



FORUNDERSØGELSE AF ORMSTRUP SØ

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 175

2015



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

[Tom side]

FORUNDERSØGELSE AF ORMSTRUP SØ

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 175

2015

Martin Søndergaard¹
Henning Jensen²
Jacob Rysberg Nielsen²
Kasper Reitzel²

¹ Aarhus Universitet, Institut for Bioscience

² Syddansk Universitet, Biologisk Institut,



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 175
Titel:	Forundersøgelse af Ormstrup Sø
Forfattere:	Martin Søndergaard ¹ , Henning Jensen ² , Jacob Rysberg Nielsen ² & Kasper Reitzel ²
Institution:	¹ Aarhus Universitet, Institut for Bioscience & ² Syddansk Universitet, Biologisk Institut
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	December 2015
Redaktion afsluttet:	November 2015
Kvalitetssikring, DCE:	Poul Nordemann Jensen
Finansiel støtte:	Viborg Kommune
Bedes citeret:	Søndergaard, M., Jensen, H., Nielsen, J.R. & Reitzel, K. 2015. Forundersøgelse af Ormstrup Sø. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 24 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 175 http://dce2.au.dk/pub/SR175.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Rapporten beskriver en forundersøgelse af Ormstrup Sø med henblik på at vurdere forskellige restaureringsmuligheder. Søen er meget næringsrig med en stor intern fosforfrigivelse fra sedimentet. Den interne fosforfrigivelse kan reduceres betydeligt ved at bortgrave det øverste sediment, men der er stadigvæk mobile puljer af fosfor i de dybere dele af sedimentet. Behandling med aluminium vil kræve, at der bufres med f.eks. Ca(OH) ₂ på grund af søens forholdsvis lave alkalinitet.
Emneord:	Ormstrup Sø, restaurering, aluminiumtilsætning, Fosflocktilsætning, sedimentfjernelse, optiskning
Layout:	Grafisk Værksted, AU-Silkeborg
Foto forside:	Ormstrup Sø. Foto: Martin Søndergaard
ISBN:	978-87-7156-183-8
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	23
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/SR175.pdf

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
1 Indledning og tidligere undersøgelser i Ormstrup Sø	7
1.1 Baggrund for undersøgelsen	7
1.2 Ormstrup Sø	7
1.3 Tilførsel af fosfor	8
1.4 Vandkemiske forhold	9
1.5 Biologiske forhold	9
2 Sedimentundersøgelser	11
2.1 Sedimentets hårdhed	11
2.2 Fosforindhold og fosforfraktioner i sedimentet	12
2.3 P-frigivelse ved simuleret fjernelse af de øverste 40 cm af sedimentet	15
2.4 Beregning af doseringsmængder af aluminium og Phoslock	16
2.5 Omkostninger ved dosering af aluminium og Phoslock	17
3 Mulige restaureringsmetoder og deres anvendelse i Ormstrup Sø	19
3.1 Sedimentfjernelse	19
3.2 Fosforbinding ved tilsætning af aluminium eller Phoslock	19
3.3 Opfiskning af fredfisk	19
3.4 Restaureringsmuligheder og priser	19
3.5 Kombination af metoder	20
4 Sammenfatning og konklusioner	21
4.1 Søens nuværende tilstand	21
4.2 Søens restaurering	21
5 Referencer	23

[Tom side]

Forord

Denne rapport beskriver en forundersøgelse af Ormstrup Sø med henblik på at belyse forskellige muligheder for at restaurere søen. Forundersøgelsen omfattede også nye undersøgelser af sedimentet for at kunne vurdere mulighederne for kemisk fældning af fosfor og/eller fjernelse af sediment.

Sammenfatning

Ormstrup Sø er en 12 hektar stor sø beliggende i den sydlige del af Viborg kommune lidt nord for Ans. Søen er forholdsvis lavvandet med en største dybde på 4-5 m og en gennemsnitsdybde på 2,3 m. Søen kan periodisk være lagdelt om sommeren. Der er ingen egentlig tilløb til søen, og vandets opholdstid i søen er gennemsnitligt omkring 0,8 år.

Ormstrup er meget næringsrig – især hvad angår indholdet af fosfor og sommergennemsnittet for totalfosforindholdet det seneste måleår i 2010 var på 0,72 mg/l. Den gennemsnitlige sigtdybde var på 1,2 m og indholdet af klorofyl a på 40 µg/l. Fiskebestanden domineres af skalle og aborre. Der er ingen undervandsplanter i søen.

Sedimentet er meget blødt overalt i søen bortset fra de meget brednære områder. Indholdet af fosfor er især højt i de øverste 10 cm med totalfosforkoncentrationer på 150-200 µmol P/g tørvægt på de fem stationer, der er undersøgt. Under de 10 cm er koncentrationerne forholdsvis konstante og ligger omkring 40-90 µmol P/g TV. Der er en betydelig mobil pulje af fosfor i hele sedimentets dybde, der er undersøgt ned til 90 cm's dybde.

Det molære forhold mellem jern og fosfor er meget lavt i overladesedimentet (2,1-3,7), men stiger en smule med dybden (4,7-7,9). Det stiger dog ikke til værdier over 10, hvilket betyder, at der også kan forventes frigivelse af fosfor fra en eventuel ny blotlagt sedimentoverflade. Laboratorieforsøg med sediment fra søen viste en meget stor frigivelse af fosfor fra den nuværende sedimentoverflade, men en meget mindre frigivelse, hvis de øverste 40 cm blev fjernet.

Puljestørrelsen af mobilt fosfor i de øverste 10 cm er så stor, at den kræver tilsætning af omkring 200 g aluminium/m², for at sedimentets fosforfrigivelse standses. En tilsætning i denne størrelsesorden er ikke mulig pga. af søens forholdsvis lave alkalinitet på 1,4 mekv./l. For at binde sedimentets fosforpulje skal man derfor lave en tilsætning, som bufres med f.eks. Ca(OH)₂, eller man skal anvende et produkt som Phoslock, som ikke påvirker alkaliniteten. Phoslock er 4-5 gange dyrere at anvende end aluminium.

Der er givet et overslag over udgiften ved at anvende og kombinere forskellige restaureringsmetoder i Ormstrup Sø. Den billigste metode vil være opfiskning af fredfisk (skaller), som vil koste 0,12-0,24 mio. kr. Opfiskning kan dog ikke forventes at give varige effekter, men kan evt. anvendes i kombination med sedimentfjernelse eller kemisk fosforfældning. Aluminiumtilsætning alene vil koste 0,9 mio. kr., hvortil kommer ekstra omkostninger til bufning, mens Phoslocktilsætning vurderes at ville koste omkring 4 mio. kr. Fjernelse af de øverste 20 cm sediment i søen vurderes at ville koste mellem 2,4 og 5 mio. kr.. Sedimentfjernelse af de øverste 20 cm + aluminiumtilsætning vurderes at koste 2,9-5,5 mio. kr., mens sedimentfjernelse af de øverste 20 cm + Phoslocktilsætning vurderes at koste 4,2-6,8 mio. kr.

1 Indledning og tidligere undersøgelser i Ormstrup Sø

1.1 Baggrund for undersøgelsen

Ormstrup Sø er en 12 hektar stor sø beliggende i Viborg kommune lidt nord for Ans. Søen blev i forbindelse med udarbejdelsen af de første vandplaner udpeget til at skulle restaureres ved tilsætning af aluminium med henblik på at mindske den interne fosforbelastning fra sedimentet og dermed forbedre søens vandkvalitet. Søen er målsat til at have en god økologisk tilstand, men er i basisanalysen for de seneste vandområdeplaner angivet til samlet at have en dårlig økologisk tilstand. Generelle sedimentkemiske forhold og mulighederne for at restaurere søen ved at fjerne den øverste sedimentlag er tidligere undersøgt og vurderet i et notat af Envidan (2014), mens forhold vedr. vand- og fosfortilførsel er beskrevet af Orbicon (2015).

