



REDEGØRELSE FOR UDVIKLING I LANDBRUGETS FOSFORFORBRUG, TAB OG PÅVIRKNING AF VANDMILJØET

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 77

2016



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

[Tom side]

REDEGØRELSE FOR UDVIKLING I LANDBRUGETS FOSFORFORBRUG, TAB OG PÅVIRKNING AF VANDMILJØET

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 77

2016

Hans Estrup Andersen¹
Annette Baatrup-Pedersen¹
Gitte Blicher-Mathiesen¹
Jesper Philip Christensen¹
Goswin Heckrath²
Poul Nordemann Jensen (red)³
Finn Pilgaard Vinther²
Jonas Rolighed¹
Gitte Rubæk²
Martin Søndergaard¹

¹Aarhus Universitet, Institut for Bioscience

²Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi

³Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

- Serietitel og nummer: Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 77
- Titel: Redegørelse for udvikling i landbrugets fosforforbrug, tab og påvirkning af Vandmiljøet
- Forfattere: Hans Estrup Andersen¹, Annette Baatrup-Pedersen¹, Gitte Blicher-Mathiesen¹, Jesper Philip Christensen¹; Goswin Heckrath², Poul Nordemann Jensen (red.)³, Finn Pilgaard Vinther², Jonas Rolighed¹, Gitte Rubæk² & Martin Søndergaard¹
- Institution: Aarhus Universitet, ¹Institut for Bioscience, ²Institut for Agroøkologi & ³DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi
- Udgiver: Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL: <http://dce.au.dk>
- Udgivelsesår: Marts 2016
Redaktion afsluttet: Marts 2016
- Faglig kommentering: Dennis Trolle, Institut for Bioscience
Kvalitetssikring, DCE: Susanne Boutrup
- Finansiel støtte: Miljøstyrelsen
- Bedes citeret: Andersen, H.E., Baatrup-Pedersen, A., Blicher-Mathiesen, G., Christensen, J.P., Heckrath, G., Nordemann Jensen, P. (red.), Vinther, F.P., Rolighed, J., Rubæk, G. & Søndergaard, M. 2016. Redegørelse for udvikling i landbrugets fosforforbrug, tab og påvirkning af Vandmiljøet. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 86 s. - Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 77
<http://dce2.au.dk/pub/TR77.pdf>
- Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
- Sammenfatning: Rapporten samler eksisterende viden om fosfor i landbrugsmæssigt regi indeholdende forbrug m.m. (aktuelt og historisk) af fosfor i landbruget, mulige risici og tabsveje for fosfor samt fosfors betydning for tilstanden i vandløb, søer og marine områder.
- Emneord: fosfor, fosfortab, fosforanvendelse, fosfors indvirkning på vandløb, søer og havet
- Layout: Grafisk Værksted, AU Silkeborg
Foto forside: Gitte Rubæk
- ISBN: 978-87-7156-199-9
ISSN (elektronisk): 2244-999X
- Sideantal: 86
- Internetversion: Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som
<http://dce2.au.dk/pub/TR77.pdf>

Indhold

Indledning	5
Sammenfatning	6
1 Regulering af landbrugets forbrug af fosfor. Fosforbalancer	10
1.1 Landbrugets forbrug af fosfor i handelsgødning og husdyrgødning	10
1.2 Udvikling i mark og erhvervs-balance for fosfor	11
1.3 Historisk udvikling i erhvervsfosforbalancen	12
1.4 Udviklingen i P-overskud i perioden 1990-2013 i hhv. Mark- og Erhvervsbalancen	13
2 Fordeling af fosforgødning mellem marker (registerdata)	15
2.1 Bedriftsafhængige forskelle i tildeling af N og P	15
2.2 Regionale forskelle i tildeling af N og P-markoverskuddet	15
2.3 Opgørelse af arealer med lav, middel og høj fosfortildeling	18
2.4 Øget fosfortilførsel ved ændring af harmonikrav fra 1,4 til 1,7 DE	18
3 Fosforindholdet og mætningsgraden	21
3.1 Indledning	21
3.2 Plantetilgængeligt fosfor	21
3.3 Det danske fosfortal	22
3.4 Kortlægning af fosforbindingskapacitet	25
3.5 Hvordan har fosforindholdet i landbrugsjord ændret sig over tid?	27
3.6 Hvordan hænger Total P, Olsen P og mætningsgrad sammen?	33
3.7 Hvad er en kritisk mætningsgrad?	35
3.8 Kan sammenhænge mellem P balancen og udvikling i Total P eller Olsen P beskrives kvantitativt?	37
3.9 Videnudvikling vedrørende fosfortilførsel, udvikling af jordens fosforindhold og betydning for fosforbinding og frigivelse	37
4 Tab af fosfor fra dyrkningsjorden	39
4.1 Baggrundskoncentration af fosfor i vandløb	39
4.2 Udvaskning af fosfor	39
4.3 Modelberegning af fosfortab	46
4.4 Kvantificering af fosfor tabt fra landbrugsarealer til vandmiljøet (dyrkningsbidraget) via kendte tabsprocesser	47

5	Fosfors påvirkning af vandmiljøet	51
5.1	Udvikling og status for P-udledning generelt – samt kildefordeling og udvikling i kilder	51
5.2	Fosfors påvirkning af vandmiljøet i søer	53
5.3	Fosfor i vandmiljøet – Marint	62
5.4	Fosfors påvirkning af vandmiljøet i vandløb	66
6	Referencer	70
	Bilag 1	80
	Bilag 2: Data vedr. fosfortab via drænvand	82
	Bilag 3. Validering PLEASE-modellen	85

Indledning

Miljøstyrelsen har bedt Aarhus Universitet v/DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi udarbejde en redegørelse om landbrugets anvendelse af fosforgødning, om jordens fosfor indhold, binding og mætningsgrad, og hvad disse elementer betyder for fosfor udledning og påvirkning af vandmiljøet. Bestillingsbeskrivelsen kan ses i Bilag 1. Redegørelsen er udarbejdet af medarbejdere fra hhv. Institut for Bioscience og Institut for Agroøkologi.

Sammenfatning

Der er i det efterfølgende givet en fyldig sammenfatning af de tekniske afsnit i rapporten.

Udvikling i fosforforbrug, og -tab til overfladevand

Fosfor i jorden

Fosfor tilført jorden bindes normalt hårdt, og der vil til enhver tid kun være en meget lille mængde uorganisk fosfor opløst i jordvæsken, hvorfra den er tilgængelig for planteoptag eller udvaskning. Bindingskapaciteten for fosfor i jord er begrænset, dog varierer den ganske betydeligt for forskellige jordtyper og med dybden. Tilføres der fosfor til jorden, vil størstedelen bindes i jorden, og koncentrationen i jordvandet vil kun stige ganske ubetydeligt, hvis jordens bindingskapacitet for fosfor ikke er opbrugt. Ved fortsat tilførsel beslaglægges jordens fosforbindingskapacitet imidlertid, og der vil kunne ske mærkbare stigninger i fosforkoncentrationen i jordvæsken.

Bindingskapaciteten i danske højbundsjord er især bestemt af indholdet af jern- og aluminiumoxider, som især findes i lerfraktionen, og desuden af pH, redoxforhold og jorddybde. Bindingskapaciteten er jordtypeafhængig, således er bindingskapaciteten i JB1-jorde (sand) hhv. 60 % og 70 % af bindingskapaciteten i JB4- og JB6-jorde (lerjorde).

Fosformætningsgraden er et udtryk for, hvor stor en del af jordens totale fosforbindingskapacitet, der allerede er besat. På højbundsjord bestemmes mætningsgraden som forholdet mellem oxalatekstraheret fosfor, jern og aluminium. En fosformætningsgrad på højbundsjord på over 25 % anses i Holland for kritisk, idet den giver anledning til en jordvæskekoncentration på 0,1 – 0,15 mg total P l⁻¹. Til sammenligning er gennemsnitskoncentrationen i vandløb, der afvander landbrugsområder i Danmark ca. 0,1 mg total P/l (Jens Bøgestrand, pers.kom.)

Opgørelser fra KVADRATNETTET viser, at landbrugsjordene i Danmark i gennemsnit indeholder ca. 4,8 t totalfosfor pr. ha, mens løvskovsjorde, som må antages at have været udenfor landbrugsmæssig drift, indeholder ca. 2,5 t totalfosfor pr. ha indtil 75 cm dybde. Fosformætningsgraden i pløjelaget i de undersøgte landbrugsjord var i gennemsnit 32 % (data fra 1997/1998). Kvadratnets-undersøgelsen viser en markant stigning i jordens totale indhold af fosfor i løbet af en tiårsperiode fra 1986 til 1997/98. Der er ikke siden lavet en lignende undersøgelse. Denne stigning fandt vel at mærke i lige så høj grad sted under pløjelaget (14,3 kg fosfor/ha årligt i 25 - 50 cm dybde) som i selve pløjelaget (11,5 kg fosfor/ha årligt i 0 - 25 cm dybde). Den store stigning i underjordens indhold af totalfosfor er et klart tegn på, at overjorden i mange tilfælde ikke længere tilbageholder fosfor i samme grad som tidligere.

Potentialet for tab af fosfor

Ekstraktion af jordprøver med vand kan give en indikation af, hvor meget fosfor jorden kan frigive til jordvandet, som er direkte relevant i forbindelse med fosforudvaskning. Adskillige studier viser en sammenhæng mellem jordens indhold af fosfor karakteriseret ved fosformætningsgrad og tabspotentialet for fosfor. Bestemmelse af fosformætningsgrad er ingen standard-analyse. Derimod udføres der hvert år mange tusinde fosfortalsanalyser på jordprøver fra pløjelaget i danske marker. Fosfortallet er en indikator for

mængden af plantetilgængeligt fosfor. Danske undersøgelser har vist, at der også er en tydelig sammenhæng mellem vandopløseligt fosfor - og dermed tabspotential for fosfor - og fosfortallet.

Når jordvand beriget med opløst fosfor nedsiver fra pløjelaget til dybere jordlag, er der mulighed for at fosfor ved kontakt med overflader på jordpartikler bliver genbundet. En kritisk høj fosformætningsgrad eller fosforstatus i pløjelaget betyder derfor ikke i sig selv, at der tilføres fosfor til vandmiljøet. Imidlertid er det sikkert, at en øgning i nettotilførslen af fosfor vil øge fosformætningsgraden og alt andet lige dermed øge potentialet for tab af fosfor. Fosfor kan udover tab på opløst form ved udvaskning eller overfladisk afstrømning også tabes som partikulært bundet fosfor ved jorderosion, overfladisk afstrømning og via makroporer til dræn. Når fosforindholdet i jorden øges, øges også potentialet for tab af partikulært bundet fosfor via disse transportveje. Det er ikke muligt direkte at slutte fra en øgning i fosforoverskuddet til en øget tabsrisiko, da dette i meget høj grad vil bestemmes af lokale forhold, dyrkningshistorie og jordens fysiske-kemiske egenskaber på den enkelte mark. Her er der behov for modelberegninger, der inddrager de individuelle forhold.

Målinger af fosfortab

Danske målinger af fosfortab opdelt på transportveje er få. Udvasning via dræn er generelt lav, men 10 - 20 % af de undersøgte dræn kan betegnes som risikodræn. Udvasning af fosfor fra rodzonen er lav på hovedparten af de få undersøgte marker, men ca. 25 % af markerne har enten konstant høj udvasning eller enkelte år med høj udvasning. Fosforkoncentrationen i det øvre grundvand er generelt lav og uafhængig af jordtype, men koncentrationen varierer dynamisk, og der forekommer ekstremt høje fosforkoncentrationer, specielt under de få undersøgte lerjordsoplande. Vi er med det nuværende vidensniveau ikke i stand til at udpege og kortlægge risikodræn og områder med forhøjet udvasning fra rodzonen og tab til grundvand.

Det første forsøg på at kvantificere bidrag til diffust fosfortab til overfladevand ad forskellige transportveje (Kronvang og Rubæk, 2005) indikerede, behæftet med stor usikkerhed, at brinkerosion bidrager med mere end halvdelen af fosfortabet, erosion bidrager med mindre end 5 %, dræn på hhv. højbund og lavbund med hver 10 - 15 %, mens bidraget fra øvre grundvand udgør op mod 10 %.

Landbrugets forbrug af fosfor

Bortset fra under de to verdenskrige har der været konstant overskud i landbrugserhvervets fosforbalance. Det højeste niveau blev nået i 1979 med ca. 28 kg P ha⁻¹. Siden har overskuddet været faldende til det nuværende niveau på ca. 5 kg P ha⁻¹ svarende til niveauet i begyndelsen af forrige århundrede. Summeret for det 20. århundrede er der netto-tilført ca. 1,4 tons P ha⁻¹ landbrugsjord (ekskl. brak). I perioden 1990-2013 er forbruget af fosforhandelsgødning faldet fra 40.400 tons P/år til 11.300 tons P/år. I samme periode er fosfortilførsel med husdyrgødning reduceret med 13.300 tons P/år svarende til en reduktion på 25 %. Siden indførsel af afgiften på foderfosfater er fosfortilførslen med husdyrgødningen faldet med ca. 11 %. De resterende ca. 14 % hænger primært sammen med forbedrede fodringsstrategier og øget udnyttelse af fosfor i foderet.

Forbruget af fosfor varierer mellem bedrifter og især mellem bedriftstyper. Tildeling af husdyrgødning reguleres gennem harmonikrav bestemt ud fra husdyrgødningens indhold af kvælstof. Tildelingen af fosfor afhænger således

af forholdet mellem kvælstof og fosfor i husdyrgødningen. Husdyrgødning fra pelsdyr, fjerkræ samt svin har relativt meget fosfor i forhold til kvælstof, og det er da også på disse bedriftstyper, at markoverskuddet af fosfor er størst, hhv. gennemsnitligt 10 kg P ha⁻¹ for pelsdyr- og fjerkræbedrifter, 5 kg P ha⁻¹ for svinebedrifter mod 3 kg P ha⁻¹ for kvægbedrifter og 1 kg P ha⁻¹ for planteavlbrug (data for 2013). Langt størstedelen af det danske landbrugsareal (ca. 79 %) har en samlet fosfortildeling på 30 kg P ha⁻¹ eller mindre. Kun en marginal del (ca. 1 %) tildeles mængder på 50 kg P ha⁻¹ eller mere. Gennemsnitligt fraføres ca. 20 kg P/ha ved høst (Blicher-Mathiesen et al., 2015).

Betydning af en ændring af harmonikravet fra 1,4 til 1,7 DE ha⁻¹

En ændring af harmonikravet fra 1,4 til 1,7 DE ha⁻¹ vil berøre svine-, fjerkræ- og pelsdyrbedrifter. For kvæg-, får-, gede- og hjortebedrifter er harmonikravet allerede 1,7 DE ha⁻¹. På data fra landovervågningsoplandene er det beregnet, at en øget tildeling af husdyrgødning på 0,3 DE ha⁻¹ vil betyde en øgning af fosfortilførslen på hhv. 7-13 kg P ha⁻¹ for svinebedrifter, 8-11 kg P ha⁻¹ for minkbedrifter og 8-23 kg P ha⁻¹ for fjerkræbedrifter. Den eksakte øgning bestemmes af husdyrgødningens N:P-forhold, som afhænger af husdyrart og staldtype. Når svine-, fjerkræ- og pelsdyrbedrifter må anvende en større del af den producerede gødning på egen bedrift, må det forventes, at der bliver en mindre eksport af husdyrgødning til planteavlbrug. Tilsvarende må forbruget af fosforhandelsgødning på planteavlbrug forventes at stige. Forudsættes en uændret husdyrproduktion, vil en ændring af harmonikravet fra 1,4 DE ha⁻¹ til 1,7 DE ha⁻¹ således føre til, at husdyrgødning fra den eksisterende husdyrproduktion udspredes på et mindre areal end det nuværende, og at bedrifter med en nuværende import af husdyrgødning fra svin, mink eller fjerkræ vil i et vist, men sandsynligvis ikke fuldt omfang kompensere for den reducerede tildeling af fosfor gennem husdyrgødning ved tildeling af fosforholdig handelsgødning. Gennemsnitligt betragtet har alle de berørte bedriftstyper allerede et markoverskud af fosfor hvorfor den ekstra fosfortilførsel som følge af en ændring af harmonikravet vil øge markoverskuddet i forholdet 1:1.

Ved en stigende overskudstilførsel af fosfor vil fosformætningsgraden øges, og dermed øges risikoen for, at der udvaskes fosfor alt afhængigt af fosformætningsgraden i udgangssituationen på den enkelte mark. Det er derfor ikke muligt direkte at oversætte øgningen i fosforoverskud som følge af en lempelse af harmonikravet til en øgning i fosforudvaskningen uden at kende forholdene på den enkelte mark. Imidlertid er det sikkert, at en øgning i nettotilførslen af fosfor alt andet lige vil øge potentialet for tab af både opløst fosfor ved udvaskning og overfladisk afstrømning og partikulært bundet fosfor med jorderosion og overfladisk afstrømning, samt strømning gennem makroporer. En generel regulering der hindrer stor ophobning af fosfor på landbrugsarealet kan derfor bidrage til at sikre, at fosfortabene ikke øges på længere sigt. Større effekt og egentlige reduktioner i fosfortabet vil kunne opnås, såfremt man udpeger risikoarealer og sætter ind med målrettede virkemidler der. Et sådant operationelt værktøj til at udpege risikoarealer er pt. ikke udviklet for samtlige tabsveje for fosfor.

Fosfors indvirkning på overfladevandsområder

Fosfor er som for planter i landbrugsproduktionen et meget væsentligt næringsstof som, hvis det er i underskud, kan have betydning for vækstbetingelserne for vandplanter i bred forstand (både planteplankton (encellede alger) og blomsterplanter). Fosfors betydning i forhold til det andet vigtige

næringsstof, kvælstof, skifter ikke alene mellem vandtyperne (vandløb søer og havet), men også hen over året.

Der er dog det til fælles for alle typer af overfladevand, at mængden af fosfor (koncentrationen) på et eller andet tidspunkt eller under bestemte betingelser er begrænsende for plantevæksten, herunder især væksten af planteplankton. Det er i de situationer, at en øget tilførsel af fosfor kan have negative miljøkonsekvenser – og omvendt at en reduktion i fosfortilførslen kan have en positiv effekt på tilstanden.

Vandløb

Fosfor vil påvirke lysforholdene i vandløbet og sammensætningen af arter. Det bevirker også, at vandløbets økologiske tilstand vurderet i forhold til planterne påvirkes. Fosfor koncentrationer i vandløbsvandet, der overstiger en given grænse, udgør derfor en risiko for målpopfyldelse ift. Vandrammedirektivet.

Søer

Søvandets indhold af fosfor (og dermed tilførslen af fosfor) spiller en afgørende rolle for søernes vandkvalitet og økologiske tilstand, fordi fosfor som oftest er det begrænsende næringsstof for produktionen af planteplankton. Reduceret tilførsel af fosfor anbefales derfor oftest som den primære styrende faktor i forhold til at forbedre søers tilstand – f. eks. i form af en øget sigtdebyde.

Koncentration og tilførsel af fosfor kan også direkte relateres til de biologiske kvalitetselementer, der anvendes til at vurdere den økologiske kvalitet i søer jf. Vandrammedirektivet. Dette gælder for planteplankton og undervandsplaner samt indholdet af klorofyl a (et mål for planktonmængden). Dermed får tilførsel af fosfor og søvandets indhold også en afgørende rolle i forhold til udarbejdelsen af vandplaner og de danske søers forvaltning. Det skal bemærkes, at anvendelse af sammenhænge mellem næringsstoffer, her fosfor, og biologiske kvalitetselementer ofte har en stor variation.

Koncentrationen af fosfor er faldet i de danske søer siden 1989, men først og fremmest i den del af søerne, som er mest næringsrige og mest i starten af perioden, hvor der blev gennemført forbedret spildevandsrensning. Tilsvarende mindskes indhold af klorofyl a i de mest uklare af søerne og især i løbet af 1990'erne. Indholdet af fosfor er endnu for højt i de fleste danske søer til at de opfylder målsætningen om mindst god økologisk tilstand.

Kystnære marine områder

Fosfor har generelt stor betydning for miljøtilstanden i det marine miljø særligt i de lukkede og mest ferske fjorde. Det gælder både for produktionen af planteplankton og som følge heraf også for bundlevende flora og fauna. Effekten af tilførsel af fosfor skal dog ses i sammenhæng med udledning af andre næringsstoffer særligt kvælstof. Samlet set for de danske farvande spiller kvælstof en vigtigere regulerende rolle end fosfor, og der er også stadig et behov for reduktion i kvælstoftilførslerne. Men i visse kystnære områder og på visse tider af året er fosfor det vigtigste næringsstof. Det vurderes derfor, at kvælstof, isoleret set, har størst betydning for regulering af plantevæksten i det danske havmiljø – men at også fosfor spiller en væsentlig rolle.

1 Regulering af landbrugets forbrug af fosfor. Fosforbalancer

Landbrugets anvendelse af fosfor i husdyrgødning er i dag indirekte reguleret gennem harmonikravene.

I Miljøministeriets bekendtgørelser fastsættes der regler for, hvor stor en mængde husdyrgødning opgjort i dyreenheder pr. harmoniareal, der må udbringes på en landbrugsbedrift. For 2002/2003 og frem gælder, at på svinebrug, økologiske brug samt øvrige brug må der udbringes husdyrgødning, der svarer til gødningsproduktionen fra 1,4 DE/ha harmoniareal.

På kvægbrug må der udbringes husdyrgødning, der svarer til gødningsproduktionen fra 1,7 DE/ha harmoniareal. Dog må der i henhold til undtagelsen fra Nitratdirektivet udbringes gødning, der svarer til produktionen fra 2,3 DE/ha harmoniareal, hvis mindst 70 % af ejendommens areal dyrkes med roer, græs eller græsefterafgrøder. Der er desuden en række krav til gødningsanvendelse, afgrødefølge, ompløjning m.v. Ved at indgå i produktionsmæssig sammenhæng med et kvægbrug, er det ligeledes muligt for et ikke-kvægbrug at udbringe gødning, som svarer til produktionen fra 2,3 DE/ha harmoniareal, såfremt hovedparten af afgrøderne fra bedriftens arealer afsættes til den kvægbedrift, som man indgår i produktionsmæssig sammenhæng med og desuden overholder samme krav til gødningsanvendelse, afgrødefølge, ompløjning m.v. På brug med fjerkræ, pelsdyr eller en blanding heraf måtte der frem til 1. august 2008 udbringes husdyrgødning, der svarer til gødningsproduktionen fra 1,7 DE/ha harmoniareal. Herefter må der højst udbringes husdyrgødning fra 1,4 DE/ha.

Harmoniarealet omfatter arealer samt forpagtede arealer, hvor der dyrkes afgrøder med en kvælstofnorm eller et vejledende behov for fosfor og kalium. Kun arealer, der kan og må gødskes med husdyrgødning, kan medregnes til harmoniarealet.

Anvendelse af mineralsk fosfor i foder er siden 2005 reguleret gennem en afgift på 4 kroner pr. kg. Derudover er der ingen generelle krav til landbrugets fosforgødskning. I forbindelse med miljøgodkendelsen af husdyrbrug fastsættes desuden yderligere krav til fosforoverskuddet på visse udbringingsarealer.

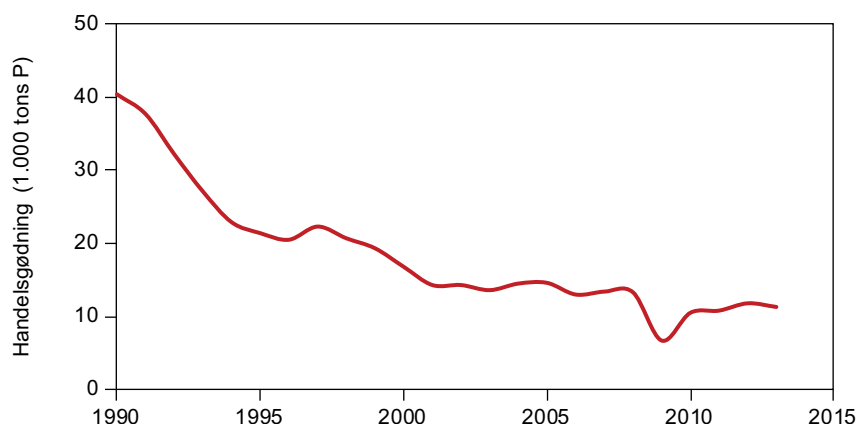
1.1 Landbrugets forbrug af fosfor i handelsgødning og husdyrgødning

Forbruget af fosforhandelsgødning er faldet fra 40.400 tons P i 1990 til 10.800, 11.800 og 11.300 tons P i henholdsvis 2011, 2012 og 2013 (Fig. 1.1), og er således reduceret med ca. 70 % i perioden 1990-2013. Fra 2010 til 2013 har forbruget af fosfor i handelsgødning været stabilt eller svagt stigende. Fosfortildeling fra handelsgødning har dog generelt været faldende siden 1990, og er f.eks. 17 % lavere i perioden 2011-13 end i perioden 2005-2007.

Fosfortilførsel med husdyrgødning er reduceret med 13.300 tons i perioden fra 1990 til 2013 svarende til en reduktion på 25 %. Siden indførsel af afgiften på foderfosfater i 2005 er fosfortilførslen med husdyrgødningen faldet med ca. 11 %. De resterende ca. 14 % hænger primært sammen med forbedrede fodringsstrategier og øget udnyttelse af P i foderet. Importen af foderfosfater

udgjorde ved årtusindskiftet ca. 18.000 tons P, hvorefter det frem til 2005-2006 faldt til 12.000-13.000 tons P, og har ligget på dette niveau indtil 2013, dog med et mindre dyk til 9.000-10.000 tons P i 2008-2009.

Figur 1.1. Forbruget af fosfor-handelsgødning i perioden 1990-2013 jf. Blicher-Mathiesen et al. (2015).



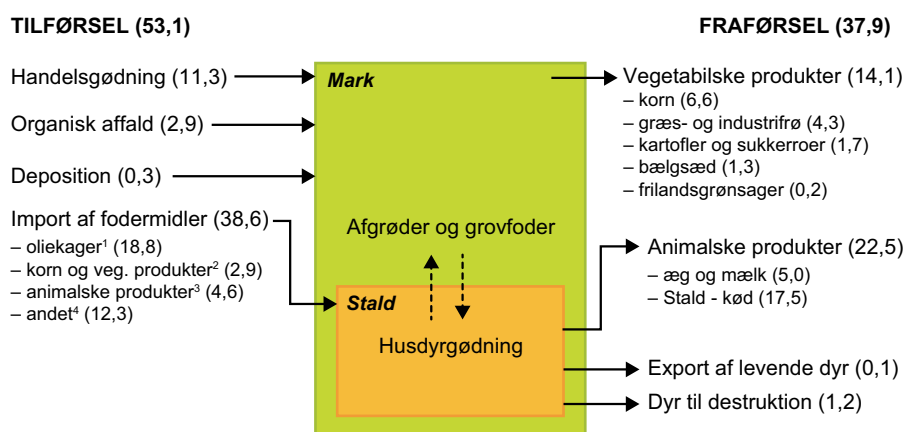
1.2 Udvikling i mark og erhvervs-balance for fosfor

Erhvervsbalancen

Erhvervsbalancerne opstilles ud fra statistiske data, hovedsageligt på grundlag af landbrugsstatistikken iflg. Danmarks Statistik, men også data fra gødningsregnskaberne, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi og Institut for Husdyrvidenskab, Aarhus Universitet indgår.

Næringsstofoverskuddet beregnes som en national bedriftsbalance, hvor forskellen mellem de til- og fraførte mængder udgør overskuddet af det pågældende næringsstof. I modsætning til en markbalance indgår den interne omsætning mellem mark og stald ikke i beregning af bedriftsbalancen (Fig. 1.2). Principperne for erhvervs- og markbalancerne er vist i Fig. 1.2 og Fig. 1.3, hvor tal i parentes angiver størrelsesorden af de enkelte poster.

Figur 1.2. Princip for opgørelse af erhvervsbalancen. Tal i parentes angiver gennemsnit af seneste tre år i 1.000 tons P.



¹ Oliekager	² Korn og veg. produkter		³ Animalske produkter		⁴ Andet
Solsikkekager	Korn	Guarmel	Fiskemel	Mælkepulver	Foderfosfat
Soyakager	Majs	Mask	Fiskeensilage	Valle	
Rapskager	Hvedeklid	Bærme	Fiskeaffald		
Andre kager	Melasse	Roeaffald og pulp			
	Tapiokamel	Fodergær			
	Citruskvas				

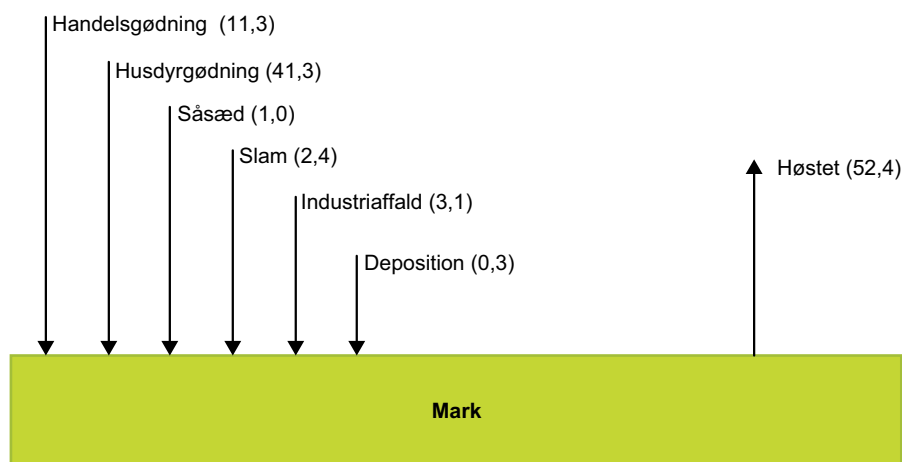
For yderligere oplysninger om beregning af erhvervsbalancen henvises til Kyllingsbæk (2005) og Vinther & Olsen (2015).

Figur 1.3. Princip for opgørelse af markbalancen. Tal i parentes angiver gennemsnit af seneste tre år i 1.000 tons P.

Markbalancen

TILFØRSEL (59,4)

FRAFØRSEL (52,4)



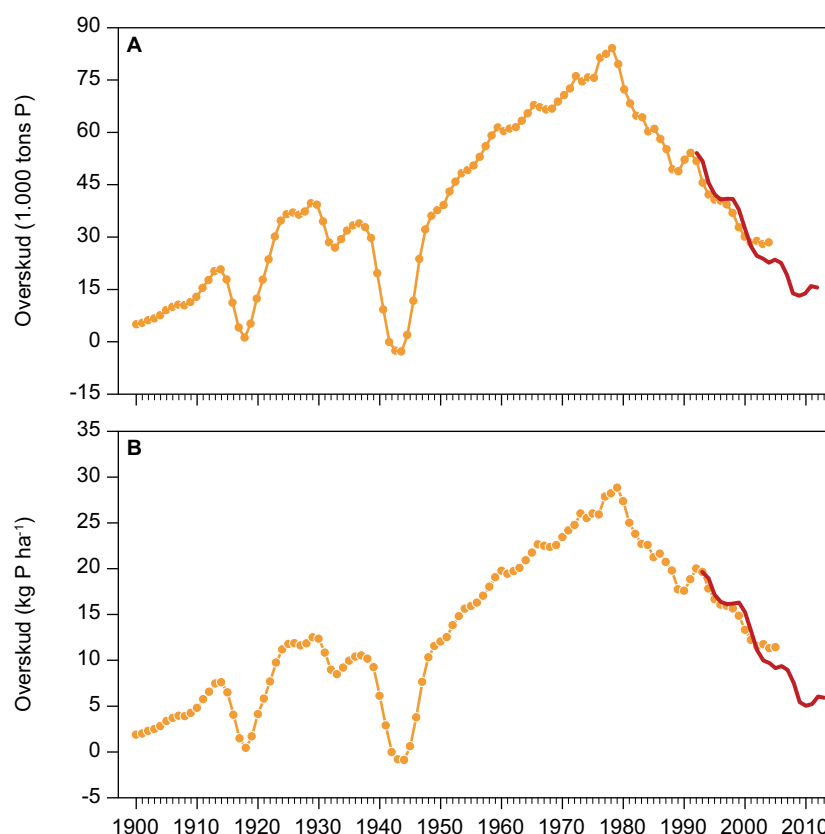
Som navnet antyder beregnes markbalancen ud fra hvad der til- og fraføres på markniveau, i modsætning til erhvervsbalancen, hvor balancen beregnes som en bedriftsbalance ud fra erhvervets eller "bedriftens" samlede til- og fraførsler. Tilførsel udgør handelsgødning, husdyrgødning og lager, P i såsæd og deposition. Fraførsel udgør den høstede mængde af fosfor i såvel salgsafgrøder, foderafgrøder og høst af øvrige afgrødetyper. I markbalancen er der størst usikkerhed på opgørelsen af den høstede mængde af grovfoder. Metoden til at bestemme næringsstoffer, der fraføres ved høst blev ændret i forhold til opgørelsen der blev udarbejdet i Landovervågningsoplande 2012. Næringsstofindholdet for grovfoderafgrøder beregnes nu ud fra udbyttet i foderenheder (FE), i stedet for som tidligere ud fra udbyttet i tørstof (TS). Det har betydet, at tallene for nettotilførslen af fosfor er steget lidt ift. de tidligere opgørelser i Landovervågningsrapporterne. For yderligere oplysninger om beregning og datagrundlag henvises til Blicher-Mathiesen et al. (2015).

1.3 Historisk udvikling i erhvervsfosforbalancen

Udviklingen i landbrugets overskud af P gennem de seneste 113 år er vist i Fig. 1.4 samt for perioden 1900-2005 i tabel 1.1. De to verdenskrige og depressionen i 1930'erne markerer sig tydeligt ved et markant fald i overskuddet forårsaget af en kraftig reduktion i importen af P til erhvervet. Overskuddet var ca. 5.000 tons i 1900 og var efter slutningen af 2. verdenskrig steget til 43.000 tons pr. år først i 1950'erne. Derefter steg overskuddet kraftigt og nåede det højeste niveau på ca. 84.000 tons (ca. 28 kg P/ha) i 1979, og har siden været støt faldende til det nuværende niveau på ca. 15.000 tons P eller ca. 5 kg P/ha. P overskuddet er i dag på samme niveau som i starten af forrige århundrede.

Det bemærkes at der ikke er helt sammenfald mellem værdierne fra Kyllingsbæk (2008) og Vinther & Olsen (2015) i perioden 1993-2005. Forskellene opstod i forbindelse en revurdering af erhvervsbalancerne i forbindelse med midtvejsevalueringen af VMP III (Vinther & Poulsen, 2009). De skyldes dels en revurdering af landbrugets anvendelse af fiskeprodukter, som blev foretaget af Danmarks Statistik i efteråret 2007, ikke var fuldt implementeret i balancen for perioden 2000 - 2005, og dels, at en genberegning af anvendelsen af foderfosfat for perioden før indførelsen af fosforafgiften i 2005.

Figur 1.4. Udviklingen i P-overskud i erhvervsbalancen i perioden 1900 – 2013. Blå signatur udgør perioden 1900-2005, Kyllingsbæk (2008) og rød signatur perioden 1993-2013, Vinther & Olsen (2015).

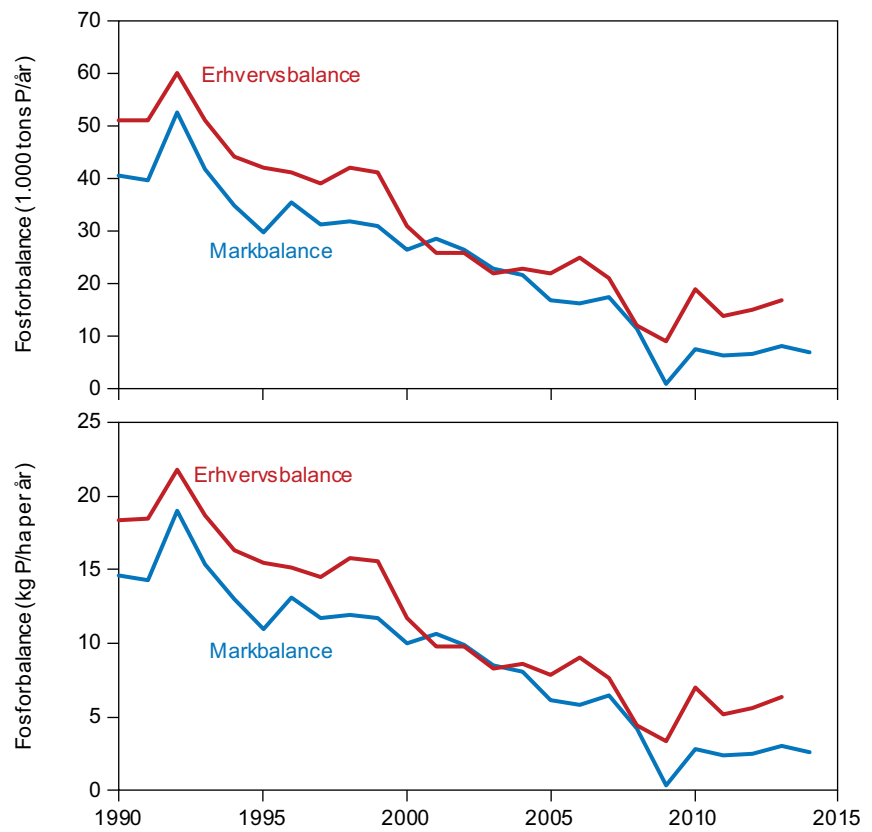


1.4 Udviklingen i P-overskud i perioden 1990-2013 i hhv. Mark- og Erhvervsbalancen

Markbalancen er reduceret fra 40.500 tons P i 1990 til 8.100 tons P i 2013 (Fig. 1.5). For det dyrkede areal udgør fosforoverskuddet i 2013 gennemsnitlig 3 kg P/ha mod 14,5 kg P/ha i 1990 og 6,1 kg P/ha i 2005. Selvom det gennemsnitlige fosforoverskud for hele landet er på et forholdsvis lavt niveau viser interviewdata fra landovervågningen, at der er et højt fosforoverskud på bedrifter med husdyr og et fosforunderskud for bedrifter der ikke anvender husdyrgødning (Blicher-Mathiesen, 2015).

Den totale fosforbalance for dansk landbrug opgjort som erhvervsbalance giver generelt et større overskud end opgjort fra markbalancen. Som gennemsnit af alle årene 1990-2013 har overskuddet beregnet i erhvervsbalancen været ca. 6.400 tons P eller ca. 2,8 kg P/ha større end beregnet i markbalancen. Idet der for fosfor ikke forekommer luftformige tab, burde totaloverskuddet og markoverskuddet på landsplan i princippet være ens. Der kan være forskellige årsager til afvigelsen mellem de to metoder, såsom usikkerhed omkring opgørelse af anvendte fiskeprodukter, usikkerhed omkring høstudbytter eller P indhold i afgrøder, fodermidler og animalske produkter, manglende indberetning fra alle eksportører eller kornproducenter, og usikkerhed på beregningsmetoden for fraførsel med levende dyr eller dyr til slagtning. For yderligere diskussion og eksempler på størrelsesordner af disse usikkerheder henvises til Vinther & Poulsen (2009).

