

Viborg Kommune

Restaurering af Rødding Sø og Loldrup Sø

UNDERSØGELSE AF MULIGHEDERNE FOR SØRESTAURERING VED KEMISK FOSFORFÆLDNING I RØDDING SØ OG LOLDRUP SØ

Viborg Kommune

Restaurering af Rødding Sø og Loldrup Sø

UNDERSØGELSE AF MULIGHEDERNE FOR SØRESTAURERING VED KEMISK FOSFORFÆLDNING I RØDDING SØ OG LOLDRUP SØ

Rekvirent	Viborg Kommune
Rådgiver	Orbicon A/S Jens Juuls Vej 16 8260 Viby J
Projektnummer	1321800098
Projektleder	Henrik Skovgaard
Tekst	Henrik Skovgaard og Thomas Aabling
Kvalitetssikring	Maren Moltke Lyngsgaard
Revisionsnr.	0.1
Godkendt af	Rasmus Bang
Udgivet	03-04-2019

INDHOLDSFORTEGNELSE

1. INDLEDNING 5

2. BESKRIVELSE AF SØERNE 6

3. MÅLSÆTNING OG INDSATSPROGRAM 10

3.1. Målsætninger i Vandområdeplanen 10

3.2. Indsatsprogram 11

3.2.1 Viborg Nørresø 11

3.2.2 Loldrup Sø 12

3.2.3 Rødding Sø 13

4. MILJØTILSTAND I SØERNE 15

4.1. Loldrup Sø 15

4.1.1 Temperatur og ilt 15

4.1.2 Vandkemiske forhold 16

4.2. Rødding Sø 23

4.2.1 Temperatur og ilt 24

4.2.2 Vandkemiske forhold 24

5. FOSFORTRANSPORT OG –BALANCE I NØRREMØLLE Å 33

5.1. Loldrup Sø 35

5.2. Rødding Sø 36

6. FOSFORPULJE I SEDIMENTET 38

6.1. Loldrup Sø 38

6.1.1 Sedimentkarakteristik 39

6.1.2 Mobil fosforpulje i sedimentet 43

6.1.3 Alternative beregninger af den interne belastning 45

6.1.4 Samlet vurdering af den mobile fosforpulje i sedimentet og aflastning til Viborg Nørresø 46

6.2. Rødding Sø 47

6.2.1 Sedimentkarakteristik 48

6.2.2 Mobil fosforpulje i sedimentet 51

7. MULIGHEDER FOR SØRESTAURERING VED KEMISK FOSFORFÆLDNING 54

7.1. Konklusion vedrørende egnethed til kemisk fosforfældning 56

8. PERSPEKTIVERING OG INDSATSMULIGHEDER 57

9. REFERENCER 62

10. BILAG 64

10.1. Bilag 1: Belastningsopgørelse for Loldrup Sø (Miljøstyrelsen, 2017) 64

1. INDLEDNING

Statusrapporten om Viborgsøerne fra 2016 og statens Vandområdeplan har fastslået, at miljømålsætningen for Viborgsøerne ikke er opfyldt, og at der derfor skal ske en yderligere indsats overfor fosfortilførslen fra oplandet til Loldrup Sø og Viborg Nørresø (Orbicon, 2016). Den efterfølgende rapport fra 2017 belyste mulighederne for reduktion af fosfortilførslen til søerne fra forureningskilder i søens opland (Orbicon, 2017). En af konklusionerne var, at Rødding Sø og Loldrup Sø bidrager væsentligt til fosfortilførslen til Viborg Nørresø på grund fosforfrigivelse fra søsedimenterne. Rapporten pegede på, at en mulig løsning er kemisk fosforfældning i en eller begge søer, og det har Viborg Kommune ønsket en teknisk undersøgelse og eventuel projektering af med henblik på realisering i foreløbigt Loldrup Sø.

Viborg Kommune og Orbicon har indgået en aftale om at udarbejde nærværende undersøgelsesrapport, som opfylder de tekniske krav i "Vejledning for gennemførelse af sørestaurering" (Søndergaard m.fl. 2015). Undersøgelsen omfatter følgende elementer for både Rødding Sø og Loldrup Sø:

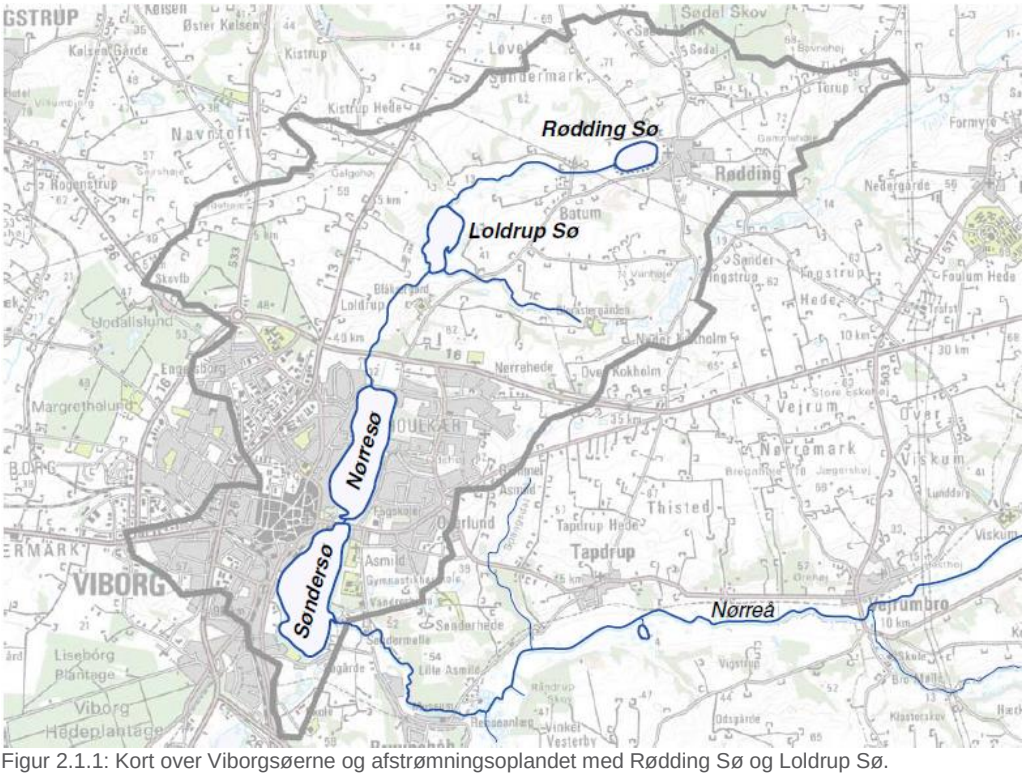
- Opsamling af vandkemiske parametre over tid og prognose for miljøtilstand.
- Vurdering af målopfyldelse nu og på sigt.
- Analyse og vurdering af sedimentdata fra de 3 stationer i hver af søerne. Analyse og vurdering følger vejledningens metode 2 og 3 til bestemmelse af puljen af potentielt mobilt fosfor.
- Vurdering af behov og egnethed til kemisk fosforfældning og begrundet anbefaling af metode.
- Projektering af kemisk fosforfældning i Loldrup Sø.
- Prisoverslag på kemisk fosforfældning i Loldrup Sø.
- Oversigt over regler og nødvendige myndighedsgodkendelser.
- Forslag til efterfølgende monitering.
- Udkast til ansøgning til Miljøstyrelsen om tilladelse efter miljøbeskyttelsesloven.

I undersøgelsen indgår data fra Viborg Kommune, Danmarks Miljøportal og Miljøstyrelsen.

2. BESKRIVELSE AF SØERNE

Viborgsøerne er en del af Gudenåsystemet. Det største tilløb til Viborg Nørresø er Nørremølle Å, hvorefter vandet via Viborg Søndersø løber ud i Søndermølle Å, Figur 2.1.1. Herfra løber vandet videre til Nørreå og ud i Gudenåen for til sidst at ende i Randers Fjord. Opstrøms Viborg Nørresø i Nørremølle Å systemet ligger Loldrup Sø og Rødding Sø. Rødding Sø blev genskabt som sø i 2004, primært for at fjerne næringsstoffer (kvælstof og fosfor) af hensyn til de nedstrøms beliggende søer og kystvande.

Forureningen af Viborgsøerne tog til efter kloakering af Viborg by i begyndelsen af 1900-tallet. I løbet af de seneste 70 år er kloaknettet løbende blevet udbygget, og spildevandsrensningen er væsentligt forbedret. I perioden 1938-78 lå byens renseanlæg ved dæmningen mellem Viborg Nørresø og Viborg Søndersø og havde udledning til Viborg Søndersø. Søerne modtager ikke længere spildevand fra renseanlæg, da Viborg Centralrenseanlæg i Bruunshåb har udledning til Nørreå nedstrøms søerne. Derimod udledes der regnvand (vej- og tagvand) fra separatkloakerede oplande i Viborg til begge søer. Det gælder både regnvand, der udledes via rensedamme, og regnvand, der udledes fra byen uden forudgående rensning. Desuden er der periodisk overløb til søerne af spildevand fra kloaknettet under kraftig nedbør. I 2011 blev der skabt et vådområde ved Nørremølle Enge opstrøms Viborg Nørresø, der har til formål at fjerne næringsstoffer. I dag er den største kilde til tilførsel af fosfor relateret til landbrugsdrift i oplandet, men også frigivelse af fosfor fra søsedimenter i Rødding Sø og Loldrup Sø har betydning.



Figur 2.1.1: Kort over Viborgsøerne og afstrømningsoplandet med Rødding Sø og Loldrup Sø.

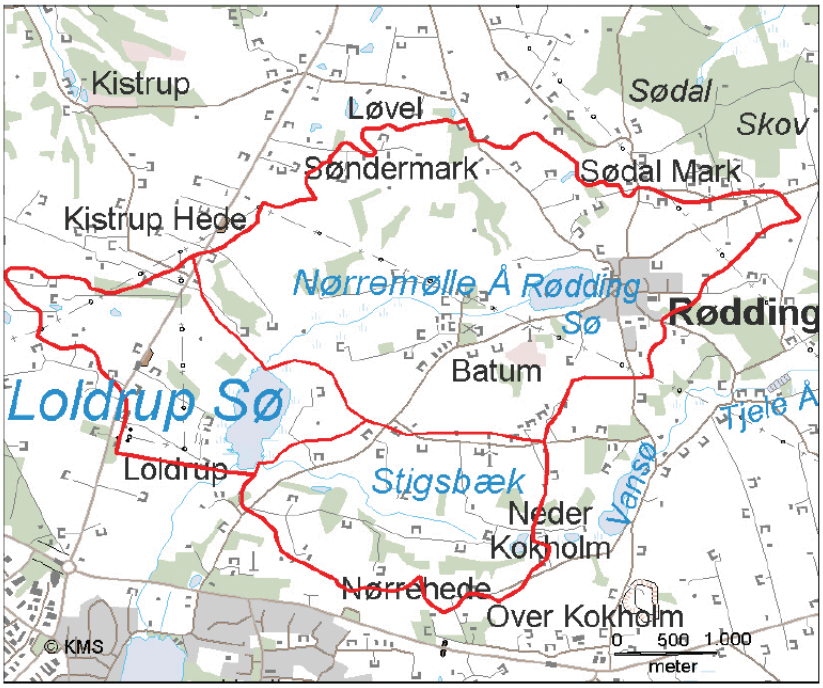
Med et areal på ca. 120 ha hører Viborg Nørresø til blandt de middelstore danske søer. Søen er med en middeldybde på 7 m og en maksimal dybde på 12,4 m karakteriseret som dyb, og der ses hvert år kortere eller længere perioder med temperaturbetinget lagdeling i vandsøjlen, mens dette kun meget kortvarigt finder sted i den lavvandede Viborg Søndersø. Vandets gennemsnitlige opholdstid i Viborg Nørresø er ca. 0,6 år, men varierer fra år til år afhængigt af nedbør og afstrømning fra oplandet. Loldrup Sø og Rødding Sø er henholdsvis 38,9 ha og 21,2 ha, og begge er lavvandede søer med en kort opholdstid (især Loldrup Sø).

	Viborg Nørresø	Loldrup Sø	Rødding Sø
Areal, ha	120,4	38,9 (42,1)*	21,2
Volumen, mio. m^3	8,49	0,44 (0,48)*	0,31
Middeldybde, m	6,9	1,15	1,5
Max dybde, m	12,4	3,3	2,5
Opholdstid, år	0,6	0,08-0,09	0,26
Opland, km^2	36,7	19,3	3,4

Tabel 2.1.1: Areal- og dybdedata samt opland og opholdstid i Viborg Nørresø, Loldrup Sø og Rødding Sø. *Tidligere opmålte data til dybdekortet.

Oplandet til Viborg Nørresø dækker et areal på 36,7 km^2. Jordtypen i oplandet er primært grovsandet jord og lerblandet sandjord med humusjord på de lavtliggende arealer langs Nørremølle Å, Figur 2.1.1. Oplandet består af landbrugsarealer (ca. 60 %), mens ca. 17 % af oplandet til søen består af bymæssig bebyggelse.

Oplandet til Loldrup Sø dækker et areal på 19,3 km^2. Heri indgår oplandet til Rødding Sø på 4,3 km^2, et opland langs Nørremølle Å mellem Rødding Sø og Loldrup Sø, opland til Stigsbæk fra øst samt et opland omkring selve Loldrup Sø, især på vestsiden, Figur 2.1.1. Oplandet består langt overvejende af landbrugsarealer (78 %), Figur 2.1.2.



Beliggenhed		**Søen: Loldrup Sø**	
Kommune(r)	791 Viborg	Søtype	9: Kalkrig, ikke brunvandet, fersk, lavvandet
Hovedopland	1.5 - Randers Fjord		
Delvandopland	1.5.D - Nørreå	Søareal, ha	39
Vandløbssystem	Nørre Å-systemet	Middeldybde, m	1,14
Tilløb	Nørremølle Å, Stigsbæk	Max. dybde, m	3,30
		Volumen m^3	478.639
		Opholdstid, år	0,090
Afløb	Nørremølle Å	**Opland**	
Beskyttelse		Oplandsareal, km^2	19,34
Natura 2000-område		**Arealanvendelse**	
		Landbrugsjord, %	85
		Befæstet/bebygget areal, %	4
EF-habitatområde		Skov, %	5
		Naturarealer, %	0,8
		Ferskvand, %	0,4
EF-fuglebeskyttelsesområde		Andet, %	5
		Ikke opgjort %	
Habitatarter		**Jordbunds-forhold**	
Ramsar område		F1 – grovsand, %	51
Sø-naturtype		F2 – finsand, %	6
		F3 – lerblandet sandjord, %	32
		F4 – sandblandet lerjord, %	
Badevandssø [1)]	Nej	F5 – lerjord, %	
Fredning		F6 – svær lerjord, %	
		F7 – humus, %	5
Natur/vildtreservat		F8 – Kalkrig jord, %	
		FKX – uklassificeret, %	6
[1] Omfattet af EF-badevandsdirektiv			

Figur 2.1.2: Morfometriske data og oplandsdata for Loldrup Sø (By- og Landskabsstyrelsen).



Foto: Rødding Sø



Foto: Loldrup Sø.

3. MÅLSÆTNING OG INDSATSPROGRAM

3.1. Målsætninger i Vandområdeplanen

Loldrup Sø, Viborg Nørresø og Viborg Søndersø er i Vandområdeplan 2015-2021 målsat "god økologisk tilstand", men da tilstanden samlet set er "moderat økologisk tilstand" i Loldrup Sø og Viborg Nørresø er målsætningen ikke opfyldt i nogen af søerne.

I Loldrup Sø er den "moderate økologiske tilstand" baseret på en vurdering af planteplankton og undervandsplanter, og her anvendes klorofyl ikke som selvstændigt kvalitetselement.

Loldrup Sø og Viborg Nørresø er omfattet af undtagelsesbestemmelser i Vandområdeplan 2015-2021 i form af forlængelse af tidsfristen for målopfyldelse til efter 2021 på grund af kemisk og biologisk træghed i søernes respons på indsatsen i oplandet.

Rødding Sø har målsætningen "dårlig økologisk tilstand" svarende til den aktuelle tilstand. Den lave målsætning skyldes, at søen er etableret med henblik på tilbageholdelse af næringsstoffer til nedstrøms beliggende søer og til Randers Fjord. Der er ikke stillet krav om en særskilt fosforindsats, men da Rødding Sø har betydning for miljøtilstanden i Loldrup Sø og Viborg Nørresø, er det alligevel nødvendigt at inddrage muligheden for at reducere søens fosforkoncentration, så der ikke strømmer så meget fosfor med afløbsvandet videre til Loldrup sø.

Ud over målsætningen "god økologisk tilstand" skal Loldrup sø og Viborg Nørresø også opfylde målsætningen om en "god kemisk tilstand", hvor der stilles krav til forekomsten af miljøfarlige forurenende stoffer.

Et vandområde har god kemisk og økologisk tilstand for så vidt angår miljøfarlige stoffer, når de målte stofkoncentrationer ikke overskrider de fastsatte miljøkvalitetskrav. Miljømålet i et vandområde er således opfyldt, når alle de målte stoffer overholder miljøkvalitetskravene. Omvendt vil et vandområde ikke opfylde miljømålet, hvis blot et af de målte miljøfarlige stoffer overskrider et fastsat miljøkvalitetskrav. I Vandområdeplan 2015-2021 er den økologiske tilstand med hensyn til miljøfarlige stoffer og den kemiske tilstand i Viborg Nørresø vurderet "ukendt", fordi der ikke foreligger målinger i vand af de oplistede stoffer for søer eller kviksølvindhold i fisk.

For en nærmere gennemgang af de enkelte søer og deres miljøtilstand og udvikling henvises til Orbicon (2016).

Tabel 3.1.1: Målsætning og tilstand i Viborg Nørresø, Loldrup Sø og Rødding Sø.

	Viborg Nørresø	**Loldrup Sø**	**Rødding Sø**
Areal, ha	120,4	38,9	21,2
Søtype	10 (dyb alkalisk ikke brunvandet sø)	9 (lavvandet alkalisk ikke brunvandet sø)	9 (lavvandet alkalisk ikke brunvandet sø)
Målsætning	**God økologisk og god kemisk tilstand**	**God økologisk og god kemisk tilstand**	**Dårlig økologisk tilstand og god kemisk tilstand (VMP II sø)**
Økologisk tilstand - klorofyl	Moderat	Anvendes ikke	Dårlig
Økologisk tilstand - planteplankton	Ukendt	Moderat	Ukendt
Økologisk tilstand - fisk	Ukendt	Ukendt	Ukendt
Økologisk tilstand - undervandsplanter	Ukendt	Moderat	Ukendt
Økologisk tilstand - miljøfarlige stoffer	Ukendt	Ukendt	Ukendt
Kemisk tilstand	Ukendt	Ukendt	Ukendt
Samlet tilstand	**Moderat**	**Moderat**	**Dårlig**
Målsætning opfyldt?	**Nej**	**Nej**	**Ja**
Krav til fosforkoncentration i sø (sommermiddel) mg P/l	**0,031**	**0,053**	**-**

3.2. Indsatsprogram

3.2.1 Viborg Nørresø

Det ses af Tabel 3 2.1, at den nuværende tilførsel af fosfor til Viborg Nørresø er 1.661 kg P/år baseret på data fra perioden 2010-2014 i Vandområdeplan 2015-2021. Heraf kommer 167 kg P/år fra regnbetingede udledninger, og resten stammer fra det åbne land (landbrug, naturbidrag og spredt bebyggelse) (Miljøstyrelsen, 2017a).

Tilførslen af fosfor i baseline 2021 (allerede planlagte tiltag frem til 2021) er ligeledes 1.661 kg P/år. Med en årlig vandtilførsel på 15,5 mio. m^3/år svarer det til en vandføringsvægtet indløbskoncentration af fosfor på 0,107 mg P/l.

Målbelastningen for fosfor er 869 kg P/år, hvilket giver et samlet indsatsbehov på 793 kg P/år ved målopfyldelse, svarende til, at søen med tiden opnår et sommergennemsnit på 0,031 mg P/l.

Indsatskravet for fosfor skal nås gennem tiltag over for den diffuse tilførsel fra oplandet ved etablering af fosforvådområder. Der er ikke stillet krav om yderligere rensning af spildevand fra renseanlæg, regnbetingede udledninger eller spredt bebyggelse
.

Tabel 3.2.1: Indsatsbehov for tilførsel af fosfor til Viborg Nørresø i Vandområdeplan 2015-2021.

	Vandtilførsel, mio m^3/år	Status, kg P/år	Baseline, kg P/år	Målbelastning, kg P/år	Indsatsbehov, kg P/år*
Vandområdeplan 2015-2021	15,5	1.661	1.661 (i 2021)	869	793

* Inklusiv effekt af indsats i opstrøms liggende søer.

3.2.2 Loldrup Sø

Det ses af Tabel 3.2.2, at den nuværende tilførsel af fosfor til Loldrup Sø er 929 kg P/år i Vandområdeplan 2015-2021 svarende til en indløbskoncentration på 161 µg P/l og en modelberegnet søkoncentration på 198 µg P/l som sommergennemsnit. Heraf kommer 10,4 kg P/år fra regnbetingede udledninger og resten fra det åbne land (landbrug, naturbidrag og spredt bebyggelse) (Miljøstyrelsen, 2017b).

Tilførslen i baseline 2021 (allerede planlagte tiltag frem til 2021) er ligeledes 929 kg P/år.

Målbelastningen for fosfor er 324 kg P/år, hvilket giver et samlet indsatsbehov på 605 kg P/år ved målopfyldelse, hvor fosforkoncentrationen i søvandet som gennemsnit er beregnet til 0,053 mg P/l. Målbelastningen svarer til en vandføringsvægtet indløbskoncentration af fosfor på 56 µg P/l, hvilket er tæt på naturbidraget.

