

## **Notat**

Den interne fosforbelastning i danske søer og indsvingningstiden  
efter reduktion af ekstern fosfortilførsel.

**Udarbejdet**

**af**

Mogens R. Flindt, Charlotte Jørgensen & Henning Jensen

Biologisk Institut

SDU

Januar

2015

## Forord

Dette notat er en af 5 rapporter/notater 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 (dette notat).
- Erfaringer med anvendelse af dynamiske sømodeller. Notat fra DHI.

Dette notat anviser en metode til at vurdere, hvor lang tid der går fra at fosforbelastningen af en sø er reduceret tilstrækkeligt til at opnå målopfyldelse, og til at søen kan forventes at opnå denne målopfyldelse. Notatet beskriver først sammenhængen mellem fire parametre (total P, total jern (Fe), tørstof og glødetab) og sedimentets pulje af mobilt P målt ved sekventiel kemisk ekstraktion. De fire første parametre er målt i næsten alle danske søer mens mobilt P er målt i 33 søer. Dernæst beskrives sammenhængen mellem mobilt P, Fe, glødetab og sedimentets P-frigivelseshastighed målt ved 16 grader og iltet overfladesediment. Der anvendes data fra godt 30 søer. Sidst anvendes disse tal i en dynamisk model, som med et "standard år" for vandafstrømning bruges til at fremskrive udviklingen i søens mobile P-pulje, P- frigivelsen fra sedimentet og søvandets TP. Modellen valideres på udvalgte søer.

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 (DCE, 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.

## 1 Introduktion

Intern fosfor (P) belastning (sæsonvis frigivelse fra sedimentet af P, som er akkumuleret pga. en tidligere høj ekstern belastning) kan fastholde søer i en dårlig tilstand i mange år efter at den eksterne P-tilførsel er nedbragt (f.eks. Jensen et al. 2006). I de fleste søer er det dog muligt at binde overskuddet af P i sedimentet f.eks. ved tilsætning af aluminium; men inden man beslutter at udføre dette indgreb, bør det vurderes om søen af sig selv kan opnå en god økologisk tilstand alene ved udtømning af den mobile P-pulje i sedimentet.

I dette kapitel gives der en vejledning til, hvordan man ud fra nedenstående information:

1. Sedimentparametrene tørstof (%tv), glødetab (%gt), total fosfor (TP) og total (TFe),
2. Vandet opholdstid og søens dybde,
3. Den årgennemsnitlige indløbskoncentration for TP

kan vurdere, hvor lang tid det vil tage, før en sø kan opnå målopfyldelse på den sommergennemsnitlige klorofyl *a* koncentration. Vurderingen foretages vha. en dynamisk massebalancemodell for P, hvor sedimentets P-frigivelse er beskrevet ved de empiriske sammenhænge mellem sediments mobile P-pulje og frigivelsesraten, som er fundet i ca. 35 danske søer. Modellen beregner bl.a. sæsonvariationen i søvandets TP og ud fra sommergennemsnitlige TP værdier for søvandet vurderes målupfyldelse, som opnås hvis TP kommer under  $70 \mu\text{g P L}^{-1}$  i lavvandede søer og under  $25 \mu\text{g P L}^{-1}$  i lagdelte søer.

### Baggrund:

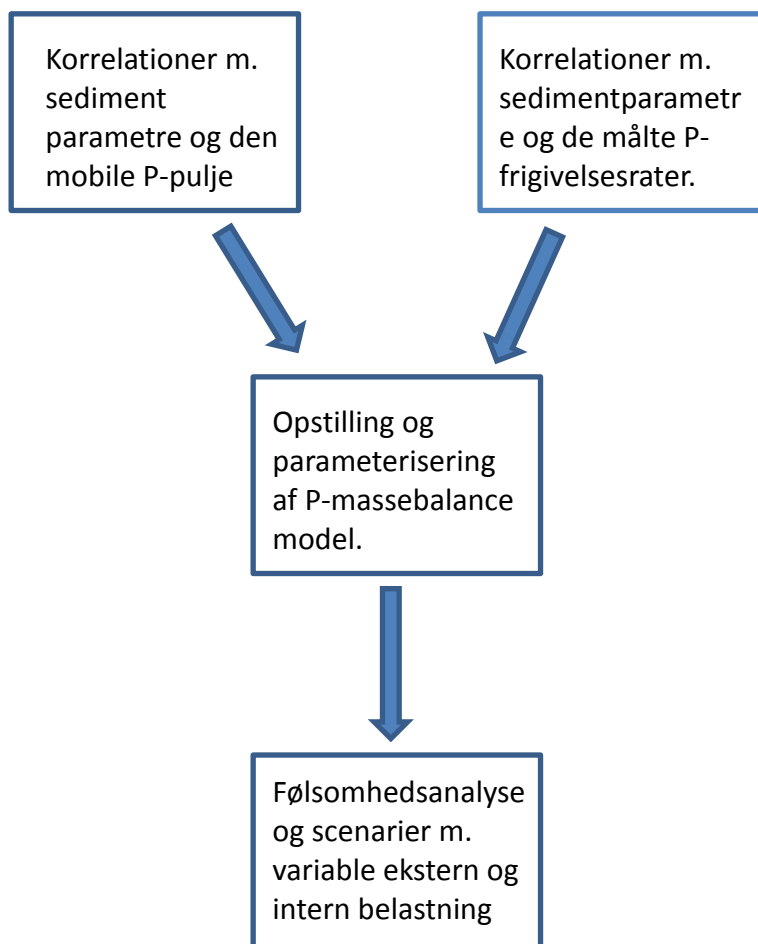
I overfladesedimentet i danske søer er der en stærk korrelation mellem total jern (TFe) og total fosfor (TP) (f.eks. Jensen et al. 1992). Denne sammenhæng skyldes at oxideret Fe binder P meget stærkt og sandsynligvis har tilførslen af P i en lang periode (op til ~1990) været i overskud i forhold til den mere konstante tilførsel af Fe således, at puljen af oxideret Fe ofte er mættet med P. Jensen et al. (1992) viste, at P frigivelsen fra en iltet sedimentoverflade falder eksponentielt med Fe:P forholdet i de øverste 5 cm af sedimentet. Dette kan forklares ved at jernbundet P ofte udgør den største del af den mobile P-pulje i sedimentet at forholdet mellem oxideret Fe (Ox.Fe) og jernbundet P beskriver mætningen af den jernbundne P pulje.

Både oxideret Fe og jernbundet P kan bestemmes rimeligt sikkert ved sekventiel ekstraktion af vådt sediment med BD-reagens (bicarbonat-dithionit), som virker ved at reducere oxideret Fe ( $\text{Fe}^{3+}$ ) til  $\text{Fe}^{2+}$  og frigive både dette og den jernbundne P i ekstraktet. I næste trin af denne ekstraktionsmetode kvantificeres omsættelig organisk P ved ekstraktion med natriumhydroxid. Denne pulje indgår også i den mobile P-pulje. Metoden (Psenner et al. 1988, Jensen and Thamdrup 1993) har efterhånden været brugt i ~30 danske søer og for disse søer etableres der en sammenhæng mellem størrelsen af den mobile P pulje (målt som vandekstraherbart P, jernbundet P, og labilt organisk P) og de sedimentparametre, som måles i det danske overvågningsprogram for søer (nævnt ovenstående under "1").

Tilsvarende har rater for P-frigivelse fra uforstyrrede sedimentkerner været målt direkte i laboratoriet for ~30 danske søer med ensartet inkubationsteknik. Det har tidligere været demonstreret, at disse frigivelsesrater svarer til den korttidsakkumulering af TP i vandfasen, som ses i lavvandede søer i klarvandsperioder uden sedimentation (Jensen og Andersen 1992). Det bliver derfor også etableret en sammenhæng mellem de traditionelle sedimentparametre ("1") og frigivelsesraterne.

Med udgangspunkt i en forholdsvis sikker bestemmelse af størrelsen af den mobile P-pulje og af P-frigivelsesraten fra sedimentoverfladen er det målet at etablere en generel, dynamisk, P-massebalance model, som ud fra månedlige målinger af vand- og P-tilførsler kan bruges til at beregne tiden for udtømning af sediments P-overskud samt simulere søvandets TP koncentration over sæsonen. Et modelarbejde med samme mål, at beregne indsvingningstiden efter reduceret ekstern P-belastning, har tidligere været udført på data fra 16 lavvandede danske søer (Jensen et al. 2006). Jensen et al.'s model, som ligeledes er generel, simulerede sæsonvariation i søvandets TP koncentration tilfredsstillende; men viste sig meget følsom over for størrelsen af den mobile P-pulje i sedimentet ved start af modellen. Da den mobile P-pulje blev estimeret for de enkelte søer ved kalibrering af modellen og da P-frigivelsesraterne ligeledes var bestemt ved kalibrering vurderes det, at denne model er for usikker til at vurdere udtømning af sedimentets mobile P-pulje i danske søer. I en senere version af modellen er Total-P i de øvre sedimentlag dog anvendt i stedet for at kalibrere sedimentpuljen, ligesom en permanent deposition er inkluderet (Jeppesen et al., 2009) i lighed med den model, som præsenteres i dette notat.

De følgende afsnit:



2. Der etableres en sammenhæng mellem størrelsen af den mobile P-pulje, bestemt ved sekventiel kemisk ekstraktion og simple sediment parametre: TP, TFe, tørstof og glødetab. Denne baseres på ca. 30 undersøgte søer.

3. Der etableres en sammenhæng mellem søernes mobile P-pulje (eller proxyen for mobilt P bestemt ud fra "1") og P-fluxene. Dette gøres for ~30 danske søer, hvor P-efflux er målt i uforstyrrede sedimentkerner.
4. Ovennævnte sammenhænge implementeres i en dynamisk massebalance model, som herefter kan simulere udtømningen af sedimentets P-pulje (og dermed størrelsen af den interne P-belastning) i forskellige scenarier. Scenarierne vælges så de nogenlunde dækker spektret af danske søtyper i forhold til indløbskoncentrationer, mobile P-puljer, opholdstider og vanddybder. Dermed vurderes indsvingningstiden generelt uden at opstille en model for hver enkelt sø.
5. Praktisk anvendelse af resultaterne

### Bidragydere til datasættet

Udover forfatterne har flg. personer bidraget med data: Sara Egemose, Kasper Reitzel, Maria Jensen.

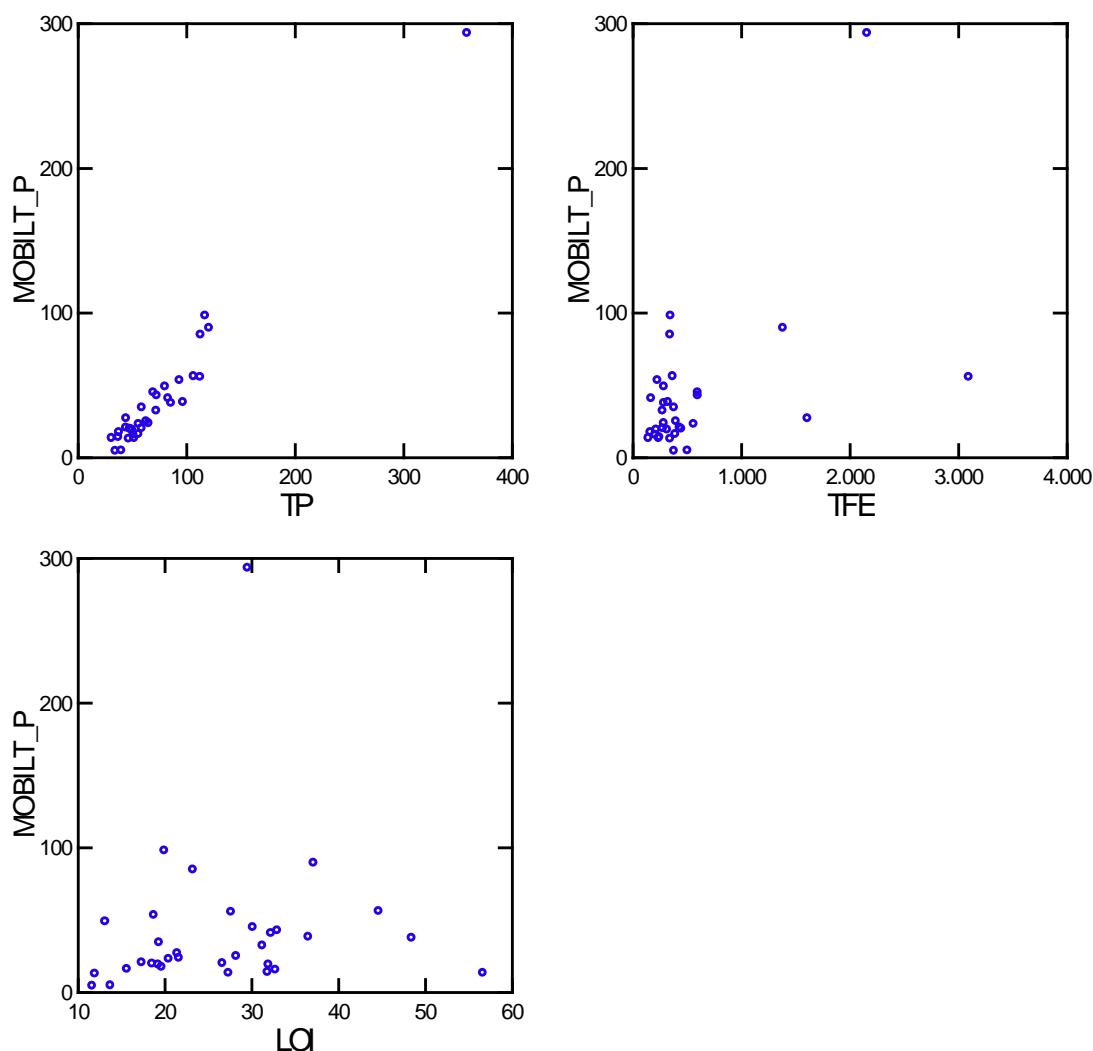
## **2. Sammenhæng mellem den mobile P-pulje og TP, TFe, tørstof og glødetab**

Data for mobilt P bestemt vha. sekventiel kemisk ekstraktion findes for ca. 30 danske søer. I hver sø blev den dybeste station udvalgt til nærmere analyse. Data for søer, der har fået tilsat aluminium, er ikke medtaget. Puljen af mobilt P blev opdelt i let-adsorberet P, jernbundet P (BD-P) og labilt organisk P (NRP) og bestemt ned til henholdsvis 5 og 10 cm dybde. Puljerne blev udtrykt som  $\mu\text{mol P/g tørvægt}$ . Tilsvarende blev det gennemsnitlige indhold af total P (TP) og total Fe (TFe) bestemt ned til henholdsvis 5 og 10 cm dybde og udtrykt som  $\mu\text{mol P/g tørvægt}$  og  $\mu\text{mol Fe/g tørvægt}$ . Glødetabet (%) blev bestemt som en gennemsnitlig værdi for 0-5 cm og 0-10 cm dybde. Data blev altså opdelt i to sæt: et sæt med sedimentdata som repræsenterer middelværdier for 0-5 cm dybde og et sæt som repræsenterer middelværdier for 0-10 cm dybde. For begge sæt blev den mobile pulje (herunder den samlede pulje, det jernbundne uorganiske P og NRP) plottet, som funktion af TP, TFe og glødetabet for at identificere eventuelle sammenhænge. Disse plot indikerede, at der er en lineær sammenhæng mellem mobilt P (samlet pulje og jernbundet P) og TP imens det for de øvrige plot var sværere at identificere en specifik tendens.

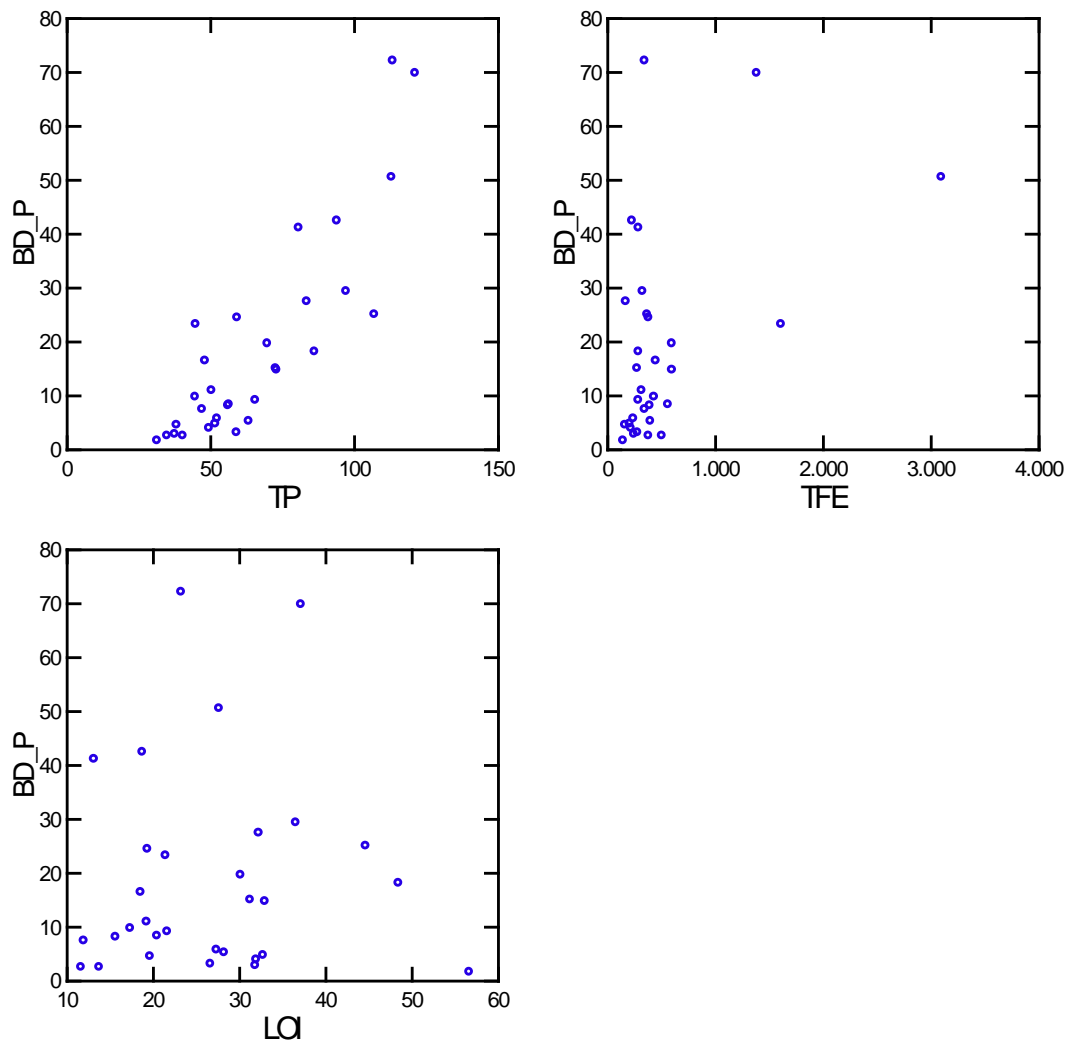
For at finde et matematisk udtryk til beskrivelse af den mobile P pulje ud fra basisparametrene TP, TFe og glødetabet blev der anvendt stepvis multipel lineær regression (least square). Regressionen foregår i trin. I første trin inkluderes alle de valgte parametre til beskrivelse af den mobile pulje. For hver parameter angives det, om den bidrager signifikant til beskrivelsen. Er det ikke tilfældet, fjernes den mindst signifikante parameter og regressionen sker på ny uden den fjernede parameter. Sådan fortsættes processen indtil der kun er parametre tilbage, som bidrager signifikant (parametre hvis p værdi overstiger 0.15 sorteres automatisk fra) til beskrivelsen af den mobile pulje. Den multiple regression blev kørt for den samlede pulje af mobilt P, for jernbundet P og for NRP for alle søerne. Analysen blev senere gentaget for lavvandede søer og dybe søer. I de fleste tilfælde var der en stærk sammenhæng mellem de mobile puljer og TP, imens glødetabet i nogle tilfælde også bidrog til beskrivelsen. Total Fe bidrog kun med statistisk signifikans til beskrivelsen af den jernbundne P i lavvandede søer.  $R^2$ -værdien blev angivet for hver regression. I nogle tilfælde havde enkelte søer en stor indflydelse på regressionerne. I disse tilfælde blev regressionen gentaget uden den eller de pågældende søer.

Scatterplots af mobile fosforpuljer som funktion af TP, TFe og glødetab 0-10 cm.