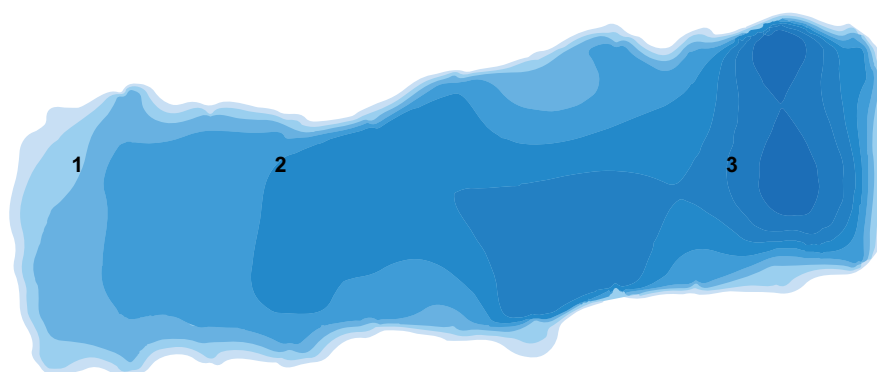
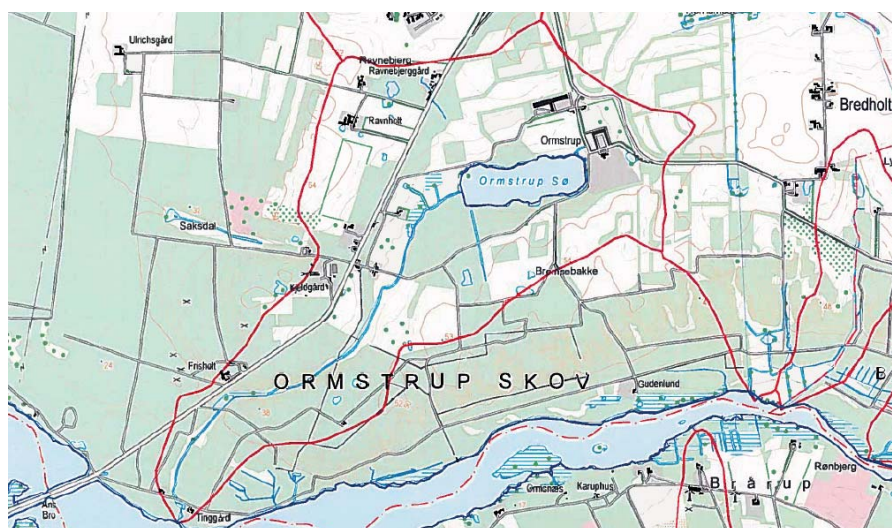
I forbindelse med planerne om restaurering af Ormstrup Sø har Viborg kommune ønsket en forundersøgelse af søen med henblik på at belyse forskellige muligheder for søens restaurering. Forundersøgelsen har omfattet nye undersøgelser af sedimentet samt en vurdering af øvrige restaureringsmuligheder jf. Vejledning for gennemførelse af sørestaurering (Søndergaard m.fl., 2015). Foruden at undersøge for de virkemidler, der er anvist til sørestaurering i Virkemiddelkataloget til Vandplanerne, indgår desuden en vurdering af muligheden for at restaurere søen ved sedimentfjernelse efter aftale mellem ejeren af Ormstrup Gods og Viborg Kommune.

1.2 Ormstrup Sø

Ormstrup Sø har et gennemsnitsdybde på 2,3 m og en maksimumsdybde på 4-5 m i søens østlige ende (fig. 1.1). Profilmålinger af temperatur og ilt ned gennem vandsøjlen i 2010 tyder på, at søen på trods af den relative lave vanddybde kan være lagdelt i perioder om sommeren, hvorved der opstår iltfattige forhold i bundvandet.

Der findes ingen egentlige tilløb til søen, og den har en forholdsvis beskedne vandudskiftning med en årsgennemsnitlig opholdstid af vandet på omkring 0,8 år (Orbicon, 2015). Vandudskiftningen varierer gennem sæsonen og er væsentlig mindre om sommeren. Det betyder, at den fosforpulje, som er i søen og herunder også en eventuel intern fosforbelastning fra sedimentet, kun langsomt skylles ud. Afløbet fra søen er i den vestlige ende, hvorfra vandet løber til Tange Sø (fig. 1.1).

Figur 1.1. Øverst: Ormstrup Sø og dens opland ved udløbet i Tange Sø markeret med rødt. Nederst: Dybdeforhold (0,5 m mellem hvert farveskift, 1, 2 og 3 m dybdekurver er angivet).



1.3 Tilførsel af fosfor

Den eksterne tilførsel af næringsstoffer til søer er afgørende for deres vandkvalitet og for, hvordan de på sigt vil udvikle sig i takt med at en eventuel intern fosforfrigivelse aftager. I Ormstrup Sø er den samlede årlige eksterne fosfortilførsel ved basisanalysen og udarbejdelsen af vandområdeplanerne beregnet til at udgøre 44,3 kg P, mens Orbicon ved at estimere de forskellige fosforkilder opgør den årlige tilførsel til 17,7 kg P (Orbicon, 2015). Sidstnævnte estimat svarer til en vandføringsvægtet middelindløbskoncentration på 0,055 mg/l på årsbasis og om sommeren på 0,091 mg/l (Orbicon, 2015). Anvendes den årlige middelindløbskoncentrationen på 0,055 mg/l til at beregne den årgennemsnitlige søkoncentration, giver dette en fosforkoncentration på 0,046 mg/l (jf. tabel 5.1, ligning 3 i Trolle m.fl., 2015). Dette svarer til en gennemsnitlig sommerkoncentration på 0,053 mg/l (jf. Fig. 3.6 i Trolle m.fl., 2015), hvilket netop svarer til fosforgrænsen anvendt til vurdering af målbelastning i lavvandede søer (Naturstyrelsen, 2014).

På baggrund af vandafstrømningen fra søen og fosforkoncentrationerne i søen er fraførslen af fosfor via afløbet estimeret til 216 kg P/år (Orbicon, 2015). Dette svarer til, at søen internt netto bidrager med mere 4-11 gange den estimerede eksternt tilførte mængde af fosfor. Søer i ligevægt (ikke påvirket af intern fosfortilførsel) vil normalt tilbageholde fosfor, hvilket svarer til, at der løber mindre fosfor ud af disse søer, end der kommer ind i søen. Holder de estimerede værdier over den eksterne tilførsel og fraførsel af fosfor til Ormstrup Sø, tyder dette på, at søen er voldsomt internt belastet med fosfor.

Der er ikke lavet nogen opgørelser over den tidligere fosfortilførsel, og det er ikke muligt at vurdere, hvor meget fosfor der tidligere kan være tilført og tilbageholdt i søen, men i Orbicon (2015) er det angivet, at der tidligere har været opdræt af op til 3.000 ænder i søen. Viborg kommune (2014) angiver, at søen har været eutrofieret siden 1850, og vurderer, at søen gennem tiden er tilført næringsstoffer via tilledninger af spildevand fra Ormstrup Gods samt fra landbrugsaktiviteterne på søens nordside.

1.4 Vandkemiske forhold

Ormstrup Sø er meget næringsrig – især hvad angår indholdet af fosfor. Der er kemiske analyser fra søvandet fra 2002, 2004, 2007 og 2010 (tabel 1.1), og i alle årene når koncentrationen af totalfosfor (TP) op på 0,6-1 mg P/l om sommeren. Niveauet i 2010 ligger højere end de øvrige undersøgelsesår – ikke mindst i forårsperioden, hvor totalfosfor i 2010 var omkring 0,5 mg P/l mod omkring 0,2 mg/l i de foregående undersøgelsesår. Høje orthophosphat-koncentrationer i 2002 og 2004 i overfladevandet peger klart på, at fosfor ikke er begrænsende for primærproduktionen i søen (tabel 1.1).

Der er ikke tidligere lavet egentlige undersøgelser, der beskriver omfanget af den interne fosforfrigivelse, men det markant øgede indhold af fosfor (både totalfosfor og orthophosphat), der ses om sommeren, tyder på, at der sker en meget omfattende frigivelse af fosfor fra søbunden.

