

---

# Fosfat i vandløb

## – betydning af oplandsfaktorer

---

Fosforbelastningen til søer og fjorde sker ikke kun i forbindelse med erosion og som partikelbundet fosfor. Den opløste fraktion udgør i mange vandløb den største del. Hvad er sammenhængen til f.eks. fosforoverskuddet i oplandet, til jordbundsforhold m.v.? En forståelse af disse sammenhænge vil både kunne anvendes i relation til at beregne fosforbelastning fra umålte oplande og desuden være en indgang til at beskrive risikofaktorer for fosfortab til vandmiljøet.

---

LISBETH WIGGERS  
HOLGER NEHMDAHL

---

### Fosfor og vandmiljøet

Fosfortilførslen har stor betydning for miljøet i danske søer og fjorde. I dag er den diffuse fosfortilførsel ofte den største kilde. Tidligere har fosfor fra spildevand og dambrug haft en større betydning, men en effektiv indsats har begrænset disse kilder.

Resultater fra overvågningsvandløb viser, at afstrømningen og koncentrationen af fosfor er lavere i naturvandløb end i vandløb i landbrugsområder /1/. Den større fosforafstrømning i vandløbene i landbrugsområder kan stamme fra forskellige kilder til fosfortilførslen. Fosfor kan ledes til vandløb med jordpartikler, der eroderes fra overfladen eller som finpartikulært materiale via makroporer og dræn, fosfor kan stamme fra erosion i vandløbsbunden og brinkerne. Fosfor kan også føres til vandløb på opløst form som fosfat eller organiske fosforforbindelser, som siver fra rodzonen via dræn eller øvre grundvand til vandløbene. Endelig kan der være et højt indhold af fosfat i dybt reduceret grundvand, som når frem til vandløbene.

Andelen af opløst fosfat i den samlede vandløbstransport varierer. For vandløb i sandede oplande udgør fosfat typisk mellem halvdelen og tre fjerdedel af den samlede transport. I vandløb i lerjordsoplande findes typisk mellem en tredjedel og halvdelen som opløst fosfat. Også den absolutte mængde af fosfat varie-

rer mellem vandløbene. I vandløbene i sandjordsoplande måles typisk vandføringsvægtede koncentrationer mellem 40 og 80  $\mu\text{g P/l}$ , mens koncentrationsniveauet typisk er mellem 20 og 60  $\mu\text{g P/l}$  i vandløb i lerjordsoplande. Dette peger i retning af, at kilderne til vandløbenes diffuse fosforafstrømning og transportvejene ikke er fordelt på samme vis. I de mere lerede oplande spiller erosion og nedvaskning af finpartikulært materiale via dræn sandsynligvis en større rolle, og de større vandføringsvariationer i disse vandløb vil også kunne være årsag til en større erosion fra brinker og bund. Den højere koncentration af fosfat i de sandede oplande kan derimod indikere, at udvaskning fra jorden spiller en større rolle.

I denne undersøgelse er der set på sammenhænge mellem indholdet af fosfat i vandløbene og oplandsbeskrivende faktorer. Den partikulære fosfortransport er ikke analyseret nærmere primært fordi den er væsentligt mere usikkert opgjort. Den partikulære fosfortransport sker ofte i forbindelse med kortvarige hændelser, og en analyse af den partikulære fosforafstrømning vil derfor kunne foretages med større sikkerhed på baggrund af kontinuerlig prøvetagning i vandløb – som det er gjort i /2/.

### Anvendelse af resultaterne

Såfremt der kan findes sammenhænge mellem fosfatindholdet i vandløbene og f.eks. landbrugsparametre, jordbundsparametre, vandløbsnærhed m.v., vil de kunne danne baggrund for en beskrivelse af fosfatbelast-

ningen fra oplande, hvor der ikke direkte måles stoftransport i vandløbene, de såkaldte umålte oplande. Der vil sandsynligvis kunne opnås en bedre beskrivelse af den diffuse fosforafstrømning ved en særskilt beskrivelse for fosfat og for partikulært fosfor, da transportveje og –processer er forskellige.

Sammenhænge mellem fosfatindholdet og oplandsparametre vil sammen med en faglig vurdering også kunne give en indikation af årsagssammenhænge – og hermed et bud på risikofaktorer og –områder til brug i forbindelse med indsats rettet mod at begrænse den diffuse fosforbelastning.

