

Tema om phosphor

I tre artikler sætter vi fokus på den globale phosphor-udfordring og nye metoder til at genindvinde phosphor fra spildevand, så det kan genbruges.

Om forfatterne



Kasper Reitzel er lektor ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet. reitzel@biology.sdu.dk



Haiyan Qu er professor mso ved Institut for Kemi-, Bio- og Miljøteknologi samt ved Chemical Engineering, Syddansk Universitet. haq@kbm.sdu.dk



Morten Lykkegaard Christensen er lektor ved Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet. mlc@bio.aau.dk



Ulla Gro Nielsen er professor ved Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, Syddansk Universitet. ugn@sdu.dk



Per Halkjær Nielsen er professor, Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet. phn@bio.aau.dk

DEN GLOBALE PHOSPHOR-UDFORDRING

Næringsstoffet phosphor er afgørende i den globale fødevarereproduktion, men mangel på phosphor truer inden for det næste århundrede. Samtidig har vi problemer med, at phosphor forurener vores vandmiljø. Derfor har vi brug for en mere holistisk tilgang til forvaltningen af det værdifulde næringsstof.

Vi har i mange år diskuteret udfordringerne ved vores høje forbrug af fossilt brændstof, da dette er en begrænset ressource, som samtidig medvirker til global opvarmning. Ligesom fossilt brændstof er der en lang række andre kritiske råstoffer, som også er i fare for at blive opbrugte. Et vigtigt råstof er klippematerialer, der indeholder grundstoffet phosphor på den kemiske form PO_4^{3-} (phosphat). Phosphat anvendes blandt andet til fremstilling af gødningsstoffer og er et essentielt næringsstof, der indgår i for eksempel knogler, cellemembraner, DNA og stofskiftet. For at kunne brødføde Jordens voksende befolkning er det derfor nødvendigt, at vi har adgang til nok phosphatgødning.

Phosphor findes primært som phosphat i forskellige mineraler og udvindes i dag fra phosphatrige bjergarter ved minedrift. Før vi mennesker begyndte at udvinde phosphat, var det globale phosphor-kredsløb lukket; mennesker og dyr spiste afgrøderne, og afføringen blev genbrugt lokalt som gødning til nye afgrøder. I dag er dette kredsløb blevet brudt, og der udvindes hvert år globalt cirka 220 mio. tons pho-



Procesanlæg i forbindelse med en phosphat-mine. Foto: Shutterstock.