Figur 1.5. Udviklingen i P-overskud i perioden 1990 – 2013. Fra Blicher-Mathiesen et al. (2015) og Vinther & Olsen (2015).



2 Fordeling af fosforgødning mellem marker (registerdata)

Tildeling af P er generelt større for landbrugsareal, der gødes med husdyrgødning. Mængden af tildelt husdyrgødning varierer regionalt og er størst i det vestlige Danmark.

For at belyse eventuelle forskelle i tildelingen af P på markniveau, er tildelingen af N og P i handels- og husdyrgødning samt P-markbalancen opgjort. Dette er gjort ved at koble data fra Det Generelle Landbrugsregister (GLR) og Det Centrale Husdyrregister (CHR) med markblokkortet. Efterfølgende er bedrifter inddelt i bedriftstyper efter sammensætningen af dyreenheder (DE) på bedriften, som er indmeldt til GLR.

2.1 Bedriftsafhængige forskelle i tildeling af N og P

Forbruget af N og P varierer mellem de enkelte bedrifter og er især forskellig imellem bedriftstyper. Tildeling af husdyrgødning reguleres gennem harmonikrav bestemt ud fra husdyrgødningens indhold af N. Tildelingen af P afhænger således af forholdet mellem N og P og i den tildelte husdyrgødning. Således vil P-markoverskuddet på marker, som gødes med husdyrgødning med særligt lavt N:P-forhold forventeligt være højere end på marker, som udelukkende gødes med handelsgødning eller med husdyrgødning med et højt N:P-forhold. Relativt lavt N:P-forhold findes i husdyrgødning fra bl.a. pelsdyr og fjerkræ samt svin. Særligt lavt N:P-forhold findes desuden i fiberfraktionen fra gylleseparering samt spildevandsslam, som også anvendes til udspreddning.

En opgørelse af forbrug af N og P viser, at tildelingen af P og P-markoverskuddet generelt stiger ved anvendelse af større mængder husdyrgødning (tabel 2.1). Det fremgår desuden, at tildelingen af P i handelsgødning generelt falder ved stigende tildeling af husdyrgødning og at P-markoverskuddet er størst for brug med fjerkræ og pelsdyr samt svinebrug.

2.2 Regionale forskelle i tildeling af N og P-markoverskuddet

De koblede data fra GLR og CHR er aggregeret på ca. 3000 oplande på hver ca. 15km² (benævnes ID15-oplande). Opgørelsen er lavet for både 2005 og 2013 for at belyse en eventuel ændring i tildelingsmønster på regionalt plan.

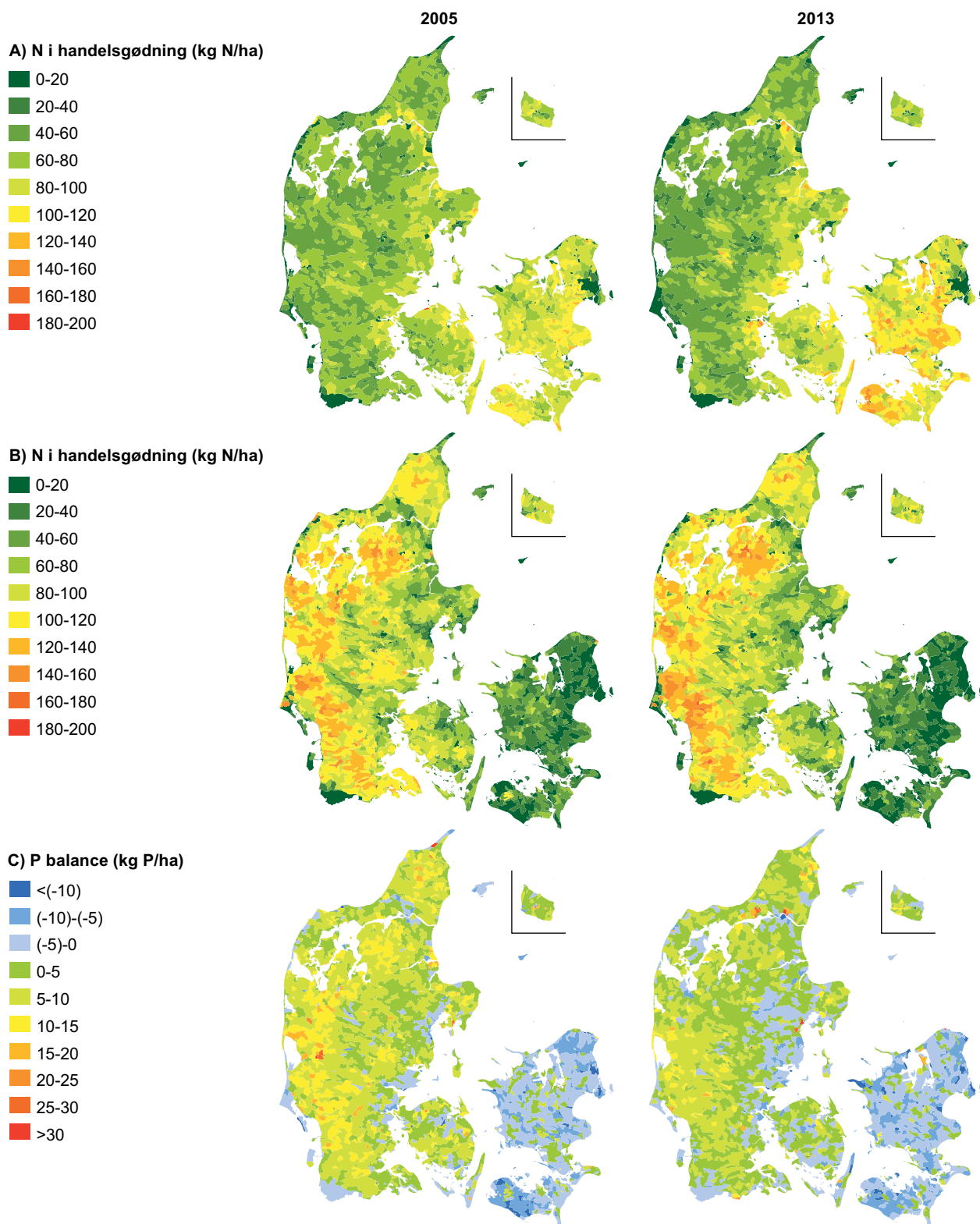
P-markbalancen varierer ikke kun fra bedrift til bedrift, men også regionalt. Dette skyldes det generelt større husdyrhold på bedrifter i Vestdanmark hvor de sandede jorde dominerer, hvorimod bedrifterne i Østdanmark, hvor lerede jorde hyppigt forekommer, i højere grad udgøres af plantebrug.

Således fremgår det af figur 2.1, at tildelingen af N i handelsgødning er størst på Sjælland og i det østlige Jylland, mens tildelingen af N i husdyrgødning er størst i det vestlige Jylland. Mønsteret er stort set det samme for både 2005 og 2013, om end gødningsniveauet for N på landsplan er højere i 2013 (ca. 3 kg N ha⁻¹ højere for handelsgødning og ca. 5 kg N ha⁻¹ højere for husdyrgødning). Mønsteret for P-markoverskuddet følger generelt samme mønster som for tildeling af N i husdyrgødning, således at P-markoverskuddet er størst i det vestlige Jylland og mindst i det østlige Danmark.

Tabel 2.1. Gennemsnitlig tilførsel af N og P på markniveau for bedriftstyper, grupperet efter harmonitryk, opgjort på koblede registerdata fra GLR og CHR fra 2013. Nogle bedrifter ligger uden for harmonikravet i forhold til den angivne bedriftstype. Dette kan skyldes, at de indgår i en produktionsmæssig sammenhæng med en kvægbedrift. Desuden vil der være en usikkerhed på opgørelsen af harmoniarealet, som er opgjort på afgrødefordelingen i GLR. Bedriftstypen defineres ud fra antal DE på den enkelte bedrift (DE_{sum}) samt hvor stor en andel, den enkelte dyretype udgør af det samlede dyrehold.

Bedriftstype	DE pr. ha	Areal, 1000ha	Husdyr- Handels- N-balance			Husdyr- Handels- P-balance		
			gødning kg N ha ⁻¹ dyrket areal	gødning kg N ha ⁻¹ dyrket areal		gødning kg P ha ⁻¹ dyrket areal	gødning kg P ha ⁻¹ dyrket areal	
Fjer / Pels	0-0,7	12	34	92	64	8	5	1
$DE_{sum} > 2$	0,7-1,4	42	107	64	103	25	1	10
$DE_{fjer/pels} > \frac{2}{3} DE_{sum}$	>1,4	10	147	28	107	38	1	22
	Alle	64	99	64	96	24	2	10
Kvæg	0-0,7	146	34	93	61	5	7	-3
$DE_{sum} > 2$	0,7-1,4	309	110	51	88	18	3	1
$DE_{kvæg} > \frac{2}{3} DE_{sum}$	1,4-1,7	226	148	60	109	24	4	4
	1,7-2,3	162	194	55	132	31	5	9
	>2,3	3	195	40	141	32	4	13
	Alle	846	123	62	98	20	4	3
Plante	0-0,7	680	15	112	57	3	9	-2
$DE_{sum} < 2$	0,7-1,4	296	101	59	87	21	2	6
	>1,4	28	158	44	108	30	2	11
	Alle	1004	44	94	68	9	5	1
Svin*	0-0,7	83	47	101	69	11	4	-1
$DE_{sum} > 2$	0,7-1,4	471	102	63	86	23	1	6
$DE_{svin} > \frac{2}{3} DE_{sum}$	Alle	557	94	69	84	21	2	5
Får / Geder	0-0,7	18	24	63	46	4	5	-2
$DE_{sum} > \frac{2}{3} DE_{sum}$	0,7-1,4	7	73	21	54	16	1	4
$DE_{får/geder} > \frac{2}{3} DE_{sum}$	1,4-1,7	1	142	57	118	28	2	4
	>1,7	0	59	12	62	9	1	1
	Alle	26	39	51	50	7	4	-1
Blandet	0-0,7	137	12	37	3	2	4	-5
<i>Bedrifter, som ikke opfylder betingelser i ovenstående kategorier.</i>	0,7-1,4	40	98	58	82	21	3	5
	>1,4	6	142	50	107	25	2	7
	Alle	184	35	42	24	7	3	-3

*39 bedrifter udeladt i opgørelsen pga. usikkerhed ifbm. opgørelse af harmoniareal.



Figur 2.1. Tildeling af N samt P-markbalancer på landbrugsarealer i 2005 og 2013 vist på 15 km² oplande (ID15-oplande). A) Tildeling af kvælstof i handelsgødning. B) Tildeling af kvælstof i husdyrgødning. C) Fosforbalance.

2.3 Opgørelse af arealer med lav, middel og høj fosfortildeling

Det totale input af fosfor for 2013 er opgjort på bedriftsniveau og herefter inddelt i grupper efter mængden af tildelt fosfor på bedriftsniveau. Det summerede areal for hver gruppe fremgår af tabel 2.2. Langt størstedelen af landbrugsarealet har en fosfortildeling på 30 kg P ha⁻¹ eller mindre. Kun en marginal andel af landbrugsarealet tildeles mængder på 50 kg P ha⁻¹ eller derover. Disse arealer må forventes især at tilhøre bedrifter, som har produktion af husdyrgødning med lavt N:P-forhold, eller bedrifter, som aftager gødning med lavt N:P-forhold gennem gødningsaftaler.

Tabel 2.2. Tildeling af P opgjort på bedriftsniveau.

Tildelt total P (kg P ha ⁻¹ dyrket)	Areal (1000 ha)	Areal (%)
0-10	501	19
10-20	673	25
20-30	950	35
30-40	421	16
40-50	96	4
>50	40	1

2.4 Øget fosfortilførsel ved ændring af harmonikrav fra 1,4 til 1,7 DE

For alle bedrifter (undtagen kvæg-, får-, gede- og hjortebedrifter) gælder det for det nuværende harmonikrav, at der må udbringes husdyrgødning og anden organisk gødning på bedriftens harmoniarealer svarende til 1,4 DE ha⁻¹. For kvæg-, får-, gede- og hjortebedrifter gælder et harmonikrav på 1,7 DE ha⁻¹, mens det for kvægbedrifter er muligt at opnå et harmonikrav på 2,3 DE ha⁻¹, såfremt en række betingelser vedrørende sædskifte og jordbearbejdning opfyldes. Ændring af det nuværende harmonikrav fra 1,4 DE ha⁻¹ til 1,7 DE ha⁻¹ vil således ikke berøre bedrifter med kvæg, får, geder eller hjorte.

Svinebedrifter i Landovervågningsoplande

Udviklingen i fosforoverskud på svinebedrifter er opgjort for Landovervågningsoplandene siden 1991, tabel 2.3. Overskuddet på markniveau har været faldende fra ca. 16 kg P ha⁻¹ år⁻¹ i 1991 – 1995 til ca. 5 kg P ha⁻¹ år⁻¹ i 2006 – 2010 og ca. 4 kg P ha⁻¹ år⁻¹ for den seneste periode 2011-2014.

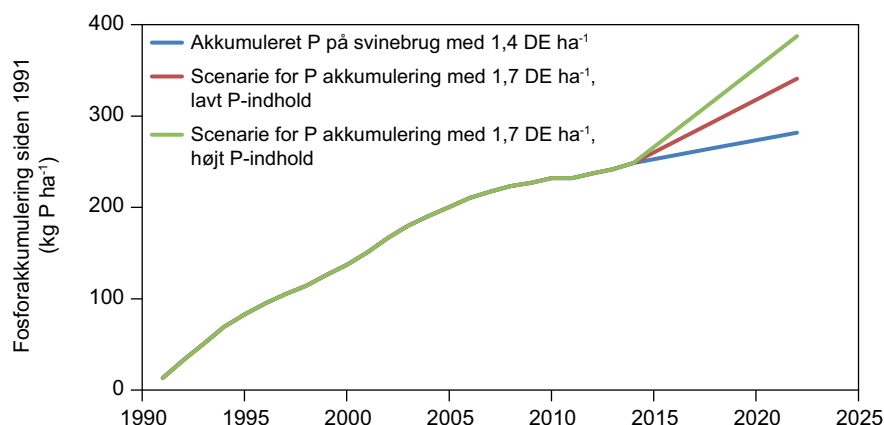
En ændring af harmonikravet for svinebedrifter fra 1,4 DE ha⁻¹ til 1,7 DE ha⁻¹ vil betyde, at markoverskuddet på svinebedrifter i Landovervågningsoplandene vil stige. En øget tildeling af husdyrgødning på 0,3 DE ha⁻¹ vil betyde en øgning af fosfortilførslen i størrelsesordenen 7-13 kg P ha⁻¹ år⁻¹. Den eksakte øgning bestemmes af husdyrgødningens N:P-forhold, som afhænger af husdyrart (ex. smågrise, slagtesvin, søer) og staldtype (NaturErhvervstyrelsen, 2015). I Landovervågningsoplandene betyder dette, at fosforoverskuddet på markniveau vil stige fra ca 4 kg P ha⁻¹ år⁻¹ (niveau for 2011-2014) til mellem 12 og 17 kg P ha⁻¹ år⁻¹ eller svarende til niveauet opgjort i perioden før 2006 (tabel 2.3).

Tabel 2.3. Udviklingen i fosforoverskud på markniveau for svinebedrifter i Landovervågningsoplandene.

	Markbalance Kg P ha ⁻¹ år ⁻¹
1991 – 1995	16,6
1996 – 2000	10,9
2001 – 2005	12,6
2006 – 2010	5,3
2011 - 2014	4,2
Overskud ved ændring af harmonikrav fra 1,4 ha ⁻¹ til 1,7 DE/ha (Lavt P-indhold i husdyrgødning)	11,5
Overskud ved ændring af harmonikrav fra 1,4 ha ⁻¹ til 1,7 DE/ha (Højt P-indhold i husdyrgødning)	17,4

Udviklingen i fosforakkumuleringen på svinebrug i Landovervågningsoplandene er opgjort for perioden 1991-2014 og er fremskrevet til år 2022 dels ved det nuværende harmonikrav, dels ved et forudsat ændret harmonikrav (figur 2.2). Akkumuleringen er beregnet som forskellen mellem tilført og fjernet fosfor på markniveau. Det fremgår, at det indtrufne fald i akkumuleringsstakten efter Vandmiljøplan III afløses af en forøget akkumulering ved ændring i harmonikravet til svinebedrifter.

Figur 2.2. Fremskrivning i akkumulering af fosfor på svinebrug i Landovervågningsoplandene siden 1991. Fremskrivningen er foretaget dels det nuværende harmonikrav, dels ved lempet harmonikrav for anvendelse af husdyrgødning fra svin med henholdsvis lavt og højt P-indhold. Akkumulering er beregnet som forskellen mellem tilført og fjernet fosfor på markniveau.



Bedrifter med mink og fjerkræ

En ændring af harmonikravet for bedrifter med mink eller fjerkræ fra 1,4 DE ha⁻¹ til 1,7 DE ha⁻¹ vil betyde, at markoverskuddet for fosfor på disse bedrifter vil stige. En øget tildeling af husdyrgødning på 0,3 DE ha⁻¹ vil betyde en øgning af fosfortilførslen i størrelsesordenen 8-11 kg P ha⁻¹ år⁻¹ for minkbedrifter og 8-23 kg P ha⁻¹ år⁻¹ for fjerkræbedrifter. Den eksakte øgning bestemmes af husdyrgødningens N:P-forhold, som afhænger af husdyrart og stalddtype (NaturErhvervstyrelsen, 2015). Ved fuld udnyttelse af harmonikrav på 1,7 DE/ha vil tildeling af P ligge på 44-65 kg P/ha for minkbedrifter og 51-103 kg P/ha for bedrifter med slagtekyllinger, afhængig af stalddtype.

Plantebrug med og uden forbrug af husdyrgødning

En ændring af harmonikravet fra 1,4 DE ha⁻¹ til 1,7 DE ha⁻¹ vil bevirke, at eksport af husdyrgødning vil falde, idet bedrifter, som producerer husdyrgødning, vil anvende en større andel af den producerede husdyrgødning på egen bedrift.

For plantebrug betyder det, at der generelt vil blive importeret mindre fosfor gennem husdyrgødning. Tilsvarende må tildeling af fosfor gennem handelsgødning forventes at stige. Således anvendte plantebrug med husdyrgødning i Landovervågningsoplandene ca. 3 kg P ha⁻¹ år⁻¹ fra handelsgødning, mens plantebrug uden husdyrgødning anvendte ca. 11 kg P ha⁻¹ år⁻¹ i perioden 2010-2014 (tabel 2.4). Nogenlunde samme niveau ses for tildeling af handelsgødning på markniveau for plantebrug opgjort på registerdata fra 2013.

Tabel 2.4. Gennemsnitligt forbrug af P i handels- og husdyrgødning samt fosforbalance på plantebrug opgjort på data fra Landovervågningsoplandene i perioden 2010-2014 og på markniveau for koblede registerdata fra GLR og CHR fra 2013.

	Plantebrug uden husdyrgødning		Plantebrug med husdyrgødning	
	Landovervågningsoplande	Registerdata	Landovervågningsoplande	Registerdata
	2010-2014	2013	2010-2014	2013
Handelsgødning (kg P ha ⁻¹ år ⁻¹)	10,8	10,0	3,3	2,5
Husdyrgødning (kg P ha ⁻¹ år ⁻¹)	0,0	0,0	18,1	20,7
Fosfor-balance (kg P ha ⁻¹ år ⁻¹)	-7,9	-3,8	-0,2	6,6

Denne forskel mellem plantebrug med og uden forbrug af husdyrgødning må forventes også at gælde for plantebedrifter med en nuværende import af husdyrgødning fra svin, mink eller fjerkræ, og hvis gødningsaftale ved en ændring af harmonikravene risikerer at ophøre. Forudsættes en uændret husdyrproduktion, vil en ændring af harmonikravet fra 1,4 DE ha⁻¹ til 1,7 DE ha⁻¹ således føre til, at husdyrgødning fra den eksisterende husdyrproduktion udsprede på et mindre areal end det nuværende, og at bedrifter med en nuværende import af husdyrgødning fra svin, mink eller fjerkræ vil kompensere for den reducerede tildeling af P gennem husdyrgødning ved tildeling af fosforholdig handelsgødning.

3 Fosforindholdet og mætningsgraden

3.1 Indledning

Fosfor i jorden forekommer dels som uorganisk fosfor og dels som organisk bundet fosfor. I almindelig agerjord udgør organisk bundet fosfor omkring halvdelen. Planter optager primært uorganisk fosfor. Størstedelen af det uorganiske fosfor i jorden er typisk bundet til jern- og aluminiumminerale under danske forhold (Borggaard et al., 1990), men også mere eller mindre tungt opløselige calciumfosfater forekommer. Fosfor reagerer villigt med jordens faste bestanddele, og kun en meget lille del af jordens uorganiske fosfor er opløst i jordvæsken og derved umiddelbart tilgængeligt for planterne og for udvaskning som opløst fosfor med afstrømning fra rodzonen. De kemiske forhold, der er betydende for fosforbinding i høj- og lavbunds-jorde, adskiller sig på flere væsentlige områder fra hinanden, og de metoder der anvendes til at belyse dette, adskiller sig derfor også. Dette afsnit omhandler først og fremmest binding og frigivelse af P i højbunds-jorde. Detaljerede beskrivelser af forholdene i lavbunds-jorde i Danmark kan findes f.eks. i Hoffmann et al. (2009) eller Forsmann og Kjærgaard (2014).

3.2 Plantetilgængeligt fosfor

En afgrøde kan umiddelbart kun udnytte en beskedent del af det fosfor, der findes i jorden på et givet tidspunkt. Den del kaldes typisk for tilgængeligt fosfor. At måle jordens indhold af plantetilgængeligt fosfor er komplekst, og i tidens løb er der i forskellige lande blevet udviklet mange ret forskellige analysemetoder hertil. Vanskelighederne med at bestemme plantetilgængeligt fosfor kan henføres til de komplekse bindingsforhold for fosfor i jorden, som varierer ganske betydeligt fra jordtype til jordtype. En metode, der egner sig på visse jordtyper, kan derfor være uegnet på andre. Forskellige lande og regioner har da også gjort ganske forskellige valg med hensyn til hvilken metode de anvender til rutineanalyser i forbindelse med rådgivning i planteproduktionen (Sibbesen & Sharpley 1997; Jordan-Meille et al., 2012).

Bestemmelse af "tilgængeligt fosfor" ved ekstraktion af jorden med en 0,5 M bicarbonatopløsning (Olsen et al., 1954) er en af de klassiske jordanalysemetoder, ofte kaldet "Olsen P", som anvendes i mange lande heriblandt Danmark. I britiske studier har man under markforhold demonstreret sammenhæng mellem udbytte og fosforstatus i jorden målt med denne metode, og det har været muligt at finde de såkaldt kritiske niveauer for Olsen P for forskellige afgrøder. Ved Olsen P værdier højere end det kritiske niveau, er der ikke længere udbytterespons på stigende Olsen P (Johnston, 2005; Syers et al., 2008).

I danske karforsøg, hvor udbytte og fosforoptagelse i en afgrøde blev sammenholdt med flere forskellige fosfor-testmetoder, var Olsen P den blandt de testede klassiske rutinemetoder, der viste den klareste sammenhæng med plantevæksten (Sibbesen, 1983). Der er også blevet udført længerevarende danske markforsøg for at demonstrere sammenhængen mellem jordens fosforstatus og udbyttet (Rubæk og Sibbesen, 2000). De danske forsøg er mindre omfattende end de ovenfor beskrevne britiske forsøg. Der er ikke opnået så store forskelle i fosforniveauerne mellem forsøgsbehandlingerne, og der er derfor heller ikke tilsvarende klare resultater. For de mere lerede jordtyper (JB6 og JB7) er der dog god overensstemmelse mellem de danske og de britiske forsøg: Skæringspunktet for hvornår der ikke længere er udbytterespons for fosforgødskning i afgrøder, der ikke har særlige fosforbehov, lig-

ger omkring 20 mg Olsen P pr kg (P_{tal} = 2.0). Derimod giver fosforgødskning et udbytterespons ved betydeligt højere fosfortal på de mere sandede danske jorder (Rubæk og Sibbesen 2000). Nye markforsøg udført i regi af et igangværende forskningsprojekt på KU-Life viser også, at der mod forventning ved ganske høje Olsen P værdier kan opnås merudbytter ved fosforgødskning, medens en ny metode, kaldet DGT-metoden, bedre kunne beskrive, hvornår der vil være udbytterespons på fosforgødskning (Mundus et al., 2013; Tandy et al., 2011; Speirs et al., 2013).

3.3 Det danske fosfortal

I Danmark skiftede vi fosforanalysemetode i 1987 fra fosforsyretallet (Ft) som er en stærk sur ekstraktion med 0,2 N svovlsyre, og som ekstraherer en betydelig andel af jorden uorganiske fosfor (Bondorff, 1950), til en variant af den klassiske Olsen P metode (Olsen et al., 1954), kaldet fosfortallet (Pt eller P_{tal}) (Plantedirektoratet, 1994). Resultater af fosforsyretalsanalysen (Ft) angives i mg P/33 g jord, medens fosfortalsanalysen (Pt) angives i mg P/100 g jord, hvorimod resultaterne af den klassiske Olsen P metode typisk angives i mg P/kg jord, hvilket kan give anledning til misforståelser. I det følgende anvendes både Olsen P og P_{tal}, afhængig af det oprindelige datamateriale, der præsenteres. Tabel 3.1 viser hvordan fosfortallet anvendes til fastsættelse af fosforgødningsbehov i Danmark.

Tabel 3.1. Anbefalinger om fosforgødskning ud fra jordens fosfortal (fra pjecen "Pas på Fosfor" udarbejdet af Leif Knudsen med flere i 2004 for Dansk Landbrug og Ringkøbing Amt).

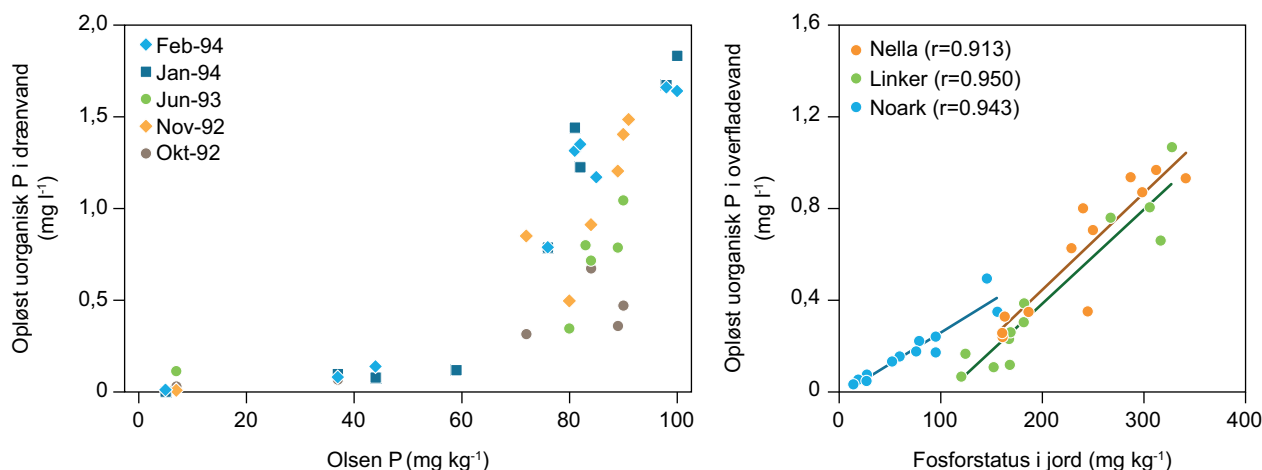
Fosfortal	Niveau	Anbefaling
Under 1	Meget lavt	Tilførsel af større mængder fosfor for at hæve fosfortallet suppleret med årlig tilførsel af fosfor i handels- eller husdyrgødning
1-2	Lavt	Tilførsel af 20-40 % mere fosfor end afgrøden fjerner
2-4	Middel	Tilførsel af, hvad der i gennemsnit svarer til det planterne fjerner. I følsomme afgrøder (majs, roer, kartofler) lidt mere.
4-6	Højt	Tilførsel af 25-50 % af hvad afgrøden fjerner *)
Over 6	Meget højt	På kort sigt ikke behov for tilførsel af fosfor. *)

*) Fosfortallet vil falde med årene, og når fosfortallet er under 4,0 skal alt det fosfor som planterne fjerner erstattes.

Det har længe været kendt, at der er store udfordringer mht. at sikre et robust analyseresultat for fosfortalsanalysen. Udfordringerne og forslag til tiltag der kan afhjælpe disse, er grundigt beskrevet i to rapporter (Rubæk og Sørensen, 2011; Rubæk et al., 2015).

3.3.1 Fosforanalyser og vurdering af risiko for fosfortab

De forskellige metoder for bestemmelse af tilgængeligt fosfor bliver i stigende omfang også anvendt som en vigtig parameter, når risikoen for fosfortab til vandmiljøet skal vurderes (Maguire et al., 2005). Det gælder også danske forhold, hvor fosfortallet nu anvendes i forbindelse med miljøgodkendelser af husdyrbrug. Ligeledes indgår fosfortallet i redskaber til kortlægning af risiko for fosfortab (Heckrath et al., 2009). En væsentlig begrundelse for denne anvendelse af fosfortallet er, at der findes tydelige, dog ofte jordtypespecifikke, sammenhænge både mellem fosfortallet og det fosfor, der kan frigives til vand (se også fig. 3.13) og mellem fosfortallet og jordens totalfosforindhold (se også fig. 3.9), samtidig med at tallet hyppigt måles på landbrugsjorden (Heckrath et al., 2009). Desuden er der i kontrollerede forsøg, hvor andre faktorer, der påvirker P tabet, er holdt konstant, vist klare sammenhænge mellem fosforstatus i jord målt med Olsen P eller tilsvarende P test, som anvendes i andre lande, og det faktiske tab (Heckrath et al., 1995; Pote et al., 1999) (Fig. 3.1).



Figur 3.1. Sammenhæng mellem fosforstatus i jord målt som fosfortallet og koncentrationen af fosfor målt i vand fra drænrør (venstre) (efter Heckrath et al., 1995), og (højre) fosforstatus i jord målt ved Bray/Kurtz-metoden og koncentrationen af opløst fosfor i overfladeafstrømmende vand for tre forskellige jordtyper (DRP: opløst uorganisk fosfor) (Pote et al., 1999).

Dette gælder også for hvad der kan vaskes ud af det øverste jordlag fra danske jorde (tabel 3.2; Glæsner et al., 2013). En generalisering af sammenhængen mellem fosforstatus i jord og fosfortab fra markerne er problematisk, da en række jordprocesser og dyrkningstiltag påvirker det lokale tabsniveau.

Tabel 3.2. Udvaskning af fosfor fra jordkolonner (20 cm i diameter og 20 cm dybe). Regnintensiteten svarede til 2 mm pr time. Forsøget er opgjort efter der er løbet vand svarende til mellem 130 og 144 mm nedbør gennem kolonnerne. Jordkolonnerne blev udtaget fra et areal, der havde huset et langvarigt forsøg med fosforgødsning. Gødskningsniveauerne i de 27 år markforsøget varede var henholdsvis 0, 15 og 30 kg P pr ha. Markforsøget var anlagt ved Rønhave på Als på en JB7 jord. Tal efterfulgt af forskellige bogstaver indenfor hver kolonne er signifikant forskellige (5 % niveau) (Glæsner et al., 2013).

Fosforgødsningsniveau Kg P/ha	Olsen P i jorden (mg P/kg jord)	Mængde fosfor udvasket (kg P/ha)		
		Total P	Opløst P	Partikulært P
0	11a	0,31a	0.14a	0.17a
15	18b	0,48a	0.30a	0,18a
30	28c	1.20b	0.88b	0,32a

Når fosfortallet i dag bruges både som rettesnor for fosforgødsningen i forbindelse med planteproduktion og i miljøsammenhæng som parameter til udpegning af risikoområder, øges fokus på og kravene til analysens pålidelighed. Anvendelsen af fosfortallet ved vurderinger af risiko for fosfortab giver også nyt og væsentligt fokus på betydningen af, hvor og hvordan jordprøven udtages (Knudsen et al., 2011). Det er vigtigt at få belyst, om den prøveudtagning, som man traditionelt anvender til belysning af jordens P-status mht. planteproduktion, også er den ideelle, når det drejer sig om miljøspørgsmål. Den blandede (puljede) jordprøve med traditionelt 16 stik dækker over en stor variation i marken (Gade, 2011). Denne variation har betydning for både planteproduktion og måske i særlig grad for miljøspørgsmål. Tilmed er det sådan, at når prøven udtages alene med henblik på planteproduktion, vil man traditionelt undgå afvigende zoner i marken, såsom foragre og mindre lavninger, men disse zoner er måske af særlig stor betydning for risikoen for P tab fra området.

3.3.2 Fosforbindingskapacitet og fosformætningsgrad på højbundsjord

På højbundsjarde inddeles jordens fosforindhold ofte i puljer med tilgængelighed varierende fra helt utilgængelige til såkaldte let ombyttelige puljer,

hvorfra fosfor relativt let kan frigøres til jordvæsken. Mellem puljerne og jordvæsken er der ligevægt. Fjernes fosfor fra jordvæsken ved, at planterne optager fosfor, eller ved udvaskning af fosfor fra rodzonen til dræn og grundvand, forskydes ligevægten, og der frigøres fosfor fra de bundne puljer i jorden. Tilføres letopløseligt fosfor, eksempelvis ved gødskning, vil der ske en forskydning i modsat retning, idet en del af det opløste fosfor vil bindes til jordens faste fase. Jordens bindingskapacitet for fosfor er generelt stor, men i teorien begrænset. Bindingskapaciteten kan variere ganske betydeligt for forskellige jordtyper og med jorddybden. Ved fortsat tilførsel be-
slaglægges en stadigt stigende del af jordens fosforbindingskapacitet, jordens fosformætningsgrad vil stige, og der vil efterhånden ske mærkbare stigninger i fosforkoncentrationen i jordvæsken. Begrebet fosformætningsgrad giver ofte anledning til misforståelser. Teoretisk er fuldstændig mætning af en jord med fosfor (dvs. alle fosforbindingspladser på jordpartiklernes overflader er besat med fosfor) mulig, men i praksis er det irrelevant, da den såkaldte kritisk høje mætningsgrad indtræder længe før fuldstændig mætning. I Holland er der udviklet en metode til bestemmelse af en jords fosformætningsgrad, under forhold hvor jern- og aluminiumoxider kontrollerer bindingskapaciteten. Denne metode ekstraherer samtidig fosfor, jern og aluminium med en oxalatopløsning. Ekstraheret jern og aluminium er et udtryk for fosforbindingskapaciteten, mens ekstraheret fosfor antyder hvor stor en del af denne bindingskapacitet allerede er opbrugt (Poulsen & Rubæk, 2005). Metoden anvendes også i Danmark til videnskabelige formål.

Mange undersøgelser har vist, at jordens evne til at binde fosfor også stiger i takt med stigende indhold af ler (Munkholm & Sibbesen, 1997). I mineraljorde findes hovedparten af jordens fosfor således bundet i lerfraktionen, der pga. partikelstørrelsesfordelingen har det største overfladeareal, fosfor kan reagere med. Desuden forekommer jern- og aluminiumoxider, som typisk har stor kapacitet til fosforbinding, hyppigt som belægninger af lerpartiklerne. I dyrkningslaget af landbrugsjord fra Foulum (9 % ler), Ødum (11 % ler) og Askov (9 % ler) fandtes ca. 70 % af total-fosforet i ler- og ca. 30 % i siltfraktionen. Sandfraktionen indeholdt kun få procent af jordens totale fosforindhold (Sibbesen, 1995; Rubæk et al., 1999). I nogle situationer kan større partikler være belagt med jern- og aluminiumoxider, hvorved også sand kan opnå en større bindingskapacitet. Sådanne belægninger er hyppigst i underjorden. Type og størrelsesfordeling af lerminerallerne er af betydning for, hvor stort et overfladeareal, der findes på lerminerallerne og for hvor mange bindingssteder, der findes pr. overfladeenhed (Borggaard et al., 1991). Lerindhold og indholdet af jern- og aluminiumoxider varierer fra område til område og med dybden, hvorfor jordens fosforbindingskapacitet varierer hermed. Fosfor bindes dårligt på frit kalk, men kan udfælde som calciumfosfater, hvilket især kan have betydning i kalkrige C-horisonter (Borggaard et al., 1991). Men selv i jord med frit kalk vil jern- og aluminiumoxidgrupper på jordens overflader ofte være de vigtigste steder (sites) for fosforbinding (Schwertmann and Schiek, 1980;).

Generelt set svækkes fosfors binding til jordens overflader ved stigende pH. På dyrket jord kalker man ofte jorden med henblik på at hæve jordens pH og forbedre jordens frugtbarhed, og derved påvirkes teoretisk set både jordens fosforbindende egenskaber og jordens evne til at forsyne planterne med fosfor. Forsøg under mark- og laboratorieforhold, hvor kalkningens påvirkning af fosfortilgængelighed for afgrøderne er undersøgt, har dog givet umiddelbart modstridende resultater (Haynes, 1984). Resultater, fra et markforsøg over vekselvirkningen mellem fosforgødskning og kalkning på en sur grovsandet dansk jord ved St. Jyndeved, har vist, at regelmæssig kalkning af den-

ne jord gennem mere end 50 år har påvirket pH og jordens fosforbindende egenskaber (lidt svagere binding i kalket jord) ned til ca. en meters dybde i forhold til en ukalket dyrket behandling (Rubæk et al., 1998). Denne grovsandede jord har meget ringe bindingskapacitet i pløjelaget, men generel stor bindingskapacitet i den underjordiske udfældningshorisont, der ofte dannes på danske sandjorde (den såkaldte spodiske horisont) (Borggaard et al., 1991).

En betydelig del af humusfraktionen er bundet til lerminerale, ofte igennem jern- og aluminiumoxider på lerpartiklernes overflade. Derved påvirker organisk stof teoretisk bindingseffektiviteten for fosfor i mineraljord. Indholdet af organisk kulstof i danske højbundsjordene varierer typisk mellem 1 og 2 %, hvilket er klart mindre end indholdet af ler eller jern- og aluminiumoxider. Derfor vurderes det, at organisk stof i praksis er af mindre betydning for fosforbindingskapaciteten. Et øget indhold af organisk stof i en jord resulterer typisk i en højere grad af aggregering og større strukturabilitet – altså en "bedre jordstruktur". Dette vil typisk forøge jordens evne til at opsuge og lede regnvandet bort fra overfladen. På skrånede arealer vil det betyde, at en mindre andel af regnvandet vil løbe bort på overfladen, hvilket typisk forventes at reducere tabet af både opløst og partikulært fosfor. Også på flade jorde uden overfladetransport vil jordstrukturen påvirke fosfortabet, fordi en jord med dårlig struktur har meget anerkendte porestrukturforskelinger og heraf følgende ringere vandholdende evne, og dårligere infiltrationskapacitet giver et andet mønster for, hvordan vandet trænger igennem jorden. Findes der f.eks. gennemgående makroporer visse steder på marken, vil der hurtigere initieres flow igennem disse end hvis jorden generelt havde en bedre struktur. Hvorved tabet via makroporer til dræn vil kunne øges.