Tabel 3.1.3: Indsatsbehov for tilførsel af fosfor til Loldrup Sø i Vandplan 2009-2015 og Vandområdeplan 2015-2021.

	Vandtilførsel, mio. m^3/år	Status, kg P/år	Baseline, kg P/år	Målbelastning, kg P/år	Indsatsbehov, kg P/år
Vandområdeplan 2015-2021	5,79	929	929 (i 2021)	324	605



Foto: Droneoverflyvning ved nedstrøms del af Nørremølle Å mellem Rødding Sø og Loldrup Sø med Loldrup Sø i baggrunden.

3.2.3 Rødding Sø

Tilførslen af fosfor (nuværende og baseline 2021) til Rødding Sø har staten beregnet til 197,1 kg P/år svarende til en vandføringsvægtet indløbskoncentration på 169 µg P/l, Tabel 3.1.4. Heraf kommer 14,3 kg P/år fra regnbetingede udledninger og resten fra det åbne land (landbrug, naturbidrag og spredt bebyggelse) (Miljøstyrelsen, 2017c).

Med den nuværende tilførsel af fosfor har staten beregnet en søkoncentration af fosfor på 201 µg P/l som sommergennemsnit. Til sammenligning kræver en ”god økologisk tilstand” for lavvandede søer maksimalt 53 µg P/l som sommergennemsnit.

Som tidligere nævnt er der ikke fastsat en målbelastning og et indsatsbehov for Rødding Sø. Tilførslen fra regnbetingede udledninger afviger kun med 2 kg P/år fra Viborg Kommunes oplysninger (12 kg P/år), mens fosfortilførslen fra det åbne land formentlig er overvurderet. Målinger i det største tilløb fra dyrkede arealer øst for Rødding Sø

(station 18) viser således koncentrationer af fosfor på 36 og 90 µg P/l, hvilket er væsentligt lavere end 169 µg P/l. Rødding Sø påvirker tilstanden i Loldrup Sø, og derfor et det et problem, at der i Vandområdeplan 2015-2021 ikke er planlagt en fosforindsats i oplandet til søen og/eller en indsats i selve søen i form af sørestaurering, der kan forbedre tilstanden i Rødding Sø.

Orbicon har modelberegnet en målbelastning på 64 kg P/år, hvis Rødding Sø med statens beregnede vandtilførsel skal opnå en koncentration af fosfor på 53 µg P/l som sommergennemsnit. Indsatsbehovet vil afhænge af, hvor stor den reelle tilførsel til Rødding Sø er. Det kan skønnes ved at anvende gennemsnittet på 112 µg P/l af målinger af fosforindhold i dræn og grøfter fra screeningen for fosforkilder på 16 undersøgte stationer i oplandet til Viborg Nørresø. Ved at multiplicere 112 µg P/l med vandtilførslen til søen fås en tilførsel af fosfor på 130 kg P/år. Hertil lægges et bidrag fra regnbetingede udledninger på 14 kg P/år. Det giver en aktuel tilførsel på 144 kg P/år og dermed et indsatsbehov på 80 kg P/år. Det skal nævnes, at denne opgørelse er behæftet med stor usikkerhed, da der er meget få data til rådighed.

Tabel 3.1.4: Indsatsbehov for tilførsel af fosfor til Rødding Sø.

	Vandtilførsel, mio. m^3/år	Status, kg P/år	Baseline, kg P/år	Målbelastning, kg P/år	Indsatsbehov, kg P/år
Vandområdeplan 2015-2021	1,16	197,1	197,1	64*	-

*: Beregnet af Orbicon på baggrund af sømodeller ved en målsat koncentration af fosfor på 53 µg P/l som sommergennemsnit.

4. MILJØTILSTAND I SØERNE

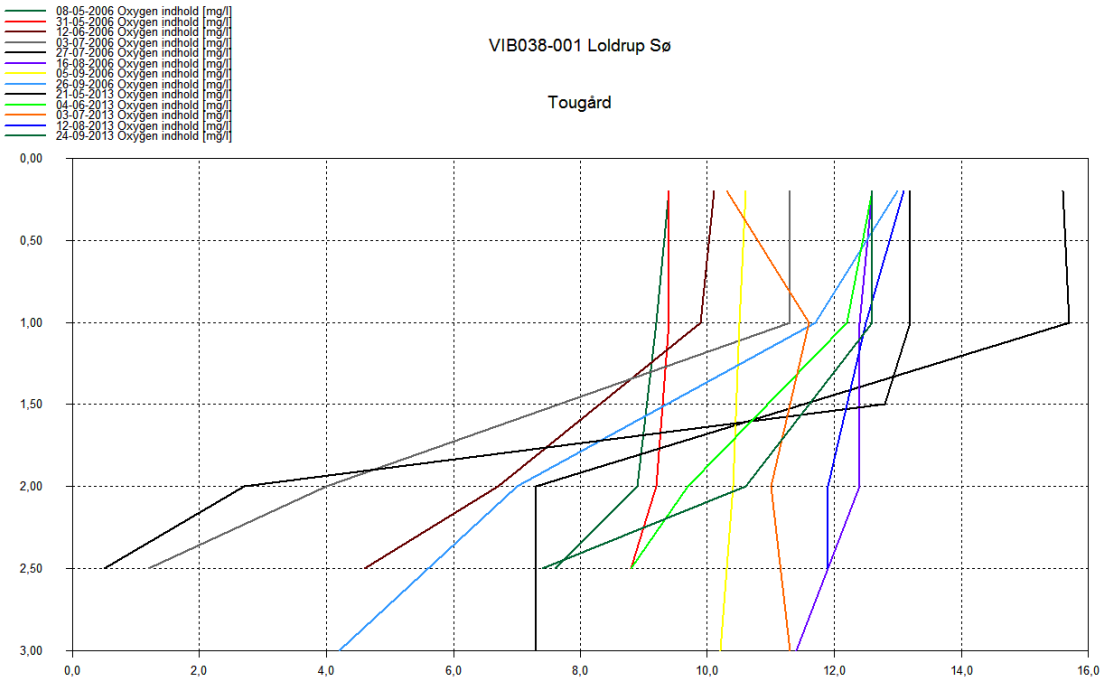
I dette kapitel beskrives status og udvikling i miljøtilstanden i Loldrup Sø og Rødding Sø. Der henvises til rapporten om Viborgsøerne (Orbicon, 2016) for en nærmere beskrivelse af Viborg Nørresø og Søndersø. Der er fokuseret på de væsentligste vandkemiske parametre i tilstandsbeskrivelsen, men i rapporten inddrages også andre parametre i det omfang, de er relevante for vurderingen af søens egnethed til sørestaurering ved kemisk fosforfældning.

4.1. Loldrup Sø

Loldrup Sø er blevet undersøgt siden 1980-erne, først af Viborg Amt og siden 2007 af Miljøstyrelsen som led i den nationale overvågning af vandmiljøet (NOVANA).

4.1.1 Temperatur og ilt

Loldrup Sø er en lavvandet og relativt vindeksponeret sø, hvorfor der aldrig opstår en stabil temperaturlagdeling af vandmasserne om sommeren, og på lavt vand er der normalt gode iltforhold i søen. Som det fremgår af Figur 4.1.1, kan der dog opstå næsten iltfrie forhold i bundvandet på dybder over ca. 2,0 meter om sommeren i forbindelse med varmt og stille vejr. Også ved langvarigt isdække om vinteren kan der opstå iltfrie forhold under isen. Perioder med lave iltkoncentrationer kan foranledige frigivelse af jernbundet fosfor fra sedimentet til søvandet.



Figur 4.1.1: Iltprofil i Loldrup Sø i sommermånederne i årene 2006 og 2013.

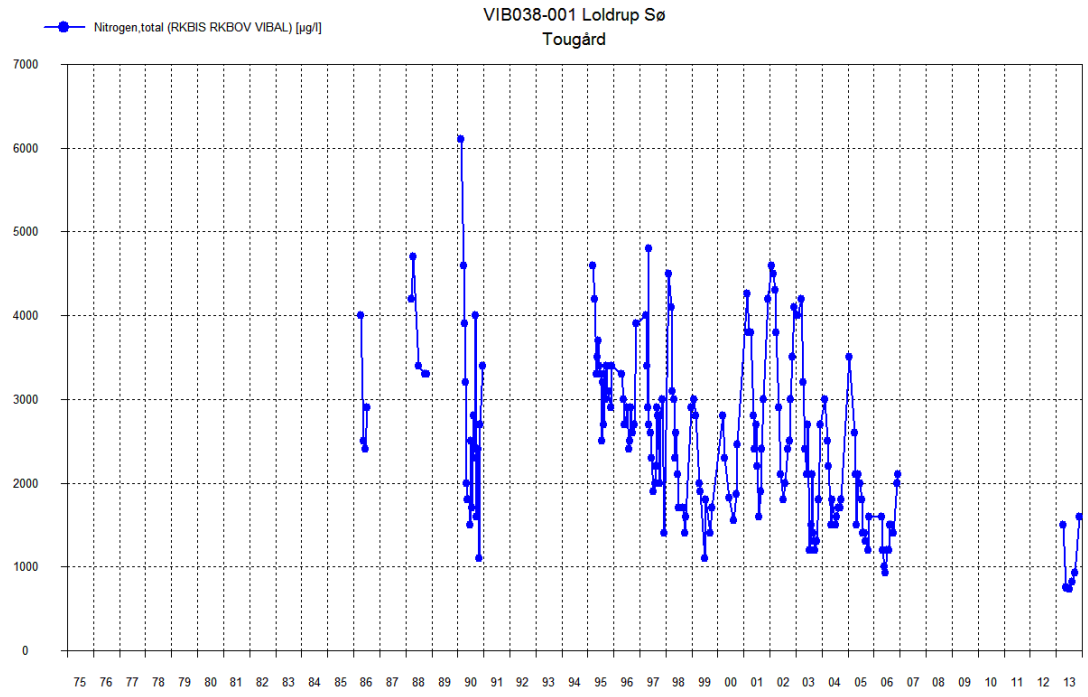
4.1.2 Vandkemiske forhold

I de senere år er der i forbindelse med statens overvågningsprogram (NOVANA) udtaget 5-7 prøver i hvert måleår, typisk med én prøve i hver af de fem sommermåneder (maj-september) og én prøve i henholdsvis forår og efterår. Da Loldrup Sø er en lavvandet sø, er der kun udtaget prøver af overfladevandet. Prøverne udtages på det dybeste sted i søen, der vurderes at repræsentere forholdene i hele søen. Data er hentet fra Danmarks Miljøportal, Stoq-databasen.

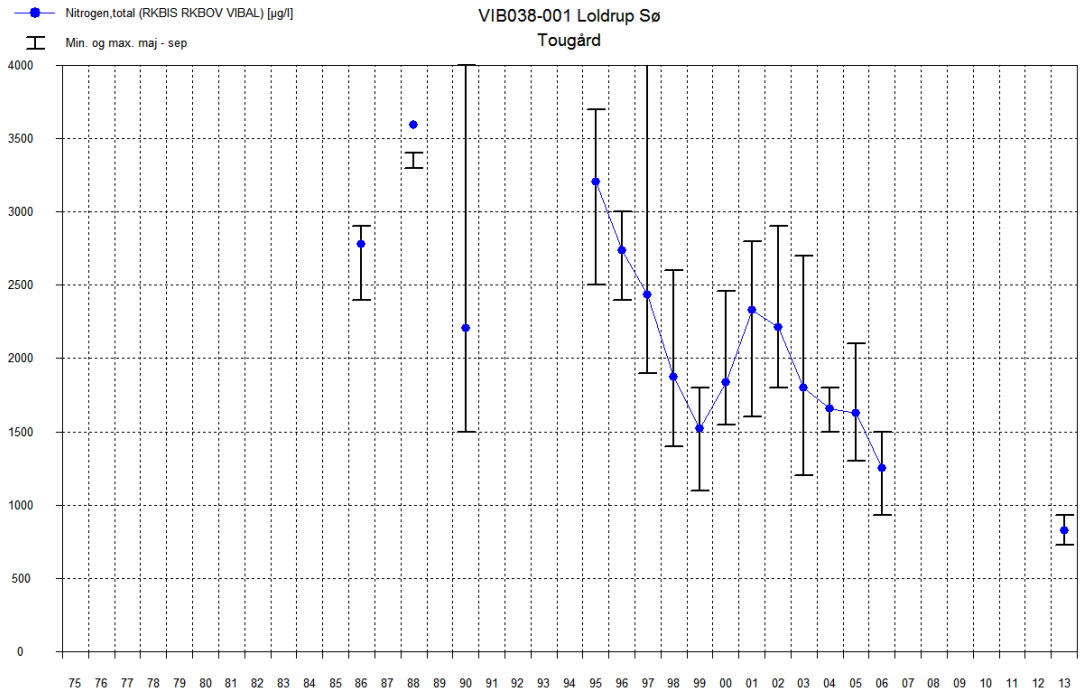
I dette afsnit gennemgås de vigtigste vandkemiske parametre fra undersøgelsesperioden 1986 til 2013.

Figur 4.1.2 viser kvælstofkoncentrationen (total-N) i overfladevandet i de seneste årtier. Generelt er koncentrationen af kvælstof højere end det naturgivne niveau på ca. 0,5 mg N/l på grund af udvaskning af kvælstof fra landbrugsarealer i oplandet. Søen følger det typiske billede for danske søer med et fald i tilførslen af kvælstof siden 1990-erne som følge af vandmiljøplanerne.

Kvælstofkoncentration (total-N) var i 2013 moderat med et sommergennemsnit på ca. 0,83 mg N/l, Figur 4.1.3 og Tabel 4.1.1. Vægtforholdet mellem total-N og total-P (TN:TP) i Loldrup Sø i sommeren 2013 var i gennemsnit 6 og dermed tæt på skæringsværdien 7 (Redfield ratio, dvs. det typiske forhold mellem kvælstof og fosfor i planktonalger). Derfor kan fytoplankton i perioder have været vækstbegrænset af kvælstof, men fosfor vurderes stadig at have størst betydning som regulerende næringsstof for fytoplankton i Loldrup Sø som i de fleste danske søer.



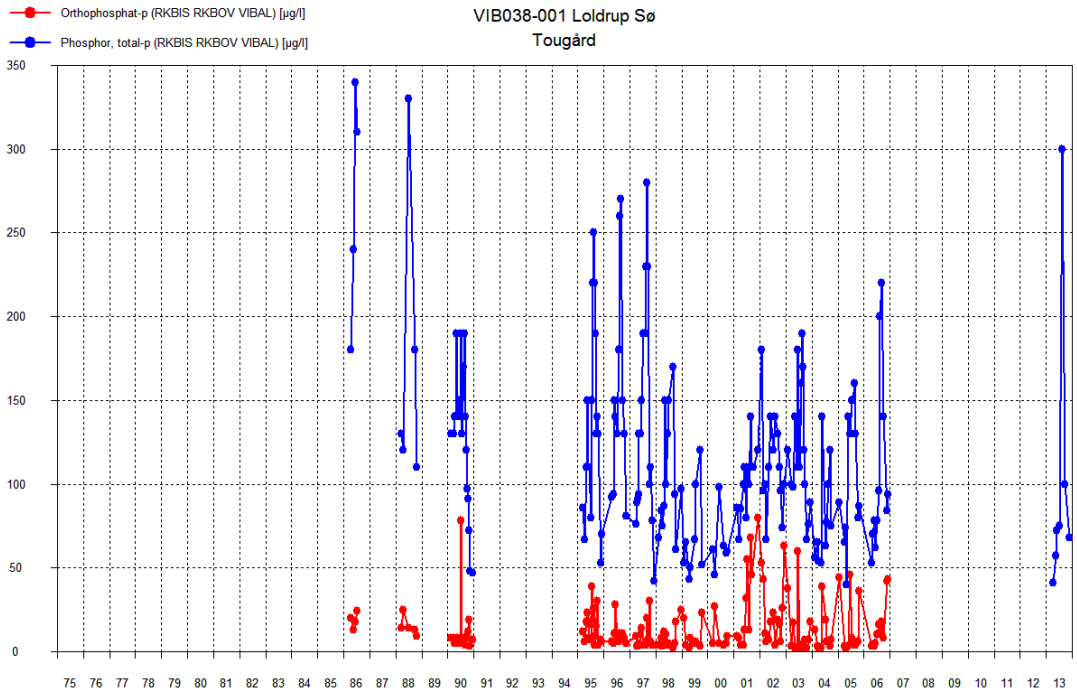
Figur 4.1.2: Kvælstofkoncentrationen (total-N) i Loldrup Sø i perioden 1986-2013.



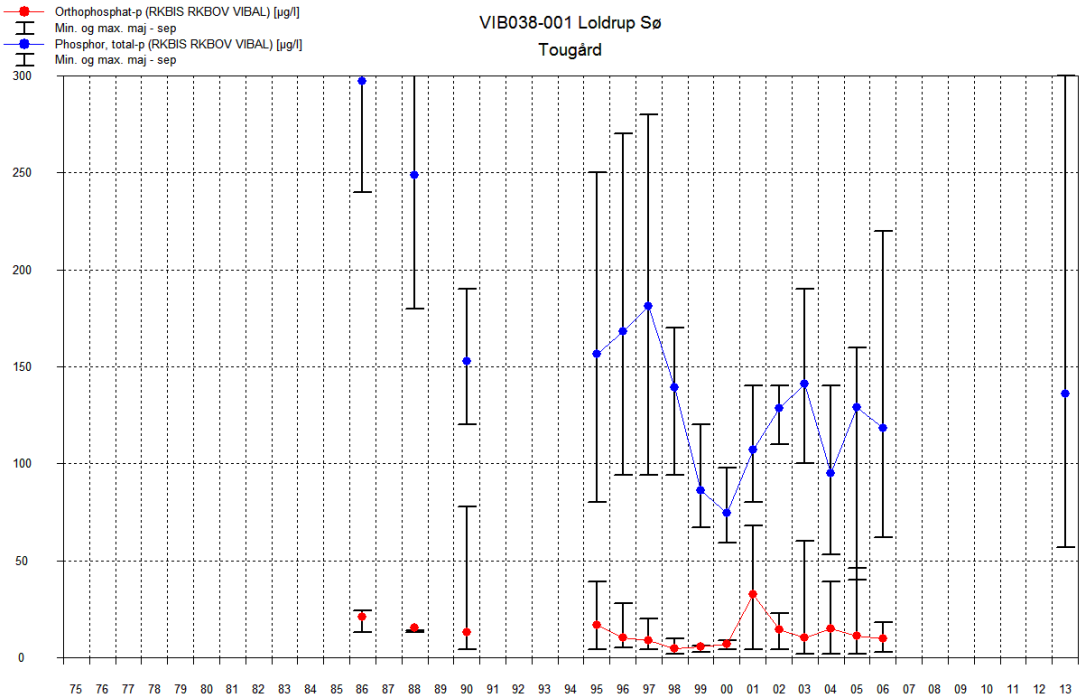
Figur 4.1.3: Kvælstofkoncentrationen (total-N) som sommergennemsnit i Loldrup Sø i perioden 1986-2013.

Figur 4.1.4 viser koncentrationen af fosfor (total-P og ortho-P) i overfladevandet i perioden 1986-2013. Det ses, at der er meget store udsving i fosforkoncentrationen henover året og især om sommeren. Det skyldes, at sedimentet frigiver fosfor, hvilket typisk ses på baggrund af en stigning i koncentrationen af uorganisk fosfor (ortho-P). Frigivelsen skyldes formentlig et lavt redoxpotentiale i de øvre lag af sedimentet kombineret med høje temperaturer, høj pH og stor omsætning af organisk materiale.

Som det fremgår af Figur 4.1.5 og Tabel 4.1.1 havde Loldrup Sø ved den seneste undersøgelse i 2013 en fosforkoncentration på ca. 136 µg P/l som sommergennemsnit. Det er meget højere end de 53 µg P/l som sommergennemsnit, der ifølge Vandområdeplan 2015-2021 er en forudsætning for at opnå "god økologisk tilstand" i søen (Miljøstyrelsen, 2017). Det ses imidlertid, at Loldrup Sø i 2000 var tæt på denne koncentration som følge af positive effekter på søens økosystem efter den daværende sørestaurering ved opfiskning af fredfisk. De nærmere omstændigheder omkring sørestaurering ved opfiskning af fredfisk er beskrevet i rapporten om Viborgsøerne (Orbicon, 2016). De høje fosforkoncentrationer i Loldrup Sø skyldes en kombination af høje indløbskoncentrationer fra oplandet (herunder aflastning af fosfor fra Rødding Sø) og især frigivelse af fosfor fra sedimentet i Loldrup Sø. Frigivelsen af fosfor fra sedimentet sker typisk i de varme sommermåneder, hvor fosforkoncentrationen i sjældne tilfælde kan nå op over 200-300 µg P/l.