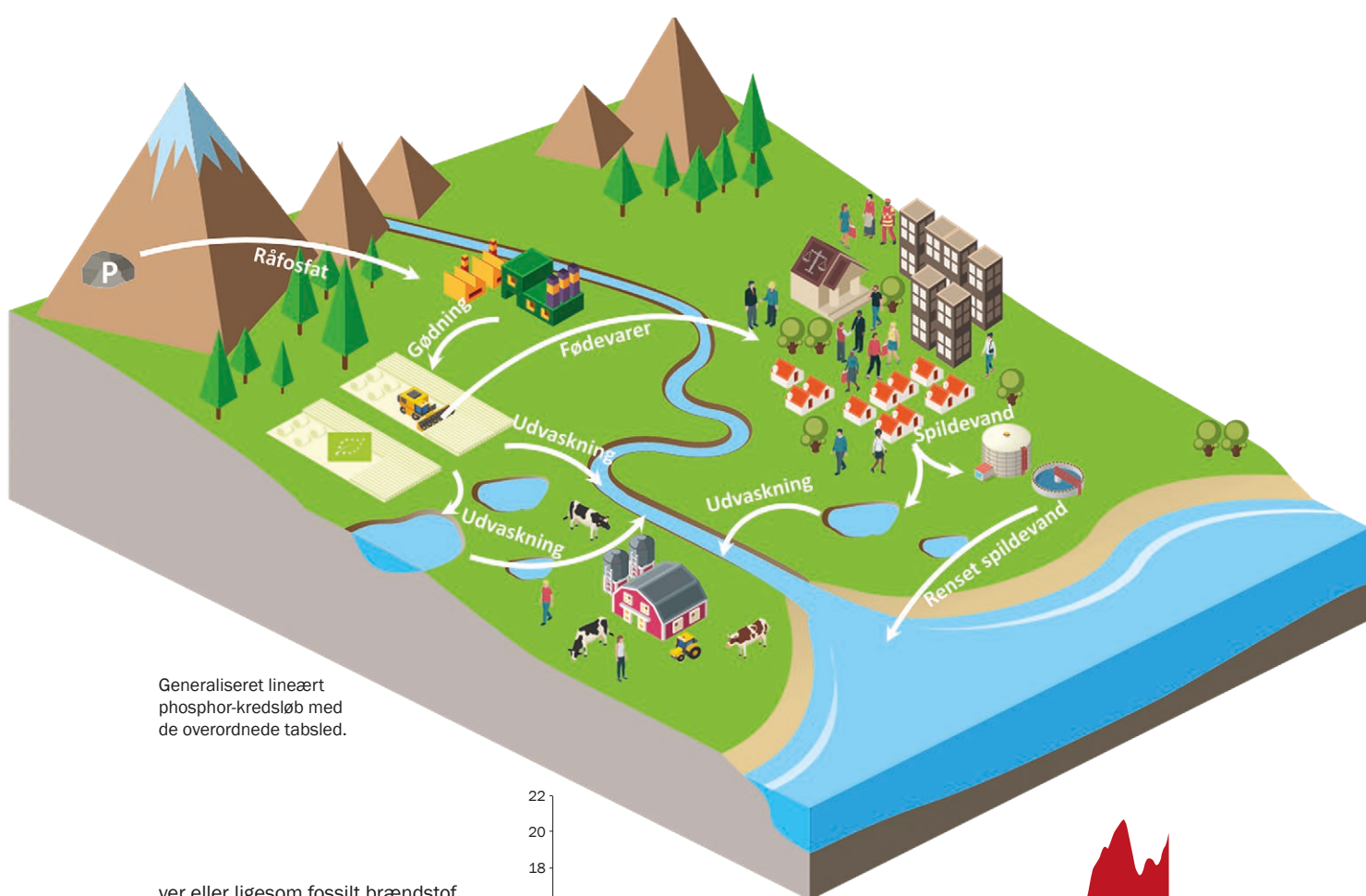
sphat fra klippemateriale til produktion af kunstgødning til landbruget.

Phosphat er både et begrænsende næringsstof og en ressource med begrænset global tilgængelighed, der forventes at blive en mangelvare om 50-100 år. Samtidig er op mod 25 % af al phosphat, der er blevet udvundet siden 1950'erne tabt fra det globale phosphor-kredsløb og ligger nu blandt andet begravet i sedimenter (især søer og kystnære områder) eller deponeret

i forskellige materialer, hvor det ikke længere er tilgængeligt for planterne.

En kompleks udfordring

De enorme samfundsmæssige udfordringer med phosphor har desværre ikke tiltrukket samme opmærksomhed hos den almene befolkning som udfordringerne med nitrogen og fossilt brændstof. Dette til trods for, at phosphor ikke ligesom nitrogen kan fikseres fra luften eller erstattes med andre alternati-

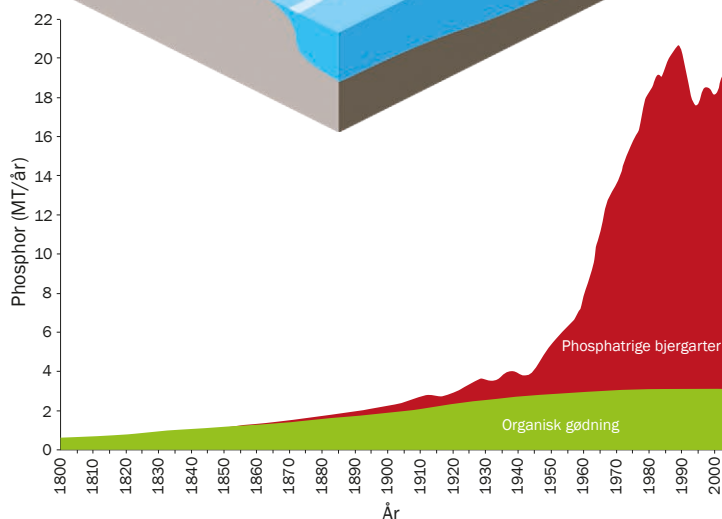


Generaliseret lineært phosphor-kredsløb med de overordnede tabsled.

