



SAMMENHÆNGE MELLEM NÆRINGSSTOF- TILFØRSEL OG SØKONCENTRATIONER I DANSKE SØER

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 138

2015



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

[Tom side]

SAMMENHÆNGE MELLEM NÆRINGSSTOF- TILFØRSEL OG SØKONCENTRATIONER I DANSKE SØER

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 138

2015

Dennis Trolle
Martin Søndergaard
Rikke Bjerring

Aarhus Universitet, Institut for Bioscience



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 138
Titel:	Sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og søkoncentrationer i danske søer
Forfattere:	Dennis Trolle, Martin Søndergaard & Rikke Bjerring
Institution:	Aarhus Universitet, Institut for Bioscience
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	Februar 2015
Redaktion afsluttet:	December 2014
Faglig kommentering:	Naturstyrelsen og internt i forfattergruppen
Kvalitetssikring, DCE:	Poul Nordemann Jensen
Finansiel støtte:	Naturstyrelsen
Bedes citeret:	Trolle, D., Søndergaard, M. & Bjerring, R. 2015. Sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og søkoncentrationer i danske søer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 34 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 138 http://dce2.au.dk/pub/SR138.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Rapporten etablerer empiriske sammenhænge mellem søers næringstilførsel (fosfor og kvælstof) og de resulterende søkoncentrationer med udgangspunkt i nye samt tidligere anvendte modeller. Forklaringsværdien for flere af de analyserede modeller afviger ikke væsentlig fra hinanden, men det varierer noget hvor stor bias modellerne har. Der kan etableres stærke sammenhænge mellem årsmiddel- og sommermiddelskoncentrationer.
Emneord:	Søer, empiriske modeller, næringsstofftilførsel, søkoncentration, fosfor, kvælstof
Layout:	Grafisk Værksted, AU Silkeborg
Foto forside:	Martin Søndergaard
ISBN:	978-87-7156-124-1
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	34
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/SR138.pdf

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
1 Indledning	8
1.1 Baggrund	8
1.2 Formål	9
2 Metoder	11
2.1 Databaggrund og analyser	11
3 Fosfortilførsel og søkoncentration	15
3.1 Modeller til beregning af søkoncentration	15
3.2 Sammenhæng mellem fosfortilførsel og fosforkoncentration	16
3.3 Sammenhæng mellem års- og sommermiddelværdier	20
3.4 Relationer til fosfor-retention	21
3.5 Delkonklusion	23
4 Kvælstoftilførsel og søkoncentration	24
4.1 Modeller til beregning af søkoncentration	24
4.2 Sammenhæng mellem kvælstoftilførsel og kvælstofkoncentration	24
4.3 Sammenhænge mellem års- og sommermiddelskoncentrationer	26
4.4 Delkonklusion	27
5 Konklusioner	28
Fosfortilførsel og søkoncentration	28
Kvælstoftilførsel og søkoncentration	30
6 Referencer	31

[Tom side]

Forord

Denne rapport er en af 5 rapporter vedrørende søer, som er udarbejdet i forbindelse med Naturstyrelsens projekt: implementering af modeller til brug for vandforvaltningen.

Rapporterne er:

- Sikkerhed på tilstandsvurdering i danske søer – År- til år variationer i biologiske kvalitetselementer. Rapport fra DCE, Aarhus Universitet.
- Sammenhæng mellem næringsstofindhold og biologiske kvalitetselementer i danske søer. Rapport fra DCE, Aarhus Universitet.
- Sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og søkoncentration i danske søer. Rapport fra DCE, Aarhus Universitet.
- Den interne fosforbelastning i danske søer og indsvingningstid efter reduktion af ekstern fosfortilførsel. Notat fra Syddansk Universitet.
- Erfaringer med anvendelse af dynamiske sømodeller. Notat fra DHI.

Rapporten beskriver de empiriske sammenhænge, der kan etableres mellem tilførslen af fosfor og kvælstof til danske søer og den koncentration, der ses i søvandet. Disse sammenhænge kan anvendes til at vurdere hvilken indsats, der eventuelt skal iværksættes over for den eksterne næringsstofftilførsel for at opnå mindst en god økologisk tilstand.

Sømodelprojektet har været fulgt af en projektgruppe bestående af Kjeld Sandby Hansen, Gudrun Frandsen Krog, Bodil Aavad Jacobsen og Harley Bundgaard Madsen (alle Naturstyrelsen), Martin Søndergaard (Aarhus Universitet), Dennis Trolle (Aarhus Universitet), Henning Jensen (Syddansk Universitet), Mogens Flindt (Syddansk Universitet), Jørgen Krogsgaard Jensen (DHI) og Flemming Gertz (Videncenter for Landbrug). Medlemmerne i projektgruppen takkes for bidrag og kommentarer undervejs.

Sammenfatning

Indholdet af næringsstoffer – især fosfor og kvælstof - sætter de overordnede rammer for søers vandkvalitet og den økologiske tilstand. For at kunne vurdere hvilken indsats, der eventuelt er nødvendig for at opnå mindst en god økologisk tilstand, er det derfor vigtigt med et godt kendskab til søernes næringsstofftilførsel og hvilken søkoncentration, denne kan forventes at resultere i. Formålet med denne rapport er at revurdere tidligere anvendte modeller for sammenhænge mellem kvælstof- og fosfortilførsel til søer og den resulterende søkoncentration, og på baggrund af opdaterede danske data at opstille nye, simple empiriske modeller for sammenhæng mellem tilførsel og søkoncentration.

Modellerne er etableret på baggrund af opdaterede målinger af stofftilførsel og søkoncentrationer og med udgangspunkt i Vollenweider-modellen anvendt ved udarbejdelsen af de første vandplaner, hvor der imidlertid inkluderes en række yderligere modelkoefficienter i et forsøg på at forbedre modellens nøjagtighed i forhold til et dansk datasæt. Det anvendte datasæt omfattede en bruttoliste med 50 søer, som i den endelige analyse blev reduceret til at omfatte data fra 23 søer (165 søår) for blandt andet at frasortere søer, som ikke antages at være i ligevægt med den eksterne belastning.

Det beskedne antal søer gør analyseresultaterne usikre, ikke mindst hvis der underinddeles i specifikke søtyper. Usikkerheden i de etablerede sammenhænge øges også ved, at det ikke med sikkerhed kan afgøres om de søer, som er anvendt i analyserne, helt er i ligevægt med den eksterne næringsstofftilførsel. Endvidere udgøres det tilgængelige datasæt næsten udelukkende af næringsrige søer, hvilket betyder, at modellerne er bedst til at udtale sig om sammenhænge mellem tilførsel og søkoncentrationer i uklare søer, som må forventes at være i moderat, ringe eller dårlig økologisk tilstand.

For fosfor viser analyserne af de forskellige modeltyper generelt ikke de store forskelle i forklaringsværdierne for sammenhænge mellem tilførsel og søkoncentration og peger ikke klart på én model frem for andre. Alle modeller giver nogenlunde den samme – og relativt lave - forklaringsværdi svarende til tidligere analyser. Dog er der forskel på modellernes bias, og her giver analyserne en lav værdi for den ikke-typeinddelte modeltype (modificeret OECD-model), hvilket er at foretrække og taler til fordel for at anvende denne model (tabel 0.1). Hvis man ønsker, at målrette anvendelsen af denne model mod de mindst næringsrige af søerne, der indgår i analyserne, kan man evt. anvende modeludtrykket, som kun anvender sødata med totalfosforkoncentrationer under 0,2 mg/l. Konsekvensberegninger med udgangspunkt i de forskellige modeller, der blev analyseret, viser for de fleste søer en god overensstemmelse i forhold til beregnet fosforreduktionskrav, men for enkelte søer ville det være fagligt relevant at kvalificere beregningerne - evt. ved opstilling af en dynamisk model og/eller med noget empiri for hver enkelt sø (baseret på tidsserierne). Ved omregning mellem årsgennemsnit og sommergennemsnit kan der etableres stærke empiriske sammenhænge i både lavvandede og dybe søer.

Tabel 0.1. Simple empiriske sammenhænge mellem årsgennemsnitlig fosfor- og kvælstoftilførsel ($TP_{indløb}$ og $TN_{indløb}$) og de relaterede årsgennemsnitlige søkoncentrationer ($TP_{sø}$ og $TN_{sø}$) gældende for alle søtyper. Her er vist den modificerede OECD-model (ingen opdeling i søtyper). T_w er den hydrauliske opholdstid i år. R^2 er korrelationskoefficienten (forklaringsværdien). MSE er modeludtrykkets mean squared error. N er antallet af søer inkluderet i analysen.

Søkoncentration	Ligning	R^2	MSE	N
$TP_{sø} =$	$1,568 \cdot TP_{indløb}^{1,147} / (1 + \sqrt{t_w})^{0,276}$	0,45	0,00205	165
$TP < 0,2 \text{ mg/l: } TP_{sø} =$	$1,095 \cdot TP_{indløb}^{1,043} / (1 + \sqrt{t_w})^{0,229}$	0,40	0,00101	147
$TN_{sø} =$	$1,340 \cdot TN_{indløb}^{0,612} / (1 + \sqrt{t_w})^{0,632}$	0,76	0,33	165

For kvælstof kan der etableres en noget stærkere empirisk sammenhæng mellem kvælstoftilførsel og søkoncentration end for fosfor (tabel 0.1). Forklaringsværdien og spredningen (repræsenteret ved MSE) er stort set den samme, om der anvendes en generel modificeret OECD-model for alle søer, eller der typeinddeles efter dybde eller opholdstid. Ved omregning mellem årsgennemsnit og sommergennemsnit kan der ligeledes etableres relativt stærke empiriske sammenhænge, men dog ikke helt så stærke som for fosfor.

1 Indledning

1.1 Baggrund

Indholdet af næringsstoffer sætter de overordnede rammer for de fleste biologiske processer og forhold i søerne. Dermed bliver tilførslen af næringsstoffer også meget vigtig for den vandkvalitet og den økologiske tilstand en sø har. Især indholdet af kvælstof og fosfor er betydende, og heraf anses fosfor hyppigst som værende den begrænsende faktor for primærproduktionen og dermed også det næringsstof med størst indflydelse på søernes tilstand. Kvælstof kan dog i mange tilfælde også spille en betydelig rolle og i mange danske søer skifter betydningen af fosfor og kvælstof formentlig igennem sæsonen, som blandt andet beskrevet i Bjerring et al. (2013).

I forhold til Vandrammedirektivets implementering og beregning af hvilken indsats, der eventuel er nødvendig for at opnå mindst en god økologisk tilstand, er det derfor vigtigt med et godt kendskab til søernes næringsstoftilførsel og hvilken søkoncentration, denne kan forventes at resultere i. I det første hold vandplaner blev der således anvendt en empirisk fosformodel, der beregnede årsmiddelkoncentrationen af fosfor på baggrund af den årsgennemsnitlige indløbskoncentration og søens hydrauliske opholdstid (Vollenweider, 1976). Denne model blev anvendt for alle søtyper.

De empiriske sammenhænge, der kan etableres mellem tilførsel og søkoncentration, er ofte noget usikre og giver typisk en forklaringsværdi på højest 50% (dvs. R^2 -værdi på omkring 0,5 eller mindre) for sammenhænge mellem målt og beregnet søkoncentration (Kristensen et al. 1990). Se også Trolle og Søndergaard (2010) vedrørende udviklingen og anvendelsen af empiriske og dynamiske sømodeller. Internationalt har disse typer af modeller også fundet vid anvendelse, hvoraf Vollenweider-modellen er den hyppigst anvendte (Brett & Benjamin, 2008). Årsagen til den forholdsvis beskedne forklaringsværdi i disse modeltyper kan være mange, men som det eksempelvis er påvist ved lavvandede søers skift mellem den klarvandede og uklare tilstand, så har de biologiske forhold i den enkelte sø stor betydning for både fosfor- og kvælstoftilbageholdelsen, og det giver stor variation i de empiriske sammenhænge. Derudover vil disse typer af sammenhænge ofte være udviklet med baggrund i data fra forskellige søtyper, som ikke nødvendigvis udviser samme respons for sammenhæng mellem tilførsel og søkoncentration. Endelig vil beregningen af den eksterne fosfortilførsel ofte være forbundet med en betydelig usikkerhed (se fx Bjerring et al. 2014).

Vollenweidermodellen har været anvendt som udgangspunkt for videreudvikling af andre modeller og eksempler på modificerede udgaver af Vollenweidermodeltypen er illustreret af OECD (1982) og Foy (1992). Foy (1992), for eksempel, anvendte et udtryk med yderligere tre modelkoefficienter og fandt høje R^2 -værdier (0,96) for 10 irske søer: $P_{sø} = 1,234 \cdot P_{indløb}^{0,991} / (1 + \sqrt{t_w})^{1,13}$, hvor $P_{sø}$ er årsmiddelkoncentration i søen, $P_{indløb}$ er vandføringsvægtet indløbskoncentration og t_w er opholdstiden.

