



Fosforkortlægning af dyrkningsjord og vandområder i Danmark

Aarhus Universitet

Kontaktpersoner

Hans Estrup Andersen, Inst. f. Bioscience

Goswin Heckrath, Inst. f. Agroøkologi



Baggrund

Med udkast til ny husdyrlov ophæves harmonikravet på 1,4 DE/ha til 1,7 DE/ha og der indføres fosforlofter, som bevirker en vis omfordeling af husdyrgødningen på arealet, og dermed eliminerer de største overskudstilførsler med fosfor. Selv efter indførelse af fosforlofter er der dog en fortsat fosforakkumulering i jorden på størstedelen af harmoniarealet (ca. 60 pct.), nogenlunde svarende til i dag (DCE, 2016). Hermed vil den resterende fosforbindingskapacitet i jorden fortsat reduceres, og med tiden opbruges med fosforlækage til følge, såfremt overskudstilførslen fortsætter. Stigningstakten i fosforakkumulering vil dog være væsentligt nedsat på de arealer, der ved den nuværende regulering modtager store fosforoverskud, men dette betyder ikke, at fosfortabsrisikoen på disse arealer elimineres. Potentialet for tab af fosfor ad alle transportveje vil alt andet lige øges ved en positiv fosforbalance, mens en reduktion i fosforbalancen vil forlænge perioden, indtil bindingskapaciteten for fosfor i jorden opbruges til en kritisk grænse, hvor der kan forventes en betydelig stigning i fosfortab (DCE, 2016).

I udkast til husdyrlovsforslaget fremgår det, at miljø- og fødevarerministeren frem mod næste generation af vandområde- og naturplaner vil gennemføre en forbedret kortlægning mv. for at afklare, om der er behov for en justering af den skærpede fosforbeskyttelse af sårbare vandområder. Hertil hører også en kortlægning af oplande til mindre søer, som indgår i udpegningsgrundlaget for Natura 2000-områder, og som ikke indgår i vandområdeplanerne, samt marint vandmiljø (fjorde m.v.). Regeringen agter på baggrund af den forbedrede kortlægning mv. at træffe de eventuelle foranstaltninger i relation til fosforbeskyttelsen, som måtte være nødvendige for at kunne opfylde forpligtelserne efter EU-direktiverne (vandramme-, habitat- og VVM-direktiverne).

Projektforslag

Det overordnede formål med projektet er at få kortlagt de landbrugsarealer, hvor risikoen for fosfortab er størst. Denne viden skal sammenholdes med de vandområder, der vurderes som fosforfølsomme, og dermed i risiko for ikke at opfylde vandområde- og Natura2000-planens miljømål. Projektet skal danne grundlag for en fremadrettet, målrettet regulering af fosfor, som kan differentieres i forhold til de områder, hvor det fremgår, at både risikoen for fosfortab er stor, samt hvor vandmiljøet er fosforfølsomt. I projektet indgår også en kildeopsplitning af fosfortabet, eftersom resultatet af projektet skal indgå i den fremtidige husdyrregulering, hvor det primære fokus er en regulering af landbrugsbidraget.

Dette projektforslag indeholder tre hovedleverancer: A. et fosforrisikokort, B. en kortlægning af fosforfølsomme vandområder og C. en fosforbelastningsopgørelse inklusiv en kildeopsplitning.

Fosforrisikokortet skal sammen med følsomhedskortlægningen kunne benyttes i reguleringssammenhæng. Slutproduktet vil være et GIS-kort med en række undertemaer, der angiver risikoområder for fosfortab fra dyrkningsjord til vandområder på markniveau og finere. Risikoområder vil være skaleret i forhold til fosfortabsvejene, hvilket vil sige, at det for den enkelte mark vil fremgå hvilken fosfortabsvej, der er mest betydningsfuld. Risikofastsættelsen vil være semi-kvantitativ, dvs. opgjort i en række kvantitative klasser, og for hvert delelement fulgt af en evaluering og en usikkerhedsanalyse. Kortlægning af fosforfølsomme vandområder indeholder en grundlæggende analyse og udpegning af fosforfølsomme vandområder. Desuden leveres en opdateret fosforbelastningsopgørelse (2013-2017) fordelt på kilder inklusiv en usikkerhedsanalyse.

De tre hovedleverancer inklusiv deleleverancer vil kunne færdiggøres inden 31. december 2019 under forudsætning af projektstart senest 1. januar 2017.

Miljø- og Fødevarerministeriet forudser at styrelsen eller tredjemand efter projektet afslutning kan foretage funktionelle eller andre ændringer i forskningsleverancen herunder f.eks. ændrede oplandsgrænser mv.

Projektpartnere: projektforslaget er stillet af Aarhus Universitet. Under de enkelte underprojekter er oplyst samarbejdspartnere fra andre institutioner, som vil blive inddraget i projektløsningen under kontrakter med Aarhus Universitet. AU forpligtiger sig således til at ville indgå separate aftaler med de enkelte parter og inddrage dem i det omfang, som er nødvendigt. Udgifter til samarbejdspartner indgår i projektbudgettet.

A. Fosforrisikokortet

Følgende tabsveje anses for relevante på landbrugsjord, nemlig 1) vanderosion, 2) overfladeafstrømning, 3) udvaskning gennem jordens matrix på højbundsjord, 4) udvaskning via makroporer, samt 5) udvaskning fra lavbundsjarde. Desuden er det vigtigt at kunne kvantificere bidraget fra brinkerosion og baggrundsbidraget for at kunne bestemme landbrugets andel af det samlede fosfortab. Fosfortab fra det åbne land til vandmiljø er rumligt og tidligt stærkt varierende og hidrører fra en relativt begrænset del af det samlede areal - risikoområderne. Risikoområder (også kaldet *hot spots* eller kritiske kildeområder) er områder, hvor en effektiv transportvej forbinder områder med højt indhold af fosfor med et vandløb eller en sø.