Indholdet af totalkvælstof (TN) er forholdsvis lavt og ligger de fleste målear på omkring 1 mg/l (tabel 1.1). Indholdet af nitrit og nitrat er kun højt i vinterperioden og i det tidlige forår og er tæt ved 0 gennem hele sommerperioden. TN:TP forholdet er meget lavt og har endda været faldende i måleperioden, så sommergennemsnittet i 2010 kun var 1,4 (vægtbasis). Dette tyder ligeledes på, at planteplanktonet i Ormstrup Sø i øjeblikket er kvælstofbegrænset frem for fosforbegrænset. Normalt anses søer for at være potentielt kvælstofbegrænsede, selv ved væsentligt højere TN:TP forhold.

Tabel 1.1. Sigtdybde og vandkemiske forhold i Ormstrup Sø 2002-2010 (sommergennemsnit).

Parameter	2002	2004	2007	2010
Sigtdybde (m)	1,50	1,23	1,69	1,20
Klorofyl a (µg/l)	41	38	61	40
Totalalkalinitet (meq/l)	1,22	1,24	1,43	1,62
Farvetal (mg Pt/l)	-	18	23	20
Totalfosfor (mg/l)	0,45	0,43	0,53	0,72
Orthofosfat (mg/l)	0,35	0,33	-	-
Totalkvælstof (mg/l)	1,17	1,13	0,83	1,03
Nitrat+nitrit (mg/l)	0,02	0,03	-	-
TN:TP (mg/mg)	2,6	2,6	1,6	1,4

1.5 Biologiske forhold

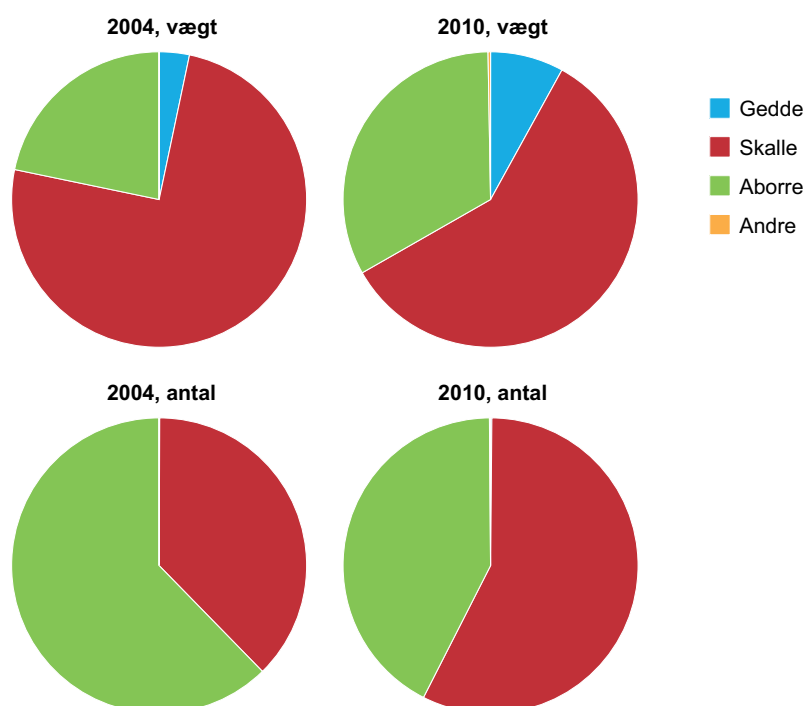
Klorofyl a og sigtdybde

Indholdet af klorofyl a i søen er højt, og det gennemsnitlige indhold om sommeren var i 2010 på 40 µg/l (tabel 1.1). Som en konsekvens af den store planteplanktonbiomasse er sigtdybden det meste af året lav. Om sommeren er den omkring 1 m, men kan være op til 3-4 m uden for sommerperioden. Den gennemsnitlige sommersigtdybde var i 2010 på 1,2 m (tabel 1.1).

Fisk

De to seneste fiskeundersøgelser fra Ormstrup Sø stammer fra 2004 og 2010 (fig. 1.2). I begge undersøgelser dominerer skalle og aborre fuldstændigt fiskebestanden, med islæt af enkelte gedder og meget få suder (suder kun fanget i 2010).

Figur 1.2. Fiskesammensætningen i Ormstrup Sø i 2004 og 2010 inddelt efter fangst i antal og i vægt ved fiskeri med biologiske oversigtsgarn.



Store fisk (> 10 cm) dominerer totalt bestanden for alle arter og udgjorde både i vægt og i antal næsten 100 % af fiskesammensætningen ved undersøgelsen i 2010 (tabel 1.2). Ved undersøgelsen i 2004 var der en noget mere jævn fordelt størrelsessammensætning, hvor andelen af store aborre udgjorde 22 % (antal) henholdsvis 85 % (vægt), mens skalle udgjorde 48 % (antal) henholdsvis 93 % (vægt).

Tabel 1.2. Fiskesammensætningen i Ormstrup Sø 2010 med angivelse af CPUE (catch per unit effort) ved anvendelse af biologiske oversigtsgarn.

Art	Total CPUE		Andel >10 cm (% af total)	
	Antal	Vægt (kg/garn)	Antal	Vægt
Skalle	45,8	4,23	99	100
Aborre	33,8	2,39	96	100
Gedde	0,12	0,58	100	100
Suder	0,12	0,02	100	100

Undervandsplanter

Så vidt vides findes der ingen undervandsplanter i søen (Viborg kommune, 2014).

2 Sedimentundersøgelser

Sedimentets fysiske egenskaber blev undersøgt, og prøver af sedimentet blev udtaget i november 2014. Undersøgelserne omfattede fire typer: 1) en beskrivelse af sedimentets hårdhedstype (sten, sand, fint sediment, se tabel 2.1), omfattende i alt 68 stationer fordelt over hele søen, 2) en undersøgelse af sedimentets indhold af tørstof, organisk stof, jern og totalfosfor i de øverste 70-90 cm på fem stationer, 3) en undersøgelse af sedimentets fosforpuljer (fosforfraktionering) i de øverste 90 cm på den dybeste station og 4) laboratorieforsøg til undersøgelse af fosforfrigivelsen fra den nuværende sedimentoverflade og fra en blotlagt overflade efter fjernelse af 40 cm topsediment på den dybeste station. Den potentielt mobile P-pulje i sedimentet vurderes på alle fem stationer. På station 1 sker det på baggrund af fosforfraktioneringen, mens det på de øvrige stationer sker ud fra en model for sammenhæng mellem sedimentets total P og mobilt P. Modellen er baseret på analyse af overfladesediment (0-10 cm) fra 34 danske søer (Flindt m.fl., 2015).

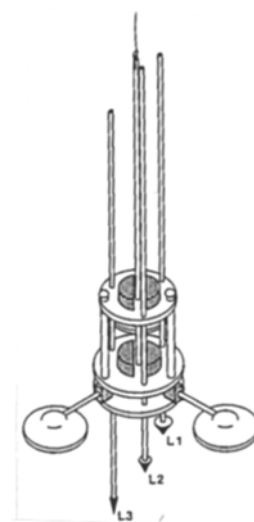
2.1 Sedimentets hårdhed

Metode

Indledningsvis er sedimentets horisontale variation og beskaffenhed (hårdhed) karakteriseret ved at anvende et penetrometer. Dette instrument sænkes ned fra en båd og placeres på sedimentoverfladen, hvor der udløses tre spyd, som i forskellig grad trænger ned i sedimentet afhængig af, hvor hårdt/blødt dette er (se fig. 2.1). Denne karakterisering gør det muligt hurtigt at vurdere, hvor ensartet sedimentet er over hele søen. Metoden har tidligere blandt andet været anvendt i Ferring Sø (Søndergaard m.fl. 2000). Undersøgelsen har dannet grundlag for udvælgelsen af udtagning af sediment-søjler til de mere specifikke sedimentundersøgelser.

Figur 2.1. Til højre ses en skitse af penetrometeret med de tre spyd (L1-3), der blev anvendt til at karakterisere sedimentets hårdhed. I tabellen nedenunder er det angivet, hvad de forskellige nedtrængningsdybder af de tre spyd overordnet svarer til af sedimenttype. + ved erosion betyder, at det er områder, der eroderes, +/- betyder, at det er transportområder og - betyder, at det er områder, hvor stof sedimenterer (efter Håkanson, 1986).

