



SAMMENHÆNGE MELLEM OPLANDS- KARAKTERISTIKA OG TILSTANDEN I SØER UDEN VELDEFINEREDE AFLØB

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 548

2023



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

SAMMENHÆNGE MELLEM OPLANDS- KARAKTERISTIKA OG TILSTANDEN I SØER UDEN VELDEFINEREDE AFLØB

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 548

2023

Martin Søndergaard
Liselotte Sander Johansson
Ane Kjeldgaard

Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 548
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Titel:	Sammenhænge mellem oplandskarakteristika og tilstanden i søer uden veldefinerede afløb
Forfattere:	Martin Søndergaard, Liselotte Sander Johansson & Ane Kjeldgaard
Institution:	Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	April 2023
Redaktion afsluttet:	Februar 2023
Faglig kommentering:	Torben Linding Lauridsen
Kvalitetssikring, DCE:	Signe Jung-Madsen
Sproglig kvalitetssikring:	Anne Mette Poulsen
Ekstern kommentering:	Miljøstyrelsen. Kommentarerne findes her: http://dce2.au.dk/pub/komm/SR548_komm.pdf
Finansiel støtte:	Miljøstyrelsen
Bedes citeret:	Søndergaard, M., Johansson, L.S. & Kjeldgaard, A. 2023. Sammenhænge mellem oplandskarakteristika og tilstanden i søer uden veldefinerede afløb. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 32 s. - Videnskabelig rapport nr. 548 http://dce2.au.dk/pub/SR548.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Søer uden veldefinerede afløb er almindelige i Danmark. Mangel på tilløb og afløb gør det vanskeligt at fastsætte en indsats i de søer, hvor målsætningen ikke er opfyldt. I denne rapport er der estimeret et opland og derefter en række oplandskarakteristika for de enkelte søer, som er sammenholdt med tilstanden i søerne. Formålet var kunne fastsætte indsatser i søernes oplande, som kan forbedre søernes tilstand. Der ses signifikante sammenhænge mellem søtilstand og oplandskarakteristika, f.eks. en positiv sammenhæng mellem andel af dyrket areal og søernes indhold af næringsstoffer, men i alle tilfælde er der tale om svage sammenhænge.
Emneord:	Søer, GIS-analyser, manglende afløb, menneskelig påvirkning
Illustrationer:	Tinna Christensen
Foto forside:	Fuglsang Sø (én af søerne omfattet af analyserne)
ISBN:	978-87-7156-769-4
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	32
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/SR548.pdf

Indhold

Forord	5
1 Sammenfatning	6
2 English summary	7
3 Baggrund og indhold	8
3.1 Baggrund	8
3.2 Arbejdsprocedure	9
4 Data, metoder og analyser	11
4.1 Søtyper og antal søer med estimerede oplande og data	11
4.2 Inputdata fra oplandet (GIS-data)	11
4.3 GIS-analyser	13
4.4 Empiriske analyser mellem opland og søtilstand	14
4.5 Søers tilstand uden menneskelig påvirkning	14
5 Resultater	15
5.1 Udarbejdelse af datasæt	15
5.2 Empiriske analyser mellem opland og søtilstand	15
5.3 Søtilstand uden menneskelig påvirkning	23
6 Konklusioner og anbefalinger	25
6.1 Konklusioner	25
6.2 Anbefalinger	26
7 Referencer	28
8 Bilag	29
8.1 Estimering af oplande til søer uden afløb	29
8.2 Anvendte jordtyper	32

Forord

I denne rapport undersøges det, hvordan tilstanden i søer uden veldefinerede tilløb og afløb kan være påvirket af menneskelige aktiviteter i det opland, søerne ligger i. Analysen er gennemført ved at estimere det topografiske opland omkring søerne og sammenholde GIS-data fra dette opland med målte parametre fra søerne. Rapporten er udarbejdet af Aarhus Universitet på foranledning af Miljøstyrelsen. Miljøstyrelsen har fremsendt datafil med fastlæggelse af søer anvendt i analyserne.

1 Sammenfatning

Mange af de danske søer er uden veldefinerede tilløb og afløb. Det gør det vanskeligt at beregne tilførslen af næringsstoffer og dermed at målrette en indsats i de søer, som ikke opfylder miljømålene i vandområdeplanerne. Et af hovedformålene med denne rapport har været at estimere et opland til disse søer og efterfølgende vurdere, om tilstanden kunne relateres til bestemte oplandskarakteristika, som så kunne danne baggrund for en indsats.

På baggrund af et datasæt fremsendt af Miljøstyrelsen har det været muligt at estimere et opland til i alt 418 søer. For disse søer er oplandet karakteriseret på baggrund af jordbundstyper, arealanvendelse, punktkilder af fosfor og kvælstof, potentielt drænedede arealer samt beregnet tab fra dyrkede arealer af fosfor og kvælstof. I alt blev der fastlagt 12 typer af oplandskarakteristika. Som inputdata for søtilstand blev anvendt sommergennemsnitlige koncentrationer af totalfosfor, totalkvælstof, klorofyl samt undervandsplanternes gennemsnitlige dækningsgrad for de enkelte søer.

Empiriske relationer mellem søtilstand og oplandskarakteristika viste en del statistisk signifikante sammenhænge, men i alle tilfælde var der tale om svage sammenhænge, hvor kun en lille del (<10 %) af søernes tilstand kunne forklares ud fra en bestemt oplandskarakteristik. Der blev således fundet en positiv sammenhæng mellem andelen af dyrket areal i oplandet og søernes indhold af næringsstoffer. Tilsvarende var der en positiv sammenhæng mellem det potentielt drænedede areal i oplandet og indholdet af næringsstoffer. Begge sammenhænge peger på, at ændringer i oplandet kan bidrage til at forbedre tilstanden i søerne.

De generelt svage sammenhænge mellem karakteristika for oplandet og søtilstand indikerer, at søtilstanden i høj grad afhænger af andre forhold, som ikke er undersøgt i dette projekt. Et af disse kunne være tidligere næringstilførsler, som ikke længere finder sted, men stadigvæk påvirker tilstanden. Et andet kunne være interaktioner med grundvandet, hvor en stor kontakt med grundvandet og et højt indhold af næringsstoffer evt. kan påvirke søernes tilstand. Der kan også være tale om naturligt næringsrige søer – evt. via et naturligt højt indhold af næringsstoffer i grundvandet.

Der findes ingen oplysninger om den menneskeligt upåvirkede tilstand (referencetilstanden) i søer uden tilløb/afløb. Et bud på denne tilstand er angivet på baggrund af næringsstof- og klorofylindholdet i de søer, hvor de dyrkede areal er <20 %, og hvor søerne er vurderet som værende i høj eller god økologisk tilstand. Disse søer har generelt lavt næringsstofindhold af både fosfor (median totalfosfor = 0,020 mg/l) og kvælstof (median totalkvælstof = 0,70 mg/l) og lavt indhold af klorofyl (median klorofylindhold = 5,3 µg/l) og må derfor forventes at have klarvandede forhold med et rigt plante- og dyreliv.

I rapporten er der angivet et flowdiagram, der kan anvendes som værktøj til at kvalificere en beslutning om at forbedre tilstanden i de søer uden veldefinerede tilløb/afløb, hvor den økologiske tilstand ikke opfylder målsætningen. Et af værktøjerne kan være at anvende sørestaurering.

2 English summary

Many Danish lakes do not have well-defined inflows and outflows. This makes it difficult to calculate the supply of nutrients and thus to target the efforts for lakes that do not meet the environmental objectives in the water area plans. One of the main aims of this report was to estimate a catchment for these lakes and subsequently assess whether the state of the lake could be related to certain catchment characteristics, which could then form the basis for an effort.

On the basis of a dataset forwarded by the Danish Environmental Protection Agency, it has been possible to estimate a catchment area for a total of 418 lakes. For these lakes, the catchment is characterised on the basis of soil type, land use, point sources of phosphorus and nitrogen, potentially drained areas and calculated losses of phosphorus and nitrogen from cultivated areas. In total, 12 types of catchment characteristics were determined. The summer average concentrations of total phosphorus, total nitrogen, chlorophyll and the average degree of coverage of submerged macrophytes for the individual lakes were used as input data for determination of lake state.

Empirical relationships between lake state and catchment characteristics showed some statistically significant correlations, but in all cases the correlations were weak, i.e. only a small part (<10%) of the state could be explained on the basis of a certain catchment characteristic. A positive correlation was thus found between the proportion of cultivated area in the catchment area and the nutrient concentrations in the lakes. Correspondingly, there was a positive correlation between the potentially drained area in the catchment and the concentration of nutrients. Both correlations point to the fact that changes in the catchment can contribute to improving the state of the lakes.

The generally weak correlations between the characteristics of the catchment area and lake state indicate that the state of a lake largely depends on other conditions that have not been investigated in this project. One of these could be previous nutrient inputs that still affect the lake state. Another could be interactions with the groundwater, where a large contact with the groundwater and a high content of nutrients may possibly affect the state of the lakes. It may also be naturally nutrient-rich lakes – possibly via naturally high nutrient concentrations in the groundwater.

There is no information about the non-human-impacted state (the reference state) in lakes without inlets/outlets. An estimate of this state is given on the basis of the nutrient and chlorophyll concentrations in lakes where the cultivated area is <20% and where the lakes are assessed as being in a high or good ecological state. These lakes generally have low concentrations of both phosphorus (median total phosphorus = 0.020 mg/l) and nitrogen (median total nitrogen = 0.70 mg/l) and low chlorophyll concentrations (median chlorophyll = 5.3 µg/l) and must therefore be expected to have clear water conditions with a rich flora and fauna.

In the report a flow diagram is presented, which can be used as a tool to qualify a decision on improving the state of lakes without well-defined inlets/outlets where the ecological state does not meet the target. One of these tools could be lake restoration.

3 Baggrund og indhold

3.1 Baggrund

Mange af de danske søer, som er målsat i vandområdeplanerne, er uden vel-definerede afløb, og deres hydrologiske og topografiske opland er ofte ukendt. Den eksterne tilførsel af næringsstoffer til disse søer kan derfor ikke umiddelbart beregnes. Dermed er det vanskeligt at fastsætte et indsatsbehov i de af søerne, hvor miljømålene i vandområdeplanerne ikke er opfyldt. Med den baggrund har Miljøstyrelsen (MST) ønsket en analyse af, hvordan den menneskelige påvirkning fra oplandet til disse søer kan vurderes, så det er muligt at fastsætte et eventuelt indsatsbehov og dermed opnå en god økologisk tilstand.

Sammenhænge mellem oplandskarakteristika og tilstand i danske søer er tidligere undersøgt i blandt andet Søndergaard m.fl. (2002), Nielsen m.fl. (2012) og Johansson m.fl. (2018). I Søndergaard m.fl. (2002) fandtes blandt andet en positiv sammenhæng mellem graden af landbrugsintensiv udnyttelse i småsøer og vandhullers nærmeste omgivelser og deres indhold af fosfor og kvælstof, mens der var en negativ sammenhæng mellem omfanget af naturarealer og næringsstofindhold. I Nielsen m.fl. (2012) var én af konklusionerne, at vandkvaliteten i ferskvandssøer påvirkes af landbrugsarealet i hele oplandet, snarere end af landbrugsintensiteten i de å-nære arealer. I Johansson m.fl. (2018) blev det konkluderet, at kortlægningsdata fra et stort antal vandhuller og småsøer ikke kunne afdække nogen statistisk signifikant sammenhæng mellem et indeks for søernes naturtilstand (omfatter en række indikatorer, se Johansson m.fl. (2018)) og vandkemiske forhold eller sigtddybden i søerne. Generelt for de tre nævnte undersøgelser var, at der, hvor der kunne ses statistisk signifikante sammenhænge, var disse sammenhænge svage.