Mekanismerne bag fosfortab varierer for de forskellige tabsveje. Det er derfor meningsfuldt at opdele kortlægningen af risikoområder på de enkelte transportveje. Fosfortab ad individuelle transportveje kan beskrives og kortlægges via en kombination af tre faktorer: 1) fosforkilden, 2) mobilisering af fosfor fra kilden og 3) transport af fosfor til vandmiljøet. En sådan modulær opbygning forenkler kortlægningen og gør den transparent. Det første forsøg på en samlet, landsdækkende kortlægning af risikoområder for fosfortab baseret på en kombination af de tre faktorer var det danske P-index fra 2009 (bl.a. Heckrath et al., 2009). Denne kortlægning var udelukkende kvalitativ og savnede en evaluering og usikkerhedsanalyse primært begrundet i manglende data på enkelt-transportveje. De

overordnede principper betragtes stadig som den bedste tilgang til at identificere risikoområder for fosfortab på en relevant skala, dvs. (sub-) markskala. I det foreliggende projektforslag bygges der videre på den første kortlægning, idet eksisterende data suppleres med nye målinger og analyser, der muliggør dels en semi-kvantitativ kortlægning, dels en evaluering og usikkerhedsanalyse af kortlægningen. Både evalueringen samt usikkerhedsanalyser indgår i den endelige afrapportering.

Udarbejdelsen af fosforrisikokortet i nærværende projektforslag er opdelt i en række underprojekter centreret om de enkelte fosfortabsveje. Underprojekterne resulterer i en række GIS-temaer, der samles i et enkelt, landsdækkende GIS-projekt fulgt af en evaluering af kortets del-elementer og en usikkerhedsanalyse. For hver proces, undtagen fosfortab fra lavbundjorde, baseres risikokortlægningen på en klasseinddeling af estimerede fosfortabsrater. Dette muliggør en sammenlignende betragtning af fosfortabsrisici. Lavbundjorde typeinddeles, og den potentielle risiko for fosformobilisering kortlægges for hver type. Udover evalueringen og usikkerhedsvurderingen på de enkelte fosfortabsveje foretages der på oplandsniveau en vurdering af den sammenvejede risiko for fosfortab fra dyrkningsjorden mod de målinger af fosfortransporten, der foretages i den nationale overvågning. Underprojekterne er beskrevet i det følgende.

Fosforrisikokortlægningen inddrager desuden danske kortprodukter, der er under udvikling i andre projektsammenhænge og forventes at være tilgængelige for projektet medio 2018. Det vedrører primært kortlagte, landsdækkende oplysninger om jordens dræningsklasse, dybde til øverste grundvandsniveau samt sandsynlighed for at jorden er drænet. I forbindelse med fosforudvaskning er transport til overfladevand betinget af, at marken er drænet eller ligger i umiddelbar tilknytning til vandløb eller grøft. Derfor har en drænkortlægning en central betydning for fosforrisikokortlægningen.

Jordens fosforpulje er den væsentligste kilde til fosfortab. Derfor vil et øget fosforindhold i jorden alt andet lige øge risikoen for fosfortab. En stor del af jordens fosforpulje er tilført som handels- eller husdyrgødning igennem det sidste århundrede. Udviklingen af fosforindholdet i jorden viser således et overordnet geografisk mønster, der afspejler intensiteten af husdyrproduktionen. Jordens fosforindhold på markskala kan dog ikke estimeres ud fra jordegenskaber og dyrkningshistorie. Landbrugets målinger af plantetilgængeligt fosfor i form af fosfortallet muliggør en pålidelig karakterisering af fosforpuljen. Disse data har hidtil ikke været tilgængelige. Da en karakterisering af fosforpuljen på markniveau er afgørende for fosforrisikokortlægningen, skal der enten etableres et system, der muliggør adgang til landbrugets målinger af fosfortal eller alternativt benyttes skønnede fosfortalværdier, som så efterfølgende kan erstattes af lokale data.

1. Erosion

Selvom alvorlige erosionshændelser er forholdsvis sjældne i Danmark, forekommer erosion i alle landsdele, og erosionsraterne er sammenlignelige med dem fra andre nordeuropæiske lande. Erosion er stærkt varierende i tid og rum, afhængigt af topografiske, klimatiske, jordtypebestemte og dyrkningsrelaterede faktorer. Sammen med sedimentet omfordeles fosfor i landskabet, således at det lokalt kan tilføres vandmiljøet. Overfladeafstrømning kan transportere fosfor fra det øverste jordlag i opløst form og bundet til kolloider også fra arealer, hvor der ikke foregår nogen egentlig jorderosion. Der mangler imidlertid afstrømningsmodeller, der er validerede under danske forhold. Da det er de samme faktorer, som betinger både overfladeafstrømning og egentlig erosion, behandles de to processer her under ét. Der er for nylig foretaget en landsdækkende erosionsmodellering hos Aarhus Universitet vha. en videreudviklet version af den amerikanske model USLE (*Universal Soil Loss Equation*). Modellen tager højde for klima-, jord- og dyrkningsfaktorer samt arealanvendelse og effekten af landskabsform i en eksplicit, rumlig sammenhæng. Den estimerer både langsigtede, gennemsnitlige erosions- eller depositions-rater på 10 m grid og eksport af sediment hen over markgrænsen og til vandområder. Dermed er det muligt at udpege områder, hvor der er stor sandsynlighed for, at der kan ske tilførsel af sediment til vandmiljøet. Denne modelopsætning udvides til at estimere transport af sedimentbundet fosfor. Det kan konservativt antages, at sedimentet har det samme indhold af totalfosfor som marken, hvorfra sedimentet stammer. Eksisterende data viser en robust sammenhæng mellem fosfortallet og jordens indhold af totalfosfor. Fosforkilden beskrives derfor som en funktion af overjordens fosfortal. Erosionsmodellen evalueres gennem et monitoringsprogram. Underprojektet har følgende aktiviteter:

1. Med udgangspunkt i erosionsmodelleringen udvælges et større antal lokaliteter til systematisk erosionsmonitoring vha. droner. Der optages luftfotos typisk om efteråret og igen i februar-marts for at kortlægge synlige erosionsmønstre vha. *remote sensing*-metoder. På et udvalgt, mindre antal af majsmarker foretages en lignende monitorering i juni måned. Erosionsmodellen evalueres på de indsamlede data, og usikkerheden på kortlægningen kvantificeres.
2. Vha. erosionsmodellen og kendskab til markens fosfortal estimeres lokalt og kvantitativt klasser for erosionsbetinget fosfortransport til vandområder.