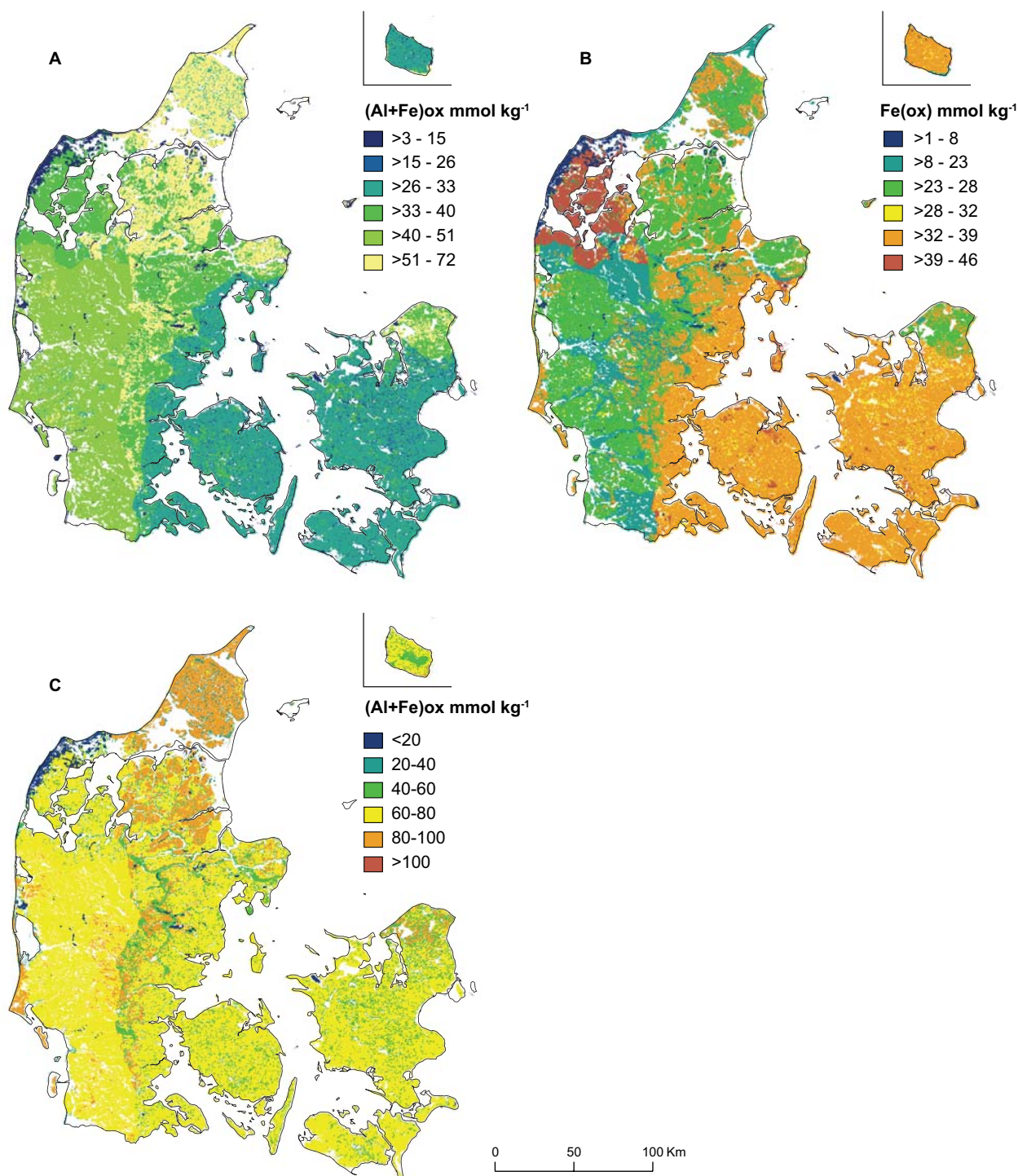
3.4 Kortlægning af fosforbindingskapacitet

Da fosforbindingskapaciteten i jord afhænger af iboende, stabile jordegenskaber, kan den principielt kortlægges givet detaljerede, geo-refererede oplysninger om jordegenskaber. Derimod er det betydeligt vanskeligere at kortlægge fosformætningsgraden, da den i høj grad afhænger af dyrkningsforanstaltninger, såsom gødskning, og er i dynamisk udvikling. Under danske forhold anses indholdet af jern- og aluminiumoxider, tekstur, pH, redoxforhold samt jorddybde som de vigtigste faktorer, der bestemmer fosforbindingskapaciteten. Forskellige pedotransfer-funktioner er publiceret, der oversætter disse faktorer til et udtryk for bindingskapacitet (Borggaard et al., 2004; Van der Zee, 1988).

Der er lavet en kortlægning af nøgleparametre for bindingskapaciteten på højbundsjord i Danmark baseret på oplysninger i den danske Jordbundsdatabase samt målinger af oxalat-ekstraherbare jern- og aluminiumoxider i 386 punkter, heriblandt punkterne fra Kvadratnetsundersøgelsen, som er beskrevet under punkt 3.5.2. Disse forholdsvis få målinger er ekstrapoleret til hele Danmark under antagelsen, at bestemte geografiske områder har karakteristiske indhold af jern- og aluminiumoxider i bestemte jordlag. Dertil blev landet inddelt i landskabstyper (LTU) på grundlag af jordartskortet i 1:50.000 (Hermansen and Jakobsen, 1999) og georegioner, hvor sidstnævnte er baseret på forskelle i udviklingen af landskabet under og efter istiden.

Kombinationen af klasser fra jordartskortet og georegioner resulterede i 31 landskabstyper, som blev kortlagt på 500 m grid for hele landet. En hver af disse landskabstyper blev tilordnet et vægtet, gennemsnitligt indhold af jern- og aluminiumoxid ud fra Jordbundsdatabase og kvadratnettpunkterne. Lavbundsarealer blev undladt fra denne kortlægning på grund af manglen-

de information om den forholdsvis store lokale variation af jernoxider. Desuden er der stor usikkerhed forbunden med at vurdere betydningen af dynamiske, pedologiske transformationer af jernoxider for bindingskapaciteten i disse jorde.



Figur 3.2. Indhold af (A) oxalat-ekstraherbart aluminium (Al_{ox}), (B) jern (Fe_{ox}) i den lavere B horisont (50 – 75 cm) af højbundsjord i Danmark og (C) samlet.

Figur 3.2 A+B viser en separat kortlægning af jern- og aluminiumoxider i 50 – 75 cm dybde, samt den samlede kortlægning, figur 3.2.C. Fosforbindingskapaciteten i de dybere jordlag er relevant, fordi disse lag kun er i ringe omfang fosforberiget, og bindingskapaciteten beskriver mere direkte potentialet

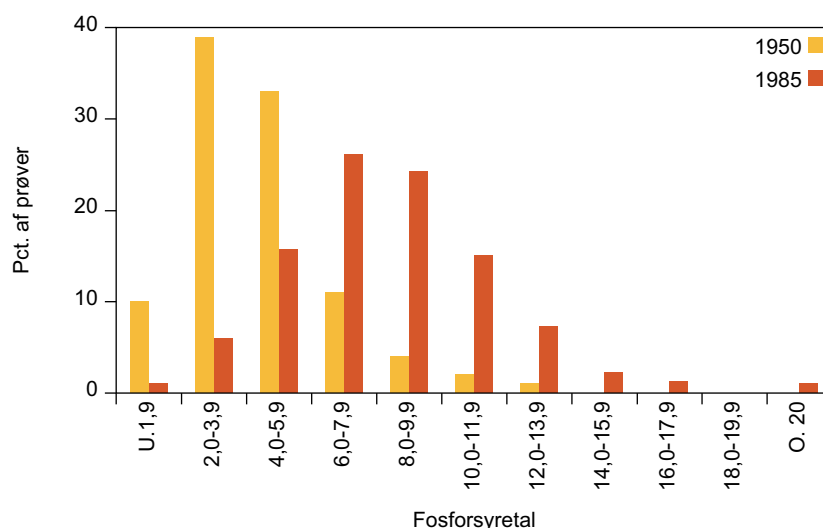
for at holde det fosfor tilbage, der nedvaskes igennem jordprofilen. Medianerne for indholdet af jern- og aluminiumoxider på det kortlagte areal var henholdsvis 32 og 37 mmol kg⁻¹. Under antagelse af at jern og aluminium har samme betydning for fosforbinding (Borggaard et al., 2004), kan disse adderes til et samlet basalt udtryk for fosfor bindingskapacitet (figur 3.2.C). De tilsvarende 25 %, 50 % og 75 % kvantiler for summen af jern- og aluminiumoxider var henholdsvis 66, 71 og 77 mmol (Al+Fe)_{ox} kg⁻¹, hvor indhold <60 mmol (Al+Fe)_{ox} kg⁻¹ anses for lavt og >100 mmol (Al+Fe)_{ox} kg⁻¹ for høj bindingskapacitet (Heckrath, pers. Komm). Således har de fleste danske underjorde ifølge denne kortlægning moderat fosforbindingskapacitet. Der er områder langs den nordlige vestkyst, i Østjylland og på Bornholm, hvor lavt bindingskapacitet er mere udbredt. Denne kortlægning er forbundet med forholdsvis stor usikkerhed på grund af den manglende tæthed af data og bør derfor kun bruges til en overordnet regional vurdering af fosforbindingsforhold i underjorden. Der er ingen klare rumlige sammenfald mellem fordelingen af fosforbindingskapacitet i underjord og husdyrintensitet eller fosforoverskud (figur 2.1) på denne skala.

3.5 Hvordan har fosforindholdet i landbrugsjord ændret sig over tid?

3.5.1 Udviklingen i fosfortallet i forskellige landsdele

Tabet af fosfor fra landbrugsjord er lille i forhold til de mængder af fosfor, der findes i jorden, og i forhold til de årlige tilførsler med gødning og bortførsler med afgrøderne. Tilføres der mere end der fraføres, sker der derfor en ophobning af fosfor i jorden. Siden anden verdenskrig er der sket en markant ophobning af fosfor i dansk landbrugsjord. Specielt i den første halvdel af det 20. århundrede var overskudstildelingen af fosfor begrundet ud fra et planteernæringsmæssigt synspunkt. Således var omkring halvdelen af de fosforsyretil (se afsnit 3.3), der blev analyseret i Jylland i 1950, under det anbefalede niveau (figur 3.3).

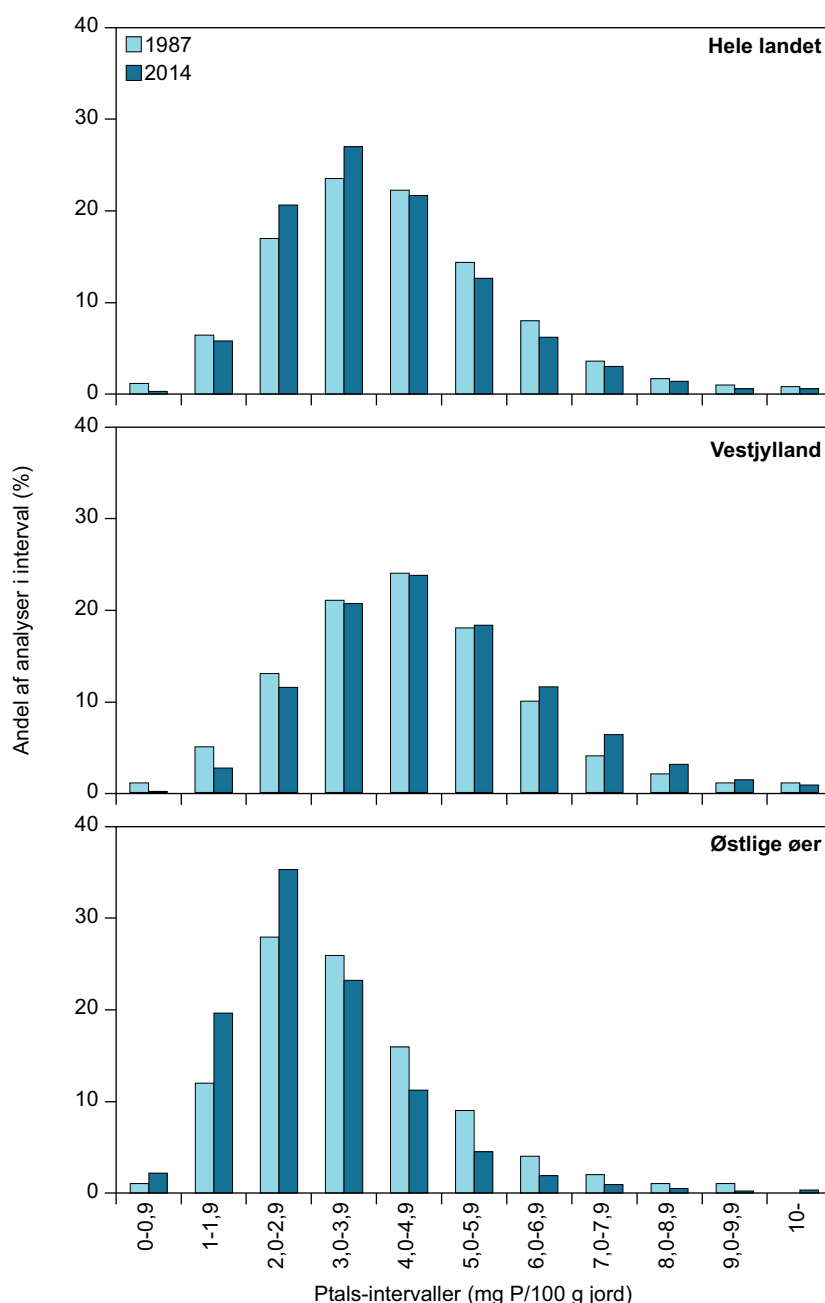
Figur 3.3. Udviklingen i fordeling af fosforsyretil fra 1950 til 1985, fosforsyretil blev anvendt til vurdering af jordens fosforstatus m.h.t. plantetilgængelighed indtil 1987. Fosforsyretil mindre end 5 ansås for lave, fosforsyretil mellem 5 og 8 var passende, og tal over 8 blev anset for høje. Fra 1987 og fremefter har man anvendt fosfortallet. Groft inddelt anses fosfortal mindre end 2 for lave, mellem 2 og 4 passende og over 4 for høje.

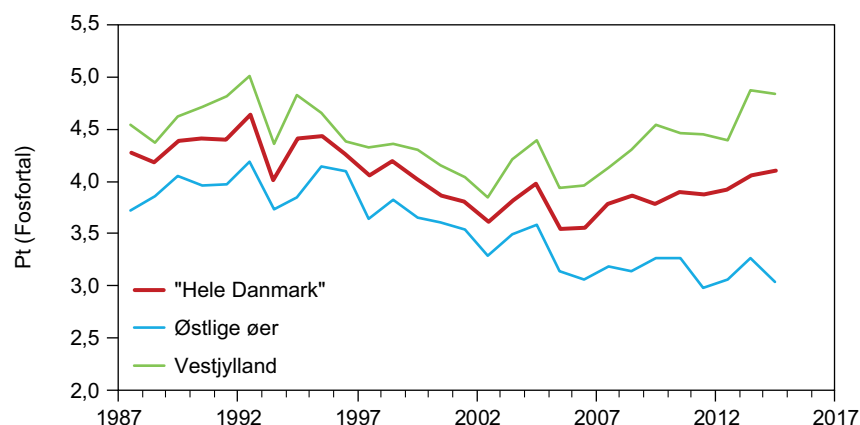


I dag ligger knap halvdelen af fosfortalsanalyserne imidlertid over det anbefalede niveau (figur 3.4. øverst) og kun en beskedent andel af prøverne ligger under det anbefalede niveau (7 % i 2014). Dvs. omkring år 1950 var der stadig behov for at øge fosforindholdet på store dele af landbrugsjorden, mens der, ud fra en planteernæringsmæssig synsvinkel, i dag mange steder vil kunne tæres på jordens fosforpulje uden udbyttmæssige konsekvenser.

Det nationale gennemsnit dækker dog over betydelige regionale forskelle, hvilket er illustreret ved fordelingen for henholdsvis Vestjylland (figur 3.4. i midten) og de Østlige Øer (Sjælland, Lolland, Falster og Møn, figur 3.4. nederst). I Vestjylland har 60 % af de analyserede jordprøver i 1987 et Ptal på 4 eller højere. I 2014 er det 68 % af jordprøverne. På de østlige øer forholder det sig modsat. Her havde 50 % af jordprøverne i 1987 et Ptal der var større end 4, i 2014 er det kun 36 procent af jordprøverne. Trenden for udvikling af de gennemsnitlige Ptal for de tre regioner er vist i figur 3.5. De regionale forskelle i udviklingen i P tal stemmer i høj grad overens med den overordnede fordeling af husdyr og husdyrgødning P i Danmark som også er illustreret i figur 2.1.

Figur 3.4. Øverste figur viser fordelingen af fosfortal i 1987 og 2014 for hele landet, midterste figur viser fordelingen for Vestjylland og nederste figur fordelingen for de østlige øer. Data for disse figurer stammer fra landmændenes jordbundsanalyser de pågældende år. Data er løbende blevet publiceret i "Oversigt over Landsforsøg", udgivet af SEGES. For dette arbejde er det samlede datasæt er stillet til rådighed af Leif Knudsen, SEGES. Repræsentativiteten af data har formentlig ændret sig gennem tiden, da der generelt analyseres færre jordprøver i dag end der gjorde før i tiden. Østlige øer omfatter Sjælland, Lolland, Falster og nærtliggende mindre øer.





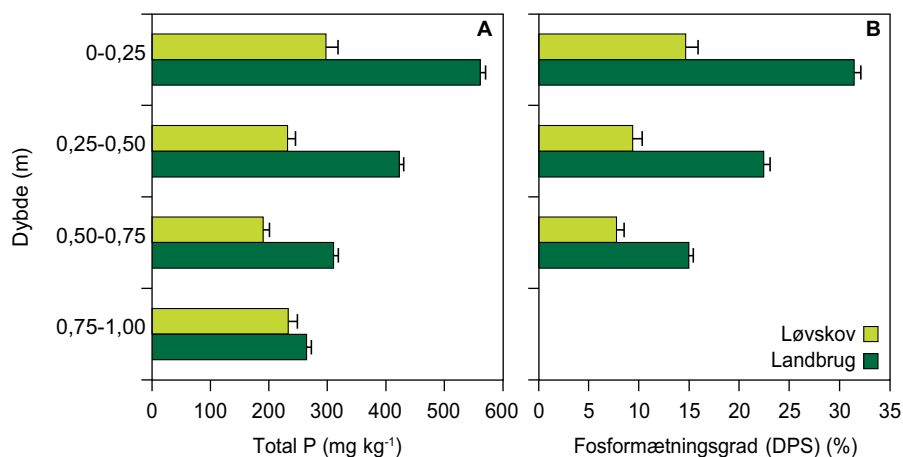
Figur 3.5. Udviklingen i fosfortallet fra 1987 til 2014 som gennemsnit for hele landet og for de to områder, der har henholdsvis de højeste (Vestjylland) og de laveste (Østlige øer) gennemsnit. Østlige øer omfatter Sjælland, Lolland, Falster og nærliggende mindre øer. Data stammer fra landmændenes jordbundsanalyser de pågældende år. Data er løbende blevet publiceret i "Oversigt over Landsforsøg" udgivet af SEGES. For dette arbejde er det samlede datasæt stillet til rådighed af Leif Knudsen, SEGES. Repræsentativiteten af data har formentlig ændret sig gennem tiden, da der generelt analyseres færre jordprøver i dag end der gjorde før i tiden.

3.5.2 Fosformålinger i KVADRATNETTET i 1986 og 1997

KVADRATNETTET, som drives af SEGES blev etableret i 1986 til bestemmelse af jordens indhold af uorganisk kvælstof og siden er der årligt udtaget prøver fra landbrugsarealerne. KVADRATNETTET består af ca. 830 fastliggende måleflader på 50 x 50 m systematisk fordelt over hele landet med en gridafstand på 7 km; 590 af fladerne findes på landbrugsarealer. For hver måleflade kendes arealanvendelsen, og for landbrugsfladerne registreres diverse dyrkningsmæssige parametre årligt i en database. Jordprøver fra fladerne er udtaget som blandingsprøver for hver 25 cm indtil 1 meters dybde. I 1998 - 2000 blev udvalgte arkiverede jordprøver fra 1986 og 1997 analyseret for fosforindhold og fosformætningsgrad (Rubæk et al., 2000; Rubæk et al., 2013).

I alt 337 måleflader fra landbrugsjord og 32 måleflader fra løvskov indgik i denne undersøgelse. Fordelingen af målefladerne på jordtyper og gødsningspraksis er beskrevet i Rubæk et al. (2000). Målefladerne fra løvskov er medtaget som en slags referencejorde, der ikke eller kun i ringe omfang har været udsat for gødsning. Fosforanalyserne blev lavet i 2 runder. I første analyserunde blev de to øverste jordlag af alle måleflader i 1986 og 1997/98 analyseret for totalfosfor og $0,5 M NaHCO_3$ (P_{tal}). Anden analyserunde omfattede dels måling af totalfosfor og Pt i de to dybere jordlag (50-75 cm og 75-100 cm), dels analyser af fosformætningsgrad (van der Zee et al., 1990) og fosfor ekstraheret med vand (jord:væskeforhold 1:50, Sissingh, 1972). Der indgik et mindre antal måleflader i anden analyserunde, da vi dels fravalgte flader, hvor informationer om fosfortil- og bortførsel var mangelfulde, og dels ikke havde jord nok til yderligere analyser - især var de fleste af jordprøverne fra 1986 opbrugt. Alle dybder fra 228 måleflader fra landbrug i 1997/98, alle dybder fra 24 landbrugsflader i 1986 og alle dybder fra 32 løvskovsflader i 1986 blev således analyseret i anden analyserunde. Herudover blev yderligere 43 jordprøver fra 0-25 cm fra landbrugsflader i 1986 analyseret. Begrænsninger i valg af måleflader til anden analyserunde påvirkede ikke fordelingen på jordtyper væsentligt. Dog er der for de i alt 67 måleflader fra 1986, hvor der er bestemt P mætningsgrad i 0-25 cm dybde, en overrepræsentation af JB1 og JB2 og en underrepræsentation af JB4 i forhold til første analyserunde.

Figur 3.6. Totalfosforindholdet ned til 1 meters dybde (A) og fosformætningsgraden til 75 cm dybde (B) i landbrugs- og løvskovsjorde ifølge undersøgelser på kvadratnetspunkter (Rubæk et al., 2001, 2013).

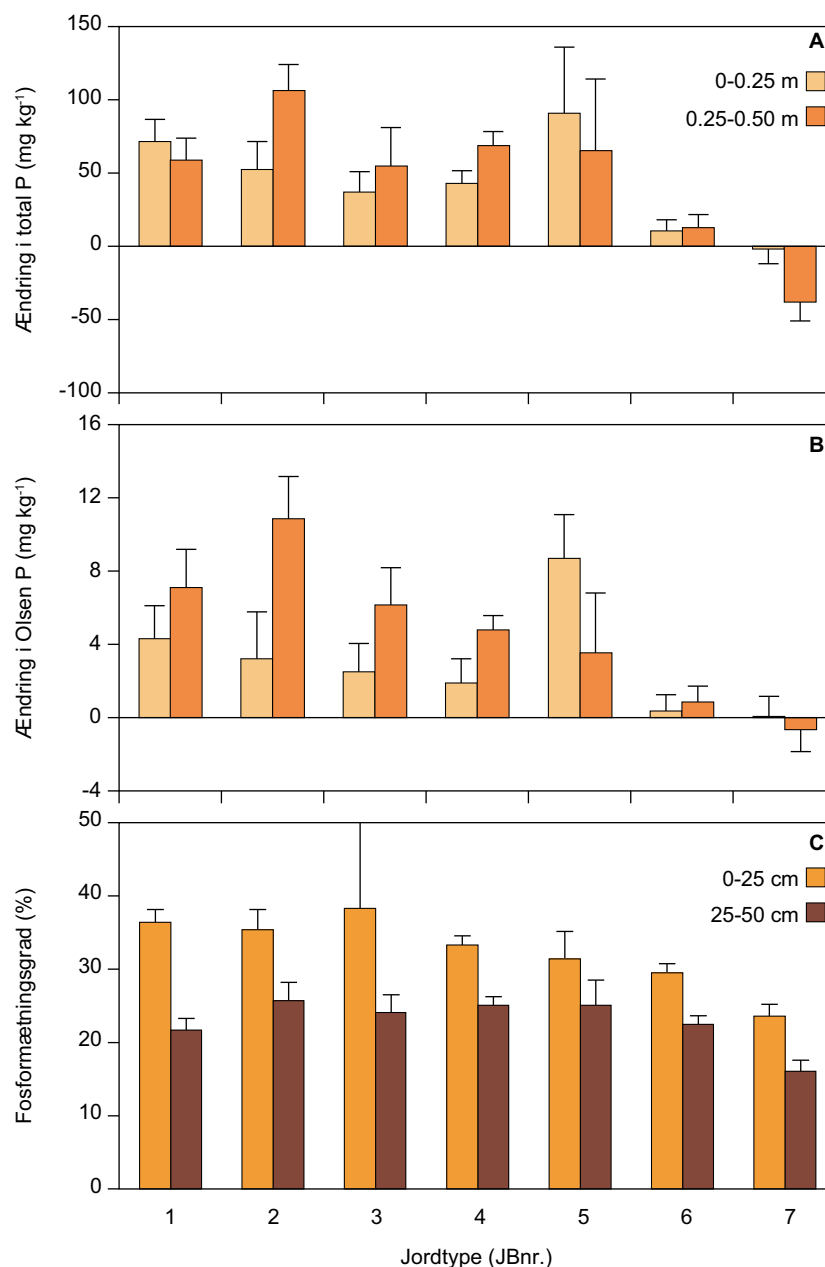


Da de samme punkter er analyseret med 11 års mellemrum, er det muligt at analysere ændringer i fosforstatus i denne 11 års periode og relatere disse til de registrerede oplysninger om drift og dyrkning i perioden. Herved har datasættet givet værdifuld indsigt i den faktiske fosforstatus i dyrkede danske jorde, og denne status er også blevet relateret til fosforstatus i 32 måleflader fra løvskovsjord (figur 3.6). Af figuren ses, at både indholdet af totalfosfor og fosformætningsgraden er større på landbrugsjordene end i løvskovsjordene ned til 75 cm dybde.

Kvadratnets-undersøgelsen viser en markant stigning i jordens totale indhold af fosfor i løbet af en tiårsperiode fra 1986 til 1997/98. Denne stigning fandt vel at mærke i lige så høj grad sted under pløjelaget (14,3 kg fosfor/ha årligt i 25 - 50 cm dybde) som i selve pløjelaget (11,5 kg fosfor/ha årligt i 0 - 25 cm dybde). Den store stigning i underjordens indhold af totalfosfor er også et klart tegn på, at overjorden i mange tilfælde ikke længere er i stand til at tilbageholde fosfor i samme grad som tidligere (Rubæk et al., 2000).

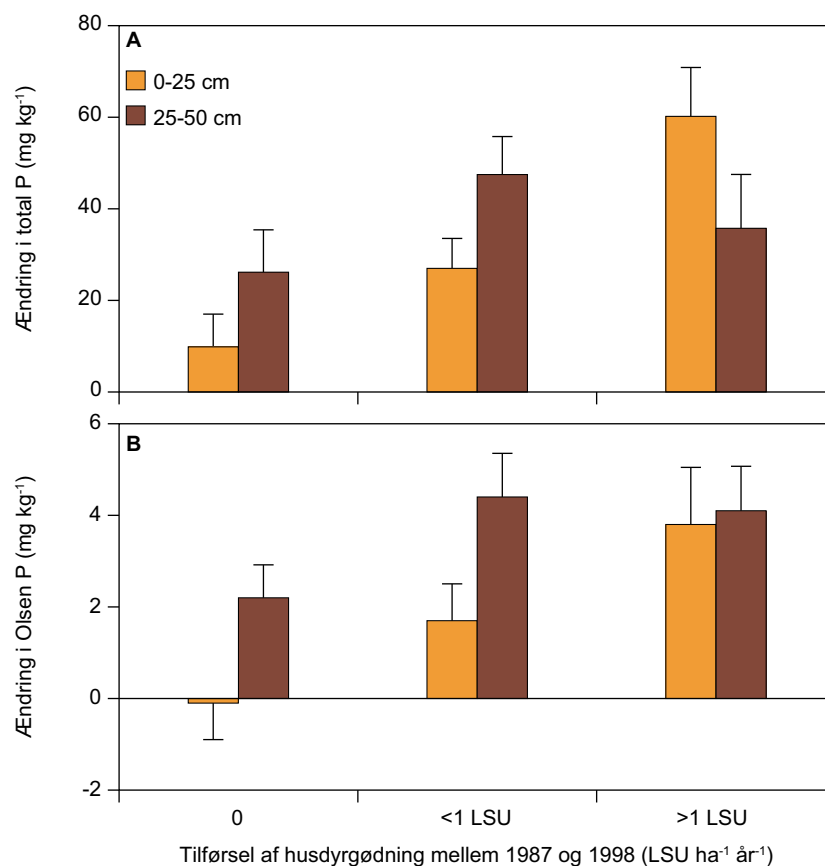
Fosformætningsgrad samt ændringer af både totalfosfor og Olsen P i jord varierer fra jordtype til jordtype. Figur 3.7 viser den gennemsnitlige ændring i totalfosfor og Olsen P i perioden 1986 til 1997 og fosformætningsgraden i 1997 fordelt på jordtyper. Der var en generel tendens til, at stigningen i totalfosfor og Olsen P samt mætningsgraden i 1997 var større i de mere sandede jorde, medens JB6 og JB7 generelt havde yderst moderate ændringer i total P og Olsen P og moderate mætningsgrader. I JB7 i 25 - 50 cm dybde var fosforindholdet faldende. Dette skyldes sandsynligvis, at denne jordtype er dominerede på de egne af landet, hvor der kun udbringes lidt husdyrgødning, og nettotilførslen af fosfor i måleperioden har været lille eller negativ. Pløjning dybere end 25 cm kan have medført, at fosforrig overjord er blandet ned i dybde 25 - 50 cm. Beregninger viste dog, at i langt de fleste tilfælde kan pløjning til 30 cm dybde kun forklare en mindre del af den stigning i fosforindhold, vi ser i dybde 25 - 50 cm. Ligeledes vurderes, at bioturbation (jordlevende dyrs aktiviteter) kun i lille omfang har bidraget til fosforberigelse i underjorden i måleperioden (Rubæk et al., 2013). Erosion, specielt jordbearbejdningserosion, kan også have påvirket dybden af pløjelaget i måleperioden, men da denne proces vil kunne påvirke tykkelsen af det øverste jordlag både i positiv og negativ retning, mener vi ikke, at den vil kunne bidrage til at forklare de generelle stigninger af fosforindholdet i dybden 25 - 50 cm. Vi konkluderer derfor, at stigningen i totalfosfor i 25 - 50 cm dybde i høj grad skyldes nedvaskning af fosfor fra overjorden.

Figur 3.7. Ændring i total P og Olsen P mellem 1986 og 1997 (a, b) og fosformætningsgraden i 1997 (nederst) i landbrugsjorde på Kvadratnettpunkter i to dybder fordelt på jordtyper (JB numre) (Rubæk et al., 2001).



Betydningen af husdyrintensiteten for udvikling af fosforstatus i jord kan direkte ses i figur 3.8. I pløjelaget steg ændring i Olsen P og totalfosfor på kvadratnettpunkter i måleperioden med stigende husdyrintensitet. Dette er i overensstemmelse med, at husdyrbedrifter på grund af foderimporter og husdyrgødningsudbringning typisk har betydeligt større nettotilførsel af fosfor end planteavlsbedrifter (se tabel 2.1). Derimod var der ingen klar sammenhæng mellem husdyrintensitet og ændring af Olsen P eller totalfosfor i underjorden, som antyder at andre, sandsynligvis transport-relaterede processer, kontrollerer fosforophobning i underjord. Sammenfattende kan en større stigning i fosforindhold og højere fosformætningsgrader på de mere sandede jorde derfor forklares med den rumlige fordeling af husdyrproduktionen i Danmark, hvor de sandede jord ofte tilføres større mængder husdyrgødning.

Figur 3.8. Ændring i total P og Olsen P mellem 1986 og 1997 i landbrugsjorde på Kvadratnets-punkter i to dybder i forhold til husdyrintensiteten (dyrenheder, LSU ha⁻¹) (Rubæk et al., 2001).



3.5.3 Totalfosforindhold i jord på KVADRATNETTET og det akkumulerede fosforoverskud

Figur 1.4 viser det årlige fosforoverskud i det 20. århundrede. Summeret for perioden frem til 1998 er overskuddet på ca. 4.000.000 t fosfor, svarende til ca. 1,4 t fosfor pr. ha landbrugsjord (ekskl. brak). Til sammenligning viser opgørelser fra kvadratnettet (Rubæk et al., 2013), at landbrugsjorderne i Danmark i gennemsnit indeholder ca. 4,8 t totalfosfor pr. ha, mens løvskovsjorde, som må antages at have været udenfor landbrugsmæssig drift, indeholder ca. 2,5 t totalfosfor pr. ha indtil 75 cm dybde (under 75 cm dybde var der ikke forskel på fosforindholdet i landbrugs- og løvskovsjorde). Dvs. forskellen i fosforindhold, som er et udtryk for den landbrugsbetingede ophobning i jorden gennem tiden, er ca. 2,3 t totalfosfor pr. ha. Sammenlignes denne talstørrelse med det summerede fosforoverskud fra dansk landbrug i det 20. århundrede på 1,4 t fosfor pr. ha, som må antages i overvejende grad at være ophobet i landbrugsjorden, ses at denne ophobning svarer til ca. 75 % af forskellen i fosforindhold i de undersøgte jorde med og uden landbrugsdrift. Taget usikkerhederne i betragtning må de to tal siges at være i samme størrelsesorden. De resterende ca. 25 % kan bl.a. skyldes naturbetingede forskelle i jordens fosforindhold på de arealer, der er opdyrket til landbrug, og de arealer, der gennem mange år har været dækket af løvskov eller, at der gennem tiden måske har været en større udpining af løvskovsjordernes- end af landbrugsjordernes naturlige fosforindhold. Derimod har det nationale fosforoverskud før år 1900 antageligt været ubetydeligt. Der kan endog have været tale om et beskedent fosforunderskud, idet eksporten af fosfor i fødevarer har været større end importen af fosfor, der stort set var lig nul før den begyndende import af fosforgødninger i tiårene op mod år 1900.

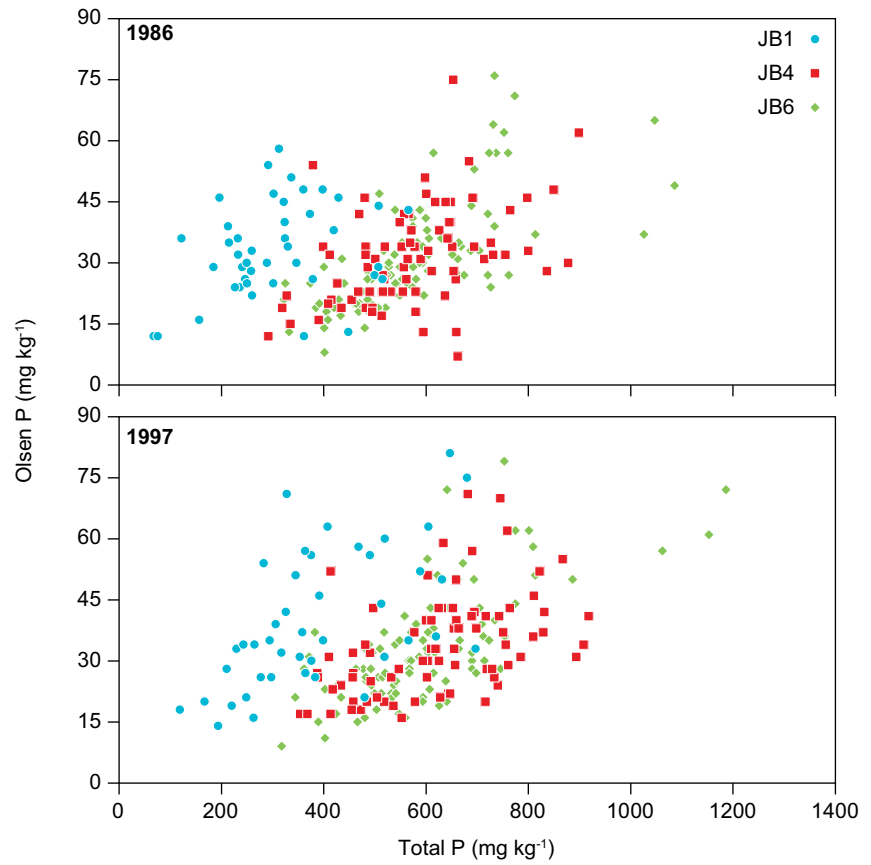
Da fosforophobningen i landbrugsjord har fundet sted over lang tid, med forskellige årsager, og løbende har ændret profil i takt med strukturændringerne i landbruget, er det meget vanskeligt at redegøre for fosforophobningen på den enkelte mark ud fra registerdata og statistiske oplysninger om regionen og landbrugsdriften gennem tiderne. Kendskab til den samlede historiske fosforophobning på markniveau forudsætter kendskab til tilførsler af både husdyr- og handelsgødning og til bortførslerne med afgrøderne langt tilbage i tiden. For at opnå operationel viden om fosforophobningen og den resulterende fosformætningsgrad, og i forbindelse med udpegning af risikoarealer for fosfortab på mark eller delmarkniveau, er det derfor nødvendigt at have kendskab til markens fosforindhold. Så detaljerede oplysninger kan i praksis kun opnås med tilstrækkelig sikkerhed ved en måling af jordens fosfor.

