

Kemisk sørestaurering 2: Fysiske sidegevinster og ulemper

I mange danske søer vil overskuddet af fosfor i søbunden kunne bindes kemisk med aluminium eller Phoslock. Disse kemiske teknikker er lovende metoder til sørestaurering, men når de overføres fra laboratoriet til fuldskalaforsøg, får de fysiske forhold i vandmasserne pludselig stor betydning. Vi præsenterer her, hvor forskelligt de to produkter opfører sig under og efter udsynkning til sedimentet og diskuterer, hvad det betyder for deres anvendelighed.

MOGENS R. FLINDT
SARA EGEMOSE
KASPER REITZEL
HENNING S. JENSEN
FREDE Ø. ANDERSEN

Som beskrevet i /1/ (dette nummer) er der ikke mange danske søer, som alene ved en reduktion i den eksterne fosforbelastning kan opfylde vandrammedirektivets mål i 2015 /2/. Der er derfor stor interesse for produkter, som kan binde overskuddet af fosfor i sedimentet. Aluminium (Al) og Phoslock (et lanthanberiget bentonitprodukt) har denne egenskab om end Phoslocks virkning ikke er så veldokumenteret som Al's /1/. En ting, som dog sjældent har været undersøgt for nogen af produkterne, er, hvordan de påvirker sedimenternes fysiske egenskaber /3/. På basis af danske og udenlandske undersøgelser /4/, /5/ kan det sandsynliggøres, at Al transporteres fra vindpåvirkede områder til akkumulationsområder og derfor tabes bindingskapaciteten i de vindeksponerede områder af søerne. Dette betyder, at den Al-flok, som dannes efter udbringningen, er følsom overfor bølgebevægelser og strømninger. Da de fleste danske eutrofe søer er lavvandede og derved ofte udsat for vindinduceret resuspension, har vi fundet det vigtigt at undersøge produkternes opførsel under perioder med vindpåvirkning. Vi har sammenlignet erosionsegenskaber og sedimentationsrater på sedimenter behandlet med enten Al, Phoslock /1/ eller en blanding af Al og bentonit (Al+bentonit). Blandingen af Al og bentonit blev brugt for at simulere

Phoslocks fysiske og kemiske egenskaber, dog med brug af Al i stedet for lanthan /1/, da denne blanding er et billigt alternativ til Phoslock.

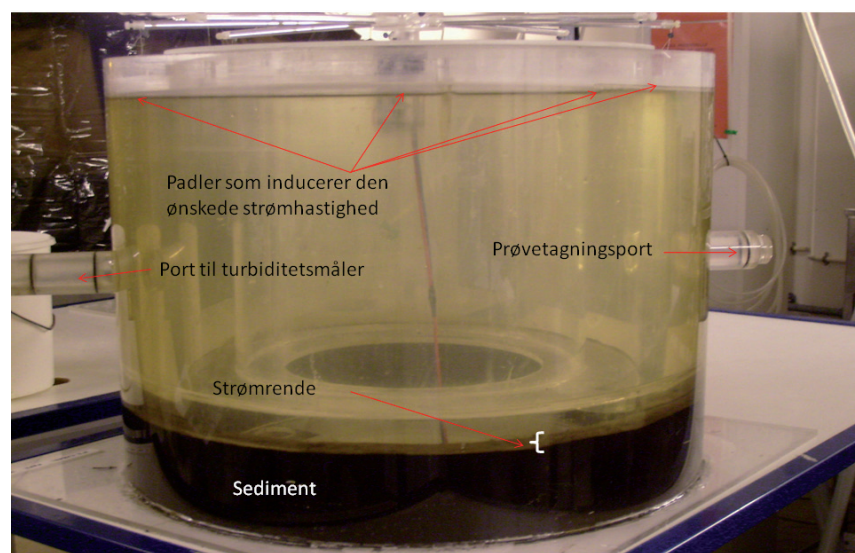
Da indholdet af organisk stof i sedimentet er steget i mange eutrofe søer, er forankringskapaciteten for rodfæstede planter blevet forringet i forhold til søernes oprindelige tilstand. Vi kan derfor i fremtidige restaureringsinitiativer blive nødt til at inkludere en stabilisering af bundforholdene for at de rodfæstede planter kan reetableres succesfuldt. Vi har derfor også undersøgt produkternes evne til at konsolidere de mudrede sedimenter, hvorved forankringskapaciteten forbedres.