Delprojektet leverer et landsdækkende kort over risiko for fosfortab ved erosion med usikkerhedsanalyse.

Samarbejdspartner: SEGES.

2. Udvasning gennem jordens matrix

Normalt bindes fosfor i minerogene jorde hårdt til fosforbindingskomplekset, som helt overvejende består af dårligt krystalliseret jern og aluminium. Imidlertid kan fosfor mobiliseres i form af opløst fosfor ved stigende mætningsgrad af bindingskomplekset og nedva-

skes. Fosforkilden til matrixudvaskning beskrives som en funktion af overjordens fosfortal. Kendskab til fosforkilden og fordeling af bindingskapacitet i jordprofilen kan bruges til at estimere fosfortransport igennem jordprofilen samt tilbageholdelse i dybere jordlag vha. en simpel udvaskningsmodel. En sådan model er den hollandske PLEASE (Schoumans et al., 2011), der er udviklet til praktiske risikokortlægningsformål og indledningsvist afprøvet under danske forhold (van der Salm et al., 2013).

I dette underprojekt foretages en landsdækkende semi-kvantitativ risikovurdering af fosforudvaskning via matrixafstrømning vha. PLEASE modellen. Specifikt 1) etableres det nødvendige kortgrundlag om fosforbindingskapacitet i jord på grundlag af eksisterende og nye jordanalyser, 2) opsættes og kalibreres modellen på en række vel-undersøgte lokaliteter, 3) gennemføres en grundig evaluering ved at sammenholde PLEASE-modelleringer med målte ændringer over tid af fosforpuljer i forskellige jordlag på Kvadratnetpunkter. Der indgår følgende hovedaktiviteter:

1. Grundlaget for kortlægningen af fosforbindingskapacitet udbygges ved analyse af oxalatekstraherbart fosfor, jern og aluminium i tre jordlag ned til en dybde af 0,75 m i yderligere ca. 250 Kvadratnetpunkter udover de eksisterende 350 punkter. Desuden udtages jordprøver på strategisk udvalgte yderligere ca. 500 punkter udenfor Kvadratnettet til bestemmelse af bindingskapacitet og vandekstraherbart fosfor i jordprofilen.
2. På grundlag af eksisterende og nye data gennemføres en ny, landsdækkende kortlægning af fosforbindingskapacitet i tre dybder. Opskaleringen fra målepunkter til et landsdækkende kort sker ved anvendelse af *regression kriging*, hvor relationer til f.eks. jordtekstur, geologisk udgangsmateriale og landskabselement anvendes. Usikkerheden på fosforbindingskortet kvantificeres med en statistisk *bootstrapping* analyse eller med kriging-usikkerheden, hvis residualerne er rumligt korrelerede.
3. Akkumulering af fosfor i dyrkningsjorden og nedvaskning af fosfor er tidligere blevet dokumenteret på grundlag af prøver taget i 1986 og 1997 i ca. 350 Kvadratnetpunkter. Der gennemføres yderligere analyser på jordprøver taget i de samme punkter i 2008/09 for at få et opdateret billede af fosforakkumuleringen og omlejring i jordprofilen. Denne data-tidsserie er grundlag for evalueringen af PLEASE.
4. Sammenhængen mellem overjordens fosfortal, størrelsen og mætningsgraden af fosforbindingskomplekset og fosfortabet ved udvaskning evalueres med PLEASE. Modellen opsættes og justeres til danske forhold på ca. 30 marker i Landovervågningsprogrammet og yderligere drænoplande, hvor alle nødvendige inputdata samt en lang tidsserie over fosforudvaskning er til stede. Modellens evne til at beskrive akkumulering og fordeling af fosfor mellem jordlagene evalueres efterfølgende ved en række modelopsætninger på Kvadratnetpunkter. Der er hermed etableret et valideret værktøj til at gennemregne effekter af fortsat fosforophobning på fosforudvaskning ved matrixafstrømning.
5. Vha. PLEASE-modellen oversættes sammenhængen mellem overjordens fosfortal og underjordens fosforbindingskapacitet og -mætningsgrad semi-kvantitativt til en række fosforudvaskningsklasser. Alle danske marker kan herefter henføres til en fosforudvaskningsklasse på baggrund af markens fosfortal og fosforbindingskapacitetskortet.

Delprojektet leverer et landsdækkende kort over fosforbindingskapacitet med kendt usikkerhed, opdateret viden om fosforakkumulering og -nedvaskning i danske jorde, en valideret fosforudvaskningsmodel samt en landsdækkende kortlægning af danske marker inddelt i semi-kvantitative fosforudvaskningsklasser

Samarbejdspartnere: SEGES, Wageningen Environmental Research (Alterra), Københavns Universitet.

3. Udvasning via makroporer

Udvasning af fosfor til dræn vil i betydeligt omfang foregå i makroporer enten på opløst form eller som fosfor bundet til mobile jordpartikler. Ud over selve vandtransporten gennem makroporer, som især opstår, når jordmatricens hydrauliske ledningsevne bliver overskredet, er potentialet for partikelmobiliseringen afgørende. Sandsynligheden for makroporestrømning er især bestemt af den geologiske variation. Der er tidligere udviklet en model, der relaterer denne sandsynlighed til lettilgængelige pedologiske og jordfysiske data (Iversen et al., 2011). På grundlag af modellen blev der gennemført en landsdækkende kortlægning af risiko for makroporetransport i 2009. Siden er datagrundlaget forbedret, hvilket muliggør en opgradering af kortlægningen. Kortlægningen af makroporetransport må desuden knyttes til en estimering af potentialet for partikelmobilisering. En stor del af den fosfor, der udvaskes til drænene er bundet til partikler. Der er en lineær sammenhæng mellem mængden af partikler og mængden af partikulært bundet fosfor i drænvand. Desuden er der en sammenhæng mellem overjordens fosforstatus og fosforkoncentrationen på partiklerne. På grundlag af kortlagte jordbundsdata udvikles en funktion til estimering af partikelmobilisering via makroporetransport. Denne funktion vil kunne bruges til at skalere risiko for makroporetransport af fosfor. De enkelte komponenter af denne kombinerede risikokortlægning skal evalueres. Underprojektet har følgende aktiviteter:

1. En nøgleparameter er mængden af vanddispergerbare partikler. Mængden af vanddispergerbare partikler vil blive målt på prøver fra marker med lergradienter samt fra marker, der repræsenterer teksturvariationen i Danmark. Desuden vil effekten af jordbearbejdning blive undersøgt. Resultaterne vil derefter blive relateret til pedologiske og jordfysiske data som grundlag for kortlægning af partikelmobiliseringspotentiale.
2. Evalueringen af risikokortet for makroporestrømning foretages i laboratoriet ved dels at måle jordens hydrauliske egenskaber, dels ved at udføre udvaskningsforsøg med et konservativt sporstof på ca. 50 udtagne jordkolonner. Jordkolonnerne repræsenterer

en gradient i underjordens lerindhold. De målte hydrauliske værdier bruges dels til en videreudvikling, dels til en validering af den pedotransferfunktion, der ligger til grund for parameteriseringen af den hydrologiske model, der blev brugt til udviklingen af risikokortet for makroporestrømning. Udvasningsforsøgene anvendes til at validere modeloutputtet fra den hydrologiske model. Der inddrages viden fra igangværende forskningsprojekter med fokus på makroporetransport og anvendes nyt laboratorieudstyr, der muliggør en samtidig måling af både udvasningsparametre og hydraulisk ledningsevne. Samtidig anvendes eksisterende måledata fra dræn til evaluering af modelleringskonceptet.

- Den rumlige udbredelse af de hydrauliske værdier baserer sig på et gridbaseret jordbundskort. Kortet er nu forbedret, så opløsningen er på 30 x 30 m. De udviklede pedotransferfunktioner, der opskalerer de hydrauliske værdier af betydning for makroporetransport, vil blive anvendt på det nye jordbundskort i produktionen af det opdaterede risikokort. En usikkerhedsanalyse gennemføres.

Delprojektet leverer en model for partikelmobilisering, en opdateret pedotransferfunktion, samt en landsdækkende risikokortlægning af risiko for fosfortab via makroporer med usikkerhedsanalyse.

Samarbejdspartnere: SEGES, udvalgte Landboforeninger, Københavns Universitet

4. Udvasning fra lavbundslande

Nyere omfattende undersøgelser viser meget betydelige variationer i fosforindholdet i lavbundslande fra <200 til >10.000 mg/kg, hvor det gennemsnitlige indhold for minerogene højbundslande er på 910 mg/kg (Kjærgaard et al., 2010). Variationen i fosforindhold afspejler variationen i bindingskapacitet, hvor den meget betydelige fosforakkumulering i nogle lavbundslande primært er relateret til jordens indhold af jernoxider. Fosfortabsrisikoen er i overvejende grad knyttet til de processer, der foregår under iltfattige forhold, når jorden er vandmættet. Der er udviklet en empirisk model, der på basis af få, målbare jordparametre kan prædiktere risikoen for fosformobilisering under vandmættede forhold (Kjærgaard og Kristensen, 2011). Da den aktuelle fosfortabsrisiko fra lavbundsarealer afhænger af såvel mobiliseringspotentialer som de hydrauliske forhold, forudsætter en yderligere kvantificering af fosfortabsrisikoen en hydrologisk beskrivelse af afstrømningsforholdene på lavbundsarealer. I underprojektet gennemføres følgende aktiviteter:

- Kortlægning af danske lavbundstypologier. Danske lavbundsarealer differentieres i henhold til georegioner, jordtype/geologi, landskabselementer, samt landskabsmorfologi.
- Geokemisk analyse af lavbundstypologier. På baggrund af eksisterende data fra SINKS-projektet (10.000 lokaliteter) med data for kulstof, volumenvægt, samt (ikke-analyserede data) oxalatekstraherbart jern, aluminium og fosfor undersøges sammenhæng mellem geokemiske nøgleparametre og lavbundstyper. Analysen vil have fokus på at dokumentere (i) variationen i fosforbindingskapacitet og fosformætningsgrad for danske organogene lavbundslande, samt (ii) identificere sammenhænge mellem danske lavbundstypologier og geokemiske parametre, herunder fosforbindingskapacitet samt fosformætningsgrad, der kan benyttes i en landsdækkende kortlægning. Da analysen benytter sig af eksisterende data fra SINKS-projektet, hvilket primært er begrænset til de organogene lavbundslande, vil analysens resultater primært være målrettet organogene lavbundsarealer. Øvrige georefererede data, fra forundersøgelser i forbindelse med danske vådområdeprojekter, i form af volumenvægt samt BD-ekstraherbart Fe og P kunne med fordel inddrages, hvis disse data stilles tilgængelige for projektet.
- Kortlægning af potentiel risiko for fosformobilisering. Der er udviklet en empirisk model der beskriver risiko for fosformobilisering på basis af jordens indhold af BD-ekstraherbart jern og fosfor samt volumenvægt (Kjærgaard et al., 2015). Data baseret på oxalatekstraktioner kan ikke umiddelbart indgå i denne prædiktionsmodel, da oxalatekstraherbart fosfor også inkluderer fosfor bundet til mere stabile aluminiumoxider. På arealer hvor aluminiumoxid-indholdet er kvantitativt betydende forventes den empiriske prædiktionsmodel at overestimere risikoen for fosformobilisering. Med henblik på en mulig kortlægning af den potentielle risiko for fosformobilisering bør sammenhængen mellem oxalatekstraherbart og BD-ekstraherbart fosfor og fosforbindingskomponenter belyses på et større datagrundlag. Der udtages derfor nye supplerende jordprøver fra repræsentative lavbundstypologier (dvs. dækkende den geokemiske variation i det eksisterende datasæt), der analyseres parallelt ved anvendelse af begge metoder med henblik på at fastlægge relationer for potentiel fosformobilisering for repræsentative danske lavbundstyper.
- Resultater fra kortlægning af potentiel risiko for fosformobilisering kan for enkelte lavbundstypologier valideres på baggrund af monitoring af fosfortab i forbindelse med eksisterende dræn- og jordvandmålestationer. Dette omfatter bla. organogene og minerogene arealer på Littorina-fladen, hvor der allerede monitoreres for fosfortab, samt organogene og minerogene lavbundsarealer i ådal i hhv. østjysk morænelersopland og vestjysk sandopland, hvor der i forbindelse med igangværende monitoring suppleres med analyser af fosfor.
- Kvantificering af fosfortab fra lavbundsarealer forudsætter foruden viden om fosformobiliseringspotentialer også viden om lavbundshydrologien, mere konkret vandtransporten gennem de fosforholdige jordlag. I forbindelse med Innovationsfondsprojektet TReNDS (2015-2019) arbejdes i 2 PhD projekter på at kvalificere strømningstypologier på ripariske lavbundsarealer. Den viden der opnås i TReNDS-projektet vil kunne anvendes som afsæt for videreudvikling med henblik på en senere kvantificering af fosfortab fra lavbundsarealer.