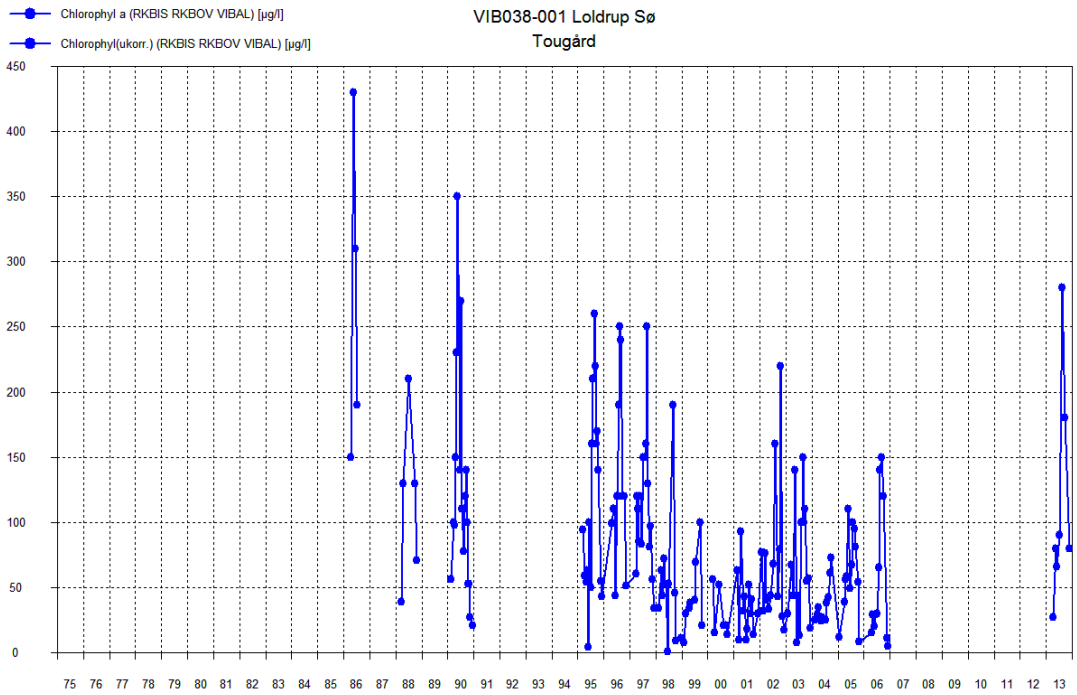
Figur 4.1.4: Fosforkoncentrationen (total-P og ortho-P) i Loldrup Sø i perioden 1986-2013.



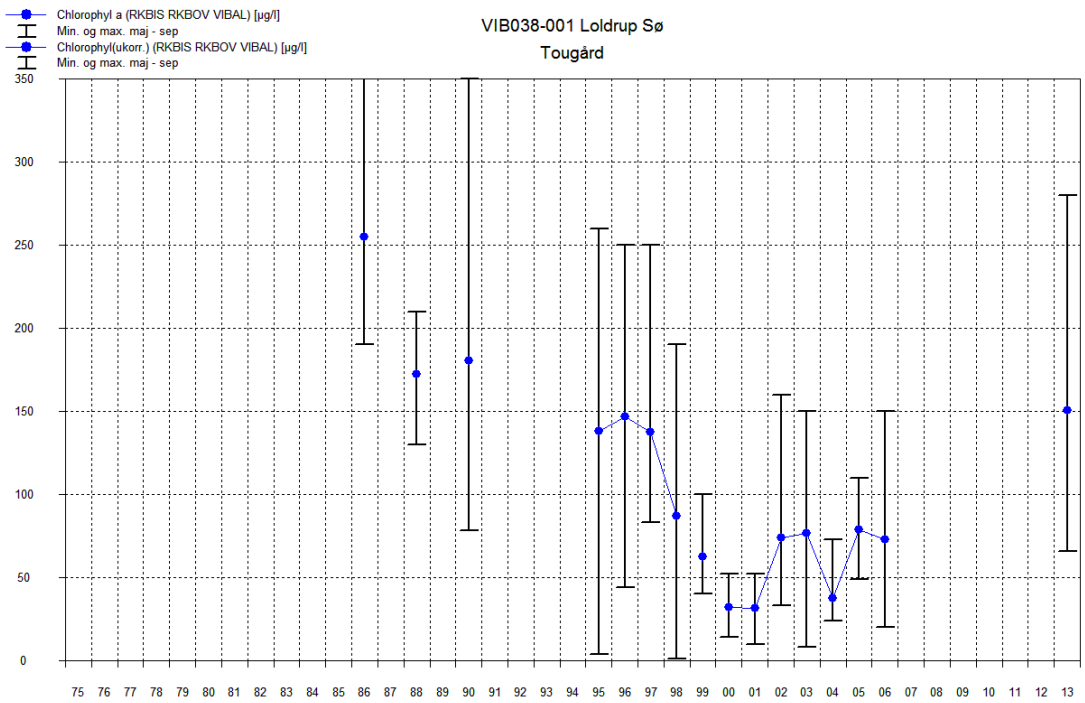
Figur 4.1.5: Fosforkoncentrationen (total-P) i overfladevandet som sommergennemsnit i Loldrup Sø i perioden 1986-2013.

Figur 4.1.6 viser koncentrationen af klorofyl i overfladevandet i perioden 1986 til 2013. Klorofyl er et mål for mængden af planteplankton (alger) i søvandet.

Målingerne viser en betydelig årstidsvariation og år til år variation. De laveste værdier sås i 2000 som tegn på en positiv effekt af opfiskningsprojektet. I 2013 ses en variation henover året fra ca. 25 µg/l til ca. 275 µg/l. Sommergennemsnittet for klorofyl var 151 µg/l i 2013, jf. Figur 4.1.7 og Tabel 4.1.1. I 2013 overholder søen dermed ikke den målsatte værdi i Vandområdeplan 2015-2021 på ca. 25 µg/l for "god økologisk" tilstand i lavvandede søer.



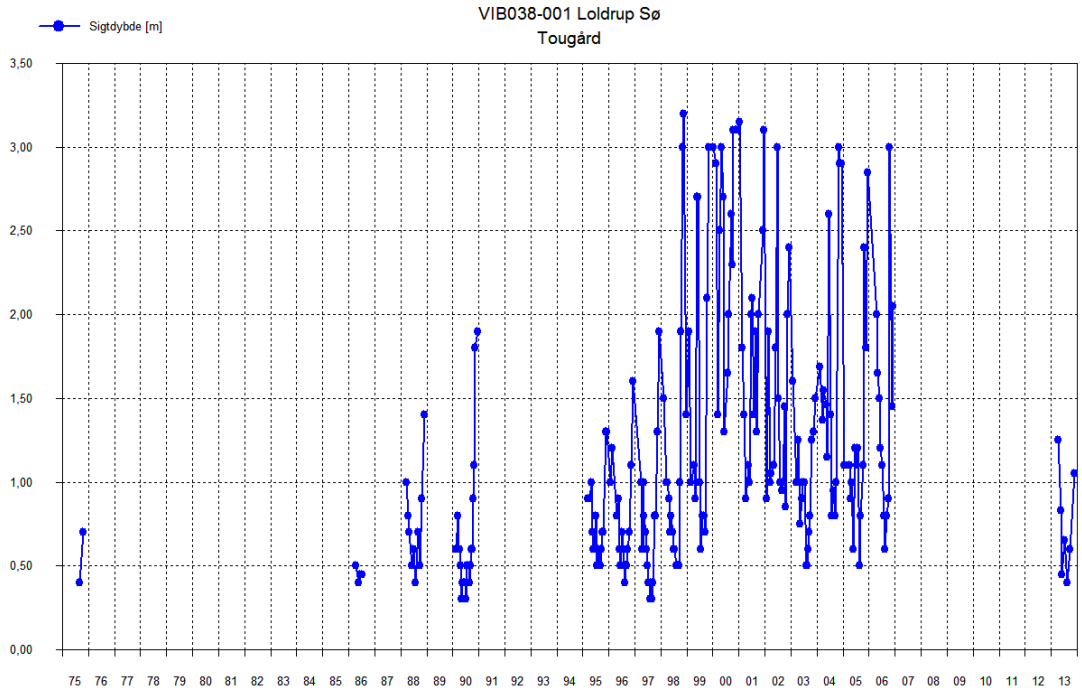
Figur 4.1.6: Klorofylkoncentrationen i Loldrup Sø i perioden 1986-2013.



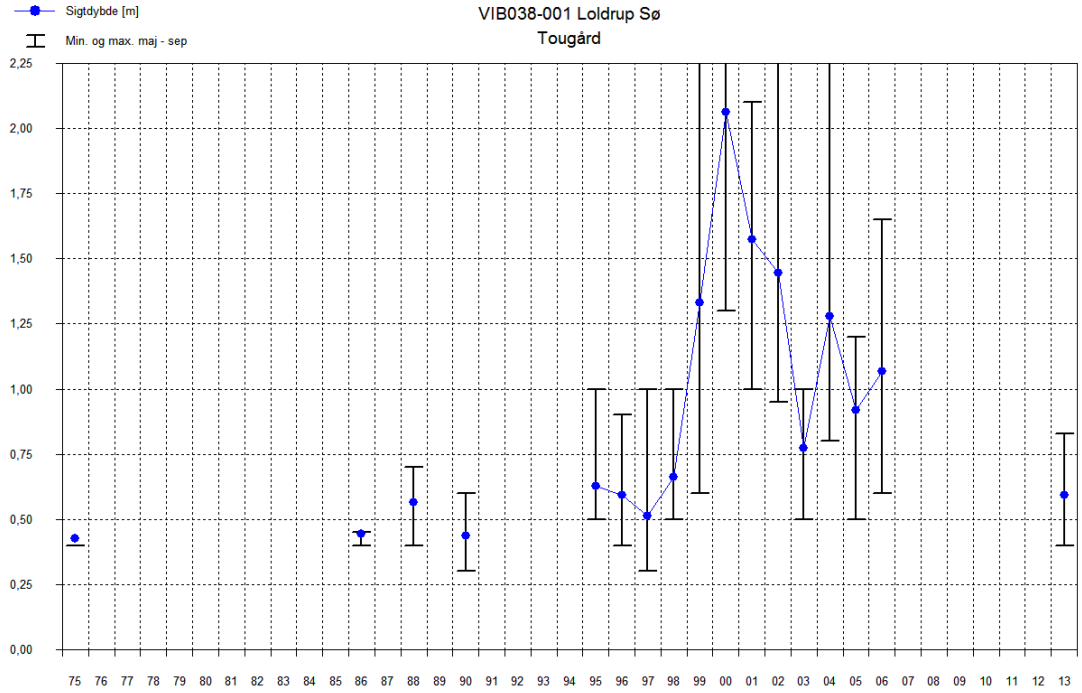
Figur 4.1.7: Klorofylkoncentrationen som sommergennemsnit i Loldrup Sø i perioden 1986-2013.

Figur 4.1.8 viser sigtdybden (mål for vandets klarhed målt med en hvid secchiskive) i overfladevandet i de seneste år. Målingerne er fra sommerperioden og ligger i intervallet 0,5-3,0 meter med enkelte målinger svarende til søens totaldybde på ca. 3,3 meter. Den højeste sigtdybde blev målt i 2000 på grund af en positiv effekt af opfiskningsprojektet med lav fosforkoncentration, lavt klorofylindhold og høj sigtdybde. Som tidligere nævnt faldt søen dog tilbage efter få år til den uklare tilstand med lav sigtdybde.

Sommergennemsnittet for sigtdybden var 0,6 meter i 2013, jf. Figur 4.1.9 og Tabel 4.1.1. Det er en meget lav sigtdybde, og søen fremstår da også både grøn og uklar om sommeren med utilstrækkeligt lys ved søbunden til vækst af undervandsplanter i de dybere dele af søen. Søen har dog en moderat økologisk tilstand for tilstandsparameteren undervandsplanter (makrofytter).



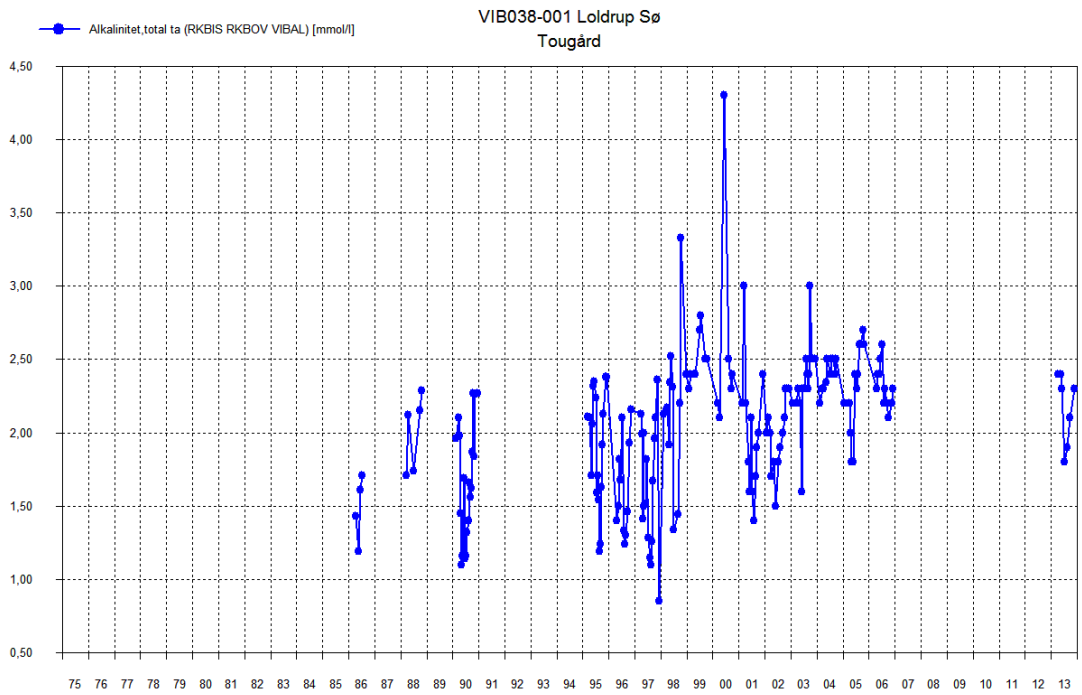
Figur 4.1.8: Sigtdybden i Loldrup Sø i perioden 1986-2013.



Figur 4.1.9: Sigtdybden i Loldrup Sø som sommergennemsnit i perioden 1986-2013.

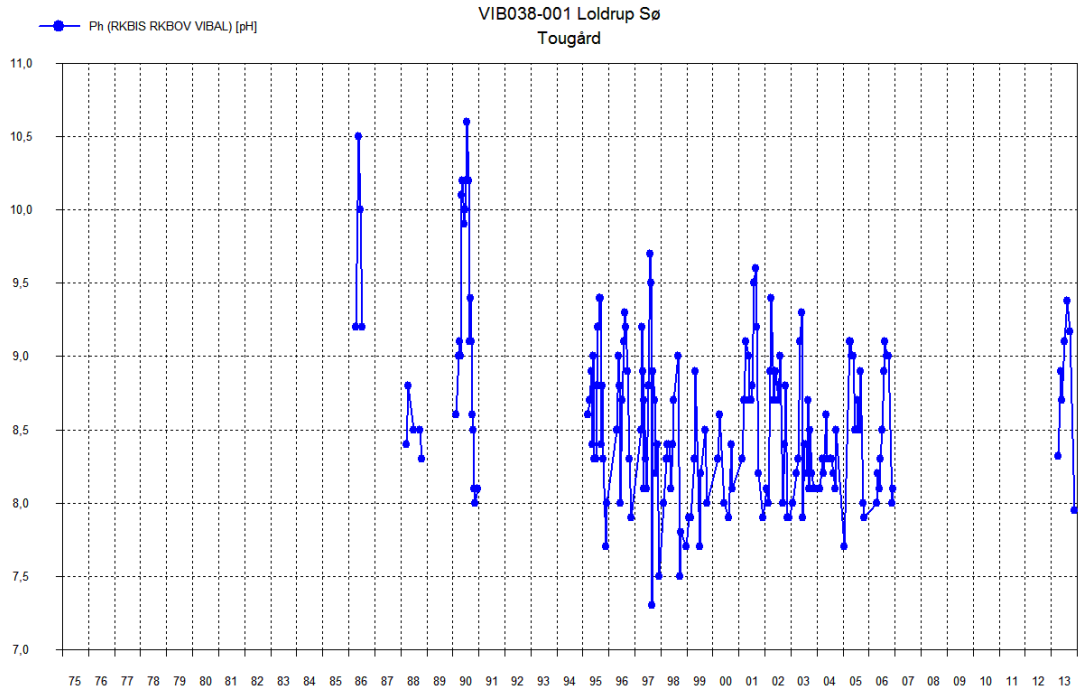
Andre betydende parametre for vurderingen af søens egnethed til f.eks. kemisk fosforfældning er alkalinitet og pH. I Figur 4.1.10 ses en kurve over alkaliniteten i Loldrup Sø i perioden 1986 til 2013. Det ses, at alkaliniteten varierer meget fra år til år og inden

for de enkelte år, men typisk er 1-3 mmol/l om sommeren. Søen kan dermed karakteriseres som en alkalisk sø.



Figur 4.1.10: Alkaliniteten i Loldrup Sø i perioden 1986-2013.

I Figur 4.1.11 ses en kurve over pH i Loldrup Sø i perioden 1986 til 2013. pH er normalt højere end 8 om sommeren. I perioder med høj algeproduktion kan pH stige til over 9, i tidligere årtier helt op til 10, hvilket er meget højt. I efteråret og om vinteren er pH typisk lidt lavere end om sommeren.



Figur 4.1.11: pH i Loldrup Sø i perioden 1986-2013

Det fremgår af Tabel 4.1.1, at Loldrup Sø har et farvetal på 29 mg Pt/l som sommergennemsnit. Dermed er søen svagt brunvandet men kan ikke typologisk betegnes som en brunvandet sø, idet grænseværdien er 60 mg Pt/l.

Vandkemisk parameter	Sommergennemsnit 2013
Total-N, mg N/l	0,83
Total-P, µg P/l	136
pH	9,1
Alkalinitet, mmol/l	2,05
Klorofyl, µg/l	151
Farvetal, mg Pt/l	29
Sigtdybde, meter	0,60

Tabel 4.1.1: Sommergennemsnit af vigtige vandkemiske parametre i Loldrup Sø ved seneste undersøgelse i 2013.

4.2. Rødding Sø

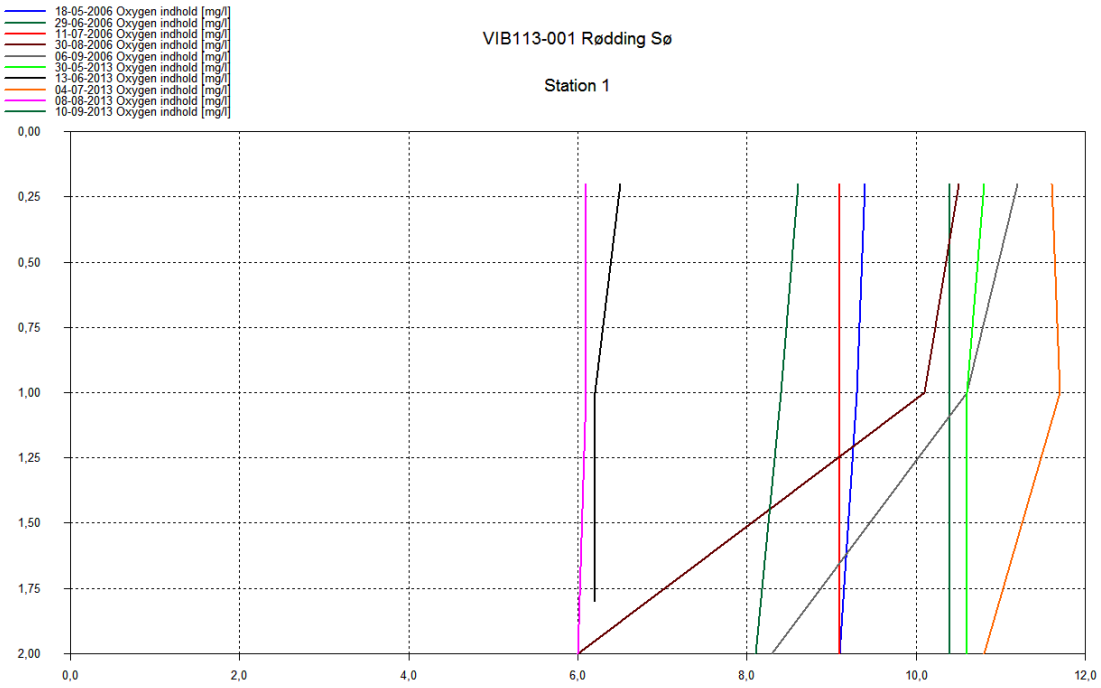
Der findes spredte data til en vurdering af Rødding Sø´s nuværende tilstand og dermed også påvirkning af Loldrup Sø. Påvirkningen afhænger i høj grad af den årlige til-

førsel af fosfor til Rødding Sø fra oplandet og de interne processer i Rødding Sø, herunder betydningen af fosforfrigivelse fra sedimentet og afstrømningen til Nørremølle Å og videre til Loldrup Sø i de kritiske perioder om sommeren.

Rødding Sø er blevet undersøgt siden etableringen i 2004, først af Viborg Amt og siden 2007 af Miljøstyrelsen som led i den nationale overvågning af vandmiljøet (NOVANA). Desuden har Viborg Kommune i de senere år indsamlet vandkemiske data fra Nørremølle Å mellem Rødding Sø og Loldrup Sø, der indgår i vurderingerne.

4.2.1 Temperatur og ilt

Rødding er en lavvandet og vindeksponeret sø, hvorfor der aldrig opstår en stabil temperaturlagdeling af vandmasserne om sommeren, og der er normalt gode iltforhold i søen, Figur 4.2.1. Midt på sommeren kan der være under 100 % iltmætning i søen med koncentrationer omkring 6 mg/l, men der er ikke registreret egentlig iltsvind i bundvandet. Ved langvarigt isdække om vinteren kan der opstå iltfrie forhold under isen.



Figur 4.2.1: Iltprofil i Rødding Sø i sommermånederne i årene 2006 og 2013.

