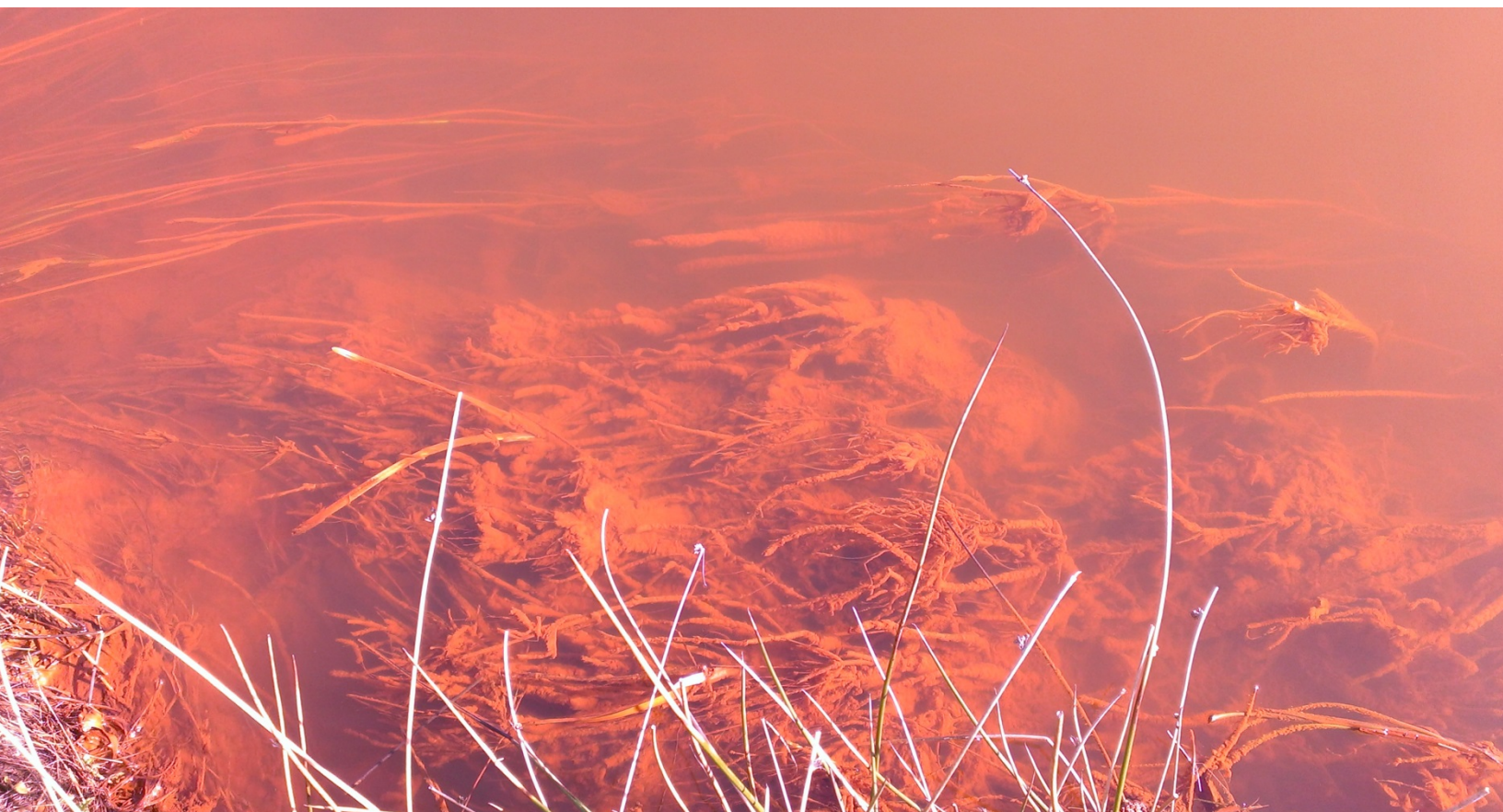


FOSFORFÆLDNINGSBASSINER

Faglig udredning vedr. fosforretention i
okkerfældningsbassiner som supplerende
virkemiddel til P-reduktion

Teknisk rapport 2014



AARHUS
UNIVERSITET
INSTITUT FOR AGROØKOLOGI

Datablad

Type	Teknisk rapport
Titel	Fosforfældningsbassiner. Faglig udredning vedr. fosforretention i okkerfældningsbassiner som supplerende P-virkemiddel
Forfattere	Charlotte Kjærgaard og Ditte M. Forsmann
Institution	Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi
Udgivelsesår	August 2014
Rekvirent	Naturstyrelsen
Foto forside	Okkerfældning. Foto: Ditte M. Forsmann

Forord

I forbindelse med vandplanarbejdet har der vist sig behov for at finde supplerende virkemidler til fosforreduktion. KL-MIM aftalen fra 2009 forudsætter, at der i første vandplanperiode 2010-2015 gennemføres en fosforvådområdeindsats på 28,7 tons fosfor som doseret i vandplanerne fra december 2011. En tilskudsordning til etablering af fosfor-vådområder blev udarbejdet og kommunerne har efter aftale i Den Nationale Styregruppe for vådområdeindsatsen, gennemført 18 forundersøgelsesprojekter, svarende til 25 % af de indmeldte indsatser. Hensigten var at indsamle viden om det nye virkemiddel, idet der kunne vise sig behov for justeringer af tilskudsordningen. Resultatet af forundersøgelserne viser, at der i mange tilfælde er problemer knyttet til etablering af fosforvådområderne grundet af risiko for fosfortab, at effektiviteten (P-reduktionen) er mindre end de forudsatte 20 kg P/ha, at der ikke kan findes tilstrækkeligt med projektarealer til at opfylde indsatsbehovet ud fra bl.a. krav om naturlig hydrologi.

I okkerpotentielle områder i Vest Midt og Sønderjylland er der i stort omfang etableret okkerfældningsbassiner i vandløbssystemet, og det er på basis af erfaringer fra kommunerne foreslået at disse anlæg kan fungere som fosforfældningsbassiner. Fosforfældningsbassiner forventes at kunne etableres og vedligeholdes som okkerfældningsbassiner. Den Nationale Styregruppe for vådområdeindsatsen har behandlet resultaterne for forundersøgelserne på møder den 11. juni og 31. oktober 2013 og truffet beslutning om, at der skal iværksættes en nærmere udredning af fosforfældningsbassiner som muligt nyt virkemiddel fremadrettet med henblik på, at det kan supplere de nuværende projekter.

Nærværende rapport omfatter en faglig udredning og vurdering af mulighederne for at benytte okkerfældningsbassiner som supplerende virkemidler til fosforreduktion. Udredningen baseres på en sammenfatning af eksisterende erfaringer fra danske okkerfældningsbassiner med fokus på potentialet for fosforretention i disse anlæg. Den faglige udredning understøttes af et mindre pilotprojekt, der omfatter en aktuell screening af fosforretentionen i fire udvalgte okkerfældningsbassiner i Holstebro Kommune i perioden marts til maj 2014. Pilotprojektet er gennemført som et samarbejde mellem Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi, som har forestået prøvetagning og analyser, og Holstebro Kommune, som har varetaget udvælgelsen af de fire okkerfældningsanlæg, og yderligere leveret vandføringsdata for disse anlæg. Ringkjøbing-Skjern Kommune (Per Søby Jensen) har endvidere bidraget med erfaringer omkring etablering og drift af okkerfældningsanlæg

Indholdsfortegnelse

1	Okkerfældningsanlæg	1
1.1	Baggrund	1
1.2	Princip for okkerfældning og potentialet for fosforretention	1
1.3	Eksisterende erfaringer fra danske okkerfældningsanlæg	2
2	Screening af fosforretention i okkeranlæg	4
2.1	Hvidmose anlægget.....	5
2.2	Hoager anlægget.....	6
2.3	Floubæk anlægget.....	7
2.4	Yllebjerg anlægget	8
3	Undersøgelse af fosforfældning i okkeranlæg	10
3.1	Vandføring.....	10
3.2	Vandkemiske parametre	11
3.3	Målte jern og fosforkoncentrationer i ind- og udløb	12
3.4	Jern og fosforretention i de undersøgte okkeranlæg	13
3.5	Sammenfatning og perspektiver i forhold til fosforfældningsbassiner	15
3.6	Anlæg og omkostninger ved drift og vedligehold.....	17
4	Konklusion og anbefaling	18
5	Litteraturliste	19
	Bilag 1. Anlægstegning af Hvidmose anlægget anno 1992	20
	Bilag 2. Anlægstegning af Hvidmose anlægget anno 1992	21
	Appendiks 1. Udtagning, håndtering og analyse af prøver.....	22
	Udtagning af vandprøver	22
	Håndtering og analyse af vandprøverne i laboratoriet	22

1 Okkerfældningsanlæg

1.1 Baggrund

Okkerloven fra 1985 fordrede at okkerskader skulle forebygges og bekæmpes, hvilket efterfølgende har resulteret i at der siden 1990 i de okkerbelastede vest- og sønderjyske vandløb er etableret og registreret mere end 100 okkerfældningsanlæg til reduktion af okkertransporten til nedstrøms vandløb (DHI, 2014). Hovedparten af disse er etableret frem til 2006 under de daværende amter, mens enkelte er etableret senere. Det fremgår rapporten at eksisterende okkerfældningsanlæg typisk er etableret på mindre vandløb og bække med henblik på at mindske okkerbelastningen af nedstrøms større vandløbsstrækninger. Dertil kommer at det ikke forventes økonomisk realistisk at etablere okkeranlæg på større vandløb.