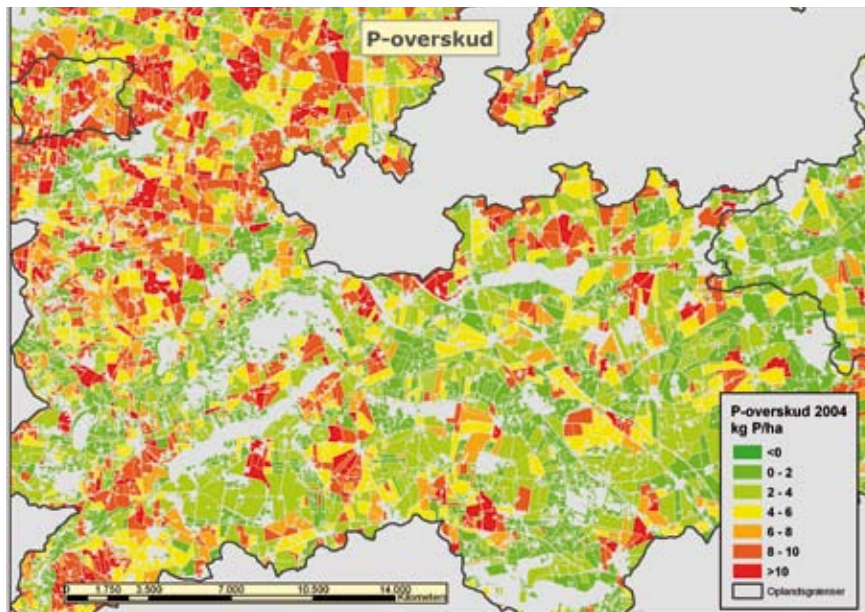
Uanset formål og anvendelse bør sammenhænge dog testes på et uafhængigt datagrundlag, f.eks. oplande, der indgår i den nationale overvågning.

### Beskrivelse af projektet.

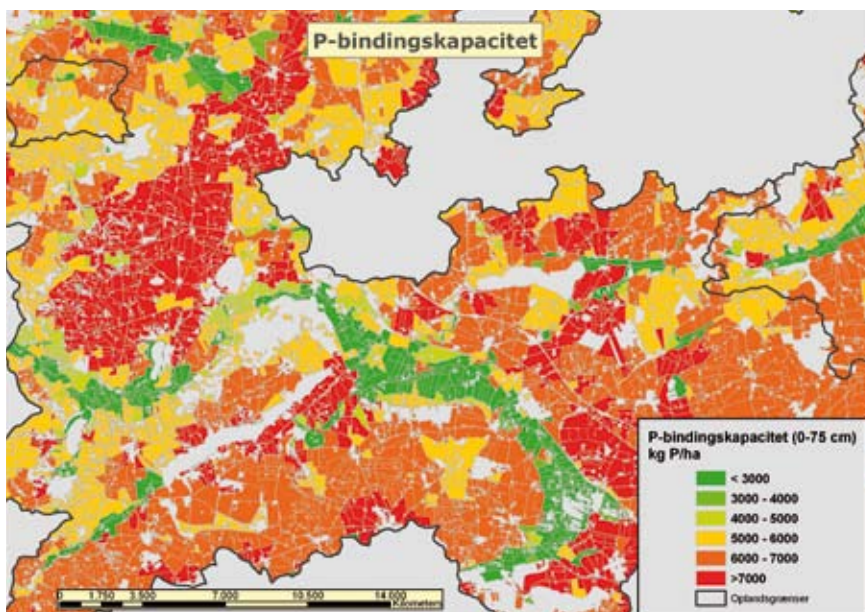
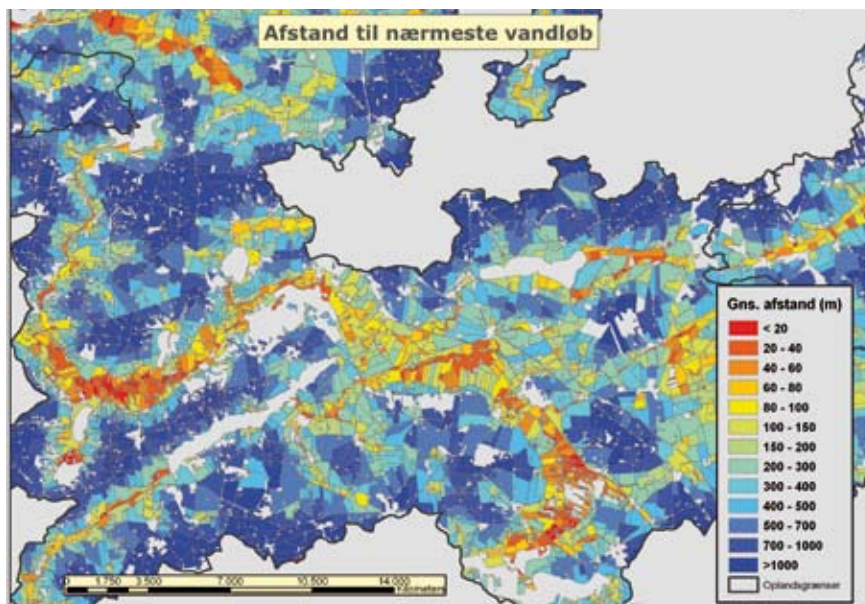
Transporten af total fosfor og af fosfat måles i mange vandløb som led i vandmiljøovervågningen. I denne undersøgelse indgår målinger fra 45 vandløb og oplande, som ligger i Århus Amt, Nordjyllands Amt, Viborg Amt og Ringkøbing Amt. Vandløbene er udvalgt ud fra, at de ikke har noget væsentligt punktkildebidrag. Desuden har det været et krav, at der ikke indgår søer i oplandene, da der både vil kunne ske en fosfortilbageholdelse og –frigivelse fra en sø. Endelig er vandløb med et jernindhold over ca. 1,0 mg Fe/l fravalgt. Jern vil fælde fosfat i vandløbene, og fosfatindholdet i jernpåvirkede vandløb vil derfor være påvirket af jernindholdet.