Fire restaureringstrængende jyske søer indgik i undersøgelsen, se tabel 1. Hostrup Sø var i første halvdel af 1900-tallet en af Dan-

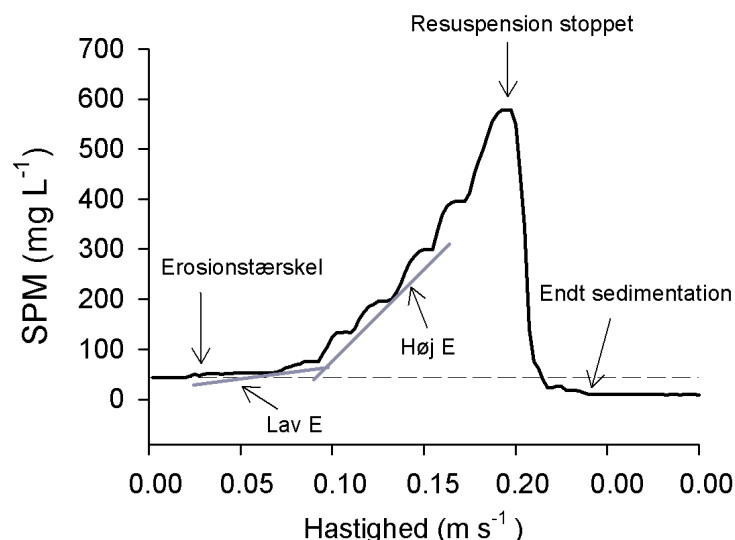
marks største lobelia-søer, men pga. eutrofiering er grundkudsplanterne i dag væk, bortset fra spredte strandbo-planter. Der har længe eksisteret et regionalt ønske om at restaurere denne sø. Vedsted Sø har også en skrantende bevoksning af grundkudsplanter. Søen fungerer som badesø og har gennem en årrække været behandlet med iltning af bundvandet. Den er efterfølgende blevet Al-behandlet. Søbygård Sø er en meget eutrofieret og lavvandet sø, der modtager sin belastning fra et stort landbrugsopland med mange kilder. Nordborg Sø blev i efteråret 2006 behandlet med Al, samtidig med at den eksterne P tilførsel blev reduceret med ca. 40 %.

Laboratorieforsøg

I dette studie undersøgte vi eroderbarheden af Phoslock, Al og Al+bentonit i forhold til naturligt sediment. Vi benyttede fem strømrender som vist på figur 1. De er 50 cm i diameter, 40 cm høje og har en aktiv strømrørende på 4,5 cm bredde svarende til et areal på 0,06 m² (svarer til arealet af ca. 30 sedimentkerner). De rummer et sedimentlag på ca. 10 cm og 17 liter søvand. Et motorstyret roterende låg med padler skaber strømbevægelsen. Der er to udtag placeret ca. 8 cm over sedimentoverfladen. Det ene huser en turbiditetsmåler (Seapoint®), som via



Figur 1. Billede af strømrende brugt i laboratorieforsøgene.



Figur 2. Forløbet af et repræsentativt resuspensionseksperiment med tilført aluminium. Erosionstærskelværdien blev defineret som den første signifikante stigning i turbiditet. Erosionsraten blev beregnet som koncentrationsstigningen mellem to strømhastighedsstep. Ved 0.20 m s⁻¹ blev motoren stoppet og sedimentation blev logget. SPM = suspenderet partikulært materiale.

et interface til PC logger koncentrationen af suspenderede partikler (SPM) med 1 Hz. Eksperimenterne startede med at homogeniseret overfladesediment blev fyldt i strømrønden, hvorefter der forsigtigt blev fyldt søvand på. Herefter stod sedimentet i mørke og konsoliderede i en uge ved 14 °C. Herefter blev der gennemført et resuspensionseksperiment. Dernæst blev produkterne tilført vandsøjlen, så det simulerede en sørestaurering med en dosering beregnet på basis af størrelsen af sedimentets mobile P pulje (Al: 40 g m⁻², Phoslock: 2500 g m⁻², Ben: 2500 g m⁻²) /6/. Under eksperimenterne blev sedimentet udsat for stigende strømhastigheder i step på 10 min fra 0 cm s⁻¹ til der opstod resuspension,