Også internationalt har sammenhænge mellem opland og søtilstand været genstand for analyser. Et nyligt eksempel er Grzybowski m.fl. (2023), hvor den økologiske kvalitet vurderet på baggrund af undervandsplanter blev relateret til oplandskarakteristika. De fandt bl.a. en positiv effekt på den økologiske tilstand ved tilstedeværelsen af vådområder og reservoirer i oplandet og en negativ effekt af landbrug og bymæssige arealer.

I dette projekt har MST ønsket en analyse af de søer, hvor der i vandområdeplanerne ikke er defineret et hydrologisk opland. Specifikt ønskes der:

1. *Udarbejdelse af topografiske oplande*
2. *Risiko for tilførsel af næringsstoffer (fosfor og kvælstof) fra forskellige tabsveje i oplandet (jf. fosforrisikokortlægning)*
3. *Vurdering af forbindelse til grundvandet samt grundvandets eventuelle påvirkning*
4. *Faglig vurdering af søens upåvirkede tilstand*
5. *Opstilling af kriterier for udpegning til restaurering.*

Det blev i projektforslaget besluttet, at punkt 3, hvor GEUS bidrager, skal udføres som et selvstændigt projekt, der specifikt skal vurdere samspillet mellem grundvand og søers tilstand.

3.2 Arbejdsprocedure

Projektet tager udgangspunkt i, at der gennemføres en analyse, der estimerer omfanget og arealet af et opland til søerne uden veldefinerede afløb. Efterfølgende etableres et GIS-datasæt fra dette opland med oplandskarakteristika, som kobles til eksisterende data fra de pågældende søer. Herved er det muligt at vurdere sammenhænge mellem oplandskarakteristika og søernes tilstand. Til de fem specifikke punkter beskrevet af MST ovenover er arbejdsproceduren:

3.2.1 Estimering af det topografiske opland

Søer uden veldefinerede tilløb og afløb, som skal indgå i analysen, defineres af MST. På baggrund heraf estimeres det topografiske opland for de enkelte søer ved GIS-analyser. Dette sker ved at placere et virtuelt afløb i søens centrum, hvortil det tilhørende opland kan estimeres på baggrund af højdekort. I områder med meget ringe højdeforskel, f.eks. Vestjylland, vil der være områder, hvor det ikke kan lade sig gøre. Se også Andersen m.fl. (2015), afsnit 4 og bilag 8.1. GIS-data med estimerede topografiske oplande udarbejdes og leveres til MST.

3.2.2 Tabsveje for næringsstoffer

Med udgangspunkt i det estimerede topografiske opland for de enkelte søer beregnes en række potentielle næringsstofkilder/tabsveje på baggrund af GIS-data med oplandskarakteristika fra det pågældende opland (se også afsnit 2). Efterfølgende sammenstilles disse data med data fra eksisterende NOVANA-målinger, og empiriske analyser gennemføres.

3.2.3 Grundvandspåvirkede søer

I et projekt, som planlægges gennemført senere i samarbejde med GEUS og MST - og som dermed ikke er indeholdt i dette projekt - er det tanken at koble data fra potentielt grundvandspåvirkede søer til sødata og grundvandsdata. Det overordnede mål vil være at kunne afgøre, om en årsag til søers manglende målopfyldelse kan tilskrives en påvirkning fra grundvandet. Det betyder også, at analyser vist i denne rapport ikke tager højde for eventuelle interaktioner mellem søerne og deres grundvand.

3.2.4 Upåvirket tilstand

Kendskabet til danske søers tilstand uden menneskelig påvirkning er meget begrænset. Dette gælder også søer uden veldefinerede tilløb og afløb, og det gør det vanskeligere at vurdere, hvilken økologisk tilstand der bør arbejdes henimod. En metode til at forbedre dette kendskab er palæolimnologiske analyser, hvor man ved at kigge på plante- og dyrerester i forskellige sedimentdybder, kombineret med en datering af sedimentet i de pågældende dybder, er i stand til at vurdere, hvordan tilstanden tidligere har været (se f.eks. Søndergaard m.fl. 2003). Ideelt set burde disse typer af analyser gennemføres enkeltvis for alle søer, idet hver sø som udgangspunkt er unik, men det er en ressourcekrævende metode og uden for rammerne af dette projekt. Som et

alternativ anvendes her i stedet eksisterende data fra søer, hvor oplandet, såvel nu som historisk, består udelukkende eller næsten udelukkende af uopdyrkede områder og uden kendte punktkilder. Antagelsen er, at tilstanden i disse søer kun i ringe grad vil være påvirket af menneskelige aktiviteter. Kun søer, som er i høj eller god økologisk tilstand, inddrages. I det omfang at datamængden er tilstrækkelig, foretages der en opdeling af disse efter jordbundstype (f.eks. sandet - ikke sandet) for at kunne vurdere naturlige grader af næringsrigdom.

3.2.5 Kriterier for sørestauring

På baggrund af ovenstående analyser vil der blive givet et forslag til kriterier for restaurering af søer uden kendt afløb, men hvor oplandet kan estimeres.

4 Data, metoder og analyser

4.1 Søtyper og antal søer med estimerede oplande og data

Et datasæt med alle søer omfattet af vandområdeplanerne er fremsendt af MST og er anvendt til udvælgelse af de søer, som indgår i analyserne. Datasættet indeholder oplysninger om navn og koordinater på søerne omfattet af vandområdeplanerne. I datasættet er der også angivet én ud af fire typer afløbskoder for hver af søerne: 1) med afløb, belastning beregnes, 2) uden afløb, belastning kan ikke beregnes, 3) temporært afløb, belastning kan af tekniske grunde ikke beregnes og 4) med afløb, men belastning kan af tekniske grunde ikke beregnes. Søerne anvendt i denne analyse omfatter primært søer af afløbstype 2 og 3. Se bilag 8.1 for en nærmere beskrivelse. Der er estimeret et opland til i alt 418 søer.

4.2 Inputdata fra oplandet (GIS-data)

Til de empiriske analyser af sammenhænge mellem parametre målt i søerne og i det estimerede opland er der anvendt en række forskellige oplandskarakteristika (omfatter ikke selve søen). Værdierne for oplandskarakteristika vil være angivet som %-del af søens samlede oplandsareal (gælder jordtyper, arealanvendelse og potentielt drænedede jorde) eller som absolutte værdier pr. søareal (gælder punktkilder samt tab af fosfor og kvælstof). Oplandsparametrene omfatter tre jordbundstyper, fire typer arealanvendelse, to typer punktkilder (udledning af fosfor og kvælstof), én type dræn og én type beregnet tab af henholdsvis fosfor og kvælstof. I alt omfatter oplandsparametrene således 12 typer af inputdata, som kort beskrives i det følgende. Benævnelser for de anvendte typer, som er anvendt efterfølgende, er angivet i parentes:

4.2.1 Jordtyper

I analyserne er anvendt tre hovedtyper af jord (se bilag 8.2 for underkategorier af jordbundstyper):

- Ler. Omfatter grov/fin lerjord, lerjord, svær lerjord, meget svær lerjord (ler%).
- Sand. Omfatter grovsandet, finsandet, grov lerblandet sandjord og fin lerblandet sandjord (sand%).
- Humus (humus%).

4.2.2 Arealanvendelse

I forhold til arealanvendelse i oplandet er anvendt samme tilgang som i Andersen & Heckrath (2020). Dette omfatter fire kategorier:

- Ej mark. Disse arealer dyrkes ikke, hverken i omdrift eller med vedvarende græs. Omfatter åben natur eller krat/skov og også selve søarealet (ej-mark%).
- I omdrift. Omfatter arealer, som behandles jævnlige med pløjning eller harvning, dvs. der dyrkes en- eller toårige afgrøder (omdrift%).

- Varig-græs. Omfatter arealer, som aldrig lægges om, dvs. der pløjes eller harves ikke. Græsset skal afgræsses eller slås årligt, så det ikke springer i buskads (varig-græs%).
- Miljøordning. Disse arealer omfatter en række forskellige forhold: f.eks. pleje af græs- og naturarealer – typisk med afgræsning og ingen gødskning, miljøvenlige jordbrugsforanstaltninger – typisk nedsat gødskning, fastholdelse af vådområder og opretholdelse af ændret afvanding – kan også omfatte vådlægning (miljøordning%).

4.2.3 Punktkilder

Punktkilder i oplandet omfatter bidrag fra renseanlæg, spredt bebyggelse m.m. Data anvendt i de empiriske analyser omfatter det samlede bidrag af totalfosfor og totalkvælstof fra det estimerede opland:

- Fosfortilførsel fra punktkilder (P-punktkilder)
- Kvælstoftilførsel fra punktkilder (N-punktkilder)

4.2.4 Potentielt drænedede jorde

GIS-data over det potentielle areal af drænedede jorde i det estimerede opland.

- Andelen af oplandet, som sandsynligvis er drænet (dræn%)

4.2.5 Tab af fosfor og kvælstof fra marker

Data på potentielt tab/udvaskning af fosfor fra det estimerede opland er opnået på baggrund af analyser af fosfortab fra omgivende marker (se tabel 2.1.1 i Andersen & Heckrath (2020) med oversigt over tabsveje for fosfor til vandmiljøet). Det beregnede tab dækker kun tabet fra marker, som nogle gange kun udgør en lille andel af det samlede areal. Det beregnede tab er angivet som kg P pr. ha:

- Fosfortab fra marker (P-udvaskning)

Som proxy for kvælstofpåvirkning fra oplandet er nitratudvaskning på markblokniveau beregnet med NLES4-modellen for høstårene 2018, 2019 og 2020 (agrohydrologisk år 2018/2019, 2019/2020 og 2020/2021). NLES-beregningen er baseret på et normaliseret klima, men udvaskningen varierer alligevel en del fra år til år, især fordi: 1) sædskifterne har i perioden været påvirket af nedbørshændelser – dette påvirker udvaskningen, og 2) efterafgrødearealet har i perioden været stigende. N-input består af N i handelsgødning, husdyrgødning og anden organisk gødning, N fikseret i afgrøden og atmosfærisk deposition. Balancerne er baseret på normudbytter. Der kan være meget store usikkerheder i opgørelsen på markblokniveau. Det anvendte udtræk indeholder den beregnede nitratudvaskning og omfatter lige som for fosfor kun tabet fra marker, som indgår i oplandet. Mere information om N-LES-modellerne kan findes i Kristensen m.fl. (2008). Det beregnede kvælstoftab er angivet som kg N pr. ha:

- Kvælstoftab fra marker (N-udvaskning)

4.2.6 Inputdata fra søerne (NOVANA-data)

Som inputdata fra søerne er der anvendt vandkemiske og biologiske data indsamlet i forbindelse med det nationale overvågningsprogram for søer (NOVANA). Blandt de vandkemiske og biologiske data til at beskrive søernes tilstand er der anvendt:

- totalfosfor (TP)
- totalkvælstof (TN)
- klorofyl *a*
- dækningsgrad af undervandsplanter (RPA, relativ plantedækket areal)

For TP, TN og klorofyl er der anvendt sommergennemsnitlige værdier. I forbindelse med vurderingen af menneskeligt upåvirkede søer er der også anvendt data om den økologiske klassificering (høj, god, moderat, ringe, dårlig). For en nærmere beskrivelse af prøvetagningsprogrammer og inputdata fra søerne henvises der til Johansson m.fl. (2021).

4.3 GIS-analyser

I forbindelse med GIS-analyser og estimering af det topografiske opland er der som udgangspunkt anvendt samme principper som angivet i Andersen m.fl. (2015). Se også bilag 8.1. I Andersen m.fl. (2015) er der beskrevet en metode til at danne oplande til søer uden afløb, og der er redegjort for de usikkerheder dette indebærer. Dette gælder f.eks. *"hvilken tærskelværdi, der sættes for, hvornår en lavning skal registreres og have sit eget opland, og hvornår den er for ubetydelig til at komme i betragtning, idet de små frasorterede lavningers oplande adderes til de resterende oplande. Det topografiske opland, som bestemmes ved denne metode, er det opland, som ved ekstreme nedbørshændelser og snesmeltninger vil kunne give overfladisk afstrømning til lavningen"*. Desuden bemærkes: *"Når meget små topografiske lavninger betragtes, vil oplandsarealet reelt være forskelligt fra nedbørshændelse til nedbørshændelse. Ved store nedbørshændelser vil tilstrømningen reelt ske fra et større opland end ved en lille nedbørshændelse"*.