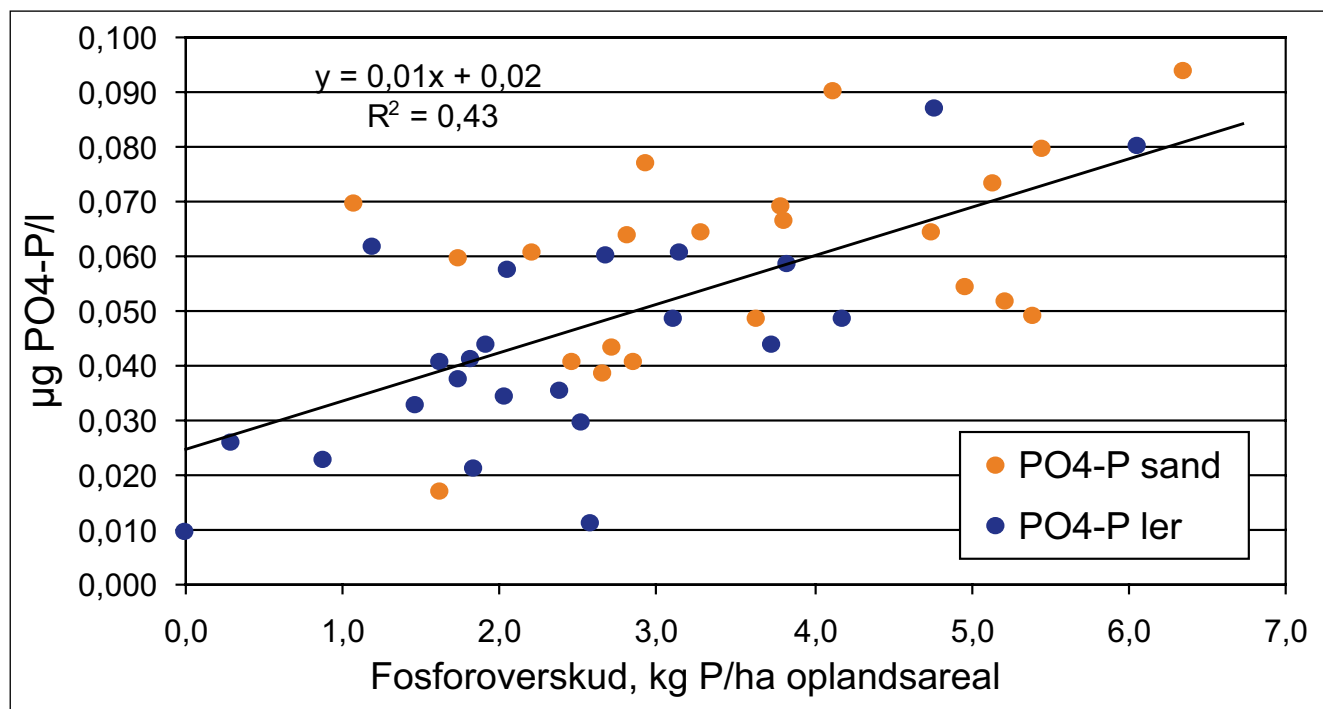
For hvert vandløb er beregnet den vandføringsvægtede koncentration af fosfat ud fra den samlede målte transport af fosfat i årene 2001-2004 divideret med den samlede målte vandmængde i denne periode.