ver eller ligesom fossilt brændstof kan erstattes med for eksempel sol- eller vindenergi. I øjeblikket er der et uholdbart overforbrug af jordens phosphor-reserver. Kombineret med forringet vandkvalitet og ulige global adgang til fosfat-gødning har det ført til udtrykket “Den Globale Phosphorudfordring”, hvor de vigtigste elementer er følgende:

1) Tilgængeligheden af phosphor fra de phosphatrige bjergarter, der bruges til at producere landbrugets kunstgødning, forventes at blive reduceret kraftigt indenfor de næste årtier. Disse bjergarter findes primært i Marokko, Rusland, Kina og USA, der tilsammen kontrollerer 85 % af de globale phosphor-reserver. Denne geografisk ulige fordeling er en vigtig fremtidig geopolitisk udfordring for den globale fødevarer-sikkerhed og for bekæmpelse af fattigdom. Dette ses blandt andet ved, at phosphor har været på EU's liste over kritiske råstoffer siden 2014.

2) Overgødning af landbrugsjord samt utilstrækkelig behandling af spildevand og regnvandsbetingede overløb forårsager udvaskning af fosfat til søer og kystområder, hvor det medfører algeopblomstring.



Den overordnede udvikling i kilder til phosphor-gødning gennem tiden. Organisk gødning er helt overvejende gødning fra husdyr eller biomasse, mens en lille del udgøres af menneskegødning og guano. Efter Cordell et al: *Global Environmental Change* 19 (2009).





Udvaskning af næringsstoffer som fx fosfat kan give miljøproblemer.
Foto: Colourbox.

ger, tab af biodiversitet og i nogle egne forurening af drikke- og badevand på grund af giftige alger.

3) Vores nuværende samfundsmodel er baseret på en lineær tankegang, hvor vi producerer, forbruger, smider ud, og producerer på ny. Vi overudnytter således en begrænset ressource til fødevarerproduktion og opbygger samtidig store mængder fosfor i landbrugsjorden, hvorfra det kan udvaskes til vandmiljøet. Mange affaldsprodukter med et højt indhold af fosfor deponeres og gøres utilgængelige for fødevarerproduktionen. For eksempel anvendes fosfat i flyveaske i cementproduktionen. Herved afkobles det fra fosfor-kredsløbet, og fremtidige generationers adgang til fosfor bliver begrænset, samtidig med at fosfor udvaskes til, og forurener, vandmiljøet. En cirkulær tilgang, hvor fosfor genanvendes og fosfor-spild minimeres, er derfor essentiel for at sikre den fremtidige adgang til denne

ressource.

4) Forvaltningen af fosfor er fragmenteret mellem forskellige sektorer – fra landbrugssektoren, hvor fosfat-baseret gødning er en værdifuld ressource, til affaldssektoren, hvor fosfat er et forurenende stof, der skal fjernes, til miljøsektoren, hvor fosfat er hovedårsagen til, at vores vandmiljø ikke lever op til EU's vandrammedirektiv, der dikterer, at vores overfladevand og grundvand skal have en god økologisk tilstand (dvs. kun afvige lidt fra den oprindelige, upåvirkede tilstand).

Den globale fosfor-udfordring er ikke blot karakteriseret ved, at nogle lande har utilstrækkelig adgang til fosfat, mens andre har store miljøproblemer forårsaget af udvasket fosfat. Den globale fosfor-udfordring er et komplekst samspil mellem biogeo-kemiske processer i naturen, industripartnere og statslige sektorer, der opererer på mange forskellige niveauer. Betydningen af dette illustreres yderligere ved, at fosfor-problematikken adresserer hele 11 af FN's 17 verdensmål. Det kræver derfor en holistisk nytænkning og nye samarbejder på tværs af de forskellige sektorer at løse fosfor-udfordringerne og sikre et bæredygtigt fosfor-kredsløb.

