBZ'ers virkning.

Formålet med de gennemførte undersøgelser, som danner baggrund for notatet, er at opnå en større viden om virkemiddelseffekten af IBZ'er i fuldskalaanlæg, som er fastlagt ud fra BufferTech-designet. Derudover analyseres udviklingen af virkemiddelseffekten i de mindre testanlæg tre-fire år efter anlæggelsen af IBZ'erne, for at undersøge, om effekten ændrer sig med alderen. Desuden vurderes udgifter til anlæggelse af fuldskala-IBZ'er, og der gives input til, hvordan anlæggelsen af IBZ'er kan kontrolleres.

2. Konstruktion af en IBZ

Princippet bag en IBZ er detaljeret beskrevet i en manual for intelligente bufferzoner (Kronvang et al., 2018). En IBZ virker ved at opfange både drænvand og eventuelt overfladisk afstrømning fra tilstødende marker, der kan være beriget med næringsstoffer (figur 1). Som det ses i figur 1, anlægges en IBZ i en bufferzone i en afstand på minimum 10 m til grøfter, vandløb og søer. I IBZ'en sker der for det første en omsætning og tilbageholdelse (retention) af sediment og næringsstoffer i selve den vanddækkede del, hvilket i det følgende vil blive kaldt det åbne bassin. For det andet foregår der en omsætning af nitrat-N ved gennemsivning af vand fra IBZ'en gennem sedimentet i anlægget ud til eksempelvis et vandløb, hvilket i det følgende kaldes infiltrationszonen (figur 1 og 2) (Kronvang et al., 2018).

I modsætning til N kan P ikke fjernes permanent, men tilbageholdes gennem kemiske, fysiske eller biokemiske processer. I både det åbne bassin og IBZ'ens infiltrationszone kan der foregå sorption (tilbageholdelse) og frigivelse af fosfat. Da der er nitrat til stede i det gennemsivende vand i IBZ'en, forventes det dog ikke, at der vil ske en stor og varig nettofrigivelse af P (Cabezas et al., 2013). Se manualen for IBZ'er for yderligere detaljer (Kronvang et al., 2018).



Figur 1. Konceptet bag installation af en IBZ i randzonen langs et vandløb.

Figur 2 viser konstruktionen af to testanlæg i Fillerup og to fuldskalaanlæg i henholdsvis Sillerup og Lillerup. En IBZ består som beskrevet både af en infiltrationszone og et åbent bassin (figur 2). Det åbne bassin består dels af en grøft og et plateau, hvor plateauet er beplantet med elletræer. Under plateauet er infiltrationszonen. Bag plateauet er der desuden anlagt et dige, som det fremgår af figur 1. I det åbne bassin foregår de ovenfor omtalte processer, der finder sted i selve vandsøjlen, hvilket i vinter- og efterårsperioden både er i selve grøften og på plateauet, mens det i sommerperioden primært er i grøften. Det ses i figur 2, at piezometerrør er placeret i transekter i infiltrationszonen i alle IBZ'erne for at kunne tage vandprøver i selve infiltrationszonen. Derudover fremgår det, at indløb og udløb i testanlæggene er placeret i samme ende af IBZ'en. I fuldskalaanlæggene er udløbet placeret i den modsatte ende af IBZ'en for at øge retentionen i det åbne bassin, da de tidligere undersøgelser af testanlæggene viser, at både N- og P-retentionen hænger sammen med den hydrauliske opholdstid (HRT) (Wisniewska, 2018; Knudsen, 2017; Zak et al., 2018).

I dette notat dækker begrebet retention både omsætning og tilbageholdelse af nitrat-N og P. Retentionen i det åbne bassin beskriver retentionen i selve vandsøjlen, mens retentionen i infiltrationszonen er den retention, som finder sted i sedimentet i infiltrationszonen.

Figur 2. Oversigt over de fire IBZ'er: Fillerup IBZ1 og IBZ2, Lillerup IBZ og Sillerup IBZ med angivelse af infiltrationszonen og det åbne bassin, samt hvor der er udtaget vandprøver. Bemærk, at der er udtaget vandprøver i alle piezometerrør.

3. De undersøgte anlæg og gennemførte målinger

I nærværende notat er fire forskellige IBZ'er blevet undersøgt (figur 3). De undersøgte IBZ'er er konstrueret efter samme principskitse, men tilpasset individuelle lokale forhold, samtidig med at de to fuldskalaanlæg er optimeret ud fra erfaringer fra testanlæggene (tabel 1). Fillerup IBZ1 og IBZ2 er to eksperimentelt anlagte testanlæg, der er placeret ved Odder i Østjylland (figur 3). Begge forsøgsbassiner er på ca. 245 m² og undersøgt over to forskellige måleperioder: fra juli 2015 til juli 2016 (måleperiode 1) i BufferTech-projektet og fra juli 2017 frem til november 2018 (måleperiode 2) i NIFA-projektet (tabel 1). I Zak et al. (2018) findes mere detaljerede analyser af retentionseffektiviteten for både N og P i de to testanlæg i Fillerup i den første måleperiode.

Sillerup IBZ er et fuldskalaanlæg på 1057 m² placeret i Sillerup nær Christiansfeld i Sønderjylland. Målingerne i denne IBZ er foretaget fra juli 2017 til november 2018 (tabel 1). Lillerup IBZ er et mindre fuldskalaanlæg på 511 m² nær Gedved ved Horsens i Østjylland (tabel 1). Her blev der gennemført målinger fra januar 2018 frem til januar 2019.

Tabel 1. Oversigt over de forskellige anlagte IBZ'er i projekterne 'BufferTech' og 'NIFA'.

Navn	Lokalitet	Anlægstype	Størrelse (m ²)	Måleperiode
Fillerup IBZ1	Nær Odder	Test	245	Juli 15 – juni 16 Juli 17 – nov. 18
Fillerup IBZ2	Nær Odder	Test	245	Juli 15 – juni 16 Juli 17 – nov. 18
Sillerup IBZ	Nær Christiansfeld	Fuldskala	1057	Juli 17 – nov. 18
Lillerup IBZ	Nær Horsens	Fuldskala	511	Jan. 18 – jan. 19

Alle IBZ-anlæg var forsynet med flowmålere til måling af indløb af drænvand til anlægget og udløb af vand fra anlægget. Der var desuden opsat udstyr til måling af vandstand i bassinerne samt måling af nedbør ved hvert anlæg. Der var nedboret piezometerrør, som er filtersat på plateauet og baganlægget ud mod vandløbet. Piezometerrørene var typisk filtersat over 10's cm dybde i permeable horisonter typisk med sandlag. Prøvetagning blev foretaget med ISCO-sampler i drænindløb, og stikprøver af vand blev udtaget hver anden-tredje uge i drænindløb, afløb og typisk tre steder i selve bassinet. I opgørelser af stofbalancer blev der kun anvendt stikprøvetagninger, da der ikke var stor forskel mellem ISCO-målingerne og stikprøverne.

Desuden blev der foretaget pejlinger af grundvandsstanden i piezometerrør og udtaget vandprøver af enten alle rør eller de rør, som blev fundet hydraulisk aktive ved et gennemført tracerstudie i alle IBZ'erne, hvor der blev pulsdoseret med bromid. Formålet med at udføre tracerforsøgene var at undersøge vandets bevægelse gennem IBZ'en samt at undersøge, om IBZ'en var påvirket af grundvandsinteraktion (ind- eller udstrømning af grundvand til IBZ'en). Bromid er et konservativt stof, der gør det muligt at spore vandets strømninger og undersøge fortyndingen af bromidkoncentrationen i det åbne bassin, hvilket giver en indikation af, hvorvidt der er en grundvandspåvirkning. De piezometerrør, hvori der blev fundet bromid under forsøget, kunne derfor betragtes som hydraulisk aktive. I Lillerup IBZ viste det sig, at der tilstrømmede grundvand til

anlægget gennem bunden af IBZ'en. Inflow af grundvand blev bestemt én gang ved tømning af anlægget og aflukning af drænindløbet. Den efterfølgende stigning i vandstanden i anlægget og afløbet fra anlægget blev betragtet som et minimum for grundvandsindsivningen. I oktober 2018 blev der gennemført en flyvning med en drone udstyret med et infrarødt kamera over anlægget. Det lykkedes at spore indsivningszonen ud fra temperaturforskelle, og der blev derefter isat et piezometerrør til udtagning af vandprøver fra indsivende grundvand.

Figur 3. Oversigtskort over, hvor i Danmark de forskellige IBZ'er er placeret.



Alle vandprøver blev analyseret for total kvælstof (TN), nitrat (N-NO_3), klor (Cl), ammonium (NH_4) og sulfat (SO_4), samtidig med at der hver tredje prøvetagningsgang blev målt opløst organisk kulstof (DOC) i laboratoriet på AU, Bioscience. Koncentrationerne af total fosfor (TP), total opløst fosfat (TDP) og fosfat (PO_4) blev bestemt på SDU. Alle vandprøver er håndteret og analyseret ud fra gældende procedurer.

Alle IBZ-anlæg har haft et solpanel opsat til levering af strøm til flowmetre og/eller automatiske prøvetagere og dataloggere. Data for flow og vandstand blev via mobiltelefon transmitteret hver time til en PC. Hermed blev eventuelle fejl mv. på anlægget løbende registreret og medtaget i planlægningen af prøvetagningen.

4. Resultater

I det følgende vil resultaterne fra de fire IBZ-anlæg, de to delanlæg i Fillerup, benævnt IBZ1 og IBZ2, samt de to nye fuldskaalanlæg ved Sillerup og Lillerup blive analyseret. En samlet tabel over retentionseffektiviteten i de enkelte undersøgte IBZ-anlæg fremgår sidst i afsnittet med resultater for effektiviteten for både N og P.

4.1 Fillerup, IBZ1

Fillerup IBZ1 er et i 2018 fire år gammelt testanlæg, der i sommerperioden har en vis biomasse af undervandsplanter i grøften samt en stor tilvækst af græsser/buske mellem de plantede elletræer på IBZ-plateauet. Der blev i efteråret 2017 bestemt biomasse af vegetation i anlægget, som er rapporteret i Zak et al. (2019). Der blev observeret et hul i diget i IBZ1 i starten af den anden måleperiode (september 2017), hvor vand ved en vis vandstand i anlægget siver ud på engen bag anlægget ned mod vandløbet (Odder å). Minimums- og maksimumsinfiltrationen gennem infiltrationszonen i anlægget er derfor blevet beregnet.

Minimumsinfiltrationen er beregnet ud fra en opstillet sammenhæng mellem vandstanden i anlægget og i indløbet i den første måleperiode. Denne sammenhæng er benyttet til at beregne minimumsinfiltrationen gennem infiltrationszonen under plateauet ud fra vandstanden i anlægget i den anden måleperiode med en antagelse om, at infiltrationen ikke har ændret sig i den anden måleperiode. IBZ'en modtager kun indløbsvand fra dræn og i forsøgsperioden hverken vand fra grundvand (bedømt ud fra gennemført afværgedråning i forkant og tracerforsøg) eller fra overfladiskafstrømning (bedømt ud fra de løbende visuelle observationer ved feltbesøg).

Vandbalance

Vandbalancen for Fillerup IBZ1 for de to måleperioder viser, at indløbet af drænvand fra drænoplandet var ca. 22 % lavere i måleperiode 2 end i måleperiode 1 (tabel 2). Samtidig var nedbørsmængden, der faldt på anlægget i måleperiode 1, næsten dobbelt så stor som for periode 2 (tabel 2). Især den mindre indløbsvandmængde i periode 2 havde betydning for, hvor meget vand der strømmede igennem IBZ'en og dermed for den hydrauliske opholdstid. Infiltrationen af vand gennem infiltrationszonen faldt også fra måleperiode 1 til måleperiode 2 med ca. 30 %, bedømt ud fra minimumsinfiltrationen.

Tabel 2. Vandbalance for Fillerup IBZ1 for de to måleperioder juli 15 til juni 16 og juli 17 til juni 18.

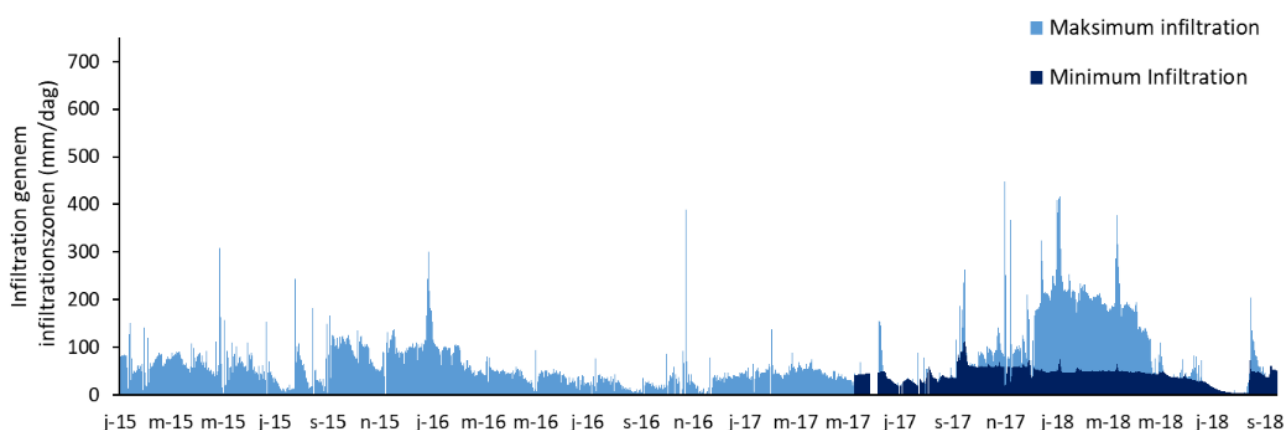
Moniteringsperiode	Indløb (m ³)	Udløb (m ³)	Nedbør (m ³)	Fordampning (m ³)	Infiltration (m ³)
Juli 15 – juni 16	20123	14307	229	150	5911
Juli 17 – juni 18	19106	8896	158	157	Min.: 4116 Maks.: 10257

Udsivning gennem det opståede hul eller via en præferentiel strømningsvej under diget må antages at udgøre forskellen mellem den beregnede minimums- og maksimumsinfiltration. Forskellen i vand siver i dag ud på engen bag IBZ'en i en afstand af ca. 5 m fra diget. Denne vandmængde omfatter i alt

i anden måleperiode ca. 6000 m³ (tabel 2). Grundet bruddet i strømning i september 2017 er det ikke muligt at bedømme, om infiltrationen gennem selve anlægget er faldet eller steget mellem de to måleperioder.

Den daglige infiltration gennem infiltrationszonen fremgår af figur 4. I Fillerup IBZ1 blev infiltrationen beregnet til gennemsnitligt 66 mm/dag for den første måleperiode og til et gennemsnitligt minimum på 46 mm/dag og et maksimum på 116 mm/dag i den anden måleperiode.

Derudover er det tydeligt, at anlægget er et forsøgsanlæg og om efteråret og vinteren ikke dimensioneret korrekt i forhold til, hvor meget vand der kommer med drænet fra det ca. 20 ha drænopland. Der blev da også målt en del bypass-flow uden om IBZ-anlægget.



Figur 4. Infiltration gennem infiltrationszonen i Fillerup IBZ1 i perioden januar 2015 til september 2018.