De forskellige typer af empiriske og generelle modeller for sammenhænge mellem fosfortilførsel og søkoncentration er etableret for søer, som antages at være i en ligevægtstilstand, dvs. under stabile belastningsforhold, hvor søerne og deres tilbageholdelse af fosfor er i ligevægt med den eksterne fosfortilførsel. Eftersom belastningen til mange danske søer er reduceret eller ændret

markant gennem de sidste årtier, repræsenterer de tilgængelige data fra disse søer ikke nødvendigvis søer i ligevægt. Dette kommer til udtryk i, at der er en væsentlig højere fosforkoncentration end forventet, fordi der frigives fosfor fra en pulje ophobet i sedimentet fra dengang belastningen var større. Det mest tydelige eksempel blandt overvågningssøerne er her Gundsømagle Sø, hvor der var en stor nettofrigivelse af fosfor i starten af 1990'erne (se fx Søndergaard et al. 2013a). Manglende ligevægtstilstande vil især påvirke sødata fra den første halvdel af 1990'erne, hvor mange søer formodes stadigvæk at være påvirkede af en intern fosforbelastning, men i de fleste tilfælde er der ikke nogen god beskrivelse af søers belastning før overvågningsprogrammets start i 1989. På baggrund af en international undersøgelse af 35 søers respons efter reduceret, ekstern fosfortilførsel er det blevet konkluderet, at søer ofte er 10-15 år om at indstille sig efter en reduceret ekstern fosforbelastning (Jeppesen et al. 2005), men der er store forskelle afhængigt af søtype og belastningshistorie (se også bl.a. Søndergaard et al. 2003; Flindt et al. 2015). Betydningen og modelleringen af indsvingningsforløbet for danske søer er blandt andet beskrevet i Jensen et al. (2006). Endelig må det bemærkes at, selvom fosfortilbageholdelsen på årsbasis er positiv og i ligevægt med den eksterne fosforbelastning vil der i mange næringsrige søer være en betydelig, intern fosforbelastning i sommerperioden, som giver anledning til forhøjede søkoncentrationer og en negativ fosfortilbageholdelse i flere af sommermånederne (Søndergaard et al. 2013a). Den negative fosfortilbageholdelse om sommeren modsvarer af en positiv tilbageholdelse i vinterperioden.

En anden problemstilling er, at de empiriske modeller, herunder også Volenweider-modellen, typisk er udviklet til at beskrive en årsmiddelkoncentration. For de biologiske kvalitetselementer, som anvendes til at vurdere søernes økologiske tilstand i Danmark, anvendes der imidlertid gennemsnitlige sommerværdier (Søndergaard et al. 2013b). Det betyder, at en given belastning i sidste ende gerne skal udtrykkes i en sommerkoncentration for at være direkte anvendelig i forhold til Vandrammedirektivets implementering. Både den sæsonmæssige variation i kvælstof- og fosforkoncentrationer på basis af blandt andet indløbskoncentrationer er tidligere beskrevet med empiriske modeller for danske søer (Windolf et al. 1996; Jensen et al. 2006).

Siden NPo-redgørelsen i 1990 (Kristensen et al. 1990), hvor forskellige modeller for empiriske sammenhænge mellem fosfortilførsel og søkoncentration blev analyseret på danske data, har NOVANA-overvågningsprogrammet og den systematiske prøvetagning bidraget markant til at forbedre databaggrunden for etablering af sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og søkoncentration. Forud for næste hold vandplaner er det derfor relevant at forsøge at optimere disse former for sammenhænge ved at inddrage nyere data, så det kan vurderes, om der kan angives mere præcise sammenhænge mellem tilførsel og søkoncentration. Dette kan eventuelt også opnås ved at gruppere søerne efter type (dybde, hydraulisk gennemstrømning, mm.). Disse modeller vil være centrale i forhold til at kunne beregne det fremtidige indsatsbehov i vandplansøerne.

1.2 Formål

Formålet i denne rapport er at vurdere og opstille empiriske modeller for sammenhænge mellem kvælstof- og fosfortilførsel til søer og den resulterende søkoncentration.

Herunder er formålet at undersøge, om sikkerheden på det beregnede indsatsbehov ved at opstille empiriske modeller, som tager højde for sammenhænge for forskellige søtyper, f.eks. lavvandede og dybe søer eller langsomt og hurtigt gennemstrømmede søer, kan øges i forhold til den tidligere anvendte model.

2 Metoder

Modeller for sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og søkoncentration etableres på baggrund af opdaterede målinger af stofftilførsel og søkoncentrationer. Dette vil kun være muligt for et begrænset antal søer og baseres på belastningsdata, der leveres fra oplandsmodel-delprojektet (Bjerring et al. 2014).

Der tages udgangspunkt i Vollenweider-modellen anvendt ved udarbejdelsen af de første vandplaner, hvor der imidlertid inkluderes en række yderligere modelkoefficienter (som også anvendt af Foy 1992) i et forsøg på at forbedre modellens nøjagtighed i forhold til et dansk datasæt. Denne modificerede model angiver vi i den følgende tekst som en "modificeret OECD" model, da modeltyperne i høj grad minder om de matematiske udtryk, der blev lavet af OECD (1982), som også tog et udgangspunkt i Vollenweider-modellen. Sammenhængen mellem kvælstofftilførsel og kvælstofkoncentration undersøges på tilsvarende vis, og kan anvendes til beregning af et evt. indsatsbehov over for kvælstof, i det omfang et sådant anvendes i 2. planperiode.

Sammenhænge mellem årsmiddel- og sommermiddelkoncentrationer af totalfosfor og totalkvælstof er etableret på baggrund af det samme datasæt anvendt til beregning af sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og søkoncentrationer.

2.1 Databaggrund og analyser

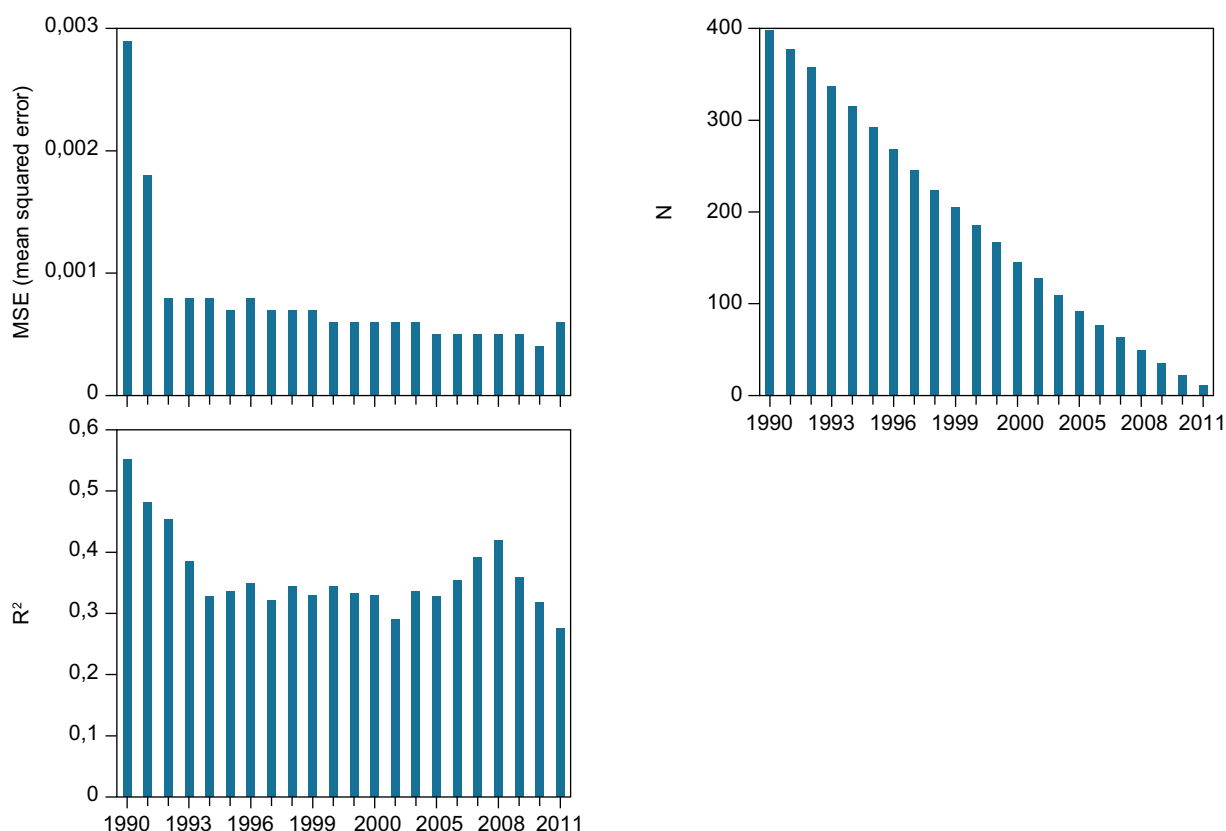
Data anvendt i dette delprojekt stammer fra oplandsmodelprojektet (Bjerring et al., 2014). På trods af et større udredningsarbejde lykkedes det kun at tilvejebringe en bruttoliste med data fra 50 søer. Heraf udgør intensivt overvågede søer fra NOVANA-programmet de 17 søer. Disse 17 søer er fulgt gennem mange år, og når alle måleår anvendes i analyserne vil disse søer dominere de anvendte data.

Før den endelige dataanalyse er bruttolisten med de 50 søer yderligere kvalitetsvurderet på baggrund af en række kriterier:

1. Sø-data skal være tilgængelige.
2. Belastningsdata og sø-data skal være tilgængelige fra samme år.
3. Der skal være månedlige sø-data tilgængelige til beregning af års- og sommer-gennemsnit.
4. Der skal være en form for afløbs- eller indløbs-data / estimat til estimering af opholdstid.
5. Årene, hvor søer antages ikke at være i ligevægt med den eksterne belastning, frasorteres:
 - a. Alle år i perioden før 2000 frasorteres.
 - b. Alle år med negativ P retention i en sammenhængende periode fra 2000 og frem frasorteres indtil første år med positiv retention.

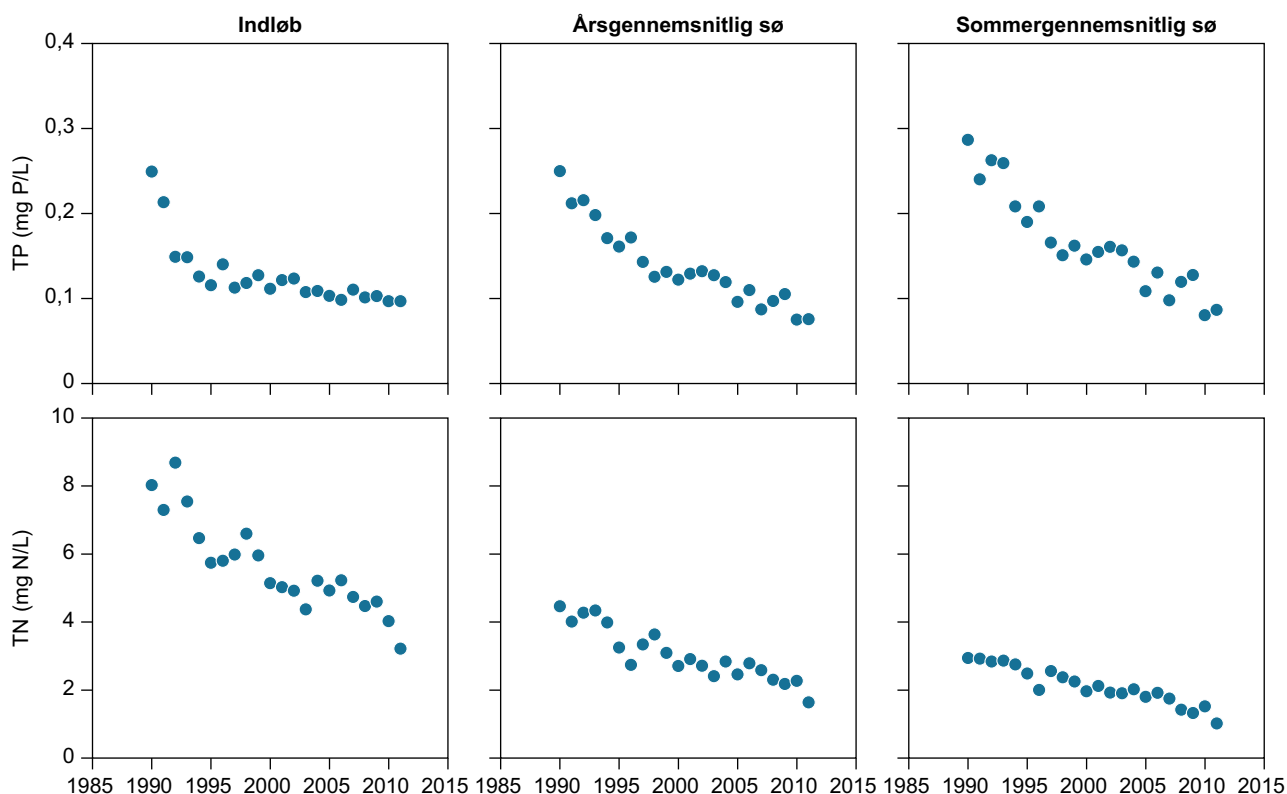
Der anvendes to statistiske parametre til at vurdere, hvor godt modellerne stemmer overens med observationer. Dette inkluderer R^2 -værdier, som udtrykker styrken i en lineær sammenhæng mellem model data og observationer (men angiver alene ikke noget om, hvorvidt sammenhængen er i nærheden af en 1:1 linje), og Mean Squared Error (MSE), som giver et udtryk for den generelle spredning, der findes omkring 1:1 linjen mellem modeldata og observationer.