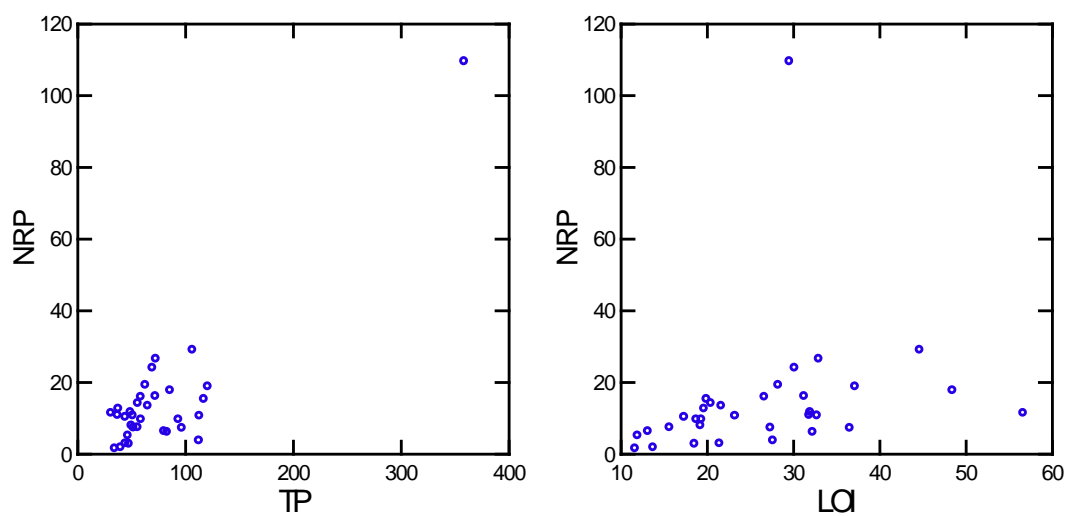
Som det første trin i modelleringen af de mobile P puljer blev disse puljer plottet som funktion af TP ( $\mu\text{mol/g tv}$ ), TFe ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) og procent glødetabet (LOI). Disse plot indikerer, at der er en lineær sammenhæng mellem TP og mobilt P, imens der er større spredning på punkterne, når mobilt P plottes, som funktion af TFe og glødetabet (Figur 1, 4, 7). Den jernbundne pulje følger samme tendenser (Figur 2, 5, 8). Der er ingen iøjnefaldende tendenser for NRP, som funktion af TP og glødetabet (Figur 3, 6, 9). Dokumentationen er medtaget her da en grafisk præsentation hurtigt giver et indtryk af data.



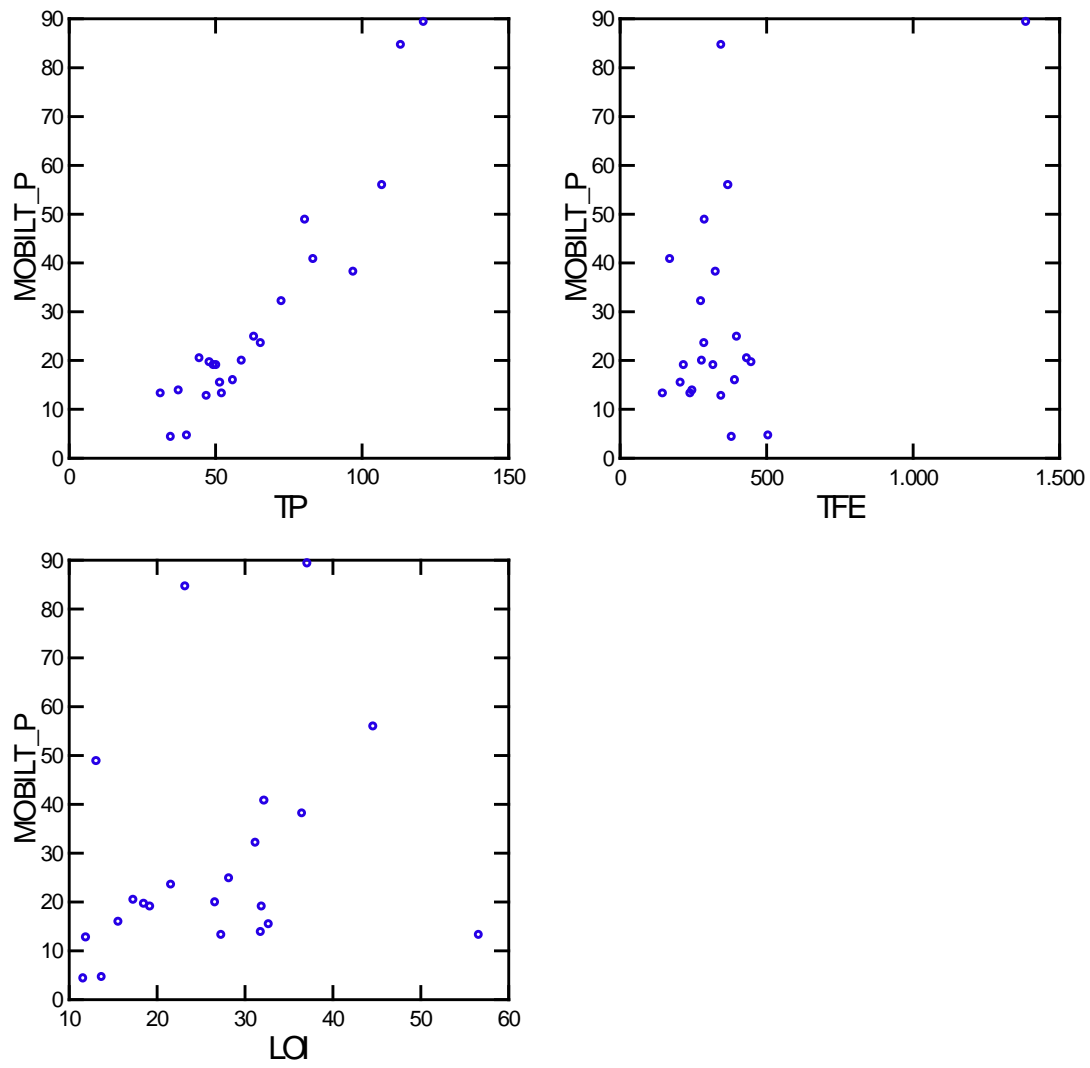
Figur 1: Mobilt P ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) som funktion af TP ( $\mu\text{mol/g tv}$ ), TFe ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) og glødetabet i % (LOI). Data er plottet for både dybe og lavvandede søer.



Figur 2: Jernbundet P (BD\_P) ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) som funktion af TP ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) og TFe ( $\mu\text{mol/g tv}$ ). Data er plottet for både dybe og lavvandede søer.

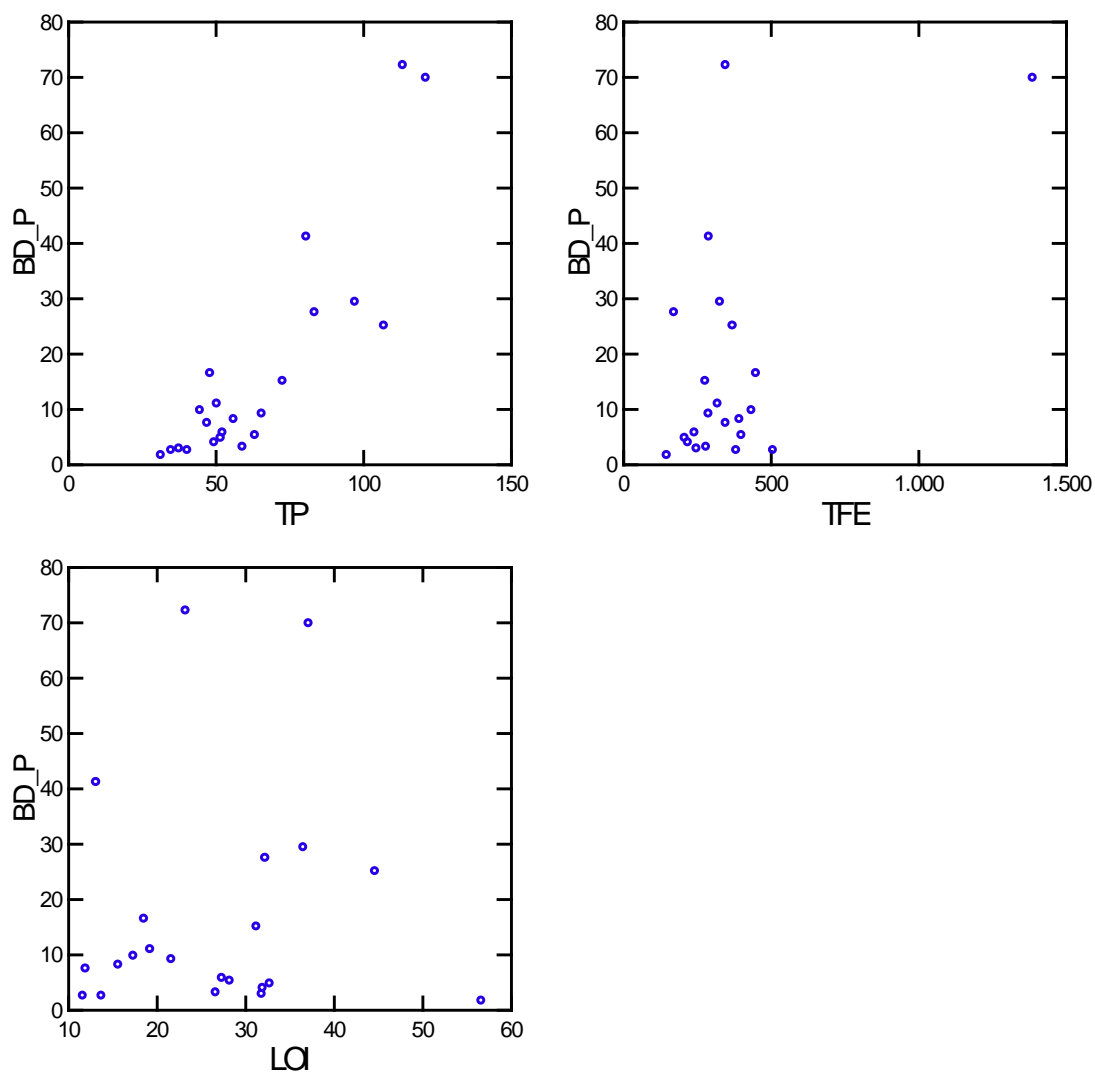


Figur 3: Non reaktivt P ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) som funktion af TP ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) og TFe ( $\mu\text{mol/g tv}$ ). Data er plottet for både dybe og lavvandede søer.

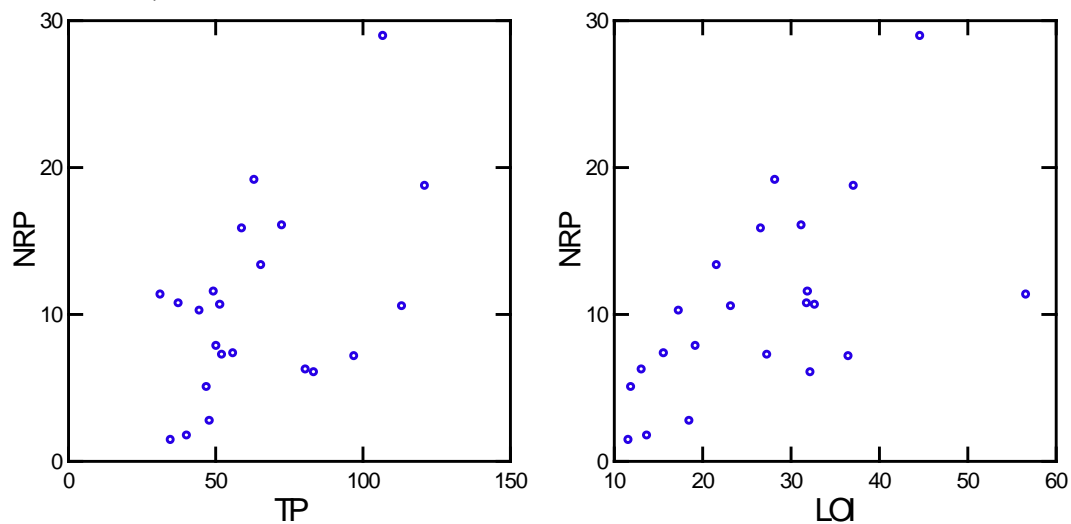


Figur 4: Mobilt P ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) som funktion af TP ( $\mu\text{mol/g tv}$ ), TFe ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) og glødetabet i % (LOI). Data er plottet for lavvandede søer.

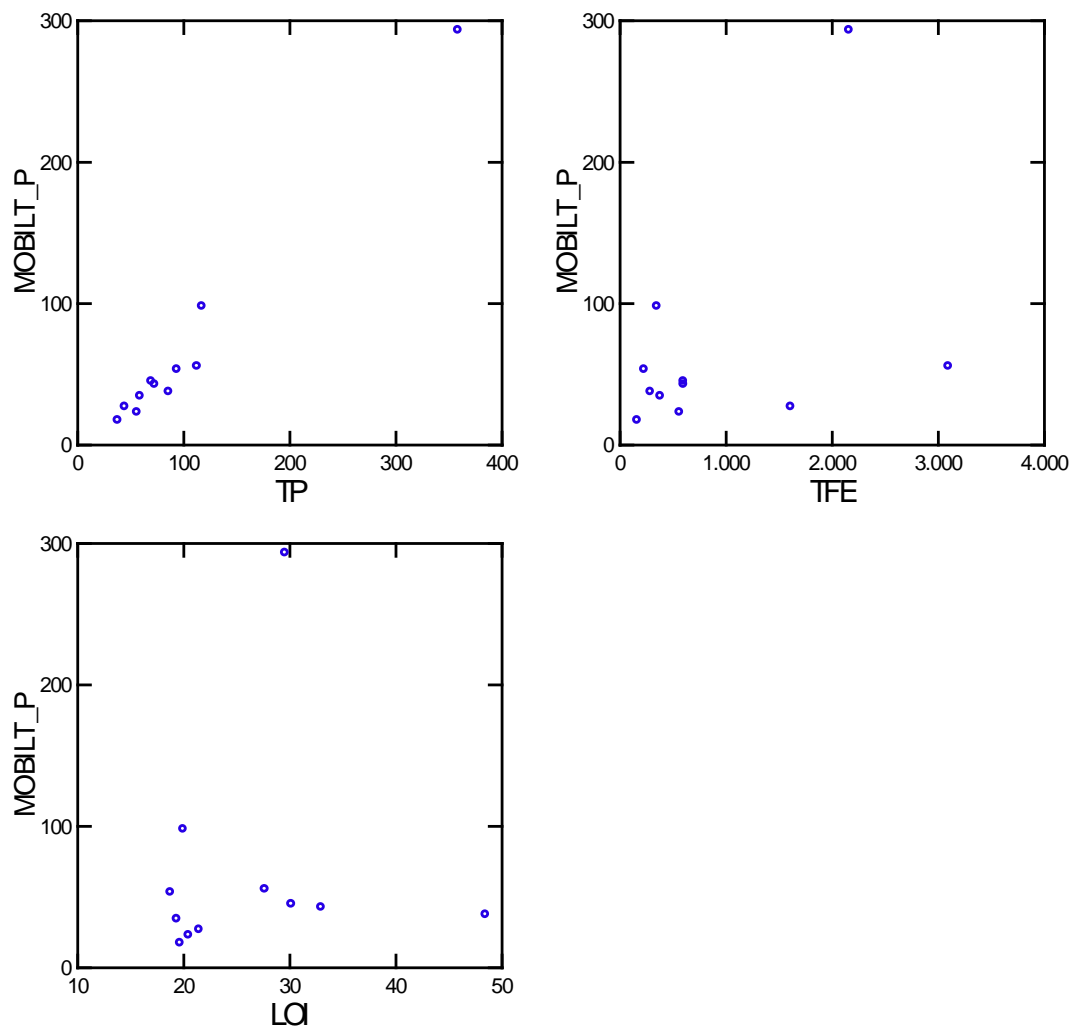




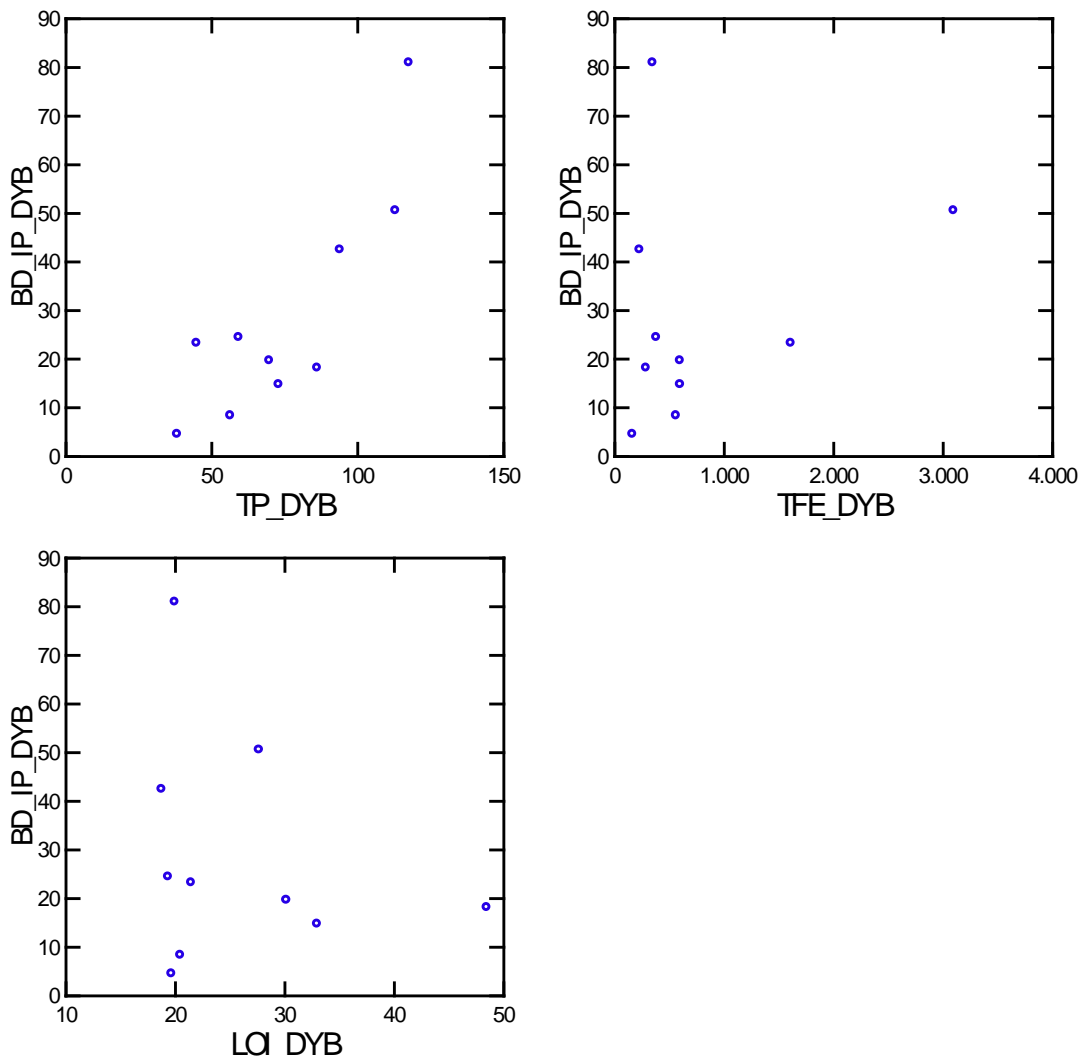
Figur 5: Jernbundet P (BD\_P) ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) som funktion af TP ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) og TFe ( $\mu\text{mol/g tv}$ ). Data er plottet for lavvandede søer.



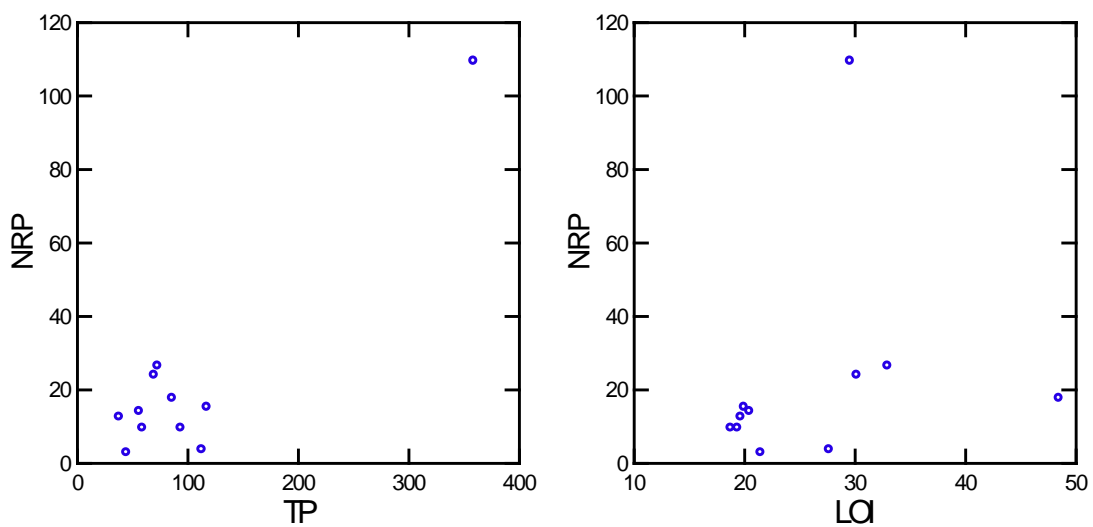
Figur 6: Non reaktivt P (NRP) ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) som funktion af TP ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) og LQ ( $\mu\text{mol/g tv}$ ). Data er plottet for lavvandede søer.