Kvælstofbalancen

Input og omsætning/tilbageholdelse (retention) i det åbne bassin og i infiltrationszonen samt output af N er vist som en årlig kvælstofbalance for den første måleperiode juli 2015 til og med juni 2016 (figur 5) og sammenlignet med resultaterne fra den nye måleperiode fra juli 2017 til og med juni 2018 (figur 6). Det ses tydeligt, at input af total N til IBZ1 med drænvand faldt markant fra måleperiode 1 til måleperiode 2 (39 %) (figur 5 og 6). Hovedårsagen hertil er, at der var en del mindre nedbør i anden end i første måleperiode (tabel 2).

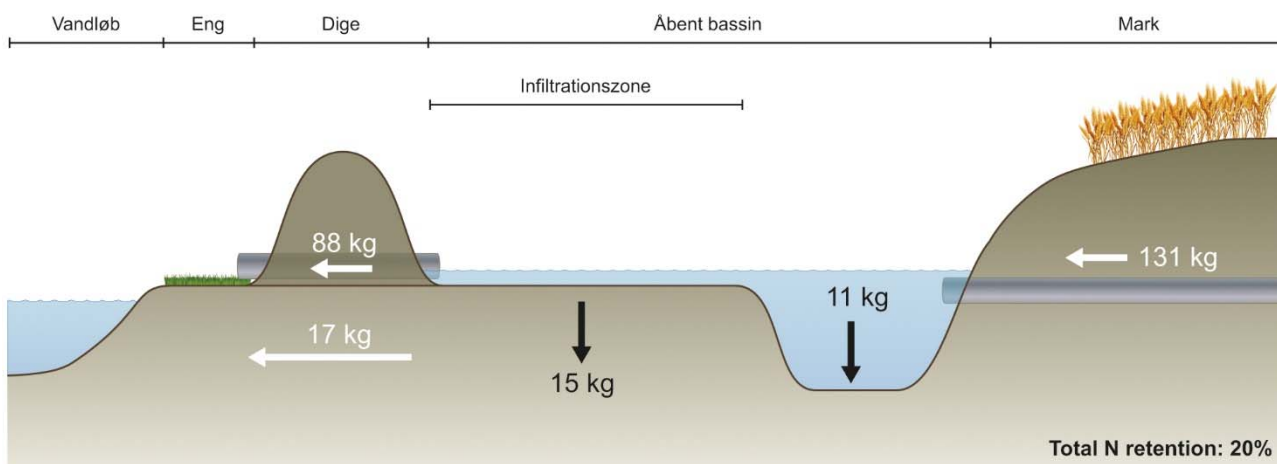
N-retentionen i det åbne bassin er derimod steget med 60 % fra måleperiode 1 til måleperiode 2 (figur 5 og 6). Denne stigning kan indikere, at anlægget med tiden har øget sin kapacitet til omsætning af nitrat ved denitrifikation. Med udgangspunkt i den beregnede minimumsinfiltration er N-retentionen faldet fra 15 kg i måleperiode 1 til 9 kg i infiltrationszonen i måleperiode 2, svarende til et fald på 38 %, hvilket direkte modsvarer faldet i infiltrationen af vand i IBZ1 mellem periode 1 og 2 (tabel 2).

Den del af infiltrationen af vand, der skyldes gennemsvivning af diget, kan ikke umiddelbart tillægges retention i IBZ-anlægget. Derimod ved vi fra andre studier, at der ved overrisling af eng med drænvand kan ske en fjernelse af nitrat på omkring 50 % (Miljøministeriet, 2014).

Den samlede N-retention for anlægget var i den første måleperiode på 20 %, mens den i den anden måleperiode var steget til at udgøre minimum 32 %. Forklaringen på den store stigning i anlæggets effektivitet for N-retention er for-

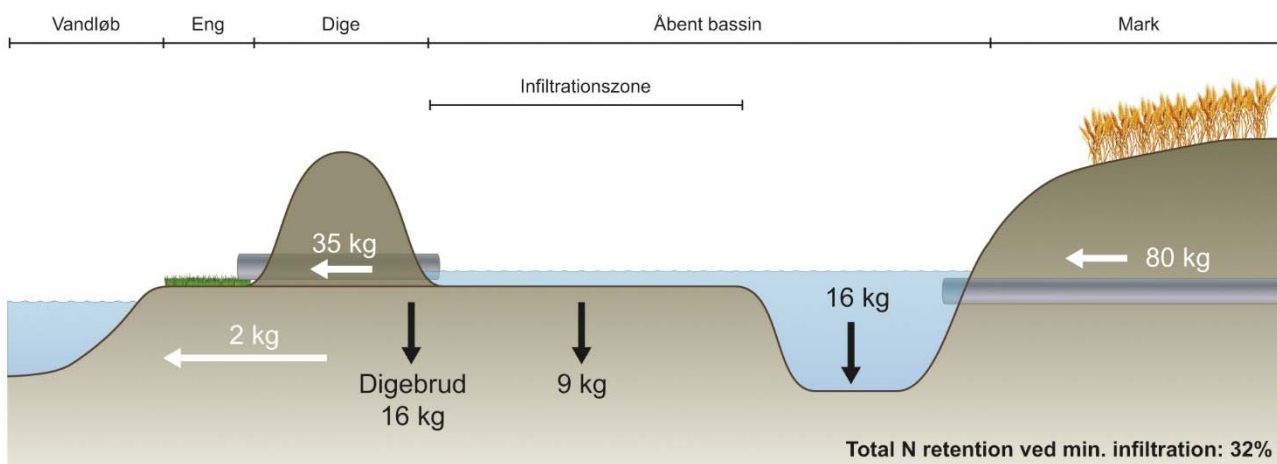
mentlig en kombination af en højere gennemsnitlig daglig hydraulisk opholdstid (HRT) i anlægget i måleperiode 1 (3,8 dage) end i måleperiode 2 (4,5 dage) samt muligvis en stigning i omsætningen af nitrat i bassinets vådområdedel. Det sidste kan måske være relateret til både en højere temperatur og større tilgængelighed af kulstof for denitrifikation fra den store udviklede biomasse af planter i grøften og på plateauet i det tre-fire år gamle anlæg.

Årlig total kvælstofbalance (Juli 2015–Juni 2016)



Figur 5. Total kvælstofbalance i kg for Fillerup IBZ1 i perioden juli 2015 til og med juni 2016.

Årlig total kvælstofbalance (Juli 2017–Juni 2018)

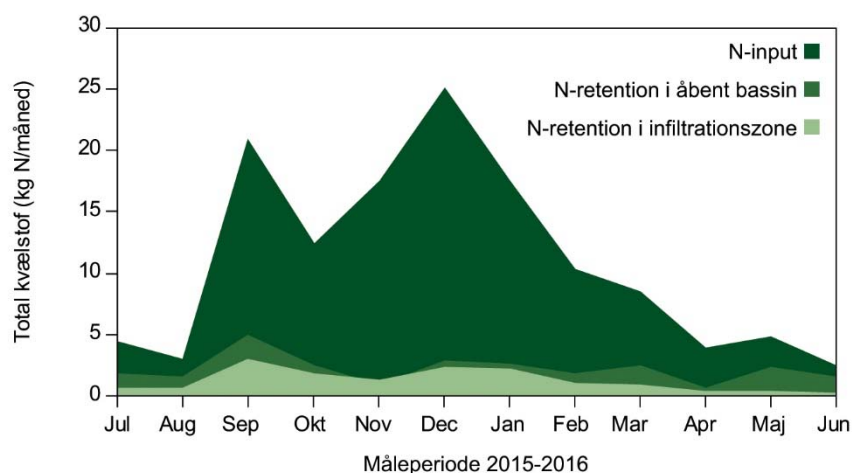


Figur 6. Total kvælstofbalance i kg for Fillerup IBZ1 i perioden juli 2017 til og med juni 2018.

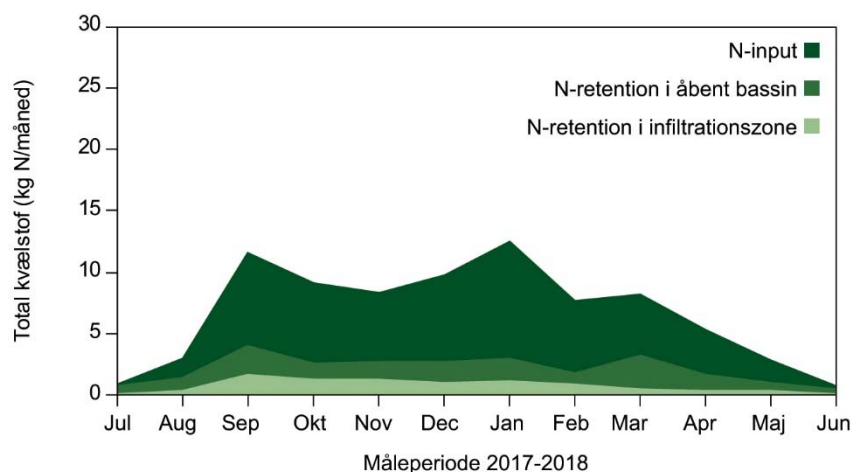
Det sæsonmæssige forløb i de to måleperioder ift. input af total N til IBZ1 samt N-retention i det åbne bassin og i infiltrationszonen for måleperiode 2 fremgår af figur 7 og 8. Det ses for begge måleperioder, at den primære import af N sker i efteråret, i september, og i vintermånederne. Retentionen i infiltrationszonen er ligeledes højest i disse perioder, hvilket højst sandsynligt skyldes, at mere vand presses gennem infiltrationszonen grundet en højere vandstand i det åbne bassin. Modsat ses det, at retentionen i det åbne bassin er højest om foråret i den første måleperiode. Dette kan skyldes den højere HRT, en højere vandtemperatur samt i mindre grad et biologisk optag af N. Samtidig fremgår det, at retentionen i det åbne bassin er højest i september i den anden måleperiode, hvilket

hænger godt sammen med et større input af N, samtidig med at vandtemperaturen stadig er høj og HRT relativt lang.

Figur 7. Total kvælstof import vs. den samlede retention i IBZ'en opdelt i retention i åbent bassin og infiltrationszonen i Fillerup IBZ1 i måleperioden juli 2015 til og med juni 2016.



Figur 8. Total kvælstof import vs. den samlede retention i IBZ'en opdelt i retention i åbent bassin og i infiltrationszonen i Fillerup IBZ1 i måleperioden juli 2017 til og med juni 2018.



Det fremgår af tabel 3, at den totale N-retention i første måleperiode var på 20 %, mens den i anden måleperiode blev målt til minimum 32 %. Derudover fremgår det, at den gennemsnitlige månedlige N-retentionsrate var på 9 g/m²/måned i den første måleperiode og minimum 9 g/m²/måned i den anden måleperiode. Det er derfor vanskeligt at vurdere, om den samlede N-retentionsrate for IBZ1-anlægget er steget fra måleperiode 1 til måleperiode 2, eller om stigningen i N-retentionseffektiviteten skyldes hullet i diget, der har muliggjort, at en stor mængde vand har kunnet strømme ud af IBZ'en.

Tabel 3. Samlet årlig N-fjernelse i Fillerup IBZ1.

Måleperiode	Total N retention (%)	Gennemsnitlig total N retention (g N/m ² /måned)	Total N retention (kg N/ha)
Juli 2015 – juni 2016	20	9	1050
Juli 2017 – juni 2018	Min: 32	Min: 9	Min: 1051

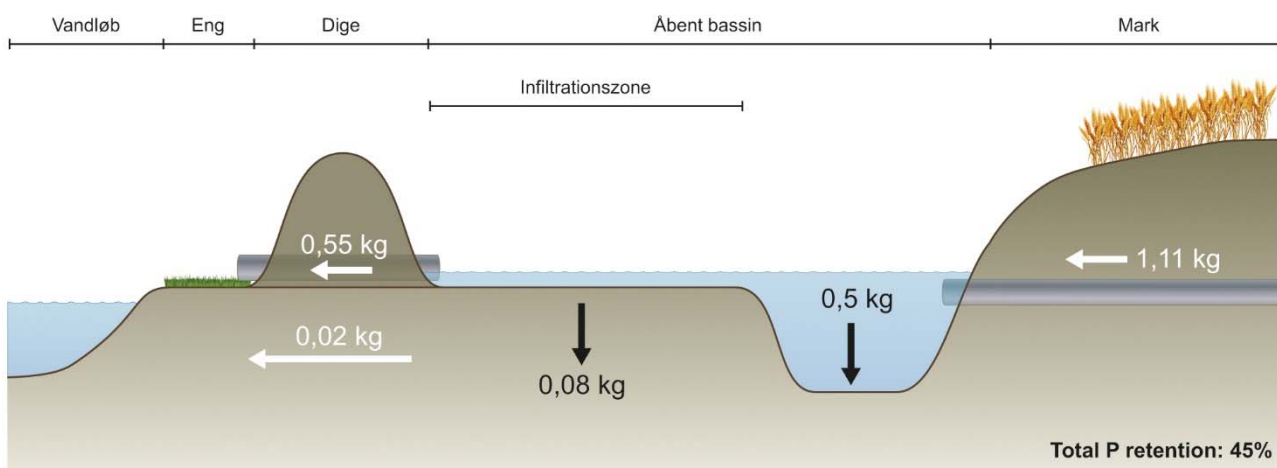
Fosforbalancen

Input og omsætning/tilbageholdelse (retention) i det åbne bassin og i infiltrationszonen samt output af P er vist som en årlig fosforbalance for perioden juli 2015 til og med juni 2016 (figur 9) og sammenlignet med resultaterne for

perioden juli 2017 til og med juni 2018 (figur 10). Det ses tydeligt, at input af total P med drænvand til IBZ2 er steget fra måleperiode 1 til måleperiode 2 (24 %) (figur 9 & 10). P-retentionen i det åbne bassin er steget markant fra måleperiode 1 til måleperiode 2 med ca. 98 % (figur 9 & 10), hvilket kan indikere, at anlægget med tiden har øget sin kapacitet til retention af P. P-retentionen i infiltrationszonen er faldet fra 0,08 kg i måleperiode 1 til 0,02 kg i måleperiode 2, svarende til et fald i retention på 3 procentpoint, hvilket kan forklares ved faldet i infiltrationen af vand i IBZ2 mellem periode 1 og 2 (tabel 2).