3.6 Hvordan hænger Total P, Olsen P og mætningsgrad sammen?

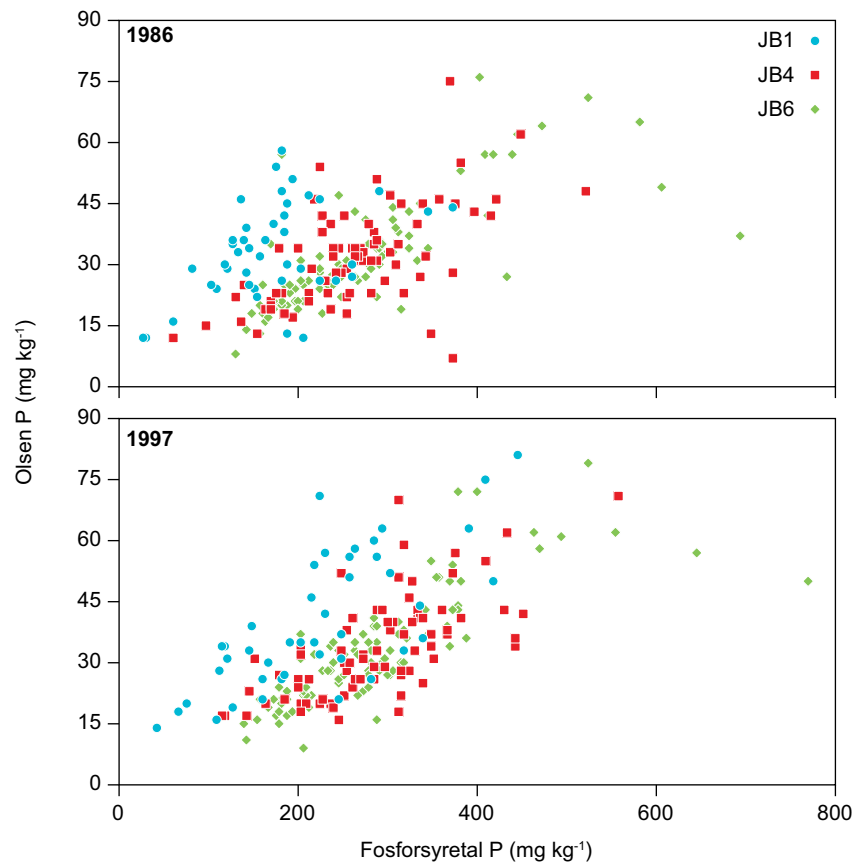
Generelt kan der ofte ses en stærk positiv sammenhæng mellem Olsen P og Total P. Data fra Kvadratnettet eksemplificerer dette (figur 3.9). Olsen P ekstraherer en betydelig del af den ombyttelige pulje af uorganisk fosfor, der er plantetilgængeligt indenfor vækstsæsonen. I takt med stigende indhold af Total P observeres der på grund af dynamiske ligevægte mellem forskellige fosforpuljer i jord (se tidligere i kap 3) også en stigning af Olsen P, som ligger i gennemsnittet på mellem 4 % og 6 % af stigning af Total P. Figur 3.9 viser, at jordtype kan have en betydning for sammenhængen mellem Olsen P og Total P. Således ekstraheres en større andel af Total P med Olsen P i JB1 end i både JB4 eller JB6. Årsagen er endnu ikke specifikt undersøgt, men kunne skyldes forholdsvis lavere bindingskapacitet i JB1, gennemsnitligt svarende til henholdsvis 60 % og 70 % af fosforbindingskapaciteten i JB4 og JB6. Samtidig er den gennemsnitlige mætningsgrad i disse JB4 og JB6 jorde henholdsvis 9 % og 16 % mindre end i JB1 jordene. Sammenhængene synes at være uafhængige af tidspunktet for prøveudtagningen (figur 3.9).

En del af spredningen i Olsen P vs Total P relationen skyldes, at jordene har varierende andele af organisk fosfor i Total P fraktionen, mens organisk P er af meget lille betydning for Olsen P. Fosforsyretal er en metode tidligere brugt til at måle plantetilgængeligt fosfor i Danmark og er bestemt på Kvadratnet-prøverne. Fosforsyretal ekstraherer en stor del af det uorganiske fosfor i jord, men næsten intet organisk bundet fosfor. I overensstemmelse med ligevægtsmodellen for uorganisk bundet fosfor i jord er Fosforsyretal generelt bedre til at forklare variationer i Olsen P end Total P (figur 3.10).

Figur 3.9. Sammenhæng mellem Olsen P og total P for jordprøver udtaget på Kvadratnettet i 0 – 25 cm dybde i 1986 og 1997.

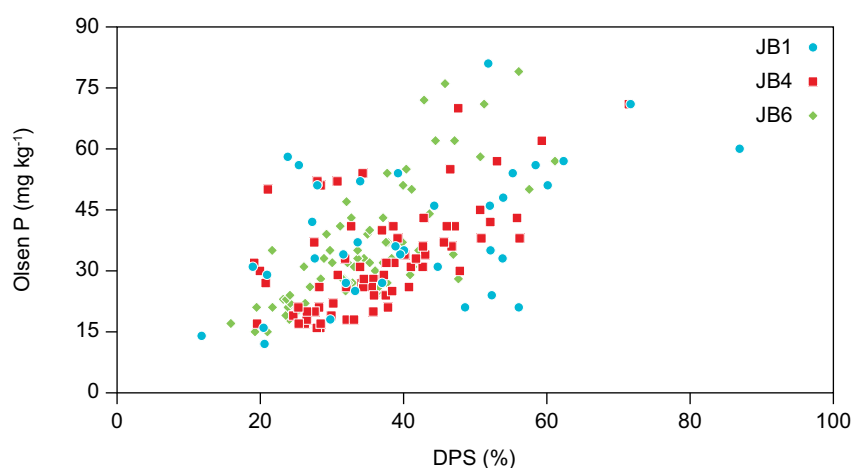


Figur 3.10. Sammenhæng mellem Olsen P og Fosforsyretal for jordprøver udtaget på Kvadratnettet i 0 – 25 cm dybde i 1986 og 1997. Jordprøverne er de samme som i figur 3.9.



Der er en stærk positiv korrelation mellem Olsen P og fosformætningsgrad på tværs af jordtyper (figur 3.11). Ved en stigende fosformætningsgrad bliver flere bindingspladser på jordpartiklerne besat med fosfor. Dermed stiger sandsynligheden for, at fosfor frigives igen til en vandig fase, eller som det siges, fosfor bindes mindre hårdt. Olsen P ekstraherer i høj grad fra denne pulje af let-ombytteligt fosfor, hvilket forklarer den høje korrelation i de observerede intervaller for henholdsvis bindingskapacitet og Olsen P. Der er dog også en betydelig spredning af Olsen P for en given fosformætningsgrad (figur 3.10), som sandsynligvis er relateret til mange specifikke forhold der har betydning for fosforbinding og frigivelse i en given jord.

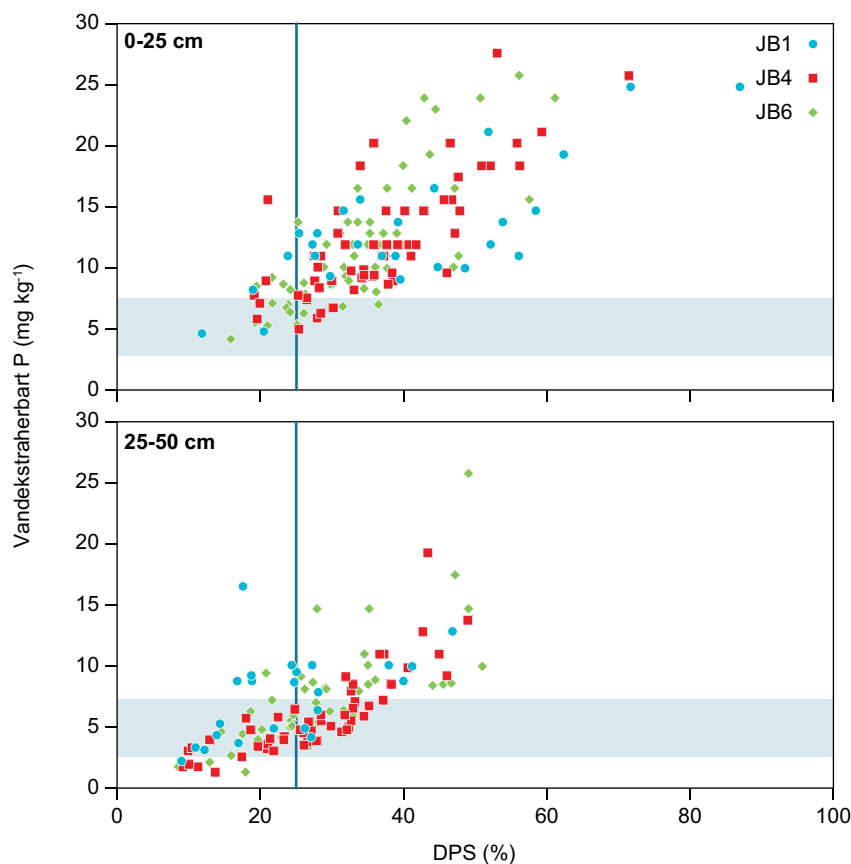
Figur 3.11. Sammenhæng mellem Olsen P og fosformætningsgrad (DPS) for jordprøver udtaget på Kvadratnettet i 0 – 25 cm dybde i 1986 og 1997.



3.7 Hvad er en kritisk mætningsgrad?

I Kvadratnets-undersøgelsen indgik også ekstraktion af jordprøverne med vand. Denne ekstraktion kan bruges som en indikation for, hvor meget fosfor jorden kan frigive til jordvandet, som er direkte relevant i forbindelse med udvaskning af opløst uorganisk fosfor (Blaauw et al., 1988). Figur 3.12 viser, at der er en tydelig sammenhæng mellem mængden af vandekstraherbart fosfor og fosformætningsgrad i både over- og underjord. En kritisk fosformætningsgrad (DPS) er defineret som der, hvor jorden er så mættet, at den understøtter en fosforkoncentration i jordvæsken, som er højere end ønskeligt, f.eks. i forhold til udvaskning til vandmiljøet. I Holland har man anvendt koncentrationen 0,1 mg fosfor pr. liter, da man her vurderede denne koncentration som værende kritisk for vandkvaliteten (van der Zee et al., 1990). Denne koncentration i jordvæsken overstiges typisk ved en mætningsgrad af 25 % under hollandske forhold (Breeuwsma & Silva, 1992). Disse kritiske værdier er indikeret i figur 3.12, men det må understreges, at de ikke umiddelbart kan overføres til danske forhold. En kritisk fosforkoncentration i vand, der forlader marken, er ikke fastlagt i forbindelse med belastning af danske overfladevandsområder. Grundlæggende mangler der systematiske data for med tilfredsstillende sikkerhed at kunne beskrive det specifikke sammenhæng mellem mætningsgrad og fosforudvaskning i danske jorde og under danske forhold.

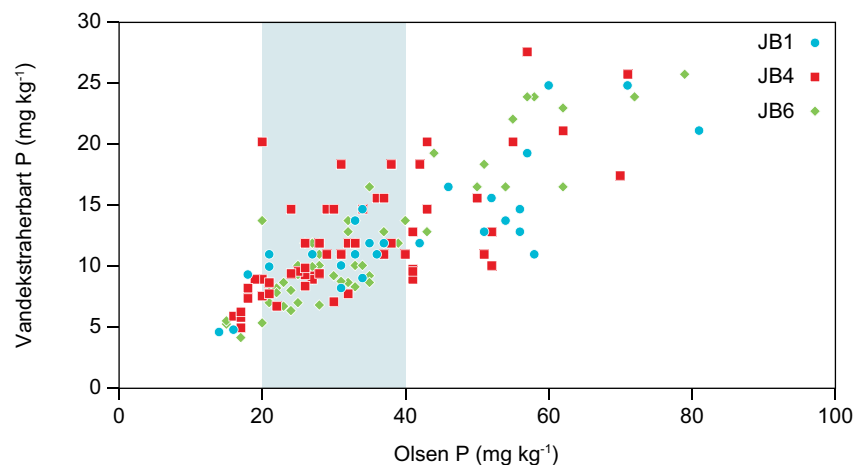
Figur 3.12. Vandekstraherbart fosfor som funktion af fosformætningsgraden (DPS) for jordprøver udtaget på Kvadratnettet i 1997 fra dybderne 0 – 25 cm (øverst) og 25 – 50 cm (nederst). Den lodrette linje ved 25 % DPS angiver den mætningsgrad, som anses for kritisk i Holland. Den vandrette bjælke angiver det omtrentlige interval, hvor der ifølge hollandske undersøgelser kan forventes en jordvæskekoncentration mellem 0,1 og 0,5 mg P l⁻¹ (Blaauw et al., 1988; Chardon og van Faasen, 1999).



Når fosforberiget jordvand siver fra pløjelaget ned til dybere jordlag vil en del af fosforet bindes til underjordens overflader på jordpartikler. En høj fosformætningsgrad i pløjelaget fører derfor ikke nødvendigvis til en øget fosforbelastning af vandløb og søer, medmindre der er en effektiv hydrologisk eller vindbetinget forbindelse mellem pløjelaget og vandløb eller sø. Det er imidlertid væsentligt at få fastlagt, hvor dybt et jordlag, der medvirker til at fastlægge fosfor, og hvor høje mætningsgrader forskellige jordlag kan tåle at have, før det må anses for kritisk for fosforudvaskningen for forskellige danske jordtyper og regioner. Ved fastsættelse af sådanne dybder bør blandt andet dræningsforhold og anden hydrologisk forbindelse mellem jordlagene og vandløb tages i betragtning. På baggrund af sammenhængen mellem vandekstraherbart fosfor og fosformætningsgrad i danske jorde (figur 3.12), må der dog antages, at en kritisk mætningsgrad med hensyn til udvaskningsrisiko er opnået på en række lokaliteter, især når der er mulighed for makroporetransport (kapitel 4). På nuværende tidspunkt er det dog ikke muligt at udpege disse lokaliteter under inddragelse af fosformætningsgraden. Kortlægning af mætningsgraden med rimelig sikkerhed i Danmark vil kræve et meget stort antal analyser for fosformætningsgrad, som er en relativ dyr analyse.

Vi har tidligere set, at fosformætningsgraden og Olsen P er tæt korreleret (figur 3.11), og der findes derfor også en klar sammenhæng mellem vandekstraherbart fosfor og Olsen P (figur 3.13). Denne sammenhæng er fordelagtig, da Olsen P, som er en billig metode og som i forvejen udføres på mange tusinde jordprøver i Danmark hvert år, vil kunne bruges som en nøgleparameter i en bred vurdering af risiko for fosforudvaskning frem for fosformætningsgraden. Dette støttes af internationale studier (Hooda et al., 2000; Casson et al., 2006). En hindring for anvendelsen til risikovurdering af de mange Olsen P analyser, som landmændene får gennemført, er dog den manglende offentlige tilgængelighed af disse data.

Figur 3.12. Vandekstraherbart fosfor som funktion af Olsen P for jordprøver udtaget på KVA-DRATNETTET fra dybden 0 – 25 cm i 1997. Den lodrette bjælke angiver det dyrkningsmæssigt anbefalede niveau for Olsen P.



3.8 Kan sammenhænge mellem P balancen og udvikling i Total P eller Olsen P beskrives kvantitativt?

På nuværende tidspunkt findes der ingen model anvendelig under danske forhold, der beskriver sammenhænge mellem fosforbalancen og udvikling i Total P eller Olsen P. Selvom data fra KVADRATNETTET i princippet vil kunne bruges til at undersøge sådanne sammenhænge, har beregningerne af fosforbalancen for kvadratnetpunkterne vist sig at være behæftet med for mange manglende observationer og for stor usikkerhed. Derfor er der ikke lavet egentlige fosforbalanceberegninger i den ovenfor beskrevne Kvadratnetsundersøgelse.

Principielt er der en simpel og ligefrem sammenhæng mellem totalfosforindholdet i en jord og fosforbalancen, men den er alligevel vanskelig at anvende i praksis. Det skyldes især, at de forskydninger, der forventes i jordens Total P indhold som respons på de typisk relativt beskedne positive eller negative trends i P balancen, vi opererer med i dag (kapitel 1), vil være ganske små og ikke detekterbare, medmindre man arbejder med tidsintervaller på flere dekader. Samtidig viser Kvadratnetsundersøgelsen, at det ikke vil være tilstrækkeligt kun at inddrage pløjelaget i betragtningerne, da der jo også kan ske ganske betragtelige forskydninger i underjordens Total P indhold på blot en dekade (fig. 3.7 og 3.8).

De sammenhænge, der forventes at være mellem fosforbalance og fosfortal, er næppe simple. Foreløbige undersøgelser tyder f.eks. på, at sammenhænge er jordtypespecifikke (Kristensen, upubliceret). Der arbejdes på at få ressourcer til at forsætte indsatsen på at få sammenhænge beskrevet. Ideerne er p.t. inkluderet i en større projektansøgning (Baltic Phoenix).

3.9 Videnudvikling vedrørende fosfortilførsel, udvikling af jordens fosforindhold og betydning for fosforbinding og frigivelse

Analyser af jordprøver i KVADRATNETTET har givet væsentligt indblik i skæbnen af gødningsfosfor i danske jorde under realistiske produktionsforhold i perioden 1986 til 1997 og har det muliggjort at pege på nogle trends, der er yderst relevante for både planternes langsigtede fosforsyning og risiko for fosfortab (kapitel 3.1.2). Siden 1997 er der naturligvis sket en yderligere udvikling i den nationale og de regionale fosforbalancer og i de dyrkningssystemer, der er fremherskende i Danmark. En opfølgning på de tidli-

gere analyserunder i KVADRATNETTET vil således give en enestående mulighed for at belyse konsekvenser af disse tiltag/ændringer og generere viden om de langsigtede trends for fosfor i dansk landbrugsjord. Der er allerede udtaget et komplet sæt af jordprøver på kvadratnetsfladerne i 2008/09, der vil kunne anvendes i en ny analyserunde tilsvarende de forgående. Samtidig foreslås der en supplerende udtagning af uforstyrrede jordprøver på udvalgte punkter til at gennemføre standardiserede udvaskningsforsøg der kan karakterisere fosforudvaskningsrisikoen.

Der er flere hovedformål med den nye analysekampagne:

1. Systematisk at undersøge udviklingen af vigtige fosforfraktioner i jord i relation til gødsknings- og dyrkningspraksis for perioden 1986 til 2009. Dette er en fortsættelse af den tidligere monitoring og vil dokumentere betydning af dansk landbrugs håndtering af fosfor for fosforstatus i jord.
2. At udvikle modeller, der beskriver ændring af især Olsen P som funktion af fosforbalance og jordegenskaber. Både landbruget og myndigheder efterspørger disse modeller.
3. At måle fosforfordeling i jordprofiler og systematisk undersøge, hvordan fosforbalance og dyrkningspraksis påvirker flytning af fosfor i jordprofilen. Undersøgelsen vil teste, om den tidligere fundne omlejring af fosfor til underjorden kan bekræftes. Dette er relevant for en overordnet forståelse af konsekvenser for fosforets mobilitet og dets langsigtede tilgængelighed som plantenæringsstof i jordprofilen.
4. At gennemføre systematiske udvaskningsforsøg i uforstyrrede jordprøver fra udvalgte kvadratnettpunkter. Dette forsøg afdækker sammenhængen mellem fosforstatus i jord, jordegenskaber og fosforudvaskning. Udvasningspotentialer for fosfor er kun undersøgt på en snæver gruppe af jorder i kolonne- eller drænforsøg, eller ved hjælp af stedfortrædermålinger såsom vandekstraherbart fosfor. Direkte udvaskningsmålinger er påkrævet til vurdering af udvaskningspotentialer og til bredere verificering af procesbaserede modeller som PLEASE.
5. Ved også at udføre sorptionsforsøg på nøje udvalgte jorde vil der kunne etableres et katalog af danske sorptionsparametre til brug ved PLEASE-modellering (Langmuir-parametre som nævnes i kapitel 4).

Analyserne kan udføres ved Institut for Agroøkologi, hvorved det sikres, at der benyttes præcist de samme metoder som ved foregående studier. Dette er en forudsætning for at opnå en god sammenligning over tid. Agroøkologi har også udviklet en standardprotokol til at gennemføre kolonneudvaskningsforsøg, som muliggør praktisk håndtering af det nødvendige prøveantal. Ved at analysere flere punkter med oxalatmetoden, hvorudfra jordens fosforbindingskapacitet kan estimeres, vil der kunne skabes et væsentligt bedre kortlægningsgrundlag end det nuværende. Ved første P analyseprojekt blev kun 226 punkter analyseret med oxalatmetoden, men der er i alt omkring 600 kvadratnettpunkter på landbrugsjord.

4 Tab af fosfor fra dyrkningsjorden

4.1 Baggrundskoncentration af fosfor i vandløb

4.1.1 Indledning

Tab af fosfor fra landbrugsjord til vandmiljøet kan ske ved vand-, vind- og jordbearbejdningserosion, ved overfladeafstrømning, brinkerosion og ved udvaskning til dræn og overfladenært grundvand. Fosfor kan tabes som opløst og partikulært bundet organisk eller uorganisk fosfor. I hvilke mængder de forskellige fosforformer tabes varierer for forskellige tabshændelser.

Fosfor i vandmiljøet kan opdeles i hhv. uorganisk og organisk partikulært bundet fosfor og uorganisk og organisk opløst fosfor. Der findes ingen klar grænse mellem partikulært og opløst fosfor. Ofte defineres opløst fosfor som den fosfor, der kan passere et 0,45 µm membranfilter. Dette medfører, at små partikler og kolloider indeholdende fosfor medtages i den opløste fraktion. I det akvatiske miljø kan der endvidere forekomme omsætninger mellem fosforformerne: partikulært organisk fosfor dannes ved primærproduktion af phytoplankton og ved bl.a. bakteriers optag af opløst fosfor, mens partikulært uorganisk fosfor kan dannes ved sorption af opløst fosfor på metalioner (Ca, Al, Fe, Mn). Omvendt kan der frigives opløst uorganisk fosfor fra Mn-, Al-, og Fe-rige sedimenter under anaerobe forhold.

4.2 Udvasning af fosfor

4.2.1 Koncentration af fosfor i vandløb

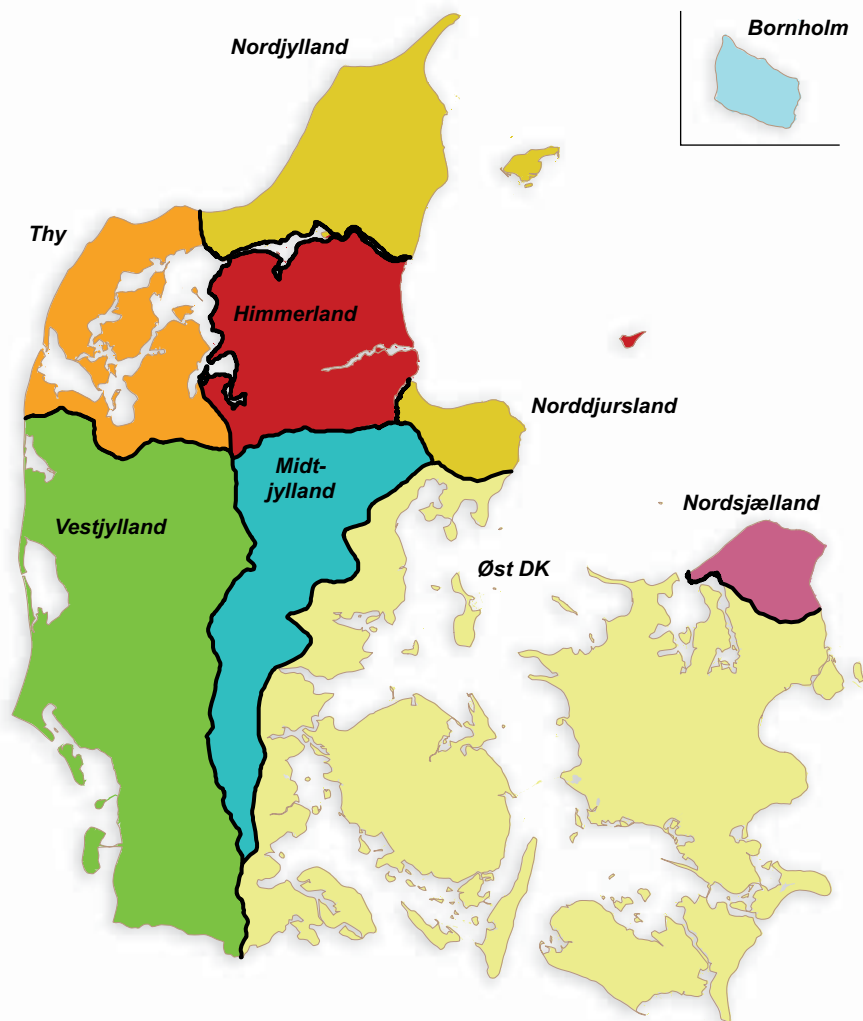
Bøgestrand et al. (2007) har estimeret baggrundskoncentration af fosfor (total opløst fosfor) i vandløb opdelt på georegioner, figur 4.1. Baggrundskoncentrationen beskriver den koncentration, der ville være, hvis der ikke er væsentlige påvirkninger fra andre kilder (landbrug og punktkilder). Baggrundskoncentrationen varierer mellem 0,011 og 0,071 mg P l⁻¹ og er specielt høj i Himmerland, men også forhøjet i Thy og Nordsjælland. Koncentrationen af ufiltreret totalfosfor i vandløb (n = 76), der afvander dyrkede oplande uden punktkilder var i 2014 knap 0,1 mg P l⁻¹ (Bøgestrand, pers kom).

4.2.2 Udvasning af fosfor via matrix-strømning og makroporestrømning

Som beskrevet ovenfor (afsnit 3) viser mange danske landbrugsjorde en betydelig fosformætningsgrad og dermed en aftagende bindingskapacitet for fosfor i det øverste jordlag. Samtidig har mange jorde dog fortsat en stor bindingskapacitet i underjorden. I visse tilfælde bindes mobiliseret fosfor alligevel ikke i underjorden, når det nedvaskes. Det kan skyldes præferencestrømning eller "bypass flow", hvor fosfor føres med hurtigt strømmende vand i kontinuerte, store porer i jorden (makroporer, diameter større end 75 µm). Kontinuerte makroporer, som udgøres af sprækker, regnormegange og gamle rodkanaler, kan transportere opløst og partikelbundet fosfor hurtigt ned uden den nødvendige tidslige og rumlige kontakt med underjordens matrice, der kunne muliggøre en fosforbinding.

Total opløst fosfor ($\mu\text{g/l}$)

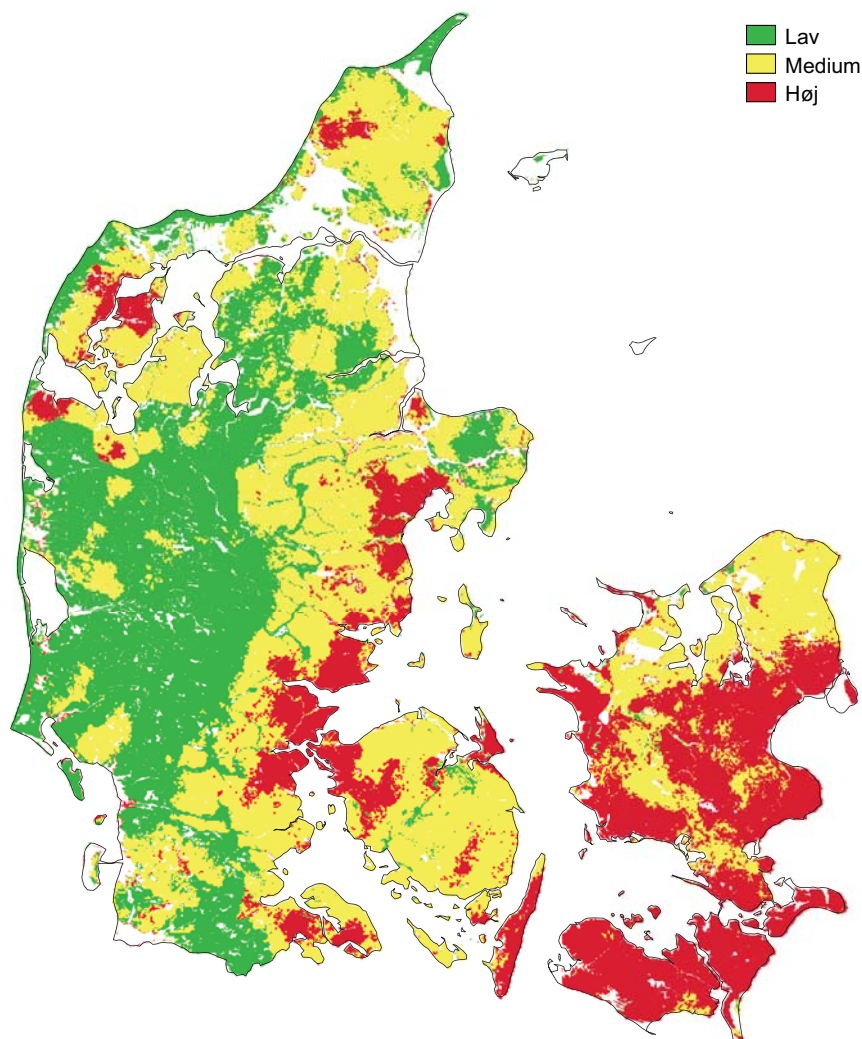
- 11 – Bornholm
- 37 – Djursland
- 71 – Himmerland
- 22 – Midtjylland
- 37 – Nordjylland
- 51 – Nordsjælland
- 40 – Thy
- 25 – Vestjylland
- 36 – Østdanmark



Figur 4.1. Baggrundskoncentrationer (vandføringsvægtede) af total opløst fosfor i vandløb i georegionerne (Bøgestrand et al., 2007).

Stabile makroporer findes især på strukturerede lerjorde. Jørgensen et al. (submitted) påviste ved tilførsel af farvestof til jordoverfladen på en sandblandet lerjord (JB 6) og efterfølgende udgravning af jordprofilen forekomst af hurtige, præferentielle strømningsveje fra jordoverfladen og ned til mere end 4 m's dybde. Pedersen et al. (2013) påviste tilstedeværelse af sammenhængende, meget effektivt ledende makroporeforbindelser mellem jordoverflade og dræn på en sandblandet lerjord. Direkte drænforbundne makroporer kunne ved jordoverfladen lokaliseres til ét ca.1 m bredt bælte over drænledningerne med flest forekomster direkte over drænet. Dette indikerer, at kun en mindre del af marken bidrager med makroporestrømning til dræn. Makroporetransport initieres kun, når jorden er tæt ved fuld vandmætning, og derfor er både jordens struktur/porøsitet, dens hydrauliske egenskaber og fugtighed i kombination med nedbørsintensiteten afgørende for, hvor og hvornår makroporetransport opstår. I forbindelse med udvikling af et dansk fosfor-indeks har Iversen et al. (2009) på grundlag af kortlagte jordbundsegenskaber og hydrologisk modellering udarbejdet landsdækkende kort, der viser områder, hvor der er mulighed for forekomst af aktive makroporer, figur 4.2. Makroporestrømning og fosfortransport på strukturerede danske lerjorde er undersøgt i en række laboratorieforsøg (Jensen et al., 1999; Jensen et al., 2000; de Jonge et al., 2002; Magid et al., 1999; Glæsner et al., 2013; de Jonge et al. 2004), på jorde med varierende struktur (Glæsner et al., 2011a, b og c) og i kontrollerede markforsøg på små arealer (f.eks. Laubel et al., 1999; Schelde et al., 2006).

Figur 4.2. Klasseinddelt kort for risikoen for vandtransport i jordens makroporer (efter Iversen et al., 2009).



Fosfordrivning i sandjorde er mindre godt undersøgt under danske forhold. Den vil formentlig variere betydeligt for forskellige typer af sandede jorde, specielt med variationerne i underjordens fosforbindingskapacitet, vandbevægelse og nærheden til et grundvandsspejl. Generelt forventes fosfordrivningen i sandede jorde at være præget af en mere ensartet vandbevægelse gennem større dele af underjordsmatricen, men præferencestrømning (*finger flow*) kendes også i sandjorde, om end den oftest vil have en anden karakter og et andet omfang end på lerjordene (de Jonge et al., 1999).

Lavbundsjarde adskiller sig fra højbundsjarde både mht. hydrologi og fosforbinding. Lavbundsjarde i landbrugsmæssig drift er typisk drænedede med rør eller grøfter og i visse tilfælde aktivt afvandede med pumper. Der findes ca. 900.000 ha lavbundsjord i Danmark. 107.000 ha af disse er organiske jorde med mindst 12 % organisk kulstof i de øverste 30 cm (jb 11). Heraf anvendes ca. 70.000 ha landbrugsmæssigt (Greve et al., 2014). Som følge af forskelle i geokemisk dannelse og geokemisk miljø samt forskelle i landbrugsdrift fandt Kjærgaard et al. (2009), at fosforindholdet i 50 undersøgte lavbundsjarde varierede fra 0,5 t P ha⁻¹ til 18 t P ha⁻¹ (til sammenligning er fosforindholdet i dyrkede højbundsjarde i KVADRATNETTET på gennemsnitligt 4,6 t ha⁻¹, kapitel 3.5.3). Selv detailafvandede lavbundsjarde oplever periodisk højt grundvandsspejl og fuldstændig vandmætning af jordprofilen. Under de reducerende forhold vil en del jern-oxider blive reduceret og jernet blive opløst, hvorved fosfat frigives og kan transporteres til vandmiljøet.

I det følgende gennemgås det tilgængelige datagrundlag vedrørende fosfor-nedvaskning til dræn, fosforudvaskning fra rodzonen og fosforkoncentrationer i det øvre grundvand.

4.2.3 Målinger af fosforudvaskning til dræn i Danmark

Nedvaskning af fosfor til dræn er blevet undersøgt siden 1980'erne, typisk ved regelmæssige stikprøvetagninger af drænvand. Kombineret med viden om drænastrømning og størrelsen af det drænede areal er disse resultater omsat til et beregnet fosfortab via dræn. Ofte er der kun målt på opløst uorganisk fosfor, mens opløst organisk fosfor og de ofte stærkt varierende bidrag af partikulært bundet fosfor er negligeret. Analyser har vist, at stikprøvetagning ofte stærkt undervurderer transporten af partikulært bundet fosfor, mens transport af opløst uorganisk fosfor var omtrent uafhængig af prøvetagningsstrategi (f.eks. Grant et al., 2002). Bilag 1 indeholder resultaterne af undersøgelser i 52 dræn.

Det gennemsnitlige tab af uorganisk opløst fosfor i de undersøgte dræn er 191 g P ha⁻¹ og medianværdien 45 g P ha⁻¹. På baggrund af fosforkoncentrationer og -tab i vandløb, der afvander dyrkede områder må de fleste fosforkoncentrationer og -tab fra de undersøgte, drænede højbundslande betegnes som lave. To dræn i Højer har dog meget høje fosfortab (2,5 – 3,8 kg P ha⁻¹). Der er her tale om marskjord, dvs. tidevandsaflejringer med et naturligt højt næringsindhold, i forholdsvis ny kultur (inddiget i 1981 og senere afvandet). Drænene i landovervågningsoplandene Højvads Rende, Oddebæk og Lillebæk, som repræsenterer en 25-årig måle-tidsserie, har også enkeltår med høje tab i forbindelse med høje vandafstrømninger (Blicher Mathiesen et al., 2015). De få lavbundslande, der er undersøgt, udviser alle store fosfortab med årgennemsnit mellem 0,5 og 5,6 kg TP ha⁻¹ og tab et enkelt år på 7 kg P ha⁻¹. Tabet af opløst uorganisk fosfor udgør som simpelt gennemsnit over alle de undersøgte dræn 53 % af tabet af totalfosfor.

Siden 2008 er der i 6 dræn i landovervågningsoplandene målt total fosfor på både ufiltreret og filtreret prøve (0,45 µm porestørrelse) samt uorganisk fosfor på den filtrerede prøve. Opløst organisk fosfor (som mere korrekt bør benævnes ikke-reaktivt fosfor, da det er fosfor, som ikke reagerer med molybdænbåt, som bruges som farvereagens i analysemetoden) er beregnet som forskellen mellem total opløst fosfor og opløst uorganisk fosfor. Partikulært bundet fosfor (både organisk og uorganisk bundet) er beregnet som forskellen mellem total fosfor på den filtrerede prøve og total opløst fosfor, tabel 4.1. Andelen af opløst organisk fosfor er i visse dræn ikke ubetydelig og udgør 6 – 38 % af total fosfor.

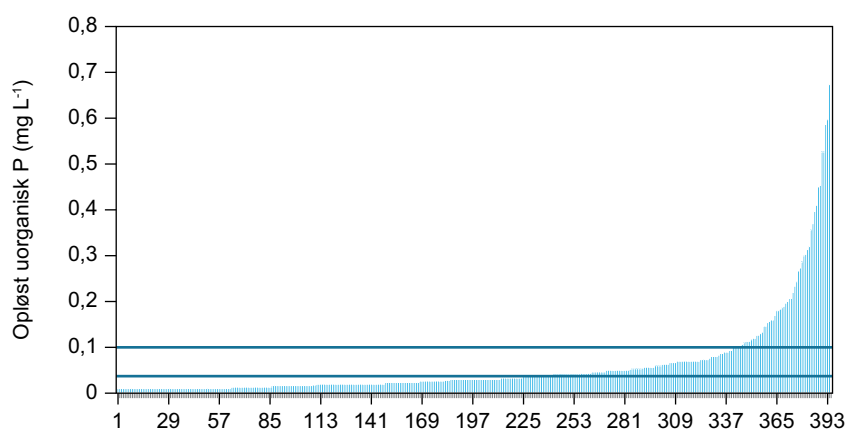
Opløst organisk materiale med indbygget fosfor produceres ved mikrobiel nedbrydning af især nyligt tilført organisk materiale (organisk gødning, plantemateriale, døde rødder). Nedbrydningen er styret af jordens temperatur, ilt- og vandindhold samt af kvaliteten af det organiske materiale. Opløst organisk materiale transporteres med nedsivende vand, men kan adsorberes til jorden humusfraktion og indgår i en ligevægt styret af koncentrationen i jordvæsken af opløst organisk materiale. Opløst organisk materiale kan desuden sorberes til jordens mineralske fraktion (lerpartikler) i binding med jern, aluminium og andre polyvalente kationer (Gjettermann, 2004). Hvor nogle typer fosforforbindelser (monoester-P som f.eks. fytinsyre) bindes til jorden på næsten samme måde som uorganisk fosfor, gælder det for andre organiske fosforforbindelser (diester-forbindelser mm.) at deres bindings-

forhold er helt anderledes, og betingelserne for transport af disse gennem jorden derfor anderledes end for uorganisk fosfor (Glæsner et al., 2011).

Tabel 4.1. Gennemsnitlige koncentrationer af opløst uorganisk fosfor, opløst total fosfor og ufiltreret total fosfor for perioden 2008/09 - 2013/14 i drænvand i landovervågningsoplandene. Opløst organisk fosfor er beregnet som forskellen mellem opløst total fosfor og opløst uorganisk fosfor, og partikulært fosfor (både organisk og uorganisk bundet) som forskellen mellem ufiltreret total fosfor og opløst total fosfor. I parentes er angivet fosfor-formens andel af total ufiltreret fosfor.

Drænaireal	Lerjorde		Lerjorde		Sandjorde
	Lave P konc.		Høje P konc		Lavbundsjord
Lokalitet	Storstrøm	Fyn	Storstrøm	Fyn	Nordjylland
Antal stationer	2	1	1	1	1
Målinger	Koncentration (mg P l^{-1})				
Total P	0,026	0,055	0,164	0,080	0,142
Opløst total P	0,023	0,048	0,163	0,053	0,073
Opløst uorganisk P	0,013 (50 %)	0,039 (71 %)	0,153 (93 %)	0,039 (49 %)	0,057 (40 %)
Beregnet					
Opløst organisk P	0,010 (38 %)	0,009 (16 %)	0,010 (6 %)	0,014 (18 %)	0,016 11 %
Partikulært P	0,003 (12 %)	0,007 (13 %)	0,001 (1 %)	0,027 (34 %)	0,069 (49 %)

I en større undersøgelse af 397 dræn er koncentrationen af opløst uorganisk fosfor målt minimum 3 gange i afstrømningsperioden 2012/13 (Piil og Knudsen, 2013), figur 4.3. Der kan ikke konkluderes om fosfortab på grundlag af undersøgelsen, da vandstrømningen ikke er målt, men den giver en indikation af variationen i fosforkoncentrationen i drænvand og af hvor hyppigt, der ses høje koncentrationer. Således har 15-20 % af drænene koncentrationer af opløst uorganisk fosfor højere end baggrundskoncentrationen af fosfor og på niveau med eller højere end koncentration i vandløb, der afvander dyrkede oplande. Høje koncentrationer forekommer især i Nordjylland, men også i Himmerland, Thy og Nordsjælland ses koncentrationer over $0,1 \text{ mg P l}^{-1}$ (Piil og Knudsen, 2013). De meget høje koncentrationer kan skyldes, at drænene tilføres vand fra marine aflejringer i undergrunden med et højt naturligt fosforindhold, eller at drænene afvander arealer med stor andel af organogene jorde med lav fosforbindingskapacitet.