Indholdet af fosfat i vandløbene kan tænkes at være påvirket af mange forskellige forhold som f.eks. dyrkningsgrad, fosforoverskud i landbruget, jordbundsforhold, dræningsgrad, jordens evne til at binde fosfor, lavbundsjord i oplandet, husdyrtæthed, landbrugsarelets nærhed til vandløb m.v. For oplandene til de 45 vandløb er disse forhold beskrevet gennem GIS analyser. Datagrundlaget indgår i den GIS baserede database, CTtools /3/ - se faktaboks,



**Figur 1.** Kortudsnit, der viser eksempler på de faktorer, som er opgjort for oplandene. Øverst fosforoverskud beregnet for blokkene, i midten gennemsnitsafstand for de enkelte blokke til vandløb, nederst jordens fosforbindingskapacitet.





**Figur 2.** Vandføringsvægtet koncentration af fosfat i vandløb (gennemsnit 2001-2004) vist som funktion af fosforoverskud pr. oplandsareal (gennemsnit 2001-2004).

som indeholder landbrugsregisterdata fra GLR, CHR og gødningsregnskaberne for de enkelte bedrifter for årene 2000-2004. I CT-tools er desuden integreret en rodzonedatabase, hvor jordens tekstur, humus, fosforbindingskapacitet m.v. er beskrevet. Eksempler er vist i figur 1.

## Resultater

Vandløbenes indhold af fosfat er sammenholdt med de ovennævnte parametre i simple og i multiple stepwise regressionsanalyser. Forud for regressionsanalyserne er lavet korrelationsanalyser mellem de enkelte parametre for at sikre, at der ikke indgår tæt korrelerede parametre i de multiple regressioner.

Den enkeltparameter, der for alle oplande giver klart den bedste korrelation til fosfatindholdet, er det samlede fosforoverskud i oplandet divideret med oplandsarealet. Der er fundet en positiv signifikant sammenhæng,  $r^2 = 0,43$  mellem fosforoverskud i oplandet og fosfatindholdet i vandløbet – se tabel 1 og figur 2. Herefter indgår vandløbsnærhed med signifikant betydning, og der opnås en korrelationskoefficient på  $r^2 = 0,50$ . Selvom der også ses en sammenhæng til f.eks. husdyrtryk, dyrkningsgrad og sandjordsandel, er disse faktorer for tæt korrelerede til fosforoverskud til, at de bør inddrages i den multiple regression.

Opsplittes datamaterialet i sandjordsoplande (jb.nr. 4 og mere sandet jord dominerer) og lerjordsoplande (jb.nr. 5 og mere leret jord dominerer) finder man, at sandjordsoplandene gennemgående har et højere fosforoverskud, og at koncentrationen af fosfat i vandløbene er højere, medianværdier i vandløbene på sand og ler er hhv.  $64 \mu\text{g P/l}$  og  $41 \mu\text{g P/l}$ .

Transportvejene i lerjords- og sandjordsoplande er forskellige. I lerjord vil en større del af markerne være drænedede, og der kan desuden være makroporer i jorden. I sandjord vil afstrømningen primært ske som sivning gennem jordmatrix, hvor der kan være en større eller mindre fosformætning og hermed ledig fosforbindingskapacitet.

I et forsøg på at analysere betydningen af den mere direkte kontakt mellem mark og vandløb i lerjordsoplande, er der lavet multiple regressionsanalyser for lerjordsoplandene ( $n=28$ ) alene. For denne delmængde opnås en samlet signifikant forklaringsgrad på  $r^2 = 0,65$ . Fosforoverskud indgår med størst vægt, herefter vandløbsnærhed og fosforbindingskapacitet – se tabel 1.

For sandjordsoplandene er billedet isoleret set mindre klart – dels er der færre observationer, og de målte koncentrationer i vandløbene ligger inden for et mindre interval end i lerjordsoplandene. Dette gør det vanskeligere at afdække betydende faktorer. At man ikke in-

den for sandjordsoplandene alene ser sammenhæng til fosforoverskud kan skyldes, at faktorer som f.eks. fosformætningsgrad og afstand også spiller en rolle. Den overordnede sammenhæng med de højeste målte koncentrationer i sandjordsvandløbene og de største fosforoverskud inden for denne del af oplandene peger dog på, at overskud har en afgørende betydning.