Figur 7: Mobilt P ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) som funktion af TP ( $\mu\text{mol/g tv}$ ), TFe ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) og glødetabet i % (LOI). Data er plottet for dybe søer.



Figur 8: Jernbundet P (BD\_P) ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) som funktion af TP ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) og TFe ( $\mu\text{mol/g tv}$ ). Data er plottet for dybe søer.



Figur 9: Non reaktivt P ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) som funktion af TP ( $\mu\text{mol/g tv}$ ) og TFe ( $\mu\text{mol/g tv}$ ). Data er plottet for dybe søer.

### Lineære regressioner 0-10 cm:

Der blev lavet lineære regressioner af de mobile puljer som funktion af TP, TFe og glødetabet (%) (på baggrund af data fra tabel 2. Resultaterne af regressionsanalyserne fremgår af tabel 1. Regressioner er testet for alle søerne, samt opdelt på lavvandede og dybe søer. De estimerede værdier for mobilt P, jernbundet P og NRP ses i tabel 3-5.

Tabel 1: Lineære regressioner for mobilt P, jernbundet uorganisk P (BD\_iP) og non reaktivt P (NRP). Alle P og Fe puljer er vægtede gennemsnit for 0-10 cm dybde og er udtrykt som  $\mu\text{mol/g TV}$ . Glødetabet er i %.

Søtype	Parameter som beskrives ( $\mu\text{mol/g}$ )	Model - ID	Ligning	R <sup>2</sup>
Alle	Mobilt P	Model 10	$-26,108+0,877*TP$	0,965
Alle	Mobilt P (uden Ørn Sø)	Model 10a	$-22,354+0,820*TP$	0,845
Alle	BD-iP	Model 11	$-10,014+0,591*TP-0,366*LOI$	0,903
Alle	BD-iP (uden Ørn og Hald)	Model 11a	$-16,903+0,688*TP-0,369*LOI$	0,760
Alle	NRP	Model 12	$-7,462+0,285*TP$	0,777
Alle	NRP (uden Ørn)	Model 12a	$-0,945+0,062*TP+0,307*LOI$	0,290
Lavvandede	Mobilt P	Model 13	$-25,865+0,775*TP+0,013*TFe$	0,885
Lavvandede	Mobilt P (beskrevet kun med TP)	Model 14	$-24,690+0,830*TP$	0,876
Lavvandede	BD-iP	Model 15	$-28,289+0,614*TP+0,016*TFe$	0,772
Lavvandede	BD-iP (uden Vejlesø og Væng)	Model 15a	$-13,555+0,428*TP$	0,617
Lavvandede	NRP	Model 16	$-2,889+0,09*TP+0,282*LOI$	0,423
Lavvandede	NRP (uden Hostrup)	Model 16a	$-2,235+0,501*LOI$	0,485
Dybe	Mobilt P	Model 17	$-22,008+0,869*TP$	0,977
Dybe	Mobilt P (uden Ørn)	Model 17a	$-12,220+0,735*TP$	0,732
Dybe	BD-iP	Model 18	$8,770+0,564*TP-0,892*LOI$	0,892
Dybe	BD-iP (Ørn)	Model 18a	$-4,927+0,790*TP-0,999*LOI$	0,832
Dybe	NRP	Model 19	$-9,129+0,310*TP$	0,846

OBS Ørn sø har en stor indflydelse på regressionen. Fjernes denne er regressionen ikke signifikant!

Modeller 10, 10a, 14 og 17 har nogle af de bedste korrelationskoefficienter og er påfaldende ens. Modellerne siger, at som udgangspunkt er der altid  $\sim 26 \mu\text{mol P g}^{-1} \text{TV}$ , som er immobil. Det svarer til  $0,8 \text{ mg P g}^{-1} \text{TV}$ . Med stigende TP koncentration vokser den immobile pulje svagt (med  $\sim 0,13*TP$ ). Resten af TP er mobilt og den mobile pulje vokser lineært med TP.

Tabel 2: Målte værdier (0-10cm) for alle søer som blev anvendt i regressionsanalysen for de mobile fosforpuljer. Dybe (lagdelte) søer er angivet med rødt.

ID	% TS	% GT	Densitet	Bulk density	TP	TFe	H2O-P	BD-P	BD-Fe	NRP	Mobilt P
		g/gTS	g/ml	gTS/ml	µmol/g	µmol/g	µmol/g	µmol/g	µmol/g	µmol/g	µmol/g
HD3	11,8	19,3	1,071	0,126	50,5	320,9	0,2	10,9	55,2	7,8	18,9
Vejl3	14,0	23,3	1,084	0,152	113,5	348,1	1,9	72,1	148,4	10,5	84,5
Sø14	7,7	32,3	1,042	0,080	83,6	173,3	7,2	27,4	45,2	6,0	40,6
SD_01	23,0	12,0	1,138	0,236	47,2	348,1	0,2	7,4	47,9	5,0	12,6
Peb_01	19,2	15,7	1,110	0,192	56,2	394,7	0,3	8,1	54,3	7,3	15,8
SktJ_N_01	11,5	17,4	1,070	0,123	44,8	435,6	0,3	9,7	55,4	10,2	20,3
Em2_01	9,6	28,3	1,049	0,090	63,4	401,6	0,4	5,2	22,9	19,1	24,7
Peb_12	20,6	13,8	1,136	0,234	40,5	508,4	0,3	2,5	39,7	1,7	4,5
SktJ_N_12	25,0	11,7	1,172	0,293	35,0	383,9	0,3	2,5	29,1	1,4	4,2
Sør1	10,6	27,4	1,061	0,113	52,4	242,5	0,2	5,7	4,4	7,2	13,1
Hald	8,4	20,0	1,049	0,088	117,7	351,6	1,6	80,9	209,1	15,2	97,7
VbN	9,1	19,7	1,054	0,096	38,3	166,3	0,2	4,5	21,7	12,5	17,2
Fure1_12	10,4	19,4	1,062	0,111	59,4	384,1	0,4	24,4	88,6	9,5	34,2
Fure1_98	10,9	18,8	1,066	0,116	94,1	231,8	1,2	42,4	61,5	9,5	53,1
Hin1	30,4	18,6	1,208	0,367	48,2	450,8	0,4	16,4	70,1	2,7	19,5
SD2	22,7	13,2	1,152	0,262	80,8	291,3	1,4	41,1	90,9	6,2	48,7
SjælB	8,7	26,7	1,050	0,092	59,2	281,9	0,9	3,1	156,9	15,8	19,8
RinØ2	6,3	33,0	1,034	0,066	73,1	602,3	1,3	14,7	126,4	26,4	42,5
RinØ5	6,5	30,2	1,036	0,067	69,9	602,0	1,2	19,6	140,8	23,9	44,7
RinS1	9,4	20,5	1,056	0,099	56,5	565,3	0,6	8,3	113,6	14,0	22,8
Søb	11,5	27,7	1,149	0,133	113,1	3100,5	1,2	50,5	1164,2	3,6	55,3
Nord1_06	8,5	21,7	1,050	0,089	65,7	290,1	1,0	9,1	40,0	13,3	23,4
Væ1_jun	5,8	37,2	1,030	0,060	121,3	1388,1	0,6	69,8	442,9	18,7	89,2
Stig	8,2	36,6	1,107	0,091	97,3	329,1	1,6	29,3	83,4	7,1	38,0
Ørn	9,5	29,6	1,108	0,106	359,0	2163,8	3,8	179,8	1264,6	109,4	293,1
Alm	9,8	21,5	1,124	0,110	45,0	1613,6	0,7	23,2	468,4	2,8	26,7
Kvie	11,6	31,3	1,129	0,131	72,8	279,2	0,9	15,0	93,8	16,0	32,0
Gra2	6,7	32,8	1,036	0,070	51,8	209,3	0,0	4,7	1,0	10,6	15,3
Tje1	6,4	32,0	1,035	0,067	49,6	220,2	3,4	3,9	5,1	11,5	18,9
Ved_12m_07	5,5	48,5	1,026	0,056	86,3	290,7	1,6	18,1	101,2	17,6	37,3
Sort											
Søn	4,8	44,7	1,023	0,048	107,1	371,9	1,9	25,0	36,1	28,9	55,8
Ar_12	7,9	31,9	1,044	0,083	37,7	249,3	0,2	2,8	53,4	10,7	13,7
Hos_12	6,6	56,7	1,028	0,068	31,5	148,2	0,2	1,6	88,3	11,3	13,1

Tabel 3: Målt og estimeret mobilt P ( $\mu\text{mol/g TV}$ ) for sedimentdybden 0-10 cm.

ID	Alle søer						
	MÅLT	Alle søer		Lavvandede søer		Dybe søer	
	Mobilt P	Model 10	Model 10a	Model 13	Model 14	Model 17	Model 17a
	$\mu\text{mol/g}$	$\mu\text{mol/g}$	$\mu\text{mol/g}$	$\mu\text{mol/g}$	$\mu\text{mol/g}$	$\mu\text{mol/g}$	$\mu\text{mol/g}$
HD3	18,9	18,2	19,0	17,4	17,2		
Vejl3	84,5	73,5	70,7	66,7	69,5		
Søl4	40,6	47,2	46,2	41,2	44,7		
SD_01	12,6	15,3	16,4	15,3	14,5		
Peb_01	15,8	23,1	23,7	22,8	21,9		
SktJ_N_01	20,3	13,2	14,4	14,5	12,5		
Em2_01	24,7	29,5	29,6	28,5	27,9		
Peb_12	4,5	9,4	10,8	12,1	8,9		
SktJ_N_12	4,2	4,6	6,3	6,2	4,3		
Sør1	13,1	19,8	20,6	17,9	18,8		
Hald	97,7	77,2	74,2			80,3	74,3
VbN	17,2	7,5	9,1			11,3	16,0
Fure1_12	34,2	26,0	26,4			29,6	31,5
Fure1_98	53,1	56,4	54,8			59,8	57,0
Hin1	19,5	16,1	17,1	17,3	15,3		
SD2	48,7	44,7	43,9	40,5	42,4		
SjælB	19,8	25,8	26,2	23,7	24,5		
RinØ2	42,5	38,0	37,6			41,6	41,5
RinØ5	44,7	35,2	34,9			38,7	39,1
RinS1	22,8	23,4	24,0			27,1	29,3
Søb	55,3	73,1	70,4			76,3	70,9
Nord1_06	23,4	31,5	31,5	28,8	29,9		
Væ1_jun	89,2	80,3	77,1	86,2	76,0		
Stig	38,0	59,2	57,4	53,8	56,1		
Ørn	293,1	288,7				290,0	
Alm	26,7	13,4	14,5			17,1	20,9
Kvie	32,0	37,8	37,4	34,2	35,8		
Gra2	15,3	19,3	20,1	17,0	18,3		
Tje1	18,9	17,4	18,3	15,5	16,5		
Ved_12m_07	37,3	49,6	48,4			53,0	51,2
Sort							
Søn	55,8	67,8	65,5	62,0	64,2		
Ar_12	13,7	7,0	8,6	6,6	6,6		
Hos_12	13,1	1,5	3,5	0,5	1,4		

Table 4: Målt og estimeret jernbundet P ( $\mu\text{mol/g TV}$ ) for sedimentdybden 0-10 cm.

ID	Alle søer						
	MÅLT	Alle søer		Lavvandede søer		Dybe søer	
	BD-iP	Model 11	Model 11a	Model 15	Model 15a	Model 18	Model 18a
	$\mu\text{mol/g}$	$\mu\text{mol/g}$	$\mu\text{mol/g}$	$\mu\text{mol/g}$	$\mu\text{mol/g}$	$\mu\text{mol/g}$	$\mu\text{mol/g}$
HD3	10,9	13,3	10,7	7,8	8,0		
Vejl3	72,1	49,3	52,6	47,0			
Sø14	27,4	28,5	28,7	25,8	22,2		
SD_01	7,4	13,9	11,2	6,3	6,7		
Peb_01	8,1	17,9	15,9	12,5	10,5		
SktJ_N_01	9,7	10,6	7,5	6,2	5,6		
Em2_01	5,2	17,9	16,3	17,0	13,6		
Peb_12	2,5	9,3	5,9	4,7	3,8		
SktJ_N_12	2,5	6,7	2,8	-0,7	1,4		
Sør1	5,7	11,8	9,0	7,8	8,9		
Hald	80,9	52,9				57,4	68,2
VbN	4,5	6,0	2,2			12,8	5,6
Fure1_12	24,4	18,6	16,8			25,0	22,7
Fure1_98	42,4	39,3	40,9			45,1	50,7
Hin1	16,4	12,2	9,4	8,5	7,1		
SD2	41,1	33,3	33,8	26,0	21,0		
SjælB	3,1	16,0	14,0	12,6	11,8		
RinØ2	14,7	22,1	21,2			20,6	19,9
RinØ5	19,6	21,1	20,0			21,2	20,1
RinS1	8,3	16,5	14,4			22,4	19,2
Søb	50,5	47,5	50,7			47,9	56,8
Nord1_06	9,1	21,5	20,3	16,7	14,6		
Væ1_jun	69,8	49,2	52,9	68,4			
Stig	29,3	35,2	36,5	36,7	28,1		
Ørn	179,8	192,2				184,8	
Alm	23,2	9,4	6,1			15,0	9,2
Kvie	15,0	22,5	21,7	20,9	17,6		
Gra2	4,7	9,6	6,6	6,9	8,6		
Tje1	3,9	8,6	5,4	5,7	7,7		
Ved_12m_07	18,1	24,7	24,6			14,2	14,8
Sort							
Søn	25,0	38,3	40,3	43,4	32,3		
Ar_12	2,8	1,6	-2,7	-1,2	2,6		
Hos_12	1,6	-10,5	-16,2	-6,6	-0,1		

Tabel 5: Målt og estimeret non reaktivt P ( $\mu\text{mol/g TV}$ ) for sedimentdybden 0-10 cm.

ID	Alle søer			Lavvandede søer	Dybe søer
	Målt	Model 12	Model 12a	Model 16	Model 17
	NRP $\mu\text{mol/g}$	NRP $\mu\text{mol/g}$	NRP $\mu\text{mol/g}$	NRP $\mu\text{mol/g}$	Mobilt P $\mu\text{mol/g}$
HD3	7,8	6,9	8,1	7,1	
Vejl3	10,5	24,9	13,2	13,9	
Søl4	6,0	16,4	14,2	13,8	
SD_01	5,0	6,0	5,7	4,7	
Peb_01	7,3	8,5	7,4	6,6	
Sktj_N_01	10,2	5,3	7,2	6,0	
Em2_01	19,1	10,6	11,7	10,8	
Peb_12	1,7	4,1	5,8	4,6	
Sktj_N_12	1,4	2,5	4,8	3,6	
Sør1	7,2	7,5	10,7	9,5	
Hald	15,2	26,1	12,5		27,4
VbN	12,5	3,5	7,5		2,8
Fure1_12	9,5	9,5	8,7		9,3
Fure1_98	9,5	19,4	10,7		20,1
Hin1	2,7	6,3	7,8	6,7	
SD2	6,2	15,6	8,1	8,1	
SjælB	15,8	9,4	10,9	10,0	
RinØ2	26,4	13,4	13,7		13,5
RinØ5	23,9	12,5	12,7		12,5
RinS1	14,0	8,6	8,8		8,4
Søb	3,6	24,8	14,6		25,9
Nord1_06	13,3	11,3	9,8	9,1	
Væ1_jun	18,7	27,1	18,0	18,5	
Stig	7,1	20,3	16,3	16,2	
Ørn	109,4	94,8	30,4		102,1
Alm	2,8	5,4	8,4		4,8
Kvie	16,0	13,3	13,2	12,5	
Gra2	10,6	7,3	12,3	11,0	
Tje1	11,5	6,7	12,0	10,6	
Ved_12m_07	17,6	17,1	19,3		17,6
Sort					
Søn	28,9	23,1	19,4	19,3	
Ar_12	10,7	3,3	11,2	9,5	
Hos_12	11,3	1,5	18,4	15,9	

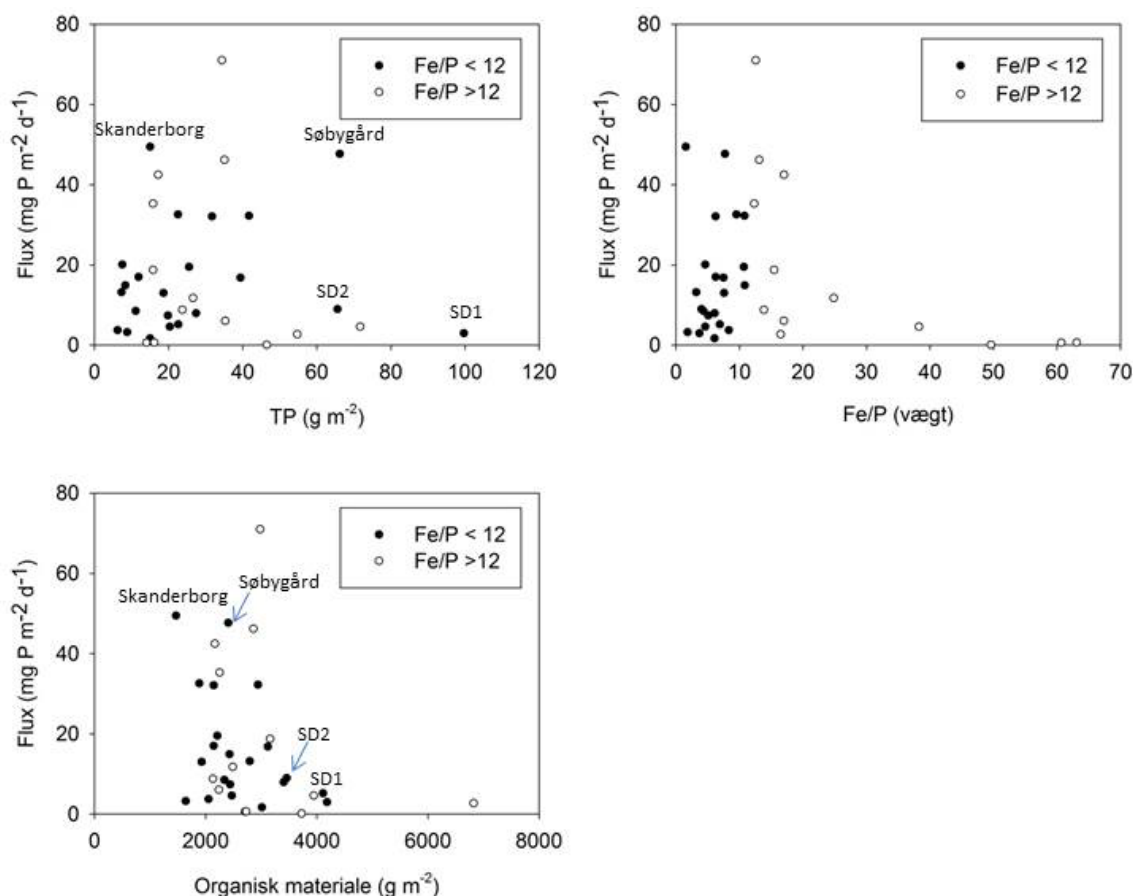
### 3. Valg af matematiske udtryk til beskrivelse af fosforfrigivelse fra sedimentet.

I det følgende etableres signifikante sammenhænge mellem P i sedimentet og P frigivelse målt på uforstyrrede sedimentkerner ved 16 °C i 35 søer. De bedste korrelationer (til en enkelt parameter) præsenteres i nedenstående Fig. 10. De fleste af målinger er fortaget i juni ved ca. 16 °C, mens et mindre antal er målt om foråret ved lavere temperaturer. I dette tilfælde er fluxene efterfølgende temperaturkorrigerede til 16 °C ved:



$$\text{flux16} = \text{flux10} * \text{tempkoeff}^{(16-10)},$$

hvor **flux10** er den målte flux ved 10°C ( $\text{mg P m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), **flux16** er den beregnede flux ved 16°C, **tempkoeff** er temperaturafhængigheds-koefficienten, som beskriver P-frigivelsens temperaturfølsomhed, mens konstanterne 16 og 10 er temperaturerne. Temperaturfølsomheden afhænger af koefficientens størrelse, hvor 1.13 er anvendt og beskriver en høj temperaturafhængighed – svarende til en  $Q_{10}$  på omkring 3 (jvnf. s. 25).