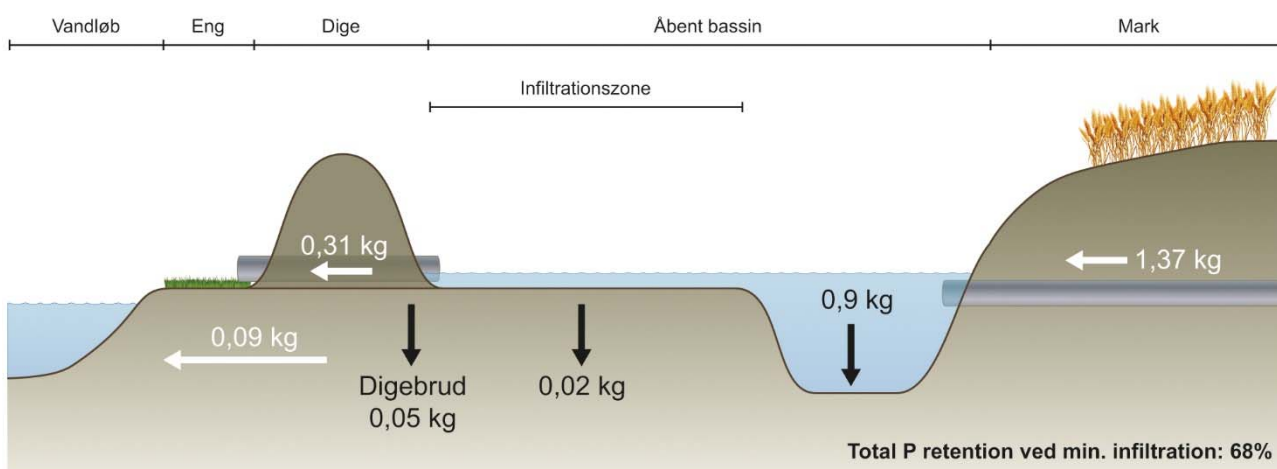
P-retentionseffektiviteten var i den første måleperiode 1 på 45 %, mens den i den anden måleperiode var steget til at udgøre minimum 67 %. Forklaringen på stigningen i anlæggets effektivitet af P-retention skyldes en kombination af en højere gennemsnitlig daglig HRT i anlægget i måleperiode 1 (3,8 dage) end i måleperiode 2 (4,5 dage) samt muligvis en stigning i retentionen af P i bassinets vådområdedel – måske relateret til et højere optag fra planterne i bassinet og især på plateauet i det ældre anlæg.

Årlig total fosforbalance (Juli 2015–Juni 2016)



Figur 9. Total fosforbalance i kg for Fillerup IBZ1 i perioden juli 2015 til og med juni 2016.

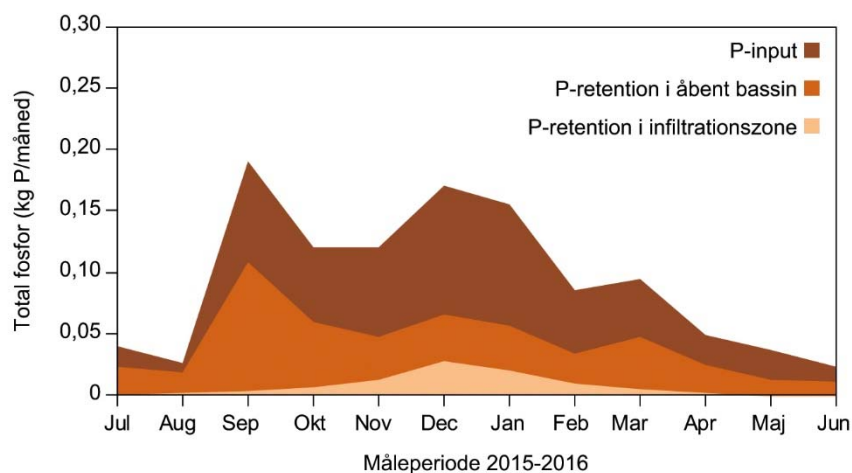
Årlig total fosforbalance (Juli 2017–Juni 2018)



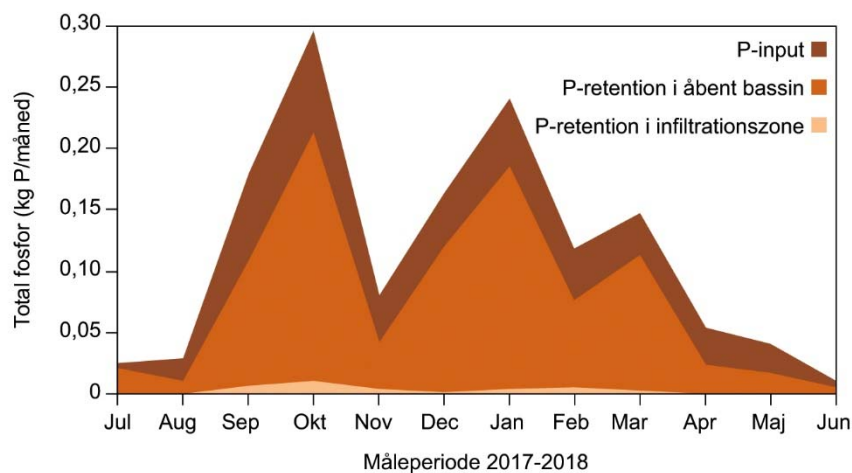
Figur 10. Total fosforbalance i kg for Fillerup IBZ1 i perioden juli 2017 til og med juni 2018.

Det sæsonmæssige forløb i de to måleperioder ift. input af total P til IBZ1 og P-retention i det åbne bassin og i infiltrationszonen samt retention gennem hul i dige i måleperiode 2 fremgår af figur 11 og 12. Det ses for begge måleperioder, at den primære import af P sker om efteråret og vinteren. Retentionen i infiltrationszonen var ligeledes højest i disse perioder, hvilket højst sandsynligt skyldes, at mere vand presses gennem infiltrationszonen i disse perioder grundet en højere vandstand i det åbne bassin. Det ses for måleperiode 2, at retentionen i det åbne bassin i højere grad følger importen af P, og der ses en høj retention i vintermånederne. I sommermånederne fremgår det dog for begge måleperioder, at den samlede retention er høj i forhold til importen af P, hvilket kan skyldes den højere HRT samt et højere optag af fosfat i plante-biomassen i bassinet og især på plateauet.

Figur 11. Total fosfor import vs. den samlede retention i IBZ'en opdelt i retention i åbent bassin og i infiltrationszonen i Fillerup IBZ1 i måleperioden 2015-2016.



Figur 12. Total fosfor import vs. den samlede retention i IBZ'en opdelt i retention i åbent bassin og i infiltrationszonen i Fillerup IBZ1 i måleperioden 2017-2018.



Det fremgår af tabel 4, at P-retentionseffektiviteten i første måleperiode var på 45 %, mens den i anden måleperiode blev målt til minimum 68 %. Derudover fremgår det, at den gennemsnitlige månedlige P-retentionsrate var på 0,17 i første måleperiode og omkring 0,32 g/m²/måned for minimumsberegningen i anden måleperiode. Den samlede P-retentionsrate for IBZ2-anlægget var derfor højere i måleperiode 2 end i måleperiode 3.

Tabel 4. Samlet årlig fosfortilbageholdelse i Fillerup IBZ1 i de to måleår – i det andet måleår angivet som minimumstilbageholdelsen.

Måleperiode	Total P retention (%)	Gennemsnitlig total P retention (g/m ² /måned)	Total P retention (kg P/ha)
-------------	-----------------------	---	-----------------------------

Juli 15 – juni 16	45	0,17	20,5
Juli 17 – juni 18	Min: 68	Min: 0,32	Min: 38

4.2 Fillerup IBZ2

Fillerup IBZ2 afviger kun fra Fillerup IBZ1 ved, at der i bunden af grøften blev udlagt en membran, som betyder, at plantevæksten i selve grøften er begrænset. IBZ'en modtager kun indløbsvand fra dræn og ikke fra grundvand og overfladisk afstrømning.

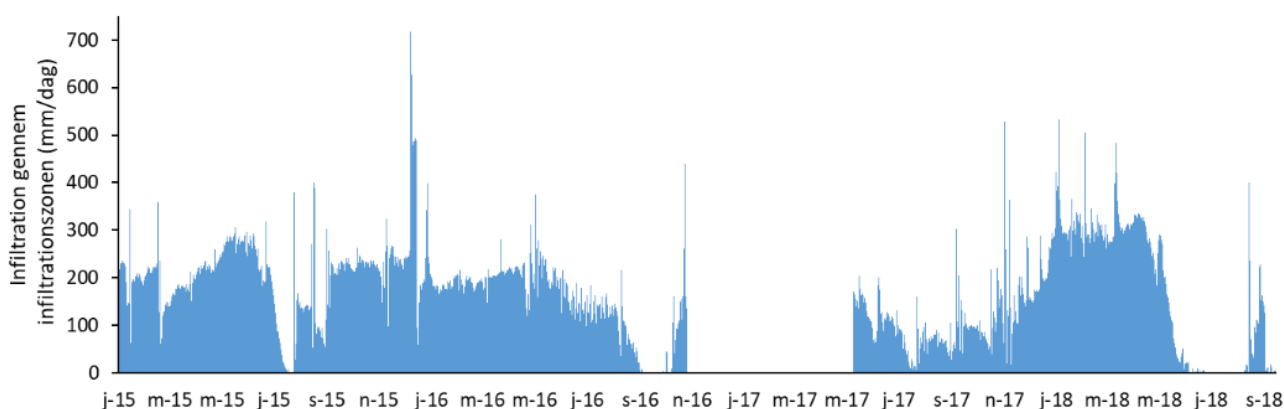
Vandbalance

Vandbalancen for Fillerup IBZ2 for de to måleperioder viser, at indløbet af vand fra drænoplandet var ca. 22 % lavere i måleperiode 2 end i måleperiode 1 (tabel 5). Samtidig var nedbørsmængden, der faldt på anlægget i måleperiode 1, næsten dobbelt så stor som for periode 2 (tabel 5). Især den mindre indløbsvandmængde i periode 2 har betydning for, hvor meget vand der er strømmet igennem IBZ'en og dermed for den hydrauliske opholdstid. Infiltrationen af vand gennem infiltrationszonen er også faldet fra måleperiode 1 til måleperiode 2, dog kun med ca. 12 %, hvilket indikerer, at der er sket en stigning i infiltrationen fra måleperiode 1 til 2.

Den daglige infiltration gennem infiltrationszonen fremgår af figur 13. I Fillerup IBZ2 er infiltrationen beregnet til gennemsnitligt 193 (mm/dag) for den første måleperiode og 171 (mm/dag) for den anden måleperiode.

Tabel 5. Vandbalance for Fillerup IBZ2 for de to måleperioder: måleperiode 1 fra juli 2015 til og med juni 2016 samt måleperiode 2 fra juli 2017 til og med juni 2018.

Moniteringsperiode	Indløb (m ³)	Udløb (m ³)	Nedbør (m ³)	Fordampning (m ³)	Infiltration (m ³)
Juli 15 – juni 16	27744	10511	229	150	17314
Juli 17 – juni 18	21556	6384	158	157	15183



Figur 13. Infiltration gennem infiltrationszonen i Fillerup IBZ2 i perioden januar 2015 til september 2018. Bemærk, at der er hul i data mellem november 2016 frem til juni 2017 grundet mangel på strøm til at måle.

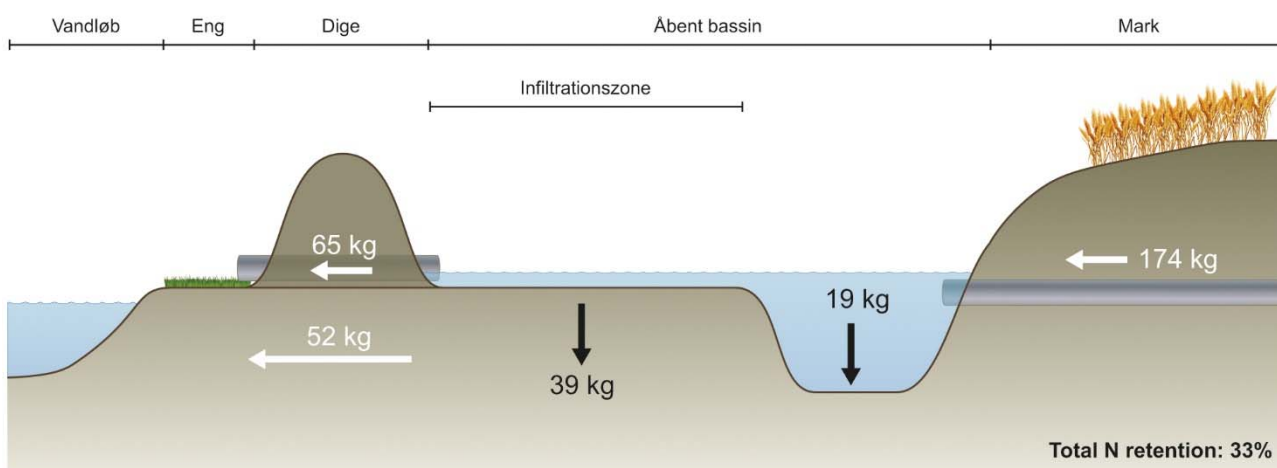
Kvælstofbalancen

Input og omsætning/tilbageholdelse (retention) i det åbne bassin og i infiltrationszonen samt output af N er vist som en årlig kvælstofbalance for perioden juli 2015 til og med juni 2016 (figur 14) og sammenlignet med perioden juli 2017 til og med juni 2018 (figur 15). Det ses tydeligt, at input af total N til IBZ2 med drænvand faldt markant fra måleperiode 1 til måleperiode 2 (48 %) (figur

14 og 15). N-retentionen i det åbne bassin er derimod steget fra måleperiode 1 til måleperiode 2 med ca. 16 % (figur 15 og 16), hvilket kan indikere, at anlægget med tiden har øget sin kapacitet til omsætning af nitrat ved denitrifikation. N-retentionen i infiltrationszonen er faldet fra 39 kg i måleperiode 1 til 34 kg i måleperiode 2, svarende til et fald på 13 %, hvilket hænger godt sammen med faldet på 12 % i infiltrationen af vand i IBZ2 mellem periode 1 og 2 (tabel 5).

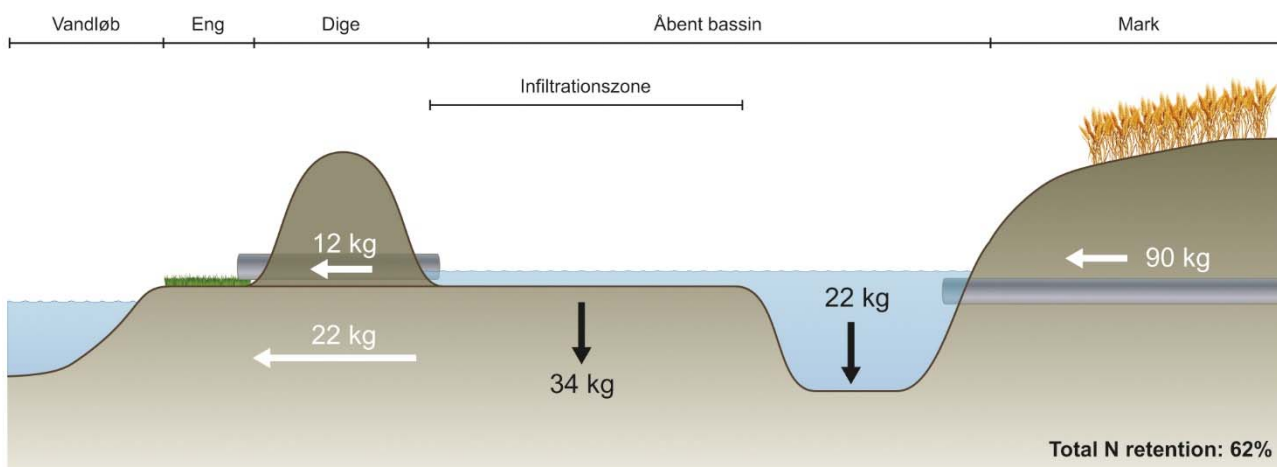
N-retentionseffektiviteten var i den første måleperiode på 33 %, mens den i den anden måleperiode steg til 62 %. Den store stigning i anlæggets effektivitet for N-retention skyldes en kombination af en højere gennemsnitlig daglig HRT i anlægget i måleperiode 1 (1,7 dage) end i måleperiode 2 (3,3 dage) samt muligvis en stigning i omsætningen af nitrat i bassinets vådområdedel – måske relateret til både en højere temperatur og øget tilgængelighed af kulstof fra planterne i bassinet og på plateauet tre-fire år efter anlæggets etablering.