En kildefaktor, som ikke indgår direkte i analysen, er det bidrag af fosfat, der eventuelt kunne komme fra reduceret grundvand. Reduceret grundvand vil ikke indeholde nitrat. Såfremt reduceret grundvand med højt fosfatindhold udgør en større del af afstrømningen, vil man derfor forvente lavt nitratindhold i vandløb med højt fosfatindhold. Nitrat- og fosfatindhold er imidlertid signifikant positivt korrelerede for de vandløb, der indgår. Fosfor tilført med reduceret grundvand ser således ikke umiddelbart ud til at spille nogen væsentlig rolle.

## Kilde- og transportfaktorer

Ovenstående undersøgelse peger på nogle af de faktorer, der direkte eller indirekte kan spille ind på fosfatindholdet i vandløb. Fosfatkoncentrationerne i vandløb er et resultat af et samspil af faktorer, som – i lighed med, hvad man gør i relation til P-index – kan opdeles i "kildefaktorer": hvor meget fosfor er der til rådighed i f.eks. i rodzonen – og "transportfaktorer": kan fosfor nå frem til

**Tabel 1.** Resultaterne af de multiple stepwise regressionsanalyser. Vandløbsnærhed er beregnet som beskrevet i faktaboks.

Alle oplande; n = 45

Akkumulerede r-værdier for signifikante parametre

Afskæring: 0.017

	r	r <sup>2</sup>	beta	signif. beta
P overskud, kg P/ha oplandsareal	0.66	0.43	0.62	0.000001
Vandløbsnærhed	0.70	0.50	0.29	0.024

Leroplade; n = 28

Akkumulerede r-værdier for signifikante parametre

Afskæring: 0.042

	r	r <sup>2</sup>	beta	signif. beta
P overskud, kg P/ha oplandsareal	0.75	0.57	0.88	0.000004
Vandløbsnærhed	0.80	0.63	0.27	0.034
Fosforbindingskapacitet	0.81	0.65	-0.67	0.047

vandløbet? Markens indhold af fosfor, f.eks. beskrevet i form af fosfortal, har vi ikke oplysninger om, og denne faktor indgår derfor ikke i undersøgelsen. En faktor, som kunne tænkes at være en form for "substitut-faktor", er fosforoverskuddet. Fosforoverskuddet vil blandt andet hænge sammen med husdyrtætheden. Som vist i /4/ er den sammenhæng mellem dyretryk og fosfortal. De arealer eller oplande, der i dag har det største fosforoverskud, vil sandsynligvis også være dem, der har haft det tidligere – og hermed være oplande, hvor det må forventes, at fosfortallet ligger i den høje ende. På landsplan findes de største husdyrtætheder og fosforoverskud i Nord- og Vestjylland, se figur 3, og det er også her, man gennemsnitligt har de højeste fosfortal /5/. Når fosforoverskuddet indgår som væsentligste forklarende parameter i beskrivelsen af vandløbenes fosfatindhold, kan det være udtryk for, at tidligere tiders overskud har medvirket til at bygge jordens fosforindhold op til et niveau, hvor det giver sig udslag i forhøjede koncentrationer i vandløbene. Der kan dog også i nogle tilfælde være en mere direkte forbindelse mellem tilførsel og udvaskning. F.eks. er det i /6/ fundet, at der i forbindelse med stor nedbør kunne registreres høje koncentrationer af fosfor i drænvand fra jord, hvor der igennem en periode havde været hyppig udbringning af gylle og omplojning af græsmarker.

En anden kildefaktor kunne være tilførslen af husdyrgødning. Denne faktor er imidlertid stærkt korreleret til fosforoverskuddet, og i praksis vil der kun være et overskud, hvor der udsprede husdyrgødning eller slam.

Jordens fosforbindingsevne indvirker på

"kildestyken". En jord med en stor bindingsevne vil kunne binde mere fosfor end en jord med lille bindingsevne, såfremt det afstrømmende vand passerer gennem jorden og ikke gennem makroporer.

Transportfaktorerne, der beskriver, om eller hvor let fosfor kan nå frem til vandløbet, er f.eks. dræningsforhold (afvandingsklasser) og vandløbsnærhed – faktorer, som også har indgået i analyserne i denne undersøgelse.

### Sammenligning med andre undersøgelser

I en række overvågningsvandløb er koncentrationen og transporten af partikulært fosfor og fosfat undersøgt på baggrund af tilnærmelsesvis kontinuerte målinger af koncentration og stoftransport, der har fundet sted gennem en årrække /2/. For fosfat er det dog koncentrationsdata fra stikprøvetagning – svarende til de data, der har været anvendt i denne undersøgelse. Der indgik 24 oplande. For fosfatkoncentrationen blev der fundet en samlet forklaringsgrad ( $r^2$ ) på 0,29. Baseflowindex indgik med størst vægt (negativ relation – der indikerer mindre fosfat i mere sandede oplande). Desuden indgik eng/mose med negativ sammenhæng samt fosfor fra husdyrgødning med lille positiv sammenhæng. Resultaterne fra denne undersøgelse afviger fra vores undersøgelse blandt andet ved, at vi gennemgående har fundet de største koncentrationer i de mere sandede oplande. Forskellen kan muligvis skyldes forskelligt datagrundlag.