Figur 10: Fosforfrigivelsen fra sedimentet ( $\text{mg P m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) plottet som funktion af total fosfor ( $\text{g P m}^{-2}$ ), organisk materiale ( $\text{g m}^{-2}$ ) og Fe/P (vægt forhold). Stevning Dam (Stevn) og Skanderborg Lillesø er markeret, da de faldt ud som "outliers" i regressionsanalysen. Desuden er Søbygård Sø markeret, da den har en stor effekt på regressionen mellem henholdsvis frigivelsen og total P indholdet i sedimentet og mellem frigivelsen og organisk materiale i sedimentet.

Fosforfrigivelsen fra sedimentet er målt i 35 søer. Enkelte søer indgår med to stationer. Mobilt P er kun målt på en del af søerne; men da denne pulje korrelerer stærkt med TP bruges kun TP i den efterfølgende opstilling af en empirisk model for P-frigivelse fra sedimentet.

Frigivelsen blev plottet som funktion af total P i sedimentet ( $\text{g P m}^{-2}$ ), Fe/P indholdet (vægt basis) og organisk materiale ( $\text{g m}^{-2}$ ) (Fig. 10). Disse plot gav en indikation af at frigivelsen ved lave Fe/P forhold kan

beskrives som en lineær funktion af TP i sedimentet (og eventuelt det organiske indhold) imens frigivelsen ved høje Fe/P forhold kan beskrives som en hyperbolsk funktion af Fe/P forholdet.

Ved hjælp af lineær regression og multipel lineær regression er det testet om fosforfrigivelsen ( $\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) ved lave Fe/P forhold (<10, <12 og <15) kunne beskrives som en lineær funktion af TP eller som en multipel lineær funktion af TP ( $\text{g m}^{-2}$ ) og organisk indhold ( $\text{g m}^{-2}$ ) i sedimentet (tabel 6). Skanderborg Lillesø og Stevning Dam er ikke inkluderet, da inkludering fører til forringet regression. Frederiksborg Slotssø er udeladt fra den multiple lineære regression pga. manglende data for glødetab. Forklaringskraften af regressionen ( $R^2$ ) for  $\text{Fe/P} < 10$  og  $< 12$  blev forøget ved at inkludere det organiske indhold. Søbygård Sø havde en stor indflydelse på den lineære regressionsanalyse mellem fosforfrigivelsen og TP i sedimentet, men indflydelsen mindskedes i den multiple regressionsanalyse – resultater er kun angivet for  $\text{Fe/P} < 12$ .

Tabel 6: Lineær regression og multipel lineær regression for fosforfrigivelsen fra sedimentet ( $\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) som funktion af TP ( $\text{g m}^{-2}$ ) og organisk materiale ( $\text{g m}^{-2}$ ) opdelt efter Fe/P forholdet.  $R^2$  værdien og p værdien er angivet for alle udtryk. Der er desuden inkluderet to udtryk for  $\text{Fe/P} < 12$ , hvor Søbygård Sø er fjernet.

Fe/P	Lineær regression/multipel lineær regression	$R^2$	p (TP)	p (org. stof)
<10	$2,255+0,591*TP$	0,453	0,003	-
<10	$19,36+0,716*TP-0,00821*org. materiale$	0,679	<0,001	0,022
<12	$2,997+0,594*TP$	0,487	0,001	-
<12 uden søbygård	$5,1+0,469*TP$	0,208	0,033	-
<12	$19,501+0,714*TP-0,00788*org. materiale$	0,672	<0,001	0,019
<12 uden Søbygård	$19,501+0,717*TP-0,00790*org. materiale$	0,459	0,002	0,029
<15	$3,265+0,745*TP$	0,335	0,002	-
<15	$12,139+0,836*TP-0,00456*org. materiale$	-	0,007	0,439

På tilsvarende vis blev der testet om fosforfrigivelsen ved høje Fe/P forhold kunne beskrives som en hyperbolsk funktion (tabel 7).

Tabel 7: hyperbolsk regression som udtryk for fosforfrigivelsen fra sedimentet ( $\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) som funktion af Fe/P.

Fe/P	Hyperbolsk funktion	$R^2$	p
>10	$10,2825*Fe/P/(-7,3634+Fe/P)$	0,173	0,0613
>12	$5,3442*Fe/P/(-11,0871+Fe/P)$	0,5397	0,0026
>15	$3,8347*Fe/P/(-12,5256+Fe/P)$	0,1583	0,1576

Ud fra ovenstående regressionsanalyser blev følgende udtryk valgt til beskrivelse af fosforfrigivelsen fra sedimentet:

**$\text{Fe/P} \leq 12$ : Flux =  $19,501+0,714*TP-0,00788*org. materiale$**

**$12 < \text{Fe/P} \leq 40$ : Flux =  $5,3571*Fe/P/(-11,0817+Fe/P)$**

Begge modeller er statistisk signifikante, men som der fremgår af tabel 8 er de estimerede effluks ofte ret forskellige fra de målte i den enkelte sø.

Tabel 8: Rådata og beregnede fluxe for søerne som blev anvendt i modellerne.

Sø	Målt flux	Tot P	Fe:P	Organisk materiale	Beregnet flux	
	mg P m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>				g m <sup>-2</sup>	g m <sup>-2</sup>
Skanderborg Lillesø	49,5	15,0	1,5	1466,1		
Gudme Sø	3,2	8,8	1,8	1641,3	12,9	
Dystrup Sø	13,2	7,3	3,2	2791,9	2,7	
Stevning Dam 1	3,0	99,7	3,7	4184,7		
Stevning Dam 2	9,0	65,6	4,0	3458,4		
Dallund Sø	8,5	11,1	4,3	2337,2	9,0	
Haderslev Dam 2	4,6	20,3	4,6	2468,9	14,5	
Frederiksborg Slotssø	20,1	7,5	4,6	0,0		
Haderslev Dam 3	7,4	19,8	5,1	2439,5	14,4	
Vedsted Sø	1,7	15,0	6,1	3013,2	6,5	
Stigsholm Sø	8,0	27,4	6,1	3403,4	12,2	
Sønderby Sø	32,1	31,7	6,3	2145,6	25,2	
Damhussøen	17,0	11,9	6,3	2144,3	11,1	
Kvie Sø	5,2	22,6	6,9	4112,8	3,2	
Nordborg Sø 2	16,8	39,4	7,5	3117,5	23,1	
Nordborg Sø 1	13,0	18,6	7,6	1928,8	17,6	
Søbygård Sø	47,7	66,2	7,7	2406,0	47,8	
Nørre Sø	3,8	6,2	8,3	2050,8	7,7	
Bryrup Langsø	32,6	22,5	9,5	1885,1	20,7	
Skt. Jørgen Sø Syd	19,5	25,5	10,7	2208,8	20,3	
Sortedams Sø Nord	32,2	41,7	10,8	2940,2	26,1	
Arreskov Sø	14,9	8,3	10,8	2428,6	6,3	
Kvind Sø	35,3	15,8	12,3	2250,3		53,9
Peblinge Sø	71,0	34,4	12,5	2978,2		45,9
Sortedams Sø Syd	46,2	35,1	13,1	2857,7		34,6
Væng Sø	8,8	23,7	13,8	2129,6		26,8
Dons Nørre Sø	18,8	15,8	15,5	3160,3		18,9
Hindemade 1	2,7	54,7	16,5	6822,5		16,3
Engelsholm Sø	6,0	35,3	17,0	2238,3		15,4
Skt. Jørgen Sø Nord	42,5	17,2	17,0	2166,1		15,3
Alling Sø	11,8	26,6	24,8	2487,1		9,7
Hinge Sø	4,6	71,7	38,3	3944,3		7,5
Søby Sø	0,1	46,5	49,6	3726,1		6,9
Slåen Sø	0,6	14,0	60,7	2710,0		6,5
Almind Sø	0,7	16,1	63,1	2728,4		6,5

Desuden overestimerer modellen fosforfrigivelsen når  $Fe/P > 40$ . Vi anbefaler derfor, at frigivelsen sættes til  $1 \text{ mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  for søer med  $Fe/P > 40$ .

Den dynamiske model (afsnit 4) konstrueres så effluxen hele tiden bliver afhængig af både den aktuelle puljestørrelse af TP per arealenhed og af  $Fe/P$  forholdet. Begge parametre ændrer sig med tiden, idet vi antager en konstant sedimentationsrate for Fe. Således vil  $Fe/P$  forholdet stige efterhånden som TP udtømmes. Det udtryk, som beskriver effluxen af P kan altså skifte fra at være baseret på TP og organisk stof til at blive baseret på  $Fe/P$  forholdet. For at skiftet ikke skal føre til abrupte ændringer i fluxen vælger modellen dog altid det udtryk, som giver den laveste efflux når  $Fe/P > 12$ .

#### 4. Dynamisk P-massebalance model

En dynamisk massebalance model blev opstillet i PowerSim.

Som det ses af Fig. 11 består modellen af en simpel P-dynamik og vandbalance.

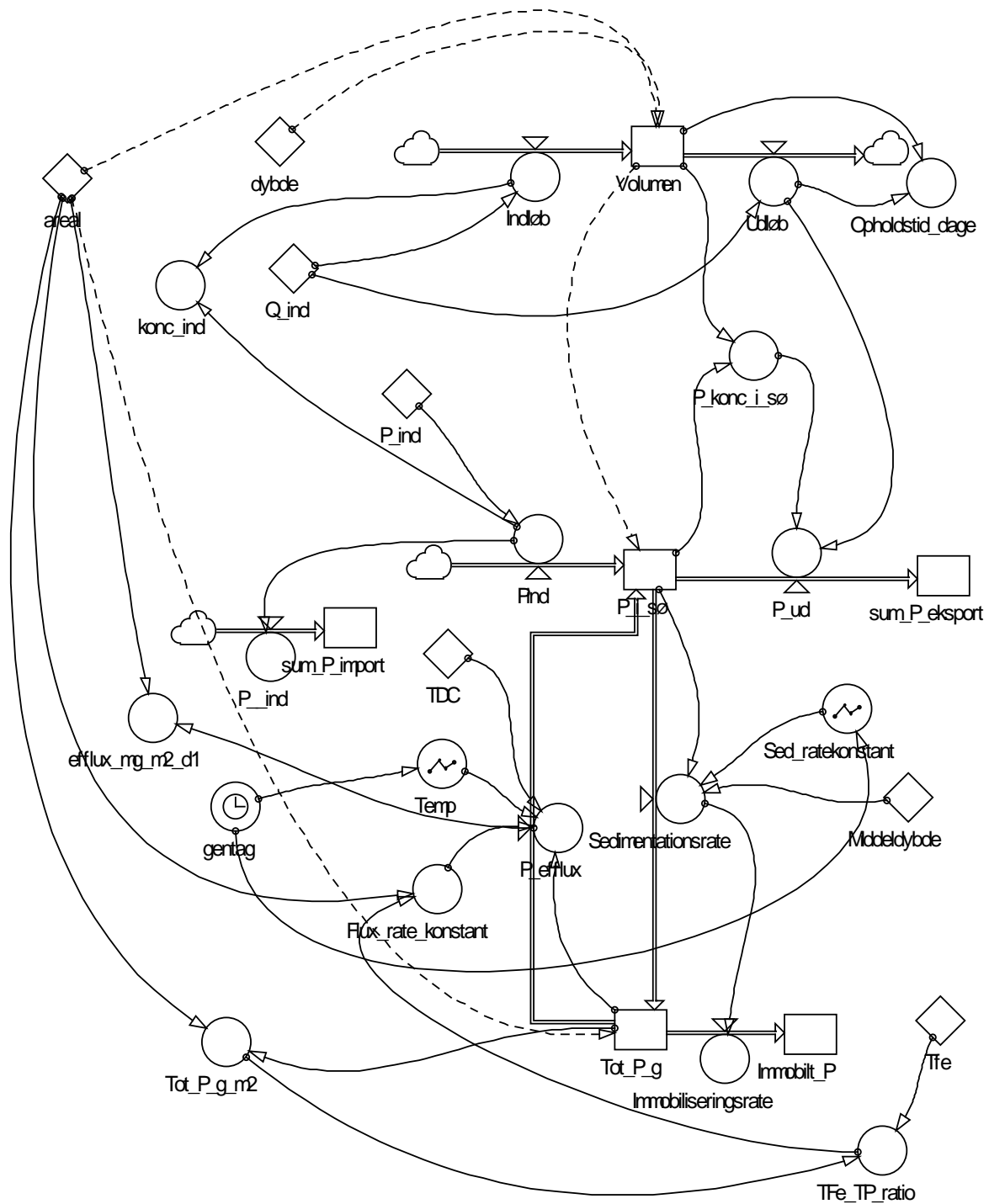
Vandbalancen bygger på, at der er opstillet et søvolumen via information om **areal** og **dybde**, der er beskrevet i tilstandsvariablen **Volumen**. Den daglige vandføring er koblet til tvangsfunktionen **Q\_ind** og processerne **indløb** og **udløb**. Vandbalancen sikrer, at der kan simuleres dynamiske opholdstider, som varierer over året. Dette muliggør simuleringer af den rette sæsonmæssige eksterne P-belastning og -afstrømning, alt sammen betinget af validerede data og korrekt parameterisering. Modellen forudsætter, at søerne er P-begrænsede, herved vil hovedparten af P findes på partikulær form – indbygget i fytoplankton eller i detritus i sommerperioden. I vinterperioden ændres tilstanden på **P\_sø** gradvist til at være 60% opløst. Dermed falder sedimentationsraten relativt til om sommeren og en større del af **P\_sø** bliver udvasket (**P\_ud**). Den eksterne P-belastning kommer ind i tilstandsvariablen **P\_sø** via tvangsfunktionen **P\_ind**. P-mængden i **P\_sø** påvirkes af følgende processer: **P\_ud**, **Sedimentation** og **P-efflux**.

Gennemstrømningen leder vand ud af søen med den i tidsskridtet gyldige P-koncentration, hvilket beregnes i processen **P\_ud** og akkumuleres i tilstandsvariablen **Sum\_P\_export**, som alene sikrer massebevarelse og efterfølgende aflastningsvurderinger.

**Sedimentationen** styres af en dynamisk **sedimentationsratekonstant**, der varierer over sæsonen. Den tungere kiselalgeopblomstring om foråret sedimenterer hurtigere end sommerens blågrønalger. **Sedimentationen** ender i tilstandsvariablen **Tot\_P\_g**, som er sedimentpuljen.

En lille andel af det nysedimenterede P (2%) immobiliseres af **Immobiliseringsraten**, mens den største fraktion er tilgængelig som intern belastning, der temperaturbetinget realiseres fra **Tot\_P\_g**. Den temperaturafhængige realisering af P-fluxen er styret af en temperaturafhængighedskonstant (**TDC**) og den aktuelle søvandstemperatur (**Temp**). Afhængigt af  $Fe/TP$ -ratio benyttes to forskellige flux-udtryk. Når  $Fe/TP$ -ratio  $< 12$  bruges **Tot\_P** og **Org\_mat** ( $Flux = 19,501 + 0,714 * TP - 0,00788 * org. materiale$ ), hvor der ved  $Fe/TP$ -ratio  $< 12$  benyttes  $TFe/TP$ -ratio dynamisk ( $Flux = 5,3571 * Fe/P / (-11,0817 + Fe/P)$ ), idet denne opdateres ved hvert tidskridt.

Endeligt er der også lavet en summeret P-import af hensyn til dynamiske beregninger af den arealspecifikke belastning.



Figur 11. Dynamisk P-massebalance model.

## Databehov.

Modellen drives af følgende input data:

- Søvolumen:  $m^3$  - startværdi
- Søvandskoncentration:  $g P m^{-3}$  – startværdi
- Mobil P-pulje i de øverste 10 cm af sedimentet:  $g P m^{-2}$  – beregnet ud fra det i 2) beskrevne udtryk.
- Organisk stof i de øverste 10 cm sedimentet  $g m^{-2}$  – beregnet ud fra det i 2) beskrevne udtryk.
- Fe/P forholdet (på vægtbasis) i de øverste 10 cm af sedimentet.
- Vandtilførsel:  $m^3 d^{-1}$  med en opløselighed der beskriver sæsonen.
- P-belastning:  $g P d^{-1}$  med en opløselighed der beskriver sæsonen.
- Søvandstemperatur:  $C^{\circ}$  med en opløselighed der beskriver sæsonen.

Beregningen af stofpuljer per arealenhed på baggrund af NST format for sø-sedimentdata er gennemgået i bilag 1.

## Modelkalibrering

Modellen er oprindeligt opstillet som en sø-specifik model og kalibreret på søerne i Haderslev tunneldal (Stevning Dam og Haderslev Sø) for årene 1998 og 2003. Her blev anvendt aktuelt målte indløbs- og søkoncentrationer samt aktuelt målte frigivelsesrater for sediment P målt ved tre forskellige temperaturer. Modellen blev efterfølgende valideret på TP og Chl. a. i søvandet for 2006. Modellen blev anvendt til at simulere indsvingningstiden for Haderslev søerne under forudsætning af forskellige tiltag (mindsket ekstern P-tilførsel og aluminiumbehandling af sedimentet).

Ligeledes er modellen blevet opstillet og anvendt på de indre søer i København og på Damhussøen.

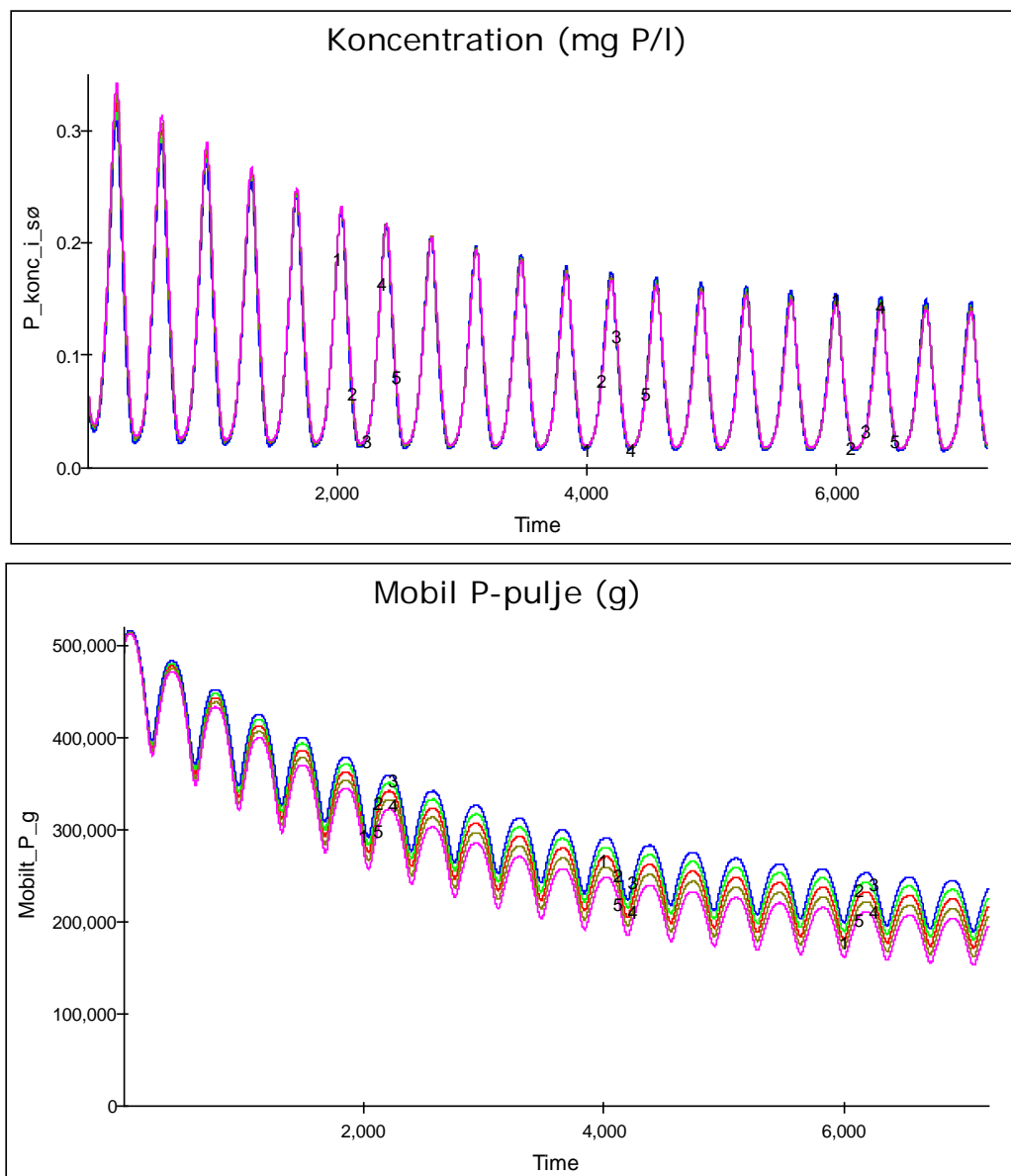
## Klassiske følsomhedsanalyser

Nedenstående er der gennemført en række følsomhedsanalyser på massebalancemodellen