Begge statistiske metoder er blandt de mest anvendte udtryk til vurdering af modeller og deres styrke (se Bennett et al. 2013 for grundig diskussion af dette emne). For eksempel kan en model godt opnå en R^2 -værdi på 1, selvom modellen konsekvent overestimerer (eller underestimerer) i forhold til observationer. Derfor er det optimale både at opnå høje R^2 -værdier og samtidig lave MSE-værdier. Til vurdering af punkt 5 er der indledningsvis lavet en beregning af MSE- og R^2 -værdier imellem observerede årsmiddel TP-søkoncentrationer og TP-søkoncentrationer beregnet med den traditionelle Vollenweider model, hvor data der indgår i analyserne årstalsmæssigt afskæres i forskellig grad (Fig. 2.1.). Disse analyser viser, at MSE efter 1991 stabiliserer sig på et næsten konstant niveau.



Figur 2.1. Beregning af MSE og R^2 , hvis data, som indgår i analyserne, i varierende grad begrænses i antal år der nedadtil anvendes. Til højre er vist hvor mange data (søår), der indeholdes i analyserne, hvis data fra og med 1990, 1991, etc. anvendes.

Tilsvarende ændres den gennemsnitlige indløbskoncentrationen af TP til søerne kun lidt efter 1991, om end der stadigvæk ses et svagt, jævnt fald (Fig. 2.2). Dette svage fald i den gennemsnitlige koncentration kan til dels skyldes påvirkningen fra enkelte søer, ikke mindst Gundsømagle Sø, hvor der var en stor intern fosforfrigivelse op gennem 1990'erne. Selv efter 2000 ses dog et svagt fald i den gennemsnitlige indløbskoncentration af fosfor, og det antyder, at søerne som helhed betragtet i en vis grad stadigvæk er under indsvingning. Indløbskoncentrationer af TN reduceres nogenlunde konstant i hele den undersøgte periode.



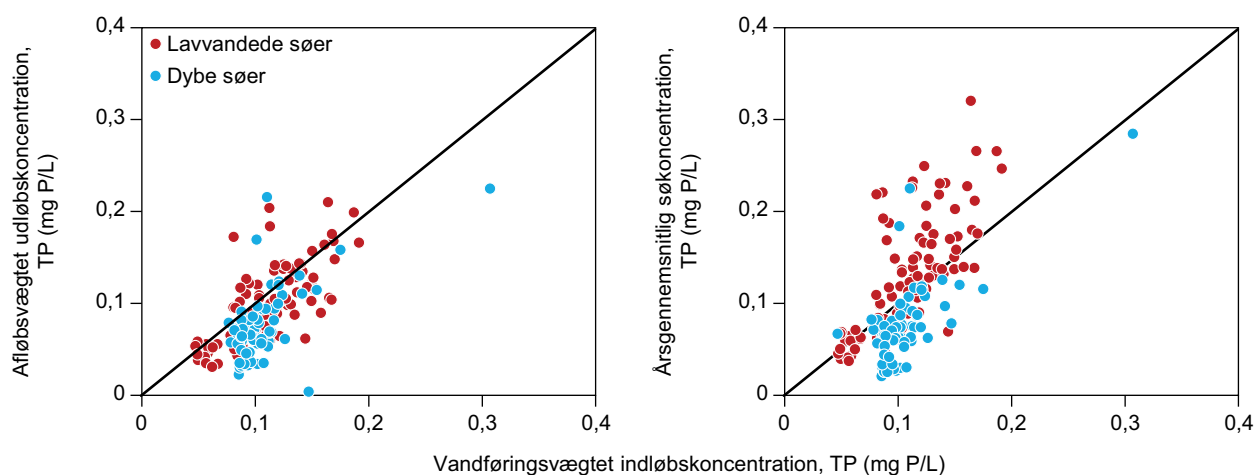
Figur 2.2. Vandføringsvægtede indløbskoncentrationer og årsgennemsnitlige søkoncentrationer som gennemsnit for de 34 søer anvendt i analyserne. Tidsserier fra tilløb og søer 1990-2011.

Hvis de fem punkter til kvalitetssikring af data i forhold til kun at anvende data fra søer, som anses for at være i ligevægt med den eksterne fosforbelastning, bringer dette det totale antal søer ned på 23 søer (15 intensive og 8 ekstensive søer) omfattende 165 sø-år; ud af 398 sø-år inkl. 1990-1991. Det beskedne antal søer gør analyseresultaterne mere usikre, især hvis der ønskes en underopdeling i specifikke søtyper. En oversigt over søerne og deres data er angivet i tabel 2.1. I alt indgår 13 lavvandede (middeldybde < 3 m) og 10 dybe (middeldybde > 3 m) søer.

I figur 2.3 (højre del) er der vist plots af alle data af vandføringsvægtede indløbs- og årsgennemsnitlige søkoncentrationer af fosfor inddelt efter sødybde. Specielt i de lavvandede, næringsrige søer ses ofte et højere årsgennemsnit i søvandet i forhold til den vandføringsvægtede indløbskoncentration. Det skyldes de forhøjede søkoncentrationer, der ofte ses i disse søtyper om sommeren på grund af frigivelsen fra søbunden. Sammenlignes den indløbsvægtede indløbskoncentration og den afløbsvægtede udløbskoncentration (Fig. 2.3, venstre) ligger de fleste punkter dog under 1:1 linjen, som et udtryk for at der netto og på årsbasis er en P-retention i hovedparten af søerne. Forskellen mellem de årsgennemsnitlige søkoncentrationer og de afløbsvægtede udløbskoncentrationer skyldes, at vandgennemstrømningen som oftest er mindst i sommerhalvåret, hvor der er de højeste søkoncentrationer.

Tabel 2.1. Oversigt over søerne og data anvendt til etablering af modeller for sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og søkoncentration.

Lokalitetsnavn	Søtype	Antal år med data	Sø- areal (km ²)	Mid- del- dybde (m)	Op- holds- tid (år)	Middel	Max	Middel	Max
						årgennem- snitlig TP [mg P/L] (i perioden 2000-2010)	årgennem- snitlig TP [mg P/L] (i perioden 2000-2010)	årgennem- snitlig TN [mg N/L] (i perioden 2000-2010)	årgennem- snitlig TN [mg N/L] (i perioden 2000-2010)
Arreskov Sø	Intensiv	12	3,17	1,9	0,79	0,11	0,22	2,09	3,71
Arresø	Intensiv	11	39,87	3,1	1,73	0,16	0,23	2,20	2,71
Bryrup Langsø	Intensiv	12	0,37	4,6	0,22	0,07	0,09	2,94	3,50
Engelsholm Sø	Intensiv	12	0,44	2,6	0,21	0,05	0,07	1,18	1,45
Furesøen Storesø	Intensiv	12	9,41	13,5	8,80	0,08	0,11	0,75	0,88
Hinge Sø	Intensiv	11	0,93	1,2	0,04	0,10	0,15	2,44	3,36
Hostrup Sø	Ekstensiv	1	2,02	2,2	1,25	0,06	0,06	1,55	1,55
Jels Midtsø	Ekstensiv	1	0,24	4,3	0,10	0,09	0,09	3,81	3,81
Jels Oversø	Ekstensiv	1	0,08	1,1	0,02	0,25	0,25	2,91	2,91
Klejtrup Sø	Ekstensiv	2	1,33	2,9	0,53	0,10	0,13	2,38	2,63
Kobbermose	Ekstensiv	1	0,11	0,6	0,03	0,06	0,06	0,46	0,46
Nordborg Sø	Ekstensiv	1	0,55	5,2	0,83	0,28	0,28	1,61	1,61
Ørnsø	Intensiv	5	0,42	4,0	0,05	0,07	0,08	1,15	1,21
Østrup-									
Gundsømagle Sø	Intensiv	9	0,32	1,3	0,04	0,20	0,27	3,40	4,26
Ravn Sø	Intensiv	12	1,81	15,1	1,76	0,03	0,03	2,50	3,41
Salten Langsø	Ekstensiv	1	2,92	4,5	0,16	0,06	0,06	0,97	0,97
Søgård Sø,									
Jylland	Intensiv	10	0,27	1,6	0,05	0,14	0,19	4,26	5,15
Søholm Sø	Intensiv	12	0,26	6,7	1,00	0,06	0,08	1,71	2,15
Store Søgård Sø	Intensiv	12	0,61	2,7	0,18	0,20	0,32	3,50	4,49
Stubbe Sø	Ekstensiv	2	3,79	2,8	0,34	0,06	0,07	1,17	1,31
Tissø	Intensiv	7	12,33	8,2	1,33	0,12	0,23	2,09	2,52
Tystrup Sø	Intensiv	6	6,62	9,9	0,35	0,11	0,13	3,71	4,39
Vesterborg Sø	Intensiv	12	0,21	1,4	0,07	0,12	0,17	4,23	5,22



Figur 2.3. Højre: Observationer af indløbskoncentrationer af TP (vandføringsvægtet) samt TP koncentration (årgennemsnitlig) målt i søerne, som er inkluderet i videre analyse (165 sø-år). Venstre: den tilsvarende sammenhæng mellem vandføringsvægtet indløbskoncentration og udløbskoncentration. 1:1-linjen er indtegnet.

3 Fosfortilførsel og søkoncentration

3.1 Modeller til beregning af søkoncentration

Modelberegningerne af sammenhænge mellem fosfortilførsel og søkoncentration er foretaget med udgangspunkt i Vollenweider-typen, dvs. at en årsmiddelsøkoncentration ($P_{sø}$) bestemmes ud fra den vandføringsvægtede årlige indløbskoncentration ($P_{indløb}$) og søens opholdstid (t_w): $P_{sø} = P_{indløb} / (1 + \sqrt{t_w})$. For Vollenweider-modellen er der gennemført forskellige grader af modificeringer, for at se, i hvilket omfang dette forbedrer modellens sikkerhed for danske søer. Derudover er der gennemført beregninger med de typer af modeller oprindeligt foreslået i NPo-rapporten fra 1990.

De behandlede modeltyper er således de 4 bedste modeller fra NPo rapport "Eutrofieringsmodeller for søer", Miljøstyrelsen, Nr. C9, 1990 samt en modificeret OECD-model:

1. Vollenweider 1976
2. Prairie 1988
3. Prairie 1989
4. Canfield and Bachmann 1981
5. Modificeret OECD.

De modificerede OECD-beregninger er gennemført med udgangspunkt i den oprindelige Vollenweider-model, men således at der introduceres 1, 2 eller 3 yderligere parametre (koefficientværdier), som kan optimeres automatisk i forhold til R^2 - og MSE-værdier ved brug af Generalized Reduced Gradient algoritmen og efterfølgende anvendes i modellerne. De tre modeludtryk til beregning af søkoncentration på baggrund af indløbskoncentration og vandets opholdstid er vist i tabel 3.1. Disse typer af modificeringer er, som nævnt, tidligere anvendt blandt andet i forbindelse med OECD-beregninger (OECD, 1982) og Foy (1992).

Tabel 3.1. De modificerede OECD-modeltyper anvendt.