Der er som følge af okkerproblematikken udarbejdet et større antal rapporter omkring okkerrensning (Waagepetersen et al., 1985; Christensen, 1992; Andersen, 1993) samt erfaringer med danske okkeranlæg (Bolet, 1996; Ringkjøbing Amt, 2001; Holstebro Kommune, 2004; Orbicon, 2008; Esbjerg Kommune, 2011; DHI, 2014). Sammenfattende fremgår det af disse rapporter at danske okkeranlæg generelt er istand til at reducere okkerpåvirkningen ved okkerfældning, men at der er stor forskel i effektiviteten blandt de forskellige anlæg. Det fremgår at der i Danmark primært er etableret to typer okkerfældningsanlæg hhv. okkersøer og lavvandede grødefyldte sedimentationsbassiner, hvor sidstnævnte har vist sig mest effektive til okkerfældning (Ringkjøbing Amt, 2001).

Okkerfældningsbassiner forventes qua iltningen af opløst ferrojern til ferrijern (okker) at have potentiale for en samtidig tilbageholdelse af fosfor (P) til iltede jernoxider. En enkelt undersøgelse foretaget af Ringkjøbing Amt i perioden 1994-1996 har påvist, at der kan være en meget effektiv fosfortilbageholdelse i okkerfældningsbassiner. Der findes dog ikke yderligere offentliggjorte undersøgelser vedrørende dette og effekten på fosfor må forventes at bero på, hvor effektivt okker tilbageholdes. Nærværende rapport omfatter en faglig udredning og vurdering af mulighederne for at benytte okkerfældningsbassiner som supplerende virkemidler til fosforreduktion. I rapporten sammenfattes eksisterende erfaringer fra danske okkerfældningsbassiner med fokus på potentialet for fosforretention. Den faglige udredning understøttes af et mindre pilotprojekt, der omfatter en aktuel screening af fosforretentionen i fire udvalgte okkerfældningsbassiner i Holstebro Kommune i perioden marts til maj 2014

1.2 Princip for okkerfældning og potentialet for fosforretention

Princippet for okkerfældning beror på en iltning af opløst ferro (Fe^{2+}) jern til ferri (Fe(III)) jern under dannelse af okker. Da ferrijern-forbindelser udgør stærke bindingsfaser for P vil okkerfældningsprocessen potentielt muliggøre en retention af opløst P. Opløst P tilbageholdes, i modsætning til partikulære P former, generelt dårligt i sedimentationsbassiner, men da der i okkerfældningsbassiner kontinuert tilføres en fosforbindingsfase i form af de iltede ferrijern-

forbindelser, må det forventes at der i anlæg med høj ferrojern-iltning og retention af ferrijern (okker) samtidig er et stort potentiale for tilbageholdelse af fosfor.

Kemisk iltning af ferrojern afhænger af vandets pH, temperatur og iltindhold, hvor iltningshastigheden stiger med stigende pH, temperatur og iltindhold (Jacobsen et al., 1984). Ved de normalt forekommende pH-værdier i danske okkerbelastede vandløb sker den kemiske iltning af ferrojern langsomt. Danske og internationale undersøgelser har dog vist at iltningshastigheden øges betydeligt ved forekomst af store biotiske og abiotiske overflader der katalyserer iltningen (Davidson & Seed, 1983; Waagepetersen et al., 1985; Waagepetersen et al., 1987). Disse undersøgelser har påvist at overfladeaktiveret ferrojern-iltning kan øge iltningshastigheden med en faktor 10-100 i forhold til kemisk iltning, hvor iltningshastigheden stiger med stigende ferrojern-koncentration.

Denne mekanisme gør sig gældende i grødefyldte bassiner, hvor grødens katalyserende effekt på ferrojern-iltningen er demonstreret i flere undersøgelser (Olesen et al., 1979; Jacobsen et al., 1984 og Christensen, 1989). De lavvandede grødefyldte sedimentationsbassiner er således etableret med henblik på at optimere denne proces ved at sikre en kombination af lang opholdstid, gode iltningsforhold og mulighed for opsamling af det udfældede okker. Vandets opholdstid og dermed reaktionstiden har stor betydning for okkerfældningseffektiviteten og Christensen (1992) anbefalede på basis af en række undersøgelser af lavvandede grødefyldte bassiner at det optimale dimensioneringsgrundlag for at opnå en okkerrensningseffekt på 80% var en hydraulisk opholdstid på min. 8 timer ved pH>6 og ferro-jernkoncentrationer op til 15-20 mg/l. Dette dimensioneringsgrundlag er dog siden blevet revideret til nuværende anbefalinger om minimum 20 timers opholdstid med henblik på at optimere effektiviteten i vinterperioden, hvor reaktionshastigheder er lavere. Principper for udformningen af lavvandede grødefyldte sedimentationsbassiner i henhold til ovenstående viden er skitseret i Bilag 1 og 2 (Ringkøbing Amt, 2001).

1.3 Eksisterende erfaringer fra danske okkerfældningsanlæg

I DHI rapporten (DHI, 2014) gives en generel oversigt over kommunernes indsats i forhold til vurdering af renseseffekten af de eksisterende okkeranlæg. Der er generelt ikke gennemført systematiske undersøgelser, og for anlæg med koncentrationsmålinger er der generelt en stor spredning i renseseffektiviteten fra 0 til 99% (DHI, 2014). Mange anlæg der har reduceret renseseffekt skyldes manglende vedligeholdelse, primært som følge af manglende oprensning af sediment, der bla skaber strømrender og reducerer opholdstiden. Det fremgår af DHI rapporten at renseseffekten i mange undersøgelser bliver beregnet som forskelle i koncentrationer mellem ind- og udløb, hvor prøverne er udtaget uden hensyn til opholdstiden. Dette kan give en betydelig fejl på estimering af renseseffekten, hvis prøverne ikke afspejler opholdstiden i anlægget. Hertil kommer at der ikke er foretaget en kritisk vurdering af vandbalancen og omfang af evt. diffus tilstrømning til anlægget.

Resultaterne for 10 okkerfældningsanlæg i det tidligere Ringkøbing Amt i perioden 1992-1999 er sammenfattet i "Ringkøbing Amt, 2001". Der blev i forbindelse med undersøgelsen konstateret store forskelle i renseseffekt mellem de 10 undersøgte anlæg, hvor den gennemsnitlige årlige renseseffektivitet for anlæggene var ca. 69% og 71% for hhv. total og opløst jern med min-max. effekt på 43 til 92% for total jern samt 51 til 96% for opløst jern. I det bedst fungerende anlæg Hvidmose (okkerrensese grad på 80%) blev der i perioden oktober-94 til august-96 målt total P (TP) i ind- og udløb. Resultaterne viste et betydeligt potentiale for P tilbageholdelse i okkeranlæg med en gennemsnitlig reduktion i TP-koncentrationer fra 0,11 mg/l i indløb til 0,03 mg/l i udløb og en middel TP-reduktion på 85%. Sammenfattende blev det på baggrund af Ringkøbing Amts undersøgelser konkluderet at:

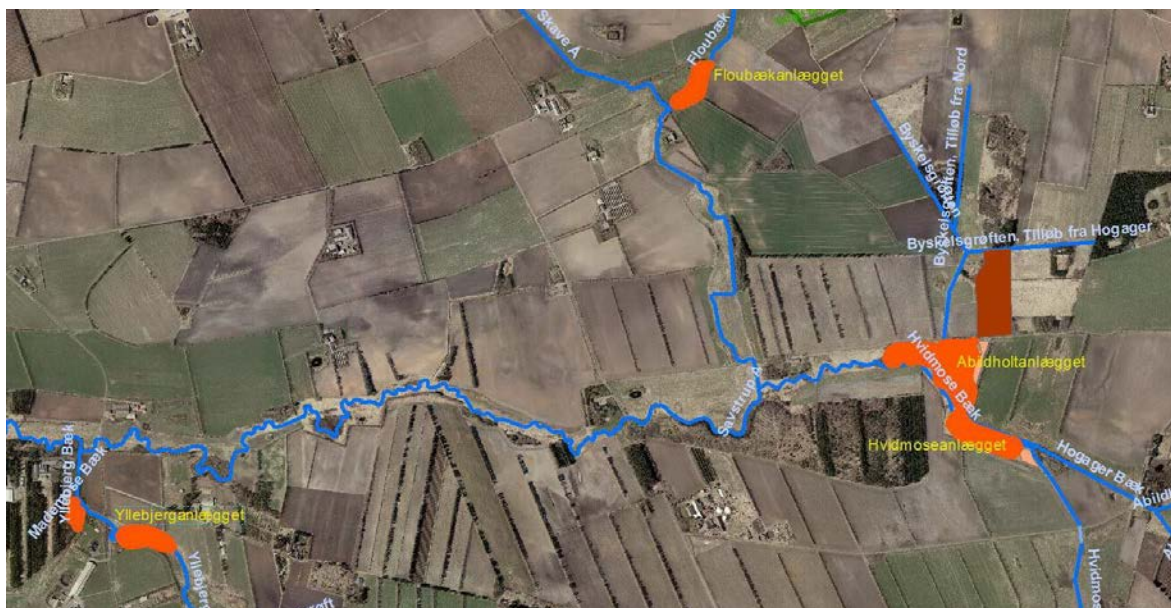
- De bedst fungerende anlæg alle er af typen lavvandede grødefyldte bassiner suppleret med dybe bundfældningsbassiner ved indløbet og/eller dybe fordelingsrender i den lavvandede grødefyldte del
- Der synes at være en sammenhæng mellem geografisk placering af anlæg og renseseffekt, hvilket blev tilskrevet forskellen i vandkemiske forhold særligt pH.
- Vandets opholdstid har stor betydning for effekten. Strømrrender reducerer vandets opholdstid og forkorter dermed reaktionstiden og kontakten med grødeoverflader der katalyserer ferrojern-iltningen.
- Renseseffekten er generelt lavere i vintermånederne for både total og opløst jern med 40-60% jern-retention. Den lavere effektivitet blev tilskrevet større vandføring med højere jernkoncentrationer, samt lavere temperatur kombineret med indløbsvandets fysisk/kemiske sammensætning og henfald i grøden. I mange anlæg blev der observeret et fald pH i vinterperioden til $\text{pH} < 6$, hvilket reducerer ferrojern-iltningen i lavvandede grødefyldte bassiner.
- Den nødvendige opholdstid for at opnå gennemsnitlige okkerrensese grader på $\geq 80\%$ varierer mellem anlæg, men generelt kræves > 20 timers opholdstid.
- Anlæg bør etableres med størst mulig grødeoverflade. Kunstige overflader kan anvendes som erstatning for den grøde der henfalder i vinterperioden.