Fastlæggelse af grid-størrelse og tærskelværdier i GIS-analyserne har betydning for, hvordan oplandet til søerne estimeres. En vurdering af dette er også vist i Andersen m.fl. (2015), hvor der er vist en række eksempler på, hvordan dybden af lavninger, som medtages, påvirker beregningen af oplande (se også bilag 8.1). I analyserne i denne rapport har vi anvendt 10 m grid-størrelser. Denne størrelse er valgt for at undgå at beregne alt for små lokale lavtliggende områder.

Som angivet i Andersen m.fl. (2015), så findes der for søer uden opland *"ikke nogen sikker metode, udover direkte målinger, til bestemmelse af oplandet, der kan bidrage med dræn- og grundvand til søen. En række metoder til bestemmelse af det areal omkring den afløbsløse sø, hvorfra der kan forekomme overfladisk tilstrømning til søen, er beskrevet. Alle metoder indeholder dog store usikkerheder og/eller subjektive valg"*.

4.4 Empiriske analyser mellem opland og søtilstand

Til analyser af empiriske sammenhænge mellem data fra de estimerede oplande og data fra søerne er der anvendt simple empiriske analyser mellem de forskellige parametre.

Et kritisk punkt ved sammenligningen mellem oplandskarakteristika og søtilstand er, i hvor høj grad de anvendte data matcher hinanden tidsmæssigt. Arealanvendelsen i oplandet til søerne kan således variere fra år til år, og det kan potentielt betyde forskellig påvirkning af søtilstanden. Tidligere analyser af nyere data har vist, at denne variation i arealanvendelsen inden for relativt korte tidsperioder ofte ikke er så stor. Data om arealanvendelse indsamlet fra oplandet fra 1281 småsøer og vandhuller viste således, at i over 50 % af søoplandene var der ændringer i mindre end 5 % af oplandsarealet, og 80 % havde ændringer i mindre end 20 % af arealet i perioden 2010-2018 (Andersen & Heckrath 2020). Derudover vil den tilstand, som måles i en sø, kunne afspejle påvirkninger, der er sket for mange år siden. Disse påvirkninger er imidlertid normalt ukendte og ikke kvantificerbare. Dette giver en yderligere usikkerhed ved denne type analyser.

4.5 Søers tilstand uden menneskelig påvirkning

Til vurdering af søers tilstand uden menneskelig påvirkning er der anvendt data fra søer, som i vandområdeplanen er klassificeret som værende med høj eller god økologisk tilstand, og hvor oplandet udelukkende eller næsten udelukkende består af uopdyrkede områder ("ej-mark" > 80 %). For at vurdere om den menneskelige upåvirkede tilstand og næringsstofindholdet er påvirket af kun naturlige forskelle i jordbunden er der skelnet mellem søer, hvor den dominerende jordtype er sand (sand% > 50 %) eller ler (ler% >50).

5 Resultater

5.1 Udarbejdelse af datasæt

Ud over de empiriske analyser, der beskriver sammenhænge mellem opland og søtilstand, har formålet med dette projekt også været at udarbejde to typer af datasæt: 1) Et datasæt, som estimerer det topografiske opland for de søer, hvor dette er ukendt, og 2) et datasæt, der samler eksisterende data fra søer, som i en senere analyse kan anvendes til at vurdere eventuelle påvirkninger mellem søer og grundvandet. Begge datasæt er udarbejdet. Det første datasæt indeholdende GIS-data er sendt til Miljøstyrelsen, og det andet datasæt er sendt til GEUS.

5.2 Empiriske analyser mellem opland og søtilstand

Analyser af sammenhænge mellem søtilstand og karakteristika fra det estimerede opland anvender data fra i alt 418 søer uden veldefinerede tilløb og afløb. Herfra findes der vandkemiske data fra 327 søer og resultater af plantedække fra 281 søer. En oversigt over data er givet i tabel 5.1. Søerne dækker over en stor gradient for alle parametre. De fleste søer er meget lavvandede (median af middeldybde = 0,97 m), små (median af areal = 5,5 ha) og forholdsvis næringsrige (median af TP = 0,076 mg/l, median af TN = 1,33 mg/l). TN:TP-forholdet i søerne varierer meget imellem søerne, men i flertallet af søerne ligger forholdet inden for det område, hvor kvælstof potentielt kan være begrænsende for primærproduktionen (Søndergaard m.fl. 2017).

Tabel 5.1 Oversigt over data anvendt til de empiriske analyser.

Parameter	N	Middel	Min.	10 %	25 %	Median	75 %	90 %	Max.
Areal (ha)	418	11,1	0,8	0,9	1,4	5,5	9,2	18,2	578
Middeldybde (m)	287	1,8	0,06	0,25	0,40	0,97	2,74	4,74	16,2
TP (mg/l)	324	0,292	0,003	0,015	0,030	0,076	0,225	0,580	13,3
TN (mg/l)	327	1,87	0,30	0,52	0,83	1,33	2,13	3,76	11,7
TN:TP (vægtbasis)	324	25,8	0,5	4,0	9,2	17,6	28,7	42,5	450
Klorofyl ($\mu\text{g/l}$)	327	60,6	1,1	4,0	7,7	24,6	70,0	161	794
RPA (%)	281	23,3	0	0	1,6	15,6	39,5	61,4	92,0

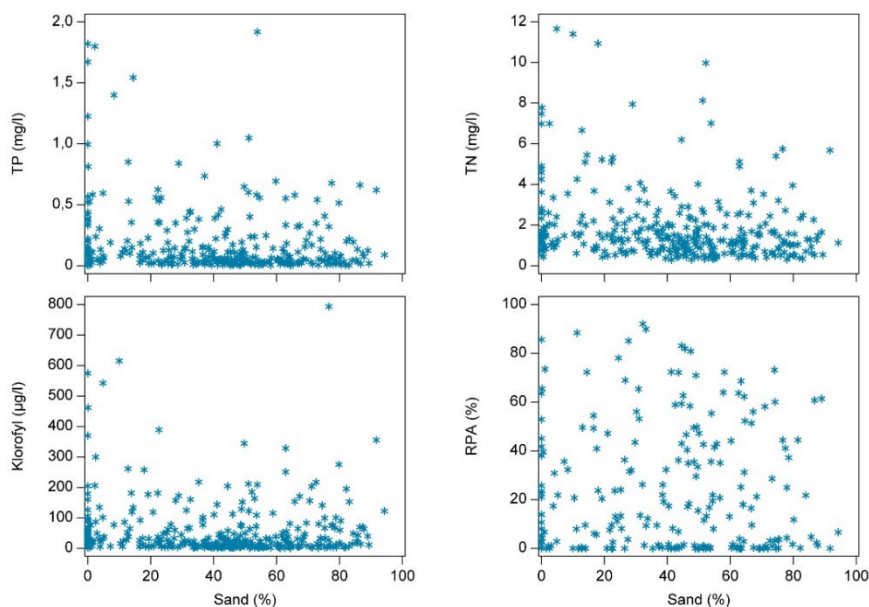
I det følgende er der vist figurer for en række empiriske sammenhænge mellem forskellige oplandskarakteristika fra de estimerede oplande og vandkemiske/biologiske data fra søerne. For oplandsdata, der vedrører arealanvendelse, er der anvendt gennemsnitlige værdier for 2010, 2018, 2019 og 2020. For oplandsdata, der vedrører punktkilder og udvaskning af kvælstof og fosfor fra marker, er der anvendt gennemsnitlige data fra 2018, 2019 og 2020. Sødata omfatter data på indhold af totalfosfor, totalkvælstof, klorofyl *a* og dækningsgraden af undervandsplanter fra de seneste målinger i hver sø, dvs. typisk målinger gennemført siden 2015. Statistiske tests mellem oplandskarakteristika og data fra søerne er vist i tabel 5.2.

5.2.1 Jordtyper

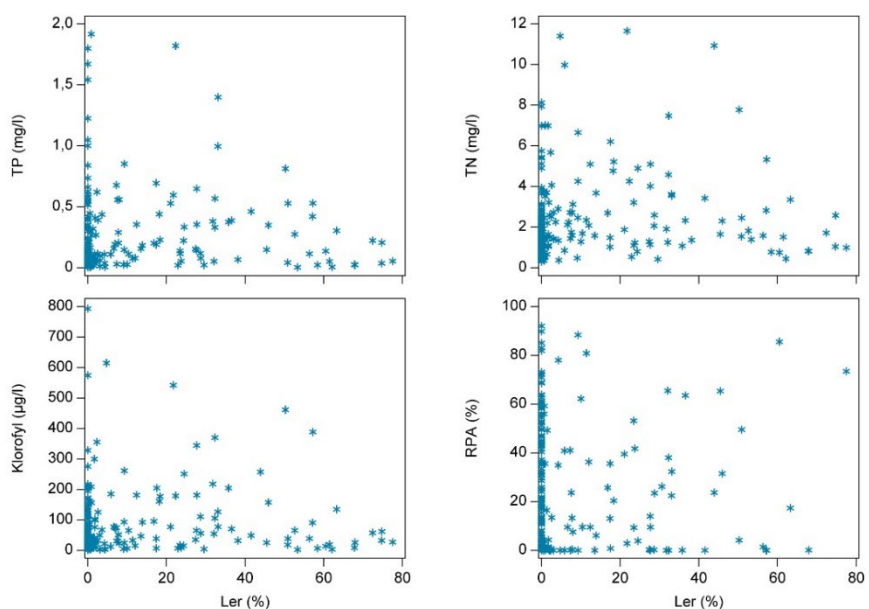
Empiriske sammenhænge mellem jordtyper i det estimerede opland og tilstanden i søerne er vist i figur 5.1-5.3. Fastlæggelsen af jordtyper er beskrevet i afsnit 4.2 og bilag 8.2. Som det fremgår af figurerne, er der ingen klare eller

kun svage sammenhænge mellem de fire parametre målt i søerne til at beskrive deres tilstand og jordtyperne i det estimerede opland. De mest signifikante værdier opnås til TP og TN, hvor der i begge tilfælde er tale om negative sammenhænge med sand% i oplandet (tabel 5.2), dvs. jo større andel sandjord, des lavere indhold af fosfor og kvælstof ses der i søerne. Forklaringsværdien (R^2) er dog ringe, kun på 0,04-0,05. For ler% er der svage positive sammenhænge med indholdet af TP, TN og klorofyl, mens der for humus% er svage sammenhænge med klorofyl (positiv) og RPA (negativ).

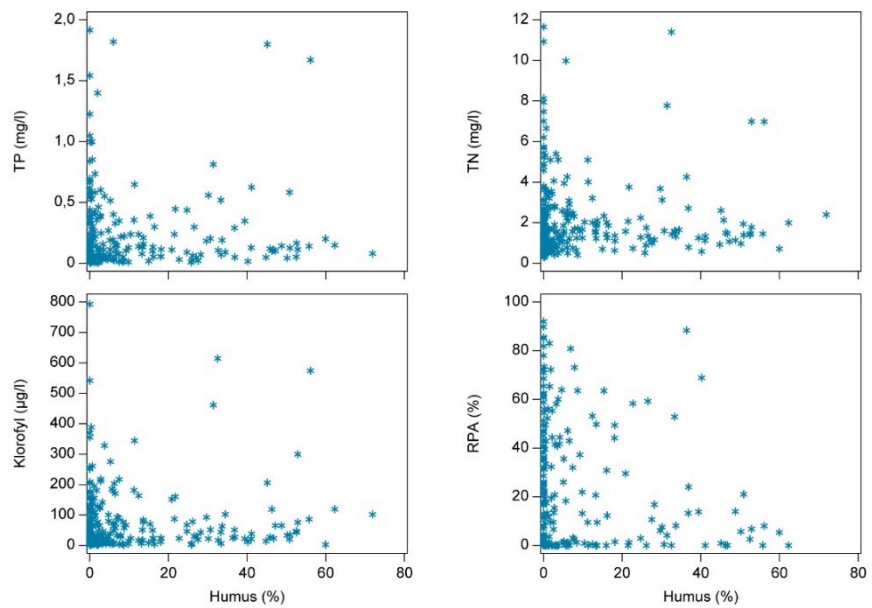
Figur 5.1. TP, TN, klorofyl, RPA i søerne i forhold til **sand%** i oplandet. For TP: Vist for TP < 2 mg/l. For RPA: middeldybde < 3 m.