Delprojektet leverer en landsdækkende kortlægning af risiko for fosformobilisering fra lavbundslande.

Samarbejdspartnere: GEUS, Københavns Universitet

5. Brinkerrosion

Brinkerrosion kan udgøre en meget betydelig del af fosfortabet fra det åbne land (Poulsen og Rubæk, 2005). Brinkerrosion er målt i en række studier, men der eksisterer ikke nogen landsdækkende kortlægning. Fosforkilden til brinkerrosion er fosforindholdet i vandløbs randzone. Selve erosionsprocessen kan beskrives som en funktion af brinkens morfologi – hældning og højde – afstrømningsregimet, samt vegetationstypen. Vegetationstypen (vedagtig vs. græs/urtevegetation) i den vandløbsnære zone kan udtrages fra eksisterende korttemaer. På grundlag af data fra 800 NOVANA vandløbsstationer dannes statistiske relationer mellem hhv. et vandløbs slyngningsgrad og størrelse og brinkens morfologi. På dette grundlag kan der foretages en landsdækkende kortlægning af risiko for fosfortab via brinkerrosion.

Underprojektet har følgende aktiviteter:

1. Definition af et antal brinktyper (forventeligt 6-8 typer) ved en analyse af sammenhænge mellem brinkerrosion og vandløbsmorfologiske og randzoneforhold ud fra eksisterende måledata af brinkerrosion fra forskningsprojekter (VMP projekt: 1994-1997; PhD projekt: 1998-2001; Buffalo-P projekt: 2005-2009).
2. Analyse af fosforindholdet i brinker/randzoner ud fra eksisterende data suppleret med nye målinger af fosforindhold i et antal randzonetyper (ca. 200 lokaliteter, udtagning i 3 dybder), der defineres på baggrund af analysen af de eksisterende data. Herunder gennemføres en analyse af kilder til fosfor i brinken/randzonen ift. hvor meget der kan tilskrives baggrundsbidraget, og hvor meget der er ophobet fra andre kilder. Analysen inddrager fosforindhold målt i prøver fra skovjorde i Kvadratnettet som reference.
3. Udvikling af statistiske transferfunktioner mellem vandløbsstørrelse og -slyngningsgrad og brinkmorfologi ud fra målinger af Dansk Fysisk Index-parametre på NOVANA stationer.
4. Semi-kvantitativ bestemmelse af fosfortab ved brinkerrosion ved at sammenholde brinktyper med eksisterende data over målt brinkerrosion samt kobling til fosforindhold i brinkmaterialet og afstrømningsregime. Afstrømningsregime foreligger allerede beregnet på ID15-niveau.
5. Landsdækkende semi-kvantitativ kortlægning af risiko for fosfortab ved brinkerrosion.

Delprojektet leverer en landsdækkende kortlægning af risiko for fosfortab ved brinkerrosion.

Samarbejdspartnere: Aalborg Universitet.

B. Fosforfølsomme vandområder

B1. Vandløb

Den økologiske tilstand i vandløb skal jævnfør vandområdeplanerne vurderes på baggrund af planter, smådyr og fisk, hvor der foreligger interkalibrerede indeks. For benthiske alger findes der endnu ikke et interkalibreret indeks, der kan indgå i vurderingen. Imidlertid foreligger der et udkast til en rapport udarbejdet af DCE til SVANA, hvori det anbefales at anvende *Rott's saprobic index* (SID), som er et eksisterende indeks (Rott et al. 1997) til økologisk tilstandsvurdering af benthiske kiselalger i danske vandløb. Både planteindekset (DVPI) og det benthiske kiselalge-indeks (SID) relaterer sig signifikant til koncentrationen af uorganisk fosfor. Foreløbige datasammenstillinger viser således, at der kan være risiko for ikke at nå målopfyldelse i vandområder med koncentrationer af uorganisk fosfor, der overstiger gennemsnitligt $43 \pm 5,6 \mu\text{g ortho-P l}^{-1}$ (gennemsnit $\pm 95\%$ konfidensgrænser). Denne værdi er baseret på 3 årlige målinger i vandløbene og kan derfor være behæftet med usikkerhed. For SID foreligger der endnu ikke interkalibrerede grænsefastsættelser mellem de økologiske tilstandsklasser. Det kan derfor endnu ikke vurderes ved hvilke koncentrationer af uorganisk fosfor, der kan være risiko for ikke at nå målopfyldelse for de benthiske alger vurderet med SID.

Der er 7.800 vandløbsvandområder i Danmark. Tilstanden i forhold til næringsstoffer er kun kendt for et meget lille antal områder, hvorfor et eventuelt indsatsbehov ikke kan bestemmes for nuværende.