2 Screening af fosforretention i okkeranlæg

Med henblik på en screening af fosforfældningspotentialet i eksisterende okkeranlæg er der i forbindelse med pilotprojektet i en kortere periode (20-3-2014 til 15-05-2014) foretaget ugentlige manuelle prøvetagninger for fire forskellige okkerfældningsanlæg hhv. Hvidmose, Hoager, Floubæk samt Yllebjerg beliggende i Holstebro Kommune, øst for Holstebro by (Figur 1, Tabel 1). Anlæggenes beliggenheden i tilknytning til vandløbssystemet fremgår af figur 2.



Figur 1. Placering af okkerfældningsanlæg der indgår i pilotprojektet beliggende i Holstebro Kommune.



Figur 2. Placering af okkerfældningsanlæg i forhold til vandløbssystemet

Table 1. Dimensioner for okkeranlæg i pilotprojektet (data fra Ringkjøbing Amt, 2001).

	Hvidmose	Hoager	Floubæk	Yllebjerg
Areal (m ²)	14.500	16.500	12.400	8.700
Volumen (m ³)	6.400	22.000	8.400	4.600
Vandføringsdata (oplyst)				
Årsmiddel (L/s)	70	165	67	89
Mid. opholdstid (h)	25	37	34	15

2.1 Hvidmose anlægget

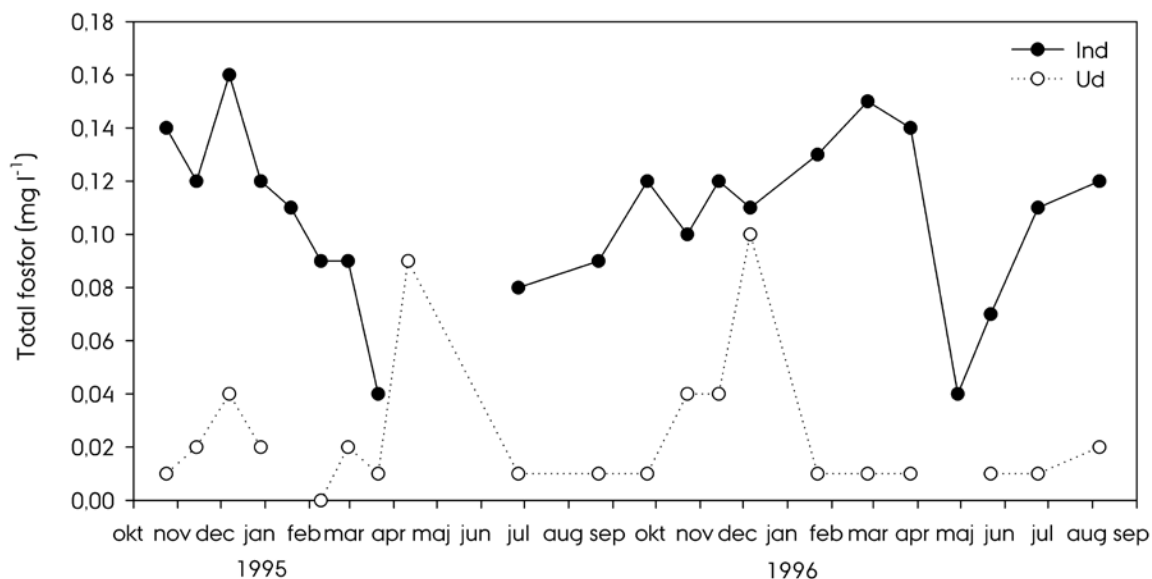
Okkerfædningsbassinerne blev anlagt i sommeren 1992. Anlægget blev etableret i henhold til de beskrevne principper for okkeranlæg og dimensioneret med et overfladeareal på 14.500 m² og et samlet volumen på 6.400 m³ fordelt med 45 vol. % i den 1 meter dybe bundfædningsdel og 55 vol. % som lavvandet grødefyldt bassin med en dybde på 30 cm (Bilag 1, Bolet, 1996). Anlæggets sydlige bassin havde i april 1994 et vegetationsdække på 98 % domineret af glanskapslet siv med betydelige forekomster af manna-sødgræs og krybhvene. Anlæggets nordlige bassin var domineret af de samme planter, men havde et mere uensartet vegetationsdække og en væsentligt lavere dækningsgrad (74 %) (Bolet, 1996). Anlægget var i sin oprindelige form anlagt med to parallelle bassiner med henblik på tidlig differentiering af oprensningen (Figur 3a), men ved oprensningen i 2000, blev de to bassiner lagt sammen til den nuværende form (Figur 3b).



Figur 3. Luftfoto af Hvidmoseanlægget med den oprindelige (1995) og nuværende (2012) udformning (Arealinformation, 2014). Ind- og udløb til anlægget er markeret på foto fra 2012.

I perioden 1992-1999 modtog anlægget vand med en gennemsnitlig vandføringsvægtet koncentration af total og opløst jern på hhv. 27,0 og 11,3 mg/l, og en samlet tilførsel på 37 tons jern. Anlægget har i perioden tilbageholdt 30 tons jern svarende til en gennemsnitlig renseeffektivitet på ca. 80%. Gennemsnitlige udløbskoncentrationer har været på 2,55 og 1,93 mg/l for hhv. total og opløst jern. For anlægget er der observeret fald i renseeffektiviteten i vintermånederne til ca. 40% (Ringkjøbing Amt, 2001).

Foruden undersøgelser af okkerfældningen, blev koncentrationen af total fosfor (TP) i ind- og udløb til Hvidmoseanlægget målt i perioden oktober 1995 til august 1996 (Figur 4; Ringkjøbing Amt, 2001). Gennemsnitlige vandføringsvægtede TP koncentrationer blev reduceret fra 0,11 mg/l i indløb til 0,015 mg/l i udløb. Anlægget havde i perioden således en meget betydelig TP-retention varierende fra 60 til 100% med middelreduktion på 85 %.



Figur 4. Koncentration af total fosfor (TP) i ind- og udløb ved Hvidmose okkerfældningsanlæg i perioden oktober 1995 til august 1996. Data fra Ringkjøbing Amt, 2001.

2.2 Hoager anlægget

Hoager anlægget er anlagt i 1992 samtidig med Hvidmose anlægget efter samme etableringsprincip med 1 m dybt bundfældningsbassin (48 vol %) og et 30 cm dybt lavvandet grødefyldt del (52 vol %) (Figur 5, Bilag 2). Hoager anlægget adskiller sig fra de øvrige anlæg ved at have to indløb, og flere bassiner, som er forbundet via rør (Figur 5). I 1995 blev anlægdimensionerne grundet driftsmæssige problemer ændret med en arealreduktion fra 35.000 m² til de nuværende 16.500 m², mens volumen blev udvidet fra 14.500 m³ til ~22.000 m³. Denne ændring har dog medført dannelse af strømrender og dermed reduceret hydraulisk opholdstid (Ringkjøbing Amt, 2001).



Figur 5. Luftfoto af Hoager anlægget fra 1995, 2002, 2008 samt 2012 (Arealinformation, 2014). Ind- og udløb er markeret på foto fra 2012, hvor de blå pile angiver vandets vej mellem bassinerne i anlægget.

Anlægget modtager vand fra Hogager Bæk og Byskelgrøften, der i perioden 1992-1999 havde koncentrationer af totaljern på hhv. 11,1 og 6,99 mg/l og opløst jern på hhv. 7,52 og 5,05 mg/l, med en samlet tilførsel på 50 tons jern (Ringkjøbing Amt, 2001). Anlægget har i perioden tilbageholdt ca. 35 tons jern svarende til en gennemsnitlig renseseffektivitet på ca. 69%. Gennemsnitlige udløbskoncentrationer har været på hhv. 3,64 og 2,46 mg/l for hhv. total og opløst jern. For anlægget er der som for Hvidmose observeret fald i renseseffektiviteten i vintermånederne (Ringkjøbing Amt, 2001).

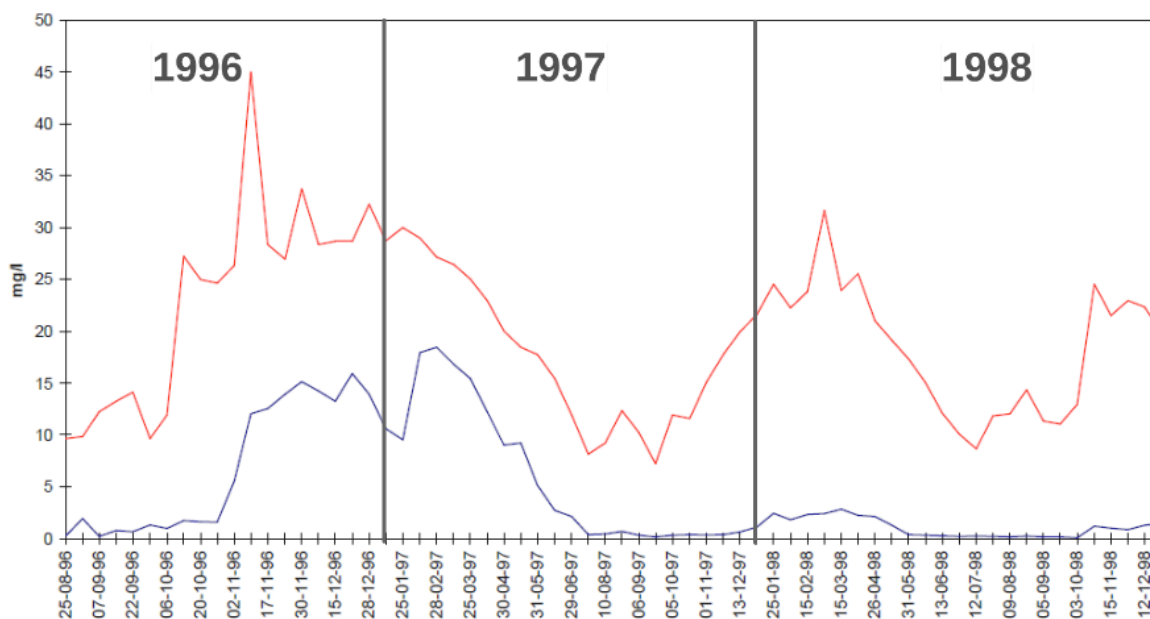
2.3 Floubæk anlægget

Floubæk anlægget er anlagt i 1996 i forbindelse med restaurering af Savstrup Å (Ringkjøbing Amt, 2001). Anlægget er dimensioneret med overfladeareal på 12.400 m² og volumen på 8.400 m³ svarende i størrelse til Hvidmose (Figur 1), men består kun af et enkelt bassin med en dybere bundfældningsdel efterfulgt af del med lavvandet grødezone (Figur 6).