Figur 5.2. TP, TN, klorofyl, RPA i søerne i forhold til **ler%** i oplandet. For TP: Vist for TP < 2 mg/l. For RPA: middeldybde < 3 m.



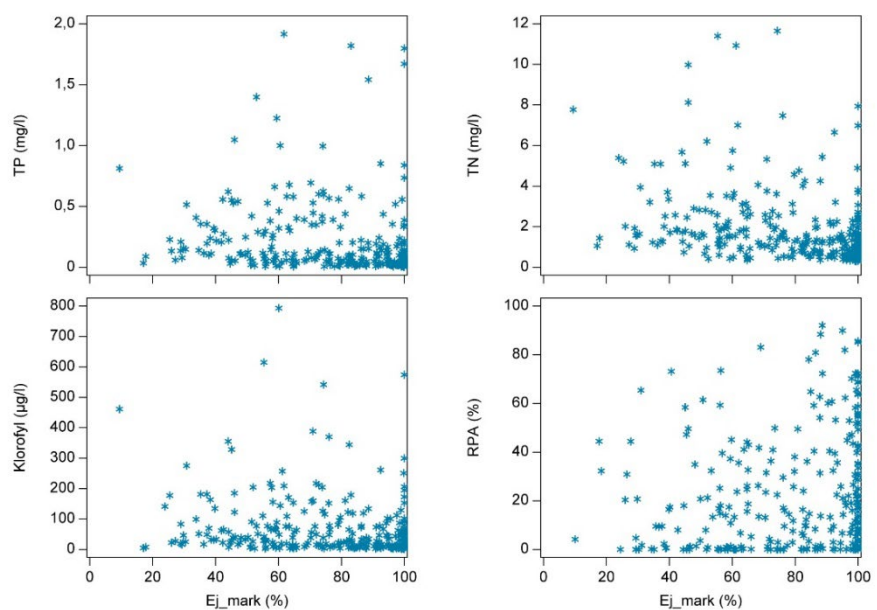
Figur 5.3. TP, TN, klorofyl, RPA i søerne i forhold til **humus%** i oplandet. For TP: Vist for TP < 2 mg/l. For RPA: middeldybde < 3 m.



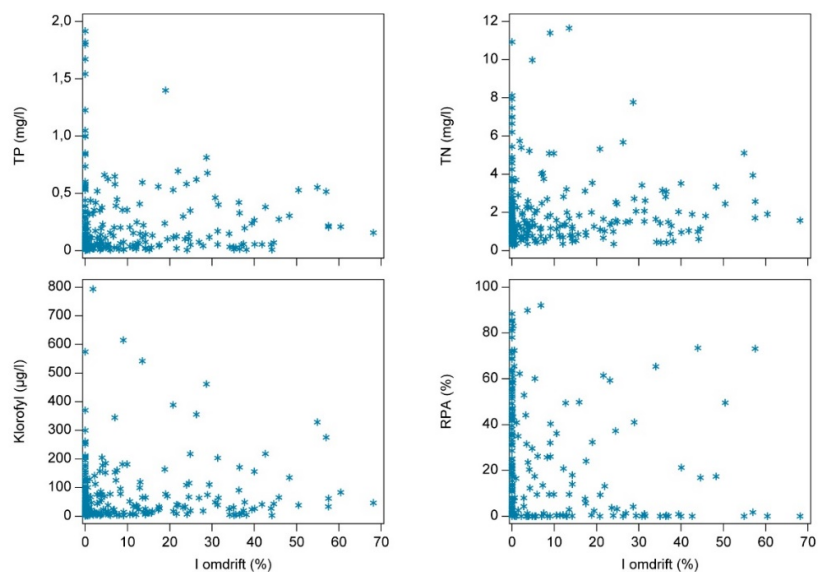
5.2.2 Arealanvendelsen

I forhold til arealanvendelsen i det estimerede opland er der også kun svage sammenhænge til de målte søparametre (figur 5.4-5.7). De stærkeste sammenhænge opnås for kategorierne ej-mark% og varig-græs%. Her er indholdet af TP, TN og klorofyl negativt korreleret til andelen af ej-mark, svarende til at der ses lavere næringsstofindhold, når en mindre del af oplandet er opdyrket. Forklaringsværdierne (R^2) ligger her på 0,06-0,09. I forhold til andelen af varig-græs% ses positive sammenhænge til TP, TN og klorofyl, men også her med lave R^2 -værdier, der dog for TN når op på 0,13. I forhold til "i omdrift%" er der en signifikant (positiv) sammenhæng med klorofyl og RPA (negativ). Der er ingen signifikante sammenhænge med miljøordning%.

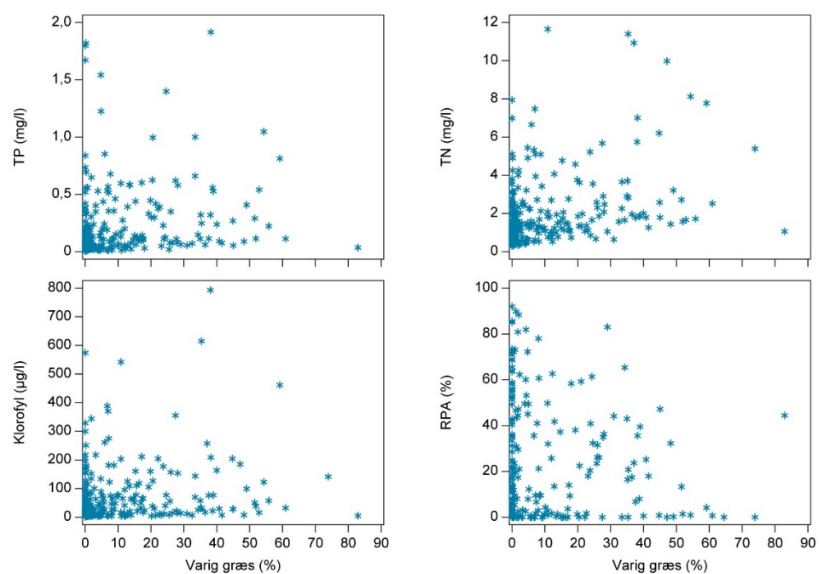
Figur 5.4. TP, TN, klorofyl, RPA i søerne i forhold til **ej_mark%** i oplandet. For TP: Vist for TP < 2 mg/l. For RPA: middeldybde < 3 m.



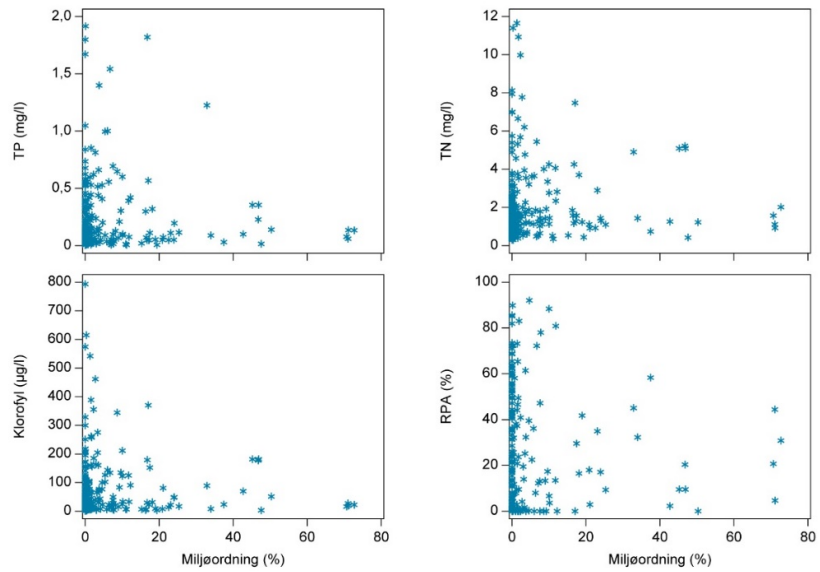
Figur 5.5. TP, TN, klorofyl, RPA i søerne i forhold til "i omdrift"-% i oplandet. For TP: Vist for TP < 2 mg/l. For RPA: middeldybde < 3 m.



Figur 5.6. TP, TN, klorofyl, RPA i søerne i forhold til "varig græs"-% i oplandet. For TP: Vist for TP < 2 mg/l. For RPA: middeldybde < 3 m.



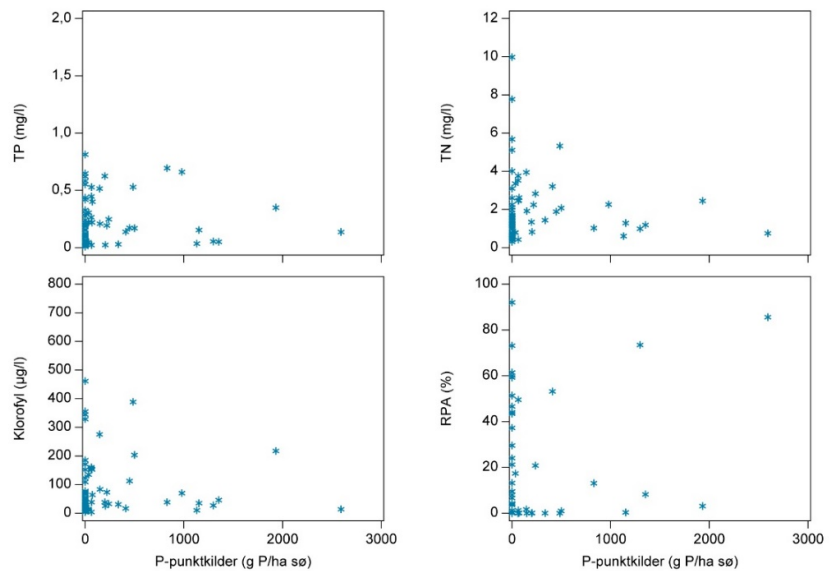
Figur 5.7. TP, TN, klorofyl, RPA i søerne i forhold til "miljøordning"-% i oplandet. For TP: Vist for TP < 2 mg/l. For RPA: middeldybde < 3 m.



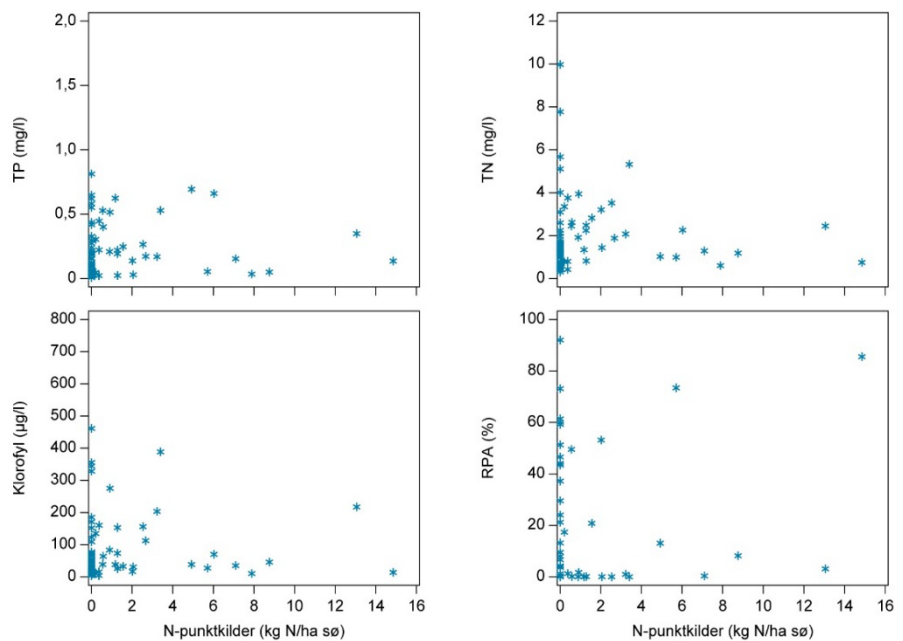
5.2.3 Punktkilder

Der er ikke så mange data vedrørende punktkilder i de estimerede oplande, som der er for de øvrige oplandskarakteristika, og i mange tilfælde er tilførslen fra punktkilder lille. Hverken det beregnede bidrag fra P-punktkilder eller N-punktkilder relaterer sig signifikant til nogen af de tilsvarende næringsstofkoncentrationer i søerne (figur 5.8-5.9, tabel 5.2). Der ses ikke tegn på, at de søer, som har de højeste P- eller N-punktkilder, har højere TP- og TN-værdier end de øvrige søer.