Underprojektet har følgende aktiviteter:

1. Det søges identificeret i hvor høj grad uorganisk fosfor er kritisk for at nå målopfyldelse med DVPI i danske vandløb i forhold til andre stressorer. Dette gennemføres ved *i*) at identificere samfund af arter, der i særlig grad er associerede til høje koncentrationer af uorganisk fosfor i vandløb og *ii*) at undersøge andelen af vandløb, hvor disse arter er dominerende. Analyserne gennemføres stratificeret efter vandløbsstørrelse på grundlag af NOVANA-data.
2. Sikkerheden på den identificerede, kritiske koncentrationen af uorganisk fosfor for at nå målopfyldelse med DVPI i vandområder undersøges bl.a. gennem en vurdering af, hvor godt 3 årlige prøver repræsenterer fosforkoncentrationen i planternes vækst-

periode. Der inddrages data fra ca. 320 NOVANA stoftransportstationer, hvor der tages prøver med en frekvens på 12 – 26 prøver per år.

3. Gennem litteraturstudier undersøges den kritiske fosforkoncentration for målopfyldelse for SID i nabolande, hvor dette indeks er implementeret i tilstandsvurderingen af vandløb.

Delprojektet leverer en validering og en usikkerhedsvurdering af den kritiske koncentration af uorganisk fosfor for målopfyldelse med DVPI, en kvantificering af andelen af danske vandløb, der ikke når målopfyldelse med DVPI pga. for høje koncentrationer af uorganisk fosfor, samt et litteraturbaseret estimat på kritisk koncentration af uorganisk fosfor for målopfyldelse med SID i små danske vandløb (<10 km²).

B2. Marine vandområder

Fosforfølsomme vandområder er som udgangspunkt vandområder, hvor primærproduktionen begrænses af fosforkoncentrationen. I mange marine vandområder er fosfor begrænsende for primærproduktionen i en kortere eller længere periode om foråret, hvorimod det sjældnere er en begrænsende faktor i sommer og efterårsperioden. I perioder med fosforbegrænsning vil primærproduktionen og med stor sandsynlighed også klorofylkoncentrationen være påvirket af fosfortilførsler fra land. Generelt set har fosfortilførsler ikke en direkte og kvantificerbar effekt på de interkalibrerede VRD-indikatorer (sommer klorofyl koncentration, DKI og dybdegrænse for ålegræs), hvorimod andre biologiske kvalitetsselementer, som f.eks. makroalger, og støtteparametre som TP og muligvis ilt også kan være påvirket af fosfortilførsler. Endvidere kan fosfor både direkte og indirekte påvirke økosystemernes respons på ændringer i næringsstofbelastningen og samspejlet mellem kvælstof og fosfor. Betydningen af fosfor som potentiel presfaktor forventes imidlertid at variere mellem områder afhængigt af, hvor fosfor-følsomme områderne er. Til kortlægning af fosforfølsomme marine vandområder foreslås følgende aktiviteter:

1. Identificering af indikatorer, der beskriver et vandområdes fosfor-følsomhed, f.eks. graden af ferskvandspåvirkning, forekomst og frekvens af cyanobakterier og antallet af dage med fosforbegrænsning.
2. Beregninger af de i punkt 1 identificerede fosfor-følsomheds-indikatorer for vandområder, hvor datagrundlaget er tilstrækkeligt.
3. Håndtering af vandområder, hvor der ikke er tilstrækkeligt med data
4. Kortlægning af de enkelte fosfor-indikatorer
5. Kategorisering og kortlægning af danske VRD vandområder baseret på graden af fosfor-følsomhed

Delprojektet leverer en beskrivelse af fosfor følsomme indikatorer inkl. beregningsmetoder, et landsdækkende kort med værdier for de enkelte fosfor-indikatorer samt et landsdækkende kort over fosforfølsomheden i danske marine vandområder inklusiv en usikkerhedsvurdering.

Samarbejdspartner: DHI

B3. Søer

Vandområdeplanerne for de danske søer og de tilhørende indsatsplaner for at kunne opfylde kravet om mindst god økologisk tilstand er udarbejdet med henblik på at modvirke den menneskeskabte eutrofiering, der er langt det største problem i danske søer. Indsatsplanerne baserer sig alene på at nedbringe tilførslen og tilgængeligheden af fosfor, idet fosfor er det primært begrænsende næringsstof i søer og afgørende for den økologiske kvalitet. Alle de biologiske kvalitetsselementer (undervandsplanter, planteplankton, fisk og bunddyr), som bruges til at fastsætte den økologiske kvalitet, responderer således kraftigt på øget indhold af fosfor. Tilførsel og øget risiko for tilførsel af fosfor er således helt afgørende for de danske søer vandkvalitet, herunder forventeligt også i de mindre søer. Som udgangspunkt er alle søer således mere eller mindre fosforfølsomme, forstået på den måde, at øget fosfortilførsel vil forværre deres tilstand.

I dette delprojekt er det formålet at undersøge tilstand og sammenhæng med oplandskarakteristika i mindre danske søer. Analysen gennemføres i søer under 5 hektar, herunder de jf. SVANA omkring 1200 kortlagte habitatsøer under 1 ha, der ligger indenfor Natura2000 områderne, men udenfor oplande omfattet af vandområdeplanerne. Desuden inddrages 170 vandplan-søer, hvor tilstanden er ukendt. Hensigten er at beskrive sammenhæng mellem oplandets karakteristika og søens naturtilstand. Den nuværende naturtilstand er kendt for de fleste af disse søer, og det er ideen, at vi skal kunne relatere tilstanden i forhold til en eventuel fosforpåvirkning. Med henblik på at beskrive hvad der skal til for at der kan laves en indsatsberegning, foreslås kortlægningen af fosforfølsomme søer at indeholde følgende elementer:

1. Dataklargøring. Monitoringsdata fra søer under 5 ha herunder de omkring 1200 søer mindre end 1 ha, som jf. SVANA er beliggende i Natura2000-oplande, men udenfor vandplanområder, tilvejebringes og systematiseres. De 1200 søer er en del af ca. 4000 habitatsøer (de resterende ca. 3000 habitatsøer er dækket af vandplan-områder). Den kemiske tilstand er i de fleste søer ukendt, og tilstanden er vurderet fysisk og via vegetation, eventuelt med en enkelt klorofyl-måling, som i et mindretal af søerne også kan være suppleret med målinger af totalfosfor og totalkvælstof. En stor del af søerne ligger i naturområder med ingen eller kun ekstensiv dyrkning. Dataklargøring indebærer også, at der etableres en samlet oversigt over de data, der indgår i naturtilstandsvurde-

ringen samt selve naturtilstandsberegningen. Det vurderes, hvorvidt det er relevant og eventuelt i samarbejde med SVANA og den løbende monitorering at indsamle supplerende data vedrørende næringsstofindhold i søerne.

2. Dataanalyse. Der foretages en grundlæggende beskrivelse og analyse af eksisterende data fra de omfattede søer. Data holdes op mod oplandskarakteristik og eventuelle fosforkilder med henblik på at relatere søtilstand til forhold i søernes opland. Det vurderes, hvorvidt andre faktorer end fosfor kan være afgørende for søernes tilstand. Der etableres empiriske sammenhænge mellem oplandskarakteristika og målt tilstandsvurdering (indhold af klorofyl a, næringsstoffer og vegetation) for søer med data. På denne baggrund etableres modelberegnete sammenhænge mellem oplandskarakteristika og tilstanden i umålte søer. Der gennemføres en kortlægning af målt og estimeret tilstand for de omfattede søer inklusiv de 170 vandplan-søer med ukendt tilstand.
3. Risikoanalyse. Det vurderes i hvilket omfang de undersøgte søer er fosforfølsomme, defineret som risiko for at der tilføres eks-tern fosfor, som forværrer tilstanden. Hvis oplandet er dyrket, vil søen være i risiko for dårlig tilstand pga. fosfortilførsel, men hvis oplandet udelukkende består af natur, er der mindre risiko for menneskabt eutrofiering.

Delprojektet leverer en oversigt over empiriske sammenhænge mellem oplandskarakteristika og målt tilstandsvurdering i søer, en model for sammenhæng mellem oplandskarakteristika og tilstand i umålte søer samt en kortlægning af målt og estimeret tilstand i søer med en usikkerhedsvurdering.

I dette projekt er fastsættelse af indsatsbehovet og tilhørende fosfor-virkemidler for disse søer ikke indeholdt. Kortlægningen af habitat-søer er ikke afsluttet, og det forventes, at ca. halvdelen af det samlede antal habitat-søer er kortlagt på nuværende tidspunkt.

C1. Belastningsopgørelse og kildeopsplitning af fosfor

En effektiv og målrettet indsats mod ekstern fosforbelastning af vandområder må baseres på viden om bidragene fra de enkelte fosforkilder. Den seneste oversigt over størrelsen af de enkelte kilder til den diffuse fosforbelastning, hvor der er foretaget en kvantitativ vurdering af betydningen af transportvejene for det diffuse fosfortab (erosion, udvaskning mv.), stammer tilbage fra 2005 (Poulsen og Rubæk, 2005) og foreligger kun på nationalt niveau. Derfor er der et stort behov for at få kvantificeret betydningen af punktkilders og diffuse kilders bidrag til fosfortransporten i de enkelte vandplanoplande, samt at opsplitte det diffuse bidrag i bidrag fra hhv. landbrug og baggrund baseret på målingerne i NOVANA-programmet og estimater for umålt opland.

Den nuværende metode til at opgøre fosfortransport til vandområder er baseret på modelberegninger samt målinger i vandløb foretaget med en frekvens på 12 – 26 målinger per år. Det er tidligere vist, at der med anvendelse af denne metode er stor sandsynlighed for at fejlestimere den sande fosfortransport i vandløb, idet fosfortransporten i store, men kortvarige afstrømningshændelser sjældent bliver målt ved stikprøvetagningen (Kronvang og Bruhn, 1996). Det er også tidligere vist, at det ikke er muligt at foretage en kvantitativ kildeopsplitning mellem landbrugsbidrag og alle typer af punktkildebelastning, herunder særligt bidraget med spildevand fra spredt bebyggelse. Derfor er der behov for i projektet dels at opdatere den empiriske fosformodel, som anvendes i NOVANA (DK-QNP), og dels at indføre en bias-korrektion på modellen som beskrevet i Larsen et al. (2015), samt at udvikle en opgørelsesmetode, der med høj sikkerhed kan foretage en kildeopsplitning mellem de forskellige punktkilder og øvrige bidrag. Derudover er der behov for at få testet nye beregningsmetoder til fosfortransport, herunder om der beregningsmæssigt bør differentieres mellem delfraktioner af fosfor (opløst og partikelbundet, inddragelse af CQ-metoden mv.). I arbejdet inddrages ny viden fra de omkring 200 nye målestationer, når data foreligger første gang i 2018.

I dette underprojekt beregnes den samlede, normaliserede fosforbelastning (2013-2017) fordelt på 90 vandoplande til kystvande. Der benyttes resultater fra det nuværende NOVANA-program og en opdateret fosformodel (DK-QNP), hvor der er korrigeret for bias. Der sikres, at metoden til opgørelse af fosforbelastningen kan anvendes på de niveauer, der anvendes i vandområdeplanlægningen, herunder til opgørelse af næringsstofbelastningen til søer og vandløb omfattet af vandområdeplanlægningen. Der foretages som resultat en opsplitning af fosforbelastningen fra de 90 vandoplande fordelt på punktkilder, baggrundsbidrag og landbrugsbidrag (en kildeopsplitning). Fosforretentionen i overfladevand vil indgå med den nuværende viden i DK-QNP-modellen. Betydningen af at skifte til en eventuel ny stoftransportmetode for fosfor vil blive belyst ved eksempler. På grundlag af den opnåede viden under projektets punkt A. fordeles landbrugsbidraget dernæst på de enkelte transportveje, hvor også betydningen af brinkerrosion inddrages. Der foretages til slut en usikkerhedsvurdering af den gennemførte kildeopsplitning.