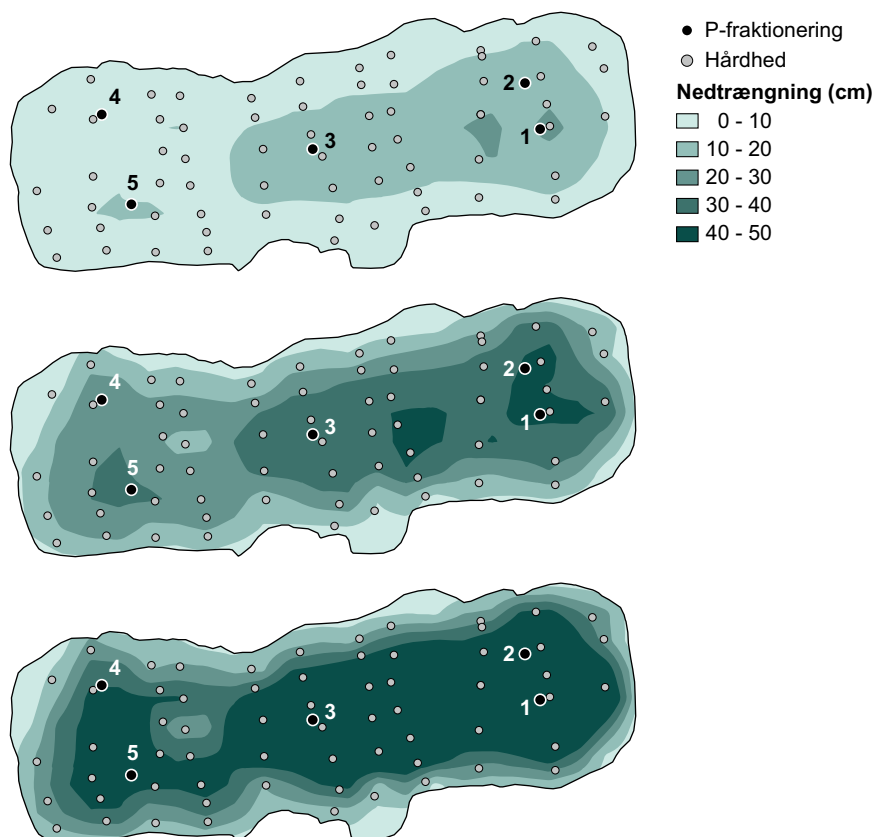
Sedimenttype	Erosion	Tørstof %	L1	L2	L3
Sten	+	100	-	-	-
Grus, småsten	+	>90	-	-	-
Grus, sand	+	80-90	0-1	0,5-2,5	1-5
Sand	+	50-70	<1,5	1-4	1,5-7
Hård ler	+/-	40-50	<2	3-5	5-10
Sandet silt	+/-	20-50	<3	3-10	5-15
Fint sediment	-	15-25	1,5-4	6-15	8-20
Meget f. sediment	-	1-15	ca. 2	>15	>20



Resultater

Sedimentets hårdhed er generelt meget ensartet i søen, og på nær meget brednære områder er stort set alle dele af søen præget af blød bund, hvor der til stadighed sker en sedimentation af organisk materiale. Især i den østlige og dybeste halvdel af søen er sedimentet meget blødt. Her trænger det tyndeste spyd overalt mindst 40 cm ned i sedimentet på nær i de 10-20 m mest brednære områder (fig. 2.2).

Figur 2.2. Sedimentets hårdhed i Ormstrup Sø målt som nedtrængningsdybden af tre forskellige spyd: L1 (øverst), L2 (midten) og L3 (nederst) ved hjælp af penetrometer (se også fig. 2.1). De fem stationer, hvor der er udtaget sedimentprøver til sedimentanalyser, er også angivet.



2.2 Fosforindhold og fosforfraktioner i sedimentet

Metode

Lokaliteterne, hvorfra der er udtaget sedimentprøver til nærmere analyser, fremgår af fig. 2.2. De fem stationer er placeret så de repræsenterer de væsentligste områder af søen.

På station 1 udtages uforstyrrede lange sedimentkerner (indre diameter 5,2 cm) ned til ca. 1 m's dybde vha. en "piston-corer". Sedimentet opdeles i dybdeintervaller på 5 eller 10 cm's lagtykkelser. På alle stationer udtages desuden sedimentkerner med en "gravity-corer", der har en indre diameter på 7,2 cm. Denne type kerner kan normalt udtages meget uforstyrrede. På kernen fra station 1 laves en finere opdeling af sedimentlagene. For alle stationer puljes sedimentskiverne fra tre kerner, således at variation, der skyldes sedimentets heterogenitet, mindskes.

På alle stationer analyseres for tørstof (TS), glødetab (GT), total fosfor (TP), og total jern (TFe). På den dybeste station analyseres desuden for forskellige bindingsformer af fosfor: let adsorberet P, jernbundet P, omsætteligt organisk P, aluminiumbundet P, calciumbundet P og refraktært organisk P samt for indhold af oxideret Fe og aluminiumoxider. Ud fra dette fås bl.a. en nøjagtig bestemmelse af sedimentets mobile P-pulje på den pågældende station.

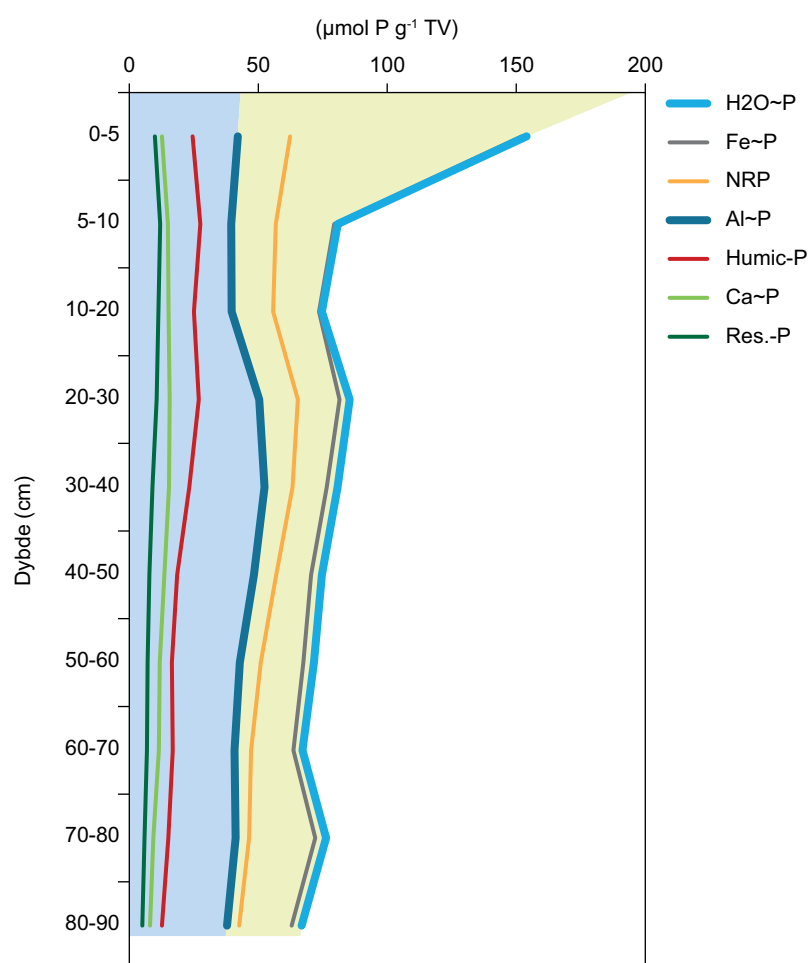
På de resterende stationer benyttes en korrelation mellem mobilt P og totalfosfor, som er fundet for 34 danske søer (Flindt m.fl., 2015). Eventuelt justeres korrelationen efter resultaterne for den dybeste station. Dermed kan det bestemmes, hvor dybt den mobile P-pulje ligger. Yderligere bestemmes

dybdeprofilen for TFe/TP forholdet til hjælp for en vurdering af, hvor meget sediment der skal bortgraves.