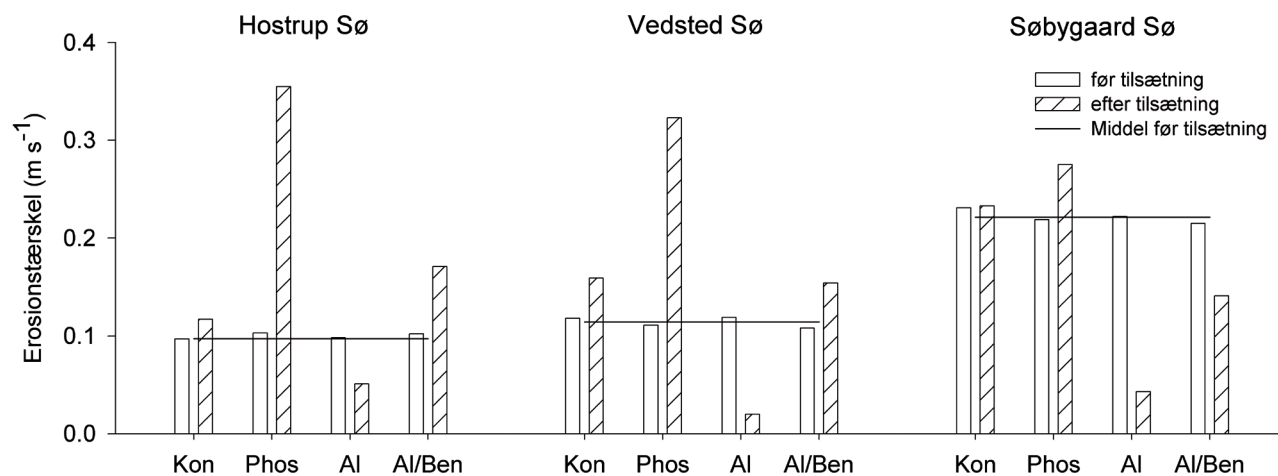
hvorved erosionstærskelværdien kunne bestemmes. Strømhastigheden blev herefter yderligere øget med nogle step, hvorved erosionsraterne kunne beregnes /7/. Herefter blev motoren stoppet, mens turbiditeten fortsat blev logget, således at sedimentationen kunne registreres. I alle eksperimenterne blev turbiditeten kalibreret overfor vandprøver.

Figur 2 vises som eksempel på et af Al-eksperimenterne. Her starter resuspensionen allerede ved 0,02 m s⁻¹ med en lav erosionsrate, men ved højere strømhastighed stiger erosionen. Sedimentationsraten er meget høj og slutkoncentrationen af suspenderet partikulært materiale (SPM) er lavere end startkoncentrationen, hvilket indikerer, at Al-flok-

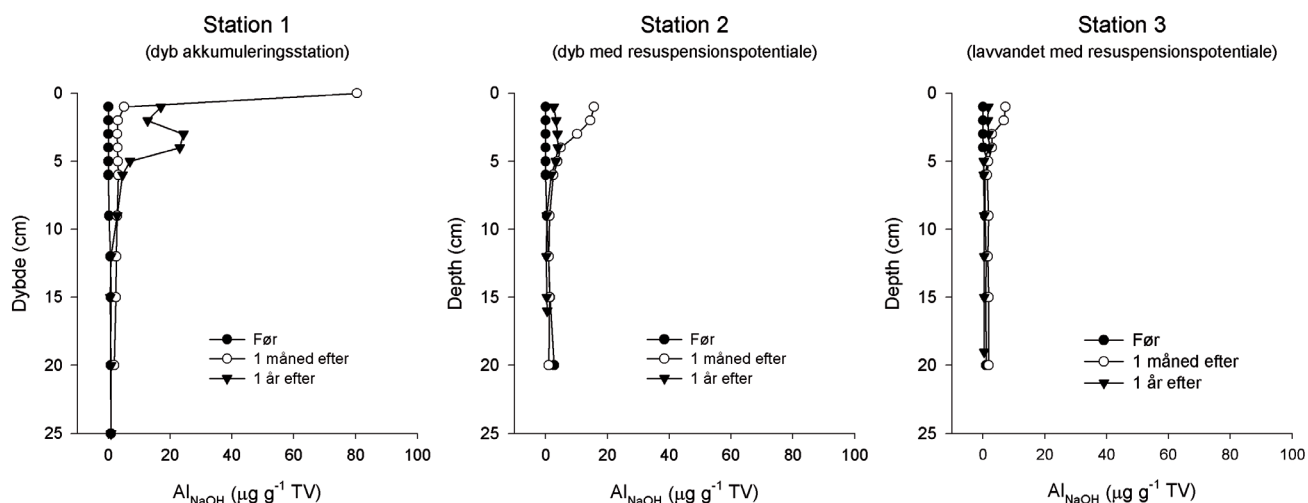
ken trækker partikler med ned på bunden under sedimentationsfasen. Resultatet af eksperimenterne for alle produkter og kontroller er vist i figur 3.