Delprojektet leverer en opdateret fosforbelastningsopgørelse (2013-2017) på 90 oplande samt en kildeopsplitning inklusiv usikkerhedsanalyse for 90 oplande.

Referencer

DCE, 2016. Redegørelse for udvikling i landbrugets fosforforbrug, tab og påvirkning af vandmiljøet. Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 77. <http://dce2.au.dk/pub/TR77.pdf>

Iversen, B.V. et al. 2011. Risk predicting of macropore flow using pedotransfer functions, textural maps, and modeling. *Vadoze Zone J.* 10:1185-1195.

Kjærsgaard, C., L. Heiberg, H.C.B. Hansen, H. Jensen, M.H. Greve og C.C. Hoffmann. 2010. Risiko for fosfortab ved reetablering af vådområder. *Vand & Jord* 17 (2): 58-62.

Kjærsgaard, C. and Kristensen, K. 2011. Statistical model to predict in situ phosphorus mobilization in rewetted peat and minerogenic lowland sediments. I: Joint meeting of society of Wetland Scientist, WETPOL and Wet-land Biogeochemistry Symposium. Prague, Tjekkiet.

Kronvang, B. and Bruhn, A.J., 1996: Choice of sampling strategy and estimation method when calculating nitrogen and phosphorus transport in small lowland streams. *Hydrological Processes*, Vol. 10, 1483-1501.

Larsen, S.E., Windolf, J. & Kronvang, B. 2015. Validering af fosformodellen. Notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi.

Poulsen, H.D. & Rubæk, G.H. (red.). 2005. Fosfor I dansk landbrug. Omsætning, tab og virkemidler mod tab. DJF-rapport Husdyrbrug nr. 68. Danmarks JordbrugsForskning.

Schoumans, O., Groendijk, P, van der Salm, C. and Pleijter, M. 2011. Methodology to characterize P-leaking soils: Description of the model PLEASE. Alterra Rep. 1724.

van der Salm et al. 2013. Predicting phosphorus losses with the PLEASE model on a local scale in Denmark and the Netherlands. *J. Environ. Qual.*, 40, 1617-1626.

Milepæle

MA1.1	Monitering af erosion afsluttet og data formateret
MA1.2	Erosionsmodellen evalueret og usikkerheden kvantificeret
MA2.1	Alle jordprøver udtaget og analyseret
MA2.2	Landsdækkende kort over fosforbindingskapacitet færdigt
MA2.3	Analyse over fosforakkumulering og -nedvaskning gennemført
MA2.4	Udvaskningsmodellen PLEASE opsat, kalibreret og valideret
MA2.5	Sammenhæng mellem overjordens fosfortal og underjordens bindingskapacitet og -mætningsgrad sammenfattet i semi-kvantitative klasser
MA3.2	Udvaskningsforsøg på jordkolonner afsluttet
MA4.1	Lavbundsarealer differentieret i henhold til geologi, jordtype og landskab
MA4.2	Analyse af sammenhæng mellem geokemiske nøgleparametre og lavbundstyper afsluttet
MA4.3	Supplerende prøvetagning afsluttet
MA4.4	Model for fosformobilisering fra lavbundslande opdateret og evalueret
MA5.2	Prøveudtagning og analyser afsluttet
MA5.4	Semi-kvantitativ bestemmelse af fosfortab ved brinkerosion udført
MB1.1	Nødvendige data identificeret og analysemetode fastlagt
MB3.1	Data etableret og klar til analyse
MB3.2	Dataanalyse og risikoanalyse afsluttet
MB3.3	Input til rapport afsluttet

Produkter

PA1.1	Landsdækkende kort over risiko for fosfortab ved erosion med usikkerhedsanalyse (GIS)
PA2.2	Landsdækkende kort over fosforbindingskapacitet med kendt usikkerhed (GIS)
PA2.3	Opdateret viden om fosforakkumulering og -nedvaskning i danske jorde
PA2.4	En valideret fosforudvaskningsmodel
PA2.5	Landsdækkende kortlægning af danske marker inddelt i semi-kvantitative fosforudvaskningsklasser (GIS)
PA3.1	Model for partikelmobilisering
PA3.2	Opdateret pedotransferfunktion
PA3.3	Landsdækkende risikokortlægning af risiko for fosfortab via makroporer med usikkerhedsanalyse (GIS)
PA4.5	Landsdækkende kortlægning af risiko for fosformobilisering fra lavbundslande (GIS)
PA5.5	Landsdækkende kortlægning af risiko for fosfortab ved brinkerosion (GIS)
PB1.1	Kvantificering af andel af danske vandløb der ikke når målopfyldelse med DVPI pga. for høje koncentrationer af uorganisk fosfor
PB1.2	Validering af kritisk koncentration af uorganisk fosfor for målopfyldelse med DVPI med usikkerhedsvurdering
PB1.3	Litteraturbaseret estimat på kritisk koncentration af uorganisk fosfor for målopfyldelse med SID i små danske vandløb (<10 km ²)
PB2.3	Beskrivelse af fosfor følsomme indikatorer inkl. beregningsmetoder
PB2.4	Landsdækkende kort med værdier for de enkelte fosforindikatorer (GIS)
PB2.5	Landsdækkende kort over fosforfølsomheden i danske marine vandområder (GIS) med usikkerhedsvurdering
PB3.1	Empiriske sammenhænge mellem oplandskarakteristika og målt tilstandsvurdering i søer
PB3.2	Model for sammenhæng mellem oplandskarakteristika og tilstand i umålte søer
PB3.3	Kortlægning af målt og estimeret tilstand i søer (GIS) med usikkerhedsvurdering
PC1.1	Opdateret fosforbelastningsopgørelse (2013-2017) på 90 oplande
PC1.2	Kildeopsplnitning inklusiv usikkerhedsanalyse for 90 oplande

E E M E T M

F N T