Årlig total kvælstofbalance (Juli 2015–Juni 2016)



Figur 14. Total kvælstofbalance i kg for Fillerup IBZ2 i perioden juli 15 til juni 16.

Årlig total kvælstofbalance (Juli 2017–Juni 2018)

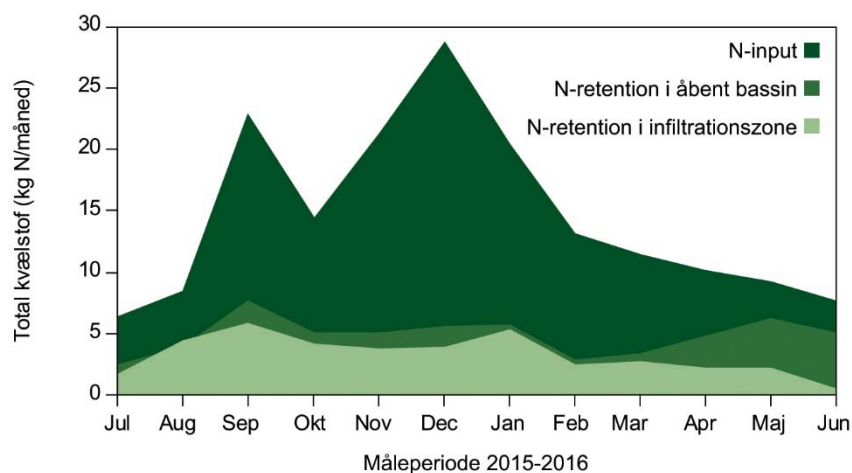


Figur 15. Total kvælstofbalance i kg for Fillerup IBZ2 i perioden juli 2017 til og med juni 2018.

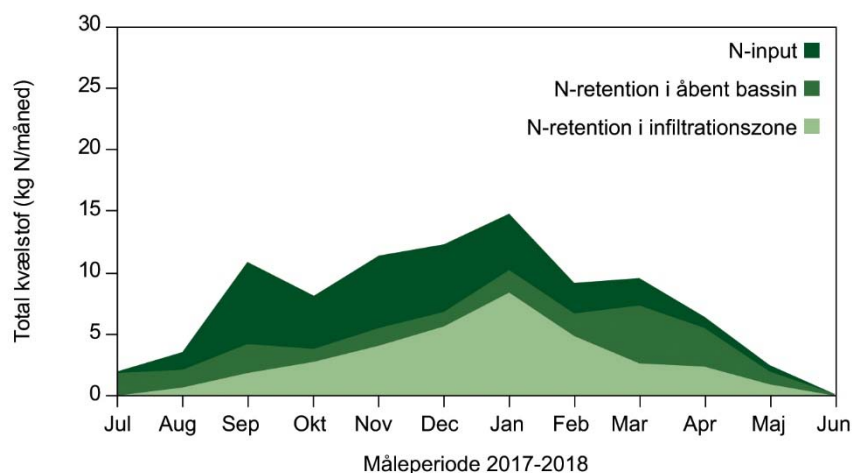
Det sæsonmæssige forløb i de to måleperioder ift. input af total N til IBZ2 samt N-retention i det åbne bassin og i infiltrationszonen fremgår af figur 16

og 17. Det ses for begge måleperioder, at den primære import af N sker i efteråret, i september, og i vintermånederne. Retentionen i infiltrationszonen er ligeledes højest i disse perioder, hvilket højst sandsynligt skyldes, at mere vand presses gennem infiltrationszonen i disse perioder grundet en højere vandstand i det åbne bassin. Modsat ses det, at retentionen i det åbne bassin er højest om foråret og sommeren, hvor der er en høj retention af N (figur 16 og 17). Dette kan skyldes den højere HRT, en højere vandtemperatur samt i mindre grad et biologisk optag af N.

Figur 16. Total kvælstof import vs. den samlede retention i IBZ'en opdelt i retention i åbent bassin og i infiltrationszonen i Fillerup IBZ2 i måleperioden 2015-2016.



Figur 17. Total kvælstof import vs. den samlede retention i IBZ'en opdelt i retention i åbent bassin og i infiltrationszonen i Fillerup IBZ2 i måleperioden 2017-2018.



Det fremgår af tabel 6, at N-retentionseffektiviteten i første måleperiode var på 33 %, mens den i anden måleperiode blev målt til 62 %. Derudover ses det, at den gennemsnitlige månedlige N-retentionsrate var på hhv. 18,6 og 19,6 g/m²/måned i de to måleperioder. Den samlede N-retentionsrate for IBZ2-anlægget var derfor lidt højere i måleperiode 1 end i måleperiode 2.

Tabel 6. Samlet årlig N-fjernelse i Fillerup IBZ2.

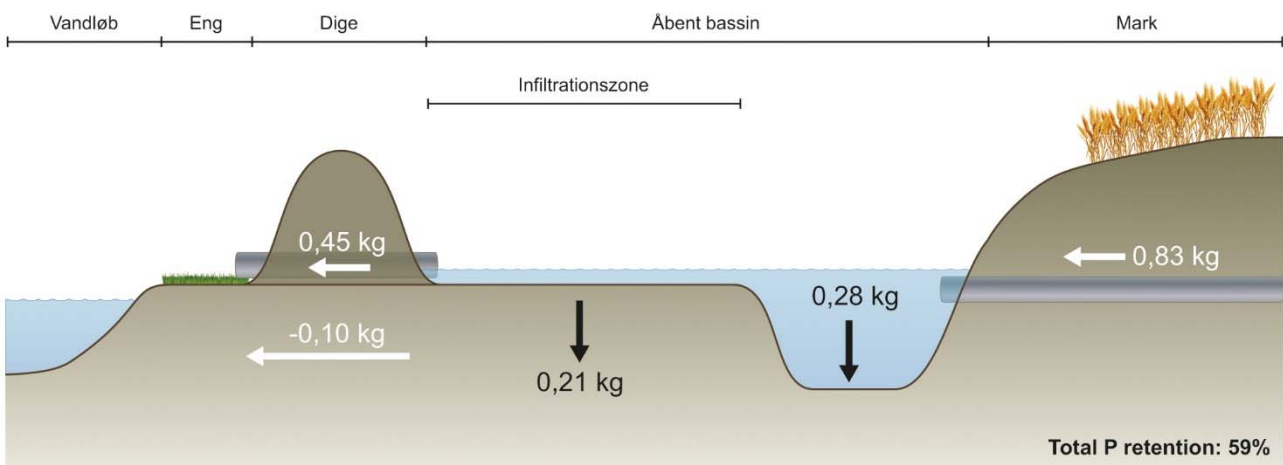
Måleperiode	Total N retention (%)	Gennemsnitlig total N retention (g N/m ² /måned)	Total N retention (kg N/ha)
Juli 15 – juni 16	33	19,6	2347
Juli 17 – juni 18	62	18,9	2273

Fosforbalancen

Input og omsætning/ tilbageholdelse (retention) i det åbne bassin og i infiltrationszonen samt output af P er vist som en årlig fosforbalance for perioden juli 2015 til og med juni 2016 (figur 18) og sammenlignet med perioden juni 2017 til og med juni 2018 (figur 19). Det ses tydeligt, at input af total P til IBZ2 med drænvand er steget markant fra måleperiode 1 til måleperiode 2 (76 %) (figur 18 og 19). P-retentionen i det åbne bassin er ligeledes steget markant fra måleperiode 1 til måleperiode 2 med ca. 227 % (figur 18 og 19), hvilket kan indikere, at anlægget med tiden har øget sin kapacitet til retention af P. P-retentionen i infiltrationszonen er faldet lidt, fra 0,21 kg i måleperiode 1 til 0,16 kg i måleperiode 2, svarende til et fald på 23 %, hvilket hænger sammen med faldet på 12 % i infiltrationen af vand i IBZ2 mellem periode 1 og 2 (tabel 5).

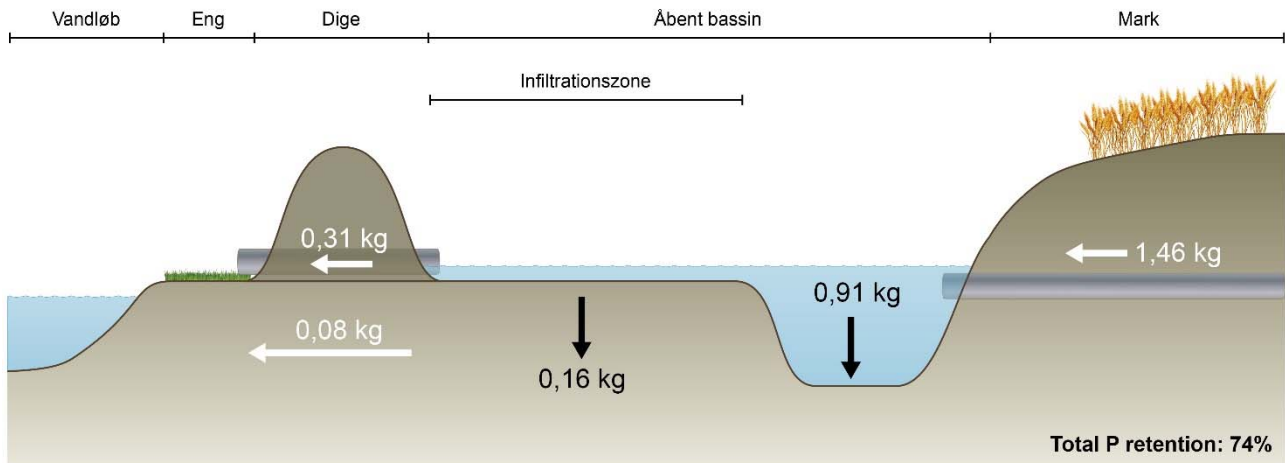
P-retentionseffektiviteten var i den første måleperiode på 59 %, mens den i den anden måleperiode steg til 74 %. Forklaringen på stigningen i anlæggets effektivitet af P-retention er en kombination af en højere gennemsnitlig daglig HRT i anlægget i måleperiode 1 (1,7 dage) end i måleperiode 2 (3,3 dage) samt muligvis en stigning i retentionen af P i bassinets vådområdedel – måske relateret til et højere optag af fosfat i planterne i bassinet og på plateauet i det ældre anlæg.

Årlig total fosforbalance (Juli 2015–Juni 2016)



Figur 18. Total fosforbalance i kg for Fillerup IBZ2 i perioden juli 2015 til og med juni 2016.

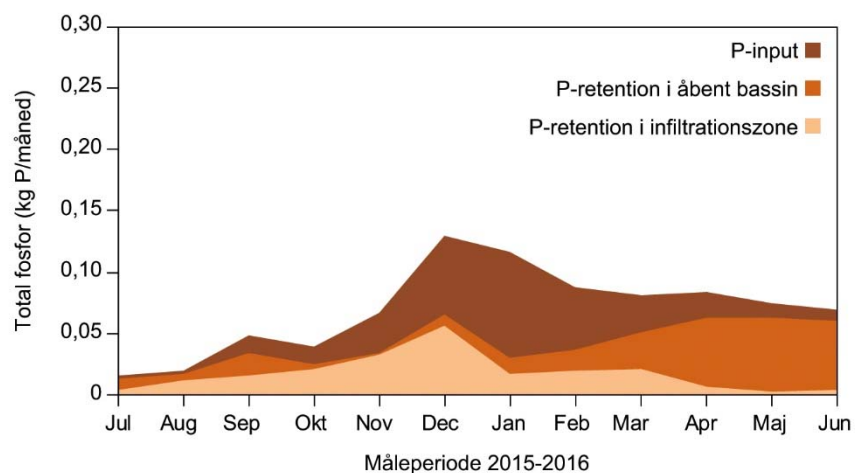
Årlig total fosforbalance (Juli 2017–Juni 2018)



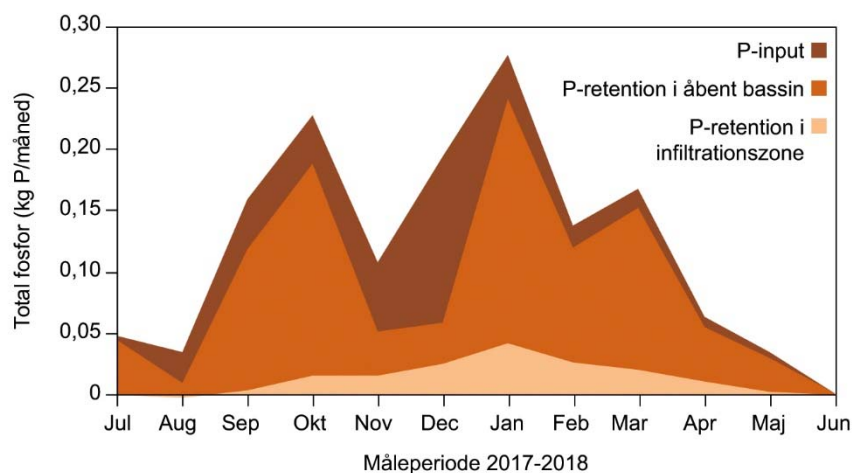
Figur 19. Total fosforbalance i kg for Fillerup IBZ2 i perioden juli 2017 til og med juni 2018.

Det sæsonmæssige forløb i de to måleperioder ift. input af total P til IBZ2 samt P-retention i det åbne bassin og i infiltrationszonen fremgår af figur 20 og 21. Det ses for begge måleperioder, at den primære import af P sker i vintermånederne, men for måleperiode 2 er der også målt en høj import af P i efteråret. Retentionen i infiltrationszonen er højest i januar, hvilket højst sandsynligt skyldes, at mere vand presses gennem infiltrationszonen grundet en højere vandstand i det åbne bassin. Modsat ses det for måleperiode 1, at retentionen i det åbne bassin er højest om foråret og sommeren, hvor der næsten er en samlet retention på 100 % af fosforinput fra drænvandet (figur 20 og 21). Dette kan skyldes den højere HRT samt et biologisk optag af P. For måleperiode 2 fremgår det, at retentionen i det åbne bassin i højere grad følger importen af P, og der ses en høj retention i vintermånederne. I sommermånederne fremgår det dog ligeledes for måleperiode 2, at den samlede retention udgør næsten 100 % af importen af P (figur 21).

Figur 20. Total fosfor import vs. den samlede retention i IBZ'en opdelt i retention i åbent bassin og i infiltrationszonen i Fillerup IBZ2 i måleperioden 2015-2016.



Figur 21 Total fosfor import vs. den samlede retention i IBZ'en opdelt i retention i åbent bassin og i infiltrationszonen i Fillerup IBZ2 i måleperioden 2017-2018.



Det fremgår af tabel 7, at P-retentionseffektiviteten i første måleperiode var på 59 %, mens den i anden måleperiode steg til 74 %. Derudover fremgår det, at den gennemsnitlige månedlige P-retentionsrate var på 0,15 og 0,37 g/m²/måned i begge måleperioder. Den samlede P-retentionsrate for IBZ2-anlægget var derfor højere i måleperiode 2 end i måleperiode 1, formentlig influeret af en længere opholdstid og et større biologisk optag.