Figur 6. Luftfoto af Floubæk anlægget fra 1995 samt 2012 (Arealinformation, 2014). Ind- og udløb er markeret på foto fra 2012.

Koncentrationer af total jern i ind- og udløb fra anlægget blev fulgt i årene efter anlæggelsen (Figur 7, Ringkjøbing Amt, 2001). Det fremgår at renseseffekten forøges i perioden fra 1996 til 1998 formodentlig i takt med, at det grødefyldte område gror til.



Figur 7. Koncentrationen af total jern i indløb (rød) og udløb (blå) for Floubæk anlægget i perioden 1996-1998 (Ringkjøbing Amt, 2001).

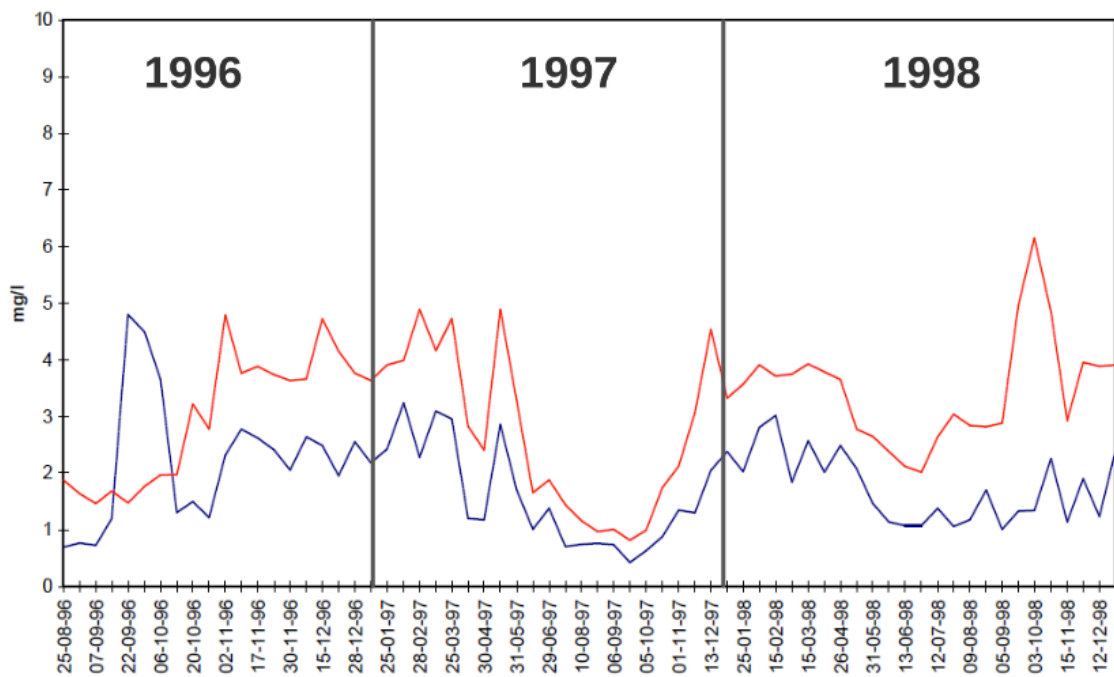
2.4 Yllebjerg anlægget

Yllebjerg anlægget er som Floubæk anlagt i 1996 i forbindelse med restaurering af Savstrup Å (Ringkjøbing Amt, 2001). Anlægget er dimensioneret med overfladeareal på 8.700 m² og volumen på 4.600 m³ og er således det mindst anlæg i undersøgelsen. Anlægget er opbygget efter sammen princip som Floubæk bestående af et enkelt bassin med en dybere bundfældningsdel efterfulgt af mere lavvandet grødezone (Figur 8).



Figur 8. Luftfoto af Floubæk anlægget fra 2002, 2004 samt 2012 (Arealinformation, 2014). Ind- og udløb er markeret på foto fra 2012.

Koncentrationer af total jern i ind- og udløb fra anlægget blev fulgt i årene efter anlæggelsen (Figur 9). Som i tilfældet med Floubæk fremgår det af målingerne at renseffekten forøges fra 1996 til 1998 formodentlig i takt med, at det lavere grøde fyldte område gror til.



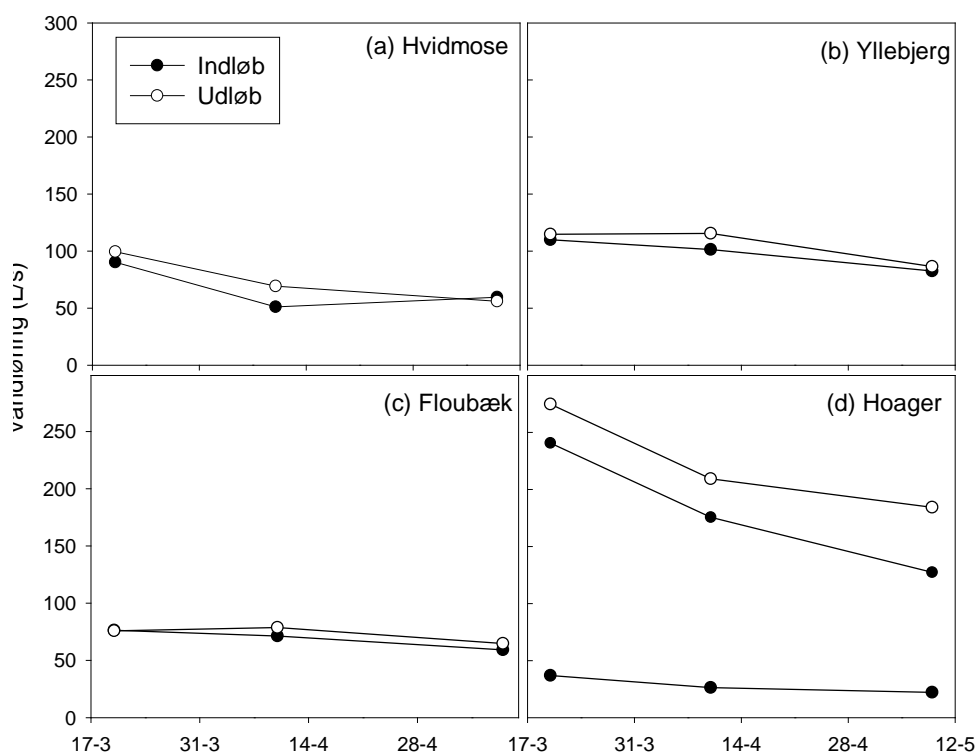
Figur 9. Koncentration af total jern i indløb (rød) og udløb (blå) for Floubæk anlægget i perioden 1996-1998 (Ringkjøbing Amt, 2001).

3 Undersøgelse af fosforfældning i okkeranlæg

I forbindelse med screeningen af fosforretention i udvalgte okkeranlæg under pilotprojektet, blev der i perioden 20-03-2014 til 15-05-2014 udtaget ugentlige vandprøver fra ind- og udløb svarende til i alt 10 prøver fra ind- og udløb fra hvert af de fire anlæg. Placering af ind- og udløb fremgår af Figur 2,4,5 og 7. Ved Hoageranlægget blev der taget vandprøver fra begge indløb. Prøvetagning og prøvehåndtering er beskrevet i Appendiks 1. Samtidig med vandprøvetagningen blev der *in situ* målt pH, temperatur og iltkoncentration. Vandets temperatur og iltindhold er brugt til beregning af iltmætningen. Vandføring i såvel ind- og udløb fra de fire okkeranlæg blev målt tre gange indenfor måleperioden af Holstebro Kommune.

3.1 Vandføring

Vandføringen til de undersøgte okkeranlæg varierede i måleperioden generelt i størrelsesorden 50-120 L/s for Hvidmose, Yllebjerg og Floubæk (Figur 10a,b,c). Hoager har i modsætning til de øvrige anlæg to tilløb, hvor indløb-1 udgør det primære tilløb med vandføring på 130-250 L/s mod 20-40 L/s for indløb-2 (Figur 10d). Den samlede hydrauliske belastning for måleperioden er estimeret ved lineær regression mellem målepunkter under antagelse af at vandføringen ændres lineært mellem måledage indenfor måleperioden (Tabel 2).



Figur 10. Målte vandføringer (L/s) for ind- og udløb ved de fire okkeranlæg (a) Hvidmose, (b) Yllebjerg, (c) Floubæk og (d) Hoager. Målinger er foretaget af Holstebro kommune.