### Følsomhedsanalyse af sedimentationsratekonstant (dynamisk)

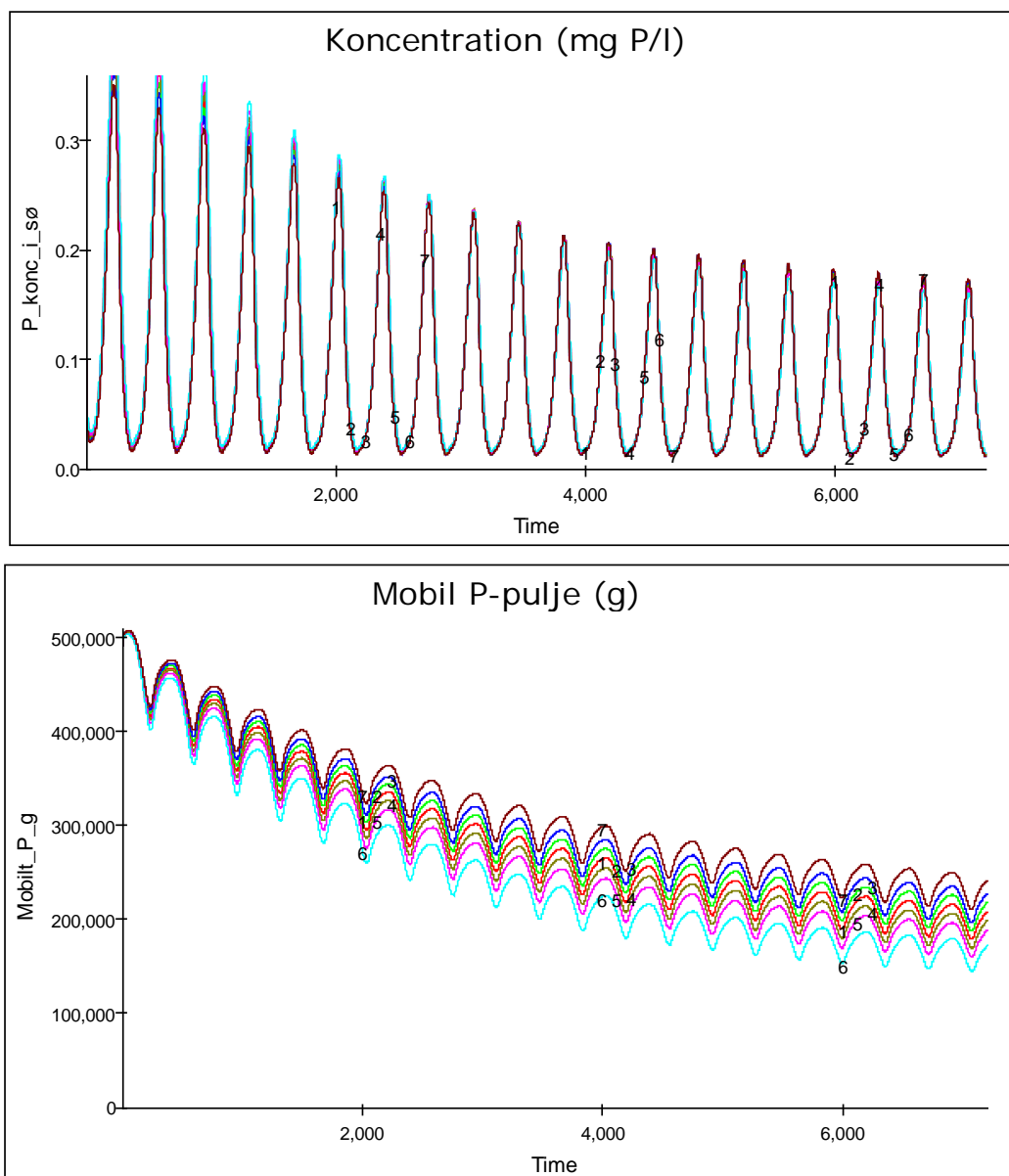
Følsomhedsanalyse af sedimentationsratekonstant (Fig. 12) er foretaget på modelopsætningen for Grarup Sø, hvor dybden er 4.2 m og opholdstiden er variabel (middel er den 286 dage). Som det ses, er modelsimuleringen ikke specielt følsom for ændringer varierende fra -10% til +10%. Ved at reducere sedimentationsratekonstanten skylles mere P ud af søen, mens en øget konstant medfører, at mere P

tilbageholdes, som igen vil bidrage til yderligere internbelastning. Der ses derfor nærmest ingen forskel på indsvingningstiden mht. P-koncentrationen i søen.



Figur.12. Følsomhedsanalyse for sedimentationsratekonstanten. Sødybde er 4.2 m, opholdstiden er variabel, men som middel er den 286 dage. Tidsenheden "Time" er dage.

I næste følsomhedsanalyse (Fig. 13) er dybden 2.1 m og opholdstiden er variabel, men som middel 143 dage. Her er følsomhedstesten øget til -20% - 20% på sedimentationsratekonstanten. Som det ses er modelsimuleringen ikke specielt følsom for ændringerne. En øget sedimentation resulterer i, at P-koncentrationen falder, men modvirkes af, at den mobile P-pulje ikke skylles ud og derved bidrager med mere intern belastning, således at koncentrations-niveauet igen stabiliseres.

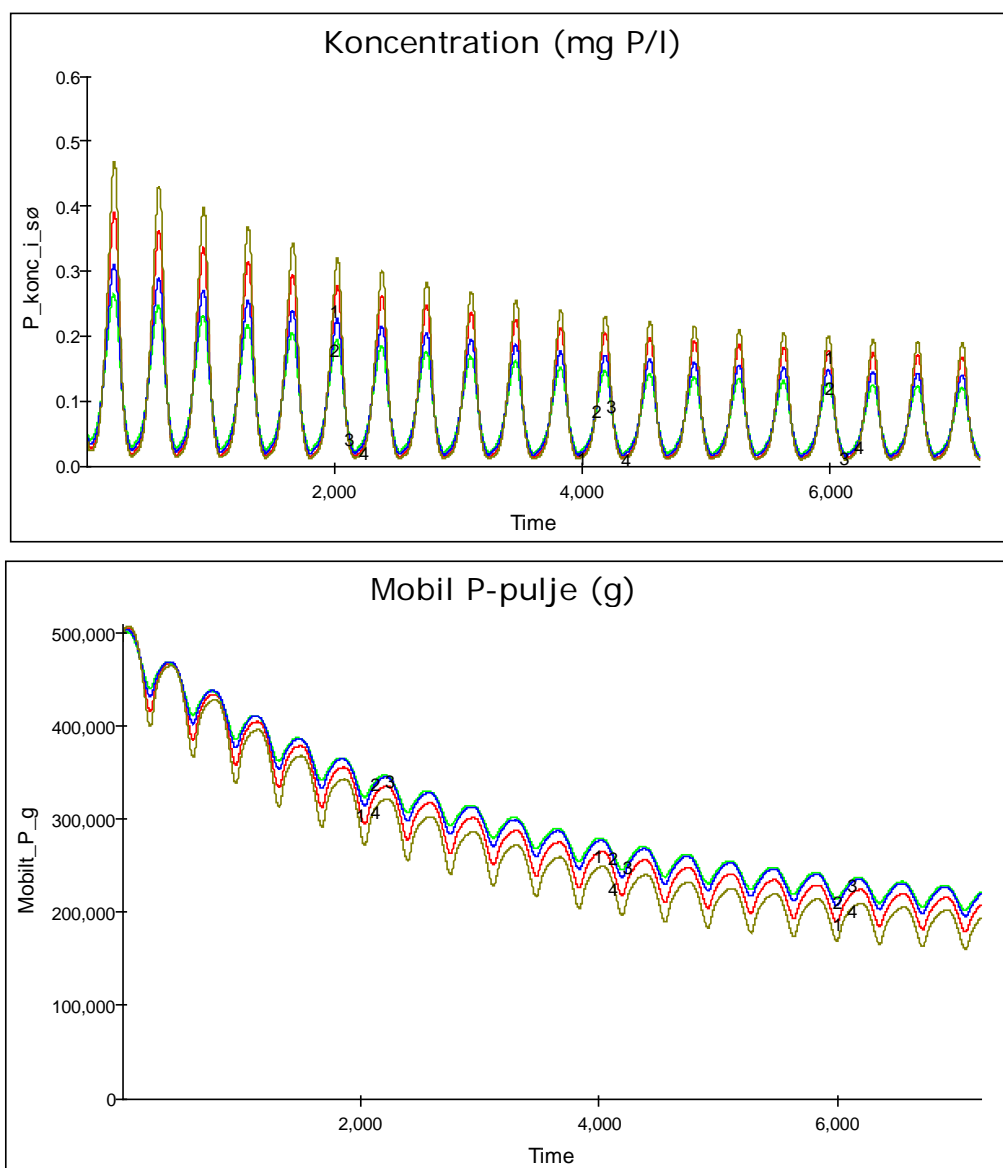


Figur.13. Følsomhedsanalyse for sedimentationsratekonstanten. Sødybde er 2.1 m, opholdstiden er variabel, men som middel er den 143 dage (samme tvangsfunktioner). Tidsenheden "Time" er dage.



### Følsomhedsanalyse af temperaturafhængighedskonstant

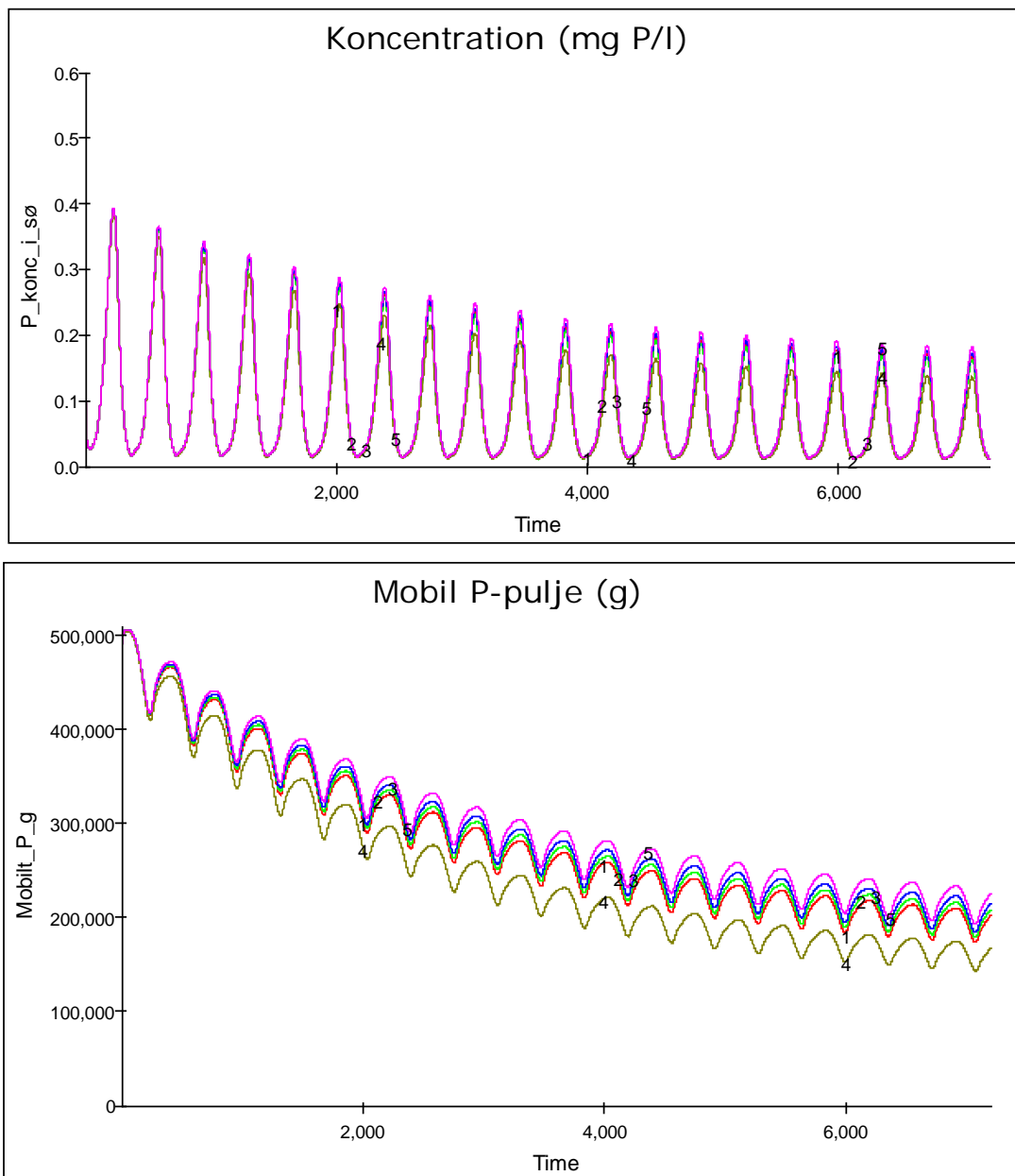
I næste følsomhedsanalyse (Fig. 14) er dybden 2.1 m og opholdstiden er variabel, men som middel 143 dage. Her er temperaturafhængighedskonstanten testet. Den er varieret fra 1.09 til 1.16, hvilket er et meget stort spænd. Modellen er kalibreret til 1.13, hvilket svarer til en  $Q_{10} = 3$ . Som det ses, er modelsimuleringen af P-koncentrationen følsom, idet en høj konstant realiserer mere intern P-belastning og derfor giver højere koncentrationer i søen. Puljen udtømmes tilsvarende hurtigere. Det er til gengæld den parameter, vi har flest målinger på – og datasættet indikerer, at temperaturafhængighedscoeffcienten bør være omkring 1.13.



Figur.14. Følsomhedsanalyse af temperaturafhængighedskonstanten. Sødybde er 2.1 m, opholdstiden er variabel, men som middel er den 143 dage (samme tvangsfunktioner). Tidsenheden "Time" er dage.

### Følsomhedsanalyse af immobiliseringsratekonstant

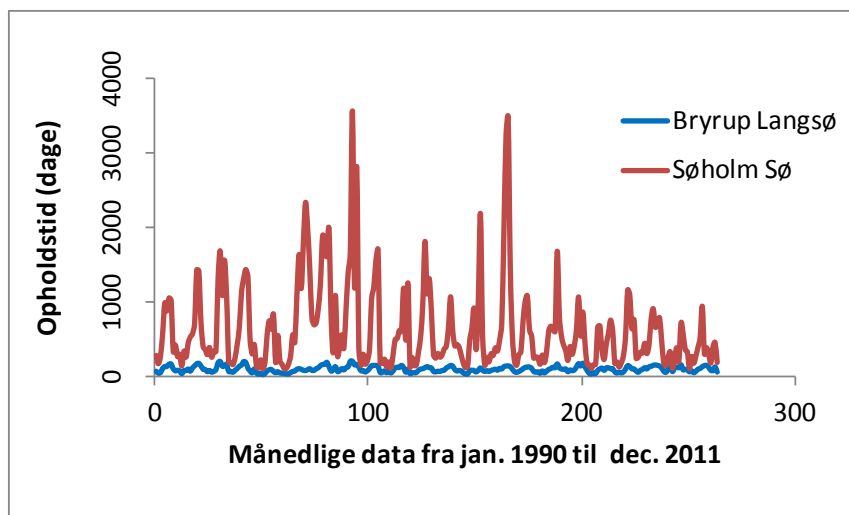
Næste følsomhedsanalyse er lavet på immobiliseringsratekonstanten (0,02). I denne følsomhedsanalyse er dybden også 2.1 m og opholdstiden er variabel, men som middel 143 dage. Konstanten er varieret mellem 0,018 og 0,022, hvilket gav meget lidt følsomhed. Den blev derefter fordoblet til 0,04 (sim. nr. 4), hvilket skabte følsomhed.



Figur.15. Følsomhedsanalyse af immobiliseringsratekonstanten. Sødybde er 2.1 m, opholdstiden er variabel, men som middel er den 143 dage (samme tvangsfunktioner). Tidsenheden "Time" er dage.

### Validering af modellen i forhold til udtømning af den mobile P-pulje.

Modellen er testet på Bryrup Langsø og på Søholm Sø begrundet i, at disse mht. opholdstid repræsenterer yderpunkter. I figur 16 ses det, at Søholm Sø repræsenterer søer med lang opholdstid – ofte over 1000 dage i hovedparten af vækstsæsonen, mens Bryrup Langsø er meget hurtigere gennemskyllet resulterende i opholdstider varierende mellem 11 og 200 dage.



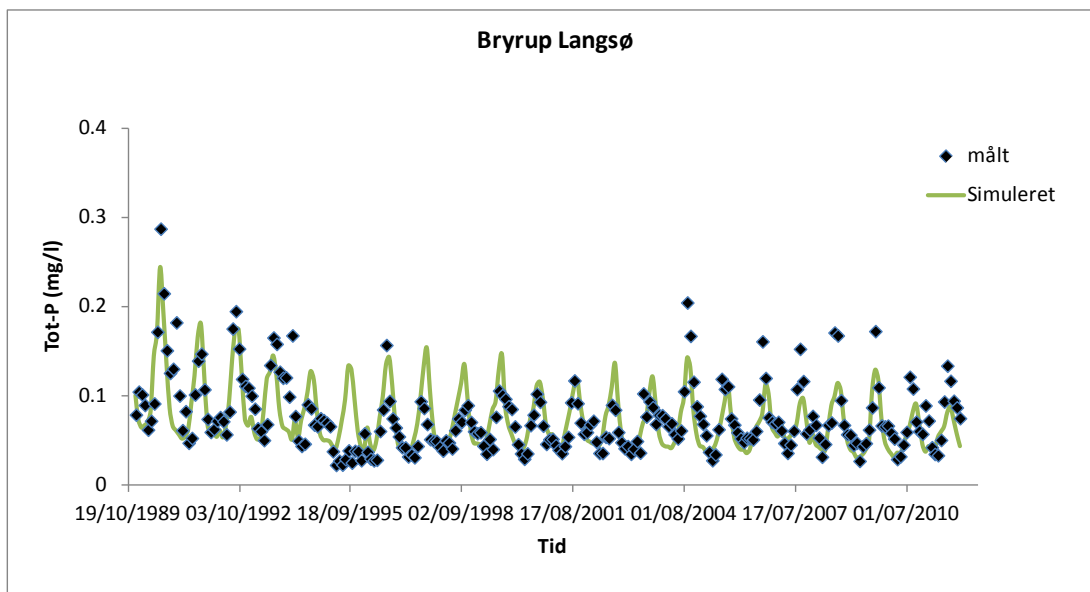
Figur 16. Viser opholdstiden for Bryrup Langsø og Søholm Sø i perioden Fra 1990 til 2011.

Ingen af disse søer repræsenterede søer med højt Fe/P forhold i sedimentet, hvorved denne empiri ikke er testet. For begge søer gælder det, at sedimentpuljerne er målt i 1990 og i 1995, hvilket benyttes til at teste modellens evne til at simulere indsvingningstiden. I perioden fra 1995 og frem til 2011 er sedimentpuljerne desværre ikke genmålt, hvilket havde givet bedre mulighed for at teste massebalance-modellen. Der har også været problemer med dataudtræk, hvor temperaturdata i sommerperioden var meget lave

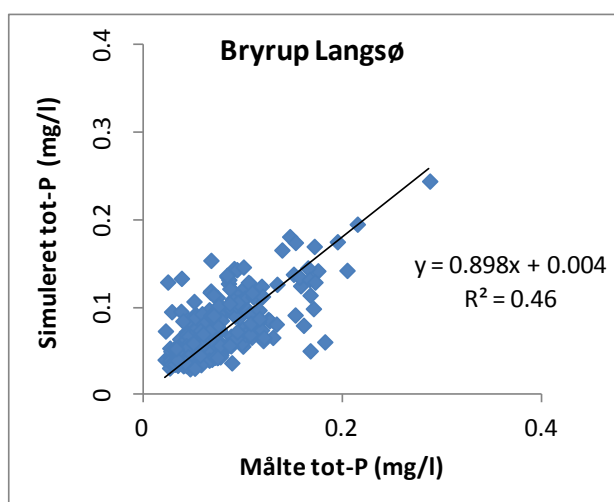
For Bryrup Langsø (Fig. 17a) ses det, at modellen magter, at simulere sæsondynamikken i søen. Nogle år rammer simuleringerne sommer-toppen fint, mens modellen andre år enten under- eller oversimulerer. Modellen simulerer fint vinter-minima. Der er dog en svag tendens til at P\_sø underestimeres (Fig. 17b)

Der er ingen tvivl om, at modellen også presses af den svage opløselighed på input data. Det er svært, at simulere optimalt, når vandføringsdata resulterer i opholdstider på 11-20 dage og data er månedsbaserede. Normalt er kravet, at opløseligheden på data skal minimum være på niveau med raterne – her opholdstiden. Vandet kan således være udskiftet et par gange mellem to sæt inputdata.