Tabel 7. Samlet årlig P-retention i Fillerup IBZ2 i de to måleår.

Måleperiode	Total P retention (%)	Gennemsnitlig total P retention (g P/m ² /måned)	Total P retention (kg P/ha)
Juli 15 – juni 16	58,8	0,15	20,0
Juli 17 – juni 18	73,6	0,37	43,9

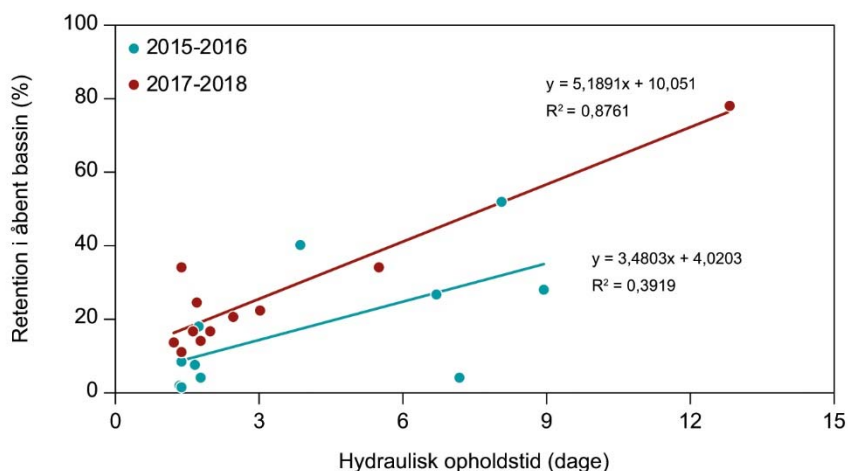
Sammenhæng mellem hydraulisk opholdstid og retention i det åbne bassin i Fillerup IBZ1 og IBZ2

Sammenhængen mellem den hydrauliske opholdstid og N-retentionseffektiviteten forventes at have betydning for IBZ-anlæggenes retentionseffektivitet, og det er derfor interessant at undersøge, om der var forskelle i sammenhængen mellem de to måleår.

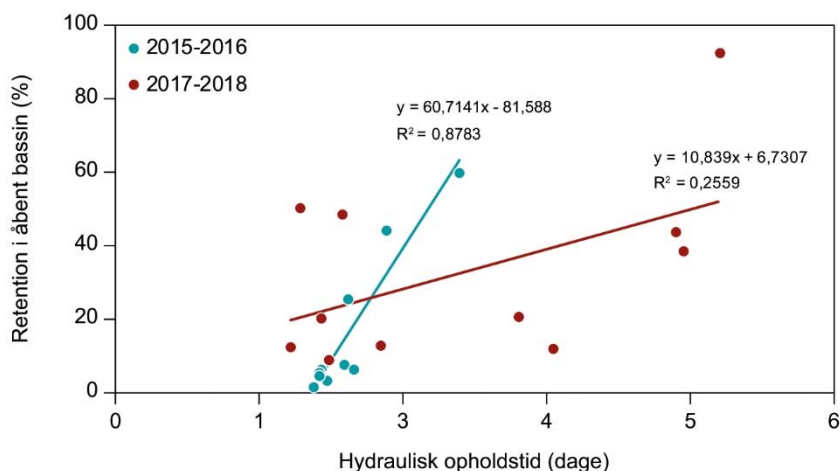
Sammenhængen mellem den gennemsnitlige månedlige hydrauliske opholdstid og N-retentionseffektiviteten i det åbne bassin for Fillerup IBZ1 og IBZ2 fremgår af figur 22 og 23. Der er sket en lille ændring i IBZ1, da hældningskoefficienten for sammenhængen mellem HRT og N-retentionseffektivitet steg en del fra 3,5 i første måleperiode til 5,2 i anden måleperiode (figur 22).

I IBZ2 er data mere slørede, og det ser umiddelbart ud til, at retentionseffektiviteten var højere i den første måleperiode end i den anden måleperiode (figur 23). Data er dog sparsomme fra måleperiode 1, hvor den gennemsnitlige månedlige HRT ligger inden for et snævert interval.

Figur 22. Sammenhæng mellem de gennemsnitlige månedlige hydrauliske opholdstider og den gennemsnitlige månedlige N-retention i det åbne bassin i Fillerup IBZ1 i de to måleperioder 2015 til 2016 og 2017 til 2018.



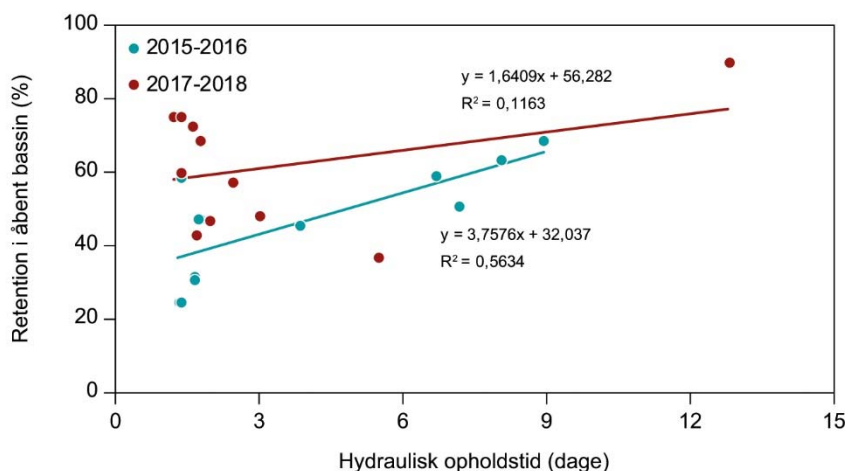
Figur 23. Sammenhæng mellem de gennemsnitlige månedlige hydrauliske opholdstider og den gennemsnitlige månedlige N-retention i det åbne bassin i Fillerup IBZ2 i de to måleperioder 2015 til 2016 og 2017 til 2018.



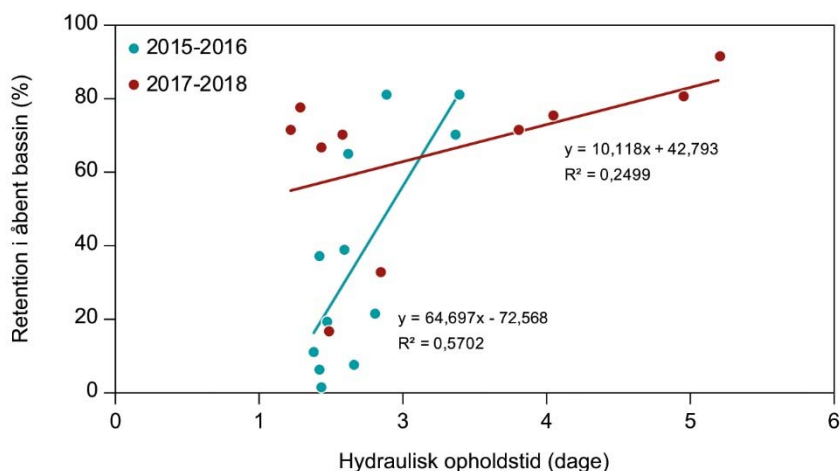
Sammenhængen mellem den gennemsnitlige månedlige hydrauliske opholdstid og P-retentionseffektiviteten i det åbne bassin for Fillerup IBZ1 og IBZ2 fremgår af figur 24 og 25. For Fillerup IBZ1 kan der ikke opstilles en god sammenhæng mellem HRT og retentionen i det åbne bassin i måleperiode 2 ($R^2=0,1$), mens der for første måleperiode er en rimelig god sammenhæng ($R^2=0,6$).

Generelt er der i IBZ1 en højere P-retentionseffektivitet i måleperiode 2 end i måleperiode 1 (figur 24). I IBZ2 er billedet ikke helt så tydeligt, da sammenhængen for måleperiode 1 er opstillet på baggrund af et meget snævert HRT-interval (figur 25).

Figur 24. Sammenhæng mellem de gennemsnitlige månedlige hydrauliske opholdstider og den gennemsnitlige månedlige P-retention i det åbne bassin i Fillerup IBZ1 i de to måleperioder 2015 til 2016 og 2017 til 2018.



Figur 25. Sammenhæng mellem de gennemsnitlige månedlige hydrauliske opholdstider og den gennemsnitlige månedlige P-retention i det åbne bassin i Fillerup IBZ2 i de to måleperioder 2015 til 2016 og 2017 til 2018.



4.3 Sillerup IBZ

Sillerup IBZ er et fuldskalaanlæg, der blev anlagt i maj 2017. IBZ'en blev tilsat med en græsblanding, og der blev plantet elletræer på plateauet. Det har betydet, at IBZ'en både i grøften og på plateauet har været tilgroet med planter i det meste af måleperioden. Der blev observeret et hul i diget i november 2017, seks måneder efter etableringen af IBZ'en. Det er dog ikke altid, at der strømmer vand ud gennem dette hul. Når der ikke er vand på plateauet, løber der heller ikke vand ud af hullet. Derfor er der beregnet henholdsvis en minimums- og en maksimumsinfiltration gennem infiltrationszonen i anlægget. Minimumsinfiltrationen er beregnet ved hjælp af den maksimale vandstand, hvor der ikke er vand på plateauet i anlægget. Vandet, som ved høje vandstande strømmer gennem diget, løber ud på og overrisler det tilgroede areal bag IBZ'en og ned mod vandløbet Sillerup bæk. En del af nitraten i det vand, som overrisler den tilgroede elleeng, vil ved nedsivning kunne blive omsat ved denitrifikation (Hoffmann et al., 2012). Dette medregnes ikke i resultaterne, da der ikke er foretaget målinger af det overrislende vand på elleengen. Sillerup IBZ modtager kun indløbsvand fra dræn og ikke fra grundvand, da et afværgedræn blev nedlagt opstrøms for IBZ'en. IBZ'en modtager heller ikke vand fra overfladisk afstrømning bedømt ud fra visuelle observationer i felten.

Vandbalance

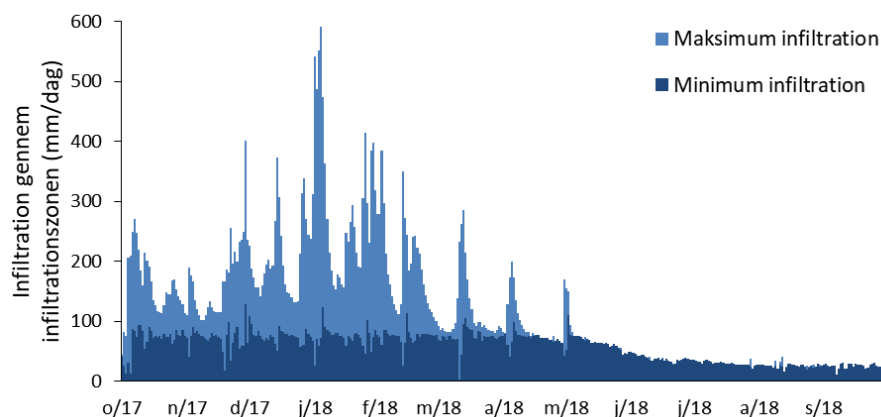
Vandbalancen for Sillerup IBZ i måleperioden oktober 2017 til og med september 2018 viser, at indløbet af vand fra drænoilandet er markant større end fra udløbet (tabel 8). Infiltrationen af vand gennem infiltrationszonen er derfor meget stor med et minimum på 21294 m³ og et maksimum på 45238 m³. Det fremgår af figur 26, at infiltrationen var nogenlunde konstant i de tørre måneder fra maj til september, hvor der ikke var vand på plateauet. Derudover fremgår det for den maksimale infiltration, at infiltrationen er højest i vintermånederne, hvilket skyldes en højere vandstand i det åbne bassin i anlægget, der presser mere vand igennem infiltrationszonen og igennem hullet i diget.

Den daglige infiltration gennem infiltrationszonen er vist i figur 26. I Sillerup IBZ er den gennemsnitlige infiltration beregnet til minimum 58 (mm/dag) og maksimum 117 (mm/dag) for den samlede måleperiode.

Tabel 8. Samlet sum af komponenterne i en årlig vandbalance for Sillerup IBZ i perioden 01.10.17 til 30.09.18.

Indløb (m ³)	Udløb (m ³)	Nedbør (m ³)	Fordampning (m ³)	Infiltration (m ³)
46824	1546	680	721	Min: 21294 Maks.: 45238

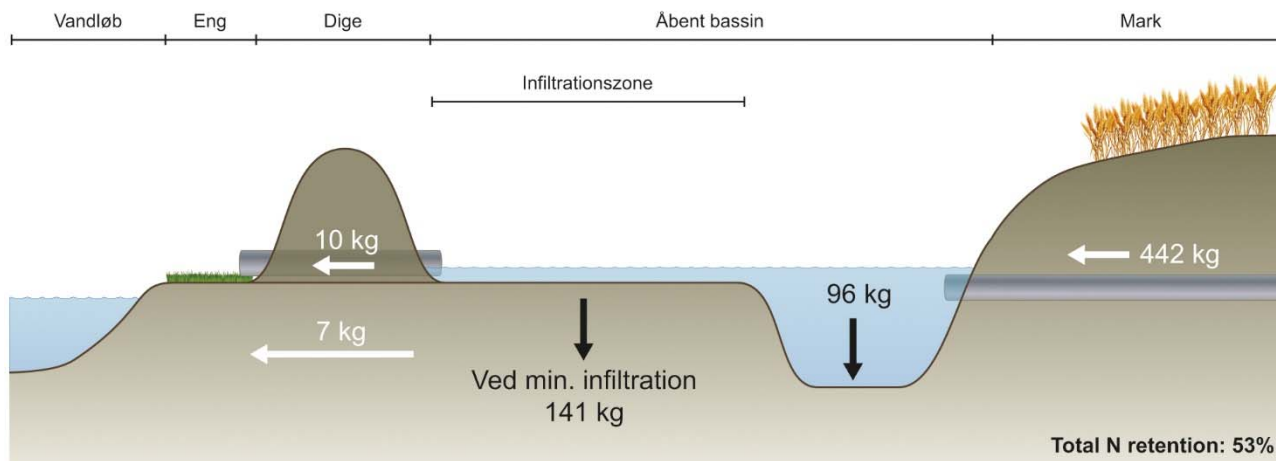
Figur 26: Maksimums- og minimumsinfiltration gennem infiltrationszonen i Sillerup IBZ i perioden 01.10.17 til 30.09.18.



Kvælstofbalancen

Input og omsætning/tilbageholdelse (retention) i det åbne bassin og i infiltrationszonen samt output af N er vist som en årlig kvælstofbalance for perioden oktober 2017 til og med september 2018 (figur 27). Det ses tydeligt, at input af total N til Sillerup IBZ med drænvand er markant større end det N, som forlader IBZ'en via udløbet (figur 27). N-retentionseffektiviteten i det åbne bassin er på 22 % (figur 27). N-retentionseffektiviteten ved infiltrationen er minimum 32 % (figur 27). Den samlede N-retentionseffektivitet i Sillerup IBZ udgør minimum 53 %.