Modificeret OECD (1 parameter):

$$TP_{sø} = a \cdot \frac{TP_{indløb}}{1 + \sqrt{t_w}}$$

Modificeret OECD (2 parametre):

$$TP_{sø} = a \cdot \frac{(TP_{indløb})^b}{1 + \sqrt{t_w}}$$

Modificeret OECD (3 parametre):

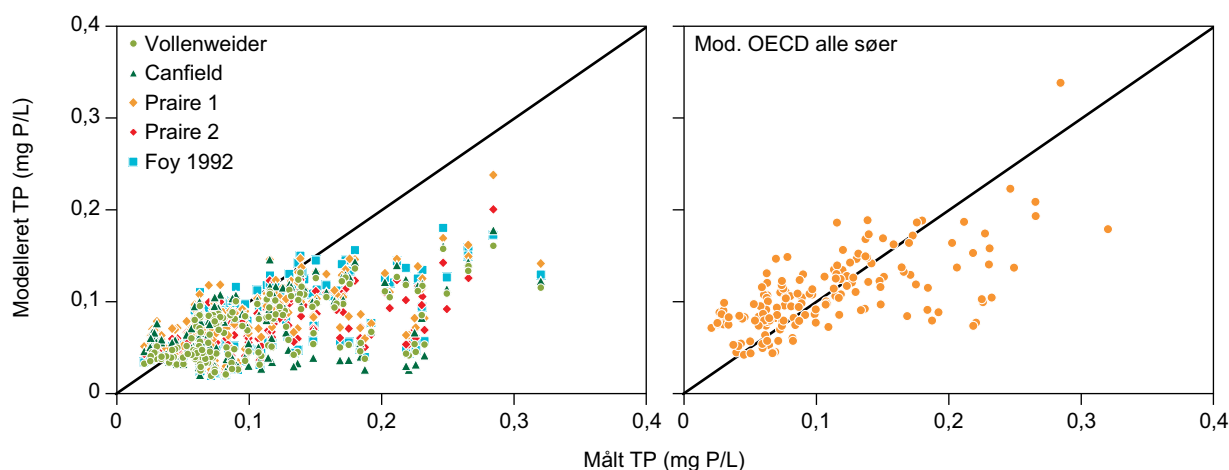
$$TP_{sø} = a \cdot \frac{(TP_{indløb})^b}{(1 + \sqrt{t_w})^c}$$

Beregninger er først gennemført for alle søer og søår i datasættet. Data fra forskellige år kan dog ikke betragtes som uafhængige – især ikke hvis opholdstiden er lang, men alle søår er her anvendt for at øge databaggrunden for beregningerne. Efterfølgende er data inddelt i lavvandede / dybe søer og i hurtigt / langsomt gennemstrømmede søer for at vurdere, om der er basis for at opstille og anvende forskellige modeller for forskellige søtyper.

3.2 Sammenhæng mellem fosfortilførsel og fosforkoncentration

Alle søer

Modelsammenhængene ved anvendelsen af de oprindelige NPo-modeller og Foy (1992) samt den modificerede OECD-model, når alle søer anvendes, er vist i Fig. 3.1. I tabel 3.2 er det vist, hvordan anvendelse af en modificeret OECD-model ved anvendelsen af 1, 2 eller 3 parametre påvirker MSE og R^2 i forhold til anvendelsen af den oprindelige Vollenweider-model.



Figur 3.1. De oprindelige NPo-modeller (venstre) og den modificerede OECD-model (med 3 parametre, højre) anvendt på datasættet. 1:1-linjen er indtegnet.

Tabel 3.2. Anvendelse af modificeret OECD og indflydelsen på MSE og r^2 ved anvendelse af 1, 2 eller 3 parametre.

Modeltype	R^2	MSE	Reduktion i MSE ift. 1 parameter model	Forbedring af R^2 ift. 1 parameter model	N
Vollenweider	0,37	0,00392	-	-	165
Mod. OECD 1 parameter	0,37	0,00248	-	-	165
Mod. OECD 2 parametre	0,39	0,00246	1 %	6 %	165
Mod. OECD 3 parametre	0,45	0,00205	17 %	22 %	165

Alle modellerne ligger med en forholdsvis beskeden forklaringsværdi med R^2 mellem 0,37 og 0,45. Størst forklaringsværdi opnås med den modificerede OECD-model, hvor der indgår tre parametre. Her fremgår det desuden, at bias, repræsenteret ved MSE-værdierne, kan reduceres betragteligt i forhold til den oprindelige Vollenweider model. Dette er også fundet i tidligere studier, som har indikeret en tendens til at Vollenweider modellen, som udelukkende er baseret på søer med en hydraulisk opholdstid > 1 år, generelt underestimerer søkoncentrationer for kalkrige søer (Stauffer, 1985) og søer med kortere opholdstid (< 1 år) (Foy 1992).

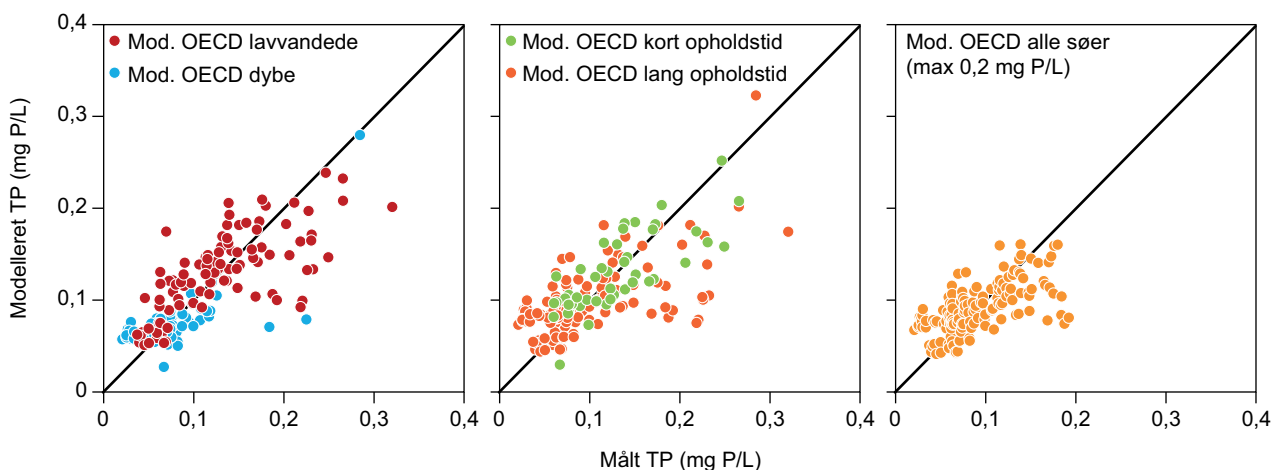
Typeinddeling af søer

I dette afsnit er data inddelt efter søernes middeldybde og vandets opholdstid for at se, om det giver mening at anvende forskellige modeller for forskellige søtyper i forhold til at forbedre modellernes evne til at estimere søkoncentrationer. Søerne er delt i lavvandede og dybe søer (adskilt ved 3 m, dog er Arresø som med en middeldybde på 3,1 m ikke er lagdelt om sommeren medtaget blandt de lavvandede søer) og ved en hydraulisk opholds-

tid over eller under 1 måned (Fig. 3.2). De tilhørende R²- og MSE-værdier er vist i tabel 3.3. I tabel 3.3 er også vist statistikken, hvis kun data med TP < 0,2 mg P/l (årgennemsnitlig søkoncentration) medtages samt for de oprindelige NPo-modeller. Selve modeludtrykkene er vist i tabel 3.4.

Tabel 3.3. Sammenligning af R²- og MSE-værdier ved anvendelsen af Vollenweider- eller den modificerede OECD-model (ved anvendelsen af tre parametre) i henholdsvis dybe/lavvandede søer (> 3 m) og søer med kort eller lang opholdstid (> 1 måned). De oprindelige NPo-modeller er også medtaget.

Typeinddeling	R ²	MSE	N
Mod. OECD alle søer (ikke typeinddelt)	0,45	0,00205	165
Mod. OECD alle søer (ikke typeinddelt, kun data < 0,2 mg P/L)	0,40	0,00101	147
Mod. OECD alle søer (typeinddelt på dybde)	0,60	0,00151	165
Mod. OECD alle søer (typeinddelt på opholdstid)	0,46	0,00201	165
Vollenweider	0,37	0,00392	165
Canfield	0,24	0,00410	165
Prairie 88	0,41	0,00276	165
Prairie 89	0,41	0,00363	165
Foy 1992	0,36	0,00338	165



Figur 3.2. Sammenhænge mellem målt og beregnet TP ved modificeret OECD-model med 3 parametre i dybe eller lavvandede søer (øverst, til venstre) og søer med henholdsvis kort og længere opholdstid (øverst, til højre). Nederst sammenhængen i alle søer ved den modificerede OECD-model, hvis kun søer med TP-koncentrationer under 0,2 mg P/l medtages. 1:1-linjen er indtegnet. Se også tabel 3.3.

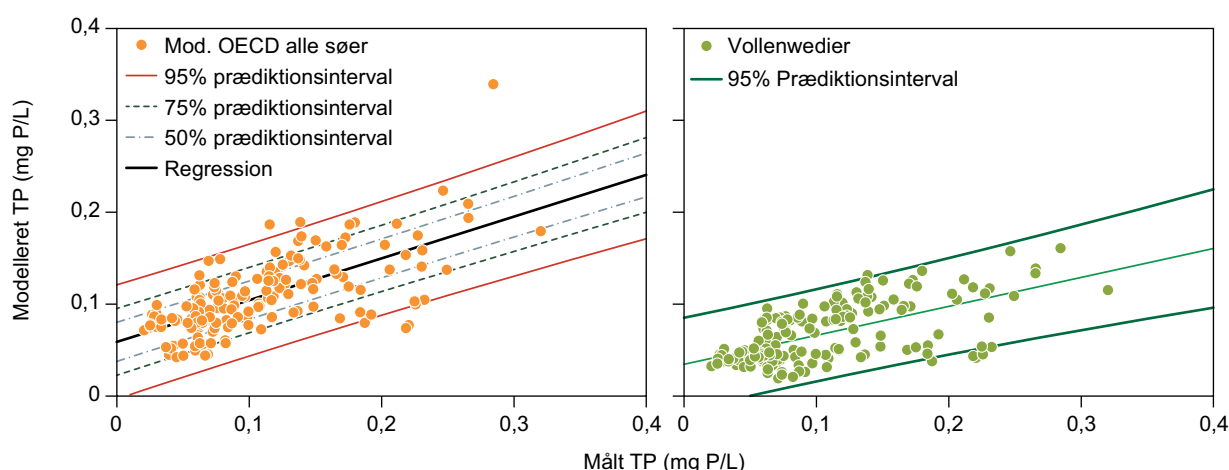
Tabel 3.4. Modeludtrykkene for sammenhænge mellem indløbskoncentration og søkoncentration for den modificerede OECD-model ved forskellige typeinddelinger og afgrænsninger. Se modelstatistik i tabel 3.3. Ligningsudtrykkene for NPo-modellerne findes i Kristensen mfl. (1990).

Ingen typeinddeling	Typeinddeling på dybde	Typeinddeling på opholdstid
$TP_{sø} = 1.568 \cdot \frac{(TP_{indløb})^{1.147}}{(1 + \sqrt{t_w})^{0.276}}$	Lavvandede søer (< 3 m): $TP_{sø} = 1.473 \cdot \frac{(TP_{indløb})^{1.101}}{(1 + \sqrt{t_w})^0}$	Kort opholdstid (< 1 måned): $TP_{sø} = 4.917 \cdot \frac{(TP_{indløb})^{1.488}}{(1 + \sqrt{t_w})^{2.620}}$
Kun data < 0.2 mg P/L: $TP_{sø} = 1.0951 \cdot \frac{(TP_{indløb})^{1.0427}}{(1 + \sqrt{t_w})^{0.2291}}$	Dybe søer (> 3 m): $TP_{sø} = 1.205 \cdot \frac{(TP_{indløb})^{1.237}}{(1 + \sqrt{t_w})^0}$	Kort opholdstid (> 1 måned): $TP_{sø} = 1.382 \cdot \frac{(TP_{indløb})^{1.098}}{(1 + \sqrt{t_w})^{0.245}}$

Sammenlignet med de ikke søtype-specifikke OECD-modeller opnås der kun en væsentlig øget R^2 -værdi, hvis der inddeles efter dybde. Her øges R^2 fra 0,45 til 0,60. Hvis kun sødata med $TP < 0,2$ mg P/l medtages, reduceres R^2 til 0,40, mens MSE til gengæld reduceres fra 0,00205 til 0,00101, hvilket i begge tilfælde dog også var forventeligt, når høje søkoncentrationer sorteres fra. De øvrige modeller fra NPo-rapporten giver lignende eller lavere R^2 -værdier og i alle tilfælde en højere MSE-værdier.

Prædiktionsintervaller for modificeret OECD- model

For at give et estimat på usikkerheden hvormed den modificerede OECD model kan forudsige P-koncentrationer i søer, er prædiktionsintervaller afbildet for regressionslinjen mellem modellerede P-koncentrationer og observationer (Fig. 3.3). Prædiktionsintervallerne giver således et estimat på det interval, hvori en ny model-beregnet P-koncentration med en given sandsynlighed vil ligge, givet det P-koncentrations-område (x-aksen i Fig. 3.3) der indgår i regressionen. I Fig. 3.3 er 95%-, 75%- og 50%-prædiktionsintervaller for regressionen illustreret. 95%-prædiktionsintervallet udtrykker således at en ny modelestimeret P-koncentration med 95% sandsynlighed vil ligge inden for dette interval, og 75%- og 50%-prædiktionsintervallerne vil ligge tættere på regressionslinjen.