Figur 5.8. TP, TN, klorofyl, RPA i søerne i forhold til årligt bidrag fra fosforpunktkilder i oplandet. For TP: Vist for TP < 2 mg/l. For RPA: middeldybde < 3 m.



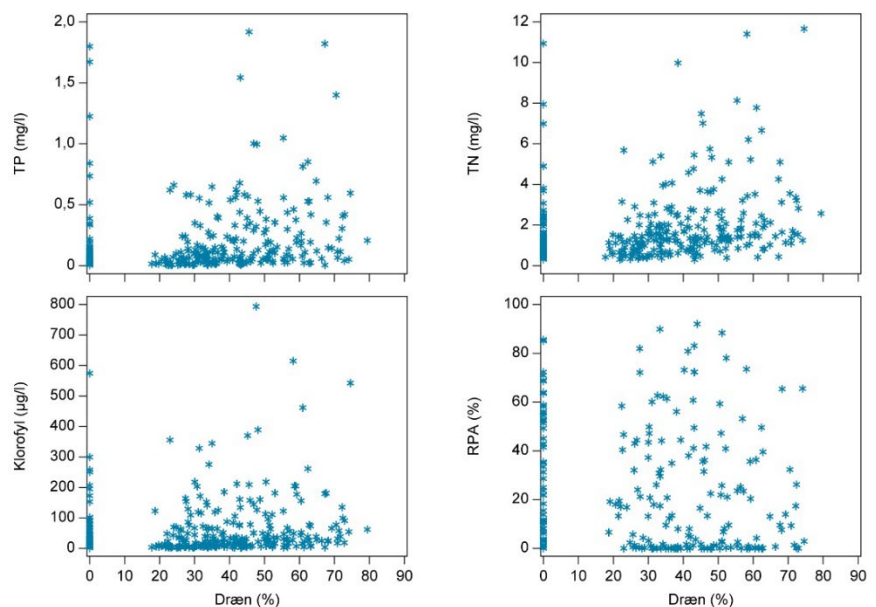
Figur 5.9. TP, TN, klorofyl, RPA i søerne i forhold til årligt bidrag fra kvælstofpunktkilder i oplandet. For TP: Vist for TP < 2 mg/l. For RPA: middeldybde < 3 m.



5.2.4 Potentielt drænedede jorde

I forhold til den potentielle andel af drænedede jorde i det estimerede opland er der signifikante og positive sammenhænge med indholdet af både TP, TN og klorofyl, dvs. der ses generelt højere næringsstofkoncentrationer ved større andel af drænedede jorde i oplandet (figur 5.10, tabel 5.2). Der er dog også her tale om lave forklaringsværdier med R^2 -værdier på 0,02-0,05. Hvis der alene anvendes data, hvor det potentielt drænedede areal er > 0, ses ligeledes signifikante og positive sammenhænge med næringsstofindholdet, hvor der opnås R^2 -værdier på 0,08-0,09.

Figur 5.10. TP, TN, klorofyl, RPA i søerne i forhold til **potentielt drænet areal** (% af opland). For TP: Vist for TP < 2 mg/l. For RPA: middeldybde < 3 m.

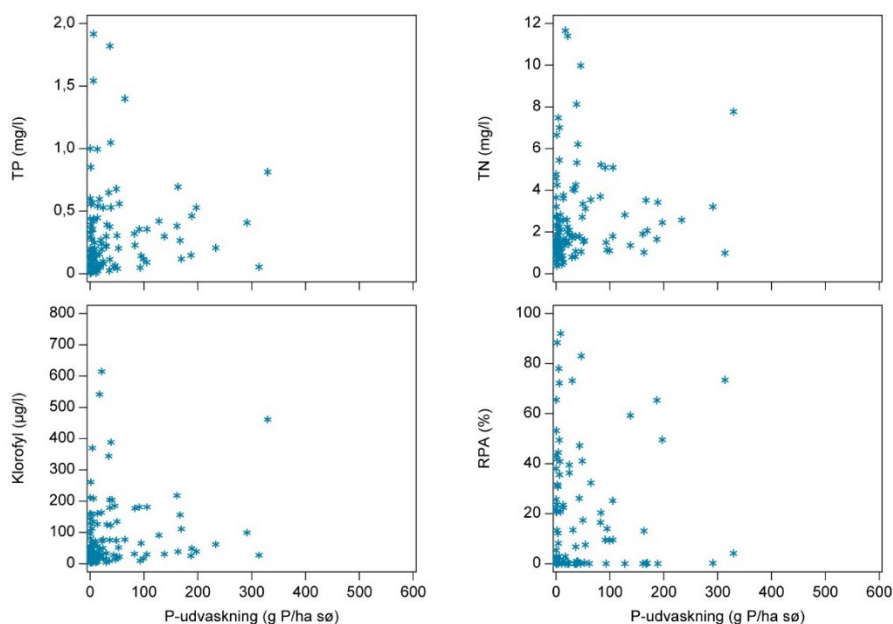


5.2.5 Tab af fosfor og kvælstof fra marker

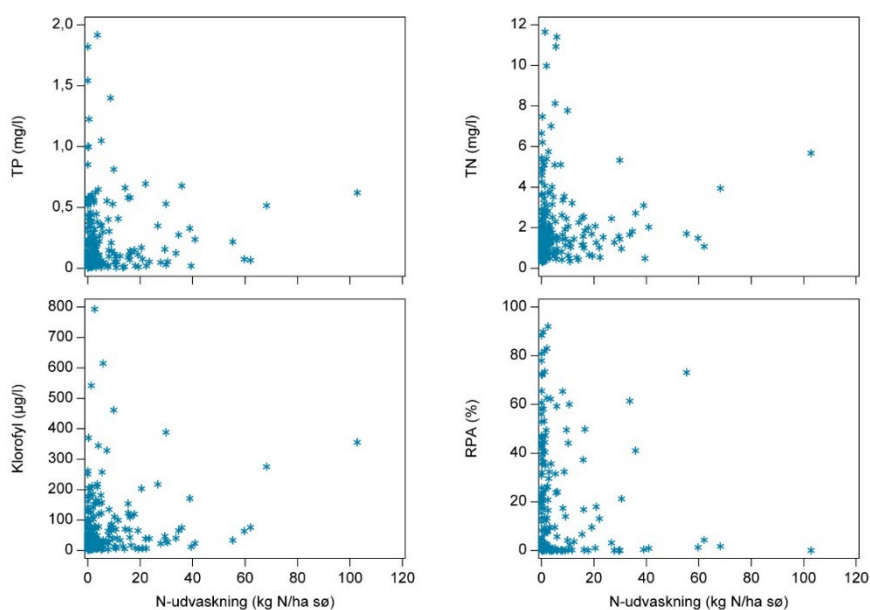
Det beregnede tab eller udvaskning af fosfor og kvælstof fra det estimerede opland relaterer sig ikke signifikant til de samhørende værdier af TP og TN, der er målt i søerne (figur 5.11-5.12, tabel 5.2). Søer, hvortil der beregnes de højeste P- eller N-udvaskninger, har ikke højere værdier af TP og TN end de

øvrige søer. Det skal dog bemærkes, som nævnt i afsnit 4.2, at tabet kun er tabet fra dyrkede marker, som i nogle tilfælde kun udgør en ringe del af det samlede opland. Derfor vil disse korrelationer være følsomme over for andelen af marker i det estimerede opland.

Figur 5.11. TP, TN, klorofyl, RPA i søerne i forhold til beregnet årlig fosforudvaskning fra oplandet. For TP: Vist for TP < 2 mg/l. For RPA: middeldybde < 3 m.



Figur 5.12. TP, TN, klorofyl, RPA i søerne i forhold til beregnet årlig kvælstofudvaskning fra oplandet. For TP: Vist for TP < 2 mg/l. For RPA: middeldybde < 3 m.



5.2.6 Test/multiple analyser

I tabel 5.2 er der vist en række tests for sammenhænge mellem de fire parametre målt i søerne og de anvendte oplandskarakteristika. Som også illustreret i figur 5.1-5.12 er der for alle de undersøgte sammenhænge kun tale om svage sammenhænge, og i en del tilfælde er der ikke tale om signifikante sammenhænge. Nogle af de signifikante sammenhænge til søparametre ses for dræn%, sand% og ejmark%, men forklaringsværdien er i alle tilfælde lav ($R^2 < 0,10$).

Tabel 5.2. Lineære regressionsanalyser (SAS, proc reg) mellem søparametre (responsvariable) (TP, TN, klorofyl og RPA) og forklarende variable, der beskriver det estimerede opland. Ved regressioner med TP er der kun anvendt søer med TP-koncentrationer under 2 mg/l. Ved analysen af det plantedækkede areal (RPA) er der kun anvendt søer, hvor middeldybden (z) er mindre end 3 m. R²-værdier er kun angivet for signifikante (p<0,05) sammenhænge. "-" eller "+" efter R²-værdien angiver, om sammenhængen er negativ eller positiv.

Forklarende variabel	Søparameter	N	p	R ²
Sand%	TP (<2 mg/l)	316	<0,0001	0,05 (-)
	TN	327	<0,0001	0,04 (-)
	Klorofyl	327	=0,0872	-
	RPA (z< 3 m)	217	=0,6477	-
Ler%	TP (<2 mg/l)	316	=0,0313	0,01 (+)
	TN	327	=0,0008	0,03 (+)
	Klorofyl	327	=0,0044	0,02 (+)
	RPA (z< 3 m)	217	=0,8993	-
Humus%	TP (<2 mg/l)	316	=0,0569	-
	TN	327	=0,17	-
	Klorofyl	327	=0,0159	0,01 (+)
	RPA (z< 3 m)	217	=0,0104	0,03 (-)
Ej-mark%	TP (<2 mg/l)	316	=0,0002	0,04 (-)
	TN	327	<0,0001	0,09 (-)
	Klorofyl	327	<0,0001	0,06 (-)
	RPA (z< 3 m)	137	=0,0022	0,04 (+)
I omdrift%	TP (<2 mg/l)	316	=0,2930	-
	TN	327	=0,2665	-
	Klorofyl	327	=0,0179	0,02 (+)
	RPA (z< 3 m)	137	=0,0081	0,03 (-)
Varig græs%	TP (<2 mg/l)	316	<0,0001	0,06 (+)
	TN	327	<0,0001	0,13 (+)
	Klorofyl	327	<0,0001	0,05 (+)
	RPA (z< 3 m)	137	=0,0687	-
Miljøordning%	TP (<2 mg/l)	316	=0,4972	-
	TN	327	=0,2972	-
	Klorofyl	327	=0,8078	-
	RPA (z< 3 m)	137	=0,6920	-
Dræn%, alle	TP (<2 mg/l)	316	<0,0001	0,05 (+)
	TN	327	<0,0001	0,04 (+)
	Klorofyl	327	=0,0052	0,02 (+)
	RPA (z< 3 m)	217	=0,0160	0,03 (-)
Dræn%>0	TP (<2 mg/l)	228	<0,0001	0,08 (+)
	TN	236	<0,0001	0,09 (+)
	Klorofyl	236	=0,0080	0,03 (+)
	RPA (z< 3 m)	161	=0,4121	-
P-punktkilder	TP (<2 mg/l)	77	=0,5418	-
P-udvaskning	TP (<2 mg/l)	167	=0,1966	-
N-punktkilder	TN	78	=0,7536	-
N-udvaskning	TN	258	=0,2223	-

Anvendelsen af dræn%, sand% og ej-mark% i en multipel analyse som forklarende variabel for TP øger ikke den samlede forklaringsværdi (samlet R²=0,04) i forhold til anvendelsen af kun én forklarende variabel. I en tilsvarende analyse af TN øges den samlede forklaringsværdi til R²=0,15 ved at ind-

drage både ej-mark% (partiel $R^2=0,09$) og sand% (partiel $R^2=0,06$). Forklaringsværdien for TN øges ikke yderligere ved at inddrage dræn%. Inddragelse af søarealet i de multiple analyser øger ikke forklaringsværdien.