Årlig total kvælstofbalance (Oktober 2017–September 2018)

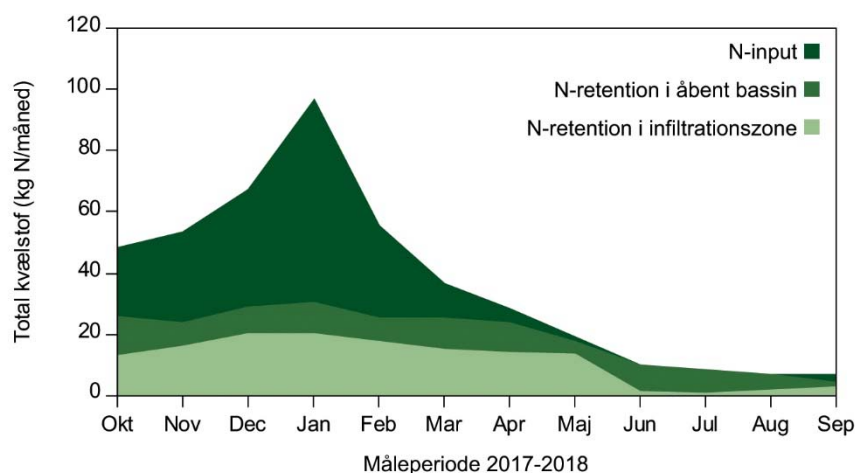


Figur 27. Årlig total kvælstofbalance i kg for Sillerup IBZ i perioden oktober 2017 til og med september 2018.

Det sæsonmæssige forløb i måleperioden ift. input af total N til Sillerup IBZ samt N-retention i det åbne bassin og i infiltrationszonen som et minimums-estimat fremgår af figur 28. Det ses, at den primære import af N sker i vintermånederne december, januar og februar. Maksimumsretentionen i infiltrationszonen er ligeledes højest i disse måneder og følger generelt importen fra oktober til juni måned. Minimumsretentionen i infiltrationszonen er generelt stabil fra oktober til maj, hvilket skyldes, at den er beregnet ud fra en fastholdt vandstand, som er bestemt af den vandstand i bassinet, der svarer til, at der ikke er vand på plateauet. Fra juni til september falder infiltrationen, hvilket skyldes den lavere vandstand i det åbne bassin, der betyder, at mindre vand presses gennem infiltrationszonen.

Retentionen i det åbne bassin er nogenlunde stabil hen over året på omkring 20 %, dog med lidt højere retention om foråret og sommeren på gennemsnitligt 64 % fra juni til september (figur 28). Dette kan skyldes en højere HRT, en højere vandtemperatur samt nok i mindre grad et biologisk optag af N. Den hydrauliske opholdstid ligger fra april til september på gennemsnitligt 6,4 dage, mens den fra oktober til marts er på gennemsnitligt 2,7 dage.

Figur 28. Årlig total kvælstof import vs. den samlede retention i IBZ'en opdelt i retention i åbent bassin og minimums- og maksimumsretentionen i infiltrationszonen.



Det fremgår af tabel 9, at N-retentionseffektiviteten for Sillerup IBZ er minimum 53 % i det første år efter IBZ'ens etablering. Derudover ses det, at den gennemsnitlige månedlige N-retentionsrate er minimum 18,5 (g/m²/måned) for det første års måleperiode.

Tabel 9. Samlet årlig retention i Sillerup IBZ for perioden oktober 2017 til september 2018.

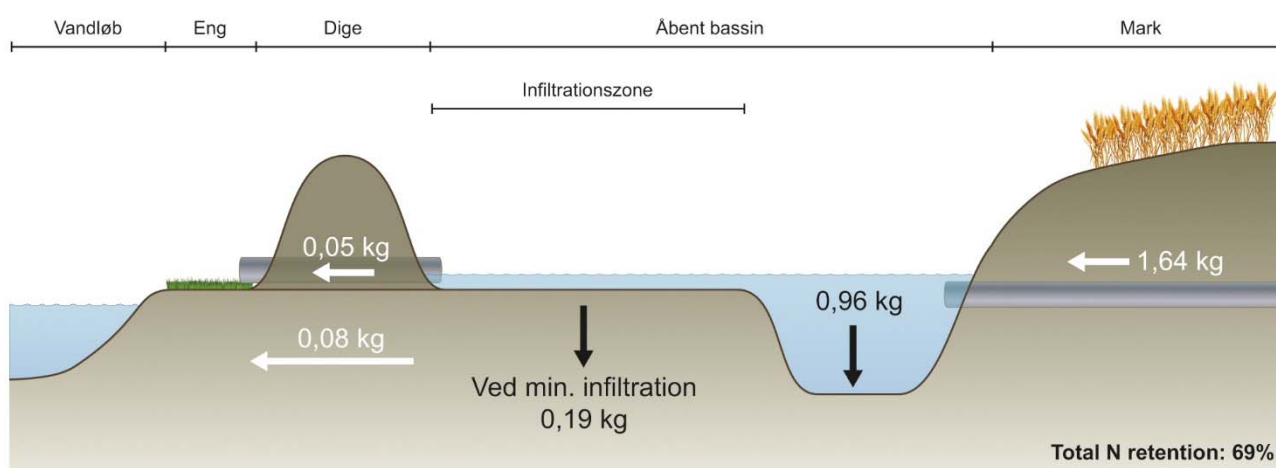
	Total N retention (%)	Gennemsnitlig total N retention (g N/m ² /måned)	Total N retention (kg N/ha)
Minimumsretention	53,1	18,5	2220

Fosforbalancen

Input og omsætning/tilbageholdelse (retention) i det åbne bassin og i infiltrationszonen samt output af P er vist som en årlig fosforbalance for perioden oktober 17 til september 18 (figur 29). Det ses tydeligt, at input af total P til Sillerup IBZ med drænvand er markant større end output (figur 29). P-retentionen i det åbne bassin er 59 % (figur 29), mens P-retentionen i infiltrationszonen er minimum 11 % (figur 29).

Den samlede P-retentionseffektivitet udgør minimum 69 %.

Årlig total fosforbalance (Oktober 2017–September 2018)

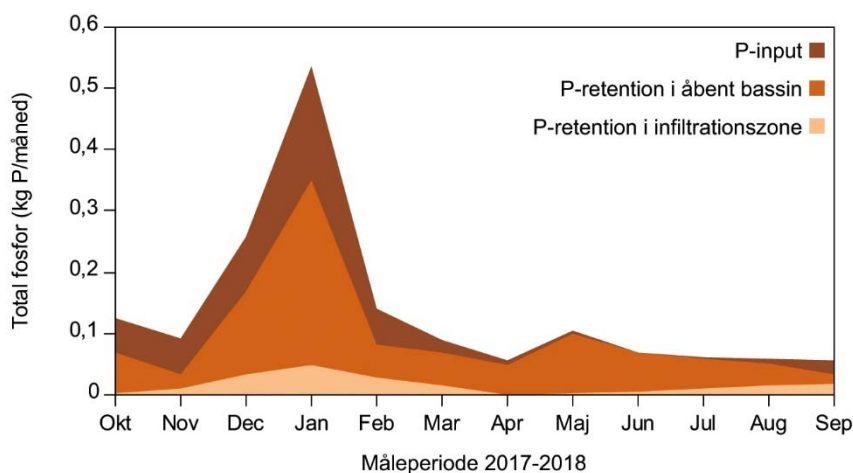


Figur 29. Total fosforbalance i kg for Sillerup IBZ i perioden oktober 2015 til og med september 2016.

Det sæsonmæssige forløb i måleperioden ift. input af total P til Sillerup IBZ samt P-retentionen i det åbne bassin og minimumretentionen af P i infiltrationszonen fremgår af figur 30. Det ses, at den primære import af P sker i vintermånederne december, januar og februar. Maksimumsretentionen i infiltrationszonen er ligeledes højest i disse måneder. Minimumsretentionen i infiltrationszonen er højest fra november til marts samt i sommermånederne juli til september (figur 30).

Retentionen i det åbne bassin er størst i januar og maj måned. Fra oktober til marts ligger den gennemsnitlige P-retention i det åbne bassin på 48 %, mens den gennemsnitligt fra april til september er 79 % (figur 30). Dette kan skyldes en højere HR, samt biologisk optag af P i planterne i det åbne bassin. Fra april til september ligger den hydrauliske opholdstid på 6,4 dage mens den fra oktober til marts gennemsnitligt er 2,7 dage.

Figur 30. Total fosfor import vs. den samlede retention i IBZ'en opdelt i retention i åbent bassin og maksimums- og minimums-retentionen i infiltrationszonen i Sillerup IBZ i måleperioden oktober 2017 til september 2018



Det fremgår af tabel 10, at P-retentionseffektiviteten for Sillerup IBZ som minimum er 69 %. Derudover fremgår det, at den gennemsnitlige månedlige N-retentionsrate er minimum 0,09 (g P/m²/måned) for måleperioden.

Tabel 10. Samlet årlig minimumstilbageholdelse af fosfor i Sillerup IBZ i perioden oktober 2017 til september 2018..

Måleperiode	Total P retention (%)	Gennemsnitlig total P retention (g P/m ² /måned)	Total P retention (kg P/ha)
Minimumsretention	68,9	0,09	10,70

4.4 Lillerup IBZ

Lillerup IBZ er et fuldskalaanlæg, som blev etableret i november 2017. Monitoringen i Lillerup IBZ blev dog først påbegyndt den 18. januar 2018. Retentionen er derfor kun bestemt for et skævt år. Data, som præsenteres i dette afsnit, er fra måleperioden 18.01.18 til 17.01.19. Lillerup er forskellig fra de andre IBZ-anlæg rent hydrologisk, da der under målingerne i det første år efter etableringen af IBZ'en blev observeret grundvandsindstrømning i bunden af det åbne bassin. Grundvandsindstrømningens størrelse er ved et kontrolleret forsøg, med tømning af anlæg og afskæring af indløb og udløb, blevet kvantificeret til at udgøre minimum 0,2 l/s, hvilket svarer til 17,3 m³/dag. Det betyder, at dette IBZ-anlæg både modtager indløbsvand med næringsstoffer fra dræn og fra grundvand. Derimod er der ikke konstateret et væsentligt input af vand fra overfladisk afstrømning på de tilstødende marker. Derudover blev anlægget ved etableringen ikke tilsået med en græsblanding, som de andre IBZ'er, men kun med elletræer, hvilket var en fejl fra entreprenørens side. Dette har betydet, at der i den åbne del og på plateauet gennem hele måleperioden har været meget lidt vegetation ud over de plantede elletræer. Tilstrømningen af grundvand blev med infrarødt kamera i oktober 2018 lokaliseret til et delareal på bunden af det åbne bassin. Der blev nedsat piezometer-rør i denne del af bunden, hvor der siden er blevet udtaget vandprøver for analyse af næringsstofkoncentrationer til brug i stofbalancerne.

Vandbalance

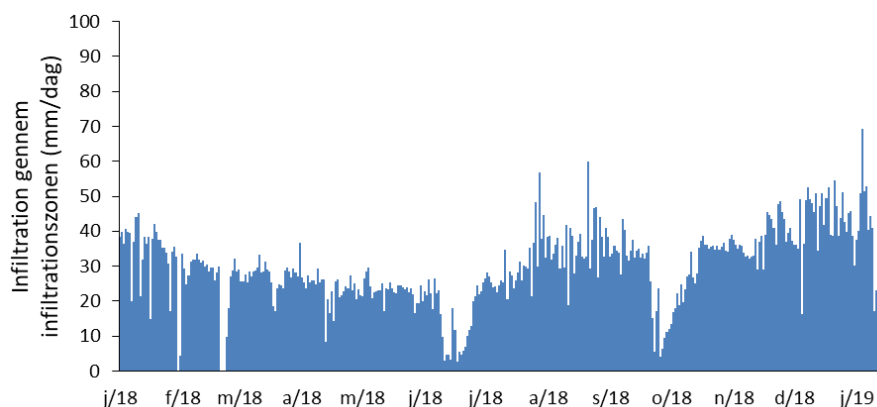
Vandbalancen for Lillerup IBZ i måleperioden januar 2018 til januar 2019 viser, at udløbet af vand fra drænoilandet er større end indløbet, hvilket skyldes indstrømning af grundvand til IBZ'en, som udgør 6307 m³ (tabel 11). Infiltrationen af vand gennem infiltrationszonen er 5484 m³. Det fremgår af figur

31, at infiltrationen var nogenlunde konstant igennem året med højere værdier i vinter- og efterårsmånederne, hvilket skyldes en højere vandstand i det åbne bassin i anlægget, der presser mere vand igennem infiltrationszonen. I perioderne fra 25. juni til 2. juli og 7. oktober til 12. oktober ses en lav infiltration (figur 31). Dette skyldes, at IBZ'en var tømt for vand i disse to perioder grundet forsøg i anlægget med at fastlægge grundvandsindstrømningen. Den daglige infiltration gennem infiltrationszonen fremgår af figur 31. I Lillerup IBZ er den gennemsnitlige infiltration beregnet til 29 (mm/dag) over hele måleperioden.

Tabel 11. Samlet sum af komponenterne i vandbalancen for Lillerup IBZ i perioden 18.01.18 til 17.01.19.

Indløb (m ³)	Udløb (m ³)	Nedbør (m ³)	Fordampning (m ³)	Infiltration (m ³)	Grundvandsindstrømning (m ³)
3688	4710	292	344	5484	6307

Figur 31. Infiltration gennem infiltrationszonen i Lillerup IBZ i perioden 18.01.18 til 22.11.18.



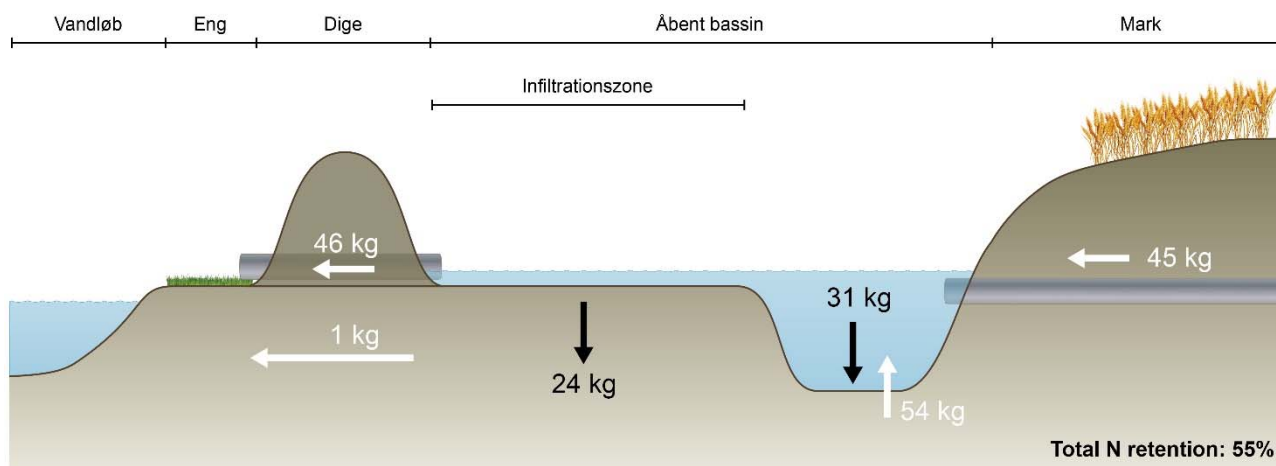
Kvælstofbalancen

Input og omsætning/tilbageholdelse (retention) i det åbne bassin og i infiltrationszonen samt output af N er vist som en kvælstofbalance for perioden januar 2018 til januar 2019 (figur 32). Det ses, at input af total N til Lillerup IBZ med drænvand (45 kg) er lidt lavere end udløbet (46 kg), hvilket skyldes, at der er en grundvandsinflux på 54 kg N ind i det åbne bassin. N-retentionen i det åbne bassin er på 31 kg (32 %), hvilket er lidt højere sammenlignet med de andre IBZ'er, der ligger på omkring de 20 %. Samtidig fremgår det, at retentionen i infiltrationszonen er på 24 kg, hvilket svarer til en retentionseffektivitet på 24 % (figur 32).