Figur 4.3. Koncentrationer af opløst uorganisk fosfor i 397 dræn, drænbrønde og afvandringskanaler. Vist som gennemsnit af 3 målinger i november, januar og marts. Data er sorteret efter stigende fosforkoncentration. For to prøvesteder længst til højre er koncentrationerne så høje, at de rækker ud over figurens skala ($1,71 \text{ mg pr. liter}$ og $4,25 \text{ mg pr. liter}$). (Piil og Knudsen, 2013). Indlagt er to linjer, der viser hhv. koncentration af total fosfor i vandløb i dyrkede oplande ($0,1 \text{ mg P l}^{-1}$, Bøgestrand, pers kom.) og den gennemsnitlige baggrundskoncentration af opløst fosfor i vandløb ($0,037 \text{ mg P l}^{-1}$, Bøgestrand, 2007).

4.2.4 Fosforudvaskning fra rodzonen målt med sugeceller

Kendskab til fosforudvaskning fra rodzonen baserer sig hovedsageligt på målinger med sugeceller i rodzonen placeret i ca. 1 m's dybde under 29 marker i de 5 landovervågningsoplande i NOVAVA-programmet, tabel 4.2. På grund af prøvetagningsmetoden analyseres kun for opløst fosfor. De gennemsnitlige koncentrationer og tab er lave. Der er dog én mark i LOOP1 (Lolland), der de fleste år har høj fosforkoncentration og -tab. Fosfortallet blev på denne mark i 2004 målt til 8,0 og 9,1 i henholdsvis 10-25 cm og 25-50 cm, og med en fosformætning på ca. 65 %. Den ekstremt høje fosforstatus kan ikke forklares af den kendte del af markens dyrkningshistorie. Ligeledes er fosforudvaskningen på 6 ud af de 8 marker i det sandede LOOP6 (Sønderjylland) på mindst 0,5 kg P ha⁻¹ i et eller flere år. Udvasningen varierer her meget mellem årene. De høje udvasninger kan eventuelt skyldes enkelte, særligt store udbringninger af husdyrgødning, ompløjning af græs eller gødningstilførsel i forbindelse med afgræsning (Blicher-Mathiesen et al., 2015).

Tabel 4.2. Målinger i rodzonen fra LOOP oplande.

Sted	Jordtype	Prøver Hypighed	PO4-P		Nedvasket PO4-P	
			Gns. mg/l	Var. Bredde ¹⁾	Gns. g/ha	Var. Bredde ¹⁾
LOOP1, Lolland, 5 marker	sandbl. lerj.	Uge-puljede prøver	0,087	0,002-0,523	147	2-1436
LOOP2, Himmerland, 6 marker	sandj.	-	0,011	0-0,067	34	0-134
LOOP3, Østjylland, 4 marker	sandbl. lerj.	-	0,010	0,001-0,077	34	2-476
LOOP4, Fyn, 6 marker	sandbl. lerj.	-	0,013	0-0,056	35	0-200
LOOP6, Sønderjylland, 8 marker	sandj.	-	0,037	0-0,517	180	0-2865

¹⁾ Variationsbredde, forskel mellem årgennemsnit.

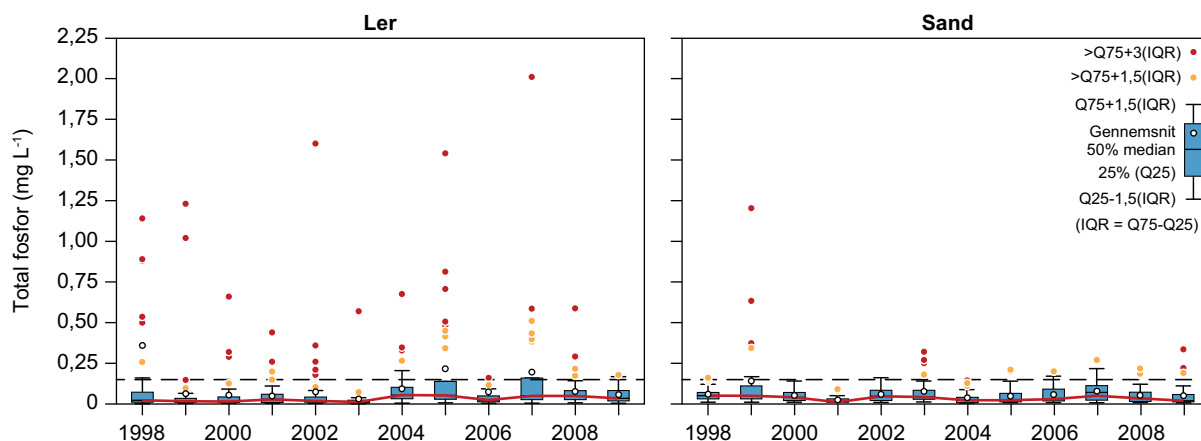
Fra 2007 er landovervågningsprogrammet udvidet med analyser til bestemmelse af organisk fosforindhold i jordvand. Der måles således både opløst uorganisk fosfor og total fosfor på filtreret prøve (porestørrelse 0,45 µm). Forskellen mellem opløst total fosfor og opløst uorganisk fosfor antages at udgøre opløst organisk fosfor. Resultatet for de første fem hydrologiske år fremgår af tabel 4.3. Opløst organisk fosfor ses at udgøre 10 – 42 % af det samlede tab af opløst fosfor. Der er dog tale om meget lave koncentrationer (< 5-10 µg P l⁻¹) tæt på detektionsgrænsen.

Tabel 4.3. Gennemsnitlige årlige koncentrationer af opløst uorganisk fosfor og opløst totalfosfor under rodzonen på markerne i landovervågningsprogrammet i 2008/09 - 2013/14. Forskellen antages at være opløst organisk P. Andelen af opløst organisk P i forhold hele fraktionen af opløst P er vist i parentes.

	Antal stationer	Opløst total P mg P l ⁻¹	Opløst uorg. P mg P l ⁻¹	Forskel = Opløst org. P mg P l ⁻¹
Lerjorde				
LOOP 1. Storstrøm	5	0,011	0,007	0,003 (32 %)
LOOP 1. Storstrøm	1	0,499	0,439	0,050 (10 %)
LOOP 4. Fyn	6	0,017	0,015	0,002 (12 %)
LOOP 3. Østjylland	4	0,007	0,006	0,001 (20 %)
Sandjorde				
LOOP 2. Nordjylland	6	0,009	0,005	0,004 (42 %)
LOOP 6. Sønderjylland	8	0,036	0,032	0,008 (21 %)

4.2.5 Fosforkoncentrationer i øvre grundvand

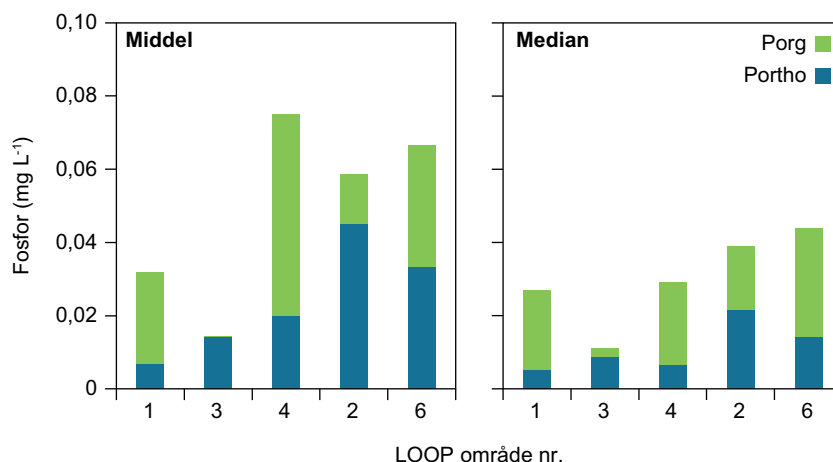
Fosforkoncentrationer i det øvre grundvand måles i borer i dybderne 1,5 m, 3 m og 5 m under 36 marker i de 5 landovervågningsoplande, figur 4.4. Koncentrationen af fosfor i grundvandet er ret ensartet på tværs af jordtyperne. Over 75 % af analyserne ligger under grænseværdien for drikkevand på 0,15 mg P l⁻¹. Værdierne ligger dog typisk over baggrundskoncentrationen i vandløb (figur 4.1). I de lerede oplande optræder der flere ekstremværdier, som kunne tyde på, at der i perioder kan forekomme udvaskning af fosfor fra overfladen, jf. figur 4.5 (Thorling (red.), 2009), men som også kan skyldes lokale fysisk-kemiske forhold.



Figur 4.4. Udviklingen i det øvre grundvands indhold af total opløst fosfor (mg P l⁻¹) for perioden 1998-2008 i landovervågningsoplandene opdelt på ler- og sandområder (efter Thorling (red.), 2009). Den vandrette, stiplede linje angiver grænseværdien for drikkevand på 0,15 mg P l⁻¹

Grundvandsprøverne analyseres for både total opløst fosfor og opløst uorganisk fosfor. Differencen antages at udgøres af opløst organisk fosfor. Der er markant forskel på andelen af det organiske fosfor i det øvre grundvand mellem de forskellige landovervågningsoplande, figur 4.5. I LOOP 3, et lerjordsopland i Østjylland, udgør opløst organisk fosfor omkring 20 % af total opløst fosfor, mens det i lerjordsoplandene LOOP1 (Lolland) og LOOP4 (Fyn) gennem hele perioden har udgjort mere end halvdelen af fosforindholdet (Thorling (red.), 2012).

Figur 4.5. Indholdet af fosfor i det øvre grundvand opdelt på opløst uorganisk fosfor (Portho) og opløst organisk fosfor (Porg) i de enkelte landovervågningsoplande i 2011 (Thorling (red.), 2012).

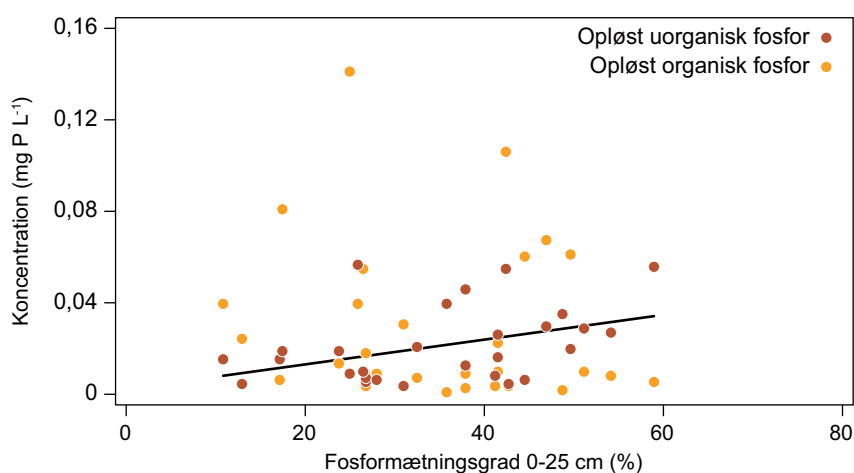


4.2.6 Sammenhæng mellem fosfor i jorden og udvaskning af fosfor

Det tilgængelige vidensgrundlag vedrørende udvaskning af fosfor via dræn og fra rodzonen og fosforkoncentrationer i øvre grundvand er sammenstillet i ovenstående afsnit. Udvasning via dræn er generelt lav, men 10 – 20 % af drænene kan betegnes som risikodræn. Udvasning af fosfor fra rodzonen er lav på hovedparten af de undersøgte marker, men ca. 25 % af markerne har enten konstant høj udvasning eller enkelte år med høj udvasning. For visse marker udgør opløst organisk fosfor en betydelig del af det samlede tab. Fosforkoncentrationen i det øvre grundvand er generelt lav og uafhængig af jordtype, men koncentrationen varierer dynamisk, og der forekommer ekstremt høje fosforkoncentrationer, specielt under lerjordsoplunde. Opløst organisk fosfor udgør en varierende og i visse områder meget betydelig andel af den samlede fosforkoncentration. Vi er med det nuværende vidensniveau ikke i stand til at udpege og kortlægge risikodræn og områder med forhøjet udvasning fra rodzonen og tab til grundvand.

Adskillige studier viser en sammenhæng mellem jordens indhold af fosfor karakteriseret ved fosformætningsgrad eller fosforstatus og tabspotentialen for fosfor enten i form af målt udvasning af fosfor fra jordsøjler i laboratoriet (f.eks. McDowell og Sharpley, 2001; Glæsner et al., 2013; Kleinman et al., 2015), målt fosforkoncentration i overfladisk afstrømning (Pote et al., 1999), eller udtrykt ved mængden af den fosfor, der kan ekstraheres med vand fra udtagne jordprøver (f.eks. Rubæk et al., 2001). Et dansk feltstudie viser imidlertid, at denne sammenhæng ikke umiddelbart kan bruges til at udpege risikoområder. Andersen et al. (2006) sammenholdt fosforstatus målt i pløjelaget af 45 marker med koncentrationen af opløst fosfor målt i dræn fra markerne gennem en afstrømnings sæson. Der var kun en svag sammenhæng mellem overjordens fosforstatus og drænkonzentrationen af opløst uorganisk fosfor, figur 4.6.

Figur 4.6. Koncentration af opløst uorganisk og opløst organisk fosfor (medianværdier) i drænvand plottet mod jordens fosforstatus udtrykt ved fosformætningsgraden i 0 – 25 cm's dybde. Den indlagte linje angiver sammenhængen mellem koncentration af opløst uorganisk fosfor i drænvandet og fosformætningsgraden ($R^2 = 0,17$, $P = 0,03$).



4.3 Modelberegning af fosfortab

Ovenstående understreger, at fosfortab er resultat af et kompliceret samspil mellem klima, topografi, dyrkning og jordens fysisk-kemiske egenskaber. Der findes kun få modeller, der er i stand til at beskrive dette samspil af faktorer, f.eks. ANIMO-model (Schoumans og Groenendijk, 2000) og SWAT (Neitsch et al., 2001), hvortil et modul til beskrivelse af udvasning og dræntab af opløst uorganisk fosfor under danske forhold er under udarbejdelse (Lu et al., submitted). Disse modeller kræver imidlertid en omfattende parameterisering.

PLEASE-modellen (Schoumans et al., 2011) bygger på de samme principper for fosforsorption og -desorption som ANIMO og SWAT, men den har et lavere krav til mængden af inputdata og er betydeligt enklere at sætte op og afvikle. PLEASE opererer på markniveau, hvilket er en relevant skala for evaluering af sammenhænge mellem (ændringer i) dyrkningspraksis og fosfortab. Da vi i Danmark har et unikt datasæt i landovervågningsoplandene, som både dækker gradienter i jordtyper og dyrkningspraksis, samt omfatter de nødvendige inputdata og langvarige målinger af fosfortab til at validere modellen på, er det oplagt at opsætte og tilpasse PLEASE-modellen til danske forhold og anvende den til konsekvensberegninger af ændringer i dyrkningspraksis.

PLEASE har en forenklet, procesorienteret tilgang til direkte beregning af fosfortab fra mark til overfladevand baseret på velkendt fosforkinetik. Fosfortab beregnes som produktet mellem fosforkoncentrationen ned gennem jordprofilet og vandfluxen gennem jorden. Fosforkoncentrationen beregnes ud fra en matematisk sammenhæng (Langmuir isotherm), der beskriver forholdet mellem adsorberet og opløst fosfor. Vandfluxen beregnes på grundlag af nettonedbør og information om grundvandsspejlets beliggenhed. Når modellen er opsat og valideret mod målt fosfortab, er det relativt simpelt at simulere en ny dyrkningssituation (en ændring i nettotilførslen af fosfor) og beregne effekten på udvaskning af fosfor. Modellen beskriver fosfortab fra minerogene jorde, hvor matricestrømning er dominerende. Modellen egner sig ikke til at beskrive fosfordynamik på svære lerjorde, hvor makroporestrømning er betydelig, og heller ikke til organogene jorde, da mineralisering/immobilisering ikke indgår i procesbeskrivelsen.

PLEASE-modellen er blevet valideret i to studier. Van der Salm et al. (2011) opsatte PLEASE på 31 marker (17 danske og 14 hollandske) og sammenlignede modellens resultater med målte værdier for fosforkoncentration og fosfortab (Bilag 2). Der var en god overensstemmelse mellem simulerede og målte værdier (Nash-Sutcliffe efficiency mellem 0,36 og 0,92). Schoumans et al. (2013) opsatte modellen på et opland (5030 ha) med 260 prøvefelter. Modellen beregnede et samlet oplandstab på 2973 kg P, hvilket er i god overensstemmelse med et gennemsnitligt målt fosfortab på 2770 kg P.

PLEASE har i Holland været anvendt til at lave landsdækkende kort over fosforudvaskning (van der Salm et al., 2014), som bl.a. har dannet grundlag for at vurdere effekter af virkemidler til reduktion af fosfortab (van der Salm et al., 2015).

4.4 Kvantificering af fosfor tabt fra landbrugsarealer til vandmiljøet (dyrkningsbidraget) via kendte tabsprocesser

Kronvang og Rubæk (2005) udarbejdede et samlet, nationalt skøn over hvor meget fosfor, der blev tabt fra landbrugsarealer via de kendte, betydende tabsprocesser i begyndelsen af nullerne. Dette nationale skøn er gengivet i tabel 4.4. Tabellen er sidenhen brugt og gengivet i adskillige publikationer, f.eks. Schou et al. (2007). Den er også i en bearbejdet version publiceret internationalt i Kronvang et al. (2005). Tabellen bygger på ekspertskøn gjort på basis af det overblik over eksisterende viden, der blev skabt i forbindelse med det store udredningsarbejde forud for vedtagelsen af VMPIII.

Datamaterialet, som ligger til grund for de kvantitative skøn, var ganske uhomogent, da flere af processerne/tabsvejene nok var kendte, men data-

materialet, der kunne belyse dels deres udbredelse og dels de tabsstørrelser, der kunne forventes, ofte var meget spinkelt og ikke nødvendigvis repræsentativt. Allerede dengang blev det derfor påpeget at: ”Det er vigtigt at være opmærksom på usikkerhederne og på, at dette skøn bør justeres, efterhånden som vi opnår bedre datagrundlag både om tabsposternes størrelse og deres udbredelse. Det er også vigtigt at være opmærksom på, at tabsposter, der i det nationale regnskab er beskudne, kan have væsentlig betydning på det lokale eller regionale niveau. Derfor bør estimerne også regionaliseres så snart der er datamateriale hertil, ligesom de bør genovervejes for væsentlige forventede ændringer i klimaet og ændrede afgrødevalg i landbruget – som f.eks. majs der medfører større risiko for jorderosion og overfladisk afstrømning”.

Tabel 4.4. Kvantitative skøn over forskellige tabsposters betydning for dyrkningsbidraget på nationalt plan. Kvaliteten af det faglige grundlag for at give disse skøn er angivet med plusser efter hvert tal : (+++++) højt; (++++) godt; (+++) middel; (++) dårligt; (+) dur ikke (Kronvang og Rubæk, 2005)

	Forudsætninger og skøn anvendt ved beregning	Tons fosfor pr år
Vanderosion, partikulært fosfor	Der mobiliseres jord svarende til 0,37 kg P/ha erosionstruet areal. <5 % af det dyrkede areal (2.675.000 ha) er erosionstruet. 10-50 % af det mobiliserede fosfor når frem til vandløb eller sø. Der er set bort fra fladeerosion	2-20 (++)
Overfladisk afstrømning, opløst fosfor	Koncentration af opløst fosfor i afstrømmende vand, 0,18 mg P/l. 10-30 mm af afstrømning løber af som overfladisk afstrømning på truet areal. Truet areal sættes til at være dobbelt så stort som det erosionstruede areal (<10 % af det dyrkede areal).	5-15 (+)
Vinderosion	Typisk erosionshændelse sat til afslibning af 1-2 mm jord. Jordens fosforindhold sættes til 566 mg P/kg jord. 1 mm jord svarer til 15 tons jord pr. ha. 5 % af afslebte fosfor ender direkte i vandløb eller sø. Klimatiske betingelser for vinderosion forekommer hvert 10. år. Ca. 10 % af det potentielt truede areal på 1-1,5 mio. ha er aktuelt truet Bidrag via den atmosfæriske deposition er ikke indregnet	5-15 (+)
Brinkerosion	Tabrate på 6,7-15,8 g fosfor pr. meter vandløb i dyrkede oplande. 65.700 km vandløb i DK. Heraf ca. 2,675/4,3 på dyrkede arealer. Tabet er formentlig overvurderet (se tekst).	275-645 (++)
Tab via kunstige dræn på minerogene risikojorde	Tabet af total-fosfor sættes til 100-500 g P/ha. Arealet af drænedede risikojorde sættes til 10 – 15 % af de drænedede minerogene jorde (som udgør: $0,49 \times (2.675.000 - 75.000) = 1.274.000$ ha).	15-90 (+)
Tab via kunstige dræn på minerogene lavrisikojorde	Tabet af total-fosfor sættes til 20-80 g P/ha. Arealet af drænedede lavrisikojorde sættes til 85-90 % af de drænedede minerogene jorde i Danmark (1.274.000 ha).	20-90 (+++)
Tab via kunstig dræning på lavbundslande	Tabet af total-fosfor sættes til 400-3.000 g P/ha. Arealet af lavbundslande (75.000 ha) der er drænet sættes til 100 %.	30-225 (+)
Øvre grundvand, drænet dyrket areal	Der afstrømmer 90 mm med en koncentration på op til 0,017 mg P/l via dræn fra det drænedede areal (1.274.000 ha).	<20 (++)
Øvre grundvand, ikke drænet dyrket areal	Fra udrænedede dyrkede arealer (51 % af dyrket areal) afstrømmer 260 mm vand. Fosforkoncentrationens sat til < 0,017 mg P/l. Risikoområder eksisterer formentlig, men kan ikke identificeres med nuværende viden	<60 (++)
Dyrkningsbidrag	Anslået ud fra ovenstående skøn	440-1180 (+)

Der er på mange områder kommet ny viden siden dengang, som det også fremgår af andre afsnit af denne rapport. Tabellen kan og bør derfor opdateres. I lighed med første gang vil der skulle foretages mange skøn, og det kan vise sig hensigtsmæssigt at opbygge tabellen anderledes med nye eller mere

detaljerede opdelinger af tabsposterne. Det er vigtigt, at en revision foretages af en ekspertgruppe med grundig indsigt i hydrologi og fosforomsætning i og -tab fra landbrugsjord.

Nedenfor er beskrivelsen af datagrundlaget fra dengang gengivet i kursiv og fulgt op med de muligheder, vi umiddelbart kan se, som bør inddrages i en revurdering af tabellen. Vurderingen af datagrundlaget dengang (i kursiv) og de umiddelbare muligheder, vi ser for opdatering, med alm. skrift.

Vanderosion, partikulært fosfor

Vidensgrundlaget er spinkelt. Det er vanskeligt at angive en gennemsnitlig tabsstørrelse for et tab, der forekommer så uregelmæssigt i tid og rum, og hvor størrelsen af den enkelte erosionshændelse varierer voldsomt. Ligeledes er de faktorer, der anvendes for hvor meget fosfor, der når frem til vandløbet, fastsat på et meget spinkelt grundlag grænsende til et rent skøn. Der er set bort fra fladeerosion.

Der er siden dengang sket en del på området mht. modellering og udpegning af arealer med risiko for erosion i Danmark. Dette arbejde kan inddrages i en revurdering.

Overfladisk afstrømning – opløst fosfor

Vidensgrundlaget stammer fra målinger af overfladisk afstrømmende vand på 28 marker i foråret 1998. Datagrundlaget er derfor meget spinkelt og kan således ikke forventes at være repræsentativt for alle marker, hvad angår kombinationer af jordtyper, fosforstatus, afgrøder, mv. Ligeledes er arealet, hvorfra der kan forekomme overfladeafstrømning, skønnet.

Der er så vidt vides ikke lavet mange studier af overfladisk afstrømning i Danmark siden dengang, men det forventes at der kan inddrages ny viden fra den internationale litteratur, og der er behov for nye målinger i Danmark.

Vinderosion

Vidensgrundlaget er overordentligt spinkelt, mange af de anvendte tal til beregningen er rene skøn. Det er væsentligt at huske på, at denne tabspost ikke indbefatter den største del af det vinderoderede fosfor, som hvirvles højt op for senere deponering over store hav- og landarealer som atmosfærisk deposition. Tabsposten er nationalt set lille, men kan regionalt have større betydning. Vinderosion kan lokalt bidrage med 0,3 – 0,6 kg fosfor pr. ha pr. mm afslebet jord.

Vidensgrundlaget for vinderosion under danske forhold er så vidt vides ikke forbedret siden VMPIII rapporten blev udarbejdet.

Brinkerosion

Vidensgrundlaget omkring fosfortabsposten fra brinkerosion stammer fra målinger i 33 mindre danske vandløb i dyrkede områder igennem 2 år, som er opskaleret til alle Danmarks vandløb i landbrugsområder. To års målinger afspejler ikke alle klimatiske forhold, og heller ikke eventuelle yderligere effekter som følge af vandløbsvedligeholdelse, mv. er dækket ind af undersøgelsen. Herudover mangler der viden om omfanget af brinkerosion og -tab i vandløb i skov- og naturområder. Bidraget overestimeres sandsynligvis, da vi ikke kan korrigere for "baggrunds-brinkerosionen" og da der ses bort fra den del af det eroderede fosfor, der forbliver i vandløbet eller flyttes via bundtransport i vandløbet, hvilket ikke er indbefattet i den gængse fastsættelse af dyrkningsbidraget.

Vidensgrundlaget er forbedret: 36 strækninger på vandløb af forskellige størrelser og med forskellige brinktyper i oplandet til Odense Å blev under-

søgt med i alt 3000 erosionspinde i perioden 2006-2009 (Kronvang et al., 2013). Tilsvarende undersøgelser er foretaget i oplandet til Skjern Å på 12 strækninger. Desuden er brinkerosion opgjort langs den restaurerede del af Skjern Å, dels lige efter restaureringen, dels 10 år senere. Endelig findes der målinger af brinkerosion fra Geelså, som ikke indgik i datagrundlaget for tabellen i 2005.

Kunstige dræn på lavrisikojorder

Vidensgrundlaget er data fra det landsdækkende overvågningsprogram (NOVA) og data indsamlet i forskellige forskningsprojekter, mv. Vidensgrundlaget er spinkelt og kan derfor ikke forventes at omfatte alle kombinationer af jordtyper, afgrøder, fosforstatus, underjordsforhold, mv. Drænet areal er sat til 49 % af det dyrkede areal (Aslyng, 1980).

Der findes nu flere målinger af fosfortab både opløst og partikulært P via dræn og bedre viden om udbredelsen af drænede arealer. Det bør på dette grundlag vurderes, om der skal justeres på fordelingen mellem høj- og lavrisikoområder.

Kunstige dræn på minerogene risikojorder

Vidensgrundlaget er overordentligt spinkelt, da det kun omfatter målinger på enkelte dræn. Et større empirisk datamateriale er nødvendigt for at kunne opnå et bedre estimat og viden om tabsprocessen relateret til jordfysik og -kemi og til dyrkningsmæssige forhold. Den andel af det dyrkede areal, der anses som risikoområder er skønnet og derfor behæftet med stor usikkerhed.

Der findes nu flere målinger af fosfortab via dræn og bedre viden om udbredelsen af drænede arealer. Det bør på dette grundlag vurderes, om der skal justeres på fordelingen mellem høj- og lavrisikoområder.

Tab via kunstige dræn på lavbundslande

Vidensgrundlaget er spinkelt og bygger på målinger af få dræn i begrænsede perioder. Areal af lavbundslande er meget usikkert fastsat. Lavbundslande dækker endvidere over vidt forskellige jordtyper, fra marsk, littorinaaflejring, højmoser og ånære arealer. Disse afviger sandsynligvis fra hinanden m.h.t. fosforbinding og frigivelse, men vi har ikke data til at behandle jordtyperne særskilt.

Kendskabet til lavbundslande, deres udbredelse og karakter mht. fosfortab og fosfortilbageholdelse er væsentligt forbedret. Denne viden bør inddrages, og det vil formodentlig føre til væsentlige ændringer i hvordan lavbundslande indgår i tabellen. Det forventes, at den kan nuanceres mere (evt. ved en underopdeling af typer af lavbundsland).

Øvre grundvandsbidrag i drænet og ikke drænet dyrket areal

Vidensgrundlaget er spinkelt, og der kan ikke differentieres mellem grundvand dannet i forskellige jordtyper/geologiske aflejringer. Formentlig varierer dette bidrag også ganske betydeligt rumligt og der vil være områder, hvorfra tabet kan være særligt stort. Disse risikoområder kan dog ikke udpeges med vores nuværende viden. Ligeledes er der regnet med ensartet nettonedbør for hele landet, på trods af at nedbørmængden varierer i Danmark, og der er et betydeligt sammenfald mellem ikke drænede lande og nedbørmængder over gennemsnittet i den vestlige del af landet og drænede lande og nedbørmængder lavere end gennemsnittet i den østlige del.

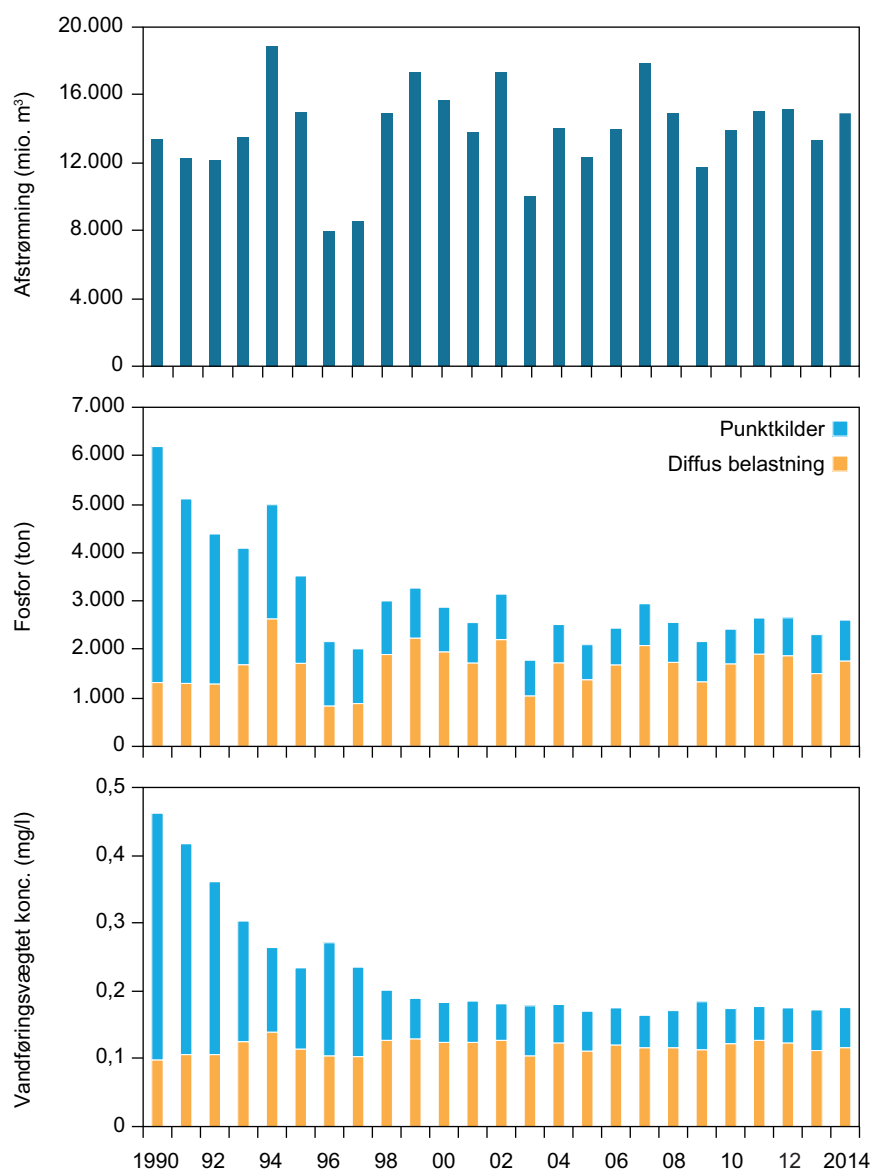
Risikoområder med periodevis meget høj fosforkoncentration i øvre grundvand er observeret, men omfang og kvantitativ betydning er ukendt.

5 Fosfors påvirkning af vandmiljøet

5.1 Udvikling og status for P-udledning generelt – samt kildefordeling og udvikling i kilder

Udledningen af fosfor til havet er faldet markant i perioden 1990-2013, hvor der ligger et ensartet datagrundlag fra den nationale overvågning. Der er ingen tvivl om, at der også er sket væsentlige reduktioner i fosforudledningen forud for 1990, men denne del af udviklingen er ikke dokumenteret på landsplan. Formodningen om en reduktion også forud for 1990 bygger på, at der dels skete en målrettet indsats for at stoppe ulovlige udledninger fra landbruget (fra møddingspladser m.m.), dels at de første rensningsanlæg med fosforfjernelse blev anlagt forud for 1990.

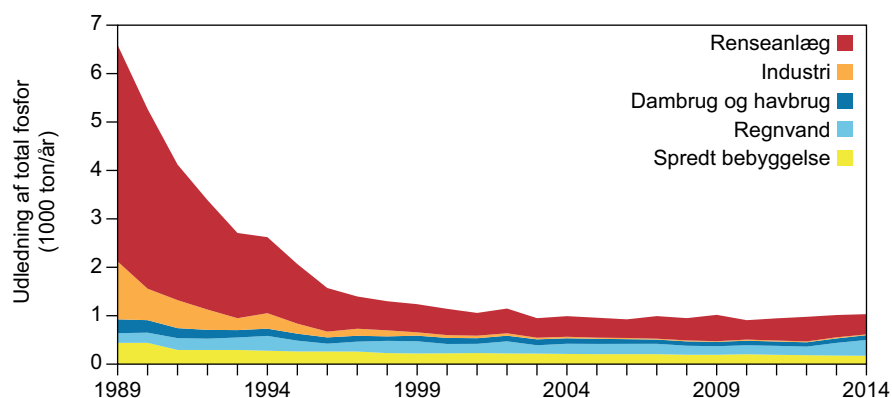
Figur 5.1. Fosfortilførslen til havet (midterste del af figur) samt den vandføringsvægtede koncentration (nederste del af figuren). Øverst er vist den totale vandafstrømning til havet. Jensen et al, 2015.



Det fremgår af figur 5.1, at der er sket en meget markant reduktion i fosforudledningen fra ca. 6000 ton P i 1989 til i dag ca. 2500 ton P. Den vandføringsvægtede koncentration viser udviklingen rensset for de væsentligste

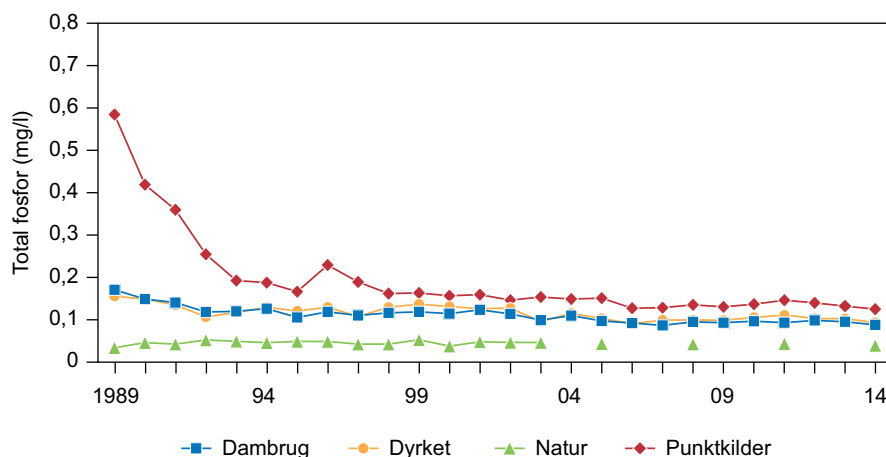
klimapåvirkninger (især nedbør) og her er der en reduktion på i størrelsesordenen 60 % hen over perioden. Det fremgår videre af figur 5.1, at denne reduktion i er båret af reduktion i punktkilderne – dvs. rensesanlæg, industri, dambrug m.m.

Figur 5.2. udvikling i udledningen af fosfor fra punktkilder (Jensen et al, 2015).



I figur 5.2 er isoleret udviklingen i fosforudledning fra punktkilder for netop at vise den væsentligste årsag til den samlede reduktion i P-udledning. Udledningen fra punktkilder er faldet med 85 %, primært som følge af en betydelig bedre rensning af byernes spildevand (fald på 91 %) samt spildevand fra industri (fald på 99 %) og dambrug.

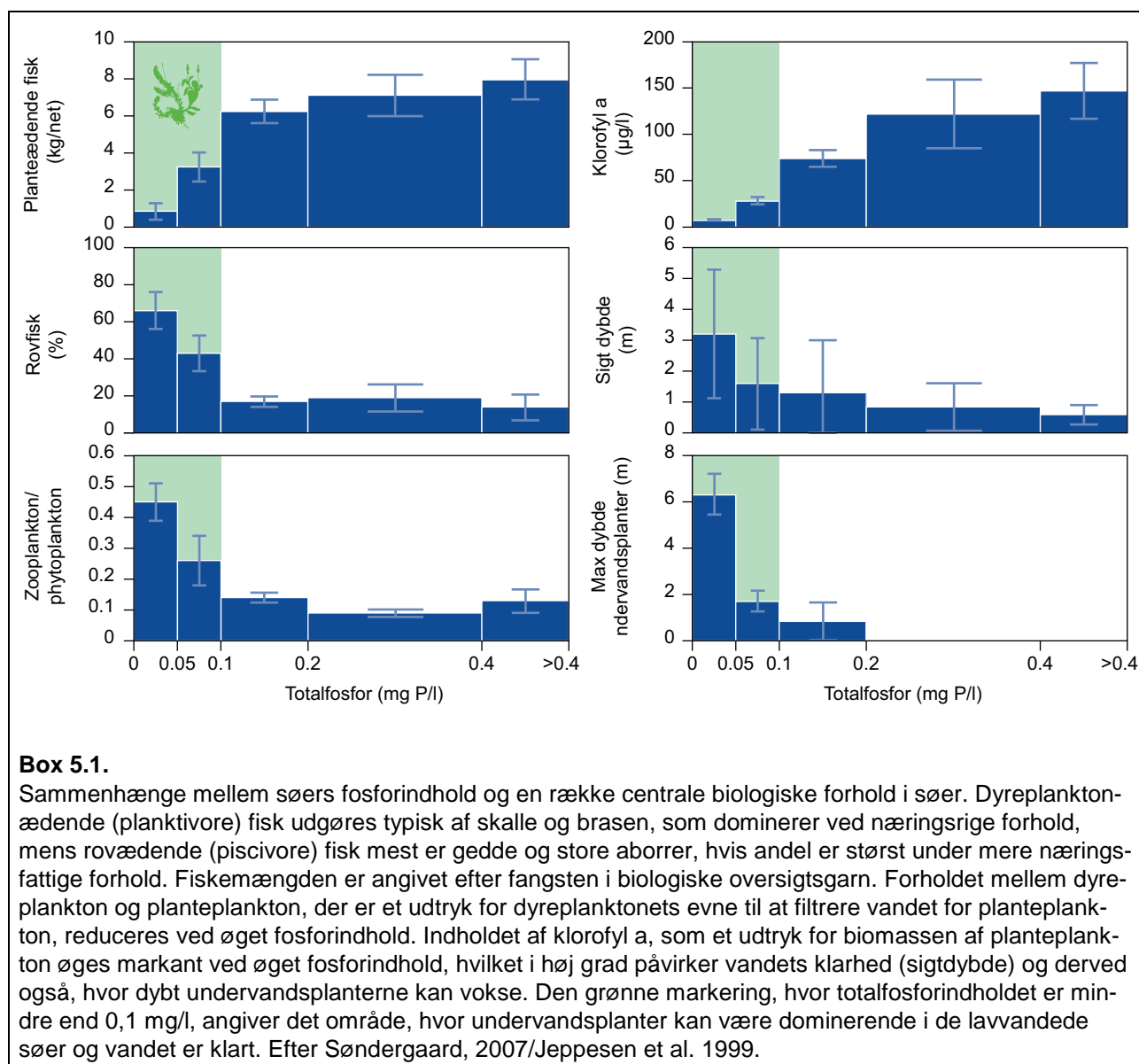
Figur 5.3. Udviklingen i fosforkoncentrationer i vandløb påvirket fra forskellige kilder (Jensen et al, 2015).