4.2.2 Vandkemiske forhold

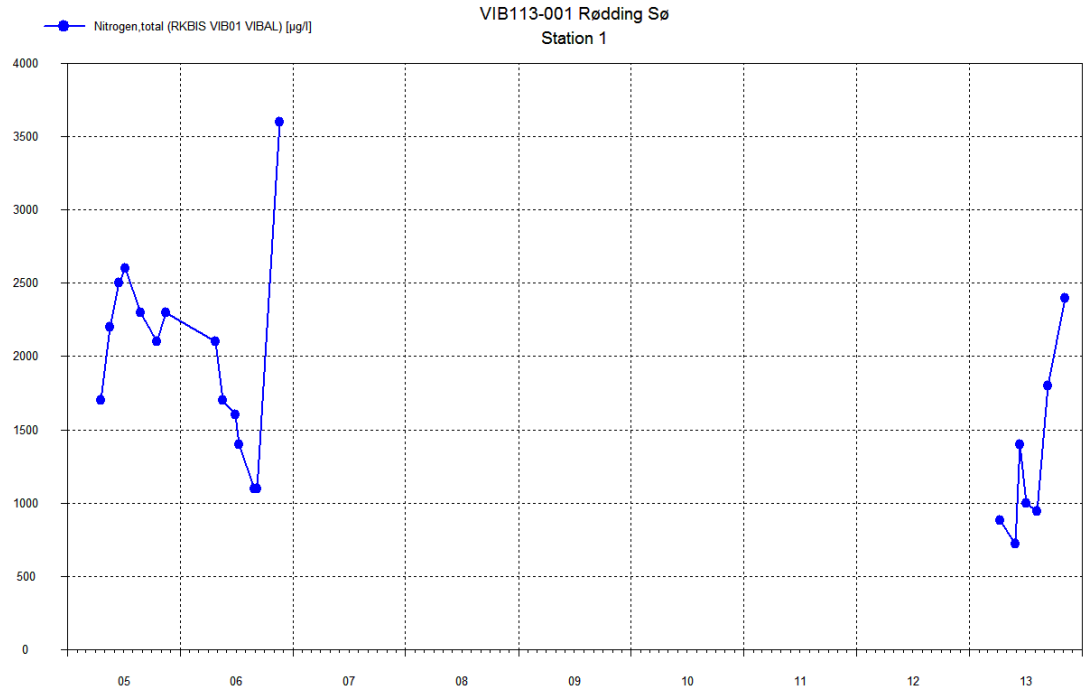
I de senere år der i forbindelse med statens overvågningsprogram (NOVANA) udtaget 5-7 prøver i hvert måleår, typisk med én prøve i hver af de fem sommermåneder (maj-september) og én prøve i henholdsvis forår og efterår. Da Rødding er en lavvandet sø, er der kun udtaget prøver af overfladevandet. Prøverne udtages på det dybeste

sted i søen, der vurderes at repræsentere forholdene i hele søen. Data er hentet fra Danmarks Miljøportal, Stoq-databasen.

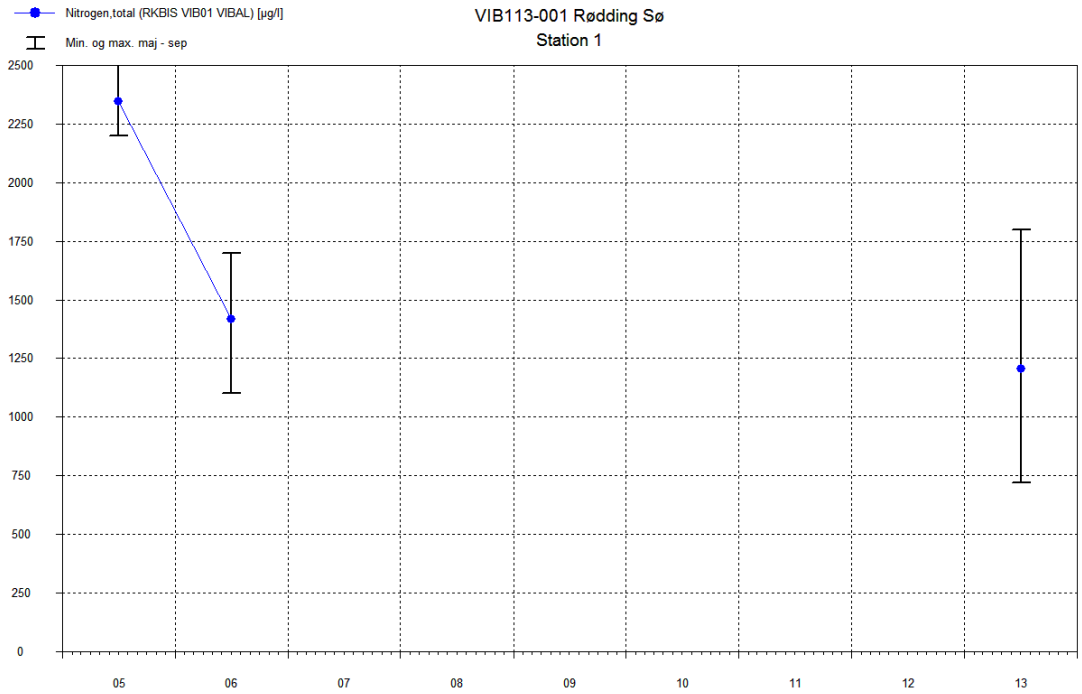
I dette afsnit gennemgås de vigtigste vandkemiske parametre fra undersøgelsesperioden 2005 til 2013.

Figur 4.2.2 viser kvælstofkoncentrationen (total-N) i overfladevandet i Rødding Sø i de seneste måleår. Generelt er koncentrationen af kvælstof højere end det naturgivne niveau på ca. 0,5 mg N/l på grund af udvaskning af kvælstof fra landbrugsarealer i oplandet.

Sommergennemsnittet af kvælstofkoncentration (total-N) var i 2013 ca. 1,20 mg N/l, Figur 4.2.3 og Tabel 4.2.1. Vægtforholdet mellem total-N og total-P (TN:TP) var i gennemsnit 5,3 og dermed tæt på skæringsværdien 7 (Redfield ratio, dvs. det typiske forhold mellem kvælstof og fosfor i planktonalger). Derfor kan fytoplankton i perioder have været vækstbegrænset af kvælstof, men fosfor vurderes stadig at have størst betydning som regulerende næringsstof for fytoplankton i Rødding Sø som i de fleste danske søer.



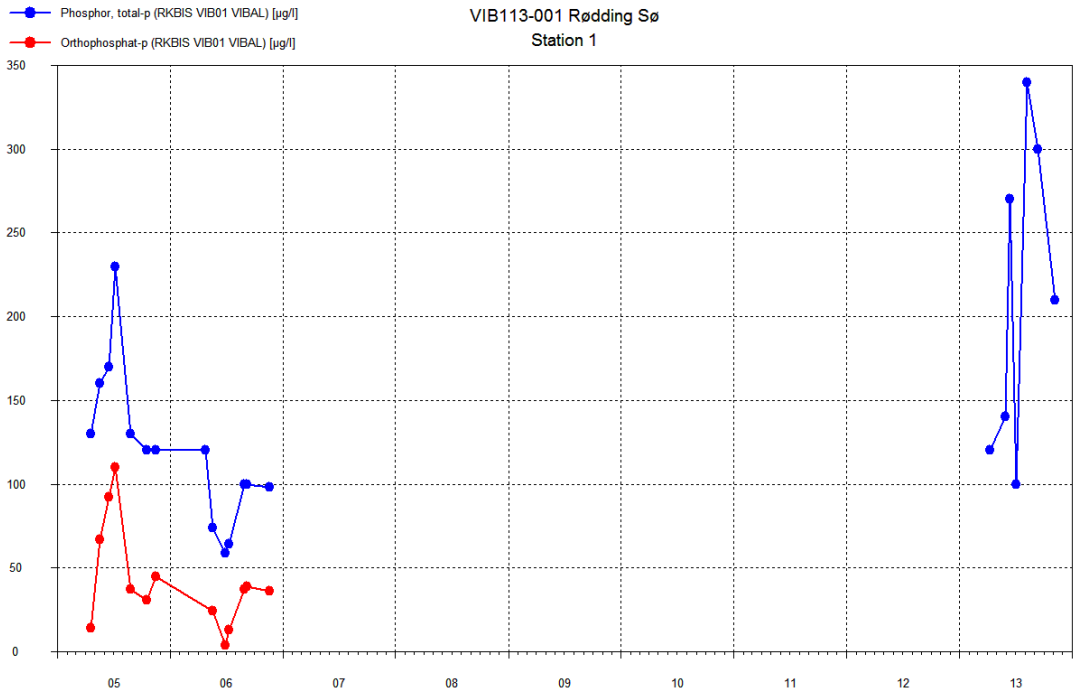
Figur 4.2.2: Kvælstofkoncentrationen (total-N) i Rødding Sø i perioden 2005-2013.



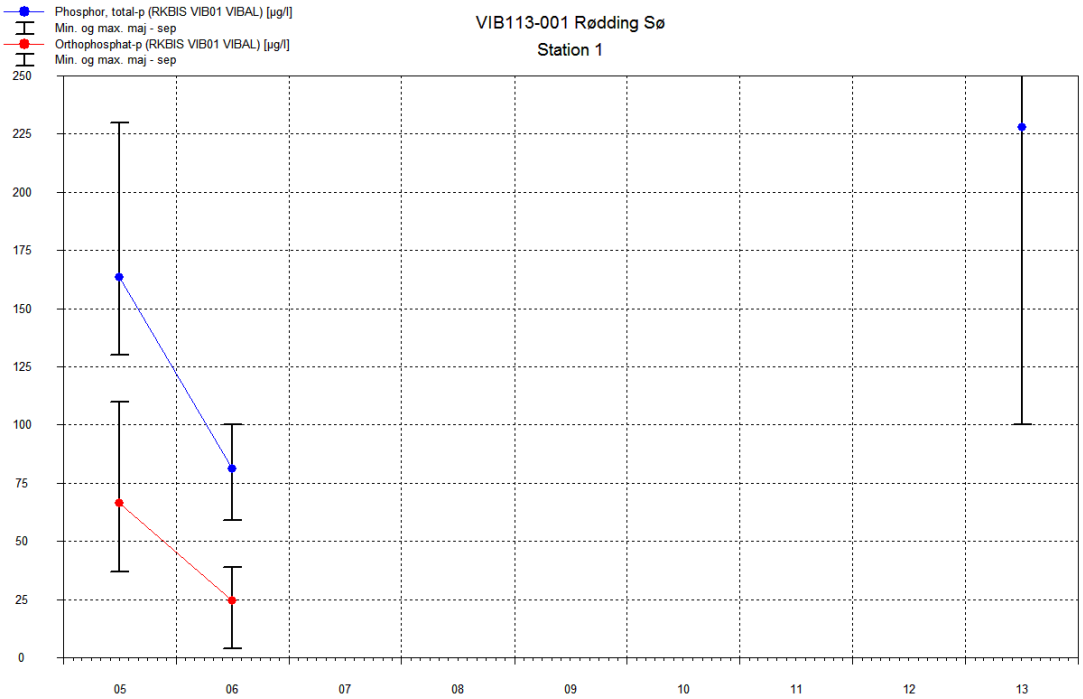
Figur 4.2.3: Kvælstofkoncentrationen (total-N) som sommergennemsnit i Rødding Sø i perioden 2005-2013.

Som det fremgår af Figur 4.2.4 havde Rødding Sø ved den seneste undersøgelse i 2013 høje koncentrationer af fosfor (total-P), især om sommeren. Som det fremgår af Figur 4.2.5 var sommergennemsnittet i 2013 228 µg P/l og markant højere end i 2005 og 2006. Rødding Sø er et meget dynamisk system, hvor koncentrationen af fosfor også om sommeren kan variere betydelig fra år til år og i løbet af året. Ustabiliteten i koncentrationen af fosfor og de biologiske kvalitetselementer er typisk for nyetablerede søer.

De periodisk meget høje koncentrationer af fosfor i Rødding Sø i 2013 skyldes formentlig fosforfrigivelse fra sedimentet om sommeren, idet koncentrationerne har vist sig at være noget lavere i vinterhalvåret, Figur 4.2.4.



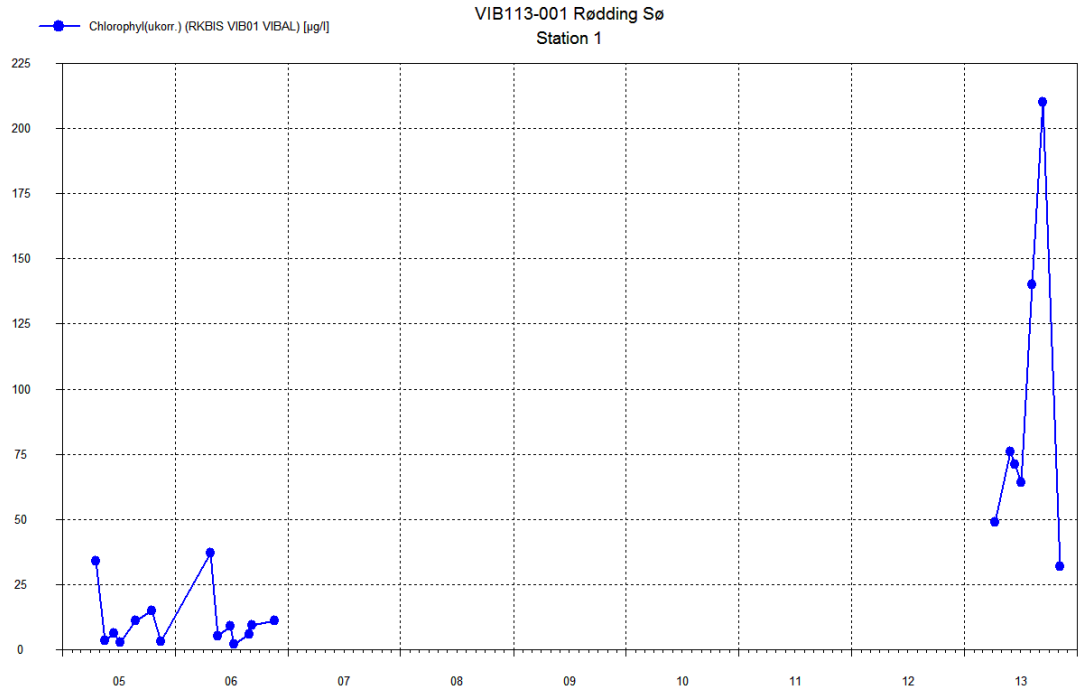
Figur 4.2.4: Fosforkoncentrationen (total-P og ortho-P) i Rødding Sø i perioden 2005-2013.



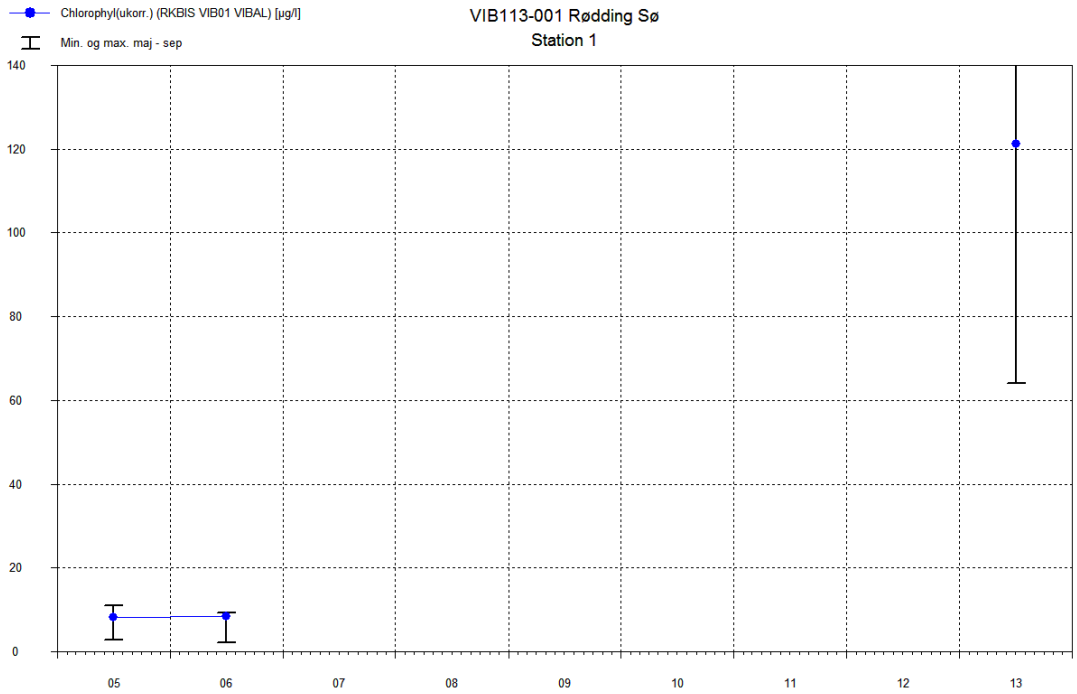
Figur 4.2.5: Fosforkoncentrationen (total-P) i overfladevandet som sommergennemsnit i Rødding Sø i perioden 2005-2013.

Figur 4.2.6 viser koncentrationen af klorofyl i overfladevandet i perioden 2005-2013. Klorofyl er et mål for mængden af planteplankton (alger) i vandet. Målingerne viser en

betydelig årstidsvariation og år til år variation. I 2005 og 2006 var klorofylkoncentrationen lav og vandet klart. Forklaringen er, at der endnu ikke var opbygget en nævneværdig fiskebestand i den nyetablerede sø. En situation med klart vand i et år eller to efter retablering er kendt fra andre nyetablerede søer. I 2013 var klorofylkoncentrationen steget markant, hvilket skyldes en øget bestand af fredfisk, som prædaterer på dyreplankton og dermed mindsker dyreplanktons græsning på planteplankton. Når der samtidig er rigeligt med næringsstoffer resulterer det i en sø med uklart og grønt vand. Sommergennemsnittet for klorofyl var 121 µg/l i 2013, jf. Figur 4.2.7 og Tabel 4.2.1. I 2013 overholder søen dermed ikke den målsatte værdi i Vandområdeplan 2015-2021 på ca. 25 µg/l for "god økologisk" tilstand i lavvandede søer.



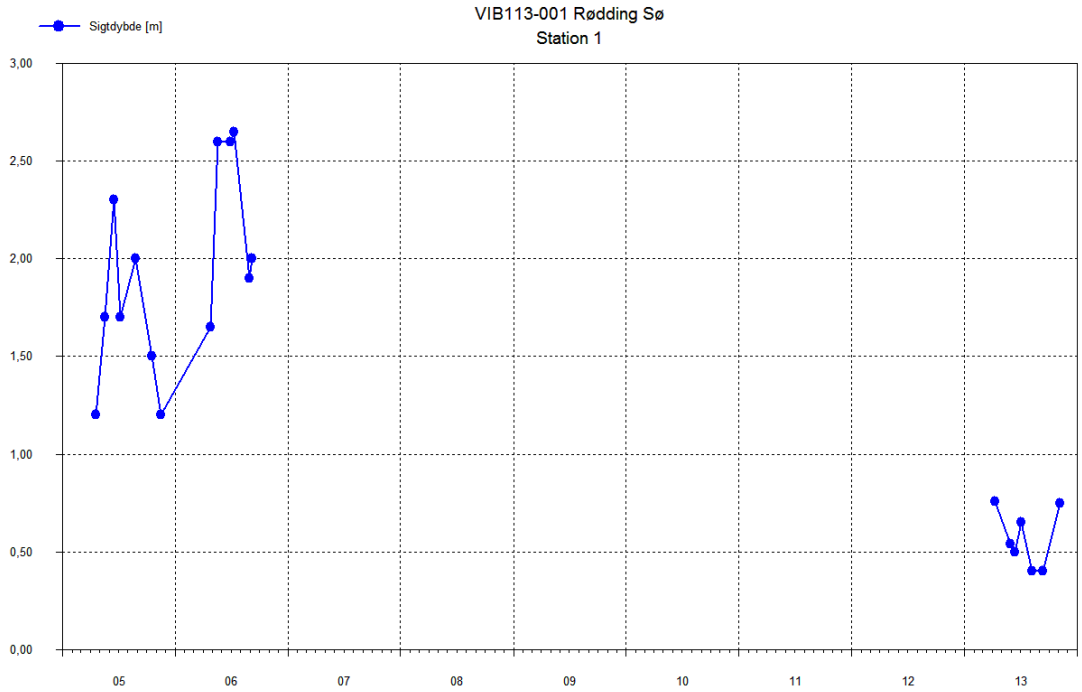
Figur 4.2.6: Klorofylkoncentrationen i Rødding Sø i perioden 2005-2013.



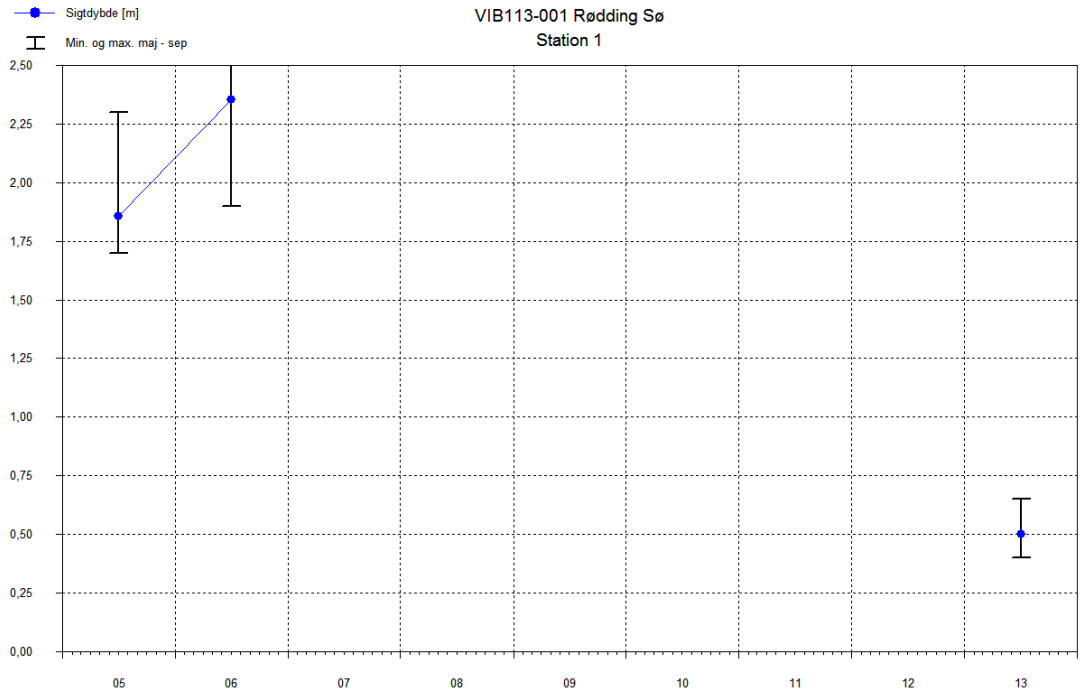
Figur 4.2.7: Klorofylkoncentrationen som sommergennemsnit i Rødding Sø i perioden 2005-2013.