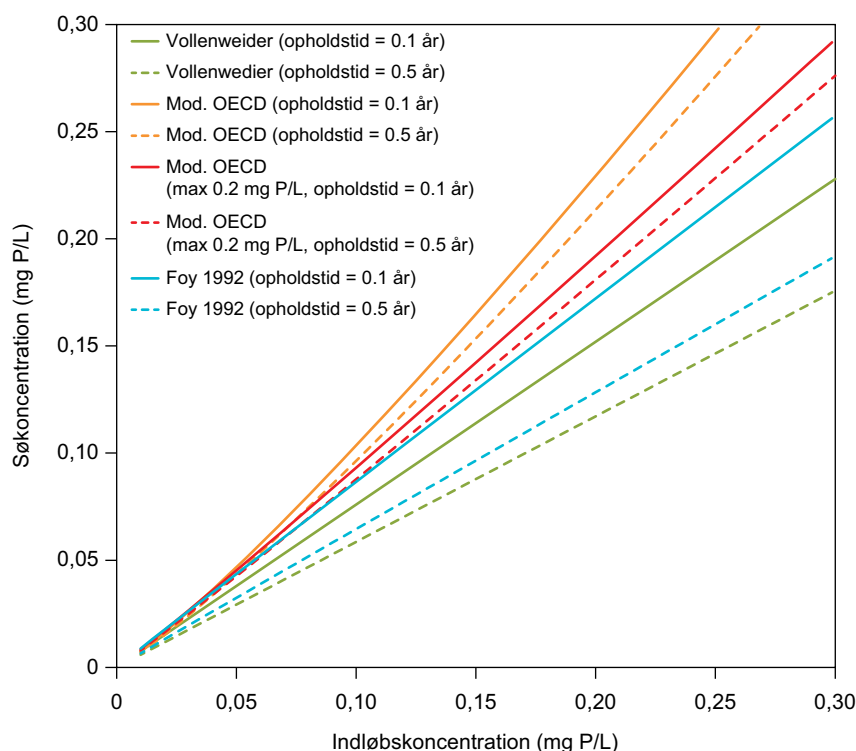


Figur 3.3. Illustration af 95%-, 75%- og 50%-prædiktionsintervaller for regression mellem modificeret OECD-ligning og observationer, samt for illustrationens skyld også et 95%- prædiktionsinterval mellem Vollenweider og observationer.

Overordnet sammenligning af modeller

Sammenhængen mellem indløbskoncentration og beregnet søkoncentration ved forskellige modeltyper er vist i Fig. 3.4. Sammenhængene er vist for to forskellige opholdstider (0,1 og 0,5 år) for at illustrere opholdstidens indvirkning på de enkelte modeller. Som det fremgår, beregner de forskellige modeller noget forskellige søkoncentrationer, især når indløbskoncentrationen overstiger ca. 0,1 mg P/l. For den modificerede OECD-model overstiger den beregnede årsgennemsnitlige søkoncentration indløbskoncentrationen ved indløbskoncentrationer over ca. 0,1 mg P/l. Den årlige nettoretention af fosfor kan dog stadigvæk godt være positiv, fordi den beregnede søkoncentration, som vist i figur 2.3, ikke kan sidestilles med den vandføringsvægtede udløbskoncentration. Den tidligere anvendte Vollenweider-model beregner generelt lavere søkoncentrationer især ved de højere opholdstider.

Figur 3.4. Sammenhæng mellem fosforindløbskoncentrationer og søkoncentrationer (begge års-gennemsnit) ved anvendelsen af de forskellige modeltyper. Model-lernes output er vist ved to forskellige opholdstider.



Eksempler på konsekvensberegninger

Som eksempler på hvilke konsekvenser anvendelse af de forskellige modeller har for indsatsbehovet, er der i dette afsnit lavet beregninger for de 23 søer, der har indgået i analyserne (tabel 2.1). Dette er illustreret for de tre modeltyper vist i fig. 3.4. Der er anvendt et gennemsnit per sø af alle sø-år, som er tilgængelige for den enkelte sø i datasættet, og øvelsen er således blot lavet for at sammenligne de forskellige modeltyper, og ikke for at udrede et konkret gældende indsatsbehov for de pågældende søer. Ved beregningerne er der anvendt følgende modelkæde og de empiriske sammenhænge etableret i de tidligere afsnit:

krav til sø-sommerrmiddel-TP (sat til 0,070 mg P/l i lavvandede søer og 0,025 mg P/l i dybe søer) →

krav til sø-årsmiddel-TP →

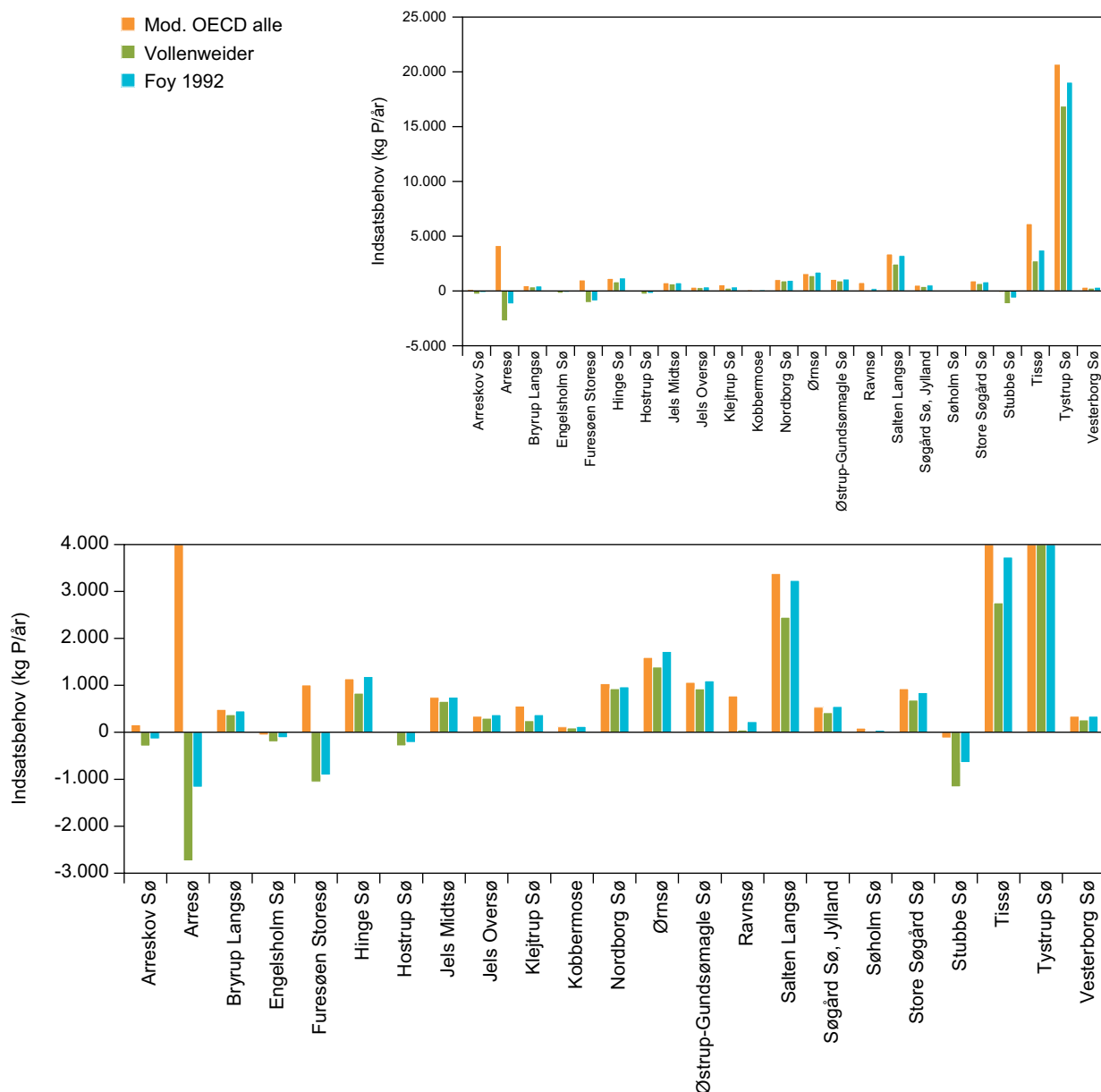
krav til indløbs-årsmiddel-TP →

højest tilladte samlede TP-tilførsel →

evt. krav til reduktion af samlet P tilførsel i forhold til den nuværende tilførsel.

Beregningseksemplerne er vist i fig. 3.5. Som det fremgår, er der nogle søer (især Tystrup Sø), hvor modellerne beregner meget store krav til belastningsreduktion. Det beregnede indsatsbehov for de tre modeltyper afviger for de fleste søer kun i mindre grad, dog er der enkelte søer som Arresø og Furesøen, hvor de tre modelleres beregninger falder væsentligt forskelligt ud. Vollenweider- og Foy-modellerne stiller her ikke øget krav til fosforreduktion, men det gør den modificerede OECD-model. Det ville være fagligt relevant især at kvalificere beregningerne for de søer, hvor modellerne falder væsentligt forskelligt ud - evt. ved opstilling en dynamisk model og/eller med noget empiri for hver enkelt sø (baseret på tidsserierne).

Med forbehold for de forholdsvis få søer, som indgår i disse analyser, ser modellernes beregninger især ud til at falde forskelligt ud for de større søer og søer med lang opholdstid.

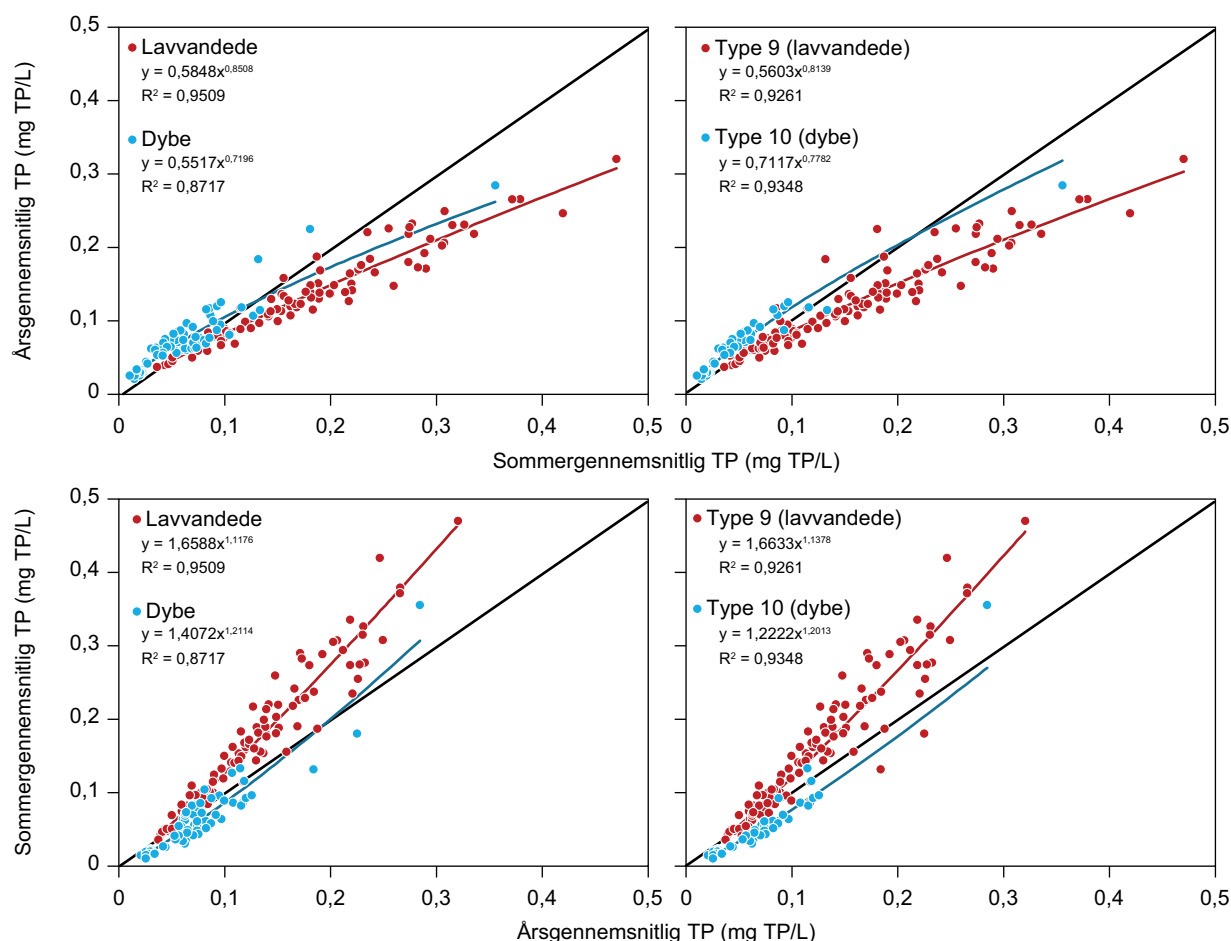


Figur 3.5. Eksempler på beregnede indsatsbehov ved anvendelse af de tre modeltyper vist i fig. 3.4. Her er indsatsbehovet vist for de 23 søer, der indgår i analyserne, hvis kravet om henholdsvis om middelsommerkoncentration af fosfor på 0,070 mg P/l (lavvandede søer) og 0,025 mg P/l skal opfyldes. Nederste figur viser et forstørret udsnit af den øverste.