I en tidligere undersøgelse af fosfat i vandløb er der fundet en positiv sammenhæng mellem fosfatkoncentrationen og andelen af

sandjord (F1+F2) /7/. Denne sammenhæng genfindes i denne undersøgelse, men sammenhængen til fosforoverskuddet er bedre. Fosforoverskuddet var ikke opgjort i den tidligere undersøgelse. Forklaringen på sammenhængen med sandjord kan være, at kvægbrug er mere udbredt på sandjord, og at kvægbrug gennem tid har haft et større fosforoverskud. En medvirkende årsag til højere fosfatkoncentration i vandløb i sandjordsoplande kan være, at sandjorden har en lavere fosforbindingsevne.

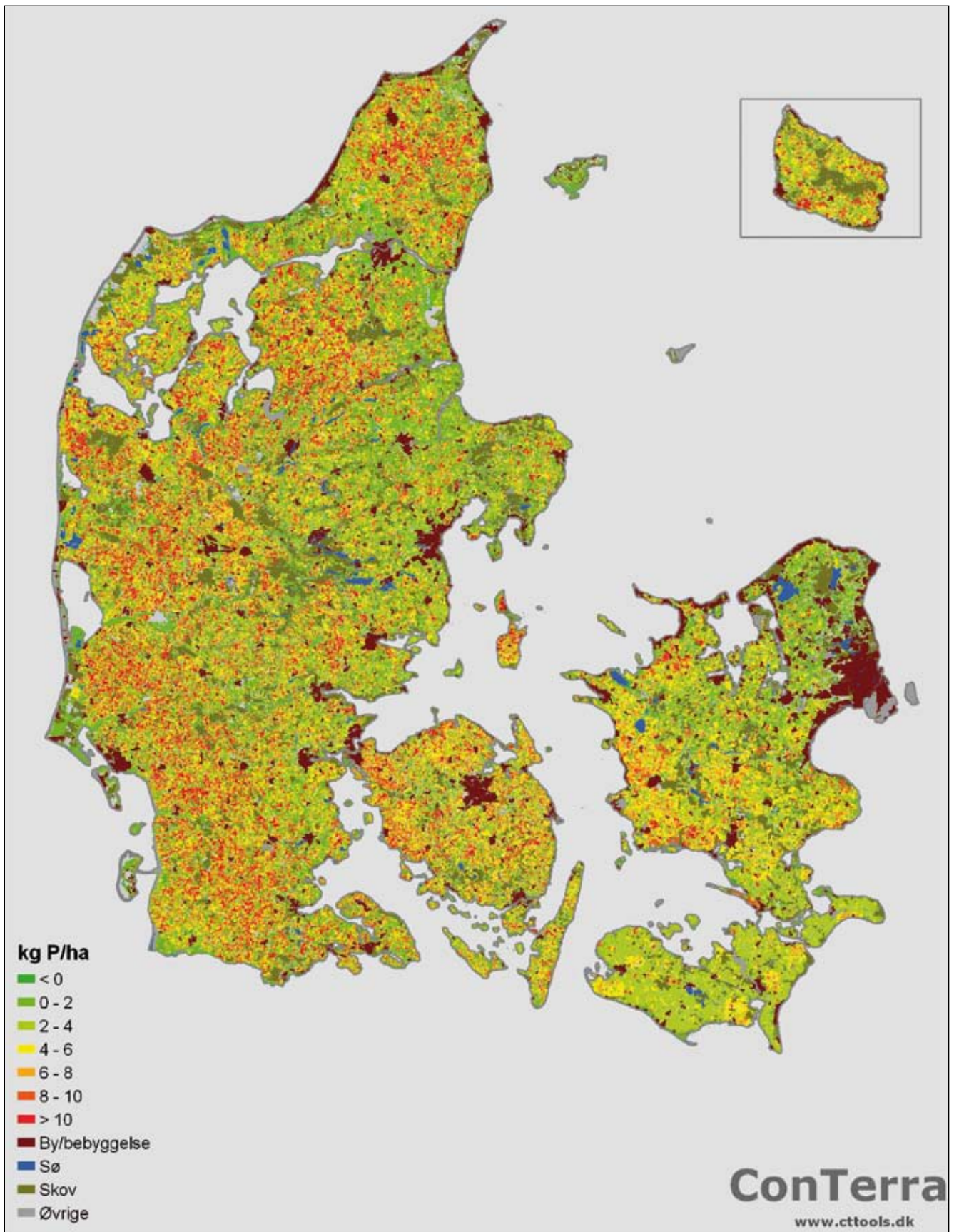
Undersøgelser af indholdet af fosfat i drænvand har vist lave koncentrationer i de fleste dræn. I enkelte dræn er der dog målt høje koncentrationer, som kan henføres til marker med højt fosfortal eller til store tilførsler af husdyrgødning /4/. Målingerne er primært foretaget som stikprøvetagning. Det fremgår af /6/, at der kan være meget stor variation i fosfatkoncentrationen i et dræn gennem tid, og at de høje koncentrationer forekommer kortvarigt. I vandløb, hvor målingerne i vores undersøgelse er foretaget, vil koncentrationsforløbet være mere udjævnet. Dette kan formentlig forklare, at der kun måles højere koncentrationer i vandløb, selvom de fleste drænmålinger viser lave koncentrationer. I sandjordsoplande, hvor der gennemgående måles de største koncentrationer i vandløbene, vil der kun være drænet i ringe grad, og man kender ikke "drænkonzentrationen".