Figur 4.2.8 viser sigtdybden (mål for vandets klarhed målt med en hvid secchiskive) i overfladevandet i de seneste år. Sigtdybden ligger i intervallet 1,25-2,6 meter i 2005 og 2006. I perioder var der således sigt til bunden overalt i søen. Som tidligere nævnt er søen blevet væsentlig mere uklar i 2013, hvilket da også afspejles i sigtdybden, der ved alle målinger var under ca. 0,7 meter.

Sommergennemsnittet for sigtdybden var således kun 0,5 meter i 2013, jf. Figur 4.2.9 og Tabel 4.2.1. Det er en meget lav sigtdybde, og søen fremstår da også både grøn og uklar om sommeren med utilstrækkeligt lys ved søbunden til vækst af undervandsplanter i de dybere dele af søen.



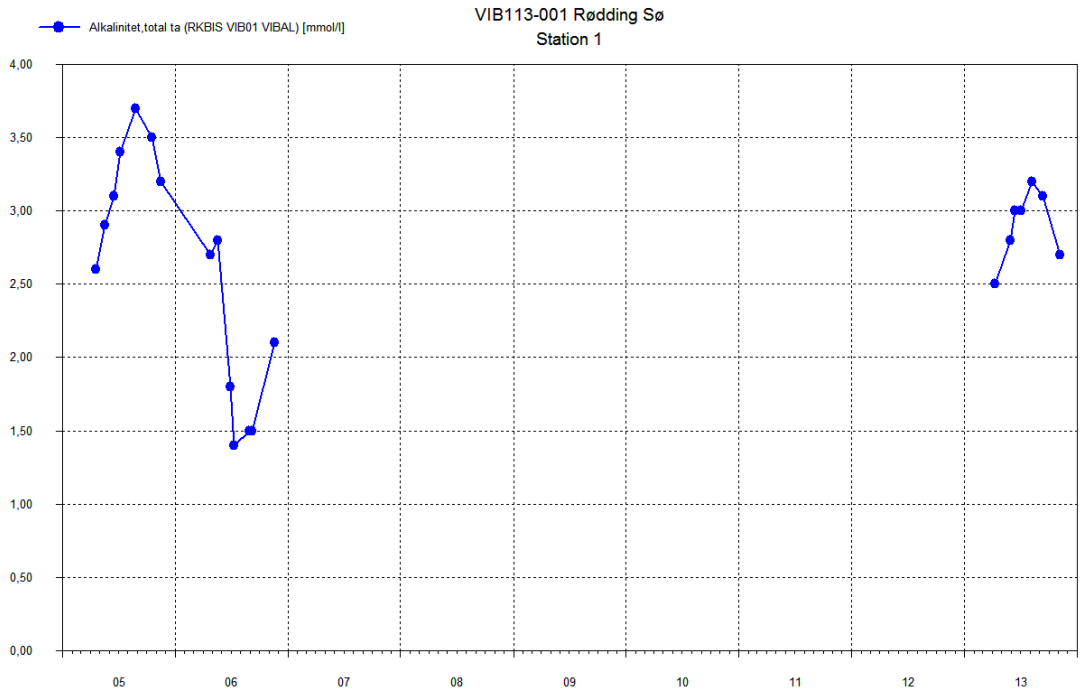
Figur 4.2.8: Sigtdybden i Rødding Sø i perioden 2005-2013.



Figur 4.2.9: Sigtdybden i Rødding Sø som sommergennemsnit i perioden 2005-2013.

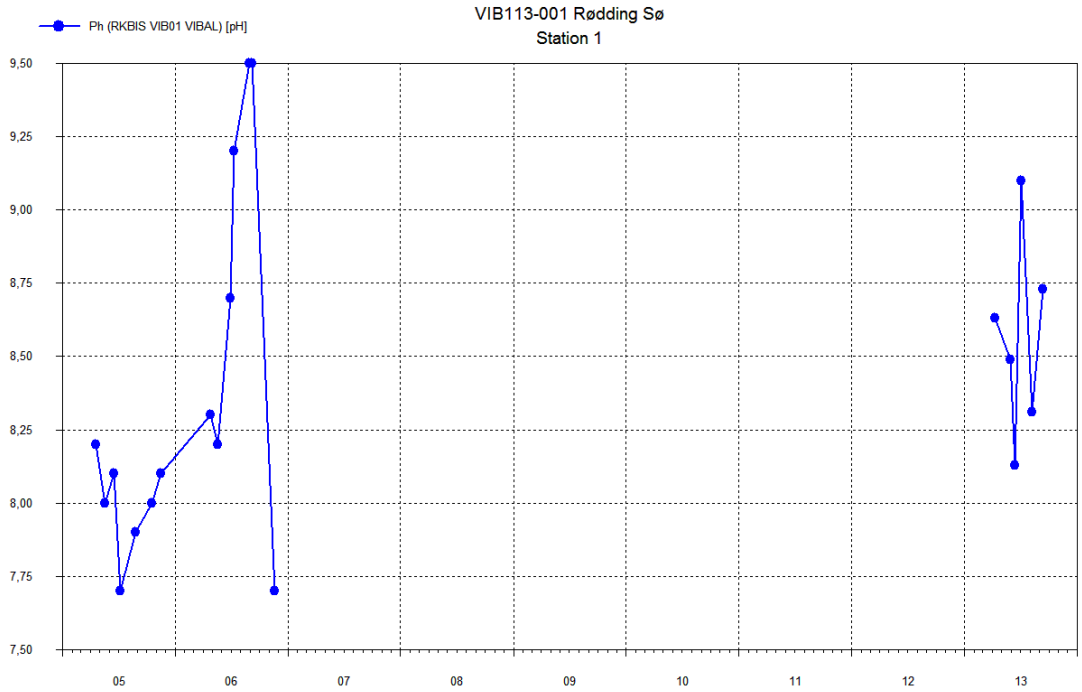
Andre betydende parametre for vurderingen af søens egnethed til f.eks. kemisk fosforfældning er alkalinitet og pH. I Figur 4.2.10 ses en kurve over alkaliniteten i Loldrup Sø

i perioden 2005 til 2013. Det ses, at alkaliniteten varierer meget fra år til år og inden for de enkelte år, men typisk er større end 1,5 mmol/l om sommeren og ofte over 2,5 mmol/l. Søen kan dermed karakteriseres som en alkalisk sø.



Figur 4.2.10: Alkaliniteten i Rødding Sø i perioden 2005-2013

I Figur 4.2.11 ses en kurve over pH i Rødding i perioden 2005 til 2013. pH er normalt højere end 8 om sommeren. I perioder med høj algeproduktion kan pH stige til over 9. I efteråret og om vinteren er pH typisk lidt lavere end om sommeren. Som det fremgår af Tabel 4.2.1 var ph 8,6 som sommergennemsnit i 2013.



Figur 4.2.11: pH i Rødding Sø i perioden 2005-2013.

Det fremgår af Tabel 4.2.1, at Loldrup Sø har et farvetal på 39 mg Pt/l som sommergennemsnit i 2013. Dermed er søen svagt brunvandet men kan ikke typologisk betegnes som en brunvandet sø, idet grænseværdien er 60 mg Pt/l.

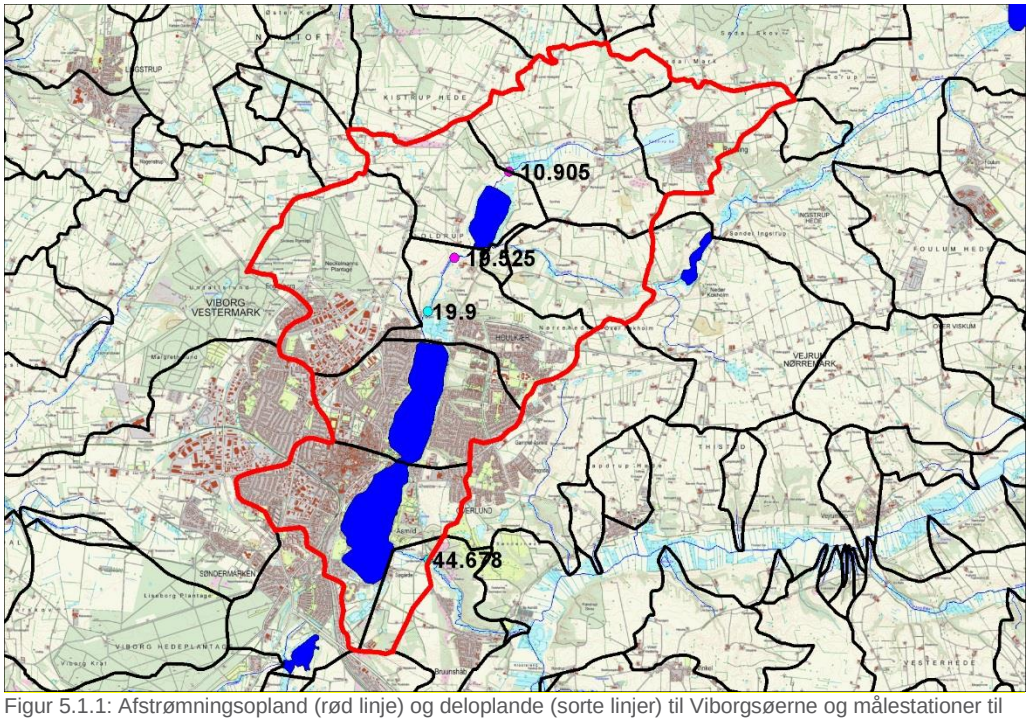
Tabel 4.2.1: Sommergennemsnit af vigtige vandkemiske parametre i Rødding Sø ved seneste undersøgelse i 2013.

Vandkemiske parameter	**Sommergennemsnit 2013**
Total-N, mg N/l	1,20
Total-P, µg P/l	228
pH	8,6
Alkalinitet, mmol/l	3,00
Klorofyl, µg/l	121
Farvetal, mg Pt/l	39
Sigtdybde, meter	0,50

5. FOSFORTRANSPORT OG –BALANCE I NØRREMØLLE Å

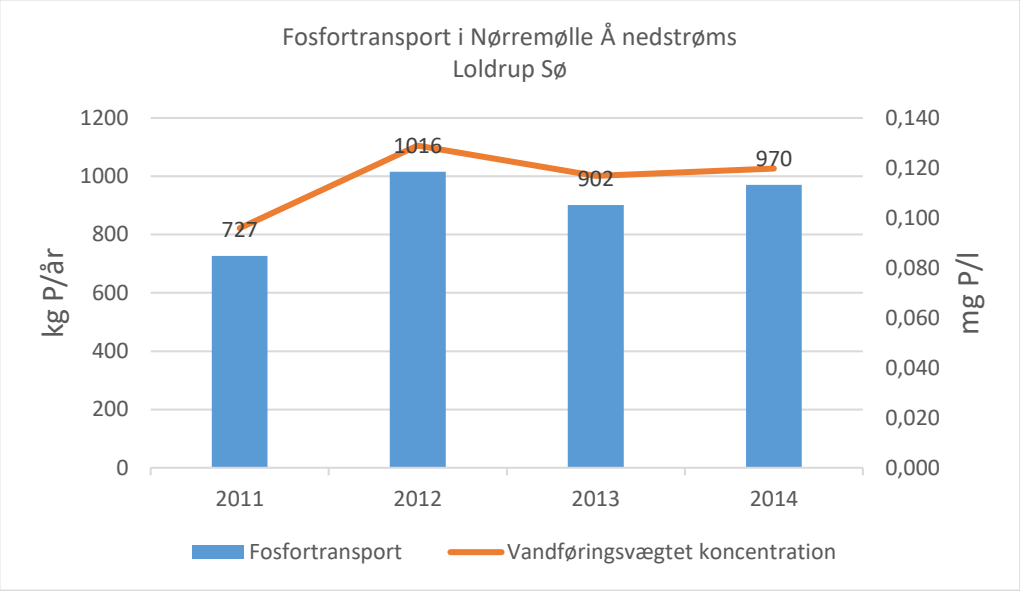
Viborg Kommune har hvert år i perioden 2006-2014 målt både vandføring, totalfosfor, opløst fosfor og totalkvælstof i både Nørremølle Å (station 18.525) og i de senere år også på station 19.9 og 21.94, i afløbet fra Søndersø (station 44.678) og i afløbet fra Nørremølle Enge til Viborg Nørresø. Placering af de primære stationer fremgår af Figur 5.1.1.

Orbicon har på baggrund af disse data beregnet den månedlige og årlige transport af vand, kvælstof og fosfor (Orbicon, 2016; opdateret i Orbicon, 2017).



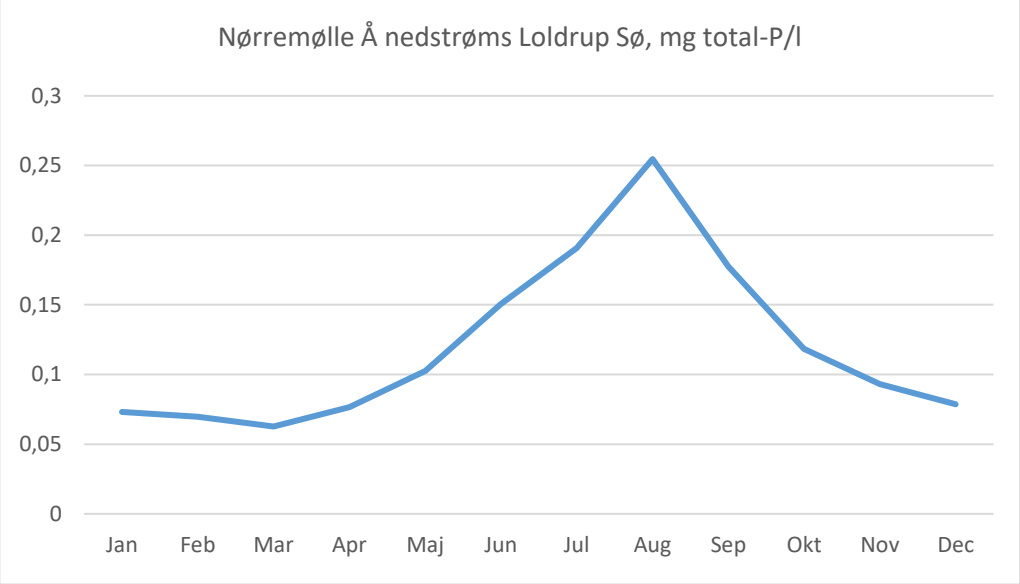
Figur 5.1.1: Afstrømningsopland (rød linje) og deloplande (sorte linjer) til Viborgsøerne og målestationer til beregning af vand- og stoftransport. Station 10.905 svarer til station 210113, station 18.525 til station 210110, og station 19.9 til station 210936.

Figur 5.1.2 viser den årlige korrigerede fosfortransport i måleperioden 2011-2014 og den vandføringsvægtede fosforkoncentration som årsgennemsnit i hvert måleår ved målestationen i Nørremølle Å, der findes kort nedstrøms Loldrup Sø. Oplandet til målestationen er 19.5 km^2 og dermed marginalt større end oplandet til Loldrup Sø på 19,3 km^2.



Figur 5.1.2: Årlig fosfortransport og vandføringsvægtet fosforkoncentration i Nørremølle Å nedstrøms Loldrup Sø (st. 18.525) (korrigeret for analysefejl af total-P) (Orbicon, 2017).

Med de korrigerede tal for de seneste 4 måleår fås en fosfortransport på ca. 900 kg P/år (gennemsnit 2011-2014) og en vandtransport i samme periode på ca. 7,8 mio. m^3/år ved stationen i Nørremølle Å. Det giver et vandføringsvægtet gennemsnit for fosfor på 0,115 mg P/l men med store variationer hen over året med de højeste koncentrationer om sommeren på grund af aflastning af fosfor fra Loldrup Sø, Figur 5.1.3.



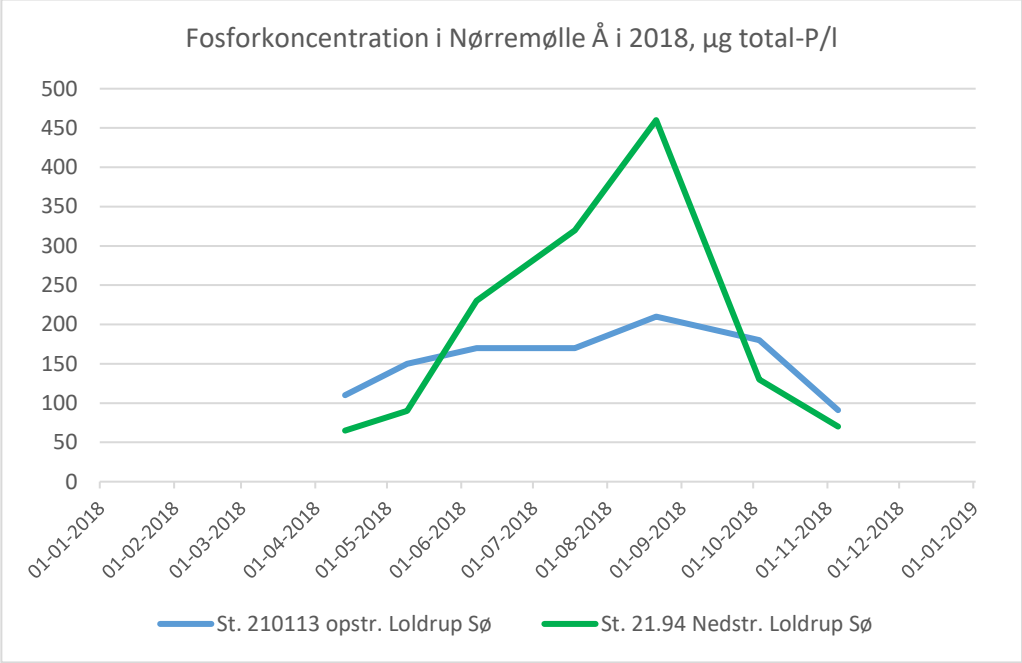
Figur 5.1.3: Vandføringsvægtet fosforkoncentration i Nørremølle Å nedstrøms Loldrup Sø (station 18.525). Gennemsnit 2011-2014 (Orbicon, 2017).

5.1. Loldrup Sø

Der findes ikke en nyere massebalance (tilført og fraført vand og fosfor) for Loldrup Sø end perioden 2011-2014, hvormed frigivelse af fosfor fra sedimentet og aflastning via afløbet kan estimeres. Men Viborg Kommune har i 2018 foretaget målinger af fosfor på to stationer i Nørremølle Å, henholdsvis opstrøms Loldrup Sø og nedstrøms Loldrup Sø ved Nordre Ringvej. Som det fremgår af Figur 5.1.1 er Nørremølle Å præget af forhøjede fosforkoncentrationer om sommeren, som skyldes aflastning af overskydende fosfor fra de to søer.

Fosforkoncentrationen i Nørremølle Å nedstrøms Loldrup Sø stiger således fra ca. 80 µg P/l i vinterhalvåret til over 450 µg P/l midt på sommeren, mens den "kun" stiger til ca. 200 µg P/l i Nørremølle Å nedstrøms Rødding Sø. Da vandføringen ved stationen nedstrøms Loldrup Sø er dobbelt så stor som opstrøms er fosfortransporten også væsentlig større, og det er denne transport der har betydning for belastningen med fosfor af Viborg Nørresø. Det skal her nævnes, at sommeren 2018 var usædvanlig varm og tør, hvilket givetvis har medvirket til en højere fosforkoncentration i Nørremølle Å end i en normal sommer.

Der er et relativt stort opland mellem Rødding Sø og station 210113 opstrøms Loldrup Sø, og derfor er vandet her en blanding af afløbsvand fra Rødding Sø og tilløb til Nørremølle Å på strækningen mellem Rødding Sø's afløb og station 210113. Det gælder også ved station 21.94 nedstrøms Loldrup Sø, men her udgør afløbsvand fra Loldrup Sø langt hovedparten af vandføringen, da oplandet til Loldrup Sø udgør 95 % af oplandet til station 21.94 ved Nordre Ringvej. Derfor er de høje fosforkoncentrationer, som er målt om sommeren i Nørremølle Å nedstrøms Loldrup Sø i 2018 og tidligere år, et udtryk for aflastning af mobilt fosfor fra søens sediment.



Figur 5.1.1: Fosforkoncentrationer i Nørremølle Å ved 2 stationer i 2018.

Der er tidligere foretaget en modelbaseret beregning af aflastning af overskydende fosfor (frigivet fra søens sediment) fra Loldrup Sø til Nørremølle Å og herfra videre til Viborg Nørresø (Orbicon, 2017). Beregningen tog udgangspunkt i en fremtidig situation, hvor Loldrup Sø er i ligevægt med den eksterne målsatte tilførsel af fosfor.

Med en fremtidig sommermiddel koncentration i Loldrup Sø i ligevægt på 53 µg P/l (krav til lavvandede søer i Vandområdeplan 2015-2021) og en beregnet årsmiddel koncentration på 51 µg P/l i søen, kan der ud fra en fraførsel af vand på ca. 7,8 mio. m^3/år beregnes en fremtidig fraførsel af fosfor på ca. 400 kg P/år. Her antages det, at afløbet fra søen har samme koncentration som søvandet, dvs. vandmasserne i søen er fuldt opblandede.