I figur 5.3 er vist de vandføringsvægtede koncentrationer i vandløb, som primært er påvirket af punktkilder, dambrug og af dyrkede arealer. Den samme tydelige fald som i figur 5.2 ses for de vandløb, hvor den dominerende påvirkning har været punktkilder (rensningsanlæg). Der ses ligeledes en mindre markant udvikling i vandløb, hvor påvirkningen primært stammer fra dambrug. I de vandløb, som afvander primært dyrkede områder er billedet ikke klart. I omkring halvdelen af vandløbene er der sket et signifikant fald og samlet set for den gruppe af vandløb er der sket et fald i fosforkoncentrationen på 17 % i perioden 1990-2014. Det skal dog nævnes, at selv om vandløbene afvander dyrkede arealer, er der også punktkilder i oplandet – primært i form af spredt beliggende ejendomme. En del af udviklingen i denne gruppe vandløb kan derfor tilskrives enten mindre brug af fosforholdige vaskemidler og/eller forbedret rensning af spildevandet i perioden.

5.2 Fosfors påvirkning af vandmiljøet i søer

Fosfor betragtes normalt som det mest begrænsende næringsstof for planteplanktonets vækst i søer, og derfor har øget fosfortilførsel en række negative effekter på deres vandmiljø og økologiske kvalitet. Øgede fosforkoncentrationer fører blandt andet til mere uklart vand pga. øget algevækst, risiko for opblomstring af potentielt giftige blågrønalger og en generelt faldende biodiversitet. Under visse forhold og for visse organismetyper kan kvælstofindholdet også spille en rolle, men betydningen af kvælstof er normalt mindre end fosfor (se dog også afsnit 5.2.2). I Box 5.1 er der vist en sammenhæng mellem søers fosforindhold og en række centrale biologiske forhold.



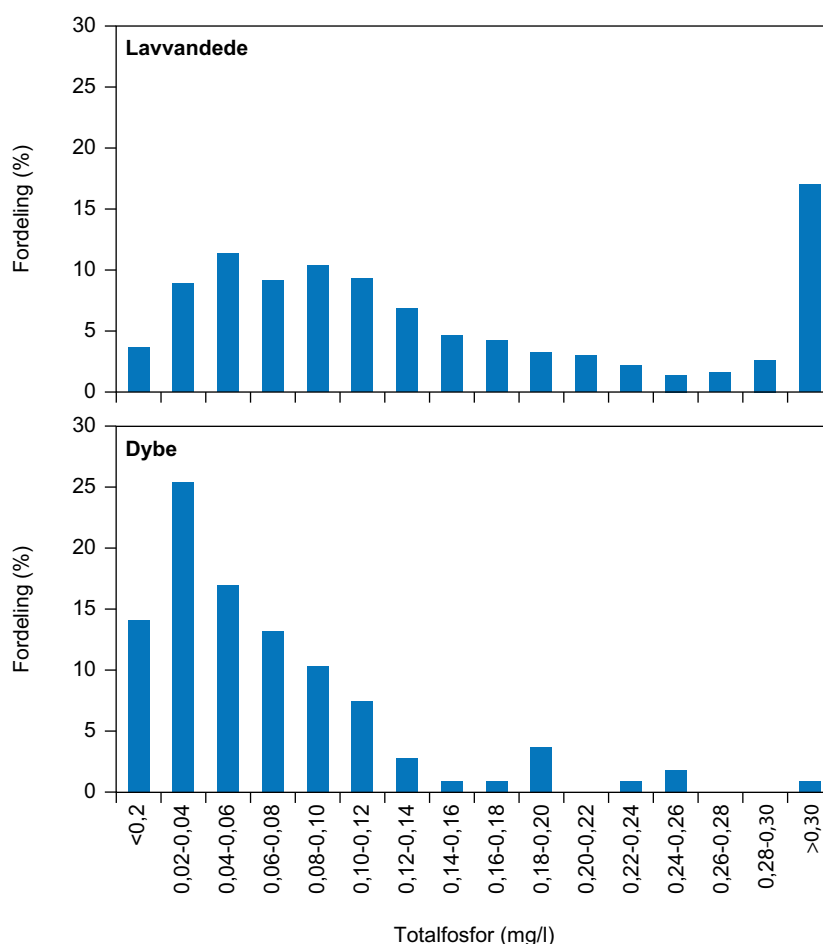
Fosfors store indflydelse på søers vandkvalitet betyder, at fosfortilførsel og den afledede søkoncentration af fosfor ofte anvendes som et styrende redskab i forhold til at forbedre vandkvaliteten. Dette gælder også i forhold til at beregne den indsats, der er nødvendig for at opnå mindst en god økologisk tilstand i de danske søer jf. Vandrammedirektivets implementering og udarbejdelsen af vandplanerne (se for eksempel Naturstyrelsen, 2014a).

5.2.1 Fosfor og kvælstof i søer

Fordelingen af fosfor

Indholdet af fosfor varierer meget i de danske søer afhængig af oplandstype og omfanget af fosforkilder (bysamfund, landbrug mm.). Generelt er fosforindholdet højest i de lavvandede søer, hvor vand- og næringsstofftilførsel per søvolumen er større end i de dybere søer (fig. 5.4). Halvdelen af de lavvandede søer har et fosforindhold over 0,114 mg/l og halvdelen af de dybe over 0,051 mg/l. Blandt de lavvandede søer findes der stadigvæk en del søer (17 %) med meget høje (>0,3 mg/l) fosforkoncentrationer.

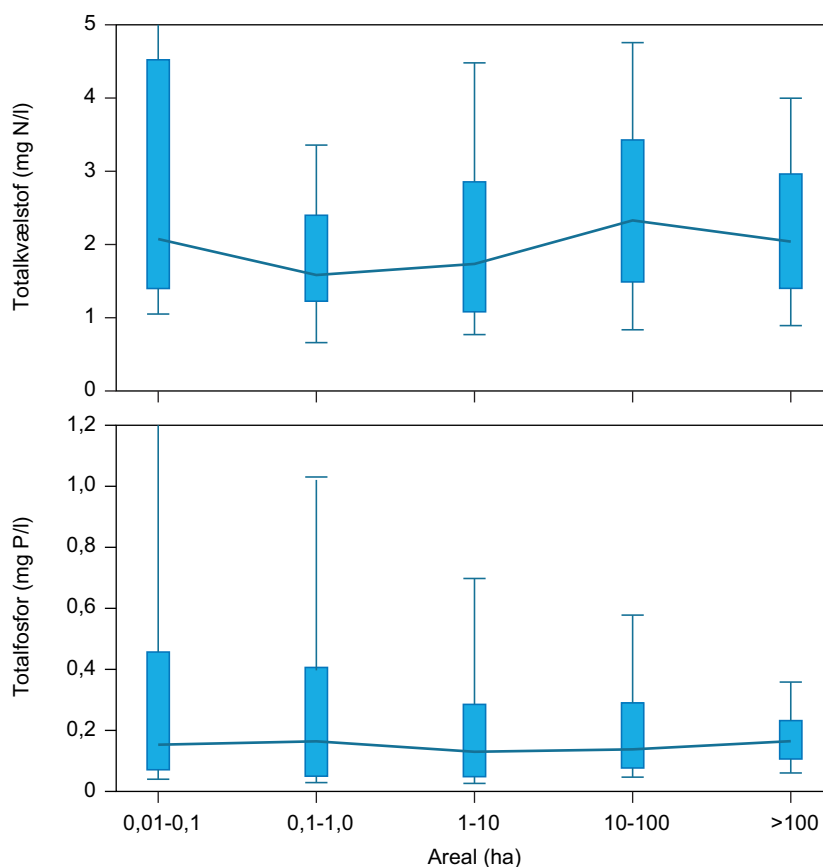
Figur 5.4. Fordelingen (%) af søer > 1 hektar med forskelligt indhold af totalfosfor (mg/l, sommergennemsnit). Der er medtaget data fra de sidste 10 år (2005-2014). Datasættet omfatter i alt 604 søer, hvoraf 493 (82 %) er lavvandede med en middeldybde under 3 m. Hvis der er data fra flere år i den samme sø, er disse midlet.



Fosfor og kvælstof i små og store søer

Der findes knap 800 søer i Danmark, som er større end 5 hektar, men der findes over 150.000 småsøer og vandhuller, som er over 100 m² og ligger spredt rundt i landskabet. Kun meget få af disse er undersøgt, men de data, der findes tyder på, at de næringsstofmæssigt ligner de større søer. Dog er der en tendens til, at de generelt er lidt mere næringsrige og med flere meget høje værdier (Fig. 5.5).

Figur 5.5. Indholdet af totalfosfor og totalkvælstof i danske søer af forskellige størrelse. Boksene repræsenterer nedre 25 % og øvre 75 %, mens den nedre og øvre vandrette linje på hver boks repræsenterer henholdsvis 10 % og 90 % fraktilen. Medianerne er forbundne. Omfatter data fra i alt 775 søer/vandhuller. Fra Søndergaard et al. 2005.

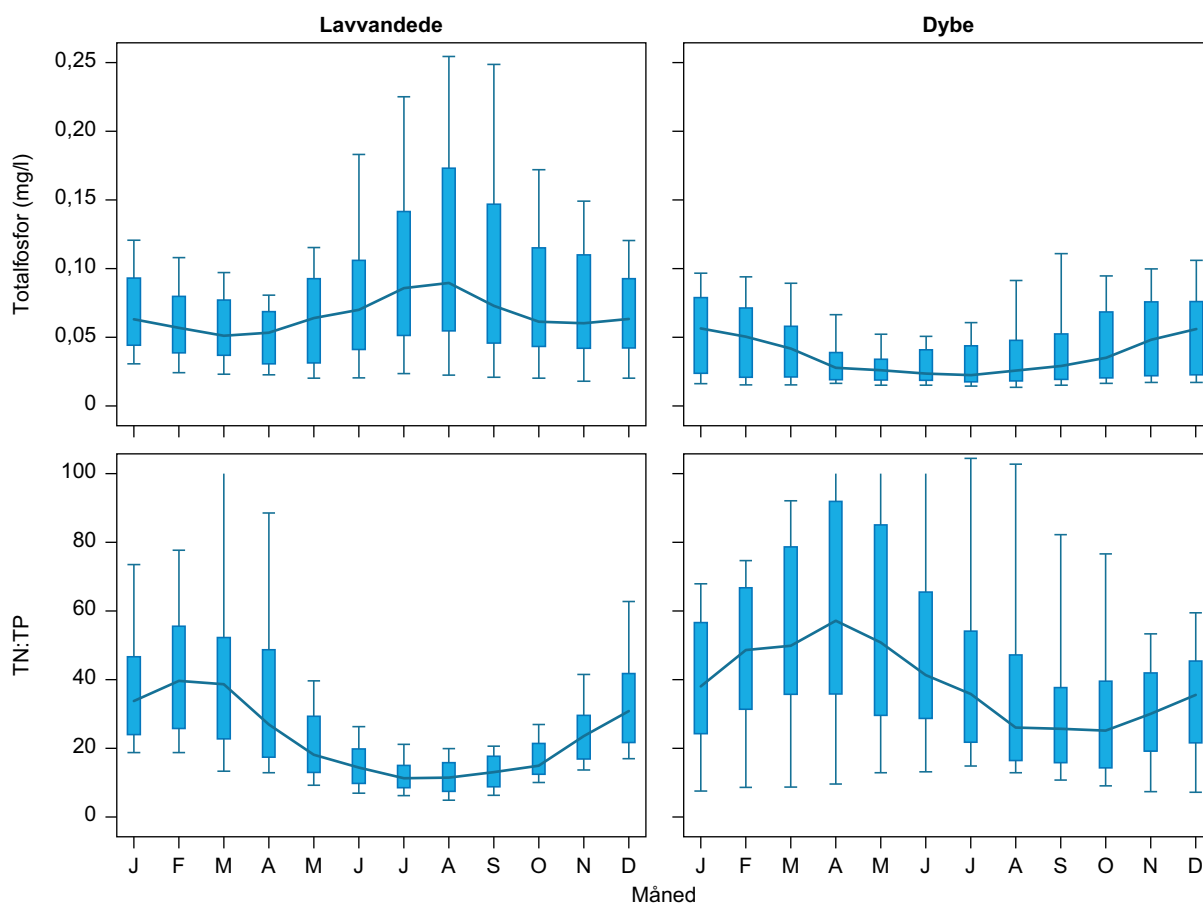


Kendskabet til hvordan småsøer og vandhuller reagerer i forhold til næringsstoffer er mindre end for de store søer, men de følger generelt de samme sammenhænge i forhold til øget næringsstofindhold. Dog kan de biologisk være anderledes i kraft af mangel på fisk eller den direkte påvirkning fra de omgivende arealer f. eks. pesticider eller udsætning af ænder/fisk (se fx Søndergaard mfl. 2002, 2005).

Årstidsvariation i fosfor og kvælstofindhold

Der er en betydelig sæsonmæssig variation i søvandets indhold af fosfor og kvælstof. Dette kan skyldes forskelle i afstrømningen til søerne fra deres opland, men den interne næringsstoffdynamik og samspillet med søbunden har også stor betydning. I de dybe søer, hvor der sker en lagdeling af søvandet om sommeren, bundfældes overfladevandets partikler og næringsstofferne ophobet i bundvandet. Der vil derfor være en tendens til lavere koncentrationer i løbet af forår og sommer i overfladevandet (fig. 5.2.3). I de lavvandede søer sker der en frigivelse af næringsstoffer fra søbunden, som fører til højere koncentrationer i søvandet af især fosfor hen over sommeren, ikke mindst i de næringsrige søer.

Mindre afstrømning, øget kvælstoffjernelse via denitrifikation og øget interne fosforbelastning betyder ligeledes store variationer i TN:TP forholdet gennem sæsonen (fig. 5.6). Alt andet lige betyder det en øget tendens til, at kvælstof bliver begrænsende for planteplanktonets produktion hen over sommeren, ikke mindst i de lavvandede søer. Der kan også være afledede effekter af kvælstof på undervandsplanternes vækstmuligheder, som påvirker søernes økologiske kvalitet (Hansen mfl. 2013).

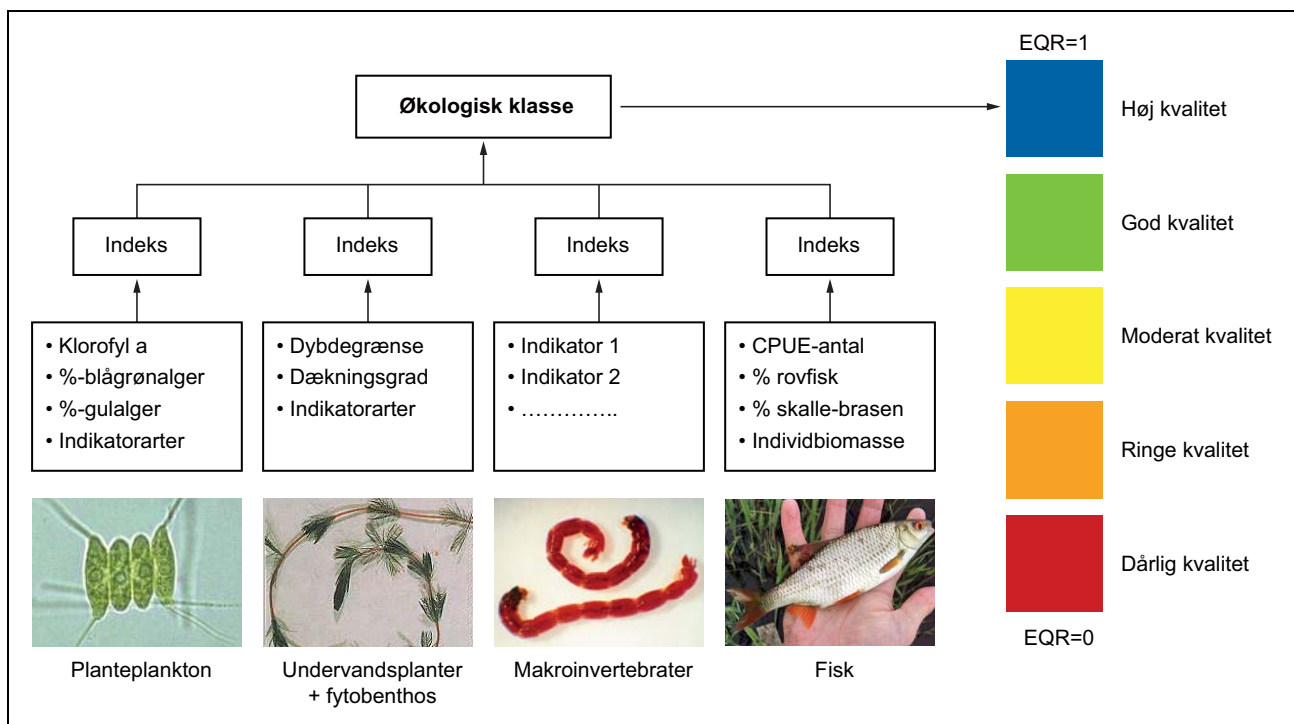


Figur 5.6. Sæsonvariation i overfladevandets indhold af totalfosfor og forholdet mellem totalfosfor og totalkvælstof (TN:TP). Kun data fra de sidste 10 år (2005-2014) er anvendt og kun fra de 15 intensivt overvågede søer, som er fulgt årligt. Søjlerne viser 10, 25, 75 og 90 % fraktiler. Linjen viser medianværdien.

5.2.2 Sammenhænge mellem fosforindhold og økologisk tilstand

I forhold til Vandrammedirektivet og udarbejdelse af vandplaner skal den økologiske tilstand vurderes på baggrund af fire biologiske kvalitetselementer: undervandsplanter, planteplankton, fisk og makroinvertebrater (se box 5.2). Heraf er der færdigudviklede og EU-interkalibrerede indices for de to førstnævnte kvalitetselementer, mens et fiskeindeks stadigvæk er under udarbejdelse (et foreløbigt nationalt indeks har dog været anvendt i udkast til vandområdeplanerne), og det er uafklaret hvorvidt makroinvertebrater skal anvendes i den økologiske klassificering af søer. En nærmere gennemgang af de økologiske indices er givet i Søndergaard mfl. (2013).

I forbindelse med udarbejdelsen af de seneste forslag til vandområdeplaner er der etableret sammenhænge mellem fosfortilførsel og søfosforkoncentrationer (Trolle mfl., 2015). Efterfølgende er der etableret empiriske sammenhænge mellem søfosforkoncentrationer (totalfosfor) og de to interkalibrerede kvalitetselementer (fyttoplankton og undervandsplanter) i forskellige søtyper (Søndergaard mfl., 2015a; Søndergaard mfl. 2015b). Disse sammenhænge kan anvendes til at vurdere, hvor meget den eksterne tilførsel af fosfor evt. skal reduceres for at søerne kan leve op til kravet om mindst god økologisk tilstand. Fosforkoncentrationen spiller således en helt central rolle i forbindelse med de danske søers forvaltning.



Box 5.2.

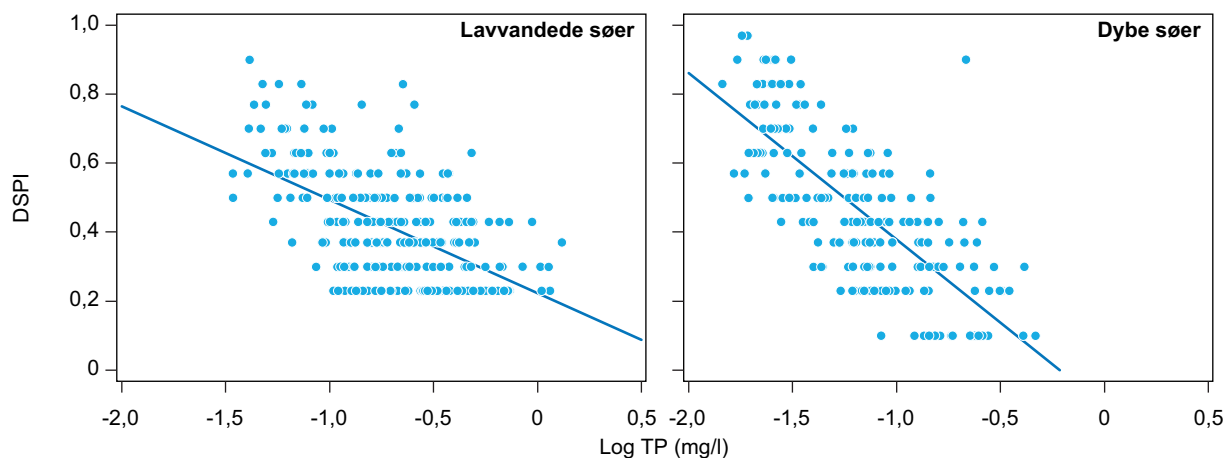
Oversigt over det danske system til klassificering af den økologiske tilstand i søer jf. Vandrammedirektivet (for nærmere forklaring se Søndergaard et al., 2013, DCE rapport nr. 59). På baggrund af de indikatorer, der indgår i de fire biologiske kvalitetselementer, fastsættes den samlede økologiske kvalitet til en EQR-værdi (Ecological Quality Ratio). Denne værdi er et udtryk for i hvor høj grad den økologiske tilstand afviger fra den menneskelige upåvirkede tilstand (EQR=1). Grænsen mellem god og moderat tilstand går i det danske system til klassificering af søer ved EQR= 0,6, svarende til grænsen mellem hvornår, der skal igangsættes en indsats for at forbedre den økologiske tilstand. I det seneste forslag til vandområdeplaner indgår data fra fytobenthos (bund- og overfladetilknyttede kiselalger) og makroinvertebrater (større bunddyr) ikke i den økologiske klassificering. I forbindelse med basisanalysen forud for udarbejdelsen af forslag til vandområdeplaner har der været anvendelige data til beregning af planteplanktonindekset fra 10 %, data vedr. undervandsplanter fra 39 % og data vedr. fisk fra 17 % af de søer, der er omfattet (Naturstyrelsen, 2014b). I en række søer er der alene anvendt indholdet af klorofyl a til at fastsætte den økologiske tilstand og klorofylldata har været tilgængelig fra 75 % af søerne. Tilstanden er ukendt i 23 % af søerne. I alt 857 søer er omfattet af de nyeste forslag til vandområdeplaner, der dækker planperioden 2016-2021. Vandområdeplanerne omfatter alle søer på 5 hektar eller derover og 168 små søer mellem 1 og 5 hektar, svarende til omkring 6 % af alle danske søer i denne størrelseskategori. De små søer ligger i Natura 2000 områder eller er vurderet til at have en særlig stor naturværdi (se også Naturstyrelsen, 2014a).

Fosfor og planteplankton

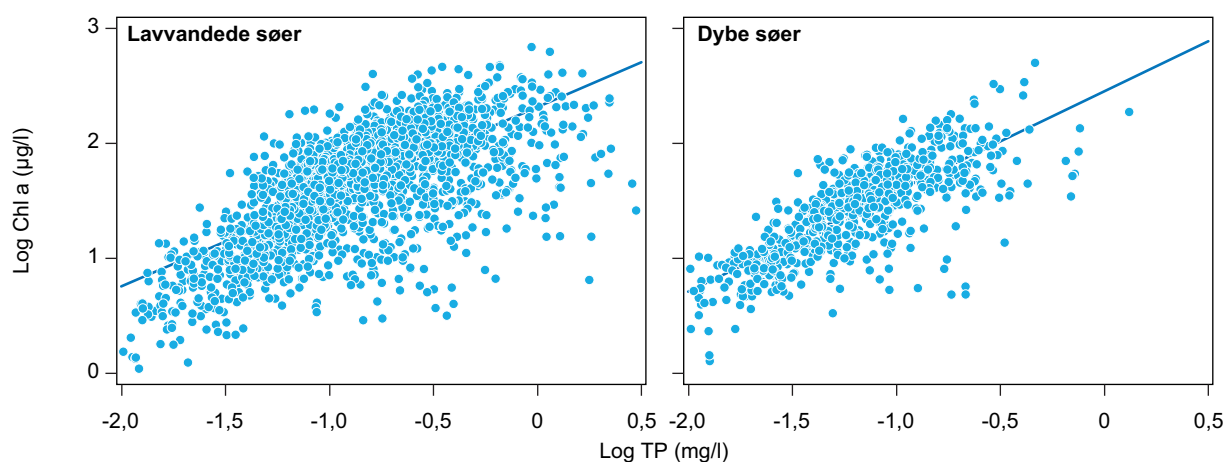
Til beregning af planteplanktonindekset anvendes informationer om planteplanktonets biomasse (klorofyl a) og dens sammensætning, herunder andelen af blågrønalgler (box 5.2). Det er imidlertid kun fra et mindretal af de danske vandplansøer at disse data findes og i stedet anvendes ofte alene indholdet af klorofyl a.

Sammenhænge mellem planteplanktonindekset i dybe og lavvandede søer er vist i fig. 5.7, og sammenhængen mellem indholdet af klorofyl a og totalfosfor i fig. 5.8. Både planteplankton-indekset og indholdet af klorofyl a er stærkt relateret til indholdet af totalfosfor, men ved et givent fosforindhold kan der også være store variationer i indekset eller indhold af klorofyl. Dette skyldes at klorofylkoncentrationen og de indikatorer, der indgår i indekset også afhænger af en række andre forhold end fosfor. Dette kan være andre næringsstoffer, herunder kvælstof, udbredelsen af undervandsplanter, hvor mange undervandsplanter alt andet lige vil betyde mindre klorofyl a samt den biologiske struktur i øvrigt, herunder dyreplankton (som

selv påvirkes af fiskesamfundet), som via deres græsning på planteplanktonet kan have en stor effekt på mængden af planteplankton (se for eksempel Søndergaard mfl., 2015c).



Figur 5.7. Sammenhænge mellem DSPI (det Danske SøPlanteplanktonIndeks) og indholdet af totalfosfor (TP) i henholdsvis lavvandede (middeldybde < 3 m) og dybe søer (middeldybde > 3m). Data omfatter kun ferskvandssøer over 1 hektar med alkalinitet over 1 meq/l. Der er anvendt en logaritmisk skala, dvs. $\log TP = -1$ svarer til en fosforkoncentration på 0,1 mg/l. Fra Søndergaard mfl. 2015b. Se også Søndergaard mfl., 2013

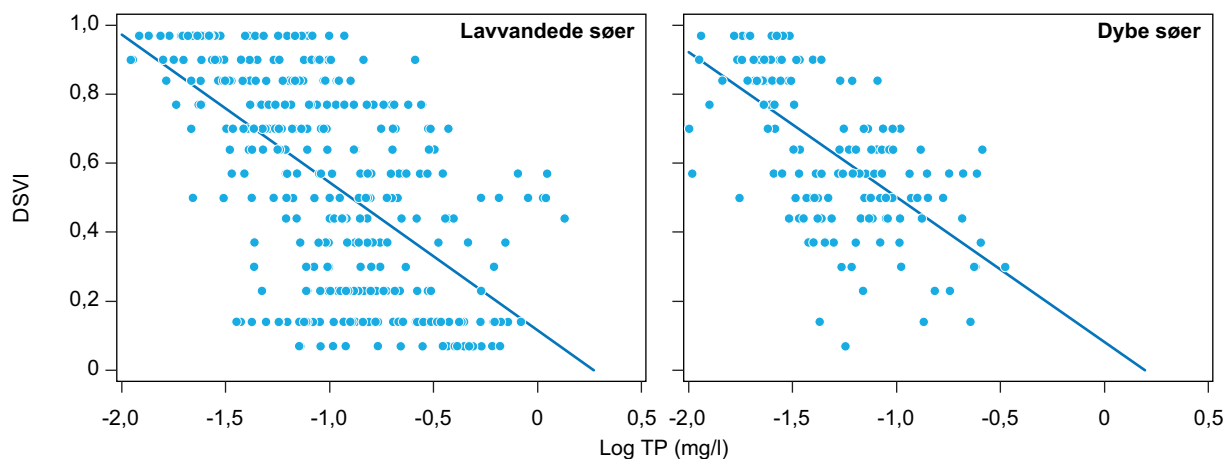


Figur 5.8. Sammenhæng mellem indhold af klorofyl a (log chl a) og totalfosfor (log TP) i henholdsvis dybe og lavvandede søer. Fra Søndergaard mfl. 2015b. Der er anvendt en logaritmisk skala, dvs. $\log TP = -1$ svarer til en fosforkoncentration på 0,1 mg/l og $\log Chl = 2$ svarer til en klorofylkoncentration på 100 µg/l. Fra Søndergaard mfl. 2015b.

Fosfor og undervandsplanter

I undervandsplanteindekset (DSVI (DanskSøvandplanteIndeks)) indgår informationer om planternes dækningsgrad (lavvandede søer), planternes maksimale dybdegrænse (dybe søer) og forekomsten af arter, som primært findes ved næringsfattige forhold (se også box 5.2).

Undervandsplanteindeksets relation til indhold af totalfosfor i henholdsvis dybe og lavvandede søer er vist i fig. 5.9. Indekset reduceres generelt ved øget indhold af totalfosfor, men ved et givent fosforindhold kan indekset antage et bredt spektrum af værdier. Dette hænger sammen med, at de indikatorer, der indgår i indekset på samme måde som planteplanktonindekset, afhænger af en række andre forhold end indholdet af fosfor, eksempelvis andre næringsstoffer, græsning (evt. fra fugle) og klimatiske variationer fra år til år, som kan påvirke planternes vækstforhold.

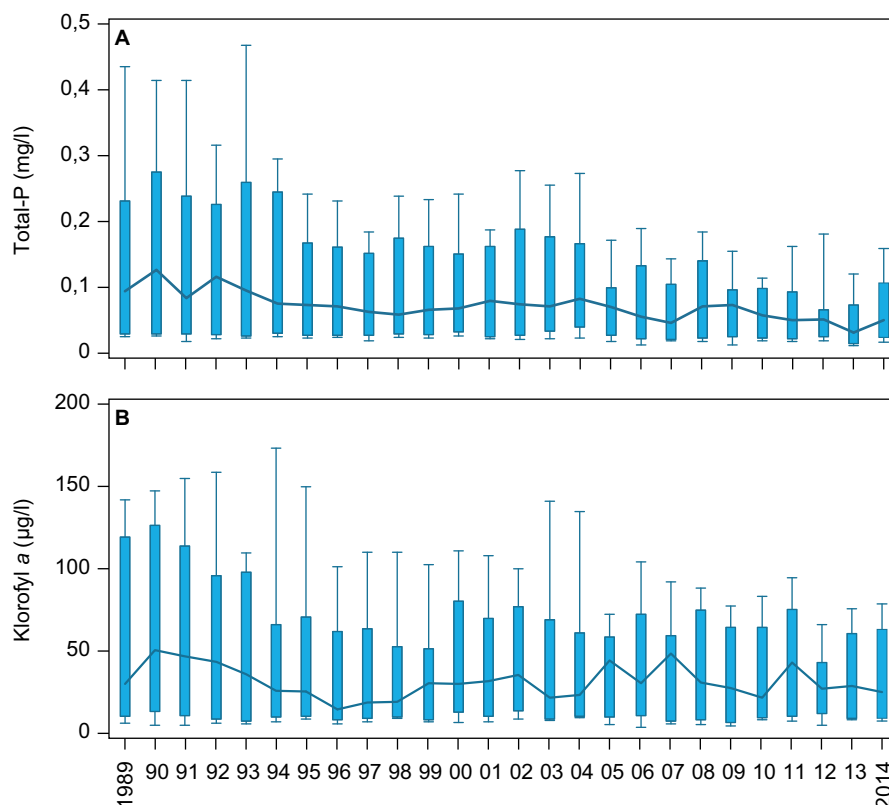


Figur 5.9. Sammenhænge mellem DSVI (Dansk Søvandplantelindeks) og TP i henholdsvis lavvandede og dybe søer over 1 hektar. Fra Søndergaard et al. (2015b). Der er anvendt en logaritmisk skala, dvs. $\log TP = -1$ svarer til en fosforkoncentration på 0,1 mg/l

5.2.3 Udviklingen i fosforkoncentration i danske søer siden 1989

Siden 1989 er der via overvågningsprogrammet indsamlet data, der beskriver de danske søers tilstand og udvikling. 15 søer har været fulgt årligt igennem hele perioden, og det giver mulighed for at vurdere den generelle udvikling, selvom disse 15 søer ikke nødvendigvis er repræsentative for alle de danske søers tilstand og udvikling (Fig. 5.10).

Figur 5.10. Udviklingen i sommergennemsnit for søkoncentrationen af totalfosfor (Total-P, mg P/l, venstre) og klorofyl a ($\mu\text{g/l}$, højre) i 15 af de søer i kontrolovervågningen af udvikling, der har været undersøgt siden 1989. Søjlerne viser 10, 25, 75 og 90 % fraktiler. Linjen forbinder medianværdien. Fra Johansson mfl. 2015, i udkast.

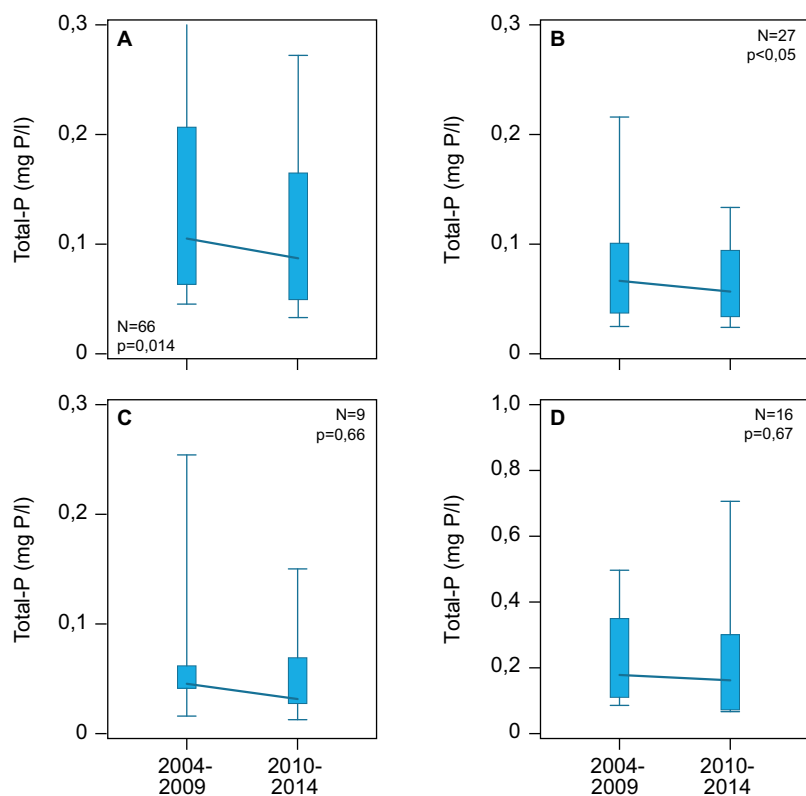


De 15 søers fosforindhold har generelt været faldende siden 1989, men de største ændringer fandt sted i den første del af overvågningsperioden. Dette er sammenfaldende med den periode, hvor de største belastningsreduktioner har fundet sted som følge af forbedret spildevandsrensning og med en

efterhånden aftagende intern fosforbelastning. Endvidere er de største ændringer registreret i de mest næringsrige søer, hvorimod ændringerne i den mindst næringsrige halvdel af søerne har været små. Tilsvarende ændringer ses i indholdet af klorofyl a, som et udtryk for at ændringer i indhold af totalfosfor også fører til ændringer i indholdet af klorofyl a (fig. 5.10).

Ud over de 15 søer, der er fulgt årligt, er der også et større antal søer, som er undersøgt flere gange i den sidste 10 års periode. Udviklingen i indholdet af totalfosfor for fire af de almindeligste søtyper fra denne overvågning er vist i Fig. 5.11. Som det fremgår, har fosforindholdet haft en nedadgående tendens i alle fire søtyper, selvom det kun er i de dybe, alkaline søer, at denne tendens er statistisk signifikant.

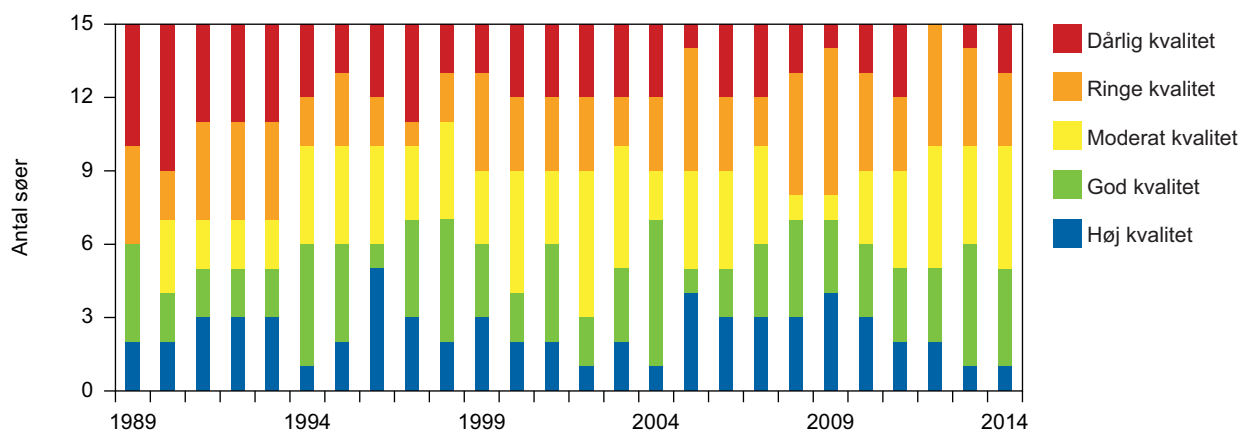
Figur 5.11. Udviklingstendenser fra perioden 2004-2009 til 2010-2014 i totalfosfor (sommer gennemsnit) i fire søtyper, der indgår i kontrolovervågning af tilstand i 2010-2014 og som der tidligere er lavet undersøgelser i. Fra Johansson mfl. 2015, i udkast. N angiver antallet af søer. P angiver sandsynligheden for at de to søjler statistisk set er forskellige (hvis $p < 0.05$ er de forskellige på 5 % signifikansniveau).



5.2.4 Udvikling i de danske søers vandkvalitet

Som nævnt skal de danske søers økologiske kvalitet vurderes på baggrund af fire biologiske kvalitetselementer. Fra mange af de søer, som indgår i forslag til vandområdeplanerne findes der imidlertid kun data om indhold af klorofyl a, og denne koncentration har derfor ligesom i de første vandplaner været anvendt til at vurdere den økologiske tilstand.

Anvendes klorofylindholdet i de 15 søer med årlige målinger som et udtryk for den økologiske kvalitet (og samme grænseværdier mellem klasserne som i udkast til vandområdeplaner, NST 2014) ses der generelt kun små ændringer gennem de sidste 26 år (fig. 5.12). Dog ses i lighed med indholdet af klorofyl a ændringer i søerne med dårligst økologisk tilstand, således at der siden 1989 er blevet færre af disse. Andelen af søer med høj eller god økologisk tilstand har gennem årene varieret mellem 3 og 7 søer ud af de 15 søer, men der er ikke nogen udviklingstendens.



Figur 5.12. Økologisk klasse på baggrund af indhold af klorofyl a i de 15 søer, som har været fulgt kontinuerlig siden 1989. I de lavvandede søer (middeldybde under 3m) er klorofylgrænserne mellem de fem klasser fastsæt ud fra Naturstyrelsen (2012): høj/god: 11.7 µg/l, god/moderat: 25 µg/l, moderat/ringe: 56 µg/l og ringe/dårlig: 90 µg/l. I de dybe søer (middeldybde over 3m) er klorofylgrænserne mellem de fem klasser fastsæt ud fra følgende: høj/god: 7 µg/l, god/moderat: 12 µg/l, moderat/ringe: 27 µg/l og ringe/dårlig: 56 µg/l. Alle værdier er sommergennemsnit.

5.2.5 Konklusioner og perspektiver

Søers indhold af fosfor spiller en afgørende rolle for deres vandkvalitet og økologiske tilstand, fordi fosfor som oftest er begrænsende for produktionen af planteplankton. Reduceret tilførsel af fosfor anbefales derfor oftest som den primære styrende faktor i forhold til at forbedre søers tilstand, sådan som det også har været tilfældet tilbage til amternes recipientplaner 1980-2006, og som anvendt i forbindelse med udarbejdelsen af de seneste forslag til vandområdeplaner.

Koncentration og tilførsel af fosfor kan også direkte relateres til de biologiske kvalitetselementer, der anvendes til at vurdere den økologiske kvalitet i søer jf. Vandrammedirektivet. Dette gælder for begge de to EU-interkalibrerede kvalitetselementer planteplankton og undervandsplaner samt indholdet af klorofyl a. Dermed får søers indhold af fosfor også en afgørende rolle i forhold til udarbejdelsen af vandplaner og de danske søers forvaltning. Det skal bemærkes, at anvendelse af sammenhænge mellem næringsstoffer, her fosfor, og biologiske kvalitetselementer ofte har en stor variation (jf. f. eks. figur 5.9).

Koncentrationen af fosfor er faldet i de danske søer siden 1989, men først og fremmest i den del af søerne, som er mest næringsrige og mest i starten af overvågningsperioden. Tilsvarende ses mindsket indhold af klorofyl a i de mest uklare af søerne og især i løbet af 1990'erne. Indholdet af fosfor er endnu for højt i de fleste danske søer til at de opfylder målsætningen om mindst god økologisk tilstand.

Der er endnu uafklarede forhold vedr. implementeringen af Vandrammedirektivet, herunder fastlæggelsen af den økologiske tilstand i de ikke-interkalibrerede søtyper, og hvilken rolle fosfor spiller her. Der må også forventes nye udfordringer i forhold til forventede klimaforandringer og påvirkningen af søernes vandkvalitet.

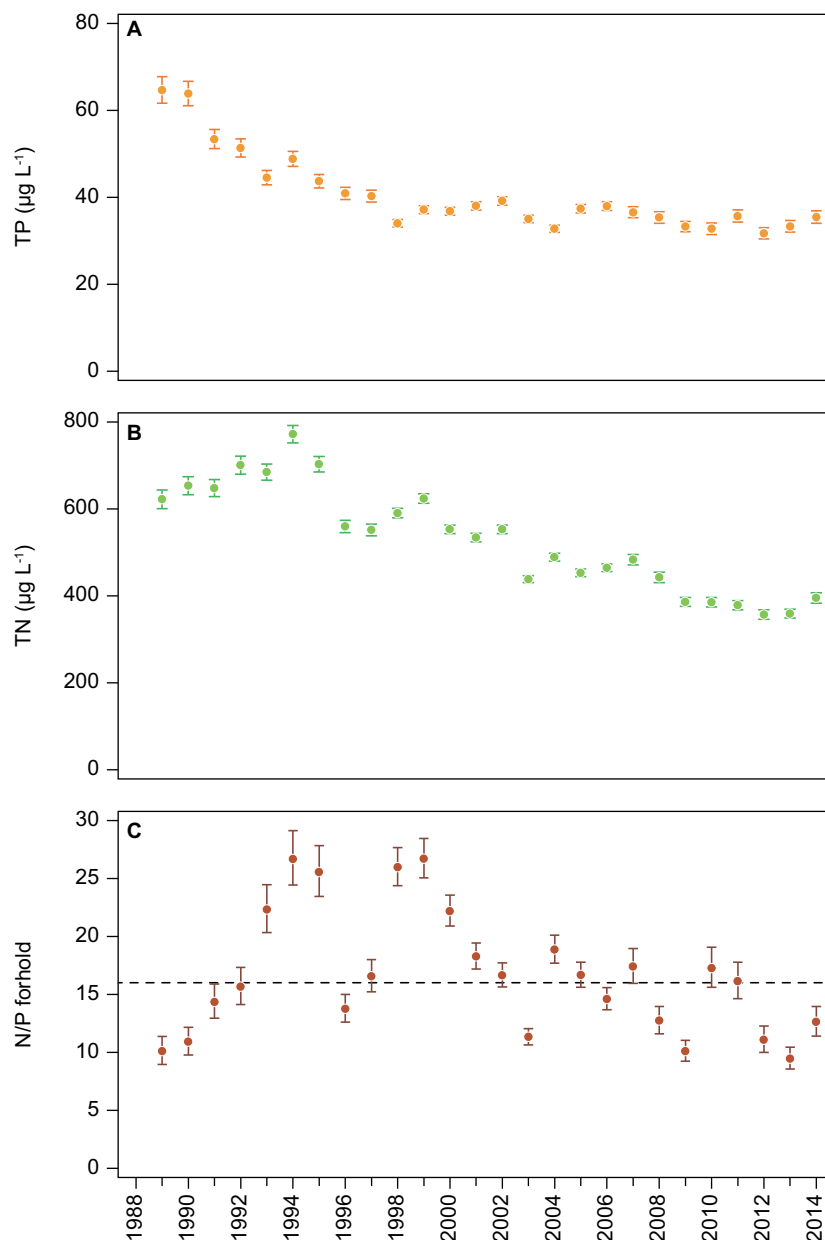
5.3 Fosfor i vandmiljøet – Marint

5.3.1 Fosfor generelt

Udviklingen i koncentrationen af næringsstoffer i marine områder

De første reguleringer af næringsstofftab til det omgivende miljø kom med NPO-handlingsplanen (1985) og den første vandmiljøhandlingsplan (VMP1, 1987). I VMP1 var indsatsen primært målrettet punktkilder som rensningsanlæg og industri. Da punktkilderne var ansvarlige for størstedelen af belastning af vandmiljøet med fosfor (P) men kun en mindre andel af belastningen med kvælstof (N) førte indsatsen i forhold til punktkilder primært til reduktioner i tilførslen af P og dermed koncentrationen af P i havet (Fig. 5.13A). Først i forlængelse af nitratdirektivet (1991) og VMP2 (1998) begyndte der for alvor at ske reduktioner i belastningen med kvælstof (N) fra landbrugsarealerne, mens disse tiltag ikke ændrede nævneværdigt på belastningen med P. Derfor har indsatsen siden midten af 1990'erne overvejende været rettet mod N, hvilket medførte en reduktion i N-koncentrationen i havet (Fig. 5.13B). Som følge heraf skete halvdelen af faldet i koncentrationen af totalfosfor (TP) før 1990, mens faldet i koncentrationen af totalkvælstof (TN) primært er sket efter 1990. Dette forløb har bevirket, at der med tiden er sket forskydninger i forholdet mellem koncentrationen af N og P i havet. Næringsstofferne N og P optages af havets planter hovedsageligt på opløst uorganisk form (DIN og DIP) og giver grundlag for vækst (primærproduktion). N og P optages i planteplankton i et forhold, der typisk ligger på en molratio omkring 16:1 (Redfield 1958). I næringsfattige miljøer kan forskydninger i N:P-ratioen derfor bruges som udtryk for, hvilket næringsstof der er mest begrænsende for primærproduktionen. Planteplankton omfatter dog mange forskellige arter med forskellige tilpasninger. Derfor kan N:P-ratioen i planteplankton variere fra 5:1 og til op over 100:1, når der er overskud af hhv. uorganisk P i forhold til N og omvendt. Det betyder også at man som regel godt kan stimulere væksten af planteplankton ved at tilføre mere af det næringsstof der ellers er overskud af i forhold til Redfield ratioen. Det vil dog ikke stimulere væksten lige så meget som, hvis man tilfører det næringsstof, der er "underskud" af. De sidste 15 år har den biotilgængelige N:P-ratio (målt som DIN:DIP) været aftagende (Fig. 5.13C). Det indikerer en tiltagende N-begrænsning og dermed et overskud af P i de kystnære områder, som har bevirket en øget eksport af P fra de kystnære områder til de mere åbne farvande. Når N bliver begrænsende, så bliver de opløste fosforpuljer ikke assimileret og indbygget i organisk materiale. Det overskydende opløste P kan derfor eksporteres til de åbne farvande. Generelt har P en længere opholdstid i vandmiljøet end N, da det modsat N ikke forekommer på gasform og kun i meget ringe udstrækning findes i luften som opløst eller partikulær forbindelser. P eksporteres derfor primært med vand som opløst eller partikulært materiale eller begravet permanent i sedimentet. Derfor er transporten af P ofte langsommere end for N og sker over kortere afstande. Dette forstærkes yderligere af, at en stor del af P i havet er bundet i havbunden i kortere eller længere perioder (se videre nedenfor).

Figur 5.13. Øverst: Årsmiddelkoncentrationer ($\pm 95\%$ konfidensgrænser) af total fosfor (TP). Midten: total kvælstof (TN). Nederst: forholdet mellem opløst uorganisk kvælstof og fosfor (DIN/DIP-forhold) (mol) i overfladevand (0-10 m) for fjorde og kystnære områder. Det gennemsnitlige forhold mellem N og P i planteplankton (Redfield-ratioen) er markeret med en stiplede linje. (fra Hansen, J.W. (under udarbejdelse)).



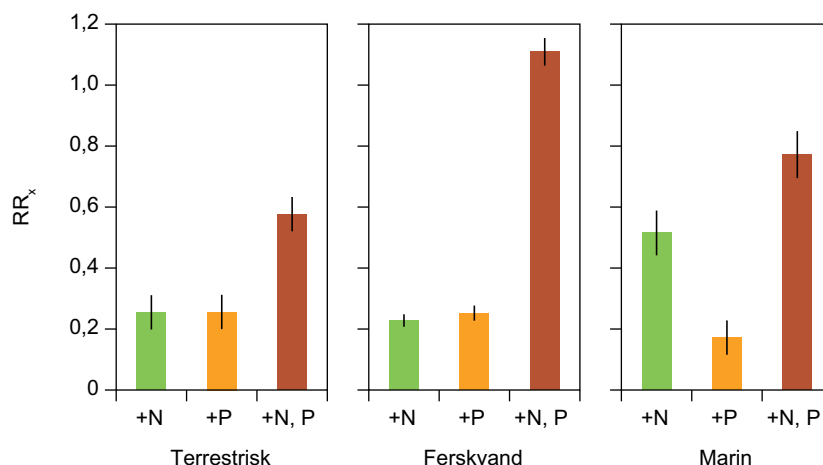
5.3.2 Fosforpuljer og udvekslingen i mellem dem

Langt den største del af fosfor (P) i havet findes i havbunden (sedimentet), hvor den øverste del (oftest 10-20 cm) stadig er biotilgængelig under visse forhold. Det kan være op til 90 – 99 % af den samlede tilgængelige pulje, der ligger i sedimentet, hovedsageligt bundet i iltede jernforbindelser. Når iltforholdene i bundvandet og sedimentet bliver dårlige (lavt redoxpotentiale), reduceres de iltede jernforbindelser i sedimentet, og den tidligere bundne P frigives. Det kan medføre stigende koncentrationer af især opløst, uorganisk P i vandfasen i løbet af sommeren efterhånden, som redoxpotentialet falder i sedimentet. Regulært iltsvind kan bevirke en så stor P-frigivelse, at der opbygges en top i koncentrationen af P. Det sker typisk i løbet af sensommeren eller efteråret og kan bidrage til opblomstring af planteplankton. I perioder kan denne interne P-frigivelse være den dominerende P-kilde.

5.3.3 Effekt på primærproduktionen i det marine miljø

Både kvælstof (N) og fosfor (P) stimulerer primærproduktionen (PP) og væksten af planteplankton (Fig. 5.14). I havet er der i de fleste områder en større effekt af N-berigelse end P-berigelse på PP, men den største effekt opnås dog ved en berigelse med både N og P.

Figur 5.14. Relativt respons (RR) i primærproduktionen forskellige økosystemer ved tilsætning af henholdsvis N og P og en kombination. Skalaen er ln til den faktor primærproduktionen er øget med dvs. 0,2 svarer til en faktor 1,2, 0,5 svarer til faktor 1,6 og 1 svarer 2,7 (fra Elser et al. 2007).

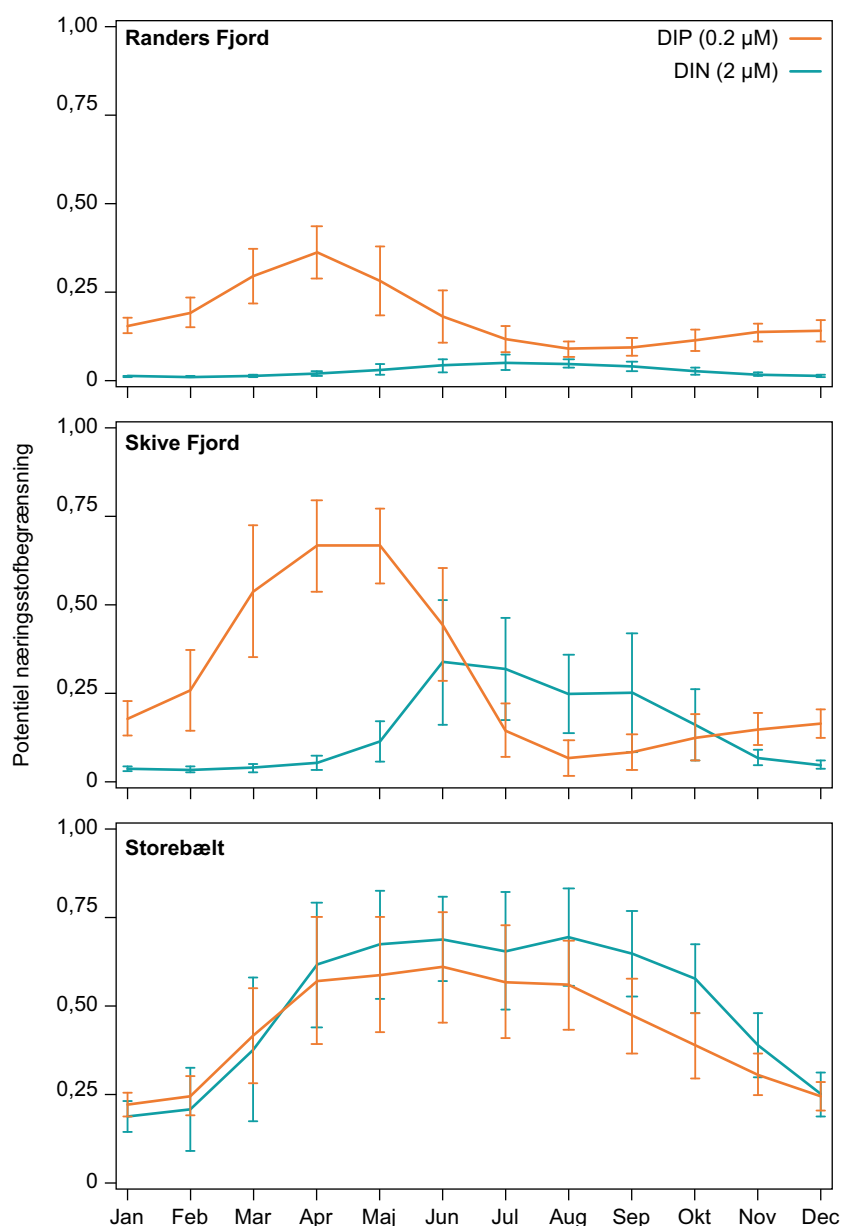


De dele af havmiljøet, hvor P har den største betydning som begrænsende næringsstof, er områder, hvor der er overskud af biotilgængeligt N dvs. tæt på kilderne og i de mere ferske dele af farvandede, hvor der, som i Østersøen, kan ske opblomstringer af kvælstoffikserende blågrønalger. Figur 5.15 viser tre områder med forskellig ferskvandspåvirkning og som følge heraf spænder næringsstofbegrænsningen for væksten af planteplankton fra at være yderst beskeden og næsten udelukkende knyttet til P i Randers Inderfjord til at være ret markant og sæsonbestemt i Skive Fjord. I Skive Fjord er P således det mest begrænsende næringsstof om foråret, mens væksten senere på sommeren hovedsageligt er begrænset af N. I de mere åbne dele af de indre farvande er både N og P begrænsende for væksten, men generelt i højere grad N end P (Fig. 5.14).

I de senere år er der blevet flere områder, hvor både N og P i væsentlig udstrækning er potentielt begrænsende for væksten. Det skyldes hovedsageligt, at belastningen med N er reduceret yderligere i perioden, mens belastningen med P har været relativ stabil. Den ændrede N:P-ratio har medført, at planktonvæksten i mange områder hovedsageligt har været P-begrænset i store dele af halvfemserne, hvor væksten oprindeligt har været og nu igen overvejende er N-begrænset eller begrænset af begge næringsstoffer. Ændret N:P-ratio har med stor sandsynlighed også påvirket artssammensætningen af planteplankton. Sammenhængen mellem N:P-ratio og artssammensætning er kompleks, idet visse arter både kan blive dominerende ved en høj og ved en lav ratio. Arter med denne egenskab har typisk en strategi til skaffe sig det næringsstof, der er i "underskud" - enten ved luksusoptag (dvs. optag ud over det umiddelbare behov) og lagring af det næringsstof, der kan blive mangel på senere eller, ved heterotrofi, hvor visse algearter spiser andre alger eller bakterier for at supplere deres optag af N eller P. Andre strategier kan f.eks. være kvælstoffiksering eller produktion af stoffer, som kan hæmme andre algers vækst. Risikoen ved store forskydninger i N:P ratioen inden for relativ kort tid er, at det kan give tilpasningsdygtige algegrupper en konkurrencefordel frem for de oprindelige arter, som er tilpasset mere stabile forhold. Det kan føre til ubalance i hele det pelagiske økosystem, som

derved bliver mere sårbart overfor andre stresspåvirkninger såsom klimaforandringer. Derfor er det med risiko for utilsigtede ændringer i økosystemet, hvis der kun satses på at regulere et af næringsstofferne.

Figur 5.14. Potentiel næringsstofbegrænsning i Randers Inderfjord, Skive Fjord og Storebælt beregnet som $1 - \frac{S}{K_S + S}$, hvor S er koncentrationen af substrat/næringsstof og K_S er halv-væksthastighedskonstanten. K_S er baseret på litteraturværdier og er her 2 μM for opløst uorganisk N (DIN) og 0,2 μM for opløst uorganisk P (DIP). Det betyder at 1 angiver maksimal næringsstofbegrænsning (dvs. ingen biotilgængelige næringsstoffer), mens der fra 0 til 0,5 kun er lidt eller ingen næringsstofbegrænsning (dvs. stort overskud af biotilgængelige næringsstoffer).



P har som nævnt en betydelig regulerende rolle for væksten af planteplankton, derfor har P også en stor betydning for dyr og planter på havbunden. Planteplankton er nemlig et vigtigt fødegrundlag for bunddyr, og en øget vækst af planteplankton vil derfor bevirke en øget mængde bunddyr og en ændret artssammensætning af bunddyrene. Denne positive effekt gælder dog kun, indtil tilførslen af planteplankton bliver så stor, at iltforbruget til omsætning af det sedimenterede planteplankton forårsager iltsvind, som har en markant negativ effekt på bunddyrene.

5.3.4 Ålegræs og andre makrofytter

Som følge af forurening med næringsstoffer vil lysforholdene i et akvatisk økosystem forringes. Dels fordi højere koncentration af planteplankton i sig selv øger lysvækkelsen i vandsøjlen, men også fordi den øgede produktion

af organisk materiale, både i opløst og suspenderet form, også øger lyssvækkelsen. Som resultat modtager de bundlevende planter mindre lys, jo mere planteplankton der er i vandsøjlen ovenover. Disse bundplanter i form af blomsterplanter, tang (makroalger), epifytter (alger som vokser fasthæftet på andre planter) og bentiske mikroalger (alger som gror på havbunden) bliver derfor relativt mindre dominerende, når mængden af næringsstoffer og dermed planteplankton øges, mens det modsatte er tilfældet, når mængden af næringsstoffer mindskes (Krause-Jensen et al. 2011). Væsentlige ændringer i tilførslerne og dermed koncentrationerne af næringsstoffer kan derfor medføre markante strukturelle forskydninger i marine økosystemer. Ved meget lave koncentrationer af både N og P i havvandet har makrofytter, som ålegræs (*Zostera*) og havgræs (*Ruppia sp*) en konkurrencefordel i forhold til planteplankton. Særligt blomsterplanterne har mulighed for via deres rodnet at udnytte næringsstofpuljerne i sedimentet til vækst og har dermed en konkurrencefordel, når næringsstofkoncentrationerne i vandfasen er meget lave. Makrofytter (både blomsterplanter og tang) har også den fordel at de kan lagre næringsstofferne i deres store biomasse, og de producerer også en masse strukturvæv, som har en meget høj C:N:P ratio. Derfor er deres behov for næringsstoffer per biomasseenhed generelt også væsentligt lavere end hos planteplankton. Da blomsterplanterne er rodfæstede planter er de meget afhængige af sedimentets tilstand. Næringsstofbelastede (N og P) områder får med tiden oftest et sediment, som er beriget med let nedbrydeligt organisk materiale. Det kan give dårlige iltforhold og medføre produktion af sulfider, herunder svovlbrinte, som planterne er særligt følsomme overfor. Rent fysisk kan sedimentet også blive så løst, at de rodfæstede planter ikke kan holde fast. Kombinationen af løst og iltfattigt sediment kan forstærke de ugunstige forhold for blomsterplanterne, da de ikke kan lave dybe rødder i et iltfattigt sediment.

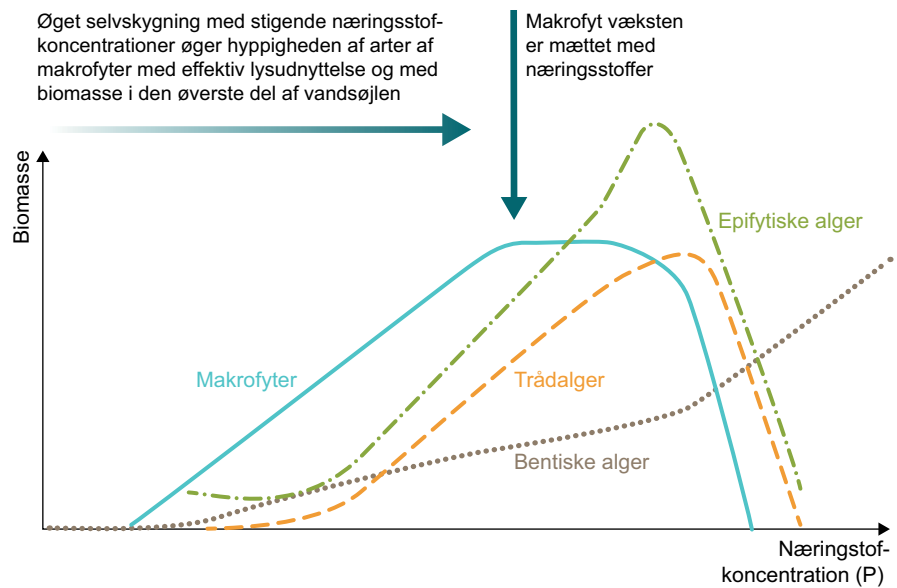
5.3.5 Opsummering

Fosfor har generelt stor betydning for miljøtilstanden i det marine miljø særligt i de lukkede og mest ferske fjorde. Det gælder både for produktionen i de frie vandmasser og som følge heraf også for bundlevende flora og fauna. Effekten af forurening med fosfor skal dog ses i sammenhæng med udledning af andre næringsstoffer særligt kvælstof. Samlet set for de danske farvande spiller kvælstof en vigtigere regulerende rolle end fosfor og der er også et vist efterslæb i kvælstofreduktionerne. Men i visse kystnære områder og på visse tider af året er fosfor det vigtigste næringsstof. Det vurderes derfor at kvælstof, isoleret set, har størst betydning for regulering af plantevæksten i det danske havmiljø – men at også fosfor spiller en væsentlig rolle, og at ideelt set bør effekten af begge næringsstoffer derfor vurderes med henblik på at forbedre miljøtilstanden i de danske farvande.

5.4 Fosfors påvirkning af vandmiljøet i vandløb

Fosfor betragtes normalt ikke som værende begrænsende for plantevækst i danske vandløb, hvilket dels skyldes generelt høje koncentrationer samtidig med at stofudvekslingen i strømmende vand generelt er hurtig, hvilket øger tilgængeligheden for primærproducenterne. Imidlertid kan indholdet af fosfor i vandløbsvandet spille en væsentlig rolle for sammensætningen af primærproducenter. Dette betyder også at ændringer i næringsstofkoncentrationerne vil kunne påvirke hyppigheden af forskellige grupper af primærproducenter og artssammensætningen af disse.

Figur 5.16. Sammenhænge mellem forskellige typer af primærproducenter og næringsstofkoncentrationen i vandløbsvandet her eksemplificeret ved fosfor (P). Modifieret efter Hilton et al. (2006).

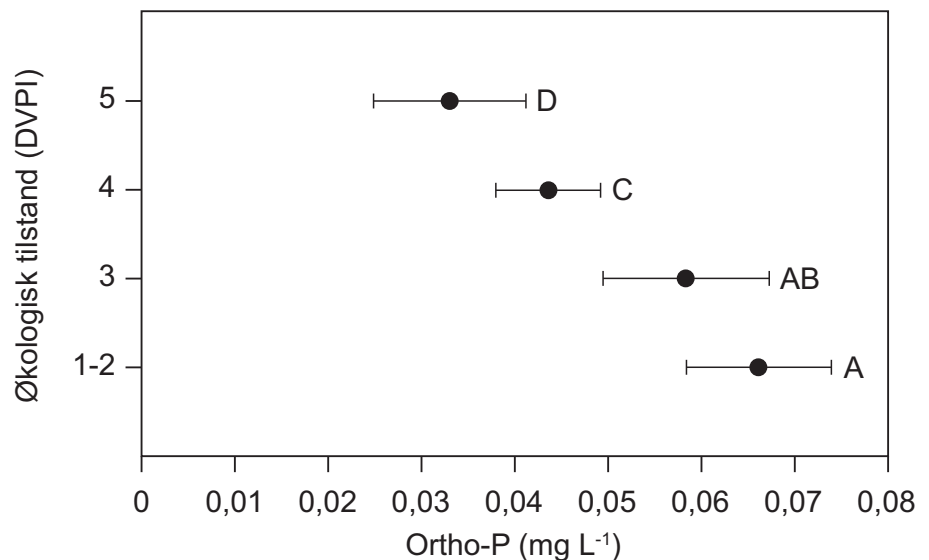


Box

Sammenhænge mellem forskellige typer af primærproducenter og næringsstofkoncentrationen i vandløbsvandet er afbildet i figur 5.16. Figuren illustrerer sammenhænge mellem koncentrationen af fosfor i vandløbsvandet og biomassen af forskellige grupper af primærproducenter. Ved lave fosfor koncentrationer er makrofyternes vækst fosfor begrænset. Når næringsstofkoncentrationen stiger øges biomassen i vandløbet og dermed selvskygningen. Det betyder også at artssammensætningen ændres. Ved intermediære fosfor koncentrationer vil makrofyterarter med effektiv lysoptagelse blive hyppigere sammen med arter der har hovedparten af biomassen i den øverste del af vandsøjlen hvor lystilgængeligheden er bedst. Ved de høje koncentrationer er makrofyternes vækst mættet. Imidlertid øges epifyternes vækst på planternes bladoverflader fortsat når makrofyternes vækst er mættet med fosfor, hvilket bidrager til at forringe lysklimaaet yderligere for makrofyterne i vandløbene, hvilket kan hæmme væksten.

5.4.1 Sammenhænge mellem fosforindhold og økologisk tilstand vurderet med DVPI

Den økologiske tilstand i vandløb skal jævnfør udkast til vandområdeplanerne vurderes på baggrund af tre biologiske kvalitetselementer: Makrofyter, makroinvertebrater og fisk, mens de bentiske alger endnu ikke indgår i vurderingen. Imidlertid kan man forvente, at både makrofyterne og de bentiske alger vil være følsomme overfor næringsstofkoncentrationen i vandløbsvandet. Dansk Vandløbsplanteindeks (DVPI) responderer på flere parametre (Søndergaard et al. 2013; Baattrup-Pedersen et al. 2015), herunder også koncentrationen af uorganisk fosfor i vandløbsvandet. Dette kan ses i figur 5.17, som er baseret på data indsamlet under det nationale overvågningsprogram NOVANA (Wiberg-Larsen et al. 2013). Ved koncentrationer af uorganisk fosfor, der er større end gennemsnitligt $43 \pm 5,6 \mu\text{g ortho-P L-1}$ (gennemsnit $\pm 95\%$ konfidensgrænser), er der risiko for, at vandløbet ikke har målopfyldelse vurderet ved DVPI. Omvendt giver koncentrationer under $43 \pm 5,6 \mu\text{g ortho-P L-1}$ (gennemsnit $\pm 95\%$ konfidensgrænser) ikke sikkerhed for målopfyldelse med DVPI, da andre påvirkningsfaktorer i vandløb også indvirker på DVPI.



Figur 5.17. Middelkoncentrationer ($\pm 95\%$ konfidensgrænser) indholdet af uorganisk fosfor ortho-P () i vandløbsvandet og økologisk tilstand i vandløb vurderet med Dansk Vandløbsplanteindeks (DVPI). DVPI kan antage værdier mellem 1 og 5, hvor 1 angiver dårlig, 2 ringe, 3 moderat, 4 god og 5 høj økologisk tilstand. Tilstandsklasse 1 og 2 er grupperet sammen i figuren da kun ganske få vandløb ligger i DVPI tilstandsklasse 1. Forskellige bogstaver indikerer at der er signifikante forskelle på middelværdier (ANOVA; $P < 0,05$). Figuren er baseret på data indsamlet i perioden 1999-2011 i de nationale overvågningsprogrammer NOVA og NOVANA ($n=229$ stationer).

5.4.2 Sammenhænge mellem fosforindhold og plantearter

En række arter, som fx børsteblandet og kruset vandaks, aks-tusindblad og en række sumpplanter som sø- og skov-kogleaks og dunhammer, indikerer, at der kan være forhøjede fosforkoncentrationer i vandløb (Wiberg-Larsen et al. 2013). Ligeledes indikerer kantplanter som bittersød natskygge, rød hestehov og en række flydebladsplanter, at der er forhøjede fosforkoncentrationer. Flere af disse arter er også tidligere identificeret som hyppige i næringsstoffbelastede vandløb i Europa, og de har derfor betydning for den økologiske tilstandsfastsættelse i mange europæiske lande (Birk og Wilby, 2010). Positive sammenhæng mellem dækningen af disse arter og fosforindholdet i vandløbsvandet betyder også, at nedbringes fosforindholdet i vandløbsvandet, kan det medføre ændringer i plantesammensætningen, og såfremt der ikke er målopfyldelse vurderet ud fra plantesamfundene, kan en nedbringelse af fosforindholdet i vandløbsvandet være vejen frem mod målopfyldelse.

Modsat indikerer høje dækninger af arter som hår-tusindblad og liden vandaks samt af en række mindre terrestriske og amfibiske arter som bl.a. vand-pileurt, eng-kabelleje, næb-star, lyse-siv, kragefod og sumpkællingetand, at de pågældende vandløb ikke er påvirket af forhøjede fosforniveauer. Det betyder også, at hvis en vandløbsstrækning med stor dækning af disse arter ikke har målopfyldelse, igen vurderet ud fra plantesamfundene, er årsagen en anden end et for stort fosforindhold.

5.4.3 Interaktion mellem fosfor og andre påvirkningstyper i vandløb

Hovedparten af de danske vandløb, der har moderat høje og høje koncentrationer af fosfor, er også udsat for hydromorfologiske påvirkninger i form af grødeskæring og opgravninger, samt andre kemiske påvirkninger i form af eksempelvis kvælstof og miljøfremmede stoffer. Derfor kan det være svært

at adskille påvirkningen fra fosfor fra andre negative påvirkninger. Imidlertid viser nye undersøgelser også, at det er muligt, ved at analysere vægtede gennemsnit af planternes egenskaber fx vækstformer og livsformer, at belyse om årsagen til manglende målopfyldelse skyldes forhøjede fosforkoncentrationer, andre typer af samtidige påvirkninger eller en kombination.

5.4.4 Konklusioner

I vandløb kan en stigende koncentration af uorganisk fosfor påvirke lysforholdene i vandløbet og dermed også sammensætningen af arter. Det betyder også at vandløbets økologiske tilstand vurderet med anvendelse af DVPI kan påvirkes. Analyser af tilgængelige data fra overvågningsprogrammet NOVANA viser, at vandløb med fosfor koncentrationer i vandløbsvandet der overstiger $43 \pm 5,6$ μg ortho-P L-1 (gennemsnit \pm 95 % konfidensgrænser) kan være i risiko for manglende målopfyldelse ift. Vandrammedirektivet.

6 Referencer

Andersen, H.E., Larsen, S.E., Kronvang, B., Hansen, K.M., Laubel, A., Windolf, J. & Muus, K. (2006). Fosfat i drænvand. *Vand & Jord*, 13 (4), 152-156.

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

Anderson, D. M., Glibert, P. M., & Burkholder, J. M. (2002). Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, 25(4), 704-726.

Arrigo, K. R. (2005). Marine microorganisms and global nutrient cycles. *Nature*, 437(7057), 349-355.

Baatrup-Pedersen, A., Göthe, E., Riis, T. (2015) DVPI og økologisk tilstand: Karakteristik af plantesamfundene og relation til påvirkninger.

Birk, S. & Wilby, N. (2010) Towards harmonization of ecological quality classification: establishing common grounds in European macrophyte assessment for rivers. *Hydrobiologia* 652: 149-163.

Blaauw, D., Sissingh, H.A. & Chardon, W.J. (1988). Verdeling van fosfaat im bodemprofielen in Nederland. Internal report Inst. Soil Fert. Research, 25 pp.

Blicher-Mathiesen, G., Rasmussen, A., Andersen, H.E., Timmermann, A., Jensen, P.G., Wienke, J., Hansen, B. & Thorling, L. 2015. Landovervågningsoplande 2013. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 158 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 120.

Blicher-Mathiesen, G., Rasmussen, A., Rolighed, J., Andersen, H.E., Jensen, P.G., Wienke, J., Hansen, B. & Thorling, L. 2015. Landovervågningsoplande 2014. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 154 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 164. <http://dce2.au.dk/pub/SR164.pdf>

Bondorff, KA, 1950. Studier over jordens fosforsyreindhold. VI. Jordfosforsyrens opløselighed i fortyndes svovlsyre. *Tidsskrift for Planteavl*. 53:336-342.

Borggaard, O.K., Jørgensen, S.S., Møberg, J.P. & Raben-Lange, B. (1990). Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminium and iron oxides in sandy soils. *J. Soil Science* 41, 443- 449.

Borggaard, O.K., Møberg, J.P. & Sibbesen, E. 1991. Indhold og mobilitet af fosfor i jord. I: Frier, J.O. & Christensen, J.F. (red.): Kvælstof, fosfor og organisk stof i jord- og vandmiljøet. Rapport fra konsensuskonference 31. januar til 4. februar 1991. Undervisningsministeriets Forskningsafdeling, 4.1-4.24.

Borggaard, O.K., Szilas, K., Gimsing, A. & Rasmussen, L., 2004. Estimation of soil phosphate adsorption capacity by means of a pedotransfer function. *Geoderma* 118, 55-61.

Breeuwsma, A., Silva, S. 1992. Phosphorus fertilization and environmental effect in The Netherlands and the Po region (Italy). Report DLO Staring Centre, Wageningen No. 57. The Winand Staring Centre, Wageningen.

Bøgestrand, J. (red.) (2007). Vandløb 2006. NOVANA. Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. 96 s. – Faglig rapport fra DMU nr. 642 <http://www.dmu.dk/Pub/FR642.pdf>

Casson, J.P., Bennett, D.R., Nolan, S.C., Olson, B.M., Ontkean, G.R. 2006. Degree of Phosphorus Saturation Thresholds in Manure-Amended Soils of Alberta. *J. Environ. Qual.* 35:2212–2221.

Chardon, W. & van Faassen, H.G. (1999). Soil indicators for critical source areas of phosphorus leaching. Wageningen: The Netherlands Integrated Soil Research Programme. Programmebureau Geïntegreerd Bodemonderzoek deel 22.34, pp.2 app.

Coelho, J. P., Flindt, M. R., Jensen, H. S., Lillebø, A. I., & Pardal, M. A. (2004). Phosphorus speciation and availability in intertidal sediments of a temperate estuary: relation to eutrophication and annual P-fluxes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61(4), 583-590.

Conley, D. J., Paerl, H. W., Howarth, R. W., Boesch, D. F., Seitzinger, S. P., Havens, K. E., Lancelot C. & Likens, G. E. (2009). Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*, 323(5917), 1014-1015.

DMU 2002: Temarapport nr 42. Stofomsætning i havbunden Af Peter Bondo Christensen et al.

Elser, J. J., Bracken, M. E., Cleland, E. E., Gruner, D. S., Harpole, W. S., Hillebrand, H., Ngai J. T., Seabloom E. W., Shurin J. B. & Smith, J. E. (2007). Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology letters*, 10(12), 1135-1142.

Eriksen J., Jensen P.N., Jacobsen B.H. (2014) Virkemidler til realisering af 2. generations vandplaner og målrettet arealregulering. 327 s. DCA rapport nr. 52.

Geider, R., & La Roche, J. (2002). Redfield revisited: variability of C: N: P in marine microalgae and its biochemical basis. *European Journal of Phycology*, 37(1), 1-17.

Glæsner, N; Kjærgaard, C; Rubæk, GH; Magid, J. 2011. Effect of irrigation regimes on mobilization of nonreactive tracers and dissolved and particulate phosphorus in slurry-injected soils. *Water Resources Research*, 47: 344-351.

Glæsner, N; Kjærgaard, C; Rubæk, GH; Magid, J. 2011. Interactions between Soil Texture and Placement of Dairy Slurry Application: I. Flow Characteristics and Leaching of Nonreactive Components. *Journal of Environmental Quality*, 40: 337-343.

Glæsner, N; Kjærgaard, C; Rubæk, GH; Magid, J. 2011. Interactions between Soil Texture and Placement of Dairy Slurry Application : II. Leaching of Phosphorus Forms. *J. Environ. Qual.* 40:344-351.

Glæsner, N; Kjærgaard, C; Rubæk, GH; Magid, J. 2013. Relation between soil P test values and mobilization of dissolved and particulate P from the plough layer of typical Danish soils from a long-term field experiment with applied P fertilizers. *Soil Use and Management*, 29:297-305.

Gjetterman, B. (2004). Modelling P dynamics in soil – decomposition and sorption. Technical report, Concepts and user manual. 109 s. DHI Water and Environment.

Grant, R., Laubel, A., Kronvang, B., Andersen, H.E., Svendsen, L.M. & Fuglsang, A. (1996b). Loss of dissolved and particulate phosphorus from arable catchments by subsurface drainage. *Water Res.* 30, 2633-2642.

Grant, R., Blicher-Mathiesen, G., Andersen, H.E., Grewy Jensen, P., Pedersen, M. & Rasmussen, P. (2002). Landovervågningsoplande 2001. NOVA 2003. Danmarks Miljøundersøgelser. Faglig rapport fra DMU 420 (elektronisk), 125 s.

Greve, Mogens H.; Christensen, Olé F.; Greve, Mette B.; Kheir, Rania Bou, 2014, Change in Peat Coverage in Danish Cultivated Soils During the Past 35 Years, *Soil Science*: May 2014 - Volume 179 - Issue 5 - p 250–257

Hansen, B. (1981). Drænvandskvantitet og -kvalitet I Susåens opland. Nr. 19 SUSÅ-H, København. Dansk Komite for Hydrologi.

Hansen, B. (1990). Landbrugets gødnings- og arealanvendelse i 1983 og 1989. Interviewundersøgelser i syv mindre landbrugsområder. NPo-forskning fra Miljøstyrelsen nr. A21.

Hansen, Jens W. (red.). Marine områder 2014. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, Videnskabelig rapport fra DCE nr.167 - Nationalt Center for Miljø og Energi.

Hansen, RB, Johansson, LS, Søndergaard, M, Jeppesen, E, Lauridsen, TL, Kjeldgaard, A, Sortkjær, L, Windolf, J & Bøgestrand, J 2013. [Søer 2012: NOVANA](#). Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, nr. 76.

Haynes, R.J. 1984. Lime and phosphate in the soil-plant system. *Advan. Agron.* 37, 249-315.

Heckrath, G, Andersen, HE, Rubæk, G, Kronvang, B, Kjærgaard, C & Hoffmann, CC, 2009. Et web-baseret P-indeks som miljøplanlægningsredskab: del 1. *Vand og Jord* nr. 2: p44-48.

Heckrath, G. Brookes, P., Poulton, P. & Goulding, K.W.T. 1995. Phosphorus leaching from soils containing different P concentrations in the Broadbalk experiment. *J. Environ. Qual.* 24, 904-910.

Hermansen, B. & Jakobsen, P.R., 1999. Danmarks digitale jordartskort 1:25 000. CD-ROM version 1.0. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 1998/79. GEUS, København.

Hoffmann, C.C. & Ovesen, N.B. (2003). Næringsstofomsætning og -tab ved ekstensiv græsning på lavbundsarealerne ved Fussingø. I: Hald, A.B., Hoffmann, CC og Nielsen, L. (red.): Ekstensiv afgræsning af ferske enge – botanisk diversitet, småpattedyr, miljø og produktion. DJF rapport, Markbrug 91.

Hooda, P.S., Moynagh, M., Svoboda, I.F., Edwards, A.C., Anderson, H.A. 2000. Phosphorus loss in drainflow from intensively managed grassland soils. *J. Environ. Qual.* 28:1166-1171.

Howarth, R. W., & Marino, R. (2006). Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: evolving views over three decades. *Limnology and Oceanography*, 51(1part2), 364-376.

Iversen, B.B., Børgesen, C.D., Lægdsmand, M., Greve, M.H., Heckrath, G. og Kjærgaard, C. 2011. [Risk predicting of macropore flow using pedotransfer functions, textural maps and modeling](#). *Vadose Zone Journal*, Vol. 10, Nr. 4, 2011, s. 1185-1195.

Jensen, P.N., Boutrup, S., Fredshavn, J.R., Svendsen, L.M., Blicher-Mathiesen, G., Wiberg-Larsen, P., Bjerring, R., Hansen, J.W., Søgaard, B., Pihl, S., Ellermann, T., Thorling, L. & Holm, A.G. 2015 : Vandmiljø og Natur 2013. NOVANA. Tilstand og udvikling – faglig sammenfatning.. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 90 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 126.

Jensen, H. S., Mortensen, P. B., Andersen, F., Rasmussen, E., & Jensen, A. (1995). Phosphorus cycling in a coastal marine sediment, Aarhus Bay, Denmark. *Limnology and Oceanography*, 40(5), 908-917.

Jensen, M.B., Hansen, H.C.B., Magid, B., Nielsen, N.E. (1999). Phosphate leaching from intact soil column in response to reducing conditions. *Water, Air Soil Pollut.* 113, 411-423.

Jensen, M.B., Olsen, T.B., Hansen, H.C.B. & Magid, J. (2000). Dissolved and particulate phosphorus in leachate from structured soil amended with fresh cattle-faeces. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 56, 253-261.

Jeppesen E, Søndergaard M, Kronvang B, Jensen JP, Svendsen LM & Lauridsen T 1999. Lake and catchment management in Denmark. In: Ecological basis for lake and reservoir management, (eds. Harper D., Ferguson A., Brierley B. & Phillips G.). *Hydrobiologia* 395/396: 419-432.

Johansson, L.S., Søndergaard, M., Nielsen, A., Landkildehus, F., Kjeldgaard, A., Sortkjær, L. Windolf, J. & Bøgestrand, J. 2015. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 84 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 166.

de Jonge, L., Jacobsen, O.H. & Moldrup, P. (1999). Soil water repellency: effects of water content, temperature, and particle size. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 437-442.

de Jonge, L.W., Moldrup, P. Schelde, K. & Rubak, G. (2002). Field variations in colloid facilitated transport of phosphorus. In: de Jonge, L.W., Moldrup, P., & Jacobsen, O.H. (eds.). *Colloids and colloid-facilitated transport of contaminants in soils and sediments*. DIAS report, Plant production 80, 227-236.

de Jonge, L.W., P. Moldrup, G.H. Rubæk, K. Schelde, & J. Djurhuus. 2004. Particle leaching and particle-facilitated transport of phosphorus at field scale. *Vadose Zone J.* 3:62-470.

Jordan-Meille, L, Rubæk, GH, Ehlert, PAI, Genot, V, Hifman, G, Goulding, K, Recknagel, KJ, Provolo, G & Barraclough, P, 2012. An overview of fertiliser-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertiliser recommendations. *Soil Use and Management* 28, 419–435.

Jørgensen, P.R., Krogh, P.H., S. Hansen, Petersen, C.T., Habekost-Nielsen, M., Rasmussen, S.B., Spliid, N.H., (submitted). Dybe biopores forekomst og betydning for pesticidudvaskning i moræneler. Miljøstyrelsens program for bekæmpelsesmiddelforskning.

Kjellerup, V & Kofoed, A.D. (1979). Kvælstofgødskningens indflydelse på drænvandets indhold af plantenæringsstoffer. Beretning nr 1465, Statens Planteavlsvforsøg.

Kjærgaard, C., Hoffmann, C.C. og Greve, M.H. 2009. Risikovurdering af fosfortab fra lavbundslande. *Vand og Jord* nr. 2, pp 62-65.

Kleinman, P.J.A., Church, C., Saporito, L.S., McGrath, J.M., Reiter, M.S. Allen, A.L., Tingle, S. Binford, G.D., Han, K. and Joern, B.C. (2015). Phosphorus leaching from agricultural soils of the Delmarva Peninsula, USA. *J. Environ. Qual.*, 44, 525-534.

Knudsen, L, Kristensen, K, Heckrath, G & Kjaergaard C, 2011. Udtagning af jordbundsprøver, opbevaring, og forberedelse til analyse. In: GH. Rubæk and P. Sørensen (eds.) *Jordanalyser – Kvalitet og anvendelse*. DCA Rapport nr. 002 Aarhus Universitet. DCA Nationalt center for Fødevarer og Jordbrug. p. 17-32.

Krause-Jensen, Dorte, Markager, Stiig & Dalsgaard, Tage (2011). Benthic and pelagic primary production in different nutrient regimes. *Eustaries and Coast* 35:527-545

Kronvang B, Rubæk GH. 2005. Kvantificering af dyrkningsbidraget af fosfor til vandløb og søer. I: Poulsen HD, Rubæk GH, red. *Fosfor i dansk landbrug*. Omsætning, tab og virkemidler mod tab. 2005, s. 132-145. (DJF rapport, Husdyrbrug; 68)

Kronvang B., Bechmann M., Lundekvam H., Behrendt H., Rubæk G. H., Schoumans O.F., Syversen N., Andersen H.E. and Hoffmann C.C. 2005. Phosphorus Losses from Agricultural Areas in River Basins: Effects and Uncertainties of Targeted Mitigation Measures. *Journal of Environmental Quality* 34:2129-2144.

Kronvang, B., Andersen, H.E., Larsen, S.E. and Audet, J. 2013. Importance of bank erosion for sediment input, storages and export at the catchment scale. *Journal of Soils and Sediments*, 13, 230-241.

Kyllingsbæk, A. (2005) *Næringsstofbalancer og næringsstofoverskud i dansk landbrug 1979-2002*. DJF rapport 116, August 2005, 103 s.

Kyllingsbæk, A. (2008) Landbrugets husholdning med næringsstoffer 1900-2005. Intern rapport. DJF markbrug nr. 18. Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet, Aarhus Universitet, 80 s.

Laubel, A., Jacobsen, O.H., Kronvang, B., Grant, R. and Andersen, H.E. (1999). Surface drainage loss of particles and phosphorus from field plot experiments and a tile-drained catchment. *J. Environ. Qual.*, 28 (2), 576-584.

Lillebø, A. I., Neto, J. M., Flindt, M. R., Marques, J. C., & Pardal, M. A. (2004). Phosphorous dynamics in a temperate intertidal estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61(1), 101-109.

Lu, S., Trolle, D., Andersen, H.E., Thodsen, H. og Rubæk, G.H. (submitted): Extended SWAT model for dissolved reactive phosphorus transport in tile-drained fields and catchments. *Agricultural Water Management*.

Magid, J. Jensen, M.B., Mueller, T. & Hansen, H.C.B. (1999). Phosphate leaching responses from unperturbed, anaerobic, or cattle manured mesotrophic sandy loam soils. *J. Environ. Qual.* 28, 1796-1803.

McDowell, R.W. and A.N. Sharpley. (2001). Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage. *J. Environ. Qual.* 30: 508-520.

Moriasi, D.N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, T. L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50 (3); 885-900.

Mundus, S, Carstensen, A & Husted, S, 2013. Testing for plant available phosphorus in soils. IFS, International Fertiliser Society, Proceeding 738. Page 1-24.

Munkholm, L.J. & Sibbesen, E. 1997. Tab af fosfor fra landbrugsjord. *Miljøforskning no. 30*. Det Strategiske Miljøforskningsprogram, 63 sider.

NaturErhvervstyrelsen 2015. Vejledning om gødsknings- og harmoniregler. Planperioden 1.august 2015 til 31. juli 2016.
https://naturerhverv.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Landbrug/Goedningsregnskab/Vejledning_om_goedsknings-og_harmoniregler_nyeste.pdf . 166 s.

Naturstyrelsen 2012. Retningslinjer for udarbejdelse af indsatsprogrammer Vandplaner 2010 – 2015.
<http://naturstyrelsen.dk/media/nst/66569/Retningslinjer%20for%20udarbejdelse%20af%20indsatsprogrammer.pdf>.

Naturstyrelsen, 2014a. Udkast til Vandområdeplan 2015-2021 for Vandområdedistrikt Jylland og Fyn.

Naturstyrelsen 2014b. Basisanalyse for Vandområdeplaner 2015-2021.

Naturstyrelsen (2014). Vedtagne vandplaner 2009-2015.
<http://naturstyrelsen.dk/vandmiljoe/vandplaner/vandplaner-2009-2015/vedtagne-vandplaner-2009-2015/>

Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., (2001), Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation - Version 2000, Blackland Research Center – Agricultural Research Service, Texas – USA

Olesen, S.E. 2007. Opdeling af lavbundsarealer efter jordklasse (FK), georegion, kvartærgeologi og okkerklasse. DJF Markbrug nr. 10.

Olsen, SR, Cole, CV, Watanabe, FS & Dean, LA, 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Circular 939, United States Department of Agriculture, Washington DC.

Pedersen, E.F. (1983). Drænvandsundersøgelser 1971-81. Beretning nr. S 1667. Statens Planteavlsvforsøg, 53 s.

Pedersen, E.F. (1985). Drænvandsundersøgelser på marsk og dyb tørvejord 1971-84. Tidsskrift for Planteavl 89, 319-329.

Petersen, C.T., Marie H. Nielsen, Søren Hansen, Per Abrahamsen og Christian B. Koch. 2013. Undersøgelse af makroporekontinuitet ved markdræn og effekter af direkte forbundne makroporer på jords filterfunktion. Bekæmpelsesmiddelforskning nr. 144. Miljøstyrelsen.

Piil, K. og Knudsen. 2013. Drænvandsundersøgelsen 2012/13. Resultater. Videncenter for Landbrug.

Pote, D.H., Daniel, T.C., Nichols, D.J., Sharpley, A.N., Moore, P.A., Miller, D.M. & Edwards, D.R. 1999. Relationship between phosphorus levels in three ultisols and phosphorus concentration in runoff. J. Environ. Qual. 28, 170-175.

Poulsen HD. & Rubæk GH. 2005. Fosfor i dansk landbrug. Aarhus Universitet, Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet. 211 p.

Riemann, B., Carstensen, J., Dahl, K., Fossing, H., Hansen, J. W., Jakobsen, H. H., Josefsen A. B., Krause-Jensen D., Markager S., Stæhr P. A., Timmermann K., Windolf J. & Andersen, J. H. (2015). Recovery of Danish Coastal Ecosystems After Reductions in Nutrient Loading: A Holistic Ecosystem Approach. *Estuaries and Coasts*, 1-16.

Rolighed, J., Blicher-Mathiesen, G. (2015) Notat om effekt af husdyrgodkendelser. 15 s. DCE Aarhus Universitet

Rubæk, G.H., Djurhuus, J., Heckrath, G., Olesen, S.E. og Østergaard, H.S. 2001. Fosfor i dansk landbrug. Grøn Viden. Markbrug nr. 241. Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri. Danmarks Jordbrugsforskning.

Rubæk, GH & Sibbesen, E, 2000. Long-term phosphorus fertilization – Effects on crop yield and soil phosphorus status. DIAS report no. 31 Plant production. Danish Institute of Agricultural Sciences, Ministry of Food, Agriculture and Fisheries.

Rubæk, GH & Sørensen, P (eds.), 2011. Jordanalyser – kvalitet og anvendelse. DCA rapport Nr 002. December 2011. 129 pages.

Rubæk, GH, 1999. "Soil phosphorus dynamics. Effects of land use, fertilisation and liming". Ph.D. thesis. Danish Institute of Agricultural Sciences, Foulum and The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen

Rubæk, GH, Kristensen, K & Knudsen, L, 2011. Analyser for tilgængeligt fosfor i jord. In: Rubæk, G. H & Sørensen, P (eds.) 2011. Jordanalyser – kvalitet og anvendelse. DCA rapport Nr 002. December 2011. page 53-71.

Rubæk, GH, Kristensen, K, Olesen, SE, Østergaard, HS & Heckrath, GJ, 2013. Phosphorus accumulation and spatial distribution in agricultural soils in Denmark. *Geoderma*, 209-210: 241-250.

Rubæk, GH, Mundus, S, Husted, S. 2015. Soil P test methods and their validity for agronomic and environmental purposes. In Rubæk, G. (ed.) *Validity and analytical robustness of the Olsen soil P test and other agronomic soil P tests used in Northern Europe*. DCA report (in prep).

Schelde, K., de Jonge, L.W., Kjaergaard, C., Laegdsmand, M. and Rubæk, G.H. 2006. Effects of Manure Application and Plowing on Transport of Colloids and Phosphorus to Tile Drains. *Vadose Zone J* 2006 5: 445-458

Schou JS, Kronvang B, Birr-Pedersen K, Jensen PL, Rubæk GH, Jørgensen U, Jacobsen B. 2007. Virkemidler til realisering af målene i EUs Vandrammedirektiv. Udredning for udvalg nedsat af Finansministeriet og Miljøministeriet: Langsigtet indsats for bedre vandmiljø. *Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet*, 132 s. (Faglig rapport fra DMU; 625).

Schoumans, O.F. and P. Groenendijk, 2000. Modeling Soil Phosphorus Levels and Phosphorus Leaching from Agricultural Land in the Netherlands. *J. Environ. Qual.* 29:111-116.

Schoumans, O.F., van der Salm, C. & Groenendijk, P. 2013. PLEASE: a simple model to determine P losses by leaching. *Soil Use and Management*, 29, 138-146.

Schwertmann, U. & Schieck, E. 1980. Das Verhalten von Phosphat in eisenoxidreichen Kalkgleyen der Münchener Schotterebene. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 143, 391-401.

Sibbesen, E, 1983. Phosphate soil tests and their suitability to assess the phosphate status of soil. *J. Sci. Food Agric.* 34:1368-1374.

Sibbesen, E & Sharpley, A, 1997. Setting and justifying upper critical limits for phosphorus in soils. I: Tunney, H, Carton, OT & Brookes, PC (red.) *Phosphorus Loss From Soil to water*, CABI Publishing, Wallingford, UK. s. 151-176.

Simmelsgard, S.E. (1996). *Plantenæringsstoffer i drænvand og jordvand*. SP rapport 7. Statens Planteavlsvforsøg, 77 s

Sissingh, HA, 1971. Analytical technique of the Pw method, used for the assessment of the soil phosphate status of arable soils in the Netherlands. *Plant and Soil*, 34, 483-486.

Speirs, SD, Scott, BJ, Moody, PW & Mason, SD, 2013. Soil phosphorus tests II: A comparison of soil test-crop response relationships for different soil tests and wheat. CROP & PASTURE SCIENCE, 64: 469-479.

Søndergaard, M., Jeppesen, E., Jensen, J.P. og Amsinck, S.L. 2005. Water framework directive: ecological classification of Danish lakes. Journal of Applied Ecology, 42, 616-629.

Søndergaard, M 2007: Næringsstoffdynamik i søer – med fokus på fosfor, sedimentet og restaurering af søer. Doktordisputats. Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. 68 s.

Søndergaard, M, Lauridsen, TL 2015a. Anvendelsen af kvalitetselementer i ikke-interkalibrerede danske søtyper. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi; Nr. 139, 48 s.

Søndergaard, M, Trolle, D, Bjerring, R 2015b. Sammenhænge mellem næringsstoffindhold og biologisk kvalitetselementer i danske søer. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 136; Aarhus Universitet, 36 s.

Søndergaard, M, Trolle, D, Larsen, SE & Bjerring, R 2015c. Fastlæggelse af økologisk kvalitet i søer. Vand og Jord 22: 13-15.

Søndergaard, M., Jensen, J.P. & Jeppesen, E. (2002): Små søer og vandhuller. Skov- og Naturstyrelsen (elektronisk).

Søndergaard, M., Jeppesen, E. & Jensen, J.P. 2005: Pond or lake: does it make any difference? - Archiv für Hydrobiologie 162(2): 143-165.

Tandy, S, Mundus, S, Yngvesson, J, de Bang, TC, Lombi, E, Schjoerring, JK & Husted, S, 2011. The use of DGT for prediction of plant available copper, zinc and phosphorus in agricultural soils. PLANT AND SOIL 346:67-180.

Thorling, L. (red.). 2009. Grundvand. Status og udvikling 1989 – 2008. GEUS 2009. <http://www.grundvandsovervaaging.dk>.

Thorling, L. (red.). 2012. Grundvand. Status og udvikling 1989 – 2011. GEUS 2012. <http://www.grundvandsovervaaging.dk>.

Trolle D, Søndergaard M, Bjerring R 2015. Sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og søkoncentrationer i danske søer. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. (Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi; Nr. 138).

Van der Salm, C., Dupas, R., Grant, R., Heckrath, G., Iversen, B.V., Kronvang, B., Levi, C., Rubæk, G. & Schoumans, O.F. 2011. Predicting phosphorus losses with the PLEASE model on a local scale in Denmark and the Netherlands. Journal of Environmental Quality, 40, 1617-1626.

Van der Salm, C., Walvoort, D. & Massop, H. (2014). Landelijk beeld van de fosfaatverliezen naar het oppervlaktewater. Een analyse met het model PLEASE. Alterra Wageningen UR, Alterra-rapport 2564, 46 sider.

Van der Salm, C., Groenendijk, P., Hendriks, R., Massop, H. & Renaud, L. (2015). Opties voor benutten van de bodem voor schoon oppervlaktewater. Alterra Wageningne, UR, Alterra-rapport 2588, 116 sider.

Van der Zee, S.E.A.T.M., 1988. Transport of reactive contaminants in heterogeneous soil systems. Ph.D. thesis. Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.

van der Zee, SEATM, van Riemsdijk, WH & de Haan, FAM, 1990. Het protocol fosfaatverzadigde gronden, Wageningen, Landbouwniversiteit. Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding, The Netherlands.

Vinther, F.P. & Poulsen, H. D. (2009) Udviklingen i landbrugets fosforoverskud og forbruget af foderfosfat. I (Børgesen, C.D., Waagepetersen, J., Iversen, T.M., Grant, R., Jacobsen, B. & Elmholt, S.) Midtvejsevaluering af vandmiljøplan III. DJF Rapport Markbrug nr. 142, s. 191-200.

Vinther, F.P. & Olsen, P. (2015) Næringsstofbalancer og næringsstofoverskud i landbruget 1993/94 – 2013/14. DCA rapport 063. DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet.

Wiberg-Larsen, P., Windolf, J., Bøgestrand, J., Larsen, S.E., Thodsen, H., Ovesen, N.B., Kronvang, B. & Kjeldgaard, A. (2012). Vandløb 2011. NO-VANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 70 s. - Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 32 <http://www.dmu.dk/Pub/SR32.pdf>

Wiberg-Larsen, P., Windolf, J., Bøgestrand, J., Baattrup-Pedersen, A., Kristensen, E.A., Larsen, S.E., Thodsen, H., Ovesen, N.B., Bjerring, R., Kronvang, B. & Kjeldgaard, A. 2013. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 84 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 75.

Bilag 1

Projektbeskrivelse.

18/8-2015/PNJ

Fosforudredning.

Miljøstyrelsen har bedt DCE/AGRO, ud fra de nedenfor skitserede spørgsmål, at lave et tilbud på en udredning omkring fosfor som kan danne grundlag for en kontrakt. Tilbuddet er baseret på en sammenskrivning og formidling af eksisterende viden om fosfor og de konklusioner, som kan drages ud fra denne viden. Der vil således ikke generelt være tale om ny bearbejdning af eksisterende data med mindre dette er specifikt nævnt. De nødvendige forbehold og/eller usikkerheder ved konklusionerne vil fremgå – kvantitativt hvor dette er muligt ellers kvalitativt. Det er vigtigt at stoffet formidles til ikke-forskere, men der kan evt. veksles mellem meget forklarende afsnit og afsnit, bilag eller bokse, hvor de tungere fakta eller forklaringer vises. Der vil kunne blive behov for at få svar på enkeltspørgsmål løbende inden deadline.

0: Sammenfatning

1) Fosforbalancen

1.a) Hvordan har den historiske fosforbalance (både erhvervs- og markbalance) på landsplan været og hvilke forhold ligger bag de senere års udvikling og niveau?

2) Fordeling af fosfor mellem marker

2.a) Hvordan fordeles fosfor mellem marker ved udbringning i dag og hvilke bedriftsmæssige forhold er særligt afgørende herfor?

2.b) Hvilke ændringer vil det betyde for førnævnte analyse fremadrettet, hvis harmonireglerne ændres fra 1,4 DE → 1,7 DE uden anden fosforregulering for slagtesvin alene og for alle dyretyper?

3) Fosforindholdet og mætningsgraden

3.a) Hvordan har fosforindholdet (Olsen P og Total P, evt. vand-ekstr. P) og mætningsgraden i landbrugsjorden udviklet sig nationalt og grupperet efter forskellig ophobning jf. tidligere spørgsmål?

4) Bindingskapaciteten og risiko for P-tab til vandmiljøet

4.a) Hvad ved vi om bindingskapaciteten i den danske landbrugsjord?

4.b) Hvad er forholdet mellem bidrag fra hhv. udvaskning, erosion og makroporetransport til det samlede tab af P fra landbrugsjord i forskellige dele af landet?

4.c) Hvad kan man sige om sammenhængen mellem fosforindhold i jorden og tab til vandmiljøet?

5) Fosfors påvirkning af vandmiljøet NST-DCE?

6) Overordnede konklusioner

Projektorganisering:

DCE ved Poul Nordemann Jensen er projektleder

Den faglige redegørelse gennemføres af:

BioScience: Brian Kronvang, Gitte Blicher-Mathiesen, Jonas Rolighed Hans Estrup Andersen, Annette Baatrup-Pedersen, Martin Søndergaard, Jesper Christensen, Jens Würgler Hansen

Agroøkologi: Goswin Heckrath, Gitte Rubæk

Projektøkonomi:

Den samlede redegørelse kan gennemføres for 610.000 kr. ekskl. moms (fastpris)

Tidsfrister:

Der leveres et første rapportudkast til kommentering i Miljøstyrelsen d. 8. oktober 2015.

Endelig rapport leveres 2 uger efter modtagelse af samlede kommentarer fra Miljøstyrelsen.

Det er en forudsætning for tidsfristen at der indgås en kontrakt senest d. 27. august 2015.

Bilag 2: Data vedr. fosfortab via drænvand

Table 1. Vandføringsvægtede fosforkoncentrationer og –tab målt i drænvand (efter Poulsen og Rubæk, 2005, og opdateret).

Sted	Jordtype	Prøver	Periode	PO4-P		Total-P		Nedvasket PO4-P		Nedvasket Total-P		Reference
				Gns. mg/l	Var. Bredde ¹⁾	Gns. mg/l	Var. Bredde ¹⁾	Gns. g/ha	Var. Bredde ¹⁾	Gns. g/ha	Var. Bredde ¹⁾	
Dræn, højbund												
Åbenrå	lerjord	1-2/14 dg	1974-91	0,08	0,01-0,30	mangler	mangler	345	12-1215	mangler	mangler	Simmelsgaard, 1996
Næstved	sandbl.lerj.	-	-	0,04	0,00-0,23	-	-	47	0-288	-	-	-
Norring	sandbl.lerj.	-	-	0,04	0,01-0,17	-	-	45	1-252	-	-	-
Lunding	sandbl.lerj.	-	-	0,07	0,01-0,30	-	-	82	3-435	-	-	-
Silstrup	sandbl.lerj.	-	-	0,12	0,02-0,65	-	-	228	35-988	-	-	-
Herlufmagle	sandbl.lerj.	-	1971-78	0,05	0,01-0,07	-	-	62	5-116	-	-	Pedersen, 1983
Næstved	sandbl.lerj.	-	-	0,04	0,00-0,23	-	-	47	0-288	-	-	-
Norring	sandbl.lerj.	-	-	0,04	0,01-0,17	-	-	45	1-252	-	-	-
Ruds Vedby 1	sandbl.lerj.	-	-	0,02	0,01-0,03	-	-	25	2-40	-	-	-
Ruds Vedby 2	sandbl.lerj.	-	-	0,02	0,01-0,06	-	-	28	2-46	-	-	-
Fjelstrup 1	sandbl.lerj.	-	-	0,02	0,01-0,04	-	-	25	5-51	-	-	-
Fjelstrup 2	lerjord	-	-	0,06	0,05-0,07	-	-	77	6-159	-	-	-
Fjelstrup 3	sandbl.lerj.	-	-	0,02	0,01-0,03	-	-	17	2-29	-	-	-
Daugård	sandbl.lerj.	-	-	0,02	0,01-0,03	-	-	23	6-41	-	-	-
Ørum	sandbl.lerj.	-	-	0,01	0,01-0,02	-	-	20	7-32	-	-	-
Odder 1	sandbl.lerj.	-	-	0,02	0,01-0,03	-	-	18	5-33	-	-	-
Odder 2	sandbl.lerj.	-	-	0,07	0,02-0,11	-	-	58	2-120	-	-	-
Bjerringbro	sandbl.lerj.	-	-	0,01	0,00-0,01	-	-	8	1-20	-	-	-
Højer	Sandbl.lerj.	1/uge	1971-84	1,10 ²⁾	-	-	-	2540	-	-	-	Pedersen, 1985
Højer	Sandbl.lerj.	1/uge	-	1,29 ³⁾	-	-	-	3840	-	-	-	-
Skjernådalen	mosejord	-	-	0,06	-	-	-	200	-	-	-	-
Ll. Egesgård	lerjord	1/uge	1977-80	0,031	0,027-0,037	-	-	43	35-51	-	-	Hansen, 1981
Stølsgård	lerjord	-	-	0,020	0,016-0,025	-	-	34	32-35	-	-	-
Sdr. Stenderup	lerjord	0,2 % af afstrømning	1973-76	0,050	0,028-0,063	-	-	60	0-180	-	-	Kjellerup & Kofoed, 1979
Gelbæk 1	sandbl. lerj.	1/uge	1993-94	0,085	-	0,111	-	288	-	298	-	Grant et al., 1996

Gelbæk 2	sandbl. lerj.	-	-	0,010	-	0,020	-	22	-	43	-	-
Bredkærvej, Odder	sandbl. lerj.	-	2012-13 6 mdr.	0,014	-	0,025	-	11	-	19	-	"Kontrolleret dræning"
Bredkærvej, Odder	sandbl. lerj.	-	2012-13 6 mdr.	0,034	-	0,064	-	71	-	132	-	-
Bredkærvej, Odder	sandbl. lerj.	-	2013-14 3 mdr.	0,008	-	0,008	-	5	-	5	-	-
Bredkærvej, Odder	sandbl. lerj.	-	2014-14 5 mdr.	0,010	-	0,012	-	10	-	12	-	-
Hedemarks-vej, Odder	sandbl. lerj.	-	2012-13 6 mdr.	0,010	-	0,027	-	16	-	45	-	-
Hedemarks-vej, Odder	sandbl. lerj.	-	2012-13 6 mdr.	0,006	-	0,009	-	10	-	14	-	-
Hedemarks-vej, Odder	sandbl. lerj.	-	2012-13 6 mdr.	0,008	-	0,015	-	12	-	24	-	-
Hedemarks-vej, Odder	sandbl. lerj.	-	2012-13 6 mdr.	0,011	-	0,027	-	19	-	46	-	-
Hedemarks-vej, Odder	sandbl. lerj.	-	2013-14 4 mdr.	0,004	-	0,004	-	7	-	6	-	-
Hedemarks-vej, Odder	sandbl. lerj.	-	2013-14 4 mdr.	0,005	-	0,004	-	7	-	5	-	-
Hedemarks-vej, Odder	sandbl. lerj.	-	2014-15 5 mdr.	0,007	-	0,023	-	15	-	49	-	-
Hedemarks-vej, Odder	sandbl. lerj.	-	2014-15 5 mdr.	0,012	-	0,027	-	26	-	57	-	-
Hofmans-gave, Fyn	lerbl.sandj.	-	2012-13 7 mdr.	0,055	-	0,066	-	97	-	116	-	-
Hofmans-gave, Fyn	lerbl.sandj.	-	2012-13 7 mdr.	0,039	-	0,044	-	84	-	97	-	-
Hofmans-gave, Fyn	lerbl.sandj.	-	2012-13 7 mdr.	0,018	-	0,025	-	56	-	79	-	-
Hofmans-gave, Fyn	lerbl.sandj.	-	2012-13 7 mdr.	0,073	-	0,081	-	104	-	116	-	-
Hofmans-gave, Fyn	lerbl.sandj.	-	2013-14 5 mdr.	0,021	-	0,023	-	54	-	60	-	-

Hofmans-gave, Fyn lerbl.sandj.	-	2013-14 5 mdr.	0,088	-	0,087	-	105	-	105	-	-	
Hofmans-gave, Fyn lerbl.sandj.	-	2014-15 3 mdr.	0,027	-	0,031	-	46	-	54	-	-	
Hofmans-gave, Fyn lerbl.sandj.	-	2014-15 3 mdr.	0,090	-	0,097	-	78	-	85	-	-	
Højvads Rende 103 sandbl.lerj.	1/uge	1990-2014	0,017	0,009-0,095	0,028	0,013-0,156	17	2-56	28	3-103	Blicher-Mathiesen et al. 2015	
Højvads Rende 105 sandbl.lerj.	-	-	0,014	0,009-0,035	0,021	0,013-0,045	20	0-95	33	1-123	-	
Højvads Rende 106 sandbl.lerj.	-	-	0,160	0,092-0,206	0,175	0,115-0,222	127	2-408	138	2-485	-	
Odderbæk 201 sandjord	-	-	0,046	0,021-0,073	0,111	0,074-0,161	452	172-736	1063	590-1806	-	
Lillebæk 402 sandbl.lerj.	-	-	0,022	0,010-0,083	0,043	0,015-0,156	47	8-231	95	11-479	-	
Lillebæk 406 sandbl.lerj.	-	-	0,033	0,006-0,124	0,076	0,009-0,250	33	0-165	75	0-374	-	
Dræn, lavbund												
Skovsbjerg-gård,	lavbund, dyb tørv, pumpet	1/14 dg.	1988-90	0,290	-	0,320	-	800	-	900	-	Hansen et al., 1990
Volsted	lavbund, dyb tørv, pumpet	-	-	0,280	-	0,660	-	2450	2400-2500	5650	4300-7000	-
Gøderup	Lavbund, 40 cm tørv på sand, pumpet	-	-	0,020	-	0,100	-	210	70-350	525	170-880	-
Fussingø, Vest, 4 dræn	Lavbund, dyb tørv, afgræs- set vedv. græs	1/14 dg.	1998-2000	-	-	0,33	-	-	-	-	-	Hoffmann & Ovesen, 2003.
Fussingø, Øst, 6 dræn	-	-	-	-	-	1,51	-	-	-	-	-	-
Fussingø, Vest, integreret undersø- gelse	Udløb fra dræ- net, grøftet lavbund m. dyb tørv, afgræsset vedv. græs	1/14 dg.	1998-2000	-	-	-	-	-	-	670	600-710	Hoffmann & Ovesen, 2003.
Fussingø, Øst, inte- greret undersøgelse	-	-	-	-	-	-	-	-	-	920	580-1390	-

¹⁾ Variationsbredde, forskel mellem årsgennemsnit

²⁾ Drændybde 80 cm

³⁾ Drændybde 115 cm

Bilag 3. Validering PLEASE-modellen

PLEASE beregner fosfortab som produktet mellem fosforkoncentrationen ned gennem jordprofilen og vandfluxen gennem jorden. Fosforkoncentrationen beregnes ud fra en matematisk sammenhæng (Langmuir isotherm), der beskriver forholdet mellem adsorberet og opløst fosfor. Vandfluxen beregnes på grundlag af nettonedbør og information om grundvandsspejlets beliggenhed. Opsætning af modellen kræver målte værdier for vandopløseligt fosfor (P_w), oxalatekstraherbart aluminium og jern (Al_{ox} og Fe_{ox}) og volumenvægt i minimum 3 dybder, baggrundskoncentrationen af fosfor (i grundvand), Langmuir-parametre (adsorptionskonstant og desorptionsrate), minimum og maximum niveau for grundvandsspejlet samt nettonedbør.

Når modellen er opsat og valideret mod målt fosfortab, er det relativt simpelt at simulere en ny dyrkningssituation (en ændring i nettotilførslen af fosfor) og beregne effekten på udvaskning af fosfor. En sensitivitsanalyse af PLEASE viste, at især Langmuir-parametrene har betydning for det beregnede fosfortab. PLEASE indeholder en database over Langmuir-parametre for forskellige jordtyper målt ved sorptionsforsøg.

Van der Salm et al. (2011) opsatte PLEASE på 31 marker (17 danske og 14 hollandske) og sammenlignede modellens resultater med målte værdier for fosforkoncentration i jordvand, grundvand og dræn samt fosfortab via dræn, tabel 4.4. NMAE (normalized mean absolute error) er relativt høj, f.eks. 0,59 og 0,60 for simuleret koncentration i jordvand og grundvand, men den absolutte fejl (simuleret minus observeret værdi) er imidlertid lille (0,03 – 0,08 mg P l⁻¹). ME (Nash-Sutcliffe modelling efficiency) ligger mellem 0,36 og 0,92, hvilket er højt for en næringsstofmodel. Moriasi et al. (2007) angiver ME > 0,50 som 'tilfredsstillende', ME > 0,65 som 'god' og ME > 0,75 som 'meget god'. Schoumans et al. (2013) opsatte modellen på et opland (5030 ha) med 260 prøvefelter, hvor P_w , Al_{ox} og Fe_{ox} blev målt og hydrologisk information blev indhentet fra en national hydrologisk model samt lokale data. Modellen beregnede et samlet oplandstab på 2973 kg P, hvilket er i god overensstemmelse med et gennemsnitligt målt fosfortab for 1989-1994 (samme periode som jordparametre er målt) på 2770 kg P. PLEASE har i Holland været anvendt til at lave landsdækkende kort over fosforudvaskning (van der Salm et al., 2014), som bl.a. har dannet grundlag for at vurdere effekter af virkemidler til reduktion af fosfortab (van der Salm et al., 2015).

Tabel 5. Kvantitativ vurdering af PLEASE-modellens evne til at simulere målte fosforkoncentrationer i jordvand, grundvand og dræn samt fosfortab via dræn (NMAE: normalized mean absolute error; ME: Nash-Sutcliffe modelling efficiency)

	n	NMAE	ME
<i>Koncentration</i>			
Jordvand	21	0,59	0,84
Grundvand	17	0,60	0,36
Dræn	9	0,24	0,92
<i>Tab via dræn</i>			
Totalfosfor	10	0,80	0,45
Opløst uorganisk fosfor	10	0,60	0,60

REDEGØRELSE FOR UDVIKLING I LANDBRUGETS FOSFORFORBRUG, TAB OG PÅVIRKNING AF VANDMILJØET

Rapporten samler eksisterende viden om fosfor i landbrugs­mæssigt regi indeholdende forbrug m.m. (aktuelt og historisk) af fosfor i landbruget, mulige risici og tabsveje for fosfor samt fosfors betydning for tilstanden i vandløb, søer og marine områder.