Den samlede N-retentionseffektivitet i måleperioden udgør 55 %.

Det sæsonmæssige forløb i måleperioden ift. input af total N til Lillerup IBZ samt N-retention i det åbne bassin og i infiltrationszonen fremgår af figur 33. Det ses, at den primære import af N sker i vintermånederne januar, februar og marts. Retentionen i infiltrationszonen er højest i januar og februar, hvilket skyldes den højere vandstand i det åbne bassin, der presser mere vand gennem infiltrationszonen. Retentionen er lavest i juni og juli, hvilket skyldes en meget lav vandstand i disse to måneder.

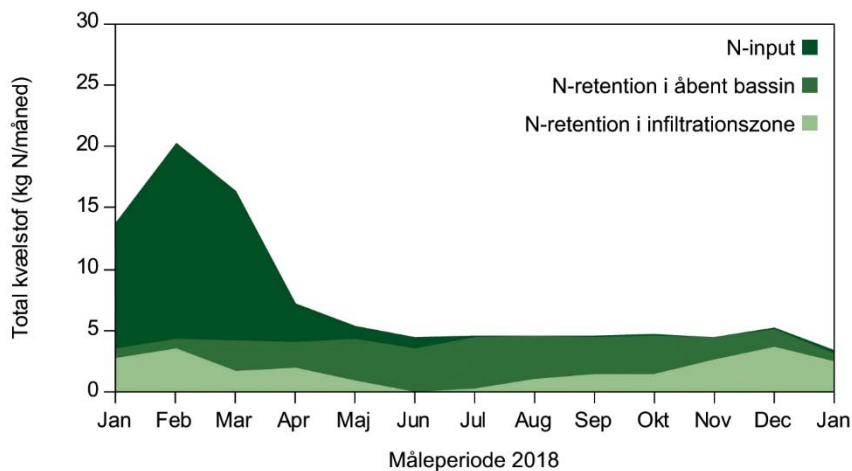
Årlig total kvælstofbalance (Januar 2018–Januar 2019)



Figur 32. Total kvælstofbalance i kg for Lillerup IBZ i perioden januar 2018 til januar 2019. Balancen går ikke helt op hvilket skyldes de forholdsvis små mængder og deraf følgende betydning af f.eks. atmosfærisk deposition, biologisk optag, mv.

Retentionen i det åbne bassin er højest i perioden juni til august (figur 33). Dette skyldes formentlig en højere HRT samt en højere vandtemperatur, mens det biologiske optag af N har været yderst begrænset pga. en meget lille biomasse i anlægget i det første måleår. Den hydrauliske opholdstid ligger fra januar til marts på gennemsnitligt 5,7 dage, mens den fra april til oktober gennemsnitligt er 19,0 dage.

Figur 33. Total kvælstof import vs. den samlede retention i IBZ'en opdelt i retention i åbent bassin og i infiltrationszonen i Lillerup IBZ. Bemærk, at import i figuren både er import fra dræn og fra grundvand.



Det fremgår af tabel 12, at N-retentionseffektiviteten for Lillerup IBZ er 55 %. Derudover fremgår det, at den gennemsnitlige månedlige N-retentionsrate ligger på 8,2 g/m² for måleperioden.

Tabel 12. Samlet årlig N-fjernelse i Lillerup IBZ.

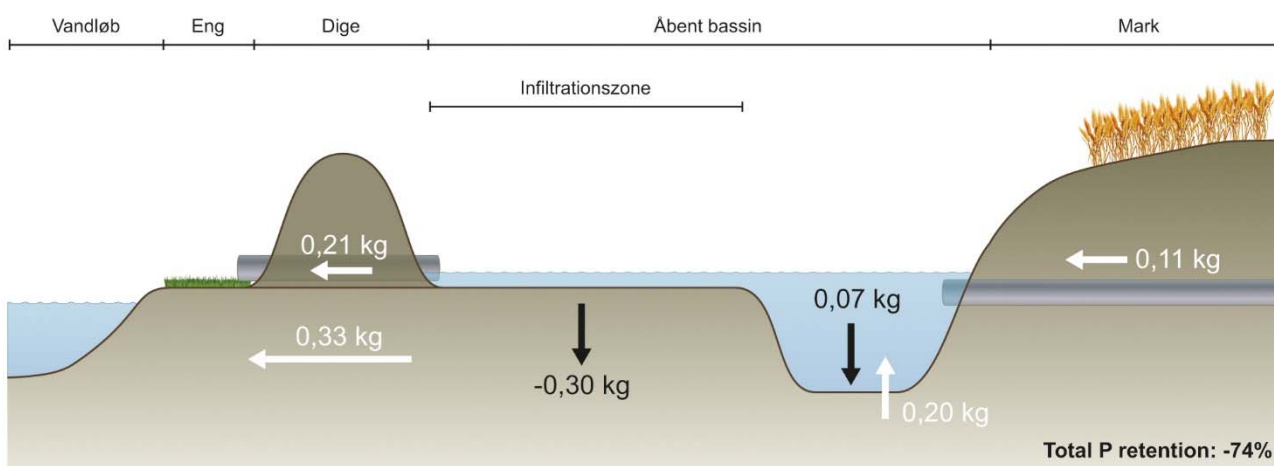
Total N retention (%)	Gennemsnitlig total N retention (g N/m ² /måned)	Total N retention (kg N/ha)
55,3	8,2	1064

Fosforbalancen

Input og omsætning/ tilbageholdelse (retention) i det åbne bassin og i infiltrationszonen samt output af P er vist som en fosforbalance for perioden januar 2018 til januar 2019 (figur 34). Det ses, at input af total P til Sillerup IBZ med drænvand (0,11 kg) er lidt lavere end udløbet (0,21 kg), hvilket skyldes, at der er en grundvandsinflux på 0,20 kg opløst uorganisk P til det åbne bassin. P-retentionen i det åbne bassin er på 0,07 kg (med en retentionseffektivitet på gennemsnitligt 24 %). Samtidig fremgår det, at retentionen i infiltrationszonen er negativ, dvs. der er en nettofrigivelse af uorganisk opløst P på -0,30 kg, hvilket svarer til en gennemsnitlig retentionseffektivitet på -98 % (figur 34). Dette betyder, at der er sket en umiddelbar nettofrigivelse af opløst uorganisk P i infiltrationszonen i hvert fald i dette første måleår.

Den samlede P-retentionseffektivitet udgør -74 %, hvilket skyldes nettofrigivelsen af P fra infiltrationszonen. I Lillerup IBZ-anlægget tilledes der i dette første måleår ekstremt små mængder af P med drænvandet, hvilket kan medvirke til at forklare den dårlige effektivitet af anlægget for P-retentionseffektiviteten, da der er meget lidt partikulært P i drænvandet, som kan sedimentere i anlægget. Desuden er den manglende plantebiomasse i anlægget i dette første måleår, efter at IBZ anlægget blev opført, en medvirkende faktor til den dårlige effekt for P.

Årlig total fosforbalance (Januar 2018–Januar 2019)

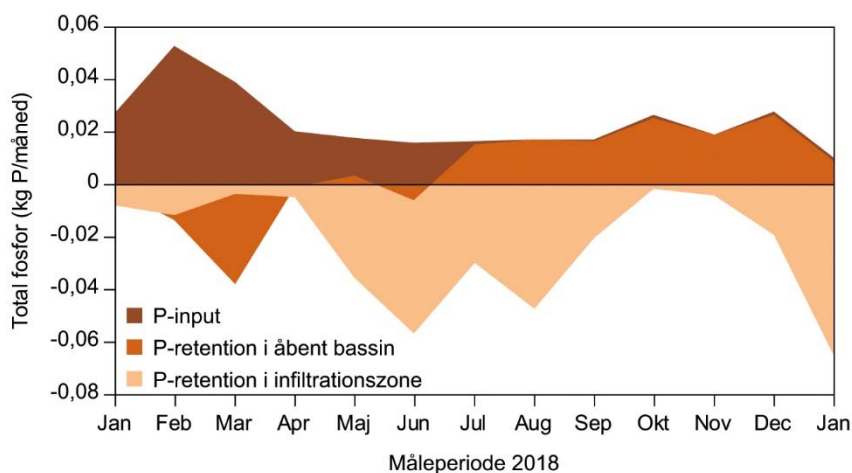


Figur 34. Total fosforbalance i kg for Lillerup IBZ i perioden januar 2018 til januar 2019.

Det sæsonmæssige forløb i måleperioden ift. input af total P til Lillerup IBZ samt P-retention i det åbne bassin og i infiltrationszonen fremgår af figur 35. Det ses, at den primære import af P sker i vintermånederne januar og februar. Retentionen i det åbne bassin er negativ fra januar til april, positiv i maj, negativ i juni og så positiv igen fra april til november (figur 35). Dette tyder på frigivelse af P i de første måneder, men kan også skyldes, at grundvandsfluxen ikke er bestemt korrekt i denne periode.

Retentionen i infiltrationszonen er negativ gennem hele måleperioden, hvilket betyder, at der sker frigivelse af P, som måske stammer fra sedimentet. Det fremgår, at frigivelsen er størst i sommermånederne, hvilket kan skyldes den højere HRT, højere temperatur samt P-frigivelse fra planterne.

Figur 35. Total fosfor import vs. den samlede retention i IBZ'en opdelt i retention i åbent bassin og i infiltrationszonen i Lillerup IBZ i måleperioden januar 2018 til januar 2019.



Det fremgår af tabel 13, at P-retentionseffektiviteten for Lillerup IBZ er på -74 %. Derudover ses det, at den gennemsnitlige månedlige P-retentionsrate er på -0,03 (g/m²/måned) for måleperioden. Dette skyldes frigivelse af TP, som ses ved den negative retentionseffektivitet i det åbne bassin fra januar til april og i juni samt den negative retentionseffektivitet gennem hele perioden i infiltrationszonen. Det skal dog nævnes, at P-inputkoncentrationen og mængder generelt er meget lave for Lillerup IBZ for måleperioden, hvilket skyldes, at der nærmest ikke har løbet vand i indløbsdrænet i hele forårs-, sommer- og efterårsperioden. Dette betyder, at resultaterne fra måleåret forventeligt ikke er særligt repræsentative for effekterne i et normalår. Drænoplandet i Lillerup er endvidere nok mindre end forventet, hvilket også bidrager til det lave input af P til IBZ'en.

Tabel 13. Samlet årlig P-retention i Lillerup IBZ i det første måleår januar 2018 til januar 2019.

Total P retention (%)	Gennemsnitlig total P retention (g P/m ² /måned)	Total P retention (kg P/ha)
-74,1	-0,03	-4,48

4.5 Kvælstofretention i alle undersøgte IBZ'er

Den samlede total N-retentionseffektivitet i de undersøgte IBZ'er ligger for alle anlæg mellem 20 og 62 %, med en gennemsnitlig retentionseffektivitet på 43 % (tabel 14). Sammenlignes den årlige N-retentionseffektivitet for testanlægget i Fillerup med de to kamre og de to nye fuldskalaanlæg over næsten det samme måleår, ligger den gennemsnitlige retentionseffektivitet på 32-62 % i testanlæggene, mens fuldskalaanlæggene i Sillerup og Lillerup har en årlig N-retentionseffektivitet på 53-55 % (tabel 14).

Tilsvarende ligger N-retentionseffektiviteten i det åbne bassin mellem 20-24 % i testanlægget ved Fillerup og 22-31 % i de to fuldskalaanlæg (tabel 14). N-retentionseffektiviteten er for det sidste måleår 12-37 % i testanlæggene mod 22-31 % i de to fuldskalaanlæg. Der er derfor ikke væsentlige forskelle mellem testanlæg og fuldskalaanlæg i fjernelse af N, når resultaterne sammenlignes over en nogenlunde ens måleperiode.

Effektiviteten af de to fuldskalaanlæg er beregnet ud fra en skallering af IBZ'er, som beskrevet i udkast til manual for etablering af IBZ'er (Kronvang et al., 2018), hvor 1 ha drænopland i Østdanmark skal have en IBZ af en

længde på 7,5 m. I Vestjylland skal længden være på 10 m pr. ha drænopland grundet den større nedbør og drænafstrømning i denne region. Det er vigtigt at overholde denne dimensionering, hvis måleresultaterne fra kvælstofbalancerne for IBZ'er skal overføres til nyetablering af IBZ'er. Til sammenligning har virkemidlet mini-vådområder en N-retentionseffektivitet på mindst 25 % (Kjærgaard et al., 2017).

Stigningen i den årlige N-retentionseffektivitet i Fillerup IBZ1 og IBZ2 mellem de to måleperioder skyldes formentlig alene, at dræntilstrømningen var mindre i anden måleperiode, hvilket øgede den hydrauliske opholdstid (tabel 14). Den årlige N-retentionsrate i Fillerup IBZ1 og IBZ2 var da også næsten ens i de to måleperioder, hvilket indikerer en konstant N-fjernelse i IBZ'en. Resultaterne viser, at der er meget stor forskel i infiltrationen i IBZ'erne, og at størrelsen af infiltrationen er en afgørende parameter for den endelige effekt af anlægget.

Tabel 14. Oversigt over de målte total N-retentionsrater og retentionseffektiviteten i test- og fuldskalaanlæg undersøgt i NIFA-projektet 2017 og 2018.

Anlæg	Måle- periode	Samlet gns. TN		Åbent bassin TN retention (%)	Infiltrationszone TN retention (%)	HRT (dage)
		retention (g N/m ² /måned)	Samlet TN retention (%)			
Fillerup IBZ2	Juli 15 – juni 16	19,6	33	11	22	1,7
	Juli 17 – juni 18	18,9	62	24	37	3,3
Fillerup IBZ1	Juli 15 – juni 16	9,0	20	8	11	3,8
Fillerup IBZ1 - min. retention	Juli 17 – juni 18	8,8	32	20	12	4,5
Sillerup - min. retention	Okt. 17 – sep. 18	18,5	53	22	32	4,5
Lillerup	Jan. 18 – jan. 19	8,2	55	31	24	9,2

4.6 Fosforretention i alle undersøgte IBZ'er

Den samlede årlige total P-retention ligger for alle anlæg i intervallet mellem -74 og 74 % (tabel 15). Retentionen af P, som er opgjort ud fra stikprøver i indløb, bassin og udløb, er forventeligt alle et minimumsestimat, da den automatiske prøvetagning i indløbet generelt har højere koncentrationer end stikprøverne.

Sammenlignes P-retentionseffektiviteten i den anden måleperiode for de to testanlæg i Fillerup og de to fuldskalaanlæg, ligger den samlede årlige gennemsnitlige retention på samme niveau i tre af anlæggene, dog med et markant andet resultat i Lillerup IBZ, hvor der skete en nettofrigivelse af P (tabel 15).