5.3 Søtilstand uden menneskelig påvirkning

Der findes formentlig ingen søer i Danmark, som kan siges at være helt uden menneskelig påvirkning. I nogle søer må påvirkningen dog antages at være begrænset, og et bud på disse kunne være søer, der er vurderet som værende i høj eller god økologisk tilstand, og hvor oplandet ikke eller kun i ringe grad er opdyrket. Med den baggrund er der i tabel 5.3 vist næringsstof- og klorofylindhold i de søer, der på baggrund af MST og basisanalyserne er kategoriseret som værende i høj eller god økologisk tilstand, og hvor "ej-mark" udgør mindst 80 %. Data er også inddelt, så der vises koncentrationer fra søer med oplande domineret af henholdsvis lerjord eller sandjord. Baggrunden for denne inddeling er, at der naturligt må forventes forskelle mellem søer beliggende i oplande domineret af enten sand- eller lerjorde.

Set for alle typer af jordbund i oplandet er der data fra 65-68 søer, som opfylder ovennævnte kriterier mht. økologisk tilstand og dyrkningsgrad i oplandet. Næringsstof- og klorofylindhold i disse søer er generelt lavt med medianværdierne for TP på 0,020 mg/l, for TN på 0,70 mg/l og for klorofyl på 5,3 µg/l. For alle tre parametre dækker medianværdien dog over ret store variationer. Middelværdien er højere end medianværdien, hvilket er et udtryk for, at der er få søer med meget høje værdier.

Der findes kun én sø, hvor ler er den dominerende jordbundstype i oplandet, og derfor er det kun relevant at adskille oplande med sand som dominerende jordbundstype fra det totale antal søer (tabel 5.3). Søer med dominans af sand i oplandet har som medianværdi stort set samme TP-koncentration som søerne samlet, mens koncentrationen af TN og klorofyl er lidt lavere.

Tabel 5.3. Næringsstofkoncentrationer (TN og TP) og klorofylindhold i søer uden tilløb/afløb, som er vurderet som værende i høj eller god økologisk tilstand, og hvor ej-mark udgør mindst 80 %. "Sand": sand%>50. "Ler": ler%>50.

Oplandstype	TP (mg/l)			TN (mg/l)			Klorofyl (µg/l)		
	Middel	Median	Min.-max.	Middel	Median	Min.-max.	Middel	Median	Min.-max.
Alle, n=65-68	0,027	0,020	0,003-0,200	0,86	0,70	0,30-3,07	6,2	5,3	1,1-23,0
Sand, n=24-25	0,022	0,021	0,004-0,049	0,68	0,54	0,33-1,56	6,1	4,8	1,1-22,3
Ler, n=1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Det er ikke helt uproblematisk at bruge den økologiske klassificering (høj eller god) til at angive den upåvirkede tilstand, idet klassificeringen netop er afhængig af de parametre, der beskriver søernes tilstand (her TP, TN, og klorofyl). Derfor er der i tabel 5.4 og 5.5 også vist TP-, TN- og klorofylværdier for søerne, hvis der alene ses på søer, hvor henholdsvis oplandet kun i ringe grad er opdyrket (ej-mark>80 %), eller hvor søerne alene er i høj eller god økologisk tilstand.

Hvis der alene ses på søer, hvor "ej-mark%" udgør mere end 80 % af oplandet, ligger koncentrationerne af både TP, TN og klorofyl, som det måske kunne forventes, generelt væsentligt højere, end hvis der også er krav om, at den økologiske tilstand er registreret som værende god eller høj. Denne forskel kan være et udtryk for en menneskelig påvirkning, eksempelvis ved udsætning og fodring af ænder, men det kan ikke afgøres, om andre forhold, eksempelvis naturligt højt næringsstofindhold eller påvirkning fra grundvand, er i spil. Som medianværdier ligger TP her på 0,047 mg/l, TN på 1,13 mg/l og

klorofyl på 15 µg/l. Hvis der kun anvendes søer, hvor sandjord dominerer oplandet, ligger både TP, TN og klorofyl noget lavere. Det samme gælder, hvis der kun anvendes søer, hvor lerjorde dominerer, men det kan være tilfældigheder på grund af et begrænset datasæt (kun 6 søer).

Tabel 5.4. Næringsstofkoncentrationer (TN og TP) og klorofylindhold i søer uden tilløb/afløb, hvor "ej-mark%" udgør mindst 80 %. Sand er, hvor sand%>50. Ler er, hvor ler%>50 (for få søer).

Oplandstype	TP (mg/l)			TN (mg/l)			Klorofyl (µg/l)		
	Middel	Median	Min-max	Middel	Median	Min.-max.	Middel	Median	Min.-max.
Alle, n=186-189	0,234	0,047	0,003-13,3	1,41	1,13	0,30-7,95	40	15	1-574
Sand, n=57-58	0,050	0,031	0,004-0,333	0,99	0,83	0,31-4,89	30	9,1	1,1-256
Ler, n=6	0,041	0,024	0,003-0,136	0,93	0,82	0,75-0,139	15	11	2-32

I tabel 5.5 er der beregnet værdier for TP, TN og klorofyl, hvis der alene stilles krav om, at søerne skal være i god eller høj økologisk tilstand. Dette vil sige, at der er ikke stillet krav om, at "Ej-mark" udgør > 80 %. Medianværdierne er her lave og ligger på samme niveau eller lidt højere end i de søer, hvor der også var krav om mindst 80 % "Ej-mark". Middel- og medianværdier, hvis der kun anvendes data fra søer, hvor jordbunden i oplandet er domineret af sand, ligger lidt lavere, end hvis alle søer med høj eller god økologisk tilstand anvendes. Med forbehold for det begrænsede datasæt kunne dette antyde, at næringsstof- og klorofylindholdet i søer, hvor kun en mindre del af oplandet er opdyrket, er lidt lavere i søer, hvor oplandet domineres af sandjorde end i søerne generelt. Dette stemmer overens med den negative sammenhæng, der blev fundet mellem sand% i oplandet og søernes indhold af næringsstoffer.

Endelig er der i tabel 5.6 beregnet værdier for TP, TN og klorofyl, hvis der laves en inddeling efter søstørrelse. Denne inddeling viser kun små forskelle i de tre størrelsesklasser: 1-5, 5-10 og > 10 ha, og der synes ikke at være baggrund for at antage, at søtilstanden i søer uden menneskelig påvirkning analyseret i denne rapport er størrelsesafhængig.

Tabel 5.5. Næringsstofkoncentrationer (TN og TP) og klorofylindhold i søer uden tilløb/afløb, og hvor den økologiske tilstand er registreret som høj eller god. Sand er, hvor sand%>50. Ler er, hvor ler%>50 (for få søer til meningsfulde beregninger). Max-værdien for klorofyl på 258 µg/l er sandsynligvis en faktor-10 fejl i det anvendte datasæt.

Oplandstype	TP (mg/l)			TN (mg/l)			Klorofyl (µg/l)		
	Middel	Median	Min-max	Middel	Median	Min.-max.	Middel	Median	Min.-max.
Alle, n=88-91	0,062	0,022	0,003-2,64	1,00	0,71	0,30-10,9	10	5,6	1-258
Sand, n=32-33	0,023	0,019	0,004-0,075	0,66	0,53	0,33-1,56	6,5	5,5	1,0-22
Ler, n=3	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 5.6. Næringsstofkoncentrationer (TN og TP) og klorofylindhold i søer uden tilløb/afløb, som er vurderet som værende i høj eller god økologisk tilstand, og hvor ej-mark udgør mindst 80 %. Søerne er inddelt i tre størrelsestyper.

Søareal (ha)	TP (mg/l)			TN (mg/l)			Klorofyl (µg/l)		
	Middel	Median	Min.-max.	Middel	Median	Min.-max.	Middel	Median	Min.-max.
1-5, n=18	0,024	0,024	0,006-0,059	0,71	0,56	0,30-1,40	7,1	5,7	1,1-22,3
5-10, n=26-27	0,024	0,018	0,003-0,087	0,83	0,74	0,33-1,64	5,6	4,8	1,1-12,3
>10, n=21-23	0,033	0,020	0,006-0,200	1,00	0,71	0,35-3,07	6,3	5,4	2,4-23,0

6 Konklusioner og anbefalinger

6.1 Konklusioner

GIS-analyser har vist, at det er muligt at estimere et topografisk opland til de fleste af søerne uden tilløb og afløb omfattet af de kommende vandområdeplaner. Estimatet er dog forbundet med en betydelig usikkerhed og må derfor anvendes med forbehold, men det antages at give et rimeligt overordnet billede af søernes oplande. GIS-data, der beskriver de estimerede oplande for mange af søerne uden tilløb/afløb, er etableret for 418 søer.

Tidligere analyser mellem egenskaber i søers oplande og søernes tilstand har ikke været i stand til at vise stærke sammenhænge, og forklaringsværdierne for de statistiske sammenhænge mellem enkeltfaktorer har generelt været under 10 % (Andersen & Heckrath 2020). Lignende konklusioner gør sig gældende for analyserne i denne rapport, og for alle undersøgte parametre i søerne er der kun ringe eller ingen signifikante sammenhænge til en række karakteristika i det estimerede topografiske opland. Det betyder, at det er forbundet med stor usikkerhed at tillægge tilstanden i en sø en bestemt påvirkning fra det omkringliggende opland, og at det tilsvarende vil være vanskeligere at gennemføre en målrettet indsats for at forbedre søens økologiske tilstand. Analyserne i Andersen & Heckrath (2020) var baseret på naturtilstandsindexet anvendt i overvågningen i henhold til habitatdirektivet, mens data i denne rapport baserer sig på vandkemiske og biologiske parametre i søer fra overvågningen i henhold til vandrammedirektivet. Alt andet lige giver det flere data, som direkte er relateret til den økologiske tilstand og dermed potentielt bedre sammenhænge til påvirkningsfaktorer fra oplandet.

De empiriske analyser viste en del signifikante – om end svage – sammenhænge. Der var således negative sammenhænge mellem andel af udyrkede arealer ("ej mark%") og indholdet af fosfor og kvælstof i søerne. Hermed antydes, at ønskede effekter på søernes tilstand kan fremmes ved at øge andelen af udyrkede områder i søernes opland. Tilsvarende sås signifikante positive sammenhænge mellem det potentielt drænedede areal i søernes opland og søernes indhold af næringsstoffer. Dette antyder, at der kan opnås effekter ved at hindre, at drænvand løber ud i søerne.

De generelt ret svage sammenhænge mellem nuværende oplandskarakteristika og søernes nuværende tilstand indikerer, at tilstanden i søer, hvor målsætningen ikke er opfyldt, kan være et udtryk for tidligere påvirkninger. Et eksempel kunne være søer, hvor der tidligere har været en punktkildebelastning eller f.eks. udsætning og fodring af ænder, hvor sedimentet så kan indeholde en pulje af næringsstoffer, som giver anledning til en intern belastning. Svage sammenhænge mellem søernes næringsstofindhold og graden af dyrket areal i oplandet (omdrift%) er dermed ikke et bevis for, at det, der sker i søernes oplande, ikke påvirker søerne, men det kan lige så vel være et udtryk for, at søernes nuværende tilstand kan være påvirket af en række andre forhold, herunder også tidligere aktiviteter i oplandet.