3.3 Sammenhæng mellem års- og sommermiddelværdier

De empiriske modeller til beregning af sammenhænge mellem indløbs- og søkoncentrationer beregner årsmiddelkoncentrationer, mens der ved anvendelsen af klorofyl *a* og de biologiske kvalitetselementer til beregning af den økologiske tilstand anvendes sommergennemsnit. Det er derfor nødvendigt at vurdere sammenhænge mellem års- og sommermiddelværdier af fosfor og kvælstof.

Fig. 3.6 viser sammenhænge mellem sommermiddel- og årsmiddelfosforkoncentrationer i lavvandede og dybe søer. I relationerne er der tale om meget tætte sammenhænge (R^2 -værdier fra 0,87 til 0,95). For de dybe søer ligger de fleste værdier over 1:1-linjen (dvs. at sommermiddel < årsmiddel), mens det modsatte er tilfælde for de lavvandede søer. Især ved TP over 0,1 mg P/l er sommerværdier væsentligt højere end årsmiddelværdier i de lavvandede søer.



Figur 3.6. Sammenhænge mellem års- og sommermiddelmålkoncentrationer (øverst) og sommer- og årsmiddelmålkoncentrationer (nederst) af TP i henholdsvis dybe og lavvandede søer ved typeinddeling ved 3 meter (venstre) og ved NST-typeinddeling i hhv. type 9 og 10 (højre). Stiplet linje angiver 1:1 linjen.

3.4 Relationer til fosfor-retention

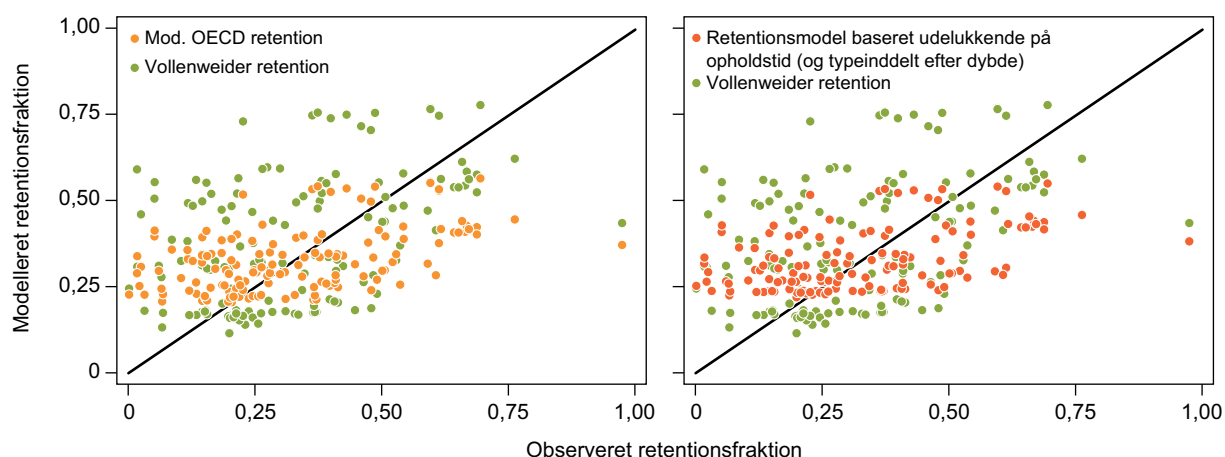
Modelberegnete P-koncentrationer i søer har tidligere været anvendt til at estimere fosfor-retention i en sø (eksempelvis blev sø-modellerne i NPo-rapporten af 1990 omskrevet til at udtrykke en retention). Således er Vol-lenweider-modellen også anvendt som retentionsmodel, hvor retentionen eksempelvis udtrykkes enten direkte eller afledt fra forskellen mellem ind-løbs-koncentration og modelberegnet sø-koncentration, hvormed det anta-ges at søen er fuld opblandet, samt at den afløbsvægtede udløbskoncentra-tion er lig den årsgennemsnitlige søkoncentration. Dette er ikke altid tilfældet, hvilket er illustreret tidligere i Fig. 2.3. I næringsrige, lavvandede søer vil der ofte være høje søkoncentrationer om sommeren, hvor der ikke løber så me-get vand ud af søerne og lavere koncentrationer om vinteren, hvor søerne gennemstrømmes hurtigere.

Fosfors binding og omsætning i søer er kompleks (afhænger blandt andet af søernes biologiske struktur som omtalt i indledningen), og det falder uden for dette projekt at lave dybdegående modeludvikling på fosfor-retention. Idet der er genereret et komplet datasæt for de 23 søer med både P-belastnings- og afløbsdata, er det dog undersøgt, hvordan den modificerede OECD modeltype, samt to øvrige udtryk som kun inkluderer opholdstiden, evner at beskrive fosforretention ud fra rent empiriske analyser. Modelud-trykkene opstilles således, at modelkoefficienter optimeres til at beskrive re-tention (Tabel 3.5).

Tabel 3.5. Modeludtrykkene for retentionen af fosfor baseret på data fra de 23 søer. Retentionen udtrykker her den fraktion (varierende principielt fra 0 til 1) af TP belastningen som tilbageholdes. $TP_{\text{belastning}}$ er udtrykt i kg P/år og opholdstid i år.

Retentionsmodel med opholdstid og belastning som input:	
Lavvandede søer,	$P_{\text{retention}} = \frac{0.44 \cdot \frac{(TP_{\text{belastning}})^{0.891}}{(1 + \sqrt{t_W})^{-0.613}}}{TP_{\text{belastning}}}$
Dybe søer,	$P_{\text{retention}} = \frac{0.29 \cdot \frac{(TP_{\text{belastning}})^{1.0}}{(1 + \sqrt{t_W})^{-0.449}}}{TP_{\text{belastning}}}$
Retentionsmodel udelukkende med opholdstid som input:	
Alle søer,	$P_{\text{retention}} = 0.371 \cdot \text{opholdstid}^{0.1477}$
Retentionsmodel udelukkende med opholdstid som input (typeinddelt):	
Lavvandede søer,	$P_{\text{retention}} = 0.299 \cdot \text{opholdstid}^{0.0767}$
Dybe søer,	$P_{\text{retention}} = 0.406 \cdot \text{opholdstid}^{0.1206}$

Der opnås generelt kun en ringe overensstemmelse mellem model-estimerede retentioner og observerede retentioner (Fig. 3.7). Forklaringsværdien for den modificerede OECD modeltype samt modellen som kun inkluderer opholdstid er meget beskednen ($R^2 = 0,23$) og retentionsberegninger ud fra Vollenweider, som også er vist i fig. 3.7, er endnu ringere ($R^2 = 0,19$). Ved en given modelleret retentionsfaktor varierer den observerede retentionsfaktor ofte mellem 0 og 0,5. Der opnås desuden kun en marginal forbedring (og kun målt på MSE) ved at inkludere belastningen som en forklarende variabel i OECD udtrykket (Tabel 3.5), i forhold til udtrykket der kun inkluderer opholdstiden (såfremt dette typeinddeles efter dybde).



Figur 3.7. Modelestimeret fosforretention (som fraktion af ekstern belastning) ved brug af modificeret OECD ligning (venstre) og retentionsudtrykket der kun indeholder opholdstid men typeinddelt efter dybde (højre), samt ved brug af Vollenweider.

Den ringe sammenhæng mellem beregnet og observeret fosforretention på trods af, at der f.eks. anvendes en modificeret OECD model, hvor koefficienter er optimeret til at beskrive retention, betyder, at disse empiriske modeller baseret på data fra de 23 søer ikke kan give sikre estimater af fosforretention i søer. Den modificerede OECD-model giver en marginalt bedre forklaringsværdi end Vollenweider.

Tabel 3.6. Sammenligning af R^2 - og MSE-værdier mellem model og observationer ved anvendelsen af forskellige retentionsudtryk.

Modeltype	R^2	MSE	N
Vollenweider	0,19	0,0425	142
Mod. OECD 3 parametre (inkl belastningsinput)	0,23	0,0276	142
Kun opholdstid som variabel (alle søer)	0,19	0,0292	142
Kun opholdstid som variabel (dybdeinddeling)	0,23	0,0277	142

3.5 Delkonklusion

Der er ingen markante ændringer i forklaringsværdien (R^2) for de empiriske modeller, der beskriver sammenhænge mellem indløbskoncentrationer og søkoncentrationer i forhold til den tidligere anvendte Vollenweider-model i 1. hold vandplaner. Derimod kan den generelle bias (repræsenteret ved MSE) minimeres betydeligt ved at anvende det nye modeludtryk. R^2 -værdien øges desuden noget, hvis der anvendes typespecifikke modeller, særligt ved inddeling i dybde-typer, og også bias (MSE) reduceres herved betydeligt.

En modificeret OECD-model, hvor der anvendes 3 parametre i modeludtrykket opnår en R^2 -værdi på 0,45, når der ikke skelnes mellem forskellige søtyper og værdien øges til 0,60, hvis der typeinddeles efter dybde. Modellerne er bygget på et datasæt bestående af kun 23 søer, og det gør det usikkert at anvende søtypespecifikke modeller. Modellernes styrke begrænses også af, at det ikke med sikkerhed kan afgøres, om alle de anvendte søer er i ligevægt med den eksterne næringsstofftilførsel.

De forskellige modellers beregninger af søkoncentrationer ved en given fosfortilførsel varierer kun lidt ved lave indløbskoncentrationer, men ved højere koncentrationer bliver forskellen større. Den modificerede OECD-model beregner generelt højere søkoncentrationer end den oprindelige Vollenweider-model ved en given indløbskoncentration.

Sammenhænge mellem modelestimeret og observeret fosforretention vurderet på baggrund af de 23 søers data er ringe og kan ikke give sikre estimater af fosforretentionen i søer.

Der kan etableres stærke empiriske sammenhænge mellem årsmiddel- og sommermiddelsoncentrationer i både lavvandede og dybe søer. I lavvandede søer opnås en R^2 -værdi på 0,95 og i dybe søer en R^2 -værdi på 0,87.

4 Kvælstoftilførsel og søkoncentration

Empiriske sammenhænge mellem tilførsel og søkoncentrationer af kvælstof kan på samme måde som for fosfor anvendes til vurdering og planlægning af indsats for at forbedre søtilstanden. I dette afsnit er der gennemført en analyse af sammenhænge mellem tilførsel og søkoncentration tilsvarende den, der blev gennemført for fosfor.

4.1 Modeller til beregning af søkoncentration

Der er anvendt samme datasæt, som til analyse af sammenhænge mellem fosfortilførsel og søkoncentration. Beregninger vedr. kvælstoftilførsel følger også samme skabelon som for fosfor, dvs. der er afprøvet forskellige modeltyper, og også her med udgangspunkt i OECD-model-typen, som introducerer en række nye koefficienter. Modeltyperne med forskelligt antal koefficienter er vist i tabel 4.1.

Tabel 4.1. Modeltyperne afprøvet til beregning af sammenhænge mellem kvælstoftilførsel og kvælstofkoncentration i søer.

Modificeret OECD (1 parameter):

$$TN_{sø} = a \cdot \frac{TN_{indløb}}{1 + \sqrt{t_w}}$$

Modificeret OECD (2 parametre):

$$TN_{sø} = a \cdot \frac{(TN_{indløb})^b}{1 + \sqrt{t_w}}$$

Modificeret OECD (3 parametre):

$$TN_{sø} = a \cdot \frac{(TN_{indløb})^b}{(1 + \sqrt{t_w})^c}$$

4.2 Sammenhæng mellem kvælstoftilførsel og kvælstofkoncentration

Modelresultater for sammenhænge mellem målt og modelleret kvælstofkoncentrationer i søer ved forskellige typeinddelinger og ved anvendelsen af den modificerede OECD-modeltype baseret på regression med 1, 2 eller 3 koefficienter er vist i Fig. 4.1. De tilhørende statistiske data er vist i tabel 4.2 og modeludtrykkene er vist i tabel 4.3.