Resultater

På station 1 blev udtaget en lang "piston"-kerne på 90 cm (fig. 2.3). Denne kerne sammenlignes med en "gravity"-kerne taget på samme sted (fig. 2.4). Sammenligningen viser, at noget af overfladesedimentet muligvis er gået tabt i den lange kerne, idet koncentrationen af total P er omkring 150 $\mu\text{mol/g TV}$ i overfladen af piston-kernen mod omkring 200 $\mu\text{mol/g TV}$ i gravity-kernen. Der bør fæstes mest lid til gravity-kernen, og det er data fra denne kerne, som er brugt ved beregning af den mobile pulje per arealenhed (Tabel 2.1). På stationerne 2-5 er der kun målt total fosfor og total jern (Fe) (fig. 2.5).

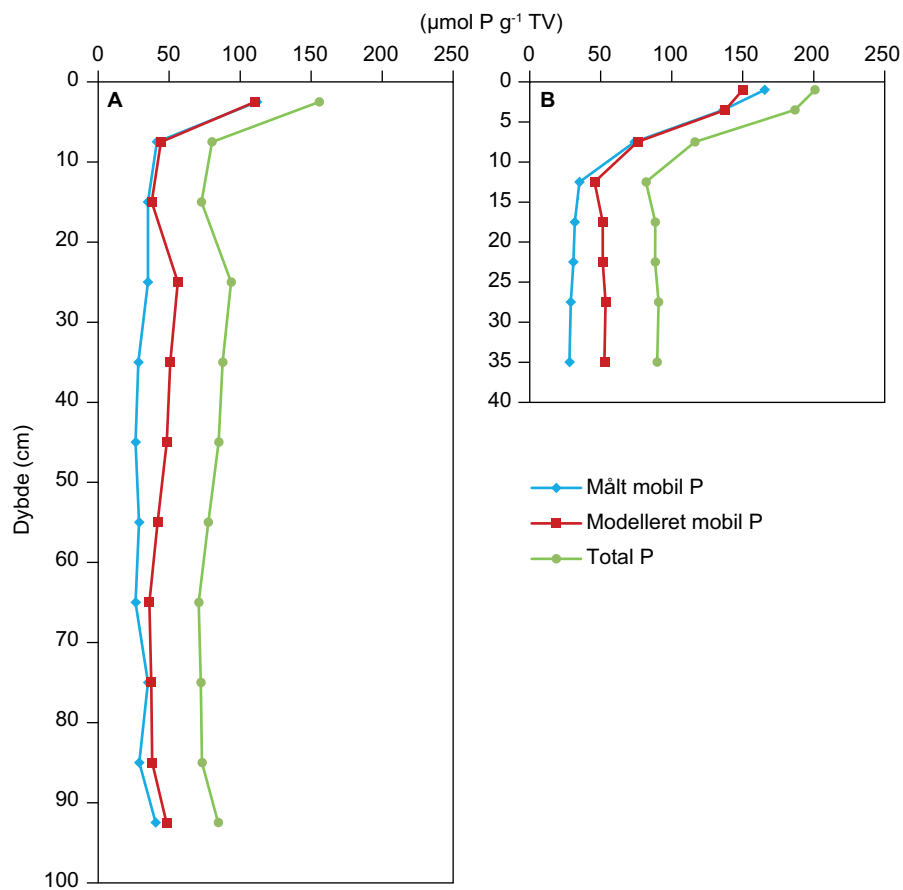
Figur 2.3. Dybdefordeling af sedimentets fosforpuljer i en lang "piston"-kerne fra station 1. Fosforpuljer markeret med gul farve regnes for potentielt mobile, mens de puljer, som er markeret med blå farve, regnes for immobiler. Se Søndergaard m.fl. (2015) for en nærmere redegørelse for de forskellige fosforpuljer og deres bestemmelse.



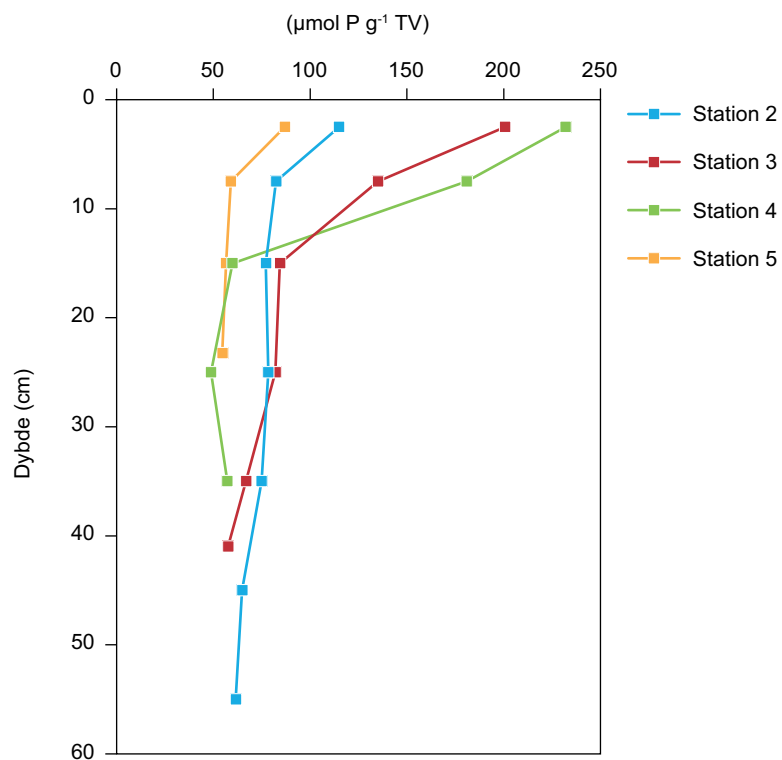
På alle stationer ses en markant øget koncentration af total fosfor i de øverste 5-10 cm af sedimentet. Analyserne af sedimentets fosforpuljer på station 1 viser, at øgningen skyldes mobilt P, overvejende i form af jernbundet P, som netop kan koncentreres i et iltet overfladesediment. Dybere end 10 cm er koncentrationen af TP næsten konstant, og på station 1 ses en ligelig fordeling mellem mobile og immobiler P-former.

Station 3 og 4 indeholder mere P i overfladesedimentet end de andre stationer. Normalt ses det, at stationer, som ligger tæt på udledningen fra land, kan have forhøjede P-koncentrationer. Resultatet indikerer derfor, at den kilde, som har forurenet søen i nyere tid, har haft en udledning tæt på station 4. Det kan måske være fodring af ænder, som har tilført fosfor omkring station 4.

Figur 2.4. Sammenligning af kerner udtaget med to forskellige prøvetagere på station 1. A: Udtaget med piston corer. B: Udtaget med gravity corer.



Figur 2.5. Total P i sedimentet på stationerne 2-5.



Den kemiske ekstraktion af sedimentets forskellige P-former kan tolkes sådan, at der er en betydelig pulje af mobilt P i hele sedimentets dybde, og at man derfor også skal forvente, at der kan frigives fosfor fra en "ny" sedimentoverflade, som ville blive blotlagt ved bortgravning af det øverste lag. At koncentrationen er konstant under 10 cm betyder, at P, som er begravet under denne dybde, ikke bliver mobiliseret yderligere, så længe forholdene er konstante. Hvis lagene bliver blotlagt ved afgravning, kan der forventes en fornyet nedbrydning af organisk bundet P fra den nye sedimentoverflade, som mobiliserer fosfor. Laboratorieeksperimentet omtalt nedenunder (afsnit 2.3) er udført for netop at belyse, hvor stor en frigivelse der kan forventes efter bortgravning af 40 cm sammenlignet med den nuværende sedimentoverflade.

2.3 P-frigivelse ved simuleret fjernelse af de øverste 40 cm af sedimentet

Ved prøvetagningen på station 1 blev der udtaget ekstra sedimentkerner for at kunne lave et laboratorieforsøg, som skulle belyse effekten af sedimentfjernelse på P-frigivelsen fra sedimentet til søvandet. Forsøget blev gennemført af biologistuderende Jacob Rysberg Nielsen som led i hans bachelorprojekt.

Forsøget bestod i, at de øverste 40 cm af sedimentet blev fjernet, og frigivelsen af fosfat fra den "nye" sedimentoverflade blev herefter sammenlignet med frigivelsen fra den eksisterende sedimentoverflade. Der blev gennemført forsøg med fem sedimentkerner (replikater) fra hver type sedimentoverflade. Over sedimentet var der iltet søvand, som blev skiftet hver 14. dag og temperaturen var 16 grader og dermed repræsentativ for de fem måneder fra maj til og med september. Forsøget løb i 70 dage, og resultaterne er opgjort i tabel 2.1.