Andre faktorer, der kan give anledning til en ringe sammenhæng mellem opland og søtilstand, kunne f.eks. være påvirkninger fra grundvandet. Søer uden tilløb, som til trods herfor stadigvæk er permanent vandfyldte, indikerer en kontakt til grundvandet, som bidrager til at opretholde en vandfyldt sø.

Grundvandets næringsstofindhold kan dermed potentielt påvirke søernes tilstand, men denne problemstilling er ikke undersøgt i denne rapport. Det kan heller ikke afvises, at nogle af søerne, som ikke opnår en høj eller god økologisk tilstand, kan være naturligt næringsrige i kraft af god kontakt til naturligt næringsrigt grundvand.

Der kan også være andre effekter, som kan påvirke søernes tilstand, blandt andet forekomst eller fravær af fisk. Påvirkninger fra anvendelsen af pesticider i søernes opland til et vandvolumen, som kun langsomt udskiftes, kan heller ikke udelukkes.

I forhold til at vurdere søers økologiske tilstand bør man ideelt set kende søernes tilstand uden menneskelig påvirkning for på den måde at kunne afgøre, i hvilken grad hver enkelt sø afviger fra en referencetilstand. Denne viden er imidlertid sjældent til stede. I mangel på denne viden blev tilstanden i søer med høj eller god økologisk tilstand undersøgt. Her var der data fra i alt 91 søer, og disse viste generelt og som forventet næringsfattige forhold og lavt indhold af klorofyl. Medianværdier for totalfosfor var på 0,022 mg/l, for totalkvælstof på 0,71 mg/l og for klorofyl på 5,6 µg/l. Disse værdier vil under normale omstændigheder være ensbetydende med klarvandede søer med gode levevilkår for en række planter og dyr. Medianværdierne for klorofyl ligger tæt på tidligere angivne værdier for referenceforhold, der for søtype 1-8, 10, 12 og 14 er på 3,85 µg/l og for søtype 9, 11, 13 og 15 på 7,5 µg/l (<https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2014/1399>).

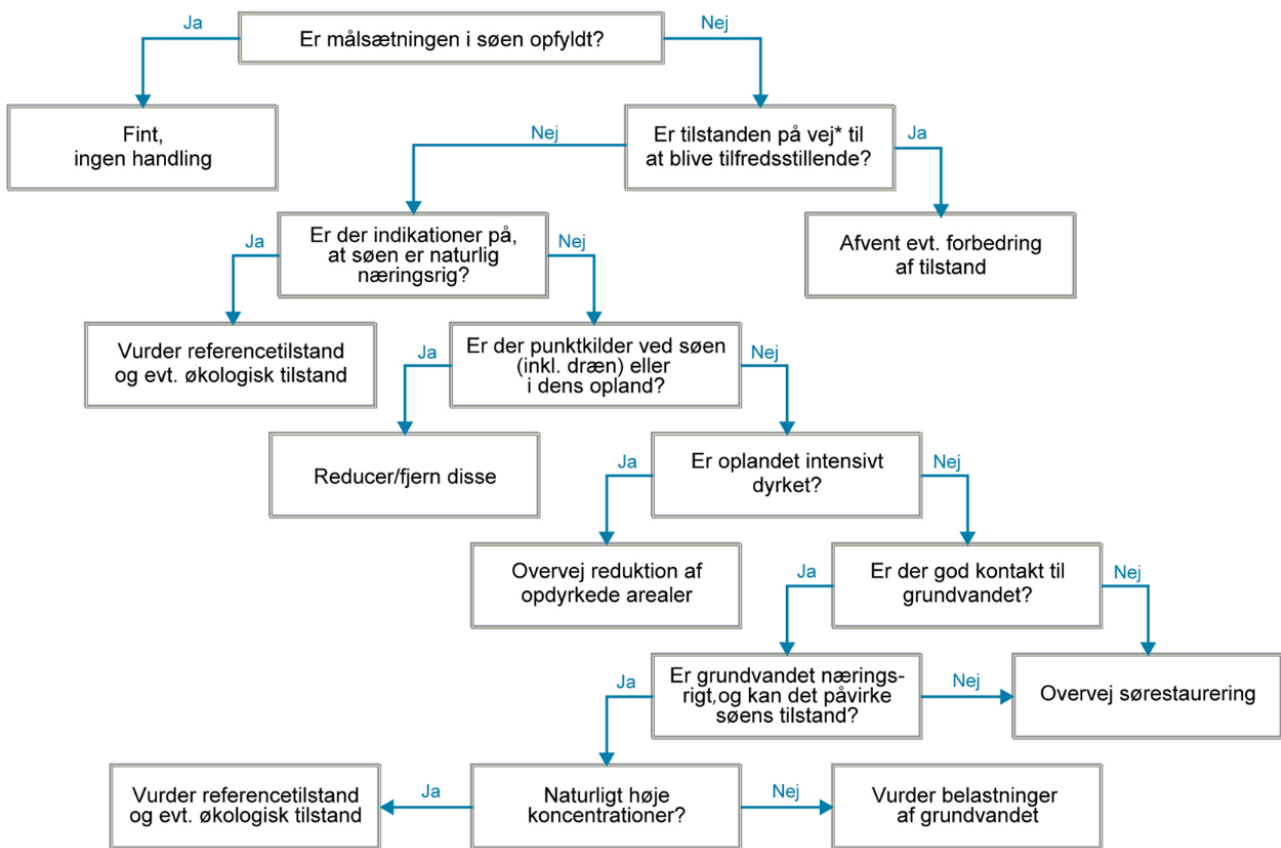
I figur 6.1 er der givet forslag til flowdiagram, som kan anvendes i forbindelse med analyser af tilstanden i søer uden tilløb og afløb og vurdering af mulige indsatser. Dette diagram giver også forslag til kriterier for, hvornår sørestaurering kan anvendes som en metode til at forbedre søernes tilstand.

6.2 anbefalinger

Den historiske menneskelige påvirkning af søer uden tilløb og afløb er – ligesom for de fleste andre søer – dårligt belyst. Derfor kunne det være relevant at gennemføre palæolimnologiske analyser af et antal søer af denne type – evt. fra forskellige oplandstyper – for dermed at kunne beskrive deres tidligere tilstand og deres generelle udvikling gennem især de seneste 100-200 år.

Søer uden tilløb og afløb, som er emnet i denne rapport, er ikke nødvendigvis helt sammenlignelige med søer, som har tilløb og afløb. Det ofte lille opland og den ringe vandgennemstrømning i søer uden tilløb og afløb kan betyde, at primærproduktionen i disse søer i mindre grad er fosforbegrænset, fordi tilført kvælstof før eller siden vil afgasses til atmosfæren, hvorimod fosfor forbliver i søen. Det kan derfor anbefales at vurdere betydningen af fosfor og kvælstof nærmere i søer uden veldefinerede afløb og tilløb. Dermed kan effekterne af en potentiel indsats over for kvælstoftilførslen til disse søer vurderes.

Interaktioner mellem grundvand og søerne uden veldefinerede tilløb og afløb er i store træk ukendte, og det anbefales at vurdere, i hvor høj grad interaktioner med grundvandet kan påvirke søernes tilstand (se også Nilsson m.fl. 2019).



Figur 6.1 Flowdiagram, som kan anvendes i forbindelse med vurdering af tilstanden i søer uden tilløb og afløb og eventuel efterfølgende handling. Der kan være administrative valg undervejs, eksempelvis om indsatser over for et intensivt dyrket opland kommer før indsatser over for punktkilder. *) I forbindelse med vandområdeplanerne anvendes en periode på 6-12 år (1-2 planperioder) som kriterie for værende "på vej".

Søer uden tilløb og afløb må forventes at have væsentlige variationer i vandstanden betinget af klimatiske variationer i nedbør og fordampning. Det anbefales, at disse forhold undersøges i forbindelse med tilstandsvurderinger af søerne og samtidigt vurdere, hvilken betydning det kan have for deres tilstand.

Restaurering er oftest gennemført i søer, som er lidt større end søerne i denne analyse. Det anbefales at vurdere mulighederne for at restaurere søer uden tilløb/afløb nærmere. Som udgangspunkt burde de være gode kandidater til en succesfuld restaurering, idet den eksterne næringsstofftilførsel ofte må formodes at være begrænset på grund af den ringe vandtilførsel. Sørestaurering vil også være relevant i de tilfælde, hvor det formodes, at målsætningen i en sø ikke er opfyldt på grund af tidligere påvirkninger.

7 Referencer

Andersen HE, Kjeldgaard A & Søndergaard M. 2015. Muligheder for at identificere søers fosforfølsomhed og fastlæggelse af oplande til søer. Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi.

Andersen HE, Heckrath G (redaktører). 2020. Fosforkortlægning af dyrkningsjord og vandområder i Danmark. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 340 s. - Videnskabelig rapport nr. 397 <http://dce2.au.dk/pub/SR397.pdf>.

Grzybowski M, Furgala-Selezniow G, Koszałka J, Kalinowska J, Jankun-Woźnicka M. 2023. Correlation between catchment land use/cover and macrophyte assessment of lake ecological status. *Ecological Indicators* 146, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109857>.

Johansson, LS, Moeslund, B, Søndergaard, M, Kjeldgaard, A, 2018. Sammenstilling af vandkemiske nøgleparametre og oplandsanvendelse med naturtilstand i næringsrige habitatsøer (naturtype 3150) <5 ha. 26 sider. http://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2018/Sammenstilling_af_vandkemiske_noegleparametre_og_oplandsanvendelse.pdf

Johansson LS, Søndergaard M, Andersen PM 2021. Søer 2020. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 80 s. - Videnskabelig rapport nr. 474. <http://dce2.au.dk/pub/SR474.pdf>

Kristensen KM, Waage-Petersen J, Børgesen CD, Vinther FP, Grant R., Blicher-Mathiesen, G. 2008. Reestimation and further development in the model NLES. NLES3 to NLES4. DJF Plant Science report no. 139. Aarhus University.

Nielsen A, Trolle D, Olesen J, Jeppesen, E. 2012. Oplandets betydning for søers vandkvalitet. *Vand & Jord*, bind 19, nr. 2, s. 57-60.

Nilsson B, Søndergaard M, Johansson LS, Olesen A, Kazmierczak J, Thorling L, Troldborg L. 2019. Vurdering af grundvandets kemiske og kvantitative påvirkning af søer. Rapport fra De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) og DCE, Aarhus Universitet.

Søndergaard, M, Jensen, JP, Jeppesen, E. 2002. Små søer og vandhuller. Skov- og Naturstyrelsen (elektronisk). <http://www.sns.dk/erhvogadm/ferskvand/smaasoer.pdf>

Søndergaard M, Jeppesen E., Jensen JP (redaktører), Bradshaw E, Skovgaard H, Grünfeld S. 2003. Vandrammedirektivet og danske søer. Del 1: Søtyper, referencetilstand og økologiske kvalitetsklasser. Danmarks Miljøundersøgelser. 142 s. - Faglig rapport fra DMU nr. 475. <http://faglige-rapporter.dmu.dk>.

Søndergaard, M, Lauridsen, TL, Johansson, LS, Jeppesen, E. 2017. Nitrogen or phosphorus limitation in lakes and its impact on phytoplankton biomass and submerged macrophyte cover. *Hydrobiologia*. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3110-x>.

8 Bilag

8.1 Estimering af oplande til søer uden afløb

Proceduren ved estimering af oplande til søer uden afløb er beskrevet nedenfor.