Da den nuværende stoftransport ved Nørremølle Å nedstrøms Loldrup Sø er beregnet til 900 kg P/år (korrigeret gennemsnit 2011-2014), vil den fremtidige fosfortilførsel til Viborg Nørresø med en opfyldt målsætning for støtteparameteren total-P i Loldrup Sø (53 mg P/l) blive reduceret med ca. 500 kg P/år (900 kg P/år - 400 kg P/år).

Den aktuelle aflastning af fosfor fra Loldrup Sø er nærmere beskrevet i afsnit 6.1.4.

5.2. Rødding Sø

Rødding Sø´s påvirkning af Loldrup Sø afhænger i høj grad af den årlige tilførsel af fosfor til Rødding Sø fra oplandet og de interne processer i Rødding Sø, herunder betydningen af fosforfrigivelse fra sedimentet og afstrømningen til Nørremølle Å og videre til Loldrup Sø i de kritiske perioder om sommeren.

Station 210113 har i 2018 et fosforniveau i vinterhalvåret på ca. 100 µg P/l og op til 200 µg P/l om sommeren, bl.a. på grund af frigivelse af fosfor fra sedimentet i Rødding Sø om sommeren.

Vandføringen i Nørremølle Å ved station 10.905 er tidligere beregnet til 3,7 mio. m^3/år (gennemsnit for perioden 2006-2009).

På baggrund af en vandtilførsel til Rødding Sø på 1,16 mio. m^3 (Miljøstyrelsen, 2017) og målingerne i afløbet i 2018 skønnes den årlige transport af fosfor fra Rødding Sø til Loldrup Sø at udgøre 150-200 kg P/år ud af Vandområdeplanens beregnede 929 kg P/år (baseline 2021) til Loldrup Sø. Hertil kommer et bidrag af samme størrelse fra den øvrige del af oplandet mellem Rødding Sø´s afløb langs Nørremølle Å frem til Loldrup Sø. Det skønnes, at frigivelse af fosfor fra sedimentet i Rødding Sø udgør under 50 kg P/år af transporten til Loldrup Sø og vil aftage yderligere i takt med at den mobile fosforpulje aflastes Som beskrevet i Orbicon (2017) kan der opnås positive effekter på miljøtilstanden i Rødding Sø ved en indsats over regnbetingede udledninger, hvilket også vil have en positiv indvirkning på Loldrup Sø.

6. FOSFORPULJE I SEDIMENTET

Det afgørende i vurderingen af sedimentets betydning for miljøtilstanden i lavvandede søer er størrelsen af den potentielt mobile fosforpulje og den faktiske udveksling af fosfor mellem sediment og de øvre vandmasser. Udvekslingen er styret af mange faktorer, hvor temperatur, pH og især iltkoncentration i bundvandet har betydning. I perioder med høj temperatur og lave iltkoncentrationer er der en forøget mineralisering af organisk stof og frigivelse af jernbundet fosfor, idet jern under reducerede forhold reduceres fra ferri jern (Fe^{3+}) til ferro jern (Fe^{2+}). Det medfører en opløsning af $FePO_4$ forbindelser og frigivelse ved diffusion og bioturbation af den frigivne uorganiske (opløste) fosfor til bundvandet.

Ud over størrelsen af frigivelsen af opløst fosfor til bundvandet har det også betydning for miljøtilstanden i søen, om den frigivne fosfor efterfølgende bliver til rådighed for planktonalger. I dybe søer med stabil lagdeling af vandmasserne (temperaturspringlag) vil der ofte være en markant adskillelse af det fosforrige bundvand og overfladevandet, så planktonalgerne har svært ved at udnytte denne fosforkilde. I lavvandede søer som Rødding Sø og Loldrup Sø og i periodisk lagdelte søer som Viborg Nørresø vil vandmasserne oftest være så godt opblandede, at frigivet fosfor fra sedimentet kommer op i den fotiske zone og kan udnyttes af planktonalger.

6.1. Loldrup Sø

I de følgende afsnit gennemgås resultaterne af prøvetagningen af sediment i Loldrup Sø i 2018. Undersøgelsen er udført efter forskrifterne i Vejledning for gennemførelse af sørestaurering (Søndergaard m.fl., 2015).

Der blev udtaget sedimentprøver på 3 stationer (1 på søens dybeste sted og 2 stationer på middeldybden). Placeringen fremgår af Figur 6.1.1. På hver station blev der i november udtaget tre sedimentsøjler af en længde på hver 40-50 cm, som efterfølgende blev opskåret i 6 intervaller (0-2 cm, 2-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm og 30-50 cm) og puljet for hvert dybdeinterval. Prøverne blev analyseret hos et akkrediteret laboratorium (Eurofins) for tørstof, glødetab, total-P og total-Fe.



Figur 6.1: Dybdekort af Loldrup Sø (én meter dybdekurver) med placering af prøvetagningsstationer L1, L2 og L3 (maksdybde) til sedimentanalyse.


Foto: Sedimentsøjle fra station L3.

6.1.1 Sedimentkarakteristik

Resultaterne af sedimentanalyserne fremgår af Tabel 6.1.1.

Generelt er sedimentet i Loldrup Sø i de øverste 20 cm tyndtflydende med et lavt indhold af tørstof (stort vandindhold) og et højt indhold af organisk stof (stort glødetab).

Fra 20-30 cm dybde og nedefter bliver sedimentet mere fast, men stadig med et højt indhold af organisk stof. På station L3, som er placeret i det dybeste område af søen, er der det laveste indhold af tørstof og det højeste indhold af organisk stof, hvilket er typisk for lavvandede søer, hvor der sker en ophobning af sediment i de dybeste huller.

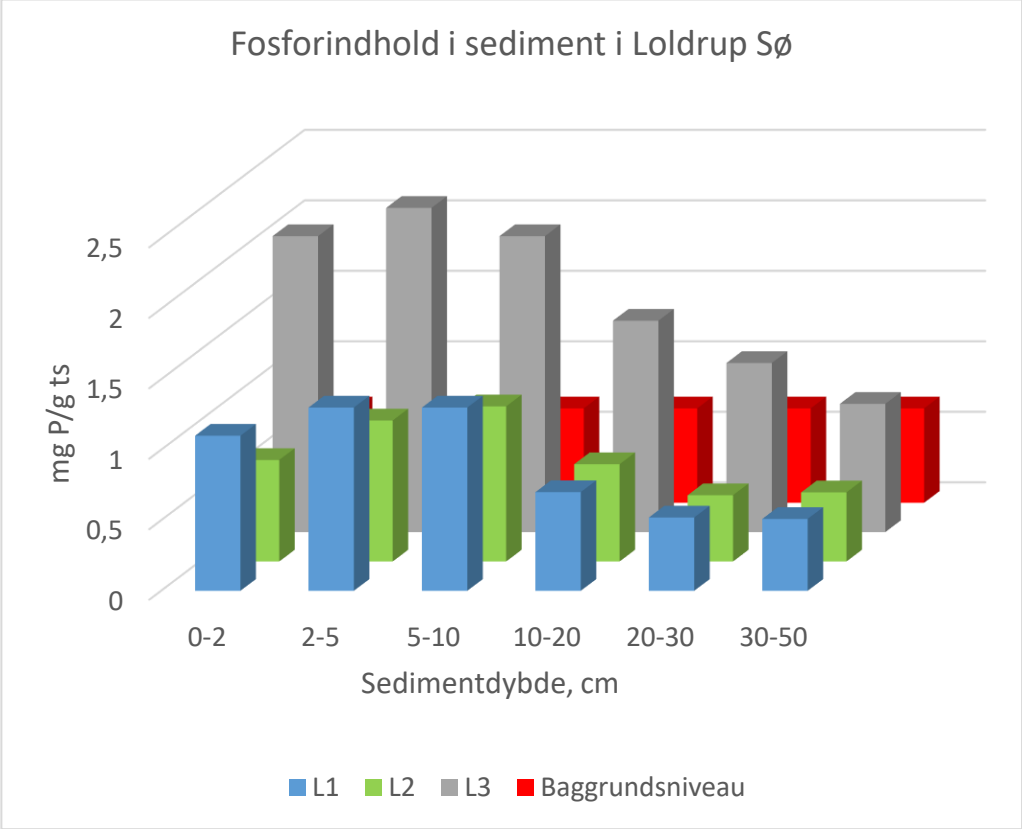
Jernindholdet i sedimentet er relativt højt med et vægtet gennemsnit fra de 3 stationer på 23 mg Fe/g ts i de øverste 10 cm.

Fosforindholdet i sedimentet er relativt lavt med et vægtet gennemsnit fra de stationer på 1,47 mg P/g ts i de øverste 10 cm.

Fosforindholdet er aftagende med dybden på alle tre stationer, som det typisk ses i danske eutrofierede søer. Station L1 og L2 udviser samme niveauer med hensyn til jern- og fosforindholdet, mens station L3 har et væsentligt højere indhold af fosfor i alle sedimentdybder, Tabel 6.1.1 og Figur 6.1.2. De specielle forhold på station L3, som er det dybeste sted i søen, skyldes formentlig, at sedimentationen af organisk stof og fosfor er særlig stor her.

Tabel 6.1.1: Resultater af sedimentanalyser på 3 stationer i Loldrup Sø i forskellige dybdeintervaller.

	Tørstof, %	Glødetab, % af tørstof	Total-Fe, mg Fe/g ts	Total-P, mg P/g ts
Loldrup Sø L.1				
0-2 cm	8,1	18	23,0	1,10
2-5 cm	9,9	18	22,0	1,30
5-10 cm	12,0	18	23,0	1,30
10-20 cm	20,0	14	20,0	0,70
20-30 cm	19,0	17	22,0	0,52
30- 50 cm	19,0	17	21,0	0,51
Loldrup Sø L.2				
0-2 cm	8,2	16	22,0	0,72
2-5 cm	12,0	15	23,0	1,00
5-10 cm	13,0	16	21,0	1,10
10-20 cm	19,0	13	20,0	0,69
20-30 cm	20,0	15	20,0	0,47
30-50 cm	21,0	15	16,0	0,49
Loldrup Sø L3				
0-2 cm	6,0	25	25,0	2,10
2-5 cm	7,0	27	23,0	2,30
5-10 cm	7,9	27	26,0	2,10
10-20 cm	9,8	25	26,0	1,50
20-30 cm	12,0	24	26,0	1,20
30-50 cm	15,0	20	24,0	0,91



Figur 6.1.2: Fosforindhold på de tre stationer i Loldrup fordelt på dybdeintervaller i sedimentet. Røde søjler viser det beregnede baggrundsniveau (svagt kulturpåvirket sediment).

Fosforindholdet i de øverste 10 cm af sedimentet på station L1 og L2 er i den lave ende for danske søer med et niveau på 0,7-1,3 mg P/g ts. Gennemsnittet for danske søer er normalt ca. 2,0 mg P g/ts i de øverste lag og 1,0 mg P/g ts i lag dybere end 20-30 cm (Søndergaard m.fl., 1996). I senere analyser af sedimentdata fra 216 danske søer er der fundet et gennemsnitligt fosforindhold på 2,1 mg P/g tv med en medianværdi på 1,6 mg P/g tv i de øverste 0-2 cm (Søndergaard m.fl., 2007). Derimod er fosforindholdet i sedimentet på station L3 lidt højere end gennemsnittet for danske søer med et indhold på 2,1-2,3 mg P/g ts i de øverste 10 cm.

Det ser ud til, at man når et mindre kulturpåvirket sediment i 20-50 cm´s dybde. Det upåvirkede niveau er beregnet som gennemsnittet af dette dybdeinterval for alle tre stationer og er 0,67 mg P/g ts.

En undersøgelse af 15 danske søer viser, at hvis vægtforholdet mellem jern og fosfor, Fe:P, er større end 15 i sedimentet, vil der under normale iltede forhold i sedimentoverfladen være en meget lille frigivelse af fosfor fra sedimentet til søvandet (Jensen m.fl, 1992). Jern-fosfor forholdet (Fe:P) i sedimentet (øverste 10 cm) i Loldrup Sø er ca. 16 (gns. af 3 stationer). På station L1 og L2 er vægtforholdet over 20, mens det

kun er ca. 12 på station L3. Det indikerer en god kapacitet til jernbinding af fosfor i sedimentet i Loldrup Sø i de lavvandede områder (L1 og L2), hvor der normalt er iltede forhold ved bunden, mens station L3 adskiller sig markant ved en ringere bindingskapacitet for fosfor generelt og i særdeleshed, når der er forringede iltforhold i bundvandet om sommeren.

6.1.2 Mobil fosforpulje i sedimentet

Ifølge vejledningen til sørestaurering (Søndergaard m.fl., 2015) skal den potentielle mobile fosforpulje i sedimentet fastlægges, inden en eventuel kemisk fældning af fosfor kan tages i brug, og for at fældningskemikaliet kan doseres i den rette mængde. Den potentielt mobile P-pulje er summen af total-P i vandfasen og mobilt P i sedimentet. Puljen i sedimentet udregnes ifølge vejledningen ud fra mindst 3 stationer i søen. Doseringen af aluminium eller Phoslock beregnes efter puljen i sedimentet ned til mindst 10 cm's dybde.

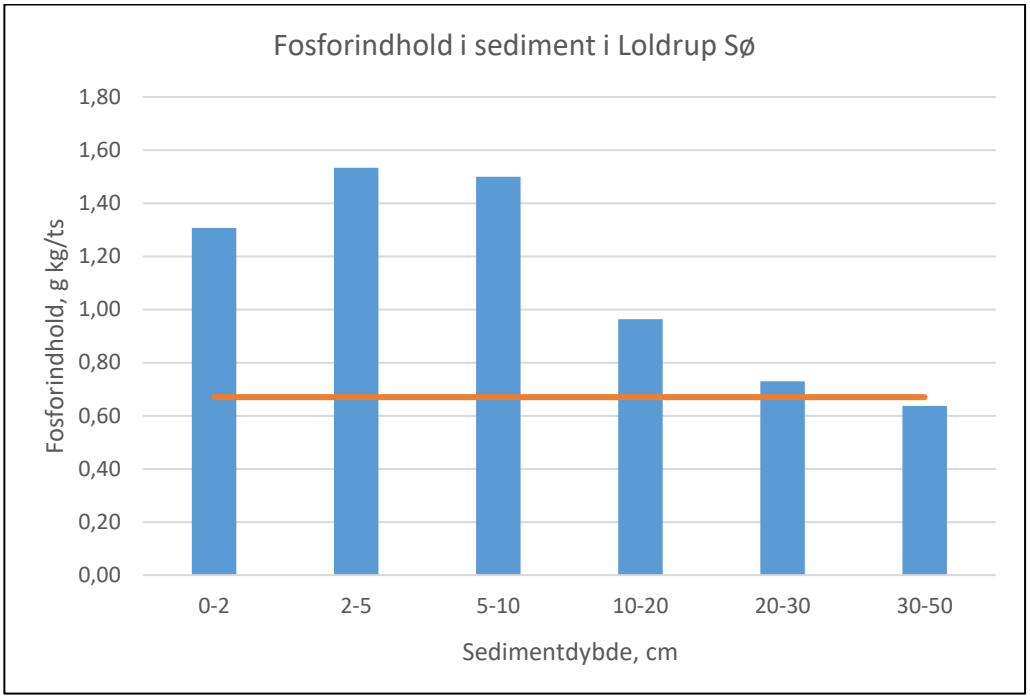
En metode fremgår af vejledningens bilag 1, hvor puljede delprøver af sediment undersøges for porevands-P, jernbundet P, og NaOH-ekstraherbart organisk P (metode 1). Denne type analyser er dog ikke foretaget på sedimentprøverne i 2018 eller tidligere.

Ifølge vejledningen kan man alternativt bruge TP_{sed}-profilen (metode 2) til en simpel bestemmelse af potentielt mobilt P, idet forskellen på gennemsnittet af TP (totalfosfor) i de øverste 10 cm, og gennemsnittet af TP i de dybere, mere stabile lag med et naturligt lavere fosforindhold repræsenterer den potentielt mobile fosforpulje i sedimentet.

Ligeledes giver en empirisk formel baseret på TP_{sed} i de øverste 10 cm et godt estimat for den potentielt mobile fosforpulje i sedimentet (metode 3).

Metode 2:
For hver station antages det, at fosforindholdet i den dybeste fraktion (20-50 cm) repræsenterer den ikke mobile P-pulje, mens indholdet over denne basisværdi i hver fraktion svarer til en mobil P-pulje. Figur 6.1.2 viser således fosforindholdet for TP på de 3 stationer i hvert dybdeinterval. De røde søjler viser gennemsnittet for den nederste fraktion (baggrundsværdien svarende til svagt kulturpåvirket sediment).

Gennemsnittet (vægtet) for de øverste 10 cm på de tre stationer er 1,47 mg P/g ts, som fratrækkes baggrundsværdien på 0,67 mg P/g ts. Det giver en mobil P-pulje på på 0,80 mg P/g ts i de øverste 10 cm af sedimentet.



Figur 6.1.3: Fosforpuljer i sedimentlag i Loldrup Sø på 3 stationer. Blå søjler viser det vægtede gennemsnit af fosforpulje på de tre stationer og den røde linje gennemsnittet for sedimentdybden 30-50 cm svarende til baggrundsværdien (svagt kulturpåvirket sediment).

Metode 3:
Ved metode 3 beregnes puljen af mobilt fosfor ud fra følgende formel, der gælder for lavvandede søer:

*Mobilt P = -24,690+0,830*TP_{sed} (TP_{sed} i µmol P/g tørstof).*

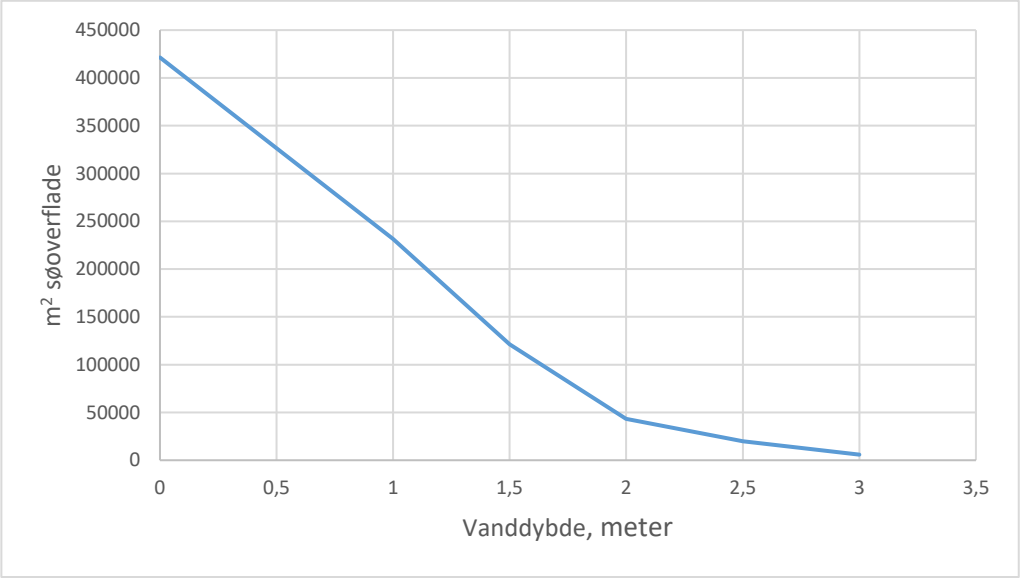
TP_{sed} i de øverste 10 cm af sedimentet på gennemsnitligt 1,47 mg P/g ts omregnes til 46 µmol P/g ts. Ved anvendelse af ovenstående model fås en mobil P-pulje på 13 µmol P/g ts svarende til 0,42 mg P/g ts i de øverste 10 cm af sedimentet, dvs ca. halvt så meget som beregnet med model 2.

Som udgangspunkt for de videre beregninger af den mobile fosforpulje anvendes beregningen baseret på de målte data ved metode 2 på 0,80 mg P/g ts. Det skal nævnes, at der er en afvigelse mellem den målte og modelbestemte mobile fosforpulje på 40 % for metode 2 og 79 % for model 3 ved et mobilt fosforindhold på under 0,87 mg P/g ts som i Loldrup Sø (Flindt m.fl., 2015).

Ud fra den målte tørstofprocent i hver fraktion og under antagelse af, at volumen/vægt relationen i sedimentet er 1:1,1 og med et vægtet gennemsnitligt tørstofindhold i de øverste 10 cm af sedimentet på ca. 10 %, kan der herefter beregnes en arealbaseret mobil P-pulje ud fra den mobile P-pulje i sedimentet på 8,19 g P/m^2 sedimentoverflade.

Under antagelse af, at de tre sedimentstationer repræsenterer hele søarealet, kan der med en mobil P-pulje på 8,9 g P/m^2 beregnes en mobil fosforpulje i Loldrup Sø på i alt 3.700 kg P. Andelen af fosfor i vandfasen, der stammer fra den mobile fosforpulje i sedimentet (og som ikke er medregnet i ovenstående beregning), antages at være 0, da koncentrationerne af fosfor i vandfasen i vinterhalvåret historisk set har været lavere end om sommeren. Sedimentprøverne er som tidligere nævnt udtaget i en vintermåned.

Sediment i områder på lavt vand og sandbund frigiver mindre fosfor end sediment i områder på dybt vand, som er rigt på organisk stof og fosfor, og som udsættes for lave iltkoncentrationer. Som tidligere nævnt i afsnit 4.1 falder iltkoncentrationen i søen om sommeren på dybder større end ca. 1,5 meter. Det fremgår af Figur 6.1.4, som viser relationen mellem søens dybde og areal (hypsografen), at søarealet med dybder over 1,5 meter udgør 121.175 m^2. Hvis dette areal lægges til grund for beregningen fås en mobil fosforpulje på 1.074 kg P. Dette tal vurderes mest realistisk og anvendes i efterfølgende beregninger til dosering ved kemisk fosforfældning.