### Konklusion

Indholdet af fosfat i vandløbene er fundet primært at være relateret til det fosforoverskud, der er i oplandene. Ved at inddrage afstand til vandløbet, øges forklaringsgraden lidt. Der har indgået en lang række øvrige faktorer i undersøgelsen, herunder jordbundsforhold, lavbund, fosforbindingsevne, dræningsgrad, husdyrtryk m.v. Flere af disse faktorer kan have en betydning for indholdet af fosfat, men betydningen er fundet at være underordnet i forhold til fosforoverskuddet.

Sammenhængen til fosforoverskud kan skyldes, at der på jorde med størst fosforoverskud sandsynligvis også er det største fosforindhold (fosfortal) i jorden. En fortsat netto-tilførsel af fosfor vil øge jordens fosforindhold yderligere, og risikoen for større fosfattilførsel til vandløbene vil hermed også stige.

Sammenhængen til fosforoverskud indikerer, at denne faktor bør indgå ved beregning af den diffuse afstrømning af fosfat fra umålte oplande. Ligeledes peger resultaterne på, at fosforoverskud kan være en relevant faktor at indarbejde i et kommende P-index.



**Figur 3.** Fosforoverskud på landbrugsarealet i hele landet. Der indgår registerdata for 50.000 bedrifter og 800.000 marker i beregningen.

## Faktaboks: Oplandsparametre, der har indgået i regressionsanalyserne

**Dyrkningsgrad:** andel af blokkortareal inden for oplandet

**Husdyrtæthed:** beregnet mængde P i husdyrgødning udbragt pr. ha. Beregningen bygger på oplysninger i gødningsregnskaberne for bedrifterne. Husdyrtæthed er beregnet som gennemsnit for 2001-2004. <http://www.cttools.dk/dokumentation/Metode/Ptildeling.asp>

**Fosforoverskud:** For den enkelte bedrift er fosforoverskuddet beregnet som tilført fosfor med husdyr- og handelsgødning samt slam minus fraført med høst. Høst beregnes ud fra antagelse af normhøst for den enkelte afgrøde under hensyn til jordbundsforhold i rodzonen. Fosforoverskuddet pr. ha fordeles ud fra driftsoplysninger på markblokkene - <http://www.cttools.dk/dokumentation/Metode/Ptildeling.asp>

**Tekstur:** Tekstur i A, B og C horisont er beskrevet i form af et kort over j.b. nr. for hver horisont. Grundlaget er for A og B horisonten jordtypekortet og teksturdata fra teksturpunkterne. Teksturen i C horisonten er beskrevet ud fra jordartskort og profildata fra Den Danske Profil Database. Der er desuden beregnet et samvægtet j.b.nr. for hele rodzonen. <http://www.cttools.dk/dokumentation/metoderodzone.asp>

**Dræning:** Dræningsgrad er beskrevet i form af fire afvandingsklasser (areal med potentielt dræningsbehov, 1: 75-100%, 2: 50-75%, 3: 25-50%, 4: 0-25%). Afvandingsklasserne bliver beregnet ud fra den metode, som er beskrevet i /8/ som inddrager oplysninger om jordtype (farvekode) i overjorden, ler eller sand i underjorden samt landskabselementtype. [http://www.cttools.dk/dokumentation/Metode/Rodzone\\_afvand.asp](http://www.cttools.dk/dokumentation/Metode/Rodzone_afvand.asp)