Den hydrauliske belastning i måleperioden er identisk for Hvidmose og Floubæk anlæggene, mens Yllebjerg og Hoager anlæggene har én faktor 1,4 og 2,9 større hydraulisk belastning. For alle anlæg er vandtransporten fra anlægget større end tilstrømningen med en netto-afstrømning på 7-9% for Floubæk, Yllebjerg og Hoager, og 16% for Hvidmose. For Hoager bidrager indløb-1 med den primære tilstrømning svarende 86% af vandtransporten. Der er ikke opstillet vandbalance for anlæggene, men den større afstrømning antyder at der kan være en supplerende diffus tilstrømning til alle anlæg. Beregning af rensegrad som forskel i koncentrationer mellem ind- og udløb vil følgelig overestimeres sammenholdt med beregninger baseret på aktuel transport (kg).

På baggrund af vandføringsmålinger og oplyst anlægsvolumen estimeres den teoretiske hydrauliske opholdstid i måleperioden til 18-35 timer for Hvidmose, 22-41 timer for Hoager, 30-39 timer for Floubæk og 20-28 timer for Yllebjerg. Formentligt er den aktuelle opholdstid kortere som følge af ikke-homogene strømningsforhold blandt andet forårsaget af strømrender.

Tabel 2. Estimeret hydraulisk belastning for okkeranlæg i måleperioden 20-03-14 til 15-05-14.

Vandføring		Hvidmose	Hoager ^a	Floubæk	Yllebjerg
Tilstrømning	m ³	330.924	970.171	330.924	468.466
Afstrømning	m ³	347.770	1.053.85	353.990	505.105
Differens	m ³	-47.216	-83.686	-23.065	-36.640
Differens	%	-16	-8,6	-7,0	-7,8

^aHydraulisk belastning til Hoager er estimeret som summen af de to tilløb

3.2 Vandkemiske parametre

Vandkemiske parametre (pH, temperatur og iltmætning) er angivet som max, min og middel for måleperioden (Tabel 3). pH varierer typisk i størrelsesorden 6,2-7,6 med middelværdier i indløb fra 6,5 til 7,1 og er for alle anlæg således højere end den kritiske grænseværdi for okkerfældning på pH ≥6. pH i udløb er enten i samme størrelsesorden eller svagt stigende i forhold til indløb.

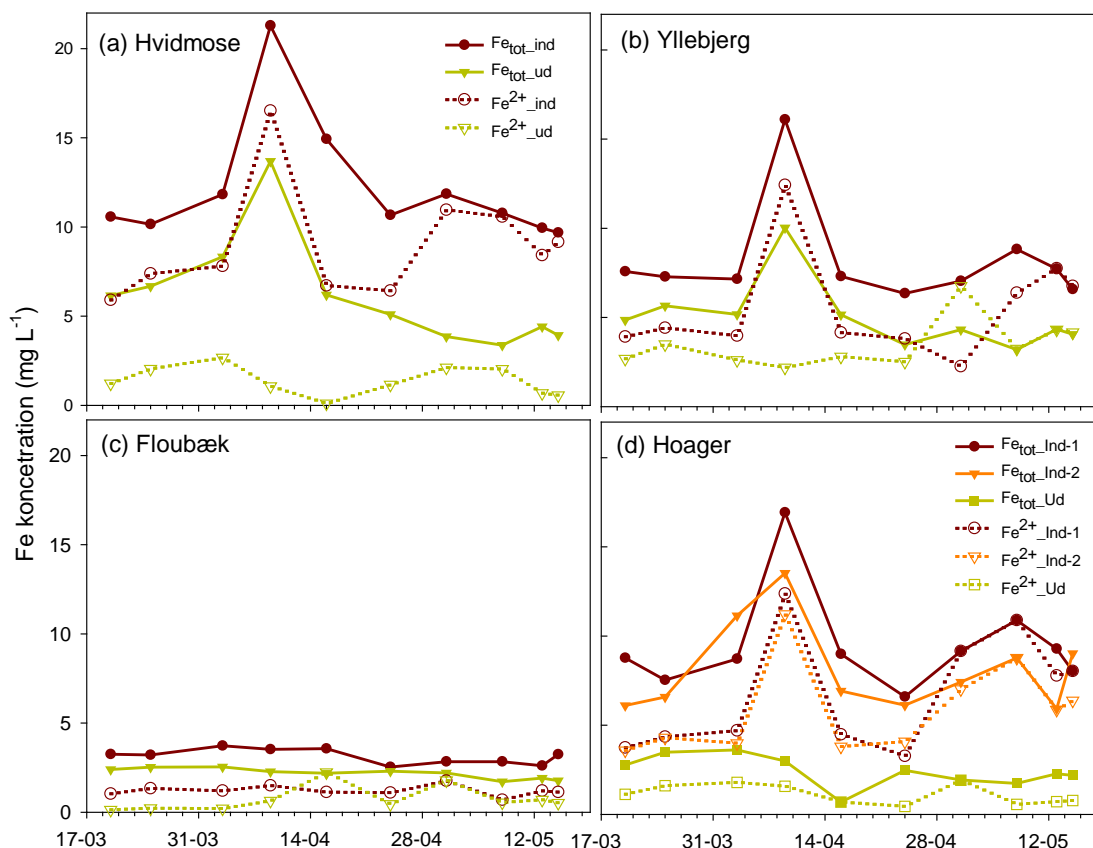
Tabel 3. Vandkemiske parametre i ind- og udløb til okkeranlæg (^ato indløb ved Hoager).

		pH		Temperatur (°C)		Iltmætning (%)	
		Ind	Ud	Ind	Ud	Ind	Ud
Hvidmose	Max	6,88	7,24	10,9	11,5	80	99
	Min	6,30	6,60	6,9	6,4	68	75
	Middel	6,60	6,89	8,8	9,4	71	87
Floubæk	Max	7,31	7,55	10,7	10,6	76	94
	Min	6,53	7,10	7,9	7,9	69	77
	Middel	7,06	7,29	9,0	9,3	73	84
Yllebjerg	Max	7,56	6,68	11,4	11,0	81	92
	Min	6,19	6,23	7,6	7,0	64	69
	Middel	6,58	6,40	8,8	8,9	69	77
	Min	6,26 6,45	6,42	7,2 6,7	8,3	71 70	75
	Middel	6,47 6,73	6,68	8,4 8,5	9,7	75 75	85

Middelvandtemperaturen er generelt svagt stigende (0,1-0,6°C) fra indløb til udløb, hvor det største anlæg (Hoager) dog har en højere temperaturstigning på 1,2°C. Iltmætningen i indløb varierer fra 64-81%, hvor middelværdien er relativt identisk for de fire anlæg (69-75%), og der ses i alle anlæg en øget iltmætningen ved transporten gennem anlægget (Tabel 3).

3.3 Målte jern og fosforkoncentrationer i ind- og udløb

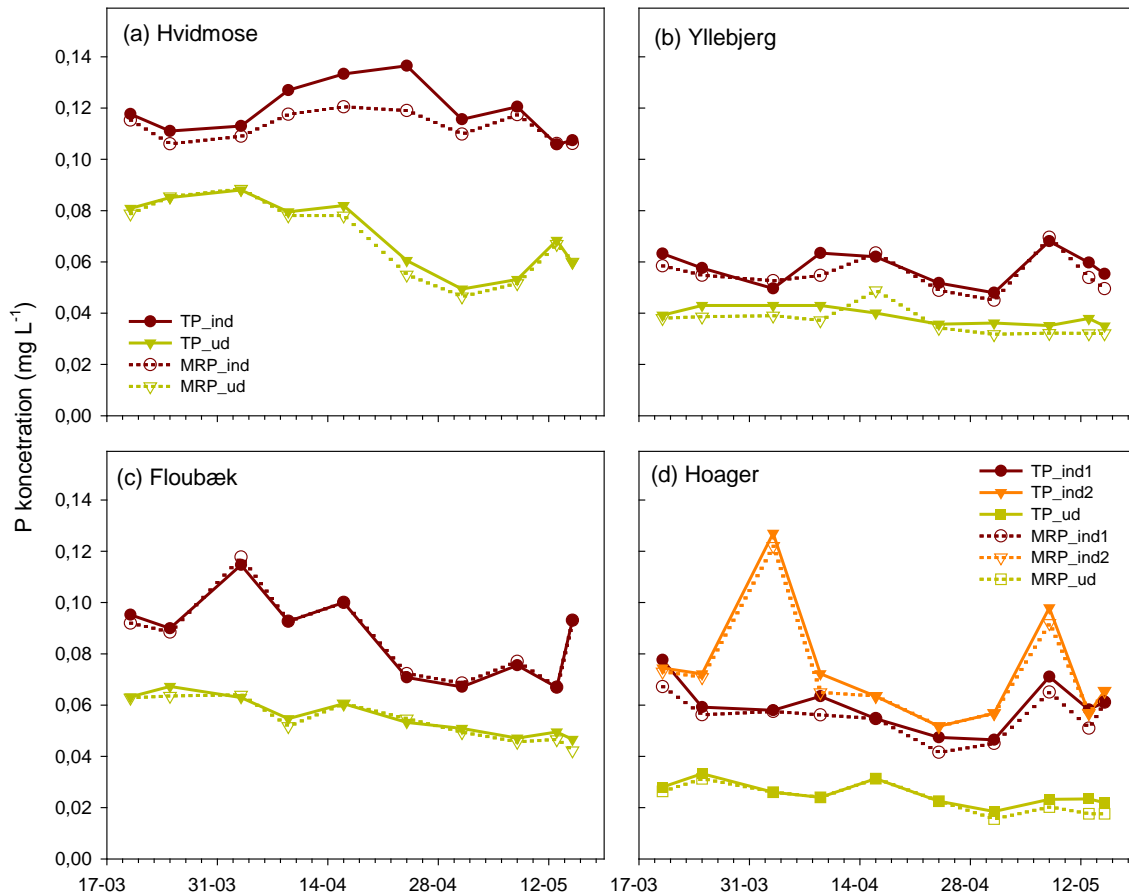
Indløbskoncentrationer af jern varierer indenfor måleperioden og mellem de fire anlæg (Figur 11). De højeste Fe_{tot} koncentrationer (10-21 mg/l) ses for Hvidmose, efterfulgt af Yllebjerg og Hoager (7-17 mg/l), mens Floubæk har væsentligt lavere Fe_{tot} -koncentrationer (3-4 mg/l) i indløb. Tilsvarende ses samme forløb for koncentrationer af opløst ferrojern (Fe^{2+}) med koncentrationer på 6-17 mg/l for Hvidmose, 3-12 mg/l for Yllebjerg og Hoager og væsentligt lavere koncentrationer 1-2 mg/l for Floubæk. For alle anlæg ses over hele måleperioden reduktion i koncentrationen af såvel total jern og opløst ferrojern. Middeldudløbskoncentrationer af opløst ferro-jern varierer fra 0,82 mg/l i Floubæk, 1,18-1,48 mg/l i Hoager og Hvidmose til 3,41 mg/l i Yllebjerg.