Mangel på ansvarsdeling

På nuværende tidspunkt har ingen offentlig institution taget ansvaret for at forvalte de globale fosfor-ressourcer. I de tilfælde, hvor der findes lovgivning, har denne ofte tendens til kun at fokusere på ét aspekt af den globale fosfor-udfordring og ikke alle aspekter af en cirkulær anvendelse af fosfor eller fremtidige behov for at understøtte en ligelig og retfærdig adgang til de globale fosfor-ressourcer. Et eksempel er EU's vandrammedirektiv, der pålægger medlemsstaterne at bringe vandområderne til en god økologisk status, men ikke fokuserer på genbrug af den fosfor, der skal fjernes fra vandområderne. Vand-

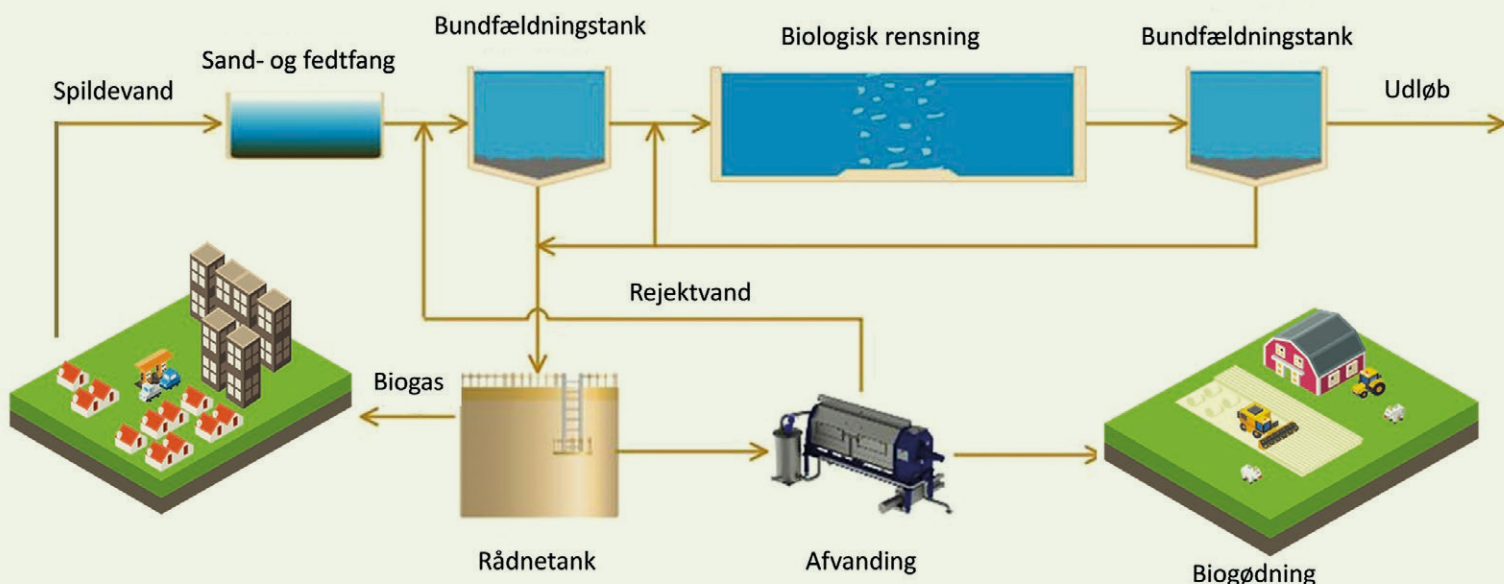
rammedirektivet burde således også tage højde for en fremtidig øget efterspørgsel på fosfor til fødevarerproduktion og ikke blot fokusere på den økologiske kvalitet af vandmiljøet. I en stadig mere urbaniseret verden, hvor befolkningstallet forventes at stige dramatisk i de kommende årtier, kan fosfor derfor ikke blot betragtes som et nationalt landbrugs- eller lokalt miljøspørgsmål. Det er derfor vigtigt, at vi på verdensplan samarbejder om en plan, der sikrer den nødvendige omstrukturering af globale og lokale fødevarer- og affaldshåndteringssystemer, samtidig med at der sikres adgang til fosfor og et rent vandmiljø.