Den første del af forsøget blev gennemført med en fosfatkoncentration på 210-270 µg P/l i det ovenstående vand, og denne koncentration er repræsentativ for sensommeren, hvor planteplanktonet er stærkt kvælstofbegrænset. Den anden del af forsøget blev gennemført med en fosfatkoncentration på 22 µg P/l, hvilket repræsenterer forholdene i søen efter standsning af den interne P-belastning.

Tabel 2.1. Bruttofrigivelse af fosfat til det ovenstående vand fra den eksisterende sedimentoverflade (REF) og fra en ny blotlagt overflade efter fjernelse af 40 cm topsediment (NY) målt ved to forskellige fosfatkoncentrationer i det ovenstående vand. Standardafvigelse er angivet i parentes.

Fosfat i ovenstående vand (µg/l)	REF (mg P/m ² /d)	NY (mg P/m ² /d)
210-270	2,0 (+/- 1,35)	0,08 (+/- 0,6)
22	22 (+/- 10,2)	1,63 (+/- 0,53)

Laboratorieforsøgene viste en meget stor frigivelse af fosfor fra den nuværende sedimentoverflade, hvilket understreger sedimentets nuværende rolle som fosforkilde. Ved begge koncentrationer i det ovenstående vand viste forsøget, at den nye blotlagte sedimentoverflade havde en P-frigivelsesrate, som kun var 4-7 % af den, som måltes fra den nuværende sedimentoverflade. Selvom der må tages det forbehold, at forsøget kun kørte i 70 dage, samt at den nye blotlagte sedimentoverflade rent biologisk ikke har opnået en ny ligevægtstilstand og heller ikke modtager nysedimenteret materiale, så antyder resultaterne, at der kan opnås en markant reduktion i den interne P-belastning ved sedimentfjernelse. Reduktionen i P-frigivelse er væsentlig

større end den forskel, der er i puljestørrelserne af mobilt P i hhv. gammel og ny sedimentoverflade (tabel 2.2). Dette tyder på, at den mobile P-pulje i de dybere sedimentlag ikke frigives lige så hurtigt som den mobile pulje i overfladesedimentet. Da koncentrationerne af total P er næsten konstante i sedimentlagene under 20 cm antages det, at effekten af bortgravning kan opnås allerede ved fjernelse af 20 cm sediment.

Hvis det antages, at raterne målt ved $22 \mu\text{g P/l}$ i de ovenstående vand re-præsenterer potentialet for P-frigivelse fra sedimentet, så svarer raterne til hhv. frigivelse af 396 kg P (uden sedimentfjernelse) og 29,3 kg P (efter sedimentfjernelse) i en 150 dages sommerperiode. Det første tal har en størrelsesorden, som passer med nettotabet af P fra søen (216 kg), når det tages i betragtning, at en del P vil nå at sedimentere igen, før vandet strømmer ud af søen. Det andet tal er ca. to gange større end den eksterne P-belastning (17,7 kg) og indikerer, at sedimentet også efter bortgravningen af mindst 20 cm vil påvirke P-indholdet i søvandet i betydelig om end væsentlig mindre grad, end den eksisterende sedimentoverflade gør nu.

Hvorvidt Ormstrup Sø efter sedimentfjernelse kan opnå en TP-koncentration i søvandet, som kan føre til målopfyldelse inden for en årrække, kan vurderes på baggrund af Flindt m.fl. (2015), hvor en generel massebalancemodel inddrager størrelsen af P-frigivelsen fra sedimentet beregnet på basis af erfaringer fra ca. 30 danske søer. I tabel 12 i Flindt m.fl. (2015) vælges den type-sø, som har en gennemsnitsdybde på 2,0 m og opholdstid på 140 dage. Indløbskoncentration P_1 sættes til $0,050 \text{ mg/l}$, hvilket er tæt på de $0,055 \text{ mg P/l}$, som er beregnet for Ormstrup Sø. Uden sedimentfjernelse indeholder overfladesedimentet (0-10 cm) $26,2 \text{ g P/m}^2$ (tabel 2.2), så der kan sammenlignes med den type-sø, som indeholder 30 g P/m^2 . Her ses det, at søvandets TP stadigvæk er $0,190 \text{ mg P/l}$ efter 20 år, og det ses også, at gevinsten ved at sænke den eksterne tilførsel til $0,020 \text{ mg P/l}$ er forsvindende lille. Efter en sedimentfjernelse indeholder de øverste 10 cm sediment stadigvæk $21,1 \text{ g P/m}^2$, og det ændrer ikke meget på indsvingningstiden. Selv hvis man på baggrund af udvekslingsforsøget, som viste, at den nye sedimentoverflade var meget inaktiv i forhold til puljestørrelsen, kun antager et P-indhold på 10 g P/m^2 i modelkørslen tager det stadigvæk 18 år, før TP i søvandet når under $0,080 \text{ mg P/l}$. Dette indikerer, at sedimentfjernelse alene ikke kan føre til målopfyldelse inden for en til to vandplansperioder.

2.4 Beregning af doseringsmængder af aluminium og Phoslock

Det molære forhold mellem Fe og P (Fe:P -forholdet) er meget lavt i overfladesedimentet (2,1- 3,7) og stiger en smule med dybden på alle stationer (4,7-7,9) (tabel 2.2). Forholdet mellem oxideret Fe og Fe-bundet P skal være større end 10-12, for at der er overskud af fosfat-adsorptionskapacitet, hvilket er nødvendigt, for at sedimentoverfladen kan tilbageholde fosfat fra porevandet. Det betyder, at der kan forventes en frigivelse af P fra en "ny" blotlagt sedimentoverflade, og at den interne P-belastning ikke kan standes alene ved bortgravning af overfladesedimentet, om end den kan mindskes betydeligt.

Puljestørrelsen af mobilt P i de øverste 10 cm af sedimentet kræver en tilsætning af omkring 200 g Al/m^2 , før sedimentets P-frigivelse standses (tabel 2.2). En sådan tilsætning er ikke mulig pga. søens forholdsvis lave alkalinitet på 1,4 mekv./l. Det er kun muligt at tilsætte 25 g Al/m^2 ved brug af den bufrede Pax XL60. Man skal derfor enten lave en tilsætning, som bufres med f.eks. Ca(OH)_2 eller anvende et produkt som Phoslock, som ikke påvirker al-

kaliniteten. Phoslock skal doseres i forholdet 100:1 (g/g) i forhold til den mobile P-pulje, og produktet er ca. 5 gange dyrere end aluminium.

Produktomkostningerne ved brug af Phoslock betyder, at sedimentfjernelse kan blive en økonomisk konkurrencedygtig løsning, specielt da resultaterne viser, at det er nok at bortgrave ca. 20 cm for at kunne mere end halvere doseringen af Phoslock eller aluminium.

Sedimentfjernelse kan dog ikke stå alene, men bør suppleres med en fosforfældning bl.a. for at fælde den store P-pulje, som er i søvandet. Det er derfor også beregnet, hvor meget aluminium der skal bruges for at binde al mobilt P i 20-30 cm's dybde – den overflade, som blotlægges ved bortgravning af 20 cm over hele søen. Den beregnede Al-dosis er dog stadigvæk væsentlig større (omkring 70 g/m²) end den mængde, som søvandet kan bufre (25 g/m²).

Tabel 2.2. Sedimentets puljer af total P og mobilt P samt Fe:P forholdet i dybderne 0-10 cm og 20-30 cm på de fem stationer. På station 1 er den mobile P pulje estimeret ved fosforfraktionering. På stationerne 2-5 er den mobile P-pulje i 0-10 cm modelberegnet ud fra total P. Det samme gælder for dybdeintervallet 20-30 cm, men her er yderligere korrigeret for den fejl, som modelberegningen giver ved sammenligning af målt og beregnet mobilt P på station 1. Desuden er der lavet en beregning af den mængde aluminium, som kræves for at binde den mobile P-pulje. Der regnes med et molært forhold mellem Al og P på 10:1.