Figur 11. Koncentration af opløst ferro jern (Fe^{2+}) og total jern (Fe_{tot}) i ind- og udløb over måleperioden for okkeranlæg (a) Hvidmose, (b) Yllebjerg, (c) Floubæk og (d) Hoager (Bemærk to tilløb for Hoager).

Som for jern ses de højeste total P (TP) indløbskoncentrationer (0,11-0,14 mg/l) for Hvidmose, her efterfulgt af Floubæk og Hoager (0,06-0,13 mg/l), mens Yllebjerg har lave TP-koncentrationer (0,04-0,065 mg/l) i indløb (Figur 12). Indløbskoncentrationerne for Hvidmose er i samme størrelsesorden som middel TP-koncentrationen (0,11 mg/l) målt i indløb i perioden oktober 1994

til august 1996 (Ringkjøbing Amt). Opløst MRP udgør for alle anlæg den dominerede P-fraction (94-100%). For alle anlæg ses over hele måleperioden reduktion i såvel TP og MRP, hvor P-udløbskoncentrationer varierer fra 0,02-0,04 mg/l (Hoager og Yllebjerg) til 0,04-0,09 mg/l (Floubæk og Hvidmose).



Figur 12. Koncentrationen af opløst reaktivt fosfor (MRP) og total fosfor (TP) i ind- og udløb over måleperioden for okkeranlæg (a) Hvidmose, (b) Yllebjerg, (c) Floubæk og (d) Hoager (to tilløb for Hoager).

3.4 Jern og fosforretention i de undersøgte okkeranlæg

Fosfor og jerntransporten for måleperioden (20-03-14 til 15-05-14) er beregnet på basis af lineær interpolation mellem ugentlige koncentrationsmålinger i ind- og udløb samt de tilgængelige vandføringsmålinger. Der forventes en usikkerhed i estimerne af de absolutte transporter, som følge af variationer i de målte koncentrationer og vandføringsmålinger, der ikke afdækkes af de ugentlige punktmålinger. I forhold til vurdering af retentionseffekten vurderes den relative sammenligning af tilførsel og eksport til og fra okkeranlægget dog at give et retvisende grundlag for konklusion af effekten i måleperioden.

I måleperioden ses langt den største jern (Fe_{tot} og Fe^{2+}) transport til Hoager-anlægget, og samtidig ses også den største jernretentionseffektivitet på 71% og 79% for hhv. total og opløst jern (Tabel

4). Hvidmose og Yllebjerg har en tilførsel af såvel total jern som opløst ferro jern i samme størrelsesorden, men hvor tilbageholdelsen af total jern er i samme størrelsesorden (32 og 36%) har Hvidmoseanlægget en langt højere retention af opløst ferro jern (80%) i forhold til Yllebjerg (32%). Floubæk har den laveste tilførsel af såvel total og opløst jern og samtidig den laveste retentionseffektivitet hhv. 24% og 30% for Fe_{tot} og opløst ferro jern (Tabel 4).

Tabel 4. Transport af jern og fosfor samt retentionseffektivitet i okkeranlæg for måleperioden 20-03-14 til 15-05-14.

		Hvidmose	Yllebjerg	Floubæk	Hoager
Fe_{tot}	Tilførsel (kg)	3.711	3.908	1.051	8.969
	Eksport (kg)	2.366	2.648	796	2.575
	Retention (%)	36	32	24	71
Fe^{2+}	Tilførsel (kg)	2.668	2.496	408	6.143
	Eksport (kg)	529	1.691	286	1.279
	Retention (%)	80	32	30	79
TP	Tilførsel (kg)	36,1	26,8	29,0	59,2
	Eksport (kg)	25,7	20,0	20,1	27,3
	Retention (%)	29	26	31	54
MRP	Tilførsel (kg)	34,0	25,8	29,3	55,8
	Eksport (kg)	25,0	18,9	19,7	26,5
	Retention (%)	26	27	33	53

Hoager anlægget har tilsvarende den største tilførsel af P (TP, MRP) samt den største retentions-effektivitet på 53-54%. De tre øvrige anlæg har samme størrelsesorden i såvel P tilførsel samt retentionseffektivitet inden for til en tilbageholdelse på 26-31% TP (Tabel 4).

Sammenholdes disse resultater med de tidligere undersøgelser af okkeranlæg ses ganske god overensstemmelse. De to største anlæg (Hoager og Hvidmose) har den største renseeffekt i forhold til opløst ferrojern med reduktion i opløst ferrojern på 79-80%. Yllebjerg og Floubæk har en væsentligt ringere renseeffekt for ferrojern på 30-32%. Sammenholdes renseeffekten for tilsvarende forårsperioder (slut marts til medio maj) fra Ringkøbing Amts undersøgelser i perioden 1992-1999 ses at renseeffekten for opløst jern i perioden varierer mellem år fra 69 til 97% for Hvidmose og fra 45 til 76% for Hogager. Renseeffekten for opløst ferrojern i nærværende undersøgelse ligger således i den øvre ende af variationskalaen i forhold Hoager, mens den for Hvidmose ligger indenfor tidligere målte variationer i perioden. Der er derfor ikke noget der tyder på at iltningseffektiviteten for ferrojern er aftaget i disse anlæg. Hoageranlægget har tilsvarende en relativt højt tilbageholdelse af total jern (79%), hvilket repræsenterer maksimum niveau for anlægget sammenholdt med samme periode i tidligere undersøgelser (45-76%). I modsætning til Hoager har Hvidmose en væsentligt lavere tilbageholdelse af totaljern (36%), hvilket ligger langt under observerede effektiviteter (66-98%) for samme periode i Ringkøbing Amts tidligere undersøgelser. Da indløbskoncentrationer af jern, fosfor samt pH er i samme størrelsesorden kan en sandsynlig forklaring på den lavere tilbageholdelse af totaljern for Hvidmose være en dårlig

sedimentation af iltede ferrijern-forbindelser som følge tilslemning af bundfældningsbassinnet. Et eksempel på en sådan tilslemning ses fx ved Hoageranlægget (Figur 13).



Figur 13. Tilslemning af bundfældningsbassin ved indløb-1 i Hoageranlægget. Foto: Forsmann, 2014.

Den ringe tilbageholdelse af totaljern kan samtidig forklare den væsentligt lavere tilbageholdelse af P (29%) i Hvidmoseanlægget, sammenholdt med de tidligere meget høje TP-retentioner (middelretention på 85% og min-max på 60-98%) der blev observeret ved undersøgelserne i 1994-1996. Det må således forventes at P-retentionen igen vil øges i Hvidmoseanlægget, hvis okkerfældningseffektiviteten genetableres fx ved oprensning af okkerslam. For Hoageranlægget, hvor der ikke tidligere er målt P, ses en P-retention på 53-54% i måleperioden. Da anlægget her har optimum i okkerfældningseffektiviteten sammenholdt med målingerne fra 1992-1999, kan det være tvivlsomt om okkerfældningseffektiviteten og dermed P-retentionseffektiviteten kan øges yderligere. På basis af feltinspektion er det dog tydeligt at anlægget har behov for oprensning af okkerslam (Figur 16). De mindre effektive okkerfældningsanlæg Yllebjerg og Floubæk har en TP-retention i måleperioden på hhv. 26 og 31%. Da okkerfældningseffektiviteten samtidig er lav i disse anlæg, kunne det forventes at P-retentionen kunne øges ved at optimere okkerfældningseffektiviteten.

3.5 Sammenfatning og perspektiver i forhold til fosforfældningsbassiner

Trods det relativt begrænsede datagrundlag, der omfatter screeningen af fire okker-anlæg (Hvidmose, Hoager, Yllebjerg og Floubæk) i foråret (marts-maj) 2014, og målingerne af Hvidmoseanlægget i perioden 1994-1996, samt de øvrige erfaringer fra okkerrensning i eksisterende anlæg, må det konkluderes at der i forbindelse med okkeranlæg synes at være et stort potentiale for tilbageholdelse af P til iltede ferrijern-forbindelser. Nærværende screening af P-retentionen i forårsperioden demonstrerede at der kunne opnås en reduktion i TP transporten i størrelsesorden 26-31% for de mindst effektive okkerfældningsanlæg og op til 54% for det i screeningen bedst fungerende okkerfældningsanlæg (Hoager). Tidligere undersøgelser af et optimalt fungerende Hvidmoseanlæg har dog vist, at det for et velfungerende

okkerfældningsanlæg med gennemsnitlige TP-indløbskoncentrationer på 0,11 mg/l er muligt at opnå en reduktion i P-transporten på 60 til 98% med en middelretention på 85% over en 2-årig periode (okt-94 til aug-96). De lavere P-effekter observeret for Hvidmose i nærværende screening kan skyldes tilslemning af bundfældningsbassinet og deraf forringede forhold for sedimentation af iltede ferrijern-forbindelser. Da det forventes at P-retentionseffektiviteten generelt vil være direkte koblet til okkerfældningseffektiviteten, må det forventes at P-retentionen kan optimeres ved at optimere okkerfældningseffektiviteten. Her har eksisterende erfaringer vist at lavvandede grødefyldte bassiner med bundfældningsbassin er de mest effektive okkerfældningsanlæg, mens der i de såkaldte okkersøer er fundet væsentligt lavere effekter.