Som det ses ændrer tærskelværdien for erosion sig ikke nævneværdigt med tiden i de ubehandlede sedimenter (Kontrol). Tærskelværdien i Hostrup Sø, Vedsted Sø og Søbygaard Sø ligger på henholdsvis ca. 0,10 m s⁻¹, 0,14 m s⁻¹ og 0,22 m s⁻¹. Dette mønster svarer fint til basisparametrene i tabel 1, hvor vandindholdet og densiteten indikerer, at sedimentet i Hostrup Sø og Vedsted Sø er meget mudret, mens den uorganiske fraktion i Søbygaard Sø er højere. Endvidere er komstørrelsen i Søbygaard Sø betydeligt mindre og densiteten højere end i de andre søer, hvilket medfører, at sedimentet kræver en større energitilførsel for at resuspendere. Når Phoslock (Phos) tilsættes stiger tærskelværdien for resuspension med op til 3 gange i forhold til det naturlige sediment. Phoslock vil altså holde på sedimentet og reducere antallet af resuspensionshændelser. Tilsættes Al-flok reduceres tærskelværdien til mellem 0,02-0,05 m s⁻¹, hvilket er 2-5 gange lavere end tærskelværdien for det naturlige sediment, og det betyder, at nydannet Al-flok resuspenderes betydeligt lettere end det naturlige sediment.

Hvert eksperiment blev afsluttet med at måle sedimentationsforløbet, hvilket matematisk kan beskrives som et eksponentielt aftagende forløb, se fig. 1. Sedimentationsraterne på de naturlige sedimenter varierer mellem 60 og 65 cm t⁻¹. Ved behandling med Al øges sedimentationsraten til 125-250 cm t⁻¹, mens behandling med Phoslock og Al+bentonit resulterer i henholdsvis 4-10 cm t⁻¹ og 25-53 cm t⁻¹. Så ved tilsætning af Al påvirkes lysforholdene positivt, idet produktet sedimenterer hurtigere end de naturlige sedimenter fra



Figur 3. Erosionstærskelværdien (m s⁻¹) for resuspensionseksperimenterne i søerne før og efter behandling. Middel før tilsætning er gennemsnittet af alle kontroller i de respektive søer før tilsætning af produkterne (n=4). Ved hvert eksperiment blev en strømrønde bibeholdt som kontrol uden tilsætning. Den skraverede kontrol er således målt efter 14 dage, samtidig med at de øvrige strømrønder blev behandlet.



Figur 4. Aluminiumkoncentrationen i sedimentet, ekstraheret med NaOH, på tre stationer i Nordborg Sø, før udbringning, 1 måned efter og 1 år efter udbringningen.

søerne, mens Phoslock og Al+bentonit sedimenterer langsommere.

Hvis produkterne resuspenderes efter udlægningen, er der risiko for, at de mister kontakten med det sediment, der skal P-immobiliseres. Resultaterne viser, at Al-flokken er meget mobil i perioden efter udbringning. Et andet resuspensionsstudium, hvor Al-flokken fik lov at ældes, viste, at den fik samme resuspensionsegenskaber som overfladesedimentet efter to måneder