Vejen frem

For at sikre en stabil fødevarerproduktion og skabe et lukket og bæredygtigt fosfor-kredsløb, skal de forskellige akademiske, industrielle og offentlige aktører (for eksempel biologer, kemikere, ingeniører, landmænd, forvaltere og politikere) samarbejde på tværs af de involverede sektorer for at tilvejebringe den nødvendige ekspertise. Men dette sker desværre sjældent. Og en vigtig grund er manglen på en holistisk og tværfaglig viden blandt de personer, der arbejder med fosfor. Der er derfor behov for at uddanne eksperter, der kan samarbejde på tværs af forskellige sektorer. Et godt eksempel er miljømedarbejdere, der i dag kun skal sørge for at fjerne fosfor fra vores søer ved primært at binde fosfat i søsedimenterne. Fremadrettet skal disse tænke cirkulært og så vidt muligt opsamle fosfat, så det kan blive genbrugt og igen indgå i landbrugets fødevarerproduktion.

Den globale fosfor-udfordring er et unikt eksempel på, hvorledes tværfaglighed skal bruges til at løse store globale udfordringer. Og den viser, hvor vigtigt det er at kombinere biologi, kemi og samfundsvidenskab i undervisningen, så de studerende ikke kun undervises i de naturvidenskabelige fag, men også lærer hvorledes ændringer i





Overordnet flow i et typisk dansk renselanlæg med biologisk rensning.

politik og generel samfundsoplysning kan medføre udvikling af nye teknologier.

Phosphor i et europæisk perspektiv

For at illustrere mulighederne for at sikre en bæredygtig anvendelse af phosphor, kan vi tage udgangspunkt i de Europæiske medlemslandes forbrug.

Et studie fra 2016 viser, at EU i 2005 importerede 95 % af sit phosphor, hvilket svarer til knap 240.000 tons. Halvdelen blev akkumuleret i landbrugsjord, mens den anden halvdel endte i affald. I affaldet kom 54 % af al phosphor fra indtagelse af fødevarer og 55 % af dette endte i husholdningsspildevand. Madspild stod for 27 % af phosphor-tabet i affaldet, mens afføring fra kæledyr udgjorde 11 %. Men også selve fødevarerproduktionen er en vigtig kilde til phosphor-tab, hvor slagteraffald udgjorde 28 %. Derudover findes der mindre tab fra forskellige andre processer som plante- og dyreproduktionen samt fra processer, der ikke er relateret til fødevarerproduktionen. Ovenstående tal viser således, at EU er yderst afhængig af importeret phosphor, men samtidig også, at der er et stort potentiale for

at reducere denne afhængighed ved at mindske phosphor-tabene fra fødevarerproduktionen samt øge genanvendelsen af phosphor i vores affald. Derfor har der i de seneste år været et stort fokus på genanvendelse af phosphor fra især spildevand.

ReCoverP-projektet

Spildevand indeholder phosphor, og faktisk svarer mængden af phosphor i spildevand (4.600 tons/år) til 20-25 % af den mængde phosphor, der hvert år importeres til Danmark i form af kunstgødning. I dag udbringes cirka 3.000 tons phosphor fra slammet på landbrugsjord, svarende til 73 % af den maksimale udnyttelse. Den danske målsætning er, at 80 % af phosphor i slammet skal genanvendes. Spildevandet behandles på renselanlæg, der er et godt eksempel på et system, hvor forskellige videnskabelige discipliner kan samarbejde med industrielle operatører. Renselanlæg modtager samfundets spildevand, der renses og ledes tilbage til naturen. I renselanlæg anvendes både biologiske og kemiske metoder til at fjerne phosphor fra spildevandet.