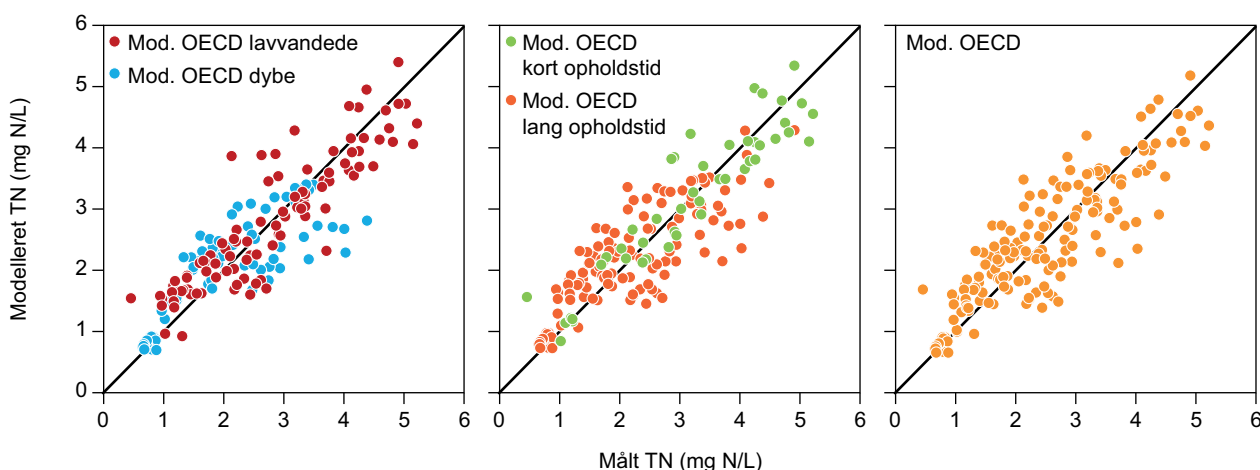
R²-værdien er rimelig høj for alle modeller, men ændres kun lidt (fra 0,74 til 076) ved anvendelsen af 1, 2 eller 3 koefficienter. MSE reduceres imidlertid med 35-42%, hvis der anvendes flere koefficienter. I figur 4.1 er også vist sammenhængen, hvis der underinddeles efter vanddybde eller opholdstid, men som det fremgår opnås der ikke nogen væsentlige ændringer i forklaringsværdien eller MSE (tabel 4.4).

Tabel 4.2. Statistiske nøgletal ved regressionsanalyserne mellem kvælstoftilførsel og kvælstofkoncentration i søvandet.

Typeinddeling	R ²	MSE	Reduktion i MSE ift. 1 parameter model	Forbedring af R ² ift. 1 parameter model	N
Mod. OECD 1 parameter	0,74	0,57	-	-	165
Mod. OECD 2 parametre	0,74	0,37	35 %	0 %	165
Mod. OECD 3 parametre	0,76	0,32	42 %	2 %	165

Tabel 4.3. Regressionsmodeller for kvælstof med og uden typeinddeling.

Ingen typeinddeling	Typeinddeling på dybde	Typeinddeling på opholdstid
$TN_{sø} = 1.340 \cdot \frac{(TN_{indløb})^{0.612}}{(1+\sqrt{t_w})^{0.632}}$	Lavvandede søer (< 3 m): $TN_{sø} = 1.142 \cdot \frac{(TN_{indløb})^{0.669}}{(1+\sqrt{t_w})^{0.356}}$ Dybe søer (> 3 m): $TN_{sø} = 1.556 \cdot \frac{(TN_{indløb})^{0.512}}{(1+\sqrt{t_w})^{0.673}}$	Kort opholdstid (< 1 måned): $TN_{sø} = 1.331 \cdot \frac{(TN_{indløb})^{0.703}}{(1+\sqrt{t_w})^{1.413}}$ Kort opholdstid (> 1 måned): $TN_{sø} = 1.459 \cdot \frac{(TN_{indløb})^{0.549}}{(1+\sqrt{t_w})^{0.605}}$



Figur 4.1. Modelresultater for sammenhænge mellem målt og modelleret kvælstofkoncentration i søer ved forskellige typeinddelinger. Mod. OECD typer er alle baseret på regression med 3 koefficienter (tilpasset individuelt til hver enkelt sø-type):

$$TN_{sø} = a \cdot \frac{(TN_{indløb})^b}{(1+\sqrt{t_w})^c}$$

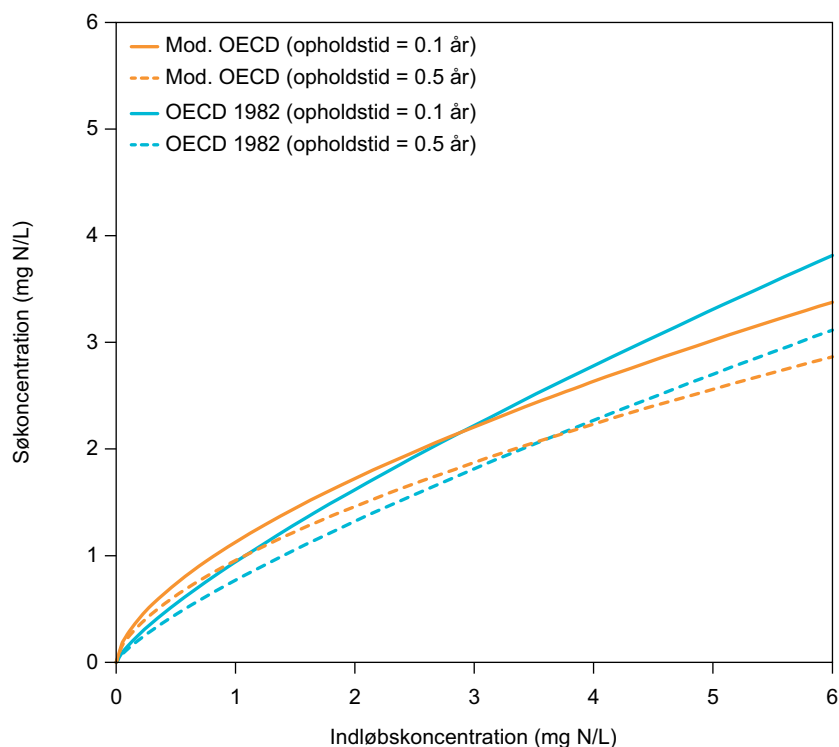
Tabel 4.4. Statistiske data bag fig. 4.1.

Typeinddeling	R ²	MSE	N
Mod. OECD alle søer (ikke typeinddelt)	0,76	0,33	165
Mod. OECD alle søer (typeinddelt på dybde)	0,77	0,31	165
Mod. OECD alle søer (typeinddelt på opholdstid)	0,76	0,32	165

Overordnet sammenligning af modeller

I fig. 4.2 er sammenhængen mellem indløbskoncentration og beregnet søkoncentration af kvælstof vist for den oprindelige OECD- (se OECD, 1982) og den modificerede model ved to forskellige opholdstider. De to modeltyper afgiver ikke meget fra hinanden ved indløbskoncentrationer op til ca. 4 mg N i indløbet, men giver herefter større forskelle i beregnet søkoncentration.

Figur 4.2. Modificeret OECD-model ift. til "traditionel" model for beregning af kvælstofkoncentration i søer på baggrund af indløbskoncentrationer.

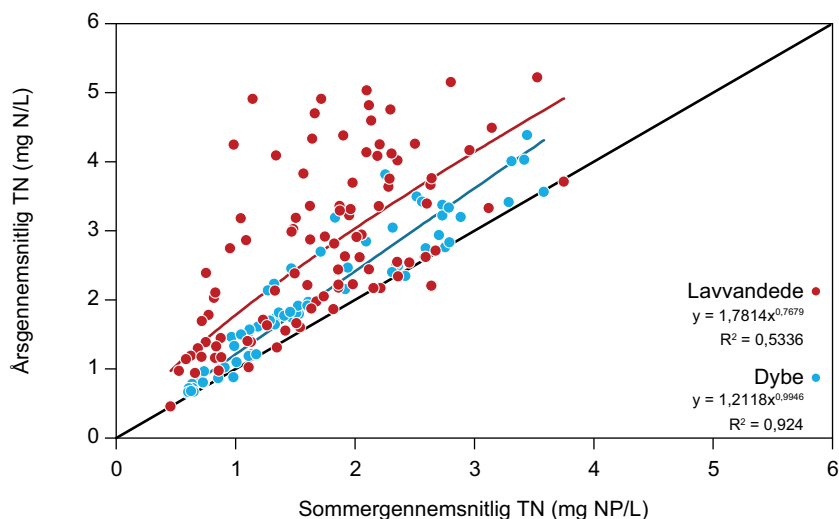


4.3 Sammenhænge mellem års- og sommermiddelkoncentrationer

På samme måde som med fosfor er der i dette afsnit sammenlignet årsmiddel- og sommermiddelkoncentrationer af TN. Baggrunden er også her, at når de biologiske kvalitetselementer relateres til indhold af kvælstof, er det til en sommermiddelkoncentration, hvor modellerne beregner årsmiddelkoncentrationer.

Sammenligningerne er vist i fig. 4.3. Også for kvælstof er der stærke empiriske sammenhænge mellem års- og sommermiddel, men ikke helt så stærke som for fosfor. I de lavvandede søer opnås kun en R^2 -værdi på 0,53, mens den er 0,92 i dybe søer. I næsten alle søer ses lavere sommerkoncentrationer end årsmiddelkoncentrationer. Hvis der inddeles efter opholdstid, opnås den højeste forklaringsværdi i søer med lang opholdstid (> 1 måned).

Figur 4.3. Empiriske sammenhænge mellem årsgennemsnitlige og sommergennemsnitlige søkoncentrationer af totalkvælstof i danske søer inddelt efter forskellige søtyper.



4.4 Delkonklusion

For kvælstof kan der etableres empiriske modeller for sammenhænge mellem tilførsel og søkoncentrationer, som er noget stærkere end for fosfor. Der opnås R^2 -værdier på omkring 0,75. Der kan ikke opnås væsentlige forbedringer i forklaringsværdien ved at inddele i søtyper eller ved at anvende flere koefficienter i den modificerede OECD-model.

Sammenhænge mellem årsmiddel- og sommermiddelkoncentrationer af totalkvælstof er til gengæld generelt svagere end sammenhængene, der kunne etableres for fosfor. Bedste korrelation opnås i dybe søer, hvor R^2 er 0,92.

5 Konklusioner

Alle analyser og modeller etableret i denne rapport må vurderes i lyset af det forholdsvis beskedne datamateriale, som har kunnet anvendes (23 søer, 165 søår). Det betyder mere usikre empiriske sammenhænge, ikke mindst hvis der anvendes søtypespecifikke sammenhænge, hvor hver søtype vil være repræsenteret af ret få søer.

I forhold til de etablerede sammenhænge mellem tilførsel af fosfor og estimering af søkoncentrationer øges usikkerheden ved, at det ikke sikkert kan afgøres om de søer, som er anvendt i analyserne, helt er i ligevægt med den eksterne næringsstofftilførsel. Hvis dataanalysen omfatter søer, som stadigvæk i en vis grad er under indsvingning i forhold til ændret ekstern fosfortilførsel, kan det give anledning til at modellerne generelt beregner højere fosforstofindhold, end der ville være, hvis der var tale om en ligevægtstilstand.

En anden væsentlig problemstilling er, at de data, som har været tilgængelige til analyserne og etableringen af modeludtrykkene, primært er fra næringsrige søer. Kun én af de 23 søer anvendt til vurdering af sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og søkoncentration har middel TP-koncentrationer under 0,05 mg P/l, og er dermed i det næringsstofområde, hvor fx lavvandede søer mere permanent vil være i en klarvandet tilstand. Det betyder, at modellerne er bedst til at udtale sig om sammenhænge mellem tilførsel og søkoncentrationer i uklare søer, som må forventes at være i moderat, ringe eller dårlig økologisk tilstand, og tilsvarende at modeludtrykkene er mindre anvendelige i forhold til de mere næringsfattige og klarvandede søer. I takt med at flere danske søer fremover bliver mere næringsfattige, kan det anbefales at følge disse søer og gentage analyserne i denne rapport om nogle år for at afgøre, om det giver anledning til andre og bedre beskrivelser af sammenhænge mellem tilførsel og søkoncentration.

Modeller har desuden generelt vanskeligt ved at beskrive, hvordan sammenhængene mellem tilførsel og søkoncentration er, når søerne skifter mellem to tilstandstyper. Det betyder, at modellerne har svært ved at beskrive situationen, hvor fx de lavvandede søer skifter mellem en uklar tilstand, hvor primærproducenterne domineres af planteplankton og en klarvandet tilstand, hvor primærproducenterne domineres af undervandsplanter. Dette skift, som kan finde sted inden for et snævert næringsstofinterval, vil typisk svare til skiftet mellem en ringe-moderat økologisk tilstand og en god-høj økologisk tilstand. Fra undersøgelser i lavvandede søer, som skifter mellem disse to tilstande – fx via biomanipulation, er det i flere søer dokumenteret hvorledes dette skift fører til væsentligt ændret tilbageholdelse af både fosfor og kvælstof (se fx Søndergaard et al., 2001).