	Total P g/m ²	Mobil P g/m ²	Al dosis g/m ²	Fe:P mol:mol	Total P g/m ²	Mobil P g/m ²	Al dosis g/m ²	Fe:P mol:mol
Station	0-10 cm	0-10 cm		0-10 cm	20-30 cm	20-30 cm		20-30 cm
1	22,0	15,5	178	3,0	22,9	7,6	87	5,3
2	33,9	18,4	212	3,5	19,4	5,7	66	5,0
3	21,9	15,7	181	2,5	22,5	7,9	91	4,4
4	33,1	24,8	285	2,1	22,4	4,8	55	4,7
5	19,9	9,5	109	3,7	18,2	4,2	48	3,8
gennemsnit	26,2	16,8	193	3,0	21,1	6,0	70	4,9

2.5 Omkostninger ved dosering af aluminium og Phoslock

Aluminium

Antages de fire-fem undersøgte stationer at repræsentere de gennemsnitlige forhold i hele søen, skal der til hele søen skønsmæssigt doseres i alt omkring 23 tons aluminium for at kunne binde den nuværende pulje af mobilt fosfor i de øverste 10 cm af sedimentet. Som nævnt er en dosering i denne størrelsesorden ikke muligt uden at påvirke søens pH-værdi for meget, og det vil være nødvendigt at supplere med tilsætning af fx. Ca(OH)₂. Hvis der først foretages en bortgravning af de øverste 20 cm sediment, skal der anvendes omkring 9 tons aluminium.

I Søndergaard m.fl. (2015) er de anslåede omkostninger for en 30 ha sø med en mobil fosforpulje på 5,75 g P/m² søbund angivet at koste 609.000 kr. for en engangsbehandling med aluminium. Overføres disse værdier til Ormstrup Sø (2,5 gange mindre areal og 2,9 gange mere mobilt fosfor pr m²) bliver den anslåede pris ved dosering af aluminium på omkring 0,71 mio. kr. for den nuværende sedimentoverflade. Hvis de øverste 20 cm sediment først fjernes, bliver den anslåede pris for aluminiumstilsætning 400.000 kr. Dertil skal i begge tilfælde lægges en ekstra udgift (ca. 25 % prisforøgelse) til udbringning af kalk for at undgå en for stor pH-sænkning i forbindelse med udbringningen. Hvis man i kombination med sedimentfjernelse vælger at

udbringe den mængde aluminium, som søen kan klare uden tilsætning af buffer (25 g Al/m²), vil prisen skønsomt blive 250.000 kr.

Phoslock

Ved anvendelse af Phoslock i stedet for aluminium er priserne fire-fem gange højere, dvs. en anslået udgift på omkring 4 mio. kr. for den nuværende sedimentoverflade og omkring 2 mio. kroner, hvis de øverste 20 cm af sedimentet først fjernes.

3 Mulige restaureringsmetoder og deres anvendelse i Ormstrup Sø

3.1 Sedimentfjernelse

Muligheden for at fjerne sedimentet er tidligere beskrevet i Envidan (2014). Her blev der regnet på et forslag, der lagde op til at fjerne de øverste ca. 0,5 m sediment, svarende til ca. 60.000 m³. De nye undersøgelser af sedimentet viser, at de største mobile puljer findes i de øverste 10 cm over næsten hele søfladen. Hvis der alene fokuseres på at fjerne denne del (og det er teknisk muligt at fjerne de øverste 20 cm sediment alene), svarer dette til 24.000 m³.

De nye sedimentundersøgelser viser imidlertid også, at de dybere sedimentlag indeholder betydelige mængder af mobilt fosfor og samtidigt har et lavt Fe:P forhold. Dette betyder, at en ny sedimentoverflade, som ville eksponeres ved en sedimentfjernelse, helt ned til de undersøgte 90 cm's dybde, stadigvæk ville indeholde en betydelig mobil fosforpulje og samtidigt have en lav kapacitet til at tilbageholde fosfor. Laboratorieforsøg viste således også, at der stadigvæk sker en frigivelse fra en ny sedimentoverflade, hvis de øverste 20 cm sediment fjernes.

3.2 Fosforbinding ved tilsætning af aluminium eller Phoslock

En relativ stor pulje af mobilt fosfor – især i de øverste 10-20 cm af sedimentet sammenholdt med en relativ lav alkalinitet i Ormstrup Sø, som sætter en begrænsning for hvor meget aluminium, der kan tilsættes, betyder, at aluminiumstilsætning ikke er mulig, uden at der samtidig tilsættes Ca(OH)₂ som buffer. Dette vil fordyre behandlingen med ca. 25 %.

Tilsætning af Phoslock påvirker ikke alkaliniteten og kan anvendes som et alternativt middel til fosforfældning, men det vil være 4-5 gange så dyrt som aluminiumbehandling.

3.3 Opfiskning af fredfisk

Den seneste fiskeundersøgelse er fra 2010 og viser en dominans af skaller, men også en pæn bestand af aborre. Både for skalle og aborre domineres bestanden af fisk over 10 cm. Biomasse-mæssigt udgør skallerne 59 % af den samlede fiskebestand og derved meget tæt på den grænse på 60 %, hvorover det vurderes relevant at anvende biomanipulation som en restaureringsmetode (Søndergaard m.fl., 2015). Det er derfor sandsynligt at en opfiskning af skaller også ville kunne have en positiv effekt på vandkvaliteten, men den store interne fosforfrigivelse taget i betragtning er det tvivlsomt om en opfiskning alene ville kunne skabe længerevarende klarvandede forhold.

3.4 Restaureringsmuligheder og priser

En oversigt over de forskellige restaureringsmuligheder og deres anslåede omkostninger er vist i tabel 3.1.

Alle metoderne har deres begrænsninger:

- sedimentfjernelse, fordi der er mobile fosforpuljer også i de dybe sedimentlag.

- aluminiumstilsætning, fordi den relative lave alkalinitet i søen ikke tillader tilsætning af tilstrækkelig store mængder aluminium til at immobilisere den mobile P-pulje.
- tilsætning af Phoslock, fordi det er en forholdsvis dyr P-fixeringsmetode sammenlignet med aluminiumstilsætning.
- opfiskning, fordi søen allerede har en rimelig pæn aborrebestand og formentlig ikke kan hindre en fortsat stor intern fosforfrigivelse.

Tabel 3.1. Oversigt over de forskellige restaureringsmuligheder af Ormstrup Sø samt et overslag over deres omkostninger. *) Alle priser er overslag med udgangspunkt i Søndergaard m.fl. (2015) og kræver mere præcise stedspecifikke beregninger.

Løsningsforslag	Bemærkninger	Pris* (mio. kr)
1. Sedimentfjernelse øverste 20 cm	Vil fjerne den største pulje af mobilt fosfor, men den nye sedimentoverflade vil stadigvæk kunne frigive fosfor og have en ringe evne til at binde fosfor.	2,4-5*
2. Sedimentfjernelse øverste 20 cm + Al-tilsætning (75 g Al m ⁻²)	Kræver tilsætning af buffer for at undgå for lav pH.	2,9-5,5
3. Sedimentfjernelse øverste 20 cm + Phoslock		4,2-6,8
4. Aluminiumstilsætning	Kræver tilsætning af buffer for at undgå for lav pH.	0,9
5. Phoslock-tilsætning		4
6. Opfiskning	Kan formentlig ikke give varige effekter pga. en stor intern fosforfrigivelse og lavt Fe:P forhold i sedimentet. I forvejen en pæn aborrebestand, så søen ligger på grænsen af, hvor biomanipulation anbefales.	0,12-0,24
7. Sedimentfjernelse øverste 20 cm + lav Al-tilsætning (25 g Al m ⁻²)	Vil sikre klart vand i nogle år og måske også langvarigt, men det kan blive nødvendigt at gentage Al-tilsætningen 1-2 gange over en 10 årig periode.	2,75-5,25

*) Prisintervallet dækker over variation i priser på sedimentfjernelse plus deponering.