**Fosforbindingskapacitet:** Jordens kapacitet til at binde fosfor er beskrevet på baggrund af rodzonekortet. Grundlaget er en pedotransferfunktion /9/, som beskriver bindingskapaciteten på højbundsjord ud fra indholdet af jern- og aluminiumoxider i jorden. Beskrivelsen er at betragte som et første bud på foreliggende data. [http://www.cttools.dk/dokumentation/Metode/Rodzone\\_fosfor.asp](http://www.cttools.dk/dokumentation/Metode/Rodzone_fosfor.asp)

**Lavbundsjord:** Beskrivelsen af lavbundsjord bygger på DJF's lavbundsdatabase, der indeholder en kortlægning af de arealer, der i slutningen af 1800 tallet og begyndelsen af 1900 tallet var eng-, mose og andre lavbundsarealer. Ud over disse arealer er inddraget arealer, der i jordartskortlægningen er karakteriseret som tørv eller gytje. [http://www.cttools.dk/dokumentation/Metode/Rodzone\\_lavbund.asp](http://www.cttools.dk/dokumentation/Metode/Rodzone_lavbund.asp)

**Vandløbsnærhed:** Som udgangspunkt er anvendt vandløbstemaet fra AIS /10/. Der er oprettet et grid med celler med 10 m kantlængde. For hver celle er opgjort afstanden fra centrum til nærmeste vandløb, og for hver markblok er beregnet en gennemsnitsværdi for alle celler inden for blokken. For oplandet er beregnet sum(blokareal/blokstand)/antal blokke.

### Referencer

- 1/ Bøgestrand, J. (red.) 2005: Vandløb 2004, NOVANA. Danmarks Miljøundersøgelser, 82 s. Faglig rapport fra DMU nr. 554. <http://faglige-rapporter.dmu.dk>
- 2/ Nielsen, K. (red.) 2004: Odense Fjord. Scenarier for reduktion af næringsstoffer. Danmarks Miljøundersøgelser, 286 s. Faglig rapport fra DMU nr. 485. <http://faglige-rapporter.dmu.dk>
- 3/ ConTerra: CTtools – en landbrugs- og rodzonedatabase. <http://www.cttools.dk>
- 4/ Grant, R., Blicher-Mathiesen, G., Jensen, P.G., Rasmussen, P. 2005: Landovervågningsoplande 2004. NOVANA. Danmarks Miljøundersøgelser, 140 s. Faglig rapport fra DMU nr. 552. <http://faglige-rapporter.dmu.dk>

- 5/ Nielsen, K. (red) 2006: Begrænsning af fosfortab fra husdyrbrug. Metoder til fremtidige miljøgodkendelser. 42 s. Faglig rapport fra DMU nr. 566. <http://faglige-rapporter.dmu.dk>
- 6/ Simmelsgård, S.E. 1996: Plantenæringsstoffer i drænvand og jordvand. Statens Planteavlsvforsøg, 77 s. SP rapport nr. 7.
- 7/ Wiggers, L. 2004: Leaching of Phosphorus from Danish sandy Soils? Poster fra konference: Tools for Assessing Phosphorus Loss from Nordic Agriculture, DJF, Foulum.
- 8/ Madsen, H.B., Nørr, A., Holst, K.A.A. 1992: The Danish Soil Classification. Atlas over Denmark 1,3. pp 56.
- 9/ Borggaard, O.K., Rasmussen, L.H., Gimsing, A.L., Szilas, C. 2005: Pedotransfer function for estimation

of phosphate adsorption capacity on a wide range of soils. In: Soil Abiotic and Biotic Interactions and Impact on the Ecosystem and Human Welfare, Science Publ., Enfield (NH), pp. 177-194

- 10/ AIS, Areal Informations Systemet. [http://www.dmu.dk/Udgivelser/Kort\\_og\\_Geodata/AIS/Interaktive\\_kort/](http://www.dmu.dk/Udgivelser/Kort_og_Geodata/AIS/Interaktive_kort/)

LISBETH WIGGERS, biolog. Ansat i Århus Amt. Arbejder med næringsstofbelastning til vandmiljøet. [lwn@ag.aaa.dk](mailto:lwn@ag.aaa.dk)

HOLGER NEHMDAHL, agronom. ConTerra Aps. Udvikler af databasen CTtools til håndtering af landbrugsregisterdata i GIS miljø.