Fosfortilbageholdelsen i okkerfældningsanlæg må forventes at være relativt stabil, da der kontinuert tilføres nyt bindingsmateriale i form af udfældede ferrijern-forbindelser (okker). Samtidig forventes det relativt vel-iltmættede vandløbsvand, der kontinuert gennemstrømmer anlægget at minimere en eventuel fosforfrigivelse fra anaerobt bundsediment.

Det er ikke muligt på baggrund af det begrænsede datamateriale at give et bud på P-retentionseffektiviteten i de danske okkeranlæg generelt og data er ikke tilstrækkeligt omfattende til at der kan drages konklusioner om virkemiddelseffektens afhængighed af responsvariable som P-tilførslen, vandkemi og årstidsvariationer. Da P-retentionseffektiviteten dog synes at være koblet til okkerfældningseffektiviteten, må det forventes at der for okkeranlæg med tilsvarende okkerfældningseffektivitet kan opnås en tilsvarende P-effekt. Der blev i Hvidmose-undersøgelsen (1994-1996) ikke observeret en årstidseffekt på tilbageholdelsen af P, idet anlægget bibeholdt høje P-retentionsrater i såvel sommer som vinterperioden. Hvis det samme er tilfældet for okkeranlæg i nærværende pilotprojekt, kan vi forvente en årlig reduktion i TP-transporten på 25-30% for de mindst effektive okkerfældningsanlæg (rensegrad 24-36%), mens der for velfungerende okkerfældningsanlæg må forventes at der kan opnås reduktion i TP-transporten på 50-85% ved tilsvarende P-indløbskoncentrationer (middelindløbskoncentration på 0,1 mg/l).

Hvidmoseanlægget har ifølge oplyste data en årsmiddelvandføring på 70 l/s, og med en gennemsnitlig indløbskoncentration på 0,11 mg/l giver det en årlig P transport på 234 kg. Med P-retentionsrater på 30 til 80% svarer det til en årlig P-retention på 70 til 187 kg P. Den arealbaserede virkemiddelseffekt giver i så fald en årlig virkemiddelseffekt på 48 til 129 kg TP/ha okkeranlæg på baggrund af de anlægsspecifikke oplysninger.

Da der i DHI-rapporten (DHI, 2014) konkluderes at et stort antal af de danske okkerfældningsanlæg, der har ringe rensegrad skyldes manglende vedligeholdelse, må der forventes at være et stort potentiale for reduktion i P transporten til vandløb ved at genetablere okkerfældningseffektiviteten for disse anlæg. Okkerpotentielle arealer udgør ca. 3000.000 ha svarende til ca. 10% af Jyllands areal, hvor den primære del af arealerne findes i Vest og Sønderjylland. Arealet af vandløb indenfor eller nedstrøms de okkerpotentielle områder er vurderet til ca. 28% af det samlede danske vandløbsareal (Andersen, 1996). I DHI-rapporten beskrives potentialet for etablering af yderligere okkerfældningsanlæg opstrøms målsatte vandløb

med høje ferrojern-koncentrationer (DHI, 2014, Bilag-A), og her bør TP-retention naturligt indregnes som additiv virkemiddelseffekt.

3.6 Anlæg og omkostninger ved drift og vedligehold

Virkemiddelseffekten i forhold til P-retention i okkerfældningsbassiner kan opnås i eksisterende såvel som nye okkerfældningsbassiner med effektiv okkerrensning uden særlige krav eller foranstaltninger i forhold til P. Anlægstekniske forhold der optimerer okkerfældningen vil samtidig optimere tilbageholdelsen af P, og omkostninger ved dette virkemiddel er således relateret til de omkostninger der generelt er ved etablering, drift og vedligehold af okkeranlæg. Væsentligt for optimering af effekten i forhold til såvel okkerfældning samt P retention er vedligeholdelse af disse anlæg, herunder særligt bortgravning af sediment.

De anlægstekniske forudsætninger for et velfungerende og optimeret lavvandet grødefyldt okkerfældningsanlæg er beskrevet i notat fra Ringkøbing-Skjern Kommune (Ringkøbing-Skjern Kommune, 2013). Forudsætningerne omfatter:

- Dimensionering i forhold til en minimum hydraulisk opholdstid på 20 timer,
- Forekomst af opløst ferrojern i indløbsvand samt $\text{pH} \geq 6$
- Et veletableret lavvandet (30 cm) grødebassin (55 vol. %) med stort grøde-overfladeareal (anvendelse af planter som vandranunkel og vandstjerne med store overfladeareal anbefales i modsætning til siv og dunhammer).
- Et dybere (1 m) bundfældningsbassin (45 vol. %)
- Regelmæssigt vedligehold i form af oprensning af okkerslam.

Der henvises endvidere til, at der på baggrund af 20 års erfaringer med okkeranlæg fra kommuner og amter er opstillet en checkliste for opbygning af de mest funktionelle okkerfældningsanlæg (Ringkøbing-Skjern Kommune, 2013). Notatet omfatter endvidere en redegørelse for tilsyn- og vedligeholdelsesfrekvens ved forskellige typer af okkerfældningsanlæg samt for økonomien i forbindelse med drift og vedligeholdelse af disse (notat Ringkøbing-Skjern Kommune, 2013).

4 Konklusion og anbefaling

På baggrund af eksisterende viden og nærværende pilotprojekt, kan der trods et sparsomt datagrundlag konkluderes at:

- Der er et stort potentiale for fosfor-retention i okkerfældningsanlæg af typen lavvandede grødefyldte sedimentationsbassiner
- P-retentionseffektiviteten forventes at være direkte koblet til okkerfældnings-effektiviteten, og P-retentionen kan derfor optimeres ved at optimere okkerfældningen i henhold til den eksisterende viden fra okkerfældningsanlæg.
- Der kan for okkeranlæg forventes årlige reduktioner i TP-transporten på 25-30% for de mindst effektive anlæg (okkerrensegrad 24-36%), op til 50-85% for velfungerende anlæg (okkerrensegrad 75-80%).
- Et større antal danske okkeranlæg har ringe okkerrensegrad formentligt som følge af manglende vedligeholdelse. Der forventes således at være et betydeligt potentiale for reduktion i P-transporten til vandløb ved at genetablere og/eller optimere okkerfældningseffektiviteten for disse anlæg.
- Der er vurderet behov for etablering af yderligere okkerfældningsanlæg opstrøms målsatte vandløb med høje ferrojern-koncentrationer (primært vest, midt og sønderjylland), og der er således potentiale for en additiv virkemiddelseffekt i form af reduktion i P-transporten til nedstrøms vandløbssystemer og recipienter i disse områder.
- Der findes 20 års erfaringer med etablering og vedligeholdelse af okkerfældningsanlæg og der er i tidligere rapporter redegjort for tilsyn og vedligeholdelsesfrekvens, samt økonomi i forbindelse med drift og vedligeholdelse af okkerfældningsanlæg.

5 Litteraturliste

Andersen, S.P., 1993. Sammenfatning af eksisterende metoder til okkerbekæmpelse. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, nr. 24/1993. Miljøstyrelsen.

Arealinformation, 2014. <http://arealinformation.miljoportal.dk/distribution/>

Bolet, B., 1996. Hvidmose okkerrenseanlæg 1992-1995, Hoager okkerrenseanlæg 1992-1995. Hodsager Lilleå okkerrenseanlæg 1993-1995, Ring Å okker/restaureringsprojekt 1993-1995. Notat fra Vandmiljøafdelingen, Ringkjøbing Amtskommune.

Christensen, L.B., 1992. Dimensionering af grødefyldte bassiner til okkerrensning, Miljøprojekt nr. 192, Miljøministeriet, Miljøstyrelsen. ISBN nr. 87-503-9704-4.

DHI, 2014. Status for okkerrensning. Vurdering af behovene for og effekterne af alternative rensningsmetoder for okker. Teknisk notat, Naturstyrelsen.

Esbjerg Kommune. 2011. Vurdering af effekten af Esbjerg Kommunes okkerrensningsanlæg. Johansson & Kalstrup A/S rådgivende ingeniører FRI. Esbjerg

Holstebro Kommune, 2004. Vurdering af effekten af 9 okkerrenseanlæg i vandløb ved Holstebro Kommune. Holstebro Kommune, Miljøafdelingen og Miljøcenter Vestjylland.

Kjær, L., 2003. Okkeranlægget som botanisk biotop. Speciale ved Institut for Økologi, Botanisk Sektion, Den Kongelige Veterinær- og Landbohøjskole.

Moeslund, B., B., Løjtatn, H., Mathiesen, L. Mathisen, A. Pedersen, N. Thyssen og J.C. Schou, 1990. danske vandplanter. Miljønyt nr. 2. Miljøstyrelsen.