8.1.1 Inddata

Som inddata til estimering af søernes opland er anvendt højdemodel:

O:\AUIT_Geodata\Denmark\Digital_elevation_models\Lidar\DHM_2015.gdb\

DHM2015_terraen_10m

Vandløbstema: GeoDanmark2022vandlobsmidte. Søtema: GeoDanmark2022soe

MST har leveret en Excel-tabel med Vandplan-3 søer inkl. koordinater, unik ID og følgende afløbskoder:

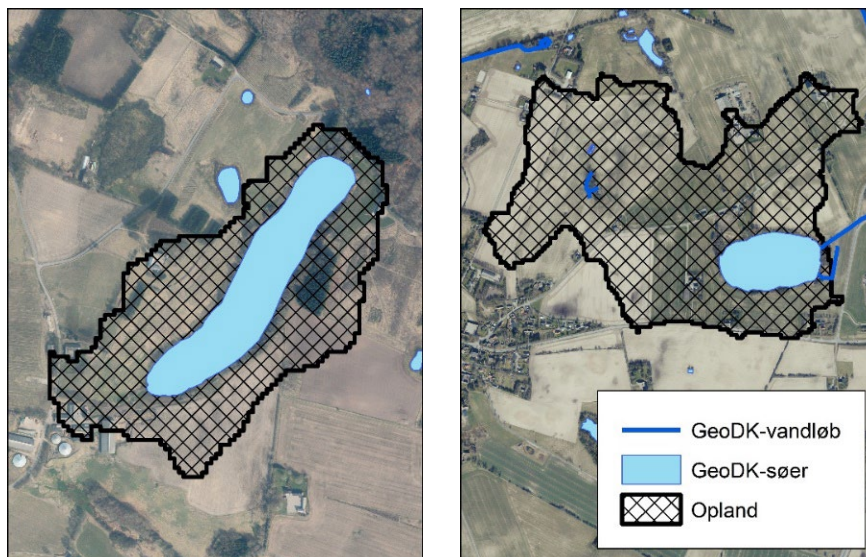
- 1) med afløb, belastning beregnes.
- 2) Uden afløb, belastning kan ikke beregnes.
- 3) Temporært afløb, belastning kan af tekniske grunde ikke beregnes.
- 4) Med afløb, men belastning kan af tekniske grunde ikke beregnes.

Der er i alt 987 søer i MST-tabellen, men 95 er uden koordinater, heraf 67 søer med afløbskode 2 eller 3. De manglende koordinater er hentet fra Vandplan3-søer som polygontema downloadet fra <https://mst.dk/service/miljoegis/>. Unikt id og afløbskoder er overført til GeoDanmark-søtemaet, og det er dette tema indeholdende samtlige søer, der anvendes til beregningen af oplande til de afløbsløse søer. Som ortofotos er der anvendt forårsbilleder 2015-2022 som WMS-service fra Dataforsyningen.

8.1.2 Procedure til beregning af overflade-oplande til søer uden afløb

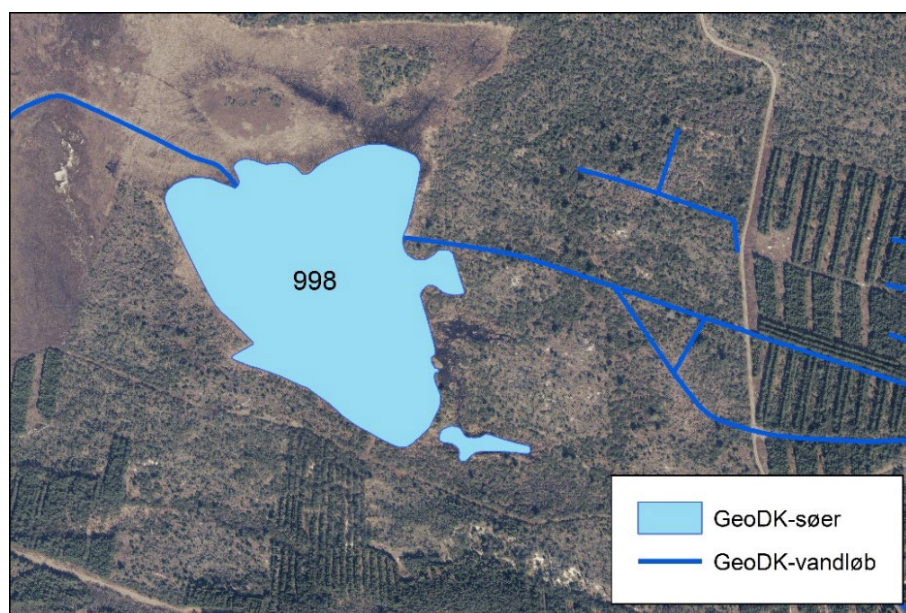
Søer uden afløb har på overfladen kun tilstrømmende vand, mens der overfladisk ikke løber noget vand fra søen. Overflade-oplande til søer uden afløb beregnes ved at betragte søen som en sink, hvor det tilstrømmende vand synker ned i jorden, og det beregnede opland vil ligge rundt om søen som hviden i et spejlæg. Overflade-oplande til søer med afløb beregnes fra søens afløb, og det beregnede opland vil strække sig fra afløbet og opstrøms, se figur 8.1.

Figur 8.1. Eksempler på søoplande. Til venstre er vist oplandet til en afløbsløs sø og til højre oplandet til en sø med afløb.



Beregningsmetoden til de to typer oplande er forskellig, og derfor er kriteriet +/- afløb vigtigt at fastsætte. MST oplyser i inddata om søernes afløbsforhold, derudover kan der også trækkes oplysninger fra GeoDanmark-vandløbste-maet, fra højdemodellen samt fra forårs-ortofotos. Desværre er der ikke altid overensstemmelse mellem kilderne, se figur 8.2. Der er især mange søer, som ifølge MST er afløbsløse, men hvor afløb ses i GeoDanmark-vandløbste-maet, i højdemodellen og på ortofoto. Ved uoverensstemmelse mellem oplysningerne om afløbsforhold er søen medtaget i beregningen af oplande til afløbs-løse søer.

Figur 8.2. Eksempel på sø, som ifølge MST er uden afløb, men hvor afløb ses i GeoDanmark-vandløb samt på Ortofoto..



Oplandsberegningerne er foretaget i ArcGIS efter følgende principper:

- GeoDanmark-søtemaet konverteres til raster, hvor sø-overflader sættes til 1 og resten til 0,
- Sø-rasteren fratrækkes højdemodellen, sådan at søoverfladerne sænkes 1 meter.
- En Flow Direction raster beregnes på den sø-justerede højdemodel.
- Sø-polygonerne konverteres til søbred-linjer med sø-id.
- Watershed på Flow Direction rasteren beregnes med søbred-linjerne som Pour Points.

- Watershed og sø-rasteren konverteres til polygoner uden simplify.
- De to polygonlag samles og opløses ("dissolves") på sø-id uden multi-parts.
- Små polygoner elimineres "by border", så resultatet bliver pæne afløbsløse oplande uden artefakter.

8.1.3 Uddata

Ved estimering af oplande er der beregnet uddata, som indeholder information om:

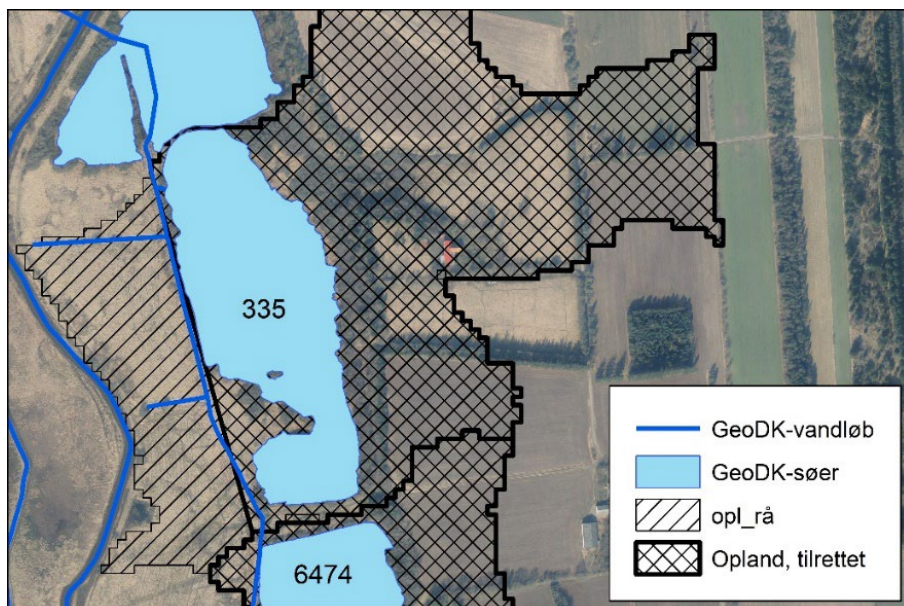
- FOT sø-id
- MST sø-id
- Sønavn
- MST-afløbskode
- +/- GeoDanmark-vandløb
- Søareal
- Oplandsareal.

Der er beregnet opland til i alt 418 søer, som er inddelt efter afløbstyper (se afsnit 2.1):

- 9 type 1 søer (men ikke afløb ifølge GeoDanmark-vandløbstemaet)
- 292 type 2 søer
- 106 type 3 søer
- 11 type 4 søer.

Der er foretaget manuelle tilretninger af nogle af oplandene, f.eks. afskæring af vandløb, se figur 8.3. De resterende type 2, 3 og 4 oplande er fejlberegnet og derfor fjernet fra uddata.

Figur 8.3. Eksempel på manuelt tilrettet opland. Sø med MST-id 335 snittes af et vandløb, dog uden at have forbindelse. Den vestlige del af det beregnede opland er manuelt fjernet, idet denne del ikke afvander til søen, men til vandløbet.



I dette projekt er der beregnet afløbsløse oplande – også til søer med uklare afløbsforhold. Når afløbsforholdet til disse søer bliver mere præcist fastsat, bør der luges ud i oplandstemaet, så det kun indeholder oplande til afløbsløse søer.

8.2 Anvendte jordtyper

I tabel 8.1 vises de jordtyper fra oplandsbeskrivelsen, der har været udgangspunktet for fastlæggelse af de tre grupper/typer af jordbund, der har været anvendt.

Tabel 8.1 Jordtyper anvendt ved beskrivelsen GIS-data fra søernes oplande.

Jordtype_DK	Symbol	JB_nr	Jordtype_UK
Grovsandet jord	GR.S.	1	Coarse sandy soil
Finsandet jord	F.S.	2	Fine sandy soil
Grov lerblandet sandjord	GR.L.S.	3	Clayey sandy soil
Fin lerblandet sandjord	F.L.S.	4	Clayey sandy soil
Grov sandblandet lerjord	GR.S.L.	5	Sandy clayey soil
Fin sandblandet lerjord	F.S.L.	6	Sandy clayey soil
Lerjord	L	7	Clayey soil
Svær lerjord	SV.L.	8	Heavy clayey soil or silty soil
Meget svær lerjord	M.SV.L.	9	Heavy clayey soil or silty soil
Siltjord	SI.	10	Heavy clayey soil or silty soil
Humus	HU.	11	Organic soil
Speciel jordtype (kalkholdig)	SPEC.	12	Atypical soil

SAMMENHÆNGE MELLEM OPLANDS- KARAKTERISTIKA OG TILSTANDEN I SØER UDEN VELDEFINEREDE AFLØB

Søer uden veldefinerede afløb er almindelige i Danmark. Mangel på tilløb og afløb gør det vanskeligt at fastsætte en indsats i de søer, hvor målsætningen ikke er opfyldt. I denne rapport er der estimeret et opland og derefter en række oplandskarakteristika for de enkelte søer, som er sammenholdt med tilstanden i søerne. Formålet var kunne fastsætte indsatser i søernes oplande, som kan forbedre søernes tilstand. Der ses signifikante sammenhænge mellem søtilstand og oplandskarakteristika, f.eks. en positiv sammenhæng mellem andel af dyrket areal og søernes indhold af næringsstoffer, men i alle tilfælde er der tale om svage sammenhænge.