Figur 6.1.4. Hypsograf med akkumuleret areal som funktion af dybden. (f.eks. viser figuren, at ca. 50.000 m^2 af søoverfladen har en dybde på 2,0 meter og derover.

6.1.3 Alternative beregninger af den interne belastning

I en vurdering af søens egnethed til sørestaurering bør der også indgå en vurdering af den reelle frigivelse af fosfor i søen på grundlag af en analyse af stigninger i fosforkoncentrationer i søvandet om sommeren fratrukket den eksterne tilførsel i samme periode. Denne fremgangsmåde er dog ikke mulig at anvende i Loldrup Sø på grund af manglende data om månedlig tilførsel og fraførsel af fosfor og mangel på nyere vandkemidata i søen.

Som alternativ kan der anvendes en modelberegning af frigivelse af fosfor fra søsedimenter, der er opstillet på baggrund af laboratorieforsøg med måling af frigivelse af fosfor fra intakte sedimentkerner fra 30 danske søer og sedimentets indhold (i de øverste 10 cm) af Fe:P forholdet (vægtbasis) (Flindt m.fl., 2015).

I søsediment med et jernindhold mellem 12 og 40 som i Loldrup Sø er der fundet følgende sammenhæng:

*12<Fe/P≤40: Flux=5,3571*Fe/P/(-11,0817+Fe/P)*

Fe/P: Beregnet til 16 for hele søen.

Med dette datagrundlag kan der ved brug af modellen beregnes en flux (bruttofrigivelse) af fosfor fra sedimentet på 17,4 mg P/m^2/d. Det ligger indenfor det niveau, som Flindt m.fl. (2015) har fundet ved laboratoriemålinger af fosforflux fra en lang række danske søsedimenter. Frigivelsen af fosfor fra hele søens bundareal på ca. 421.381 m^2 svarer til 7,3 kg P/d eller ca. 1.100 kg P i alt for hele sommerperioden maj-september, hvilket er meget tæt på den førnævnte beregning af den mobile fosforpulje på 1.074 kg P. Hvis arealet med fosforfrigivelse kun omfatter dybder over 1,5 meter er frigivelsen baseret på Fe:P forholdet dog kun 323 kg P, hvilket er lavere end beregnet med metode 2.

6.1.4 Samlet vurdering af den mobile fosforpulje i sedimentet og aflastning til Viborg Nørresø

Den samlede konklusion for dette afsnit er, at sedimentet i de dybere dele af Loldrup Sø indeholder mobilt fosfor, og en del af denne pulje kan frigives til søvandet og til nedstrøms recipienter. Det ses ved de periodisk høje fosforkoncentrationer i søen og både nye og ældre målinger i Nørremølle Å nedstrøms søen. Frigivelsen af fosfor fra sedimentet fremmes af høje temperaturer og periodevis lave iltkoncentrationer på dybder over ca. 1,5 meter. Frigivelsen forstærkes yderligere af periodisk høje pH-værdier, ligesom mineralisering af organisk bundet fosfor og resuspension af næringsrigt overfladesediment fra f.eks. fødesøgende fisk (især brasen) ved bunden kan øge frigivelsen.

Frigivelse af fosfor fra sedimentet er således en medvirkende årsag til, at søens målsætning ikke kan opfyldes på kort sigt og stadig belaster nedstrøms recipienter som Viborg Nørresø med en betydelig mængde fosfor i de kritiske sommermåneder.

Størrelsen af den potentielt mobile fosforpulje i Loldrup Sø fastsættes til 1.074 kg P og omfatter sediment på dybder større end 1,5 meter.

Der er tidligere beregnet en nuværende årlig fosfortransport ud af Loldrup Sø på ca. 900 kg P/år (Orbicon, 2017). En del af denne fosfortransport skyldes fosforfrigivelse

fra søens sediment. Det er ikke muligt at beregne denne andel uden en massebalance for søen på månedsbasis, men den kan skønnes. Hvis basisniveauet (i vinterhalvåret) for fosfor i Loldrup Sø sættes til 80 µg P/l som årsmiddel (baseret på målinger nedstrøms i Nørremølle Å i 2018 i vintermånederne og Orbicon, 2017) og vandføringen er 7,8 mio. m^3/år kan der skønnes en årlig fosfortransport ud af søen på 625 kg P/år. Det vil sige, at når fosforfrigivelsen fra Rødding Sø og Loldrup Sø ophører, vil tilførslen af fosfor til Viborg Nørresø formentligt falde med ca. 275 kg P/år som gennemsnit. Det indikerer, at kun ca. ¼ af den potentielt mobile fosforpulje i Loldrup Sø transporteres ud af søen. Noget af fosforpuljen vil formentlig ikke blive frigivet eller vil blive tilbageført til sedimentet fra søvandet.

6.2. Rødding Sø

I de følgende afsnit gennemgås resultaterne af prøvetagningen af sediment i Rødding Sø i november 2018. Undersøgelsen er udført efter forskrifterne i Vejledning for gennemførelse af sørestaurering (Søndergaard m.fl., 2015).

Der blev udtaget sedimentprøver på 3 stationer (1 på søens dybeste sted og 2 stationer på middeldybden). Prøvetagningsstationerne fremgår af Figur 6.2.1.

På hver station blev der udtaget tre sedimentsøjler af en længde på op til 50 cm, som efterfølgende blev opskåret i 6 intervaller (0-2 cm, 2-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm og 30-50 cm) og puljet for hvert dybdeinterval. Prøverne blev analyseret hos et akkrediteret laboratorium (Eurofins) for tørstof, glødetab, total-P og total-Fe. Det var ikke muligt at udtage sedimentprøver dybere end til 20 cm på station R1 og R2, da sedimentlaget ikke er tykkere. Under 20 cm findes det gamle tørvelag fra før søen blev retableret.



Figur 6.2.1: Luftfoto af Rødding Sø med placering af prøvetagningsstationer R1, R2 og R3 (maksdybde) til sedimentanalyse. Der findes ingen dybdekort af søen.


Foto: Sedimentsøjle fra Rødding Sø.

6.2.1 Sedimentkarakteristik

Resultaterne af sedimentanalyserne fremgår af Tabel 6.2.1.

Generelt er sedimentet i Rødding i de øverste cm tyndtflydende med et lavt indhold af tørstof (stort vandindhold) og et højt indhold af organisk stof (stort glødetab). Fra 10

cm´s dybde og nedefter bliver sedimentet mere fast, men stadig med et højt indhold af organisk stof. På station R3 er der i dybdeintervallet 30-50 cm et mere mineralsk sediment (sand) med et markant lavere indhold af organisk stof.

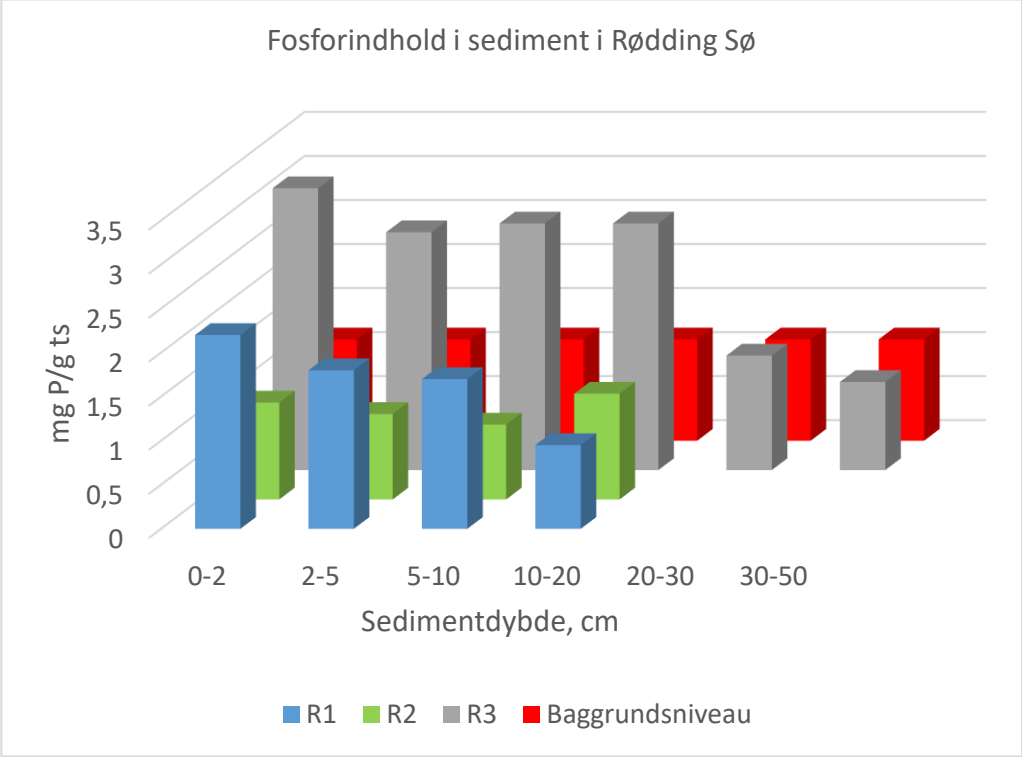
Fosforindholdet i sedimentet har et vægtet gennemsnit på 1,64 mg P/g ts i de øverste 10 cm for de tre stationer. Fosforindholdet er relativt ensartet ned til 20 cm, hvilket er atypisk for danske søer, hvor man typisk ser et fald med dybden. Det skyldes formentlig, at søen har et nydannet og relativt homogent sediment, som delvist består tidligere dyrkningslag.

Station R1 viser et moderat fosforindhold, mens station R2 generelt har et lavt fosforindhold i alle dybder. Station R3 har et væsentligt højere indhold end de to andre stationer i alle sedimentdybder i de øverste 20 cm, Figur 6.2.2, men et lavt fosforindhold i dybdeintervallet 20-50 cm. Baggrundsniveauet i sedimentet er vurderet til 1,15 mg P/g ts svarende til niveauet i 20-50 cm´s dybde på station R3.

Tabel 6.1.1: Resultater af sedimentanalyser på 3 stationer i Rødding Sø i forskellige dybdeintervaller.

	Tørstof, %	Glødetab, % af tørstof	Total-P, mg P/g ts
Station R1			
0-2 cm	12	19	2,20
2-5 cm	19	19	1,80
5-10 cm	18	21	1,70
10-20 cm	35	16	0,95
20-30 cm	-	-	-
30-50 cm	-	-	-
Station R2			
0-2 cm	29	14	1,10
2-5 cm	30	17	0,97
5-10 cm	24	19	0,85
10-20 cm	24	19	1,20
20-30 cm	-	-	-
30-50 cm	-	-	-
Station R3			
0-2 cm	8	26	3,20
2-5 cm	11	25	2,70
5-10 cm	12	25	2,80
10-20 cm	15	24	2,80
20-30 cm	36	-	1,30
30-50 cm	46	16	1,00

Fosforindholdet i sedimentet i Rødding Sø er i den lave ende for danske søer, men er ikke atypisk. Gennemsnittet for danske søer er således ca. 2,0 mg P g/ts i de øverste 10 cm og 1,0 mg P/g ts i lag dybere end 20-30 cm (Søndergaard m.fl., 1996). I senere analyser af sedimentdata fra 216 danske søer er der fundet et gennemsnitligt fosforindhold på 2,1 mg P/g tv med en medianværdi på 1,6 mg P/g tv i de øverste 0-2 cm (Søndergaard m.fl., 2007).



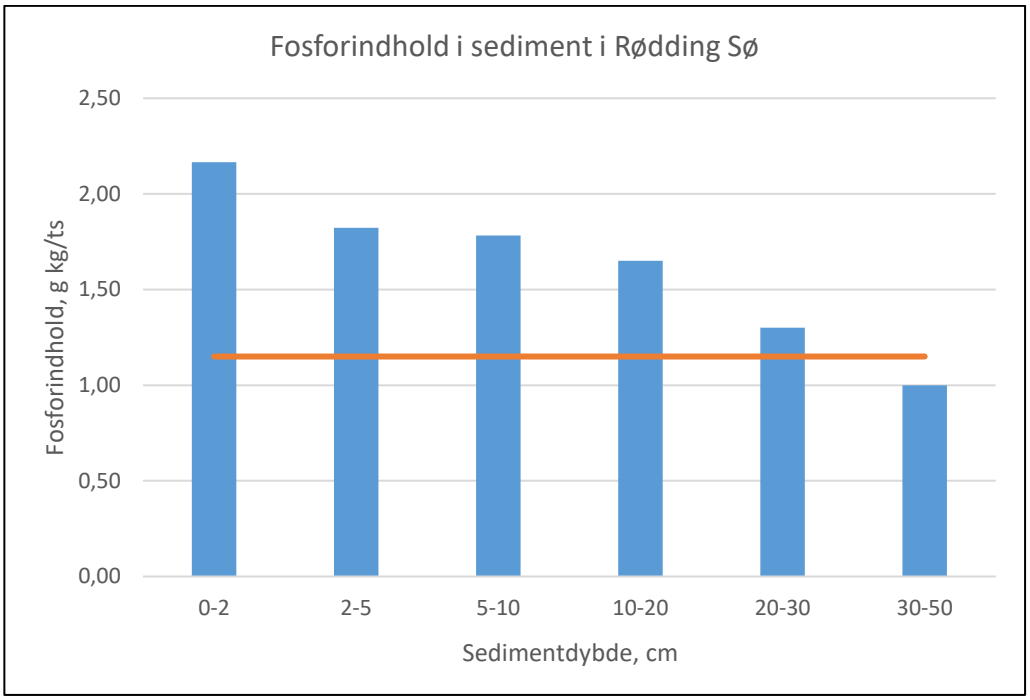
Figur 6.2.2: Fosforindhold på de tre stationer i Rødding Sø fordelt på dybdeintervaller i sedimentet. Røde søjler viser det beregnede baggrundsniveau (svagt kulturpåvirket sediment).

6.2.2 Mobil fosforpulje i sedimentet

Ifølge vejledningen til sørestaurering (Søndergaard m.fl., 2015) skal den potentielle mobile fosforpulje i sedimentet fastlægges, inden en eventuel kemisk fældning af fosfor kan tages i brug, og for at fældningskemikaliet kan doseres i den rette mængde. Den potentielt mobile P-pulje er summen af total-P i vandfasen og mobilt P i sedimentet. Puljen i sedimentet udregnes ifølge vejledningen ud fra mindst 3 stationer i søen. Doseringen af aluminium eller Phoslock beregnes efter puljen i sedimentet ned til mindst 10 cm's dybde. Der anvendes metode 2 eller 3 som beskrevet i afsnit 6.1.2.

Metode 2:
For hver station antages det, at fosforindholdet i den dybeste fraktion (20-50 cm) repræsenterer den ikke mobile P-pulje, mens indholdet over denne basisværdi i hver fraktion svarer til en mobil P-pulje. Figur 6.2.3 viser således fosforindholdet for TP på de 3 stationer i hvert dybdeinterval. De røde søjler viser gennemsnittet for den nederste fraktion (tilnærmelsesvist baggrundsværdien) på station R3, idet der ikke er nået en baggrundsværdi i sedimentet indenfor 50 cm på station R2 og R3.

Gennemsnittet (vægtet) for de øverste 10 cm på de tre stationer er 1,64 mg P/g ts, og herfra fratrækkes baggrundsværdien på 1,15 mg P/g ts. Det giver en mobil P-pulje på 0,49 mg P/g ts eller i de øverste 10 cm af sedimentet. Det vurderes, at den mobile P-pulje på sedimentdybder større end 20 cm er tæt på 0 på alle tre stationer.



Figur 6.2.3: Fosforpuljer i sedimentlag i Rødding Sø på 3 stationer. Blå søjler viser det vægtede gennemsnit af fosforpulje på de tre stationer og den røde linje gennemsnittet for sedimentdybden 30-50 cm svarende til baggrundsværdien (svagt kulturpåvirket sediment).

Metode 3:
Ved metode 3 beregnes puljen af mobilt fosfor ud fra følgende formel, der gælder for lavvandede søer:

*Mobilt P = -24,690+0,830*TP_{sed} (TP_{sed} i µmol P/g tørstof).*

TP_{sed} i de øverste 10 cm af sedimentet på gennemsnitligt 1,64 mg P/g ts omregnes til 50,8 µmol P/g ts. Ved anvendelse af ovenstående model fås en mobil P-pulje på 17,5 µmol P/g ts svarende til 0,56 mg P/g ts i de øverste 10 cm af sedimentet, dvs. lidt højere end beregnet med model 2.

Som udgangspunkt for de videre beregninger af den mobile fosforpulje anvendes beregningerne fra metode 2 på 0,49 mg P/g ts. Gennemsnittet trækkes meget op af R3. Det skal nævnes, at der er en afvigelse mellem den målte og modelbestemte mobile fosforpulje på 40 % for metode 2 og 79 % for model 3 ved et mobilt fosforindhold på under 0,87 mg P/g ts som i Rødding Sø (Flindt m.fl., 2015).

Ud fra den målte tørstofprocent i hver fraktion og under antagelse af, at volumen/vægt relationen i sedimentet er 1,1 g/cm^3 og med et vægtet gennemsnitligt tørstofindhold i de øverste 10 cm af sedimentet på ca. 17,3 %, kan der herefter beregnes en arealbaseret mobil P-pulje ud fra den mobile P-pulje i sedimentet på 10,1 g P/m^2 sedimentoverflade, hvilket er højere end i Loldrup Sø (8,9 g P/m^2).

Rødding Sø er en lavvandet sø med dybder på under 2,5 meter i hele søen, og som i Loldrup Sø er der ikke et ensartet sediment. Det største indhold af mobilt fosfor findes i de dybe områder af søen, hvor sedimentdannelsen er størst. Det skønnes, at kun dybder over 1 meter repræsenterer områder med væsentlige puljer af mobilt fosfor svarende til ca. halvdelen af søarealet (106.000 m^2). Med en mobil P-pulje på 9,3 g P/m^2 kan der herefter beregnes en mobil fosforpulje i Loldrup Sø på i alt 990 kg P, men tallet er meget usikkert.

Andelen af fosfor i vandfasen, der stammer fra den mobile fosforpulje i sedimentet (og som ikke er medregnet i ovenstående beregning), antages at være 0, da koncentrationerne af fosfor i vandfasen i vinterhalvåret historisk set har været lavere end om sommeren. Sedimentprøverne er som tidligere nævnt udtaget i november.

7. MULIGHEDER FOR SØRESTAURERING VED KEMISK FOSFORFÆLDNING

Ifølge vejledningen i sørestaurering fra 2015 (Søndergaard m.fl., 2015) bør restaurering ved kemisk fosforfældning i søer kun gennemføres, når en række kriterier er opfyldt, og alle disse punkter skal derfor godtgøres og verificeres i undersøgelsen. Eventuel fosforfældning foretages ved anvendelse af to fældningsmidler; aluminiumsalte eller det modificerede lerprodukt Phoslock. Kriterierne for anvendelse af kemisk fosforfældning fremgår af nedenstående punkter a-f:

a) Søens P-dynamik er præget af intern P-belastning, og søens P-pulje udvaskes ikke eller kun meget langsomt. Typisk sker der kun en ringe transport af P ud af søen om sommeren pga. ringe vandføring. Aluminiumbehandling af søer bør kun bruges til at immobilisere overskud af P i søvandet samt den pulje af P i sedimentet, som kan frigives til søvandet. Aluminium bør altså ikke bruges i søer for at skabe et fældningsbassin for P tilført fra oplandet.

På trods af, at der er ophobet en stor fosforpulje, må den forventes at blive udvasket relativt hurtigt, idet gennemstrømningen af søerne er stor – opholdstiden er 0,26 og 0,085 år for henholdsvis Rødding og Loldrup Sø. Almindeligvis responderer en lavvandet sø fuldt ud på en belastningsreduktion i oplandet efter ca. 10 opholdstider. Det betyder, at det vil tage 2-3 år at skylle den mobile fosforpulje ud, når den nødvendige belastningsreduktion er gennemført.

En aluminiumbehandling bør først igangsættes efter den nødvendige belastningsreduktion i oplandet er gennemført, hvilket ikke er tilfældet i Loldrup Sø

På grund af ovenstående forhold er betingelse a) ikke tilstrækkeligt opfyldt. Fosfor ses udvasket, hvilket også tyder på, at søerne af sig selv vil nå målopfyldelse for fosfor efter tilstrækkelige indsatser overfor fosfortilførslen fra søernes oplande (se også nedenstående punkt b).

b) Det skal være sandsynligt, at P-niveauet efter behandlingen kan overholde de til målopfyldelse svarende P-niveauer angivet i vandområdeplanen.

Afsnit 3 viser, at fosfortilførslen til Rødding og Loldrup Sø skal reduceres med henholdsvis 80 og 605 kg fosfor pr år, før søerne efter en restaurering kan opnå en fosforkoncentration på 53 µg P/l som sommergennemsnit svarende til god økologisk tilstand for søtypen. Reduktionskravet svarer til ca. 2/3-dele af den nuværende belastning. Dermed er kriterie b) ikke opfyldt, og vil først kunne anses opfyldt efter en væsentlig belastningsreduktion fra oplandet.

c) En sø kan også behandles, hvis behandlingen kan føre til målopfyldelse i nedstrøms beliggende søer, og så behøver kravet om målopfyldelse ikke nødvendigvis at

være opfyldt i den behandlede sø. Der kan således forekomme en situation, hvor en behandling ikke medfører målopfyldelse i den behandlede sø; men hvor behandlingen betyder, at søen ophører med at afgive P til en nedstrøms beliggende sø, som derved bliver i stand til at opfylde målsætningerne.