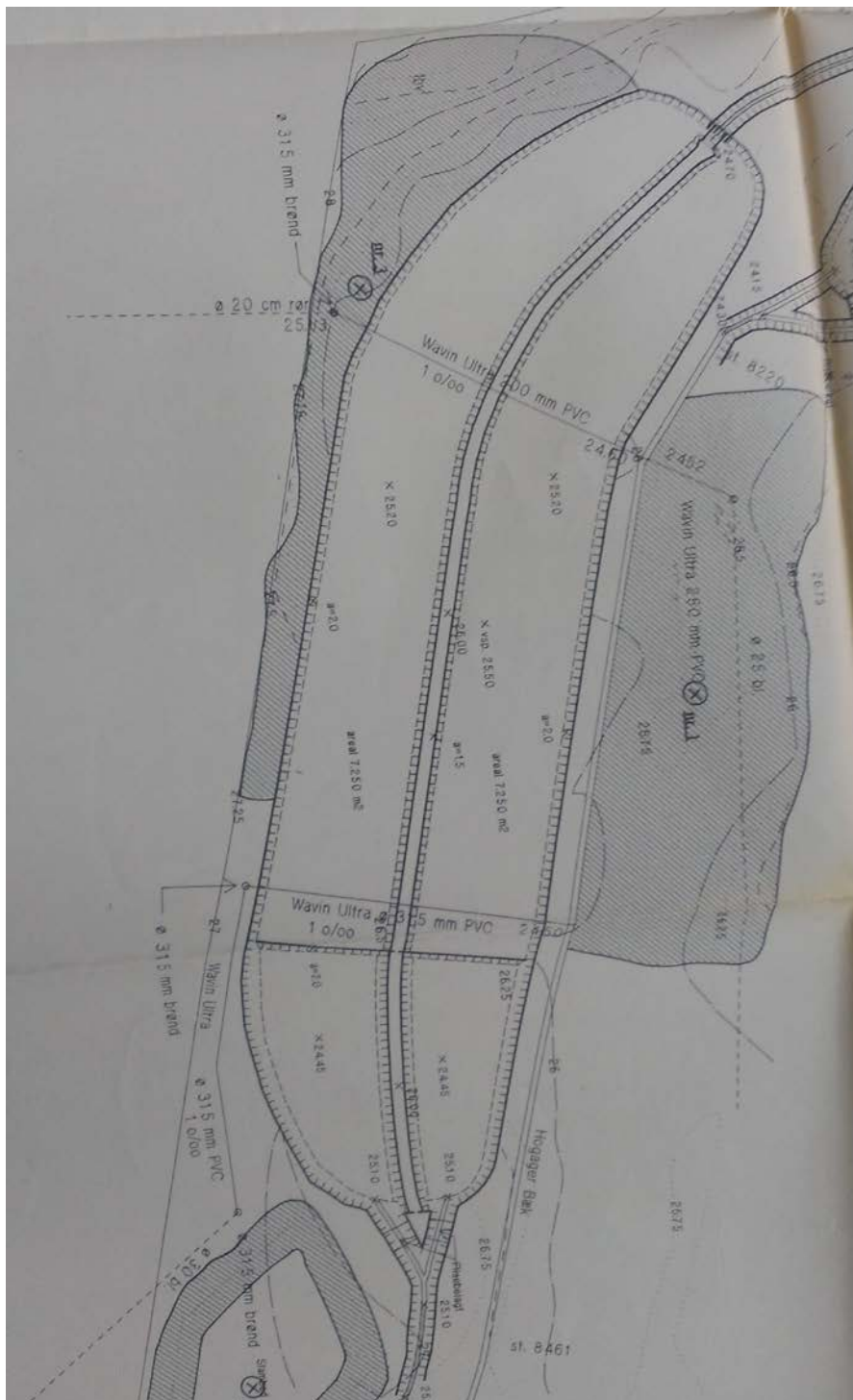
Orbicon, 2008. Miljøcenter Ribe og Miljøcenter Ringkjøbing Okkerværktøjskasse. Miljøcenter Ribe.

Ringkjøbing Amt, 2001. CD-rom præsentation af data fra Optimering af renseseffekt i lavteknologiske okkerrenseanlæg. Projektet er udført af DHI.

Ringkjøbing-Skjern Kommune, 2013. Drift og vedligeholdelse af okkerrensningsbassiner. Bilag D i DHI, 2014 (ed): "Status for okkerrensning. Vurdering af behovene for og effekterne af alternative rensningsmetoder for okker. Teknisk notat", Naturstyrelsen.

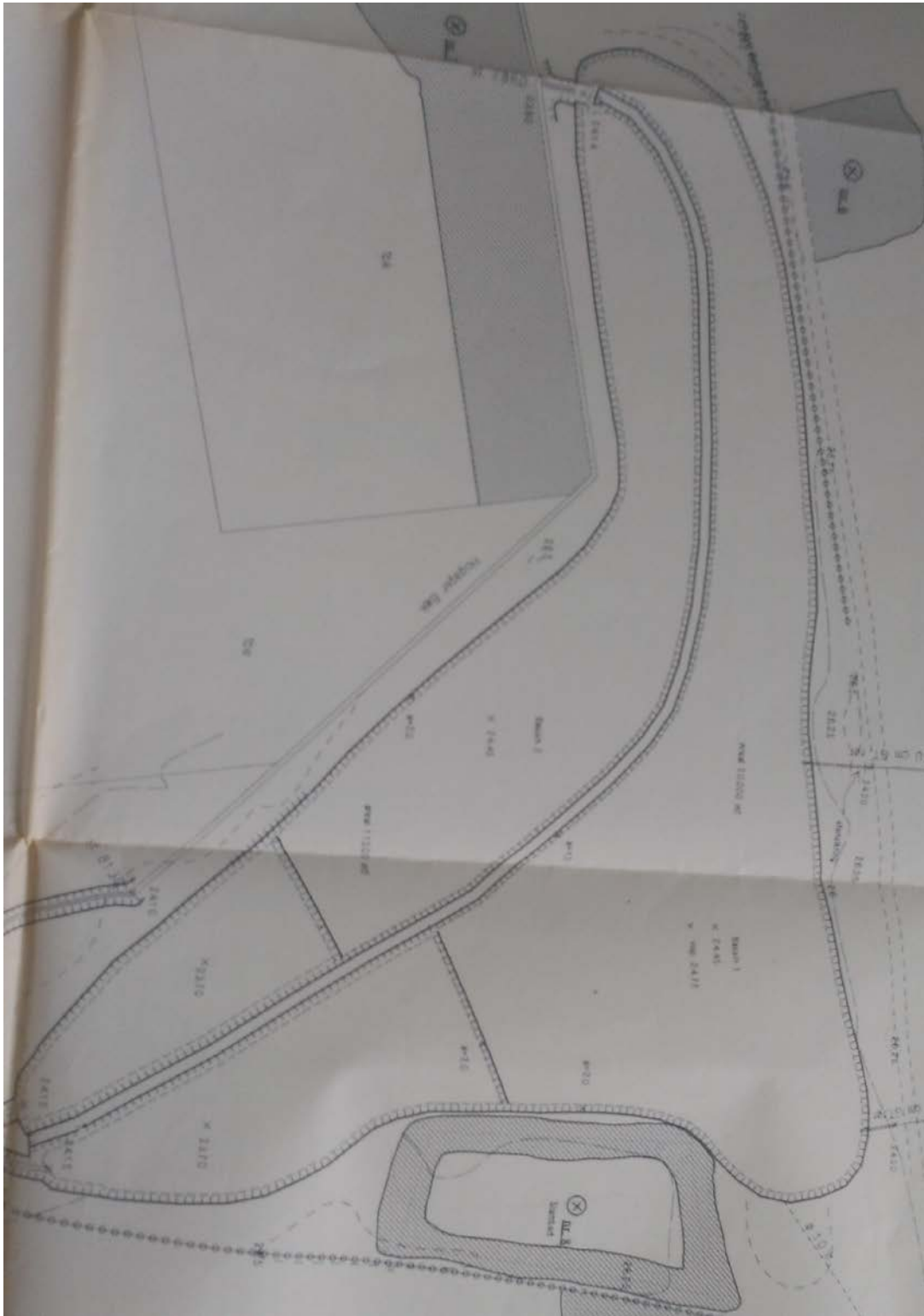
Waagepetersen, J., S.E. Olesen, J. Jacobsen, S. Nielsen og A. Sode, 1985. Overfladeaktiveret iltning af ferrojern i vand fra Hvidmosen. Miljøprojekt nr. 68, Miljøstyrelsen.

Bilag 1. Anlægstejning af Hvidmose anlægget anno 1992



(Udbudsmateriale, Ringkøbing Amt 1991)

Bilag 2. Anlægstejning af Hoager anlægget anno 1992



(Udbudsmateriale, Ringkøbing Amt 1991)

Appendiks 1. Udtagning, håndtering og analyse af vandprøverprøver

Udtagning af vandprøver



Vandprøverne udtages med en prøvetager bestående af en stang med en monteret prøveflaskeholder, hvorpå iltmålingsudstyret er monteret. Den anvendte iltmåler er af typen Oxyguard Handy Polaris II, som måler og logger temperatur samt iltindhold og iltmætning.

Prøveflasken sænkes ned under vandoverfladen for at sikre, at flasken fyldes op helt op således en evt. iltning af prøven under transporten minimeres. Flasken lukkes og den fyldte prøveflaske opbevares i køleboks indtil analyse umiddelbart efter hjemkomst til laboratoriet. En indledende test viste at PE-plastflasker var anvendelige som prøvetagningsflasker, når prøverne blev opbevaret på køl indtil analysen som blev påbegyndt umiddelbart efter hjemkomst til laboratoriet. Alle analyser blev gennemført indenfor 6 timer efter prøvetagning. Kan prøverne ikke analyseres på udtagningsdagen anbefales det, at anvende diffusionstætte glasflasker. Alle prøvetagningsflasker var syreskyllede forud for prøvetagning.

Håndtering og analyse af vandprøverne i laboratoriet

I laboratoriet blev vandprøverne analyseret for reaktivt opløst P (MRP), total P (TP), ferrojern (Fe^{2+}) samt total jern (Fe_{tot}) efter standardmetoder ved Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi. MRP og TP måles i henhold til Murphy & Riley (1962), mens opløst jern (Fe^{2+}) og total jern (Fe_{tot}) måles efter ferrozine metoden (Stookey (1970)).

Referencer

Murphy, J, Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters, *Anal. Chim. Acta.* 21 (1), 31-36.

Stookey, L.L, 1970, Ferrozine - new spectrophotometric reagent for iron. *Anal. Chem.* 42 (7), 779-782.