For Bryrup Langsø simuleres ændringen i sedimentets P-pulje (afkastningen) fint (tabel 9).



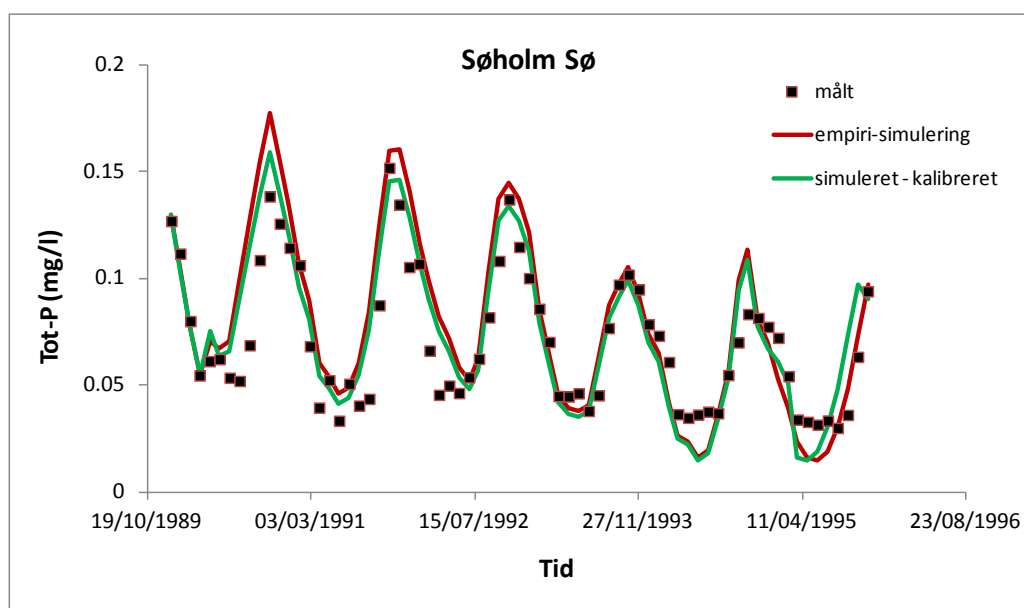
Figur 17a. Viser målte og simulerede tot-P koncentrationer i Bryrup Langsø fra 1990 til 2011.



Figur 17b. Målte versus simulerede TP koncentrationer i søvandet i Bryrup Langsø. Hædningskoefficienten afslører, at Bryrup Langsø svagt undersimuleres.

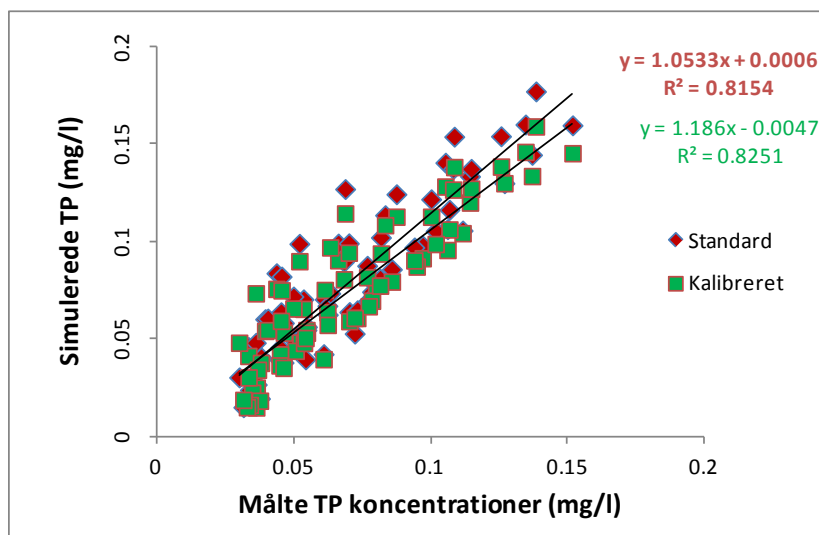
Ved vurdering af den absolutte simuleringsakkuratesse (Fig. 17b) bør man være opmærksom på, at en mindre forsinkelse i mellem målte og simulerede koncentrationer er medvirkende til, at regressionen på  $R^2=0.46$  for Bryrup Langsø er noget svag. Massebevarelsen, som fremgår af tabel 9, dokumenterer dog, at det ikke er kritisk.

For Søholm Sø er simuleringsresultatet noget bedre – her er zoomet på de første 6 år, hvorfra der er to sæt sedimentdata (Fig. 18a,b).



Figur 18a. Viser målte og simulerede tot-P koncentrationer i perioden 1990-1995. Den røde simulering viser empiri-modellen, mens den grønne er en test af, om ekstra kalibrering ville hjælpe på simuleringsakkuratessen.

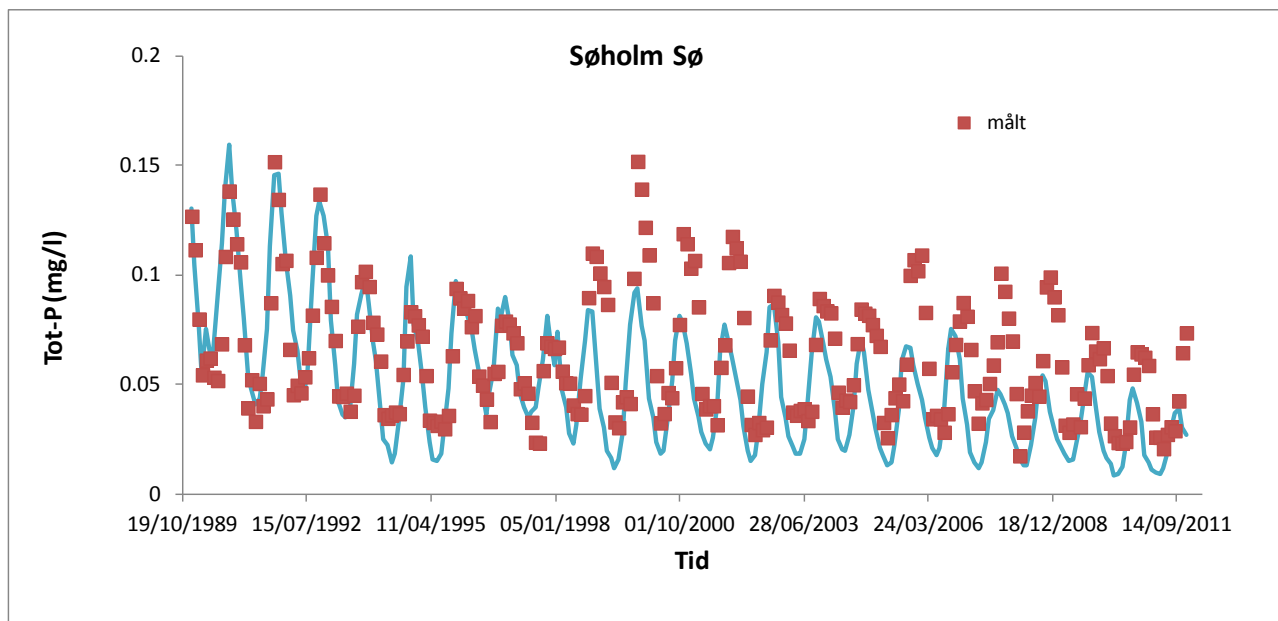
Både sommertoppene og vinterkoncentrationer simuleres rimeligt pænt på Søholm Sø, hvilket indikerer, at det er lettere at simulere mindre dynamiske søer - med lang opholdstid. Der er dog en tendens til at søvandets P-koncentration overestimeres (Fig. 18b).



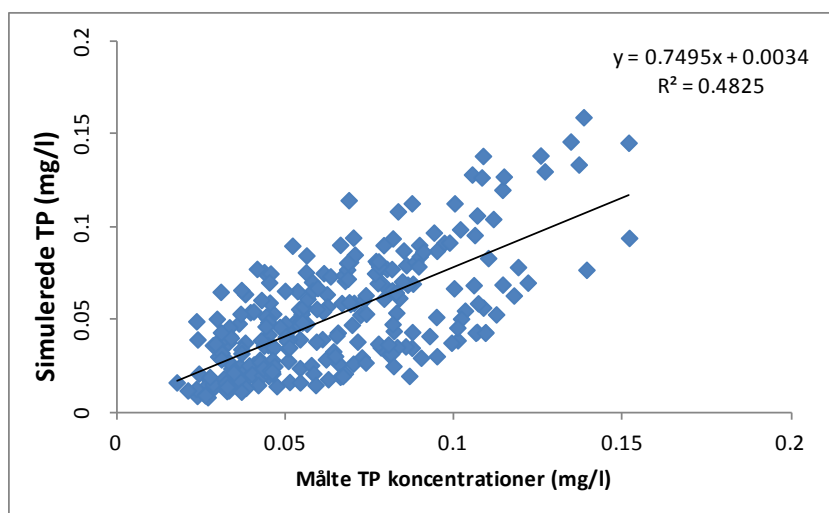
Figur 18b. Målte versus simulerede TP koncentrationer i søvandet i Søholm Sø. Hældningskoefficienten afslører, at P-koncentrationen i Søholm Sø svagt overestimeres.

For Søholm Sø overestimeres udtømningen af sedimentets P-pulje imidlertid (tabel 9), om end også måling af sedimentets P indhold er forbundet med en vis usikkerhed pga. søens topografi, som gør det meget vigtigt at ramme samme sted for de to sedimentprøvetagninger.

Hvis modellen køres for alle de 20 år, hvor Søholm Sø har været overvåget bliver usikkerheden på simulering af vandets P-koncentration større. Det ses, at søvandets P koncentration i stigende grad underestimeres (Fig. 18c,d). Dette er i overensstemmelse med at udtømningen af sedimentets P-pulje overestimeres (tabel 9).



Figur 18c. Viser målte og simulerede TP koncentrationer i perioden 1989-2010. Den blå simulering viser empiri-modellen.,



Figur 18d. Målte versus simulerede TP koncentrationer i søvandet i Søholm Sø (1989-2010). Hældningskoefficienten afslører, at P-koncentrationen i søvandet underestimeres.

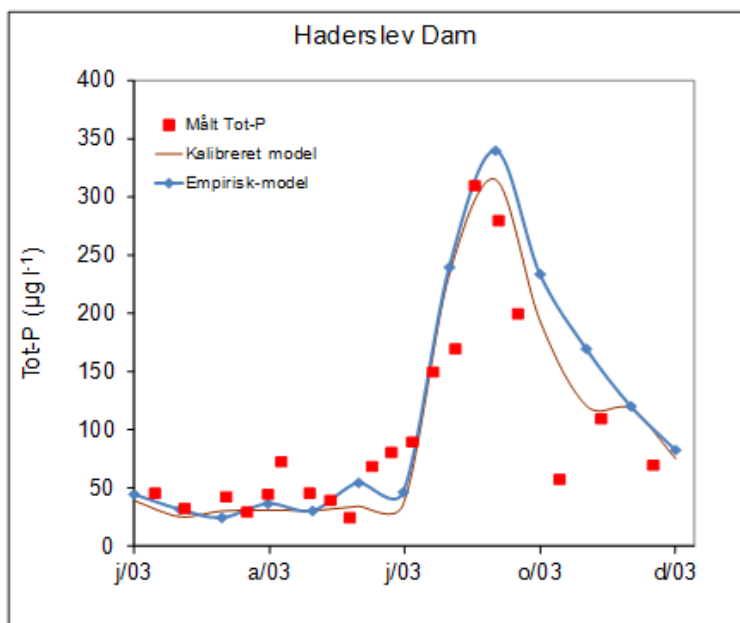
Tabel 9. Viser de målte og simulerede sedimentpuljer efter simuleringer Med empiri-modellen.

	Sø	1990	1995	Aflastning
		Tot P (g m <sup>-2</sup> )		%
Målt	Bryrup Langsø	33.9	25.7	24.3
Simuleret	Bryrup Langsø	33.9	25.9	23.8
Målt	Søholm Sø	16.2	18.3	-13.3
Simuleret	Søholm Sø	16.2	15.1	6.6

Tabel 9 viser, at massebevarelsen bedst simuleres i Bryrup Langsø, hvor modellen stort set rammer præcist den målte pulje af tot-P i 1995 efter 6 års simuleringer. Det går lidt dårligere med Søholm Sø, hvor afvigelsen er på ca. 20%.

#### Sammenligning mellem den generelle model og en individuelt kalibreret model

Da vi tidligere har arbejdet intensivt med Haderslev Dam har vi også undersøgt hvor godt den generelle empiriske model simulerer TP i forhold til en individuel kalibreret model af søen (Fig. 20).

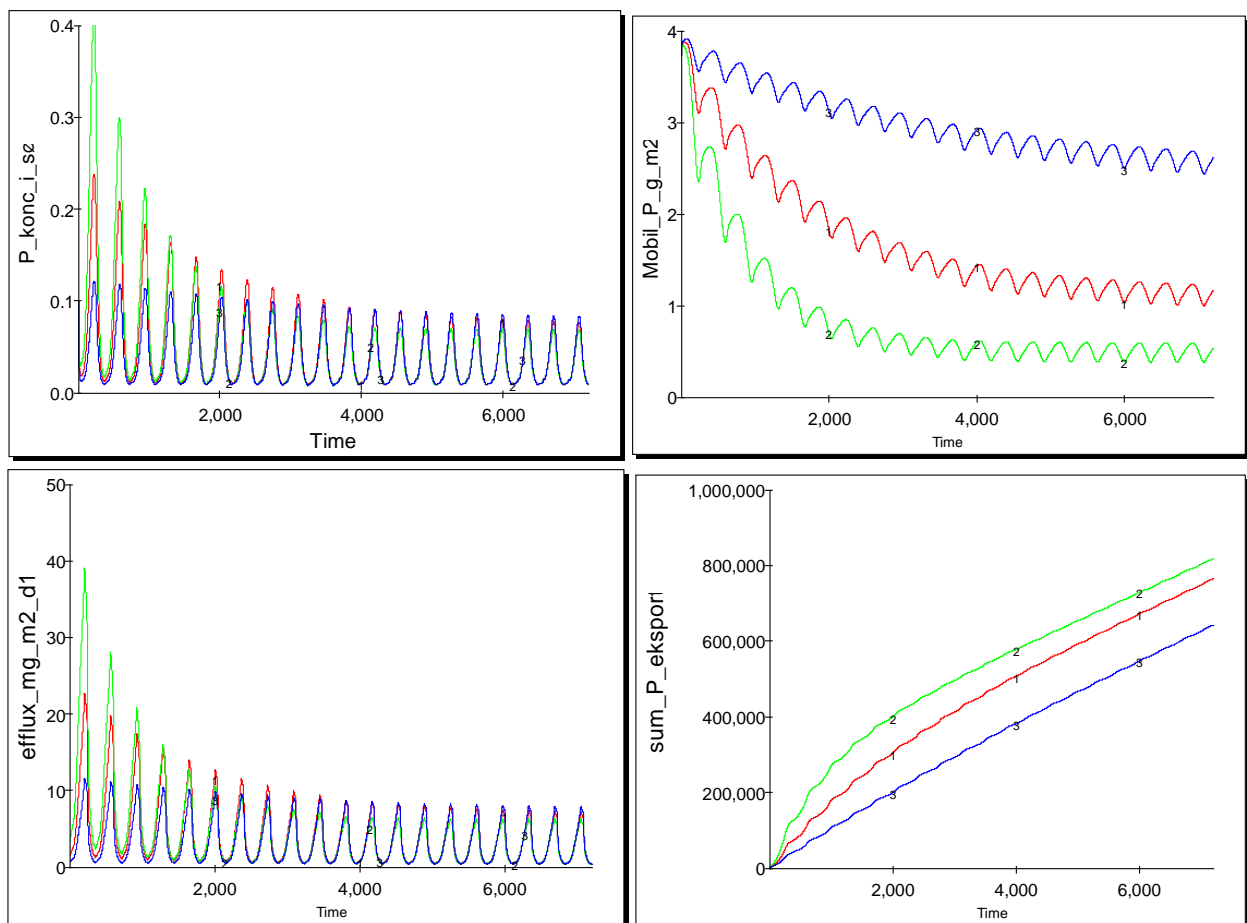


Figur.20. Viser den kalibrerede model fra Haderslev Ådals-projektet sammen med den nyudviklede empiri-baserede massebalance model.

Der er ikke store forskelle på simuleringresultaterne for de to modeller. Den generelle model oversimulerer noget mere end den individuelt kalibrerede model, hvor sedimentets P-frigivelse var målt ved tre forskellige temperaturer og på fire stationer. Sedimentationsraten var også bedre beskrevet i den individuelle model da der var data på fytoplanktonsammensætningen i søen, som muliggjorde anvendelse af forskellige synkehastigheder.

Konsekvens af forskelle mellem empirisk bestemt efflux og målte effluxe.

Da intentionen med modelværktøjet er at skabe typesøer, vurderer vi nedenstående, hvad forskellen mellem estimeret og målt efflux kan betyde for indsvingningsforløbet. Som det fremgår af tabel 8, kan der være store forskelle. Vi sammenligner i figurene 21 og 22, hvad det betyder at variere P-frigivelsesraten ved 16 °C fra en målt rate på 20 mg P m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> til hhv. 40 og 12 mg P m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.



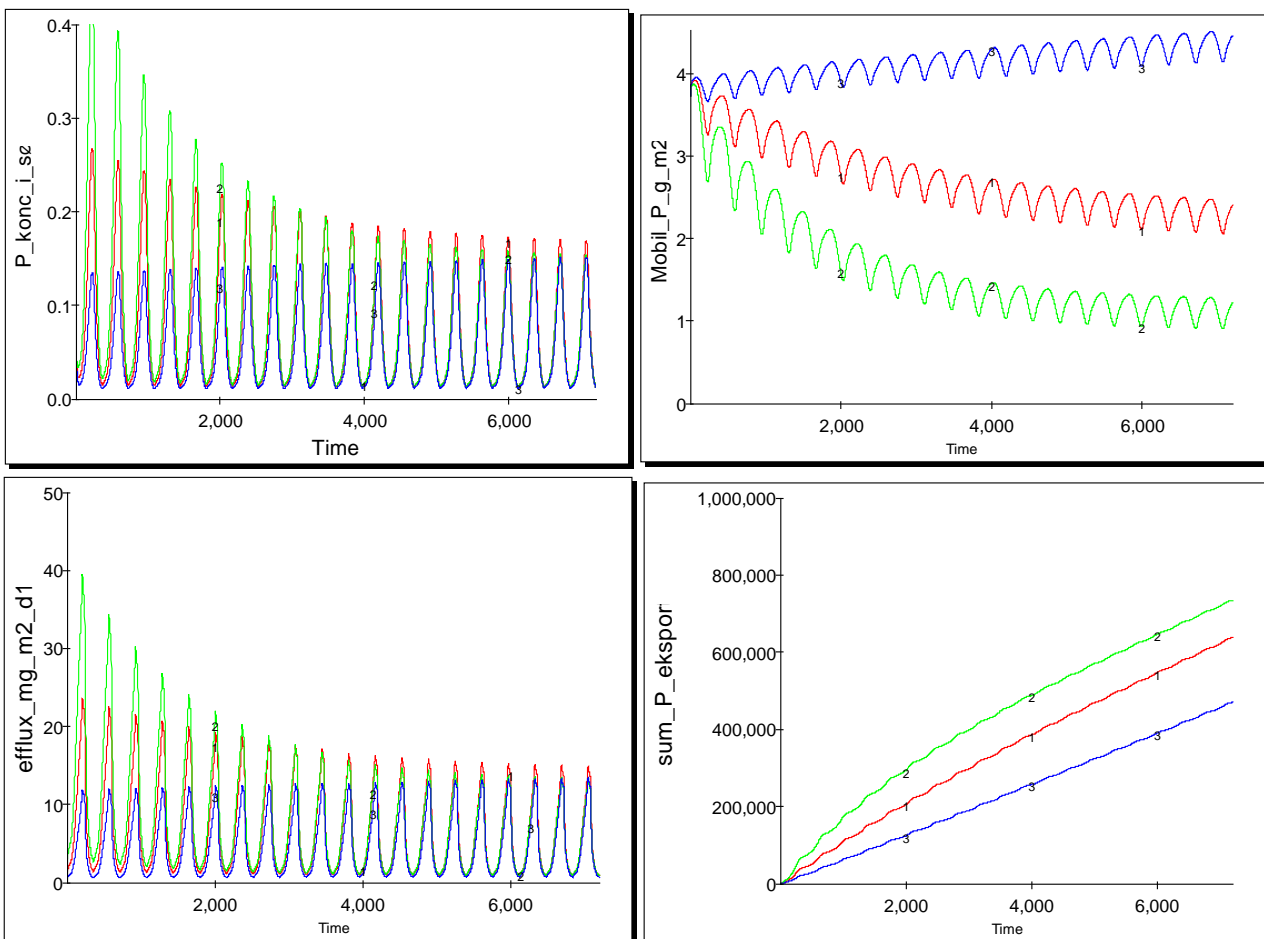
Figur 21. Simulering af konsekvenserne af, at den målte flux (1 – rød), som benyttes som initial-flux, ikke realiseres; men via empirien øges fra ca. 20 mg P m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> til 40 mg P m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (2- grøn) eller, at den sænkes til omkring 12 mg P m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (3 –blå). Tidsenheden "Time" er dage.