Denne situation er aktuel for Viborg Nørresø, idet en reduktion af fosforfrigivelsen fra Loldrup Sø vil bringe Viborg Nørresø nærmere målopfyldelse, men målbelastningen vil ikke kunne nås uden andre fosforreducerende tiltag i oplandet.

d) Søens alkalinitet er højere end 1 meqv L-1. Polyaluminiumklorid er opløst i saltsyre og dannelsen af Al(OH)3 ud fra Al3+ er yderligere en syredannende proces. Fældning af Al(OH)3 sker bedst i pH-intervallet 6-6,5. I søer med en lavere alkalinitet end 1 meqv L-1 er der risiko for, at bufferevnen er for lav og at pH-værdi efter tilsætning bliver lavere end dette. I så fald vil man have en høj restkoncentration af Al3+, Al(OH)2+ og Al(OH)2+, som alle er særdeles toksiske ioner. Phoslock virker også ved lav alkalinitet, men hvis alkaliniteten er lavere end 0,8 mækv/l anbefales det foreløbigt, at der udføres en test af fældningsegenskaberne i det pågældende vand for at se, hvor hurtigt La i suspension falder til <10 µg/l.

Alkaliniteten i de to søer er større end 1,0 mækvl/l og overholder derfor kriterie d om en tilstrækkelig høj alkalinitet (>0,8 mækvl/l).

e) Søer med lagdeling eller med forholdsvis lille bølgepåvirkning af sedimentet (relativ stor dybde til trods for manglende lagdeling eller lille påvirkning af vind) er egnede til aluminiumbehandling, hvis kriterium f også er opfyldt. Målet er at undgå resuspension af Al flokken og evt. efterfølgende omflytning. Både Phoslock og Al er følsomme overfor høj turbulens i udbringningssituationen og op til to uger efter for Phoslock og to måneder efter for Al. Phoslock synker langsomt og kan derfor transporteres med vandstrømme i overfladen (ved blæst), mens Al-hydroxid danner en flok, som meget let resuspenderes, indtil den kondenserer i løbet af de første måneder.

Begge søer er relativt lavvandede, i gennemsnit 1-1,5 meter, og vindeksponerede. Ophvirvling af sedimentet sker under stærk blæst, hvor bølger vil skabe strøm frem og tilbage hen over sedimentet. Ved storm (30 m/sek) vil bølger blot 250 meter fra kysten være store nok til at kunne ophvirvle sediment på 1,5 meters dybde. Loldrup Sø er ca. 1.000 x 500 meter, og langt det meste af sedimentoverfalden vil dermed være udsat for ophvirvling ved storm. Midten af søen er det sted, hvor vinden, uanset retning, har kortest opmarch-afstand fra bredden. Der er en opmarch-afstand på 500 meter fra nord og syd. Efter 500 meter med blæst på 30 m/sek vil kun sediment under 2,5 meters dybde være uforstyrret. Det er dermed en meget lille del af søen, der vil have uforstyrret sediment ved storm. Betingelse e) er dermed ikke opfyldt. Det skal her nævnes, at nedfældning af aluminium som har været praktiseret i svenske søer, ikke vil kunne løse dette problem, da det øverste sedimentlag under alle omstændigheder vil være let resuspenderbart

f) Søer, hvor der ikke vurderes at være risiko for, at pH i vandet over den aluminium-behandlede søbund overstiger 8,5 i de første år efter behandling (hvilket kan føre til genopløsning af udfældet Al), er velegnede. Ved Al-behandling af lavvandede søer kan der være risiko for, at udfældet Al genopløses ved høj pH i forbindelse med resuspension af sediment. Det skal vurderes om et indgreb i fiskebestanden forud for Al-behandling kan afværge risikoen, så Al-behandlingen kan gennemføres alligevel.

pH er ofte højere end 8,5 om sommeren i begge søer, og derfor bør kemisk fosforfældning med aluminium ikke foretages om sommeren men i vinterhalvåret, når ph er ca. 8. Det må forventes, at pH falder efter tilsætning af aluminium.

7.1. Konklusion vedrørende egnethed til kemisk fosforfældning

Med baggrund i målinger i 2018 i Nørremølle Å nedstrøms Rødding Sø vurderes det, at det nuværende fosforbidrag fra Rødding Sø udgør ca. 20 % af den samlede tilførsel af fosfor til Loldrup Sø. Da aflastningen af fosfor fra Rødding Sø ser ud til at være aftagende vurderes det ikke nødvendigt at foretage kemisk fosforfældning i Rødding Sø.

Loldrup Sø har et relativt lavt fosforindhold i sedimentet i det meste af søen men dog alligevel en mobil fosforpulje, der i gennemsnit aflaster ca. 275 kg P/år nedstrøms til Viborg Nørresø. På grund af vandets korte opholdstid i søen er aflastningen af den mobile fosforpulje relativt hurtig og indsvingningstiden til en ny ligevægt for fosfor vurderes at være 2-3 år. Kemisk fosforfældning vil begrænse fosforfrigivelsen fra den nuværende mobile fosforpulje i sedimenterne her og nu, men uden en indsats overfor fosforkilder i oplandet til Loldrup Sø, vil fosforkoncentrationen i søen stige igen i takt med, at der dannes nye fosforholdige sedimentlag, medmindre behandlingen gentages som en form for pleje. Metoden kan således ikke erstatte en reduktion af fosfortilførslen i Nørremølle Å systemet med henblik på opfyldelse af miljømålene i Vandområdeplan 2015-2021. Risikoen for symptombehandling og tilbagefald efter en kort årrække forstærkes af, at både Rødding Sø og Loldrup Sø er for lavvandede til at sikre en ensartet udbringning og aflejring af aluminium eller Phoslock.

Orbicon kan derfor ikke anbefale, at Rødding Sø og Loldrup Sø restaureres ved kemisk fosforfældning af følgende grunde:

- Sedimentets fosforindhold i Rødding Sø er tæt på gennemsnittet for lavvandede danske søer, mens Loldrup Sø har et fosforindhold lavere end gennemsnittet, især på de to prøvetagningsstationer, der repræsenterer gennemsnitsdybden på ca. 1 meter.

- Opfyldelse af målsætningen i Vandområdeplan 2015-2021 i Loldrup Sø kræver en stor belastningsreduktion, ca. 2/3-dele af den nuværende belastning. Uden denne reduktion vil fældningsmidlet efter en restaurering ved kemisk

fosforfældning blive opbrugt, og søerne vil igen begynde at aflaste fosfor, medmindre behandlingen gentages.

- Efter gennemførsel af den nødvendige belastningsreduktion vil søerne i løbet af ca. 2-3 år have aflastet hovedparten af den mobile fosforpulje og nå målopfyldelse for fosfor, hvorfor restaurering ved kemisk fosforfældning i Rødding Sø og Loldrup Sø er mindre relevant.

- Rødding Sø og Loldrup Sø er lavvandede og uden et tæt plantedække. Det medfører, at sedimentet under kraftig blæst vil blive ophvirvlet og fældningsmidlet omlejret med dårligere binding af den mobile fosforpulje til følge. Fiskearten brasen findes i Loldrup Sø, og fiskene vil under deres fødesøgning ved sedimentoverfladen bidrage til ophvirvling og omlejring af sediment og aluminiumsflock.

8. PERSPEKTIVERING OG INDSATSMULIGHEDER

Anbefalingen i afsnit 7 om ikke at gennemføre kemisk fosforfældning i Rødding Sø og Loldrup Sø medfører et behov for at pege på andre indsatser. Som tidligere nævnt er det af afgørende betydning for opnåelse af en god økologisk tilstand i Loldrup Sø og Viborg Nørresø, at den eksterne tilførsel af fosfor fra søernes afstrømningsoplande reduceres som anført i Vandområdeplan 2015-2021. Herefter vil der gå ca. 2-3 år før Loldrup Sø er kommet i balance med den nye lavere fosfortilførsel, hvilket vil medføre en lavere fosforkoncentration i Nørremølle Å og dermed en lavere fosfortilførsel til Viborg Nørresø. Man kan overveje at gennemføre hurtige forbedringer ved f.eks. afgravning af de øverste ca. 20-50 cm sediment i Rødding Sø og opfiskning i Loldrup Sø, men igen skal det understreges, at det ikke kan erstatte tiltag over den eksterne fosfortilførsel. En brutto liste over tiltag fremgår af nedenstående. Mange af tiltagene er tidligere beskrevet og kvantificeret med prisoverslag i Orbicon, 2017:

8.1. Lavbundsprojekt mellem Rødding Sø og Loldrup Sø

Forundersøgelse og om muligt realisering af et lavbundsprojekt mellem Rødding Sø og Loldrup Sø, som sikrer største mulig oversvømmelse af de ånære arealer med henblik på sedimentation af fosfor i åvandet

Pris; ukendt, men både forundersøgelse og realisering kan måske finansieres af Landbrugsstyrelsen.

8.2. Reduktion af tilførsel af spildevand fra Rødding til Rødding Sø

Reducere tilførslen af spildevand fra Rødding til Rødding Sø fra regnbetingede udledninger (U405) ved øget bassinkapacitet i Rødding ved U 405.

Prisoverslag; 0,05 mio. kr. ekskl. moms.

8.3. Etablering af minivådområder

Gennemføre etablering af minivådområder optimeret til fosforfældning i sidevandløb og dræn til Stigsbæk og Nørremølle Å.

Prisoverslag; 1,7 mio. kr. ekskl. moms.

8.4. Forbedret rensning af spildevand fra spredt bebyggelse.

Forbedret rensning af spildevand fra spredt bebyggelse, der i dag har utilstrækkelig fosforrensning på deres ejendom.

Prisoverslag; 0,6-2,5 mio. kr. ekskl. moms.

8.5. Udtagning af landbrugsjord

Opkøb og ekstensivering af landbrugsjorde, f.eks. i bufferzoner langs vandløbene eller ved skovrejsning i sårbare indvindingsområder for drikkevand.

Ikke prissat, afhænger af jordpriser og støtteordninger.

8.6. Sedimentfjernelse i Rødding Sø

Tørlægge Rødding Sø og afgrave 20-50 cm fosforholdigt sediment. På to af stationerne (R1 og R2) er der et lag på ca. 20 cm sediment, før man når mere fast bund. På station R3 er der et lag på ca. 50 cm sediment. Søen har et areal på 21,2 ha. Under antagelse af, at stationerne R1 og R2 tilsammen repræsenterer 2/3 af søarealet og station R3 repræsenterer 1/3 af søarealet kan sedimentmængden skønnes til 65.000 m^3 (vådvægt). Hvis Viborg Kommune ønsker at gå videre med et projekt til sedimentfjernelse i Rødding Sø, bør sedimentlaget kortlægges mere præcist i en detailprojektering, ligesom der skal foretages analyser af relevante forurenende stoffer med henblik på en vurdering af håndteringen og anvendelsesmulighederne af sedimentet i forhold til gældende lovgivning.

Vedr. håndteringen af sedimentet antages foreløbigt 3 overordnede muligheder:

- Sedimentet er lettere forurenet jf. bekendtgørelse om lettere forurenet jord (BEK nr. 554 af 19/05/2010). Det må påregnes transporteret til godkendt modtageanlæg.
- Sedimentet er lettere forurenet/rent. Det kan anvendes lokalt i f.eks. støjvold eller tilsvarende, såfremt der er afsætningsmuligheder.
- Sedimentet er ”rent” og overholder kravværdierne i bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål (BEK nr. 1001 af 27/06/2018). Det kan anvendes lokalt på landbrugsjord/landscaping, såfremt der er afsætningsmuligheder.

Forarbejderne ved håndteringen af sedimentet forud for fjernelsen antages at være nogenlunde ens og bestående af:

- Tømning af søens vand ved en midlertidig nedtagning af opstemningen i afløbet og etablering af sandfang, adgange mv.
- Naturlig afvanding af søsedimentet i søfladen hen over sommeren.
- Evt. supplerende afvanding ved lokale grøfter mm.

De samlede håndterede mængder udgør i størrelsesordenen 65.000 m^3 vådvolumen på en samlet søflade på ca. 21 ha. Der påregnes en volumenreduktion ved udtørring/afvanding af sedimentfladen på 30-40%. Ved en skønnet volumenvægt på ca. 1,4 t/m^3 antages en samlet mængde, som afrømmes og fjernes på ca. 42.000 m^3 eller ca. 60.000 ton.

Hvis sedimentet skal transporteres til et af de godkendte modtageanlæg, skal sedimentets forureningstilstand/fordeling og mulige aftagere afsøges detaljeret, da omkostningsniveauet er meget følsom på især modtageafgiften og mængden, men også transportafstanden. Som beregningseksempel er anvendt et godkendt modtageanlæg indenfor transportafstand på ca. 1 time og en standard afgift på 130 kr/ton. Det angivne omkostningsniveau nedenfor skal opfattes som meget usikkert, og må derfor alene anvendes som et retningsgivende niveau.

Hvis sedimentet kan anvendes lokalt, f.eks. til indbygning i støjvolde, landscaping eller udbringning på landbrugsjord, vil omkostningerne være betydeligt lavere. I nedenstående skema er angivet prisskøn på omkostningsniveau ved de 3 løsninger, nævnt ovenfor:

Det fremgår heraf, at omkostningerne kan skønnes til 3-5 mio. kr. for det billigste scenarie og 12-17 mio. kr. i det dyreste scenarie. Ved at gennemføre en detailprojektering vil den reelle pris kunne vurderes væsentligt bedre, men det vil stadig være tilbud fra entreprenører, der fastsætter den endelige pris.

Metode	Arbejdsplads og håndtering af sedi-ment inden fjernelse 1.000 kr. ekskl. moms	Fjernelse og håndte-ring 1.000 kr. ekskl. moms	Sum, ni-veau. 1.000 kr. ekskl. moms
A: Sedimentet afvandes og fjernes til godkendt modta-geanlæg.	2.000 - 3.000	10.000 – 14.000	12.000 - 17.000
B: Sedimentet afvandes og fjernes til lokal udnyttelse i støjvolde ell. lign.	2.000 - 3.000	3.000 - 4.000	5.000 – 7.000
C: Sedimentet afvandes og udnyttes lokalt på land-brugsjord, landscaping mm.	2.000 - 3.000	1.000 – 2.000	3.000 – 5.000

8.7. Biomanipulation ved opfiskning af fredfisk

Gennemføre et opfiskningsprojekt i Loldrup Sø og eventuelt Rødding Sø. Det vil have en umiddelbar effekt, som dog kun vil holde ca. 2-3 år på grund af genindvandring af fisk fra Viborg Nørresø og søens fortsatte høje fosforniveau. Opfiskning kan eventuelt være en plejeforanstaltning, der gentages med nogle års mellemrum for at holde søen klarvandet og næringsstofindholdet nede som det skete ved den seneste opfiskning omkring år 2000. Prisen er baseret på vejledende referenceværdier for restaurering ved biomanipulation (jf. BEK nr. 1287 af 07/11/2016) samt sammenlignede priser på et konkret opfiskningsprojekt i Dystrup og Ramten Søerne i Norddjurs Kommune.

Prisoverslag for opfiskning i Loldrup Sø (inklusiv monitering af fisk og vandkemi); 0,90 mio. kr. ekskl. moms

Prisoverslag for opfiskning i Rødding Sø (inklusiv monitering af fisk og vandkemi); 0,53 mio. kr. ekskl. moms.

Inden et eventuelt opfiskningsprojekt iværksættes, bør der foretages en revurdering af fiskebestanden baseret på den nyeste fiskeundersøgelse fra NOVANA programmet, og problemstillingen med indvandrende fisk via Nørremølle Å bør afklares med DTU

Aqua. Hvis Rødding Sø tørlægges i forbindelse med afgravning af sediment, vil søens fiskebestand under alle omstændigheder flygte fra søen eller dø.

9. REFERENCER

By- og Landskabsstyrelsen, Miljøstyrelsen. Teknisk baggrundsnotat til Vandplan 1.5 Randers Fjord.

Flindt, M, C. Jørgensen & H.S. Jensen 2015: Den interne fosforbelastning i danske søer og indsvingningstiden efter reduktion af ekstern fosfortilførsel. Naturstyrelsen. http://naturstyrelsen.dk/media/168843/model_notat_-intern-belastning-af-soeer-sdu_d-07102015.pdf

Jensen, H.S., Kristensen, P., Jeppesen E. & Skytthe, A. (1992): Iron:phosphorus ratio in surface sediment as an indicator of phophate release from aerobic sediments in shallow lakes. Hydrobiologia 235/236: 731-743.

Jensen, J.P., Søndergaard M., Jeppesen, E., Lauridsen, T.L. & Sortkjær L. (1997): Ferske Vandområder, søer. Faglig rapport fra DMU, nr. 211. 106 s.

Liboriussen, L., Søndergaard, M. & Jeppesen, E. (red.) 2007: Sørestaurering i Danmark. Del I:Tværgående analyser. Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. 88 s. – Faglig rapport fra DMU nr. 636.

Olsen S., Søndergaard, M., Jeppesen, E. Suting Zhau og Wei Li (2016). Spiller kvælstof en rolle for tilstanden i søerne? Vand og Jord. 23. Årgang nr. 2, maj 2016.

Orbicon, 2017: Reduktion af fosfortilførsel til Viborg Nørresø. Skitseprojekt. Rapport udarbejdet for Viborg Kommune.

SVANA, 2016: Sørestaurering. Vejledning om tilskud til kommunale projekter til restaurering af søer under vandområdeplanerne 2015-2021. Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning.

Miljøstyrelsen, 2017a: Belastningsopgørelse for Viborg Nørresø.

Miljøstyrelsen, 2017b: Belastningsopgørelse for Loldrup Sø.

Miljøstyrelsen, 2017c: Belastningsopgørelse for Rødding Sø.

Søndergaard, M., Jensen, J.P., Liboriussen, L. & Nielsen, K. 2003: Danske søer – fosfortilførsel og opfyldelse af målsætninger. VMP III, Fase II. Danmarks Miljøundersøgelser 40 s. - Faglig rapport fra DMU nr. 480. http://faglige-rapporter.dmu.dk

Søndergaard, M. (2007): Næringsstofdynamik i søer – med fokus på fosfor, sedimentet og restaurering af søer. Doktordisputats. Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet.

Søndergaard, M., Lauridsen, T.L., Jensen, H., Egemose, S. & Reitzel, K. 2015. Vejledning for gennemførelse af sørestaurering. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 42 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø ogEnergi nr. 149 http://dce2.au.dk/pub/SR149.pdf

10. BILAG

10.1. Bilag 1: Belastningsopgørelse for Loldrup Sø (Miljøstyrelsen, 2017)

Miljøstyrelsen - 15-5-2017

Belastningsopgørelse for Loldrup Sø

I Vandområdeplan 2015-2021 er beregnet en årlig middelbelastning af en lang række søer, herunder Birkerød Sø. Standardberegningsmetoden er beskrevet i http://svana.dk/media/202543/retningslinjer-vandomraadeplaner-for-anden-planperiode.pdf , og er benyttet ved beregningen.

Anvendt belastning fra punktkilder og åbent land aktuelt (2010-2014)og den ændring i kilderne, der forventes frem imod 2021 (Baseline 2021):

	Fosfor, kg/år	
	Aktuelt 2010-14	Baseline-effekt
Renseanlæg	0	0
Regnbetingede udledninger	10,4	0
Industri	0	0
Dambrug	0	0
Spredt bebyggelse		0
Åbent land incl. spredt bebyggelse	932,5	

Samlet massebalance anvendt i Vandområdeplan 2015-2021

Den beregnede gennemsnitlige tilførsel af vand (for normalperioden 1990-2014) og fosfor i status (2010-2014) og Baseline (2021) fremgår af nedenstående tabel. Forskellen mellem den aktuelle belastning i tabellen ovenfor og den nedenfor angivne statusbelastning skyldes, at den aktuelle belastning i perioden 2010-2014 er "normeret" til middelvandføringen gennem hele perioden 1990-2014.

Tilførsel til sø	Vand, 10^3 m^3		Fosfor, kg/år	
	Status	Baseline	Statusbelastning	Baselinebelastning
Loldrup Sø	5785,5	5785,5	929,4	929,4

På basis af ovenstående data samt data for søen beregnes indløbskoncentration og fosforkoncentration i søen i baseline 2021, dvs. uden yderligere indgreb i forhold til de allerede planlagte. Resultatet fremgår af nedenstående tabel:

Miljøstyrelsen - 15-5-2017

Sø	Qtilløb, 10^3 m^3/år	Ptilløb kg	Søvolumen, 10^3 m^3	Opholdstid, år	P-Indløbs-koncentration, mg/l	Beregnet P År, mg/l (OECD)	Beregnet P Sommer, mg/l (OECD)	P sommer ved målopfyldelse, mg/l	Indsatsbehov overfor ekstern P tilførsel
Loldrup Sø	5785,5	929,4	443,5	0,08	0,161	0,154	0,198	0,053	Ja

Der er således beregnet et indsatsbehov overfor den udefra kommende tilførsel af fosfor på 605 kg P/år

Ved beregning af sammenhængen mellem fosfortilførsel og fosforkoncentration i søen benyttes formlen:

$TP_{sø} = 1{,}095 * TP_{indløb} 1{,}043/(1+Vtw)^{0{,}229}$, OECD modellen jf. Vejledning for gennemførelse af sørestaurering og Trolle et al., 2015.

Hvor $TP_{sø}$ er årsmiddelkoncentrationen i søen (mg/l)
$TP_{indløb}$ er årsmiddelkoncentrationen i indløbet (mg/l), bestemt som den samlede fosfortilførsel til søen divideret med den samlede vandtilførsel.
tw er vandets opholdstid (år).

Denne formel har vist sig generelt at passe bedst på de danske søer (Trolle et al., 2015).

Da fosforkravet sættes til sommermiddelkoncentrationen og ikke til årsmiddelkoncentrationen, er der endvidere behov for omregning fra år til sommerkoncentration. Omregningen afhænger af, om søen er dyb eller lavvandet, og foretages vha. formler i Trolle et al., 2015.

Referencer:

Trolle, D., Søndergaard, M. & Bjerring, R., 2015: Sammenhænge mellem næringsstoftilførsel og søkoncentrationer i danske søer. Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 138.