Den årlige P-retentionseffektivitet for det åbne bassin i de to testanlæg i Fillerup og fuldskalaanlægget ved Sillerup var meget ens (59-66 %) (tabel 15). Derimod var der en markant lavere P-effektivitet i Lillerup IBZ'en, som formentlig skyldes et meget lille input af partikulært P med drænvandet og et meget lille biologisk optag grundet manglende vegetation i IBZ'en i det første måleår lige efter etableringen.

Nettofrigivelse af P er konstateret fra infiltrationszonen ved Lillerup IBZ, mens de tre andre anlæg fastholder P ved infiltrationen (tabel 15).

En IBZ's effekt på P-tilbageholdelse er meget afhængig af mængden af især partikelbundet P, der leveres med drænvandet til IBZ'en. Desuden er det biologiske optag af P i vegetationen i sommerperioden af stor betydning (Zak et al., 2019). Endelig er det konstateret, at der i hvert fald i det første måleår efter etableringen af IBZ'en kan ske en mindre nettofrigivelse af P fra infiltrationszonen, som det blev konstateret i Lillerup IBZ. Til sammenligning har virkemidlet mini-vådområder en P-retentionseffektivitet på mindst 43 % (Kjærgaard et al., 2017).

Tabel 15. Oversigt over de målte total P-retentionsrater og retentionseffektiviteten i test- og fuldskalaanlæg undersøgt i NIFA-projektet 2017 og 2018.

Anlæg	Måle- periode	Samlet gns. TP retention (g P/m ² /måned)	Samlet TP retention (%)	Åbent bassin TP retention (%)	Infiltrationszone TP retention (%)	HRT (dage)
Fillerup IBZ2	Juli 15 – juni 16	0,15	59	34	25	1,7
Fillerup IBZ2	Juli 17 – juni 18	0,37	74	62	11	3,3
Fillerup IBZ1	Juli 15 – juni 16	0,17	45	41	7,2	3,8
Fillerup IBZ1 - minimumretention	Juli 17 – juni 18	0,32	68	66	1,8	4,5
Sillerup – minimumretention	Okt. 17 – sep. 18	0,09	69	59	11	4,5
Lillerup	Jan.18 – jan. 19	-0,03	-74	24	-98	9,2

4.7 Hvad koster det at etablere en IBZ?

De to fuldskala-IBZ'er ved Sillerup og Lillerup blev etableret i 2017. Begge anlæg blev etableret ud fra de foreslåede dimensioneringer i manualen for IBZ'er, dvs. 7,5 m IBZ-anlæg for hver 1 ha drænopland (Kronvang et al., 2018). Begge IBZ-anlæg er ca. 10 m brede med en grøft og en infiltrationszone og et dige bagtil. Begge fuldskala-IBZ'er blev anlagt af den samme entreprenør, som tidligere havde etableret testanlægget i Fillerup.

Udgiften til de to anlæg består af en engangsanlægsgudgift og en udgift til det areal, som IBZ'en optager i markkanten, hvilket i de gældende anbefalinger dækker 20 m fra vandløb eller sø. Hertil kommer en vedligeholdelsesudgift for anlægget, som dog forventes at være minimal, da eksempelvis oprensning normalt først kan forventes at skulle ske efter mere end 20 år.

Engangsudgiften til gravning er for det ca. 75 m lange fuldskalaanlæg i Sillerup opgjort til ca. 10.000 kr. pr. 7,5 m IBZ-længde, hvilket altså er udgiften svarende til at behandle drænvandet for 1 ha drænopland. I fuldskalaanlægget ved Lillerup, som er ca. 37,5 m langt, er udgiften opgjort til ca. 15.000 kr. pr. 7,5 m IBZ, hvilket forventeligt også er udgiften pr. ha drænopland. Udgiften til etablering af en IBZ stiger derfor, jo mindre IBZ'ens længde er, da der er en startudgift til materiel, planlægning og flytning af maskiner mv.

5. Konklusion

De to fuldskalaanlæg Sillerup IBZ og Lillerup IBZ er begge kun blevet monitoreret i ét år, og det var et år med en ekstrem lille drænastrømning pga. af det ekstremt nedbørsfattige 2018. Det betyder, at den fundne N- og P-retentionseffektivitet og rater for fuldskalaanlæggene ikke er repræsentative for normalår, og at der med fordel kan monitoreres i flere år med henblik på at dokumentere fuldskala-IBZ'ernes effektivitet for N og P.

De genoptagede målinger i de to testanlæg i Fillerup efter tre-fire år påviser ikke de store stigninger i IBZ'ernes effektivitet med alderen. Det fremgår, at N-retentionen for Fillerup IBZ1 er steget fra 20 % til minimum 32 %, mens den for Fillerup IBZ2 er steget fra 33 % til 62 %, hvilket er markante stigninger, som dog mest kan tilskrives en længere HRT i de åbne bassiner. Datagrundlaget er på nuværende tidspunkt for spinkelt til entydigt at kunne udtale sig om alderens betydning for retentionseffektiviteten.

Sammenlignes den årlige N-retentionseffektivitet for testanlægget i Fillerup med de to kamre og de to nye fuldskalaanlæg over næsten det samme måleår, ligger den gennemsnitlige retentionseffektivitet på 32-62 % i testanlægget, mens fuldskalaanlæggene i Sillerup og Lillerup har en årlig N-retentionseffektivitet på 53-55 %. Det betyder, at de to nye fuldskalaanlæg har den forventede virkning på N-retentionen. Alene i de åbne bassiner er den årlige N-retentionseffektivitet på 20-31 % i de fire IBZ-anlæg i det seneste måleår. Hertil kommer en variabel N-retentionseffektivitet ved infiltrationen i IBZ, som for de fire anlæg varierer mellem 12-37 %, alt afhængig af infiltrations størrelse. Et IBZ-anlæg har derfor en sikker N-retentionseffektivitet i det åbne anlæg på omkring 20 %, når IBZ'en dimensioneres som foreskrevet, og hertil kan så tillægges en yderligere N-retentionseffektivitet, der afhænger af, hvor høj infiltrationen er ved anlægget (10-40 %). Det betyder, at minimumseffektiviteten for en IBZ kan forventes at være minimum 30 % i langt de fleste korrekt anlagte fuldskala-IBZ'er. En yderligere og mere sikker bestemmelse af N-retentionseffektiviteten i IBZ'er vil kræve flere målinger og forsøg med modellering af effekterne ud fra udviklede modeller for N-retentionseffektivitet.

For P-retentionseffektiviteten fremgår det, at P-retentionen for Fillerup IBZ1 er steget fra 45 % til 68 %, mens den for Fillerup IBZ2 er steget fra 59 % til 74 % fra første til andet måleår. Stigningen skyldes højst sandsynligt en længere HRT og måske en bedre udviklet vegetation i IBZ'en, der optager mere P i det åbne bassin. De to nye fuldskala-IBZ anlæg gav meget forskellige resultater i det første måleår efter etableringen. Sillerup IBZ havde en P-retentionseffektivitet (68 %) på niveau med resultaterne fra de to IBZ-testanlæg ved Fillerup. Derimod var P-retentionseffektivitet i fuldskalaanlægget ved Lillerup negativ (-74 %), hvilket skyldes en meget lille tilførsel af især partikelbundet P i det meget tørre år og en nettofrigivelse af opløst uorganisk P fra infiltrationszonen. Målingerne fra Lillerup IBZ er formentlig meget atypiske pga. det ekstremt tørre år, og desuden har det vist sig, at drænoplandet er noget mindre end forudsat, men dog passende i størrelse ift. dimensioneringen af IBZ-anlægget. Det vides heller ikke om den målte nettofrigivelse vil fortsætte i de kommende år. Fortsatte målinger vil kunne være med til at afdække disse forhold. Endelig er den beregnede P-retention formentlig et minimumsestimat, da der i denne analyse udelukkende er anvendt stikprøver til beregning af P-balancerne.

Der blev konstateret et digebrud både i det meget våde efterår 2017 med høj vandstand i Fillerup IBZ1 tre år efter etableringen og i Sillerup IBZ allerede et halvt år efter etableringen. Dette har betydet, at resultaterne begge anlæg arbejder med minimumseffekter, da en del af vandet fra IBZ'en er løbet ud på det bagvedliggende areal og har overrislet dette. Ved denne overrisling kan der foregå en nitratfjernelse, som dog ikke er med i beregningerne i denne rapport. Det vides ikke, hvordan digebruddene er opstået. Der er i manualen for IBZ'er taget højde for, at der kan opstå "huller" i diget, ved at anbefale, at IBZ'er placeres minimum 10 meter fra overfladevand (Kronvang et al., 2018). På denne måde sikres det, at der kan ske en fortsat retention af P og N ved overrisling af arealet mellem IBZ'en og vandløb.

Derudover er der en usikkerhed forbundet med beregningen af retentionseffektiviteten i Lillerup, idet der strømmer grundvand ind i IBZ'en fra bunden. Grundvandsinflow til det åbne bassin blev kun bestemt én gang ved en kontrolleret tømning og genfyldning af bassinet uden tilkoblet drænløb. Bestemmelsen er givetvis et minimumsestimat af inflow af grundvand. Forsøg med bestemmelse af grundvandsinflow bør derfor gentages under vinter-/forårsforhold med højere grundvandsstande. Desuden kan andre metoder til direkte måling af influx med fordel tages i brug, såsom temperatursensorer og/eller anvendelse af et seepagemeter. Vi har ved hjælp af et infrarødt kamera monteret på en drone bestemt området med indstrømmende grundvand, og centralt i dette område er der blevet nedboret et piezometerrør til vandprøvetagning. Der er kun foretaget seks prøvetagninger siden rørets installation i oktober 2018. I beregninger af vand- og stofbalancer er der derfor anvendt både et konstant grundvandsinflow og en konstant koncentration af N og P i grundvandet.

Der skal også pointeres, at vi stadigvæk mangler data og viden til belysning af forhold som:

- Forbedring af konstruktionen af anlægget.
- Eventuelt dosering af træflis i IBZ'ens infiltrationszone til forbedring af omsætningen af nitrat.
- Måling af drivhusgasemissioner fra IBZ-anlæg.
- Hvad styrer fosforfrigivelsen i IBZ anlægget ved Lillerup og hvor længe fortsætter den konstaterede lækage?
- Monitering over en længere tidsperiode til at undersøge retentionseffektiviteten ved forskellige hydrauliske opholdstider, grundvandsinflow, mv.
- Modellering af IBZ'ers virkning i forhold til langtidseffekten ved forskellige drænafstrømningsforhold.
- Hvad styrer infiltrationens størrelse i IBZ'er – kan den forudsiges?
- Stiger infiltrationen med tiden grundet elletræernes rødder? Eller hvad sker der med træerne over tid?
- Kan IBZ-anlæg anvendes som et klimatilpasningsvirkemiddel i forhold til at bufre store drænafstrømninger i sommer og sensommer?
- Hvilken betydning har IBZ'er for biodiversiteten?
- Kan infiltrationen optimeres ved at ændre på IBZ-anlægget – eller måske indløbet?

5.1 Taksigelser

Forfatterne takker de mange teknikere og laboranter, uden hvis hjælp det ikke havde været muligt at gennemføre det store felt- og laboratoriarbejde. Dem, som skal takkes, er: Carsten B. Nielsen, Henrik Stenholt, Uffe Mensberg, Mar-

lene V. Skjærbæk, Dorte Nedergaard og Ane Kjeldgaard, Institut for Bioscience, Aarhus Universitet. Desuden har Rikke Holm og Carina Lohmann fra Biologisk Institut, Syddansk Universitet, bidraget med laboratorieanalyser af P-fraktioner.

6. Referencer

- Cabezas, A., Gelbrecht, J. & Zak, D. 2013. The effect of rewetting drained fens with nitrate-polluted water on dissolved organic carbon and phosphorus release. *Ecol. Engineer.* 53: 79-88.
- Hoffmann, CC, Heiberg, L., Audet, J., Schonfeldt, B., Fuglsang, A., Kronvang, B., Ovesen, NB., Kjaergaard, C., Hansen, HCB., Jensen, HS., 2012. Low phosphorus release but high nitrogen removal in two restored riparian wetlands inundated with agricultural drainage water. *Ecological Engineering* 46: 75-87.
- Kjærgaard, C., Hoffmann, C.C., Ovesen, N.B., Gertz, F. & Iversen B. V. 2017. Minivådområder – et nyt kollektivt virkemiddel. *Vand & Jord* 24 (3): 84-88.
- Knudsen, M.J. 2017. Effekten af intelligente bufferzoner til fjernelse af kvælstof og fosfor fra drænvand - et eksperimentelt anlæg ved Spjald. Specialerapport, Aarhus Universitet
- Kronvang, B., Jensen, H., Egemose, S., Hoffmann, C.C., Ovesen, N.B., Gertz, F. & Zak, D.H. 2017. Hvordan virker intelligente bufferzoner? *Vand & Jord* 24 (3): 111-114
- Kronvang, B., Zak, D., van't Veen, S.G.W. & Jensen H.S. 2018. Udkast til manual omkring Intelligente bufferzoner. Teknisk manual fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi.
- Miljø- og Fødevareministeriet. 2014. Naturstyrelsens vejledning til kvælstofberegningen. Den 23. maj 2014.
- Miljø- og Fødevareministeriet. 2015. Aftale om Fødevare- og landbrugspakke <http://mfvm.dk/landbrug/vaekst-eksport-og-arbejdspladser/foedevare-og-landbrugspakke/>
- Poulsen, H.D. & Rubæk, G.H. (red.) 2015. Fosfor i dansk landbrug. Omsætning, tab og virkemidler mod tab. DJF rapport Husdyrbrug nr. 68.
- Wiborg, I, Kronvang, B., Poulsen, J.B., Børgesen, C.D., Henriksen, H.J., Sonnenborg, T., Refsgaard, J.C., Sørensen, H.V., Jensen, K.M. & Jacobsen, T.V. 2014. Landmanden som vandforvalter. Løsningsmodeller for klimatilpasning – kommunale inspirationsværktøjer og nyt forretningsområde for landbruget. Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi Nr. 42.
- Wisniewska, K. 2018. Integrated Buffer Zone for removing nitrogen from agricultural drainage water. Study from experimental site in Fillerup, Denmark. Specialerapport, Aarhus Universitet
- Zak, D.H., Kronvang, B., Carstensen, M.V., Hoffmann, C.C., Kjeldgaard, A., Larsen, S.E., Audet, J., Egemose, S., Jørgensen, C., Feuerbach, P., Gertz, F. & Jensen, H.S. 2018. Nitrogen and phosphorus removal from agricultural runoff in integrated buffer zones. *Environ. Sci. Technol.* 52 (11): 6508–6517. DOI: 10.1021/acs.est.8b01036.

Zak, D.H., Stutter, M., Jensen, HS, Egemose, S., Carstensen, MV, Audet, J., Strand, J.A., Feuerbach, P., Hoffmann, C.C., Christen, B., Hille, S., Knudsen, M., Stockan, J., Watson, H., Heckrath, G. & Kronvang, B. 2019. An assessment of the multifunctionality of integrated buffer zones in Northwestern Europe. *J. Environ. Qual.*, doi:10.2134/jeq2018.05.0216