Udgangspunktet for simuleringerne er, at der er en middellopholdstid på 72 dage, mens opholdtiden i vækstsæsonen er 115 dage og i sensommerperioden, hvor fluxen realiseres, er på 135 dage. Som det ses, er



der i starten af simuleringen stor forskel på de realiserede søkoncentrationer, hvor den højeste efflux (grøn) resulterer i meget højere søvandskoncentrationer end ved den målte flux (rød). Dette betyder, at den mobile pulje udtømmes hurtigere end ved simuleringer, hvor den målte efflux benyttes. Tilsvarende vil en empirisk reduktion af effluxen resultere i et længere indsvingningsforløb (blå). Mens der ved de to første simuleringer sker en egentlig aflastning af søen, idet den mobile P-pulje reduceres, er der kun en lille aflastning i simuleringen med reduceret efflux. Den reducerede flux medfører imidlertid, at søen baseret på TP koncentrationen i vækstsæsonen opnår målopfyldelse ligesom ved de andre scenarier – blot uden at der sker en egentlig aflastning af den mobile P-pulje.

De samme scenarier er kørt, hvor opholdstiden er fordoblet: 144 dage som middel, 228 dage i vækstsæsonen og 275 dage, hvor fluxen realiseres. Resultaterne er vist i nedenstående figur 22.



Figur 22. Simulering af konsekvenserne af, at den målte flux (1 – rød), som benyttes som initial-flux, ikke realiseres; men via empirien øges fra ca.  $20 \text{ mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  til  $40 \text{ mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (2- grøn) eller, at den sænkes til omkring  $12 \text{ mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (3 – blå). Tidsenheden "Time" er dage.

Ingen af scenarierne skaber målopfyldelse for søen. Den reducerede flux (blå) vil derimod resultere i en fortsat øgning af den mobile pulje, som igen resulterer i højere søvandskoncentrationer via en øget mobil P-pulje. Det fremgår af eksemplet, at opholdstiden er meget styrende.

Nedenstående (tabel 10) har vi vurderet hvad forskellen mellem faktisk målt og estimeret (ud fra empirien) P-frigivelsesrate ville betyde for de 6 søer, hvor modellen tidligere har været anvendt.

Tabel 10. Afvigelsen mellem antal år til målopfyldelse bestemt ud fra en individuel sømodel, hvor målte P-frigivelsesrater anvendes sammenlignet med en P-frigivelsesrate, som er bestemt empirisk udfra sediment TP, glødetab og Fe:P forhold.

Søer	Målopfyldelse	Afvigelse empiri vs måling(år)	Afvigelse (%)
Peblinge Sø	8	-2	-25.0%
Sortedams Sø Syd	9	3	33.3%
Damhussøen	12	-5	-41.7%
Bryrup Langsø	14	3	21.4%
Stevning Dam	6	-1	-16.7%
Haderslev Dam	13	-4	-30.8%

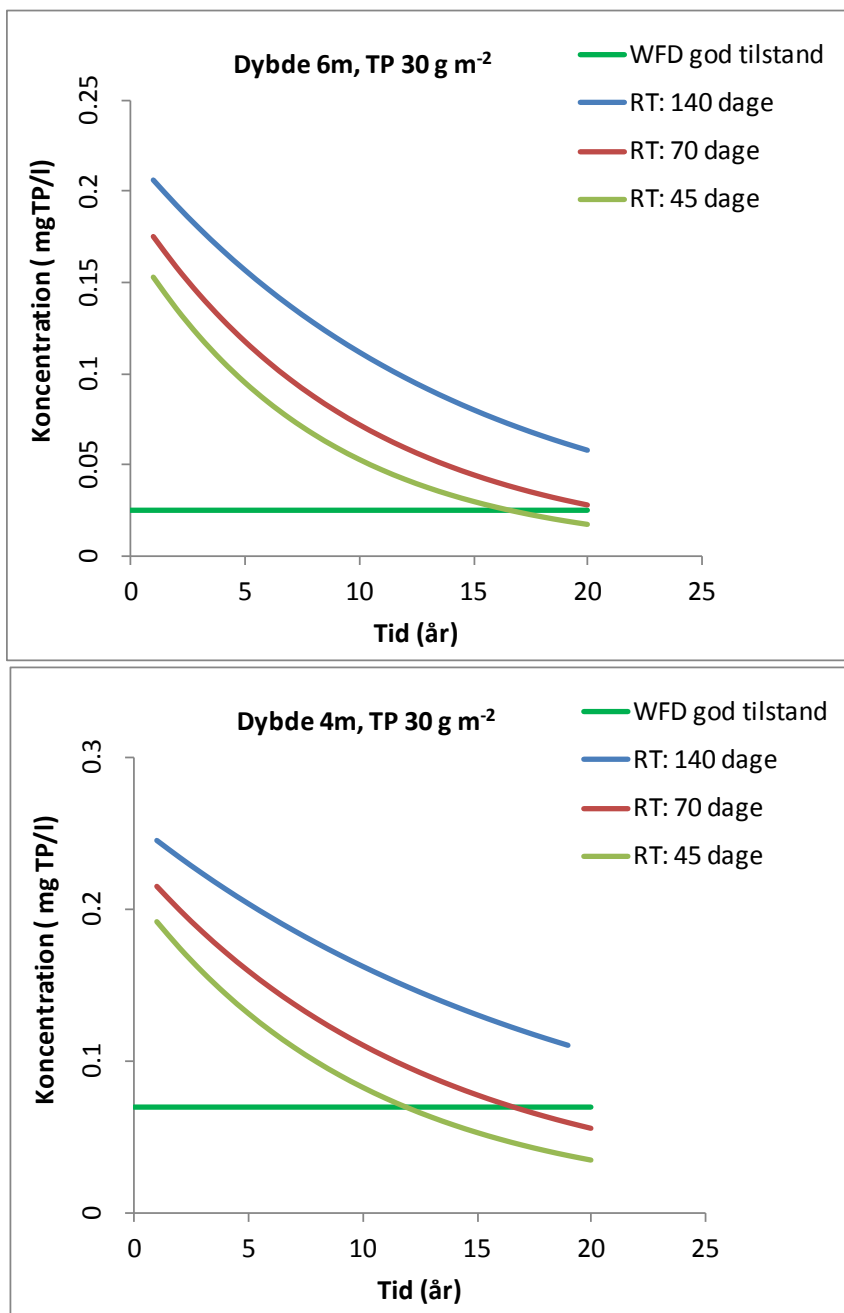
Usikkerheden ligger mellem 16-42 %, og fejlskønnet for målopfyldelse er mellem 1-5 år. Konsekvensen af dette er at man kun bør bruge modelværktøjet til at fastslå om 1) der vil ske en aflastning, 2) om den går hurtigt, 3) middel eller 4) langsomt.

#### Betydningen af vandets opholdstid

Følsomhedsanalyser viste, at vandets opholdstid er en af de mest betydende faktorer for indsvingningstiden, idet en lang årsgennemsnitlig opholdstid reelt betyder, at der ikke løber vand ud af søen i sommerperioden, hvor den interne P-belastning realiseres. Det meste P når derfor at sedimentere igen, inden søen gennemstrømmes. Dette forhold er illustreret i Fig. 23 ved tre relativt korte års-middel opholdstider (45 dage, 70 dage og 140 dage), hvor der er antaget samme arealspecifikke eksterne P-belastning på  $0,32 \text{ g P m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ . Dette betyder omvendt, at indløbskoncentrationen varierer med dybde og opholdstid fra  $6,7 \mu\text{g P L}^{-1}$  (ved 6 m middeldybde og 45 dages opholdstid) til  $32 \mu\text{g P L}^{-1}$  (ved 4 m middeldybde og 140 dages opholdstid). Sedimentets P-pulje er sat til  $30 \text{ g m}^{-2}$ , hvilket er nogenlunde midt i intervallet for de undersøgte søer.

Det antages at søen har nået målopfyldelse når den sommergennemsnitlige P koncentration i søvandet er under hhv.  $70 \mu\text{g P L}^{-1}$  (ved 4 m middeldybde) og  $25 \mu\text{g P L}^{-1}$  (ved 6 m middeldybde).

Figur 23 illustrerer, at indsvingningstiden let kan være mere end 10 år selv med en meget kort middelopholdstid på 45 dage. På baggrund af disse resultater vælges det at fastholde de 3 opholdstider i de efterfølgende simuleringer.



Figur 23. Viser indsvingnings-scenarier ved variable opholdstider for typesøer på 4 og 6 meters dybde med en TP-sediment pulje på 30 g P m<sup>-2</sup> og en arealspecifik P-belastning på 0,32 g m<sup>-2</sup> år<sup>-1</sup>.

#### Betydningen af indløbsvandets P-koncentration

Det antages, at den årgennemsnitlige indløbskoncentration er nedbragt til et niveau, som i en ligevægtstilstand (efter udtømmning af den mobile P pulje) kan give målopfyldelse. Ved anvendelse af en empirisk model af Vollenweider typen kan det beregnes, at indløbskoncentrationen skal være 95, 101 og 113 µg P L<sup>-1</sup> ved opholdstider på 45, 70 og 140 dage hhv. for at opnå en årgennemsnitlig P koncentration i

søen på  $70 \mu\text{g P L}^{-1}$ . Dette gælder for en lavvandet sø. Vi har dog valgt at anvende en indløbskoncentration på  $50 \mu\text{g P L}^{-1}$  for den lavvandede sø (og  $20 \mu\text{g P L}^{-1}$  for den dybe lagdelte sø) bl.a. for at illustrere, at selv med en meget reduceret ekstern P-belastning er det meget svært at opnå målopfyldelse, hvis der er en stor mobil P-pulje. Konsekvensen af dette valg er illustreret i tabel 11, hvor seks scenarier sammenligner søens udvikling ved forskellige indløbskoncentrationer, opholdstider og puljer af mobilt P.

Tabel 11. Udviklingen i søvandets sommergennemsnitlige P koncentration i en lavvandet sø ved forskelligt udgangspunkt mht. indløbskoncentration ( $P_i$ ), opholdstid (TW) og P-pulje i sedimentet. Tal med grøn baggrund indikerer at søen har nået målopfyldelse.

år	TW=45 TP = $10 \text{ g m}^{-2}$		TW=45 TP = $30 \text{ g m}^{-2}$		TW=70 TP = $10 \text{ g m}^{-2}$		TW=70 TP = $30 \text{ g m}^{-2}$		TW=140 TP = $10 \text{ g m}^{-2}$	
	$P_i=0.05$	$P_i=0.095$	$P_i=0.05$	$P_i=0.095$	$P_i=0.05$	$P_i=0.101$	$P_i=0.05$	$P_i=0.101$	$P_i=0.05$	$P_i=0.113$
1	0,065	0,067	0,191	0,193	0,073	0,076	0,215	0,217	0,084	0,088
2	0,060	0,062	0,174	0,176	0,069	0,072	0,199	0,202	0,081	0,086
3	0,055	0,057	0,158	0,161	0,064	0,068	0,185	0,188	0,078	0,084
4	0,050	0,053	0,144	0,147	0,060	0,064	0,171	0,175	0,075	0,082
5	0,046	0,049	0,131	0,134	0,056	0,061	0,159	0,164	0,073	0,081
6	0,042	0,046	0,120	0,123	0,053	0,058	0,148	0,153	0,070	0,079
7	0,039	0,043	0,109	0,112	0,049	0,055	0,137	0,143	0,068	0,077
8	0,036	0,040	0,099	0,103	0,046	0,052	0,128	0,133	0,065	0,076
9	0,033	0,037	0,091	0,095	0,044	0,050	0,119	0,125	0,063	0,074
10	0,031	0,035	0,083	0,087	0,041	0,047	0,110	0,117	0,061	0,073
11	0,028	0,033	0,076	0,080	0,039	0,045	0,103	0,109	0,059	0,072
12	0,026	0,031	0,069	0,074	0,037	0,043	0,096	0,103	0,057	0,071
13	0,024	0,029	0,063	0,068	0,035	0,042	0,089	0,096	0,055	0,069
14	0,023	0,027	0,058	0,063	0,033	0,040	0,083	0,091	0,053	0,068
15	0,021	0,026	0,053	0,058	0,031	0,039	0,078	0,085	0,052	0,067
16	0,020	0,025	0,049	0,054	0,029	0,037	0,072	0,080	0,050	0,066
17	0,019	0,023	0,045	0,050	0,028	0,036	0,068	0,076	0,049	0,065
18	0,017	0,022	0,041	0,046	0,027	0,035	0,063	0,071	0,047	0,065
19	0,016	0,021	0,038	0,043	0,025	0,034	0,059	0,068	0,046	0,064
20	0,015	0,021	0,035	0,040	0,024	0,033	0,055	0,064	0,045	0,063

Det fremgår af tabel 11, at indløbskoncentrationen først får betydning for indsvingningstiden når opholdstiden er lang og den mobile P-pulje lille. Med andre ord er søvandets P-koncentration om sommeren først og fremmest styret af den interne P-belastning.

## 5. Praktisk anvendelse af resultaterne

Ideelt set skal modellen opstilles for hver sø, hvor man ønsker at vurdere, om søen af sig selv kan opnå målopfyldelse inden for overskuelig tid. Dette er dog et stort arbejde og når man samtidig tager den usikkerhed i betragtning, som der er på de empirisk bestemte P-frigivelsesrater og dermed på tiden til målopfyldelse (tabel 10), finder vi det mere anvendeligt, at den enkelte sø vurderes i forhold til en række type-sø scenarier, som opstilles senere i tabel 12. Tabel 12 skal således betragtes som et opslagsværk, hvor man finder den eller de søer, som mest ligner ens "egen" sø.

### Omregning af sedimentdata til brug for sammenligning til scenarierne

For at kunne indplacere sin "egen" sø i disse scenarier, er det nødvendigt at omregne total P i sedimentet målt på tørvægtsbasis til total P på volumenbasis for at kunne beregne indholdet i de øverste 10 cm af sedimentet. Formler til disse beregninger findes i bilag 1. Hvis man formoder, at mobilt P er begravet dybere end 10 cm og at den dybe pulje bidrager til frigivelsen, skal TP beregnes til større dybde.

### Type-sø scenarier

Der opstilles 48 scenarier med 20 års simuleringer og med følgende kombination af parametre:

Den Total-P sedimentpulje ved start er: 10 g P m<sup>-2</sup>, 30 g P m<sup>-2</sup> og 50 g P m<sup>-2</sup>.

Den årgennemsnitlige indløbskoncentration af P er: 50 µg P L<sup>-1</sup> og 20 µg P L<sup>-1</sup>

Middeldybde i søen er: 2.0m, 4.0 m og 6.0m.

Årsmiddel-opholdstiden er: 45 dage, 70 dage og 140 dage

Alle modelopsætninger er kørt med Fe/P fra start på 6 og på 15.

Resultaterne af de 48 modelkørsler fremgår af tabel 12.

Tabel 12. Søvandets TP koncentration (sommergennemsnit) i 48 scenarier med variabel P-pulje (TP), Fe:TP forhold, indløbskoncentration (Pi), opholdstid og middeldybde. Målopfyldelse antages at være opnået ved TP < 70 µg P L<sup>-1</sup> for en lavvandet sø og 25 µg P L<sup>-1</sup> for en dyb lagdelt sø. Bemærk at modelsøen med 4.0 m vanddybde er kørt både som dyb (Pi=0.02) og lavvandet (Pi=0.05) sø.

Rød baggrundsfarve: ikke målopfyldelse; Grøn: Målopfyldelse

år	Dybde= 6.0 m      Fe/TP = 6      opholdstid =45 dage			Dybde= 6.0 m      Fe/TP = 6      opholdstid =70 dage			Dybde= 6.0 m      Fe/TP = 6      opholdstid =140 dage		
	TP = 50 g m <sup>-2</sup>	TP = 30 g m <sup>-2</sup>	TP = 10 g m <sup>-2</sup>	TP = 50 g m <sup>-2</sup>	TP = 30 g m <sup>-2</sup>	TP = 10 g m <sup>-2</sup>	TP = 50 g m <sup>-2</sup>	TP = 30 g m <sup>-2</sup>	TP = 10 g m <sup>-2</sup>
	Pi =0.02	Pi =0.02	Pi =0.02	Pi =0.02	Pi =0.02	Pi =0.02	Pi =0.02	Pi =0.02	Pi =0.02
1	0,255	0,153	0,053	0,292	0,175	0,059	0,342	0,206	0,070
2	0,226	0,136	0,048	0,264	0,159	0,054	0,319	0,193	0,066
3	0,200	0,121	0,043	0,239	0,144	0,049	0,298	0,180	0,062
4	0,178	0,107	0,039	0,216	0,130	0,044	0,278	0,168	0,058
5	0,158	0,095	0,035	0,195	0,118	0,040	0,260	0,157	0,054
6	0,140	0,085	0,032	0,177	0,107	0,037	0,242	0,147	0,051
7	0,124	0,075	0,029	0,160	0,097	0,033	0,226	0,137	0,048
8	0,110	0,067	0,026	0,145	0,088	0,030	0,211	0,128	0,045
9	0,098	0,059	0,024	0,131	0,079	0,028	0,197	0,120	0,042
10	0,087	0,053	0,022	0,119	0,072	0,025	0,184	0,112	0,040
11	0,077	0,047	0,020	0,108	0,065	0,023	0,172	0,105	0,037
12	0,069	0,042	0,019	0,097	0,059	0,021	0,161	0,098	0,035
13	0,061	0,037	0,017	0,088	0,054	0,019	0,150	0,092	0,033
14	0,054	0,033	0,016	0,080	0,049	0,018	0,140	0,086	0,031
15	0,048	0,030	0,015	0,073	0,044	0,016	0,131	0,080	0,029
16	0,043	0,026	0,014	0,066	0,040	0,015	0,122	0,075	0,028
17	0,038	0,024	0,013	0,060	0,037	0,014	0,114	0,070	0,026
18	0,034	0,021	0,012	0,054	0,033	0,013	0,107	0,066	0,025
19	0,030	0,019	0,011	0,049	0,030	0,012	0,100	0,062	0,023
20	0,027	0,017	0,011	0,045	0,028	0,011	0,094	0,058	0,022