Fosfortilførsel og søkoncentration

Sammenhænge mellem indløbs- og søkoncentrationer af fosfor er analyseret for en række empiriske modeller, herunder modellerne fra NPo-undersøgelsen fra 1990 (Vollenweider, Prairie, Canfield) samt Foy (1992) og en modificeret OECD-model.

Generelt er der ikke store forskelle i forklaringsværdierne (R^2) for de forskellige modeller, som sammenholder indløbs- og søkoncentrationer af fosfor, og forklaringsværdien er heller ikke væsentligt højere end den Vollenwei-

der-model, der blev anvendt i de første vandplaner. Inddeles efter sødybde, opnås dog en noget højere R^2 -værdi (0,6 mod 0,45 hvis der ikke typeinddeles), men her indgår opholdstiden til gengæld ikke som en forklarende variabel, hvilket er i modsætning til den tidligere anvendte Vollenweider-model, og også i modsætning til, hvad man rent intuitivt ville forvente. Årsagen til at opholdstiden ikke kommer ud som en forklarende variabel, når der inddeles i lavvandede og dybe søer, er formentlig, at typeinddelingen efter sødybde allerede indirekte vil indeholde en forskel i opholdstid (lang opholdstid i dybe søer og kort opholdstid i lavvandede søer). Hvis der typeinddeles efter vanddybde vil dette endvidere betyde, at man i modelberegninger ville anvende 4 parametre (2 parametre i hver af de 2 dybdetyper) mod kun 3 parametre i den ikke-typeinddelte model. Jo flere parametre en model indeholder, desto større krav skal der også stilles til forklaringsværdien (McDonald og Urban 2010), særligt set i lyset af at modellerne i dette studie pga. begrænset datagrundlag ikke er testet på et uafhængigt sø-datasæt.

Bedømt alene ud fra modellernes forklaringsværdi peger analyserne af sammenhænge mellem fosfortilførsel og søkoncentration således ikke klart på én model frem for andre. Alle modeller giver nogenlunde den samme – og relative lave – forklaringsværdi svarende til den tidligere NPo-rapport, hvor fire modeltyper heller ikke adskilte sig væsentligt og heller ikke gav særligt høje forklaringsværdier. Dog er der forskel på modellernes MSE (spredning omkring 1:1 linjen mellem model og observerede værdier), og her giver analyserne en lav værdi for den ikke-typeinddelte modeltype (modificeret OECD-model), hvilket er at foretrække og taler til fordel for at anvende denne model. I denne model indgår vandets opholdstid som en selvstændig variabel og spredningen næsten halveres (MSE reduceres fra 0,00392 til 0,00205), set i forhold til den traditionelle Vollenweider-model. Hvis man ønsker, at målrette anvendelsen af denne model mod de mindst næringsrige af søerne, der indgår i analyserne, kan man evt. anvende modeludtrykket, som kun anvender sødata med totalfosforkoncentrationer under 0,2 mg/l. Modeludtrykkene fremgår af tabel 5.1.

Konsekvensberegninger af de tre hovedmodeller analyseret (Vollenweider, modificeret OECD og Foy) for de 23 søer viser for de fleste søer en god overensstemmelse i forhold beregnet fosforreduktionskrav. Der er enkelte søer, hvor modellerne falder væsentligt forskellige ud og her ville det være fagligt relevant at kvalificere beregningerne – evt. ved opstilling en dynamisk model og/eller med noget empiri for hver enkelt sø (baseret på tidsserierne).

Empiriske analyser af de 23 søers fosformassebalancer giver en ringe sammenhæng mellem modelleret og beregnet fosforretention (R^2 : 0,19-0,24) og modellerne kan ikke give sikre estimater af fosforretentionen i søer.

Ved omregning mellem årsgennemsnit og sommergennemsnit kan der etableres stærke empiriske sammenhænge i både lavvandede og dybe søer (med R^2 -værdier på henholdsvis 0,95 og 0,87). Dvs. omregninger baseret på generelle sammenhænge kan foretages med lille usikkerhed. Ligningerne for de empiriske sammenhænge er vist i tabel 5.1.

Tabel 5.1. Nøglesammenhænge med de tilhørende ligninger.

Sammenhænge, der beskrives	Søtyper	Ligning
1. Årsgennemsnitlig totalfosforkoncentration i søen ($TP_{sø}$) på baggrund af gennemsnitlig indløbskoncentration ($TP_{indløb}$) og hydraulisk opholdstid (t_w , år). Her er angivet den modificerede OECD-model (ingen typeinddeling).	Alle	$TP_{sø} = 1,568 * TP_{indløb}^{1,147} / (1 + \sqrt{t_w})^{0,276}$
2. Samme ligningsudtryk som ovenfor, men nu årsgennemsnitlig indløbskoncentration af totalfosfor set i forhold til at opnå en given årsgennemsnitlig søkoncentrationen ved en given hydraulisk opholdstid.	Alle	$TP_{indløb} = (TP_{sø} * (1 + \sqrt{t_w})^{0,276} / 1,568)^{1/1,147}$
3. Som 1), men hvor kun sødata med TP-koncentrationer under 0,2 mg/l er anvendt til modeludtrykket.	Alle (TP < 0,2 mg/l)	$TP_{sø} = 1,095 * TP_{indløb}^{1,043} / (1 + \sqrt{t_w})^{0,229}$
4. Som 2), men hvor kun sødata med TP-koncentrationer under 0,2 mg/l er anvendt til modeludtrykket.	Alle (TP < 0,2 mg/l)	$TP_{indløb} = (TP_{sø} * (1 + \sqrt{t_w})^{0,229} / 1,095)^{1/1,043}$
5. Sammenhænge mellem års- og sommermiddel-koncentrationer af TP ($TP_{år}$, TP_{sommer}) i henholdsvis dybe og lavvandede søer. Her er årsmiddel set som funktion af sommermiddel.	Lavvandede	$TP_{år} = 0,585 * (TP_{sommer})^{0,851}$
	Dybe	$TP_{år} = 0,552 * (TP_{sommer})^{0,720}$
6. Årsgennemsnitlig totalkvælstofkoncentration i søen ($TN_{sø}$) på baggrund af gennemsnitlig indløbskoncentration ($TN_{indløb}$) og hydraulisk opholdstid (t_w , år). Her er angivet den modificerede OECD-model (ingen typeinddeling).	Alle	$TN_{sø} = 1,340 * TN_{indløb}^{0,612} / (1 + \sqrt{t_w})^{0,632}$
7. Sammenhænge mellem års- og sommermiddel-koncentrationer af TN ($TN_{år}$, TN_{sommer}) i henholdsvis dybe og lavvandede søer. Her er årsmiddel set som funktion af sommermiddel.	Lavvandede	$TN_{år} = 1,781 * (TN_{sommer})^{0,768}$
	Dybe	$TN_{år} = 1,212 * (TN_{sommer})^{0,995}$

Kvælstoftilførsel og søkoncentration

De empiriske sammenhænge, der kan etableres mellem kvælstoftilførsel og søkoncentration, har en noget højere forklaringsværdi ($R^2 = 0,76-0,77$) end for fosfor. Forklaringsværdien (R^2) og spredningen (MSE) er stort set den samme, om der anvendes en generel modificeret OECD-model eller der typeinddeles efter dybde eller opholdstid.

Ved omregning mellem årsgennemsnit og sommergennemsnit kan der etableres relativt stærke empiriske sammenhænge, men ikke helt så stærke som for fosfor. I de lavvandede søer opnås kun en R^2 -værdi på 0,53, men den er 0,92 i dybe søer. Dvs. omregninger baseret på generelle sammenhænge kan foretages med lille usikkerhed især i de dybe søer. Ligningerne for de empiriske sammenhænge er vist i tabel 5.1.

6 Referencer

Bennett, N.D., Croke, B.F.W., Guariso, G., Guillaume, J.H.A., Hamilton, S.H., Jakeman, A.J., Marsili-Libelli, S., Newham, L.T.H., Norton, J.P., Perrin, C., Pierce, S.A., Robson, B., Seppelt, R., Voinov, A.A., Fath, B.D., Andreassian, V. 2013. Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling & Software* 40:1-20

Bjerring, R., Windolf, J., Kronvang, B., Sørensen, P. B., Timmermann, A., Kjeldgaard, A., Larsen, S. E., Thodsen & H., Bøgestrand, J. 2014. Belastningsopgørelser til søer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 102 s. - Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 36

Brett M.T. & Benjamin M.M. 2008. A review and reassessment of lake phosphorus retention and the nutrient loading concept. *Freshwater Biology* 53: 194-211.

Foy, R.H., 1992. A phosphorus loading model for Northern Irish lakes. *Water Research*, 26: 633-638.

Flindt M., Jørgensen C. & Jensen H.S. 2015. Den interne P-belastning og indsvingningstiden. Rapport til Naturstyrelsen. Undervejs (sømodelprojektet).

Jensen J.P., Pedersen A.R., Jeppesen E., Søndergaard M. 2006. An empirical model describing the seasonal dynamics of phosphorus in 16 shallow eutrophic lakes after external loading reduction. *Limnology and Oceanography* 51: 791-800.

Jeppesen E., Søndergaard M., Jensen J.P., Havens, Anneville, O., Carvalho, L., Coveney, M.F., Deneke, R., Dokulil, M., Foy, B., Gerdeaux, D., Hampton, S.E., Kangur, K., Köhler, J., Hilt, S., Lammens, E., Lauridsen, T.L., Manca, M. Miracle, R., Moss, B., Nöges, P., Persson, G., Phillips, G., Portielje, R., Romo, S., Schelske, C.L., Straile, D., Tatrai, I., Willén, E., & Winder, M. (2005): Lakes' response to reduced nutrient loading - an analysis of contemporary data from 35 European and North American long term studies. *Freshwat. Biol.* 50: 1647-1671.

Kristensen P., Jensen J.P. & Jeppesen E. 1990. Eutrofieringsmodeller for søer. NPo-forskning fra Miljøstyrelsen nr. 9.

McDonald, C.P, Urban, N.R. 2010. Using a model selection criterion to identify appropriate complexity in aquatic biogeochemical models. *Ecological Modelling*, 221: 428-432.

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), 1982. Eutrophication of Waters. Monitoring assessment and control. Final Report. OECD Cooperative Programme on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control), Environment Directorate, OECD, Paris, 154 p.

Stauffer, R.E., 1985. Relationships between phosphorus loading and trophic state in calcareous lakes of southeast Wisconsin. *Limnology and Oceanography*, 30: 123-145.

- Søndergaard, M. Jensen J.P., Jeppesen E. 2001. Retention and internal loading of phosphorus in shallow, eutrophic lakes. *TheScientificWorld* 1: 427-442.
- Søndergaard, M., Jensen, J.P. & Jeppesen, E. 2003: Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia* 506/509: 135-145.
- Søndergaard, M., Bjerring, R.H., Jeppesen, E. 2013a. Persistent internal phosphorus loading during summer in shallow eutrophic lakes. *Hydrobiologia*, Vol. 710: 95-107.
- Søndergaard, M., Lauridsen, T. L., Kristensen, E. A., Baattrup-Pedersen, A., Wiberg-Larsen, P., Hansen, R. B. & Friberg, N. 2013b. Biologiske indikatorer i danske søer og vandløb: Vurdering af økologisk kvalitet. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. 78 s. (Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi; Nr. 59).
- Trolle D. & Søndergaard M. 2010. Udvikling og anvendelse af empiriske og dynamiske sømodeller. By- og Landskabsstyrelsen.
- Vollenweider, R.A. (1976): Advances in Defining Critical Loading Levels for Phosphorus in Lake Eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 33: 53-83.
- Windolf J., Jeppesen E., Jensen J.P. & Kristensen P. (1996): Modelling of seasonal variation in nitrogen retention: a four-year mass balance study in 16 shallow lakes. *Biogeochemistry* 33: 25-44.

[Tom side]

SAMMENHÆNGE MELLEM NÆRINGSSTOF- TILFØRSEL OG SØKONCENTRATIONER I DANSKE SØER

Rapporten etablerer empiriske sammenhænge mellem sø-
ers næringstilførsel (fosfor og kvælstof) og de resulterende
søkoncentrationer med udgangspunkt i nye samt tidligere
anvendte modeller. Forklaringsværdien for flere af de
analyserede modeller afviger ikke væsentlig fra hinanden,
men det varierer noget hvor stor bias modellerne har.
Der kan etableres stærke sammenhænge mellem årsmid-
del- og sommermiddelsoncentrationer.