3.5 Kombination af metoder

Der er mulighed for at kombinere flere af de omtalte metoder til restaurering af Ormstrup Sø. Således ville en sedimentfjernelse med fordel kunne kombineres med en fosforfiksering ved anvendelse af enten aluminium eller Phoslock. Dette kunne sikre både en umiddelbar og mere langvarig effekt af en restaurering. Et hollandsk forsøg udført i indhegninger viste netop, at der blev opnået en bedre effekt ved at kombinere sedimentfjernelse med en Phoslockbehandling, sammenlignet med sedimentfjernelse eller Phoslockbehandling alene (Lürling & Fassen, 2012).

I kombination med fosforfiksering og/eller sedimentfjernelse vil en opfiskning af skaller formentlig også bidrage positivt til at skabe mere stabile klarvandede forhold. Dette ville øge mulighederne for at undervandsplanter kunne etableres, så der også via ændret trofisk struktur kan skabes mere stabilt klarvandede forhold.

4 Sammenfatning og konklusioner

4.1 Søens nuværende tilstand

De seneste data fra Ormstrup Sø (2010) viser, at den er meget næringsrig – især hvad angår indholdet af fosfor og med høje koncentrationer af klorofyll a og uklart vand.

De meget høje koncentrationer fosfor i Ormstrup Sø (heraf en stor del som opløst fosfat) og lave koncentrationer af kvælstof, som giver et TN:TP forhold på to eller derunder, tyder klart på, at søens planteplankton under de nuværende næringsstofforhold er kvælstofbegrænset.

Meget høje koncentrationer af fosfor i søen på trods af en forholdsvis lille fosfortilførsel betyder, at der må ske en meget stor fosforfrigivelse fra søbunden. Dette bliver understøttet af laboratorieforsøg. Denne interne fosfortilførsel aftager kun langsomt, fordi søen kun langsomt gennemstrømmes med vand, og næringsrigt vand derfor kun langsomt forlader søen. Det er estimeret, at der netto løber ca. 200 kg P ud af søen om året, og med en mobil fosforpulje i de øverste 10 cm på omkring 2 tons og en langsomt aftagende fosforfrigivelse, vil det tage mere end 10 år, før denne mobile pulje er udtømt.

Sedimentundersøgelserne peger på en ret ensartet fordeling af fosfor i søen, dog med det mest bløde sedimentlag i de dybeste, østlige dele af søen og de højeste overfladekoncentrationer af fosfor i de midterste og nordvestlige dele. Høje koncentrationer af mobilt fosfor findes især i de øverste 10 cm af sedimentet, men der er stadigvæk betydelige mængder mobilt fosfor og et lavt Fe:TP-forhold i de dybere sedimentlag.

4.2 Søens restaurering

Sedimentfjernelse af de øverste 10-20 cm sediment vil reducere overfladens mobile fosforpulje, men den nye sedimentoverflade vil stadigvæk kunne frigive fosfor, om end raten vil blive væsentlig reduceret i forhold til den nuværende sedimentoverflade. En betydelig mobil pulje og lavt Fe:P forhold også i dybere sedimentlag betyder, at det vil være vanskeligt at fjerne tilstrækkelige mængder af de øvre sedimentlag til, at der kan etableres en ny sedimentoverflade med en god fosforbindingskapacitet. Laboratorieforsøg indikerer dog, at der vil være en betydelig mindre frigivelse af fosfor, hvis det øverste af sedimentet fjernes.

Fosforfiksering kan gennemføres ved anvendelsen af enten aluminium eller Phoslock. Aluminium er det billigste produkt at anvende, men virker ved tilsætningen til gengæld forsurende, hvilket kræver, at søen har en god bufferkapacitet (højt kalkindhold/høj alkalinitet). Ormstrup har en forholdsvis lav alkalinitet, hvilket betyder, at det er begrænset, hvor meget aluminium, der kan tilsættes, uden at søens pH falder så meget, at aluminium bliver toksisk. Tilsætning af aluminium i mængder, der kan fikserer den mobile fosforpulje, vil derfor samtidigt kræve, at der tilsættes en buffer, der kan forhindre, at pH bliver for lav.

Den seneste fiskeundersøgelse (2010) viste at Ormstrup Sø har en fiskebestand domineret af skaller, men med en betydelig andel af aborre. Biomani-pulation ved opfiskning af skaller vil formentlig ikke alene være tilstrække-

lig til at fastholde søen i en klarvandet tilstand, fordi potentialet for en stor intern fosforbelastning stadigvæk vil være til stede.

Søens interne fosforbelastning vurderes stort set at kunne elimineres enten ved fuld fosforbinding med aluminium eller Phoslock (uden sedimentfjernelse) eller ved en kombination af sedimentfjernelse og fosforbinding. Hvis opgørelse af den eksterne fosfortilførsel på knap 20 kg P/år holder, vil dette bringe søen tæt på målopfyldelse. Hvis man vælger aluminium som fosforbindingsmiddel og ingen sedimentfjernelse, skal der dog anvendes en buffer sammen med aluminium, hvilket fordyrer behandlingen. Hvis aluminium anvendes i kombination med sedimentfjernelse, kan man, i stedet for at bruge en buffer, vælge at udbringe aluminium ad tre gange over en periode på 10 år. Herved udbringes der ikke mere aluminium, end søen kan bufre ved hver behandling. Selvom første dosering vil være en underdosering i forhold til den mobile P-pulje, så er der en god chance for, at den vil føre til målopfyldelse i de 2-3 år, der går indtil næste dosering jf. erfaringer fra de danske søer, som er blevet aluminiumbehandlet (Jensen m.fl., 2015). Opfiskning af skidtfisk vil forbedre effekten af alle metoder, idet den øger sandsynligheden for, at planter kan genetablere sig på søbunden.

5 Referencer

Envidan (2014) Rapport/Forslag/Tilbud vedr. Oprensning af sediment fra Ormstrup Sø, 14 pp

Flindt M, Jørgensen C, Jensen HS (2015) Den interne fosforbelastning i danske søer og indsvingningstiden efter reduktion af ekstern fosfortilførsel. Naturstyrelsen. http://naturstyrelsen.dk/media/168843/model_notat_-_intern_belaestning_af_soeer_sdu_d-07102015.pdf

Håkanson L (1986) A sediment penetrometer for *in situ* determination of sediment type and potential bottom dynamics conditions. International Review der gesamter Hydrobiologie 71:851-858

Jensen, HS, Reitzel, K, Egemose, S (2015) Evaluation of aluminum treatment efficiency on water quality and internal phosphorus cycling in six Danish lakes. Hydrobiologia 751:189-199

Lurling M, Faassen EJ (2012) Controlling toxic cyanobacteria: Effects of dredging and phosphorus-binding clay on cyanobacteria and microcystins. Water Research 46:1447-145.

Naturstyrelsen (2014) Anvendelse af modelværktøjer til vurdering af målbelastning for søer i vandområdeplaner 2015-2021. Notat fra Naturstyrelsen: <http://naturstyrelsen.dk/vandmiljoe/vandplaner/vandomraadeplaner-2015-2021/supplerende-oplysninger/>

Orbicon (2015) Ormstrup Sø, tilførsel af vand og fosfor. Notat, 10 pp

Søndergaard M, Jeppesen E, Aaser HF (2000) *Neomysis integer* in a shallow hypertrophic brackish lake: Distribution and predation by three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus*). Hydrobiologia 428:151-159.

Søndergaard M, Lauridsen TL, Jensen H, Egemose S, Reitzel K (2015) Vejledning for gennemførelse af sørestaurering. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, nr. 149, 42 pp

Trolle D, Søndergaard, M, Bjerring, R (2015) Sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og søkoncentrationer i danske søer. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, nr. 138

Viborg kommune (2014) http://kommune.viborg.dk/Borger/Natur,-miljoe-og-affald/Soer-og-vandloeb/Soer/Ormstrup_soe

FORUNDERSØGELSE AF ORMSTRUP SØ

Rapporten beskriver en forundersøgelse af Ormstrup Sø med henblik på at vurdere forskellige restaureringsmuligheder. Søen er meget næringsrig med en stor intern fosforfrigivelse fra sedimentet. Den interne fosforfrigivelse kan reduceres betydeligt ved at bortgrave det øverste sediment, men der er stadigvæk mobile puljer af fosfor i de dybere dele af sedimentet. Behandling med aluminium vil kræve at der bufres med f.eks. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ på grund af søens forholdsvis lave alkalitet.