år	opholdstid =45 dage					opholdstid =70 dage					opholdstid =140 dage					
	Dybde= 4.0 m		Fe/TP = 6		TP = 10 g m <sup>-2</sup> Pi=0.05	Dybde= 4.0 m		Fe/TP = 6		TP = 10 g m <sup>-2</sup> Pi=0.05	Dybde= 4.0 m		Fe/TP = 6		TP = 10 g m <sup>-2</sup> Pi=0.05	Pi=0.02
	TP = 50 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05	Pi =0.02	TP = 30 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05	Pi =0.02		TP = 50 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05	Pi =0.02	TP = 30 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05	Pi =0.02		TP = 50 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05	Pi =0.02	TP = 30 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05	Pi =0.02		
1	0,317	0,316	0,191	0,190	0,065	0,356	0,355	0,215	0,213	0,073	0,406	0,245	0,244	0,084	0,083	
2	0,288	0,287	0,174	0,173	0,060	0,330	0,328	0,199	0,197	0,069	0,387	0,234	0,232	0,081	0,079	
3	0,262	0,260	0,158	0,157	0,055	0,305	0,303	0,185	0,183	0,064	0,369	0,223	0,221	0,078	0,075	
4	0,238	0,236	0,144	0,142	0,050	0,283	0,281	0,171	0,169	0,060	0,351	0,213	0,210	0,075	0,072	
5	0,216	0,214	0,131	0,129	0,046	0,262	0,260	0,159	0,157	0,056	0,335	0,204	0,200	0,073	0,069	
6	0,197	0,195	0,120	0,117	0,042	0,243	0,240	0,148	0,145	0,053	0,319	0,195	0,190	0,070	0,066	
7	0,179	0,177	0,109	0,107	0,039	0,225	0,222	0,137	0,134	0,049	0,304	0,186	0,181	0,068	0,063	
8	0,163	0,160	0,099	0,097	0,036	0,209	0,205	0,128	0,124	0,046	0,290	0,178	0,172	0,065	0,060	
9	0,148	0,146	0,091	0,088	0,033	0,194	0,190	0,119	0,115	0,044	0,276	0,170	0,164	0,063	0,058	
10	0,135	0,132	0,083	0,080	0,031	0,180	0,176	0,110	0,107	0,041	0,264	0,162	0,156	0,061	0,055	
11	0,123	0,120	0,076	0,073	0,028	0,167	0,163	0,103	0,099	0,039	0,251	0,155	0,149	0,059	0,053	
12	0,112	0,109	0,069	0,066	0,026	0,155	0,151	0,096	0,092	0,037	0,240	0,148	0,142	0,057	0,051	
13	0,102	0,099	0,063	0,060	0,024	0,144	0,140	0,089	0,085	0,035	0,229	0,142	0,135	0,055	0,048	
14	0,093	0,090	0,058	0,055	0,023	0,134	0,129	0,083	0,079	0,033	0,218	0,136	0,129	0,053	0,046	
15	0,085	0,082	0,053	0,050	0,021	0,124	0,120	0,078	0,073	0,031	0,208	0,130	0,123	0,052	0,044	
16	0,078	0,074	0,049	0,046	0,020	0,115	0,111	0,072	0,068	0,029	0,199	0,125	0,117	0,050	0,043	
17	0,071	0,068	0,045	0,042	0,019	0,107	0,103	0,068	0,063	0,028	0,190	0,119	0,112	0,049	0,041	
18	0,065	0,062	0,041	0,038	0,017	0,100	0,095	0,063	0,058	0,027	0,182	0,115	0,106	0,047	0,039	
19	0,059	0,056	0,038	0,035	0,016	0,093	0,088	0,059	0,054	0,025	0,174	0,110	0,101	0,046	0,038	
20	0,054	0,051	0,035	0,032	0,015	0,087	0,082	0,055	0,050	0,024	0,166	0,105	0,097	0,045	0,036	

år	Dybde= 2.0 m		Fe/TP = 6		opholdstid =45 dage		Dybde= 2.0 m		Fe/TP = 6		opholdstid =70 dage		Dybde= 2.0 m		Fe/TP = 6		opholdstid =140 dage	
	TP = 50 g m <sup>-2</sup>		TP = 30 g m <sup>-2</sup>		TP = 10 g m <sup>-2</sup>		TP = 50 g m <sup>-2</sup>		TP = 30 g m <sup>-2</sup>		TP = 10 g m <sup>-2</sup>		TP = 50 g m <sup>-2</sup>		TP = 30 g m <sup>-2</sup>		TP = 10 g m <sup>-2</sup>	
	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02
1	0,414	0,413	0,250	0,248	0,085	0,084	0,448	0,446	0,270	0,268	0,092	0,090	0,488	0,294	0,292	0,101	0,099	
2	0,389	0,387	0,235	0,233	0,081	0,079	0,428	0,425	0,258	0,256	0,089	0,087	0,475	0,287	0,284	0,099	0,096	
3	0,366	0,364	0,221	0,219	0,077	0,074	0,408	0,405	0,247	0,244	0,086	0,083	0,463	0,280	0,277	0,098	0,094	
4	0,344	0,341	0,209	0,206	0,073	0,070	0,390	0,387	0,236	0,233	0,083	0,079	0,451	0,274	0,269	0,096	0,092	
5	0,324	0,321	0,196	0,193	0,069	0,066	0,372	0,369	0,226	0,222	0,080	0,076	0,439	0,267	0,262	0,095	0,090	
6	0,305	0,301	0,185	0,182	0,066	0,062	0,356	0,351	0,216	0,212	0,077	0,073	0,428	0,261	0,255	0,094	0,088	
7	0,287	0,283	0,175	0,171	0,063	0,059	0,340	0,335	0,207	0,202	0,075	0,070	0,417	0,255	0,248	0,092	0,086	
8	0,270	0,265	0,165	0,160	0,060	0,055	0,325	0,320	0,199	0,193	0,072	0,067	0,406	0,249	0,242	0,091	0,084	
9	0,254	0,249	0,155	0,151	0,057	0,052	0,310	0,305	0,190	0,184	0,070	0,064	0,396	0,243	0,235	0,090	0,082	
10	0,239	0,234	0,147	0,142	0,054	0,050	0,297	0,291	0,182	0,176	0,068	0,062	0,386	0,237	0,229	0,089	0,080	
11	0,225	0,220	0,138	0,133	0,052	0,047	0,284	0,277	0,175	0,168	0,066	0,059	0,376	0,232	0,223	0,088	0,079	
12	0,212	0,207	0,131	0,125	0,050	0,044	0,271	0,264	0,167	0,161	0,064	0,057	0,367	0,227	0,217	0,086	0,077	
13	0,200	0,194	0,124	0,118	0,047	0,042	0,259	0,252	0,161	0,153	0,062	0,054	0,358	0,222	0,211	0,085	0,075	
14	0,188	0,182	0,117	0,111	0,045	0,040	0,248	0,241	0,154	0,146	0,060	0,052	0,349	0,217	0,206	0,084	0,074	
15	0,177	0,171	0,110	0,105	0,043	0,038	0,237	0,230	0,148	0,140	0,058	0,050	0,340	0,212	0,201	0,083	0,072	
16	0,167	0,161	0,104	0,098	0,042	0,036	0,227	0,219	0,142	0,134	0,056	0,048	0,332	0,207	0,195	0,082	0,071	
17	0,158	0,152	0,099	0,093	0,040	0,034	0,218	0,209	0,136	0,128	0,055	0,046	0,324	0,202	0,190	0,081	0,069	
18	0,149	0,142	0,094	0,087	0,038	0,032	0,208	0,200	0,131	0,122	0,053	0,045	0,316	0,198	0,185	0,080	0,068	
19	0,141	0,134	0,089	0,082	0,037	0,030	0,199	0,190	0,126	0,117	0,052	0,043	0,308	0,194	0,181	0,079	0,066	
20	0,133	0,126	0,084	0,077	0,036	0,029	0,191	0,182	0,121	0,112	0,051	0,041	0,301	0,190	0,176	0,079	0,065	



år	Dybde= 6.0 m			Dybde= 6.0 m			Dybde= 6.0 m		
	Fe/TP = 15		opholdstid =45 dage	Fe/TP = 15		opholdstid =70 dage	Fe/TP = 15		opholdstid = 140 dage
	TP = 50 g m <sup>-2</sup> Pi =0.02	TP = 30 g m <sup>-2</sup> Pi =0.02	TP = 10 g m <sup>-2</sup> Pi =0.02	TP = 50 g m <sup>-2</sup> Pi =0.02	TP = 30 g m <sup>-2</sup> Pi =0.02	TP = 10 g m <sup>-2</sup> Pi =0.02	TP = 50 g m <sup>-2</sup> Pi =0.02	TP = 30 g m <sup>-2</sup> Pi =0.02	TP = 10 g m <sup>-2</sup> Pi =0.02
1	0,142	0,134	0,111	0,163	0,155	0,130	0,192	0,184	0,160
2	0,123	0,111	0,079	0,144	0,131	0,096	0,176	0,162	0,127
3	0,111	0,096	0,065	0,131	0,115	0,079	0,163	0,146	0,109
4	0,101	0,086	0,047	0,121	0,104	0,069	0,153	0,135	0,097
5	0,094	0,079	0,038	0,113	0,096	0,046	0,144	0,125	0,088
6	0,088	0,073	0,038	0,106	0,089	0,039	0,137	0,118	0,082
7	0,083	0,068	0,032	0,100	0,084	0,033	0,131	0,111	0,064
8	0,079	0,064	0,022	0,095	0,079	0,028	0,125	0,106	0,052
9	0,075	0,058	0,021	0,091	0,075	0,022	0,121	0,101	0,052
10	0,072	0,052	0,020	0,088	0,072	0,019	0,116	0,097	0,052
11	0,069	0,047	0,019	0,084	0,069	0,019	0,112	0,093	0,052
12	0,067	0,042	0,019	0,082	0,066	0,018	0,109	0,090	0,052
13	0,065	0,038	0,018	0,079	0,049	0,017	0,106	0,087	0,052
14	0,063	0,034	0,017	0,077	0,044	0,016	0,103	0,084	0,024
15	0,061	0,031	0,017	0,074	0,044	0,016	0,100	0,082	0,009
16	0,059	0,028	0,016	0,072	0,044	0,015	0,098	0,080	0,008
17	0,057	0,025	0,015	0,071	0,044	0,014	0,095	0,078	0,008
18	0,039	0,022	0,015	0,069	0,044	0,014	0,093	0,075	0,008
19	0,038	0,020	0,014	0,067	0,044	0,013	0,091	0,052	0,008
20	0,038	0,018	0,013	0,066	0,044	0,013	0,089	0,051	0,008

år	Dybde= 4.0 m      Fe/TP = 15      opholdstid =45 dage						Dybde= 4.0 m      Fe/TP = 15      opholdstid =70 dage						Dybde= 4.0 m      Fe/TP = 15      opholdstid =140 dage					
	TP = 50 g m <sup>-2</sup>		TP = 30 g m <sup>-2</sup>		TP = 10 g m <sup>-2</sup>		TP = 50 g m <sup>-2</sup>		TP = 30 g m <sup>-2</sup>		TP = 10 g m <sup>-2</sup>		TP = 50 g m <sup>-2</sup>		TP = 30 g m <sup>-2</sup>		TP = 10 g m <sup>-2</sup>	
	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02	Pi =0.05	Pi =0.02
	TP	TP	TP	TP	TP	TP	TP	TP	TP	TP	TP	TP	TP	TP	TP	TP	TP	TP
1	0,179	0,178	0,171	0,170	0,144	0,144	0,202	0,201	0,194	0,193	0,167	0,166	0,232	0,231	0,225	0,223	0,199	0,195
2	0,160	0,159	0,145	0,144	0,108	0,107	0,184	0,183	0,169	0,168	0,130	0,129	0,218	0,217	0,206	0,204	0,167	0,163
3	0,146	0,145	0,129	0,127	0,090	0,089	0,170	0,169	0,152	0,151	0,110	0,109	0,207	0,206	0,191	0,189	0,148	0,142
4	0,135	0,134	0,117	0,115	0,079	0,078	0,159	0,158	0,140	0,138	0,098	0,096	0,198	0,196	0,179	0,177	0,134	0,128
5	0,126	0,125	0,108	0,106	0,062	0,061	0,150	0,148	0,130	0,128	0,089	0,087	0,190	0,188	0,170	0,167	0,123	0,117
6	0,119	0,118	0,101	0,099	0,054	0,053	0,142	0,141	0,122	0,120	0,082	0,081	0,182	0,180	0,162	0,158	0,115	0,108
7	0,113	0,112	0,095	0,093	0,048	0,047	0,136	0,134	0,116	0,113	0,076	0,074	0,176	0,173	0,154	0,151	0,109	0,101
8	0,108	0,106	0,090	0,088	0,043	0,042	0,130	0,128	0,110	0,107	0,070	0,068	0,170	0,167	0,148	0,144	0,104	0,096
9	0,103	0,102	0,086	0,083	0,039	0,037	0,125	0,123	0,105	0,102	0,065	0,063	0,165	0,162	0,143	0,138	0,099	0,090
10	0,099	0,097	0,082	0,080	0,035	0,033	0,121	0,118	0,101	0,098	0,061	0,058	0,160	0,157	0,138	0,133	0,095	0,086
11	0,096	0,094	0,079	0,076	0,031	0,029	0,117	0,114	0,097	0,094	0,057	0,054	0,156	0,152	0,134	0,129	0,088	0,078
12	0,093	0,090	0,076	0,073	0,028	0,026	0,113	0,110	0,094	0,090	0,053	0,050	0,152	0,148	0,130	0,124	0,067	0,060
13	0,090	0,087	0,074	0,069	0,025	0,023	0,110	0,107	0,091	0,087	0,050	0,047	0,149	0,144	0,127	0,121	0,062	0,055
14	0,087	0,085	0,061	0,058	0,023	0,020	0,107	0,104	0,089	0,084	0,047	0,043	0,145	0,140	0,123	0,117	0,062	0,054
15	0,085	0,082	0,049	0,046	0,020	0,017	0,104	0,101	0,086	0,081	0,044	0,040	0,142	0,137	0,120	0,114	0,062	0,053
16	0,083	0,079	0,049	0,046	0,018	0,015	0,102	0,098	0,084	0,079	0,042	0,038	0,139	0,134	0,118	0,111	0,062	0,053
17	0,081	0,077	0,049	0,045	0,016	0,013	0,100	0,095	0,082	0,076	0,039	0,035	0,136	0,131	0,115	0,108	0,062	0,052
18	0,079	0,075	0,049	0,045	0,014	0,011	0,097	0,093	0,071	0,065	0,037	0,033	0,134	0,128	0,113	0,105	0,062	0,052
19	0,077	0,073	0,049	0,045	0,013	0,008	0,095	0,090	0,055	0,050	0,035	0,030	0,132	0,125	0,111	0,102	0,062	0,051
20	0,076	0,071	0,049	0,044	0,011	0,006	0,093	0,088	0,055	0,050	0,033	0,028	0,129	0,122	0,109	0,100	0,062	0,050

år	Dybde= 2.0 m    Fe/TP = 15    opholdstid =45 dage			Dybde= 2.0 m    Fe/TP = 15    opholdstid =70 dage			Dybde= 2.0 m    Fe/TP = 15    opholdstid =140 dage		
	TP = 50 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05	TP = 30 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05	TP = 10 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05	TP = 50 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05	TP = 30 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05	TP = 10 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05	TP = 50 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05	TP = 30 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05	TP = 10 g m <sup>-2</sup> Pi =0.05
	1	0,235	0,227	0,199	0,255	0,248	0,221	0,279	0,274
2	0,218	0,203	0,159	0,241	0,227	0,185	0,271	0,261	0,227
3	0,204	0,185	0,137	0,229	0,212	0,163	0,264	0,251	0,210
4	0,192	0,172	0,123	0,219	0,199	0,148	0,257	0,241	0,196
5	0,183	0,161	0,112	0,210	0,188	0,137	0,251	0,233	0,185
6	0,175	0,152	0,104	0,202	0,179	0,128	0,245	0,226	0,177
7	0,167	0,144	0,098	0,195	0,172	0,121	0,240	0,220	0,169
8	0,161	0,138	0,089	0,189	0,165	0,115	0,235	0,214	0,163
9	0,156	0,132	0,063	0,183	0,159	0,110	0,230	0,208	0,157
10	0,150	0,127	0,063	0,178	0,154	0,106	0,226	0,204	0,153
11	0,146	0,123	0,063	0,173	0,149	0,102	0,222	0,199	0,149
12	0,142	0,119	0,063	0,169	0,145	0,087	0,218	0,195	0,145
13	0,138	0,116	0,063	0,165	0,141	0,068	0,215	0,191	0,141
14	0,135	0,112	0,063	0,162	0,138	0,067	0,211	0,188	0,138
15	0,131	0,110	0,063	0,158	0,134	0,067	0,208	0,184	0,136
16	0,128	0,107	0,063	0,155	0,131	0,067	0,205	0,181	0,133
17	0,126	0,104	0,061	0,152	0,128	0,067	0,202	0,178	0,131
18	0,123	0,102	0,013	0,149	0,126	0,067	0,200	0,176	0,129
19	0,121	0,100	0,012	0,147	0,123	0,067	0,197	0,173	0,127
20	0,119	0,098	0,012	0,144	0,121	0,067	0,195	0,171	0,125

## 6 Referencer

Jensen, HS, P Kristensen, E Jeppesen & A Skytthe 1992. Iron:Phosphorus ratio in surface sediment as an indicator of phosphate release from aerobic sediments in shallow lakes. *Hydrobiologia* 235/236: 731-743.

Jensen, HS & FØ Andersen 1992: Importance of temperature, nitrate and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes. *Limnology and Oceanography* 37(3): 577-589.

Jensen, HS & B Thamdrup 1993: Iron-bound phosphorus in marine sediments as measured by bicarbonate-dithionite extraction. *Hydrobiologia* 253: 47-59.

Jensen, JP, AR Pedersen, E Jeppesen & M Søndergaard 2006. An empirical model describing the seasonal dynamics of phosphorus in 16 shallow eutrophic lakes after external loading reduction. *Limnol. Oceanogr.* 51: 791-800.

Jeppesen, E, B Kronvang, M Meerhoff, M Søndergaard, KM Hansen, HE Andersen, TL Lauridsen, L Løboriussen, M Beklioglu, A Özen & JE Olesen 2009. Climate change effects on runoff, catchment phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations. *J. Environ. Qual.* 38: 1930-1941.

Psenner, R, B Boström, M Dinka, K Petterson, R Pucsko & M Sager 1988. Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment. *Arch. Hydrobiol. Beih.* 30: 98-110

## Bilag.

### Omregning af data fra NST format til puljer per kvadratmeter i 0-10 cm's dybde

Formatet for sedimentdata for de danske søer er:

Tørstofindhold	% af vådvægt
Organisk stof	% glødetab af tørstof (TS)
TP	mg P kg <sup>-1</sup> TS
TFe	mg Fe g <sup>-1</sup> TS

Analyserne foreligger ofte for dybdeintervallerne 0-2 cm, 2-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm.

Omregning fra koncentrationer per g tørstof til koncentrationer per arealenhed kræver kendskab til sedimentets densitet (våd densitet = DENS) og tørstof densitet (BULK = g TS cm<sup>-3</sup>), som stort set aldrig måles. Nedenstående angives derfor en formel (1) (HS Jensen, *upubliceret*), som kan anvendes. Denne formel er baseret på en densitet på 2,6 for mineralsk materiale, 1,05 for organisk materiale og 1,0 for vand.

$$(1) DENS = \left( 1 - 0,01 * \%TS + \frac{0,01 * \%TS}{2,6 * (1 - 0,01 * \%GT) + 1,05 * 0,01 * \%GT} \right)^{-1}$$

Densitet for profundalzone i søer ligger normalt mellem 1 og 1,5; stigende med dybden i sedimentet. For meget sandede littoralsedimenter kan værdien nærme sig 2.

Tørstoffdensiteten (engelsk: bulk density) beregnes som (2):

$$(2) BULK = DENS * 0,01 * \%TS$$

Det kan anbefales at lave udregningerne af TP og TFe per arealenhed i et regneark. Forslag til opstilling af regneark er givet omstående i tabel B1.

**Tabel B1. Opstilling af regneark til beregninger af TP, Org. Stof og TFe puljer per arealenhed. Tal i parentes henviser til formlerne.**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Dyb1	Dyb2	%TS	%GT	DENS	BULK	TP	TP areal	TFe	TFe areal	Org. Stof areal
2	cm	cm			g cm <sup>-3</sup>	g TS cm <sup>-3</sup>	mg P kg <sup>-1</sup> TS	g P m <sup>-2</sup> (i laget)	mg Fe g <sup>-1</sup> TS	g Fe m <sup>-2</sup> (i laget)	g m <sup>-2</sup> (i laget)
3	0	2			(1)	(2)		(3)		(4)	(5)
4	2	5									
5	5	10									
6	10	20									
7	∑ 0-10 cm							∑H3:H5		∑J3:J5	∑K3:K5
8	∑ 0-20 cm							∑H3:H6		∑J3:J6	∑K3:K6

$$(3) \text{ TP (g m}^{-2}\text{)} = (B3 - A3) * F3 * G3 * 0,01;$$

$$("0,01" = 10^4 \text{ (cm}^{-2}\text{/m}^{-2}\text{)}) / (10^3 \text{ (g/kg)} * 10^3 \text{ (mg/g)})$$

$$(4) \text{ TP (g m}^{-2}\text{)} = (B3 - A3) * F3 * G3 * 10;$$

$$("10" = 10^4 \text{ (cm}^{-2}\text{/m}^{-2}\text{)}) / 10^3 \text{ (mg/g)}$$

$$(5) \text{ Org.Stof (g m}^{-2}\text{)} = (B3 - A3) * \frac{D3}{100} * F3 * 10.000;$$

$$("10.000" = 10^4 \text{ (cm}^{-2}\text{/m}^{-2}\text{)})$$