Mange danske renselanlæg anvender i større eller mindre udstrækning biologisk phosphorfjernelse,

hvor specifikke bakterier optager phosphat og indbygger den i biomassen som polyphosphater. Phosphor kan også fjernes kemisk ved at tilsætte jern(III)-ioner, hvorved phosphat bindes til jern(oxy)hydroxider eller udfældes som jernphosphater. Under rensprocessen omdannes organisk stof i spildevandet til mikrobiel biomasse, mens uorganiske forbindelser udfældes, blandt andet som jernphosphater. Denne blanding af bakterier, organiske og uorganiske forbindelser kaldes efter afvanding for "slam".

Slammet kan benyttes direkte som gødning på marker, men anvendes oftest først til at producere biogas i rådnethet, hvorved der kan dannes både elektricitet og varme. Ved denne proces nedbrydes meget af det organiske stof i slammet under dannelsen af methan (største del af biogas), og efter slamafvanding opnås en fast slamfraktion, som typisk indeholder 25-50 g P/kg tørstof, hvis anlægget benytter biologisk rensning. Samtidig med biogasproduktionen frigives en del phosphat fra slammet, som efter filtrering ledes tilbage til renselanlægget (kaldet rejektvand), hvor det igen optages af bakterier eller bindes til jern. Rensprocessen

Se også artiklen *Genindvinding af phosphat fra spildevand* side 21) samt artiklen *Bakterier fjerner phosphat fra spildevand* side 26).

Videre læsning:

van Dijk, K.C., Lesschen, J.P. and Oenema, O. (2016) Phosphorus flows and balances of the European Union Member States. *Science of the Total Environment* 542, 1078-1093.

ReCoverP: www.en.bio.aau.dk/recoverp/

<http://phosphorus-futures.net/the-phosphorus-challenge/the-story-of-phosphorus-8-reasons-why-we-need-to-rethink-the-management-of-phosphorus-resources-in-the-global-food-system/>

<https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2019/06/978-87-7038-083-6.pdf>



Her tester vi plantetilgængeligheden af phosphor i slam.
Foto: Kasper Reitzel



sikrer en lav koncentration af phosphor (typisk $<0,2 \text{ mg P/l}$) i det rensede spildevand og en slamfraktion rig på phosphor.

Denne slam kan tilføres markerne som et gødningsprodukt, men hvis koncentrationerne af tungmetaller er for høje er dette forbudt. I nogle lande, som Tyskland og Schweiz er det forbudt at bruge ubehandlet

spildevandsslam som gødning, fordi man er bekymret for sygdomsfremkaldende bakterier og uønskede miljøfremmede stoffer. I Tyskland har man i 2017 vedtaget ny lovgivning med krav om udvinding af phosphor fra al slam, der indeholder mere end 2 % phosphor i tørstoffet. Dette skal ske indenfor de næste 15 år, og kravene gælder for alle anlæg med en kapacitet over

50.000 personækvivalenter og skal sikre, at phosphor genindvindes. Derfor arbejder man mange steder med at udvikle nye metoder til at genindvinde phosphor.

I projektet RecoverP, som er støttet af Innovationsfonden og en række forsyninger og rådgivere, har vi gennem de seneste 4 år fokuseret på at øge genindvindingen af phosphor fra spildevandsslam ved at finde alternativer til den direkte udledning af slam på markerne. Vi har udviklet metoder til karakterisering af phosphor-forbindelserne i slammet, hvilket blandt andet har påvist store mængder polyphosphater i det aktive slam samt jernphosphater i det afvandede slam. Vi har også identificeret og karakteriseret de vigtigste phosphat-akkumulerende bakterier, som er ansvarlige for den biologiske spildevandsrensning, og har derudover testet og udviklet forskellige teknologier til at genindvinde phosphor fra rejektvandet, der vil muliggøre en genanvendelse af phosphor på en renere form end i spildevandsslam. ■

Study Mathematical Bioscience

Roskilde University offers a unique integrated master's programme for students with a deep interest in mathematics and biology.

Specialize in mathematical modeling of health and disease developments, ecology, or mathematical methods.

→ **Mathematical Bioscience**

ruc.dk/en/master/programmes



RUC