

# Kortlægning af kilder til diffust fosfortab

Mens der er nogenlunde velunderbygget viden om det samlede fosfortab til vandmiljøet, har virkemiddelsindsatsen for at reducere fosfortabet været begrænset af en stor usikkerhed omkring omfanget af fosfortab fra forskellige tabsveje samt den geografiske fordeling heraf. Et stort dansk projekt har søgt at råde bod på dette.

HANS ESTRUP ANDERSEN &  
GOSWIN HECKRATH

Gennem tre år har forskere fra Aarhus og Københavns universiteter arbejdet på at kortlægge og kvantificere kilderne til fosfortabet fra det åbne land, det såkaldt diffuse bidrag (Boks 1). Skønt der stadig er betydelige videnshuller, har arbejdet resulteret i et øget kendskab til de enkelte fosfortabsveje og i en kildeopsplitning, der blandt andet belyser landbrugets rolle for fosfortab.

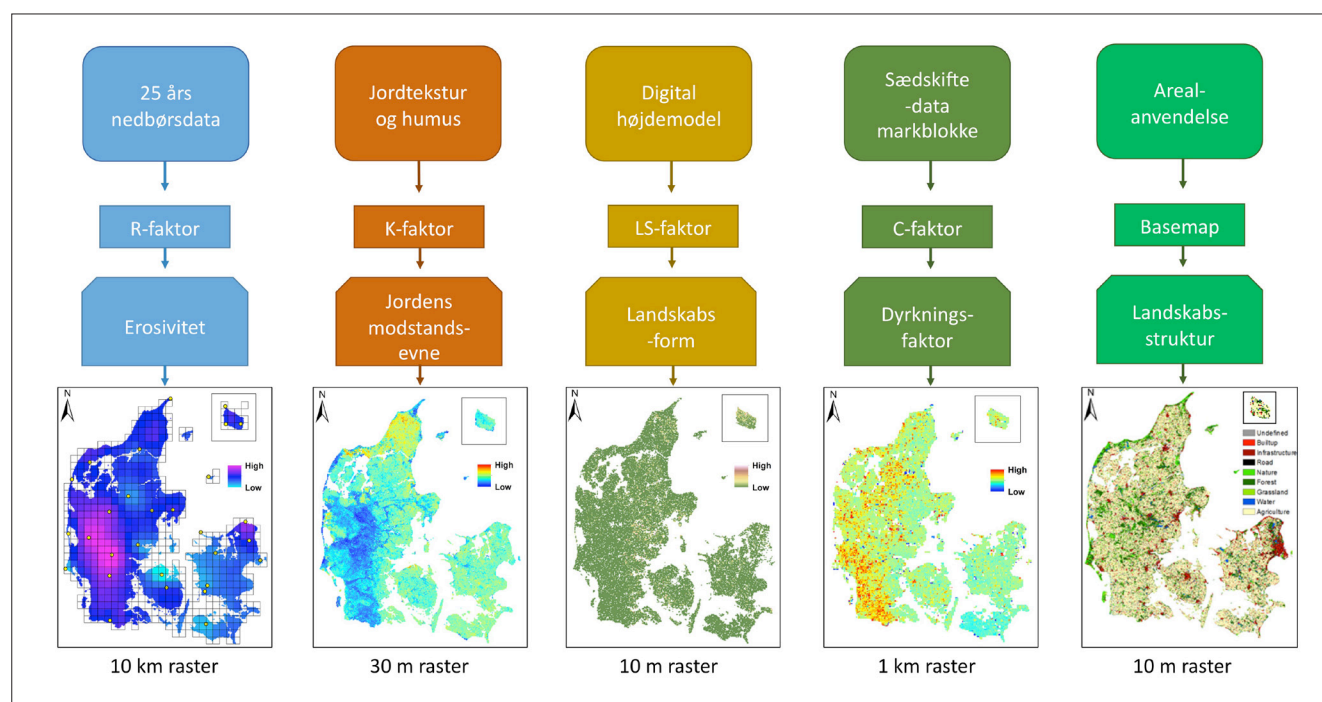
I studiet har vi fokuseret på de fosfortabsveje fra landbrugsjord, der blev betragtet som

de mest betydende: vanderosion, udvaskning, tab gennem jordens makroporer, tab fra dyrkede lavbundslande og erosion af vandløbsbrinker (Boks 1). Vi har suppleret eksisterende data med omfattende nye dataindsamlinger, udvikling af modeller og landsdækkende kortlægninger. En række af de nye kort er tilgængelige via MiljøGIS. I artiklen gennemgår vi kort de vigtigste resultater af studiet og henviser i øvrigt til den dansksprogede rapport /1/.

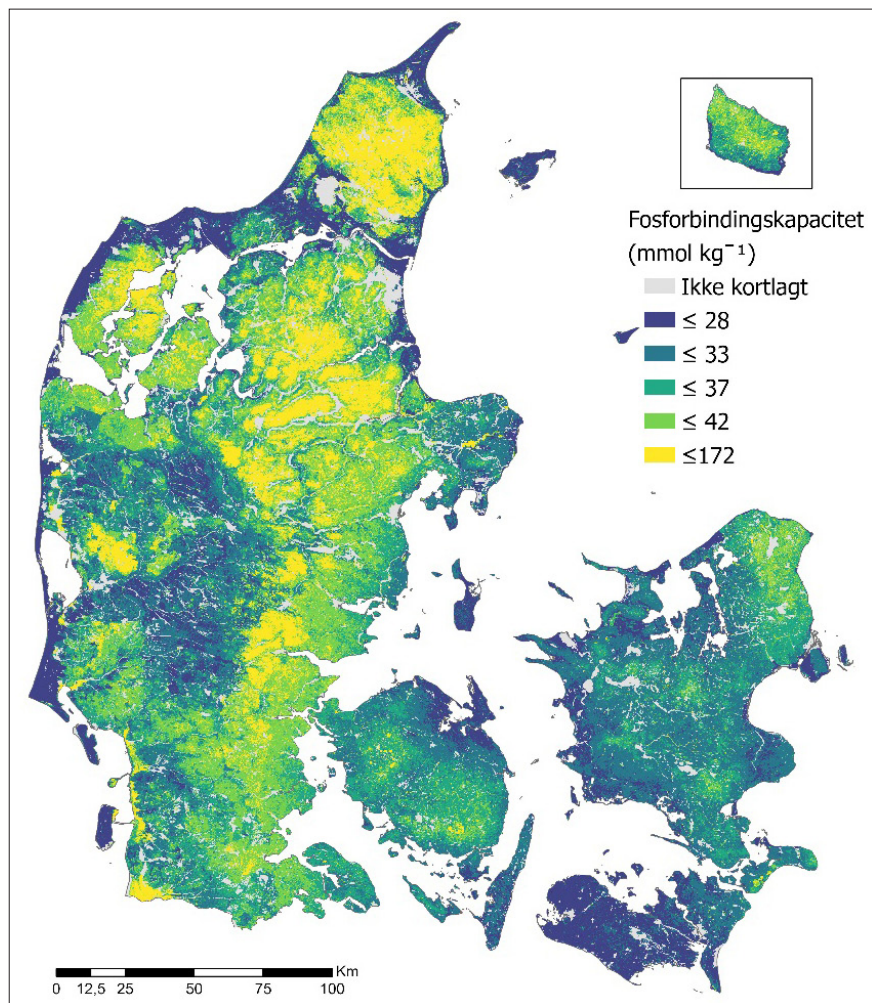
## Fosforindhold i jorden

Siden år 1900 har import af fosforholdig handelsgødning samt foder bidraget til en akkumulering af store mængder fosfor i land-

brugsjorden ud over det naturlige indhold. Gennemsnitligt er ophobningen af fosfor i landbrugsjorden på mere end 1400 kg P ha<sup>-1</sup> /2/. Kendskab til fosforindholdet på den enkelte mark er naturligvis af stor betydning ved en estimering af fosfortabet fra marken uanset hvordan fosfor tabes. Hvert år får danske landmænd foretaget måling af fosforindholdet i ca. 14.000 – 28.000 marker. Disse data er imidlertid ikke tilgængelige, og den rumlige fordeling af fosforindholdet i jorden er derfor kortlagt af rådgivningsfirmaet ConTerra med en model, der bygger på blandt andet historiske fosforbalancer /3/. Der vil således være en betydelig usikkerhed på estimerne af lokale fosforindhold.



Figur 1. Kort over inputfaktorer brugt i WaTEM modelleringen.



Figur 2. Den kortlagte fosforbindingskapacitet i topjorden (0 – 25 cm). Organisk lavbundsjord (>6% organisk kulstof) er ikke kortlagt.

### Vanderosion

Selvom store vanderosionshændelser er forholdsvist sjældne i Danmark pga. begrænset højdeforskelle i landskabet og moderat nedbørsintensitet forekommer erosion i alle landsdele. Erosion forekommer som regel i vinterhalvåret efter perioder med vedvarende regn eller tøjbrud eller om forår og sensommer ved skybrud. Vanderosion og sedimenttilførsel til overfladevand er kortlagt med WaTEM-modellen med en rumlig opløsning på 10 m (Fig. 1). Modellen inddrager detaljerede landskabsdata herunder barrierer mod overfladestrømning /4/. Ved at kombinere jordtabet på markerne med estimater af fosforindholdet i den eroderede jord er der beregnet fosforerosion fra mark til vandområder. På landsniveau er det årlige fosfortab med erosion opgjort til 56 ton P år<sup>-1</sup> med et 95 % konfidensinterval på 53 – 58 ton P år<sup>-1</sup>.

### Udvaskning af fosfor gennem jorden til drænen

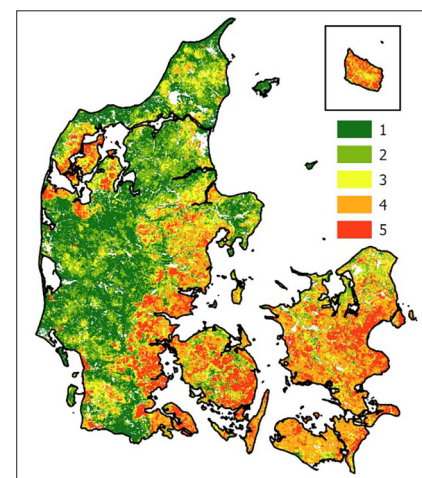
Fosfor bindes normalt hårdt til specifikke jordminerale, der betegnes som jordens fosforbindingskompleks. Langt hovedparten

af den fosfor, som siden år 1900 er tilført i overskud til landbrugsjorden, befinder sig stadig i den øverste meter, også kaldet rodzonen. Ved stigende mætningsgrad af jordens fosforbindingskompleks bindes fosfor gradvist svagere, og andelen af fosfor, der kan frigives til jordvandet som opløst fosfor og nedvaskes gennem jorden, stiger. Bindingskapaciteten for fosfor i jord er overvejende en naturgiven faktor, der varierer betydeligt mellem forskellige jordtyper og med dybden. Fosfor bindes til forskellige mineraler i jord, men lavt-krySTALLINSKE jern- og aluminiumoxider anses for langt de vigtigste bindingskomponenter under danske forhold. For at beskrive bindingskapaciteten blev 4747 jordprøver fra 1623 lokaliteter analyseret. Ved hjælp af statistiske maskinlæringsteknikker og under inddragelse af talrige landsdækkende oplysninger om klima, geologi og landskab er der på grundlag af jordanalyserne foretaget en landsdækkende kortlægning af fosforbindingskapaciteten i fire dybder. Kortlægningen er foretaget med en rumlig opløsning på 30,4 m (Fig. 2). På baggrund af ConTerras kortlægning af fosforindholdet i topjorden og den kortlagte

bindingskapacitet har vi opsat en model for fosforudvaskning, der tager udgangspunkt i den hollandske PLEASE-model /5/ modificeret til den danske hydrologi. Modellen er baseret på kendt fosforkinetik, hvor modellens parametre vedrørende fosforbinding er bestemt på baggrund af analyser af 363 danske jordprøver. Et vigtigt input til modellen er fosforindholdet i den enkelte mark. Som nævnt er størrelsen heraf behæftet med en betydelig usikkerhed, som reproduceres i modelestimaterne. Den gennemsnitlige, årlige transport af opløst fosfor i drænedede områder blev beregnet til 0,043 kg P ha<sup>-1</sup> og i alt på landsplan 59 ton P med et 95 % konfidensinterval på 23 - 94 ton P.

### Tab gennem makroporer til drænen

Forekomst af makroporer er undersøgt på ca. 1300 udtagne, uforstyrrede jordkolonner. På basis heraf er der udviklet funktioner, der kan forudsige forekomst af makroporer på grundlag af den eksisterende kortlægning af jordens tekstur. For at afgøre hvorvidt makroporer bidrager aktivt til vandtransporten, er der suppleret med en hydrologisk modellering på mere end 34.000 typeprofiler. Kortlægningen af makroporer er kombineret med en kortlægning af drænedede områder /6/ samt med nye modelestimater af den forventede, årlige afstrømning i drænsystemerne opdelt på et makropore- og et jordmatricestrømningsbidrag /1/. Risikoen for makroporestrømning fremgår af kortlægningen i figur 3. Der mangler endnu en model til at beskrive fosfortransport via makroporer. For at give et overordnet estimat på betydningen af denne transportvej har vi på grundlag af målinger i 43 drænen anslået, at en koncentration på 0,14 mg P l<sup>-1</sup> er et realistisk bud på en gennemsnitlig fosforkon-



Figur 3. Klasseinddelt kort for risiko for makroporeafstrømning. Klasse 4 og 5 har høj risiko, klasse 2 og 3 har middel risiko og klasse 1 har ingen risiko for makroporeafstrømning.

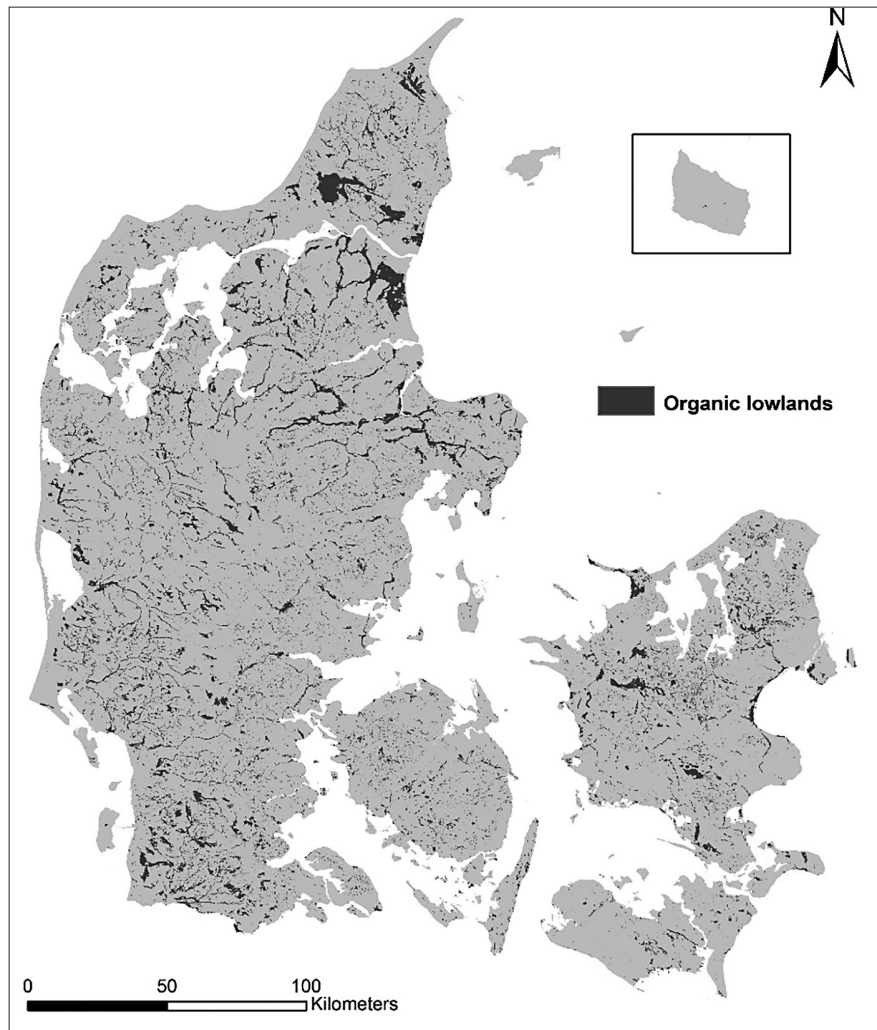
centration ved makroporestrømning. På baggrund heraf kan det årlige fosfortab gennem makroporer til dræn opgøres til 162 ton P med et 95 % konfidensinterval på 138 – 191 ton P.

### Tab fra dyrkede lavbundslande

Dyrkede lavbundslande med et kulstofindhold større end 6% udgør ca. 1714 km<sup>2</sup> og er ofte kendetegnet ved høje fosfortab. Figur 4 viser placeringen af disse jorde. SINKS-databasen ved Institut for Agroøkologi, AU, indeholder data fra 8830 prøvepunkter i organiske lavbundslande over hele Danmark herunder bl.a. indholdet af oxalatekstraherbart jern, aluminium og fosfor, som har en betydning for mobilisering af fosfor. Ved hjælp af maskinlæringsteknikker har vi omsat disse geokemiske data til en landsdækkende kortlægning. Trods omfattende laboratorieanalyser af prøver fra 47 lavbundslande dækkende en stor gradient i karakteristika lykkedes det dog ikke at udvikle en brugbar model til estimering af fosformobiliseringspotentialet, som kunne drives af de landsdækkende data. I mangel af en model har vi som for makroporer set på de indtil videre få målinger af fosfortab fra dyrkede lavbundslande, der findes. Målingerne viser, at der gennemsnitligt tabes 1,9 kg P ha<sup>-1</sup> årligt. Ganges denne tabsrate på det kortlagte areal med dyrkede lavbundslande udgør tabet samlet set 326 ton P årligt med et 95% konfidensinterval på 69 – 515 ton P.

### Brinkerosion

På grundlag af to datasæt over målinger af brinkerosion i hhv. oplandet til Odense Fjord (36 vandløbsstrækninger) og oplandet til Skjern Å (12 vandløbsstrækninger) er der udviklet en simpel empirisk model. Modeludviklingen var begrænset af, at de forklarende modelparametre efterfølgende skulle kunne kortlægges landsdækkende. Som en konsekvens heraf indgår kun vandløbsbredde, brinkhøjde og brinkvegetation i modellen. Modellen, der beskriver tab af sediment, er suppleret af et omfattende måleprogram til bestemmelse af fosforindholdet i vandløbsbrinkerne. I alt 879 prøver er indsamlet fra 334 lokaliteter landsdækkende. Vi fandt, at fosforindholdet i brinkerne varierer regionalt, men gennemsnitligt er højt – på niveau med eller over niveauet i dyrkede jorde (Tabel 1). Det faktum, at fosforindholdet i brinkerne generelt er højt over hele den undersøgte dybde i modsætning til de dyrkede og gødgede jorde, indikerer, at fosfor i brinkerne helt overvejende er naturligt forekommende. Modellen i kombination med det målte fosforindhold



Figur 4. Fordeling af 1714 km<sup>2</sup> dyrkede lavbundslande med et organisk kulstofindhold > 6%.

i brinkmaterialet estimerer et samlet tab ved brinkerosion på 644 ton P årligt med et 95 % konfidensinterval på 422 – 1373 ton P.

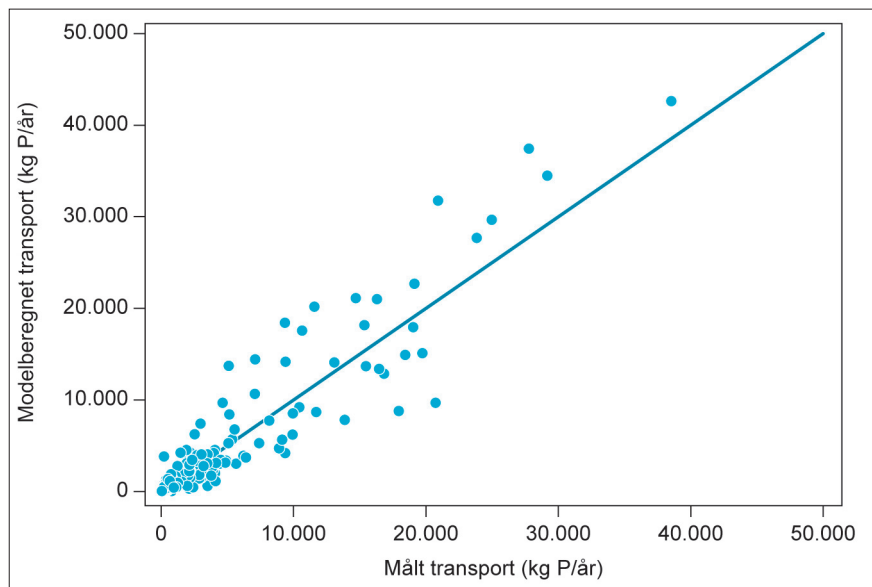
### Vurdering af beregningerne

Den samlede fosfortransport fra de mest betydende diffuse kilder: vanderosion, udvaskning, tab gennem makroporer, tab fra dyrkede lavbundslande og erosion af vandløbsbrinker, som er modelberegnet eller estimeret med en række uafhængige metoder i det ovenstående, er sammenholdt med den målte diffuse fosfortransport ved en række vandløbsstationer (Fig. 5). Data fra 263 stationer med minimum

5 års målinger i perioden 2000-2018 er anvendt. Bidrag fra spredt bebyggelse og punktkilder er fratrukket den målte fosfortransport. For de enkelte oplande kan der være tale om, at modelberegningen over- eller underestimerer den målte fosfortransport. En likelihood ratio-test viser imidlertid, at der for det samlede datamateriale ikke er nogen statistisk signifikant forskel på målt og modelberegnet diffus fosfortransport og ingen bias. Foretages sammenligningen mellem modelberegnet og målt transport på arealvægtede værdier, dvs. kg fosfor ha<sup>-1</sup>, fås en lidt dårligere sammenhæng end den her viste.

Tabel 1. Indhold af totalfosfor (TP) i vandløbsbrinker og dyrkede jorde i fire dybdeintervaller. Data fra de dyrkede jorde stammer fra Kvadratnettet. Antallet af jordprøver er angivet i parentes.

Dybdeinterval	Vandløbsbrinker	Dyrkede jorde
	mg TP kg <sup>-1</sup>	mg TP kg <sup>-1</sup>
0 – 25 cm	644 (185)	562 (337)
25 – 50 cm	529 (185)	423 (336)
50 – 75 cm	547 (180)	311 (226)
75 – 100 cm	526 (180)	265 (224)



Figur 5. Modelberegnet diffus transport af total-fosfor mod målt diffus transport af total-fosfor opgjort for 263 oplande. 1:1-linjen er vist med stiplede signatur.

### Kildeopsplitning af det samlede diffuse fosfortab

Det har ikke inden for projektets rammer været muligt at kvantificere bidrag fra overfladisk afstrømning, vinderosion og grundvand. For så vidt angår vinderosion og overfladisk afstrømning, så anses disse bidrag dog for mindre kvantitativt betydningsfulde for fosfortab. Bidrag fra de tre kilder er estimeret på baggrund af /7/. I tabel 2 er fremvist en samlet kildeopsplitning af det diffuse fosfortab underopdelt på et landbrugsbidrag og et baggrundsbidrag, hvor sidstnævnte helt overvejende udgøres af fosfortab via brinkerose samt et formodentlig mindre bidrag via grundvand fra udyrkede arealer. Den samlede fosfortilledning til ferskvand, dvs. bidrag fra både diffuse kilder, punktkilder og fra spredt

bebyggelse, udgør ca. 2200 tons fosfor per år (gennemsnit 2014 – 2018/1). Punktkilder udgør ca. 700 tons fosfor og spredt bebyggelse ca. 80 tons fosfor. Landbrugsbidraget udgør altså ca. en tredjedel af det samlede fosfortab, baggrundsbidraget udgør en anden tredjedel og punktkilder og spredt bebyggelse den sidste tredjedel.

### Perspektivering

Tre processer vedrørende fosfortab dominerer på landsplan: makroporetransport til drænen, fosfortab fra lavbundsjord og fosfortab ved brinkerose. Kortlægningerne for alle disse tabsprocesser er behæftet med store usikkerheder, dels fordi vi mangler viden om, hvordan vi kan generalisere vores procesforståelse til en tabsmodellering på landskabs-

niveau, og dels fordi vi mangler relevante data såvel til modelparameterisering som -kalibrering. Det er derfor afgørende at udvide muligheden for at modellere disse processer både lokalt og regionalt, hvis effekten af en lokalt målrettet virkemiddelindsats skal kunne kvantificeres.

### Referencer

- /1/ Andersen, H. E. & Heckrath, G. (redaktører). 2020. Fosforkortlægning af dyrkningsjord og vandområder i Danmark. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 340 s. - Videnskabelig rapport nr. 397. <http://dce2.au.dk/pub/SR397.pdf>
- /2/ Rubæk, G.H., Kristensen, K., Olesen, S.E., Østergaard, H.S., Heckrath, G. 2013. Phosphorus accumulation and spatial distribution in agricultural soils in Denmark. *Geoderma* 209–210:241–250.
- /3/ ConTerra. 2020. Notat - Udvikling af GIS-kort over estimeret fosfortal i landbrugsjord. 34 s.
- /4/ Onnen, N., Heckrath, G., Olsen, P., Greve, M., Pulens, J.W.M., Kronvang, B., Van Oost, K. 2019. Distributed water erosion modelling at fine spatial resolution across Denmark. *Geomorphology* 342:150-162.
- /5/ Schoumans, O.F., C. Van der Salm, and P. Groenendijk. 2013. PLEASE: A simple model to determine P losses by leaching. *Soil Use Manag.* 29(SUPPL.1):138–146.
- /6/ Møller, A.B., A. Beucher, B. V. Iversen, and M.H. Greve. 2018. Predicting artificially drained areas by means of a selective model ensemble. *Geoderma* 320:30–42
- /7/ Poulsen, H.D., Rubæk, G.H. (red.) 2005. Fosfor i dansk landbrug. DJF rapport Husdyrbrug nr. 68. Aarhus Universitet, Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet. 211 s.

HANS ESTRUP ANDERSEN (hea@ecos.au.dk) er seniorforsker ved Institut for Ecoscience, Aarhus Universitet.  
GOSWIN HECKRATH (goswin.heckrath@agro.au.dk) er lektor ved Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet.

Tabel 2. Samlet kildeopsplitning af landbrugsbidraget og af det samlede diffuse tab på landsplan, ton fosfor per år.

Bidrag	Metode	Estimat	Interval
		ton P år <sup>-1</sup>	ton P år <sup>-1</sup>
Vand-erosion	Model	56	53-58
Vind-erosion	Poulsen & Rubæk, 2005	10	5-15
Overfladisk afstrømning	Poulsen & Rubæk, 2005	10	5-15
Matrice-udvaskning	Model	59	23-94
Makropore-tab	Model + skøn	162	138-191
Dyrket lavbundsjord	Anvendt tabsrate = 1,9 kg P/ha; areal = 1716 km <sup>2</sup>	326	69-515
Grundvand fra ikke-drænede marker	Poulsen & Rubæk, 2005	60	
Landbrugsbidrag		683	293-888
Brinkerose (netto)	Model	644	422-1373
Grundvand fra udyrkede arealer		?	?
Diffust bidrag (landbrug og baggrund)		1327	715-2261

**Boks 1. Kilder til fosfortab**

Det samlede fosfortab kan opdeles i bidrag fra hhv. punktkilder og diffuse kilder. Punktkilder omfatter bidrag fra rensningsanlæg, regnvandsbetingede udløb, industri og bebyggelse uden tilslutning til central spildevandsrensning. De diffuse kilder kan opdeles i følgende:

<b>Vinderosion</b>	Ved vinderosion blæses jordpartikler fra de såkaldte afblæsningsflader til aflejringsområder, herunder vandløb og søer. Vinden er den basale faktor, der starter vinderosion eventuelt i samspil med temperaturen, der medvirker til at udtørre jordoverfladen og gøre den mere sårbar. Fosfor transporteres bundet til jordpartikler.
<b>Overfladisk afstrømning</b>	Når nedbøren overskrider jordens evne til at infiltrere vand, dannes vand på jordoverfladen, som afhængigt af topografien kan afstrømme overfladisk. Fosfor, der er bundet i det øverste jordlag kan tabes med det overfladisk afstrømmende vand som opløst fosfor eller bundet til små jordpartikler over længere distancer.
<b>Vanderosion</b>	Når hastigheden af det overfladisk strømmende vand stiger, kan det rive jordpartikler løs, som skylles med vandet, hvorefter det deponeres i lavninger og vandløbsbræmmer eller transporteres videre til vandløb og søer. Der er en glidende overgang fra overfladisk afstrømning. Fosfor transporteres overvejende bundet til jordpartikler.
<b>Udvaskning gennem jordprofilen (matriceudvaskning)</b>	Ved stigende mætningsgrad af jordens fosforbindingskompleks, som især består af aluminium- og jernoxider, stiger fosforkoncentrationen i jordvæsken, og fosfor på opløst form kan udvaskes med nedsivende vand. Det vurderes, at det kun er på drænedede jorde, at udvasket fosfor når frem til overfladevand pga. den store fosforbindingskapacitet i underjorden.
<b>Makroporeudvaskning</b>	Makroporeudvaskning skelnes fra matriceudvaskning ved at vandtransporten og fosfortabet her foregår i store makroporer, som er porer større end 0,3 mm. Vand strømmer kun i disse porer, når jorden lokalt er helt vandmættet. Makroporer kan i visse tilfælde forbinde det øverste jordlag med dybereliggende drænrør, hvorved den ofte betydelige fosforbindingskapacitet i underjorden omgås. Fosfor transporteres både på opløst form og bundet til jordpartikler.
<b>Grundvand</b>	Har de jordlag, der ligger over grundvandsspejlet, en begrænset fosforbindingskapacitet, og overstiger fosformætningsgraden i jordlagene et kritisk niveau, vil nydannet grundvand have en forhøjet fosforkoncentration. Fosfor kan også føres til det øvre grundvand med makroporestrømning. I dybere, iltfrit grundvand kan der forekomme naturligt høje koncentrationer af opløst fosfor ( $> 0.1 \text{ mg P l}^{-1}$ ).
<b>Tab fra organisk lavbundsjord</b>	Dyrkede og drænedede lavbundsområder adskiller sig fra mineraljordene, både hvad angår hydrologi og fosforbinding og -omsætning. På trods af dræning kan der i våde perioder opstå iltfrie forhold, hvorved jernoxider går i opløsning, fosforbindingskapaciteten reduceres, og fosfor kan udvaskes på opløst form.
<b>Brinkerosion</b>	Brinkerosion er en naturlig proces, som foregår i såvel naturlige som udrettede vandløb. Det strømmende vand i vandløb kan løsrive jordpartikler i brinkerne og hertil bundet fosfor. På længere sigt kan brinker underskæres, hvorved der sker brinksred. Fosfor transporteres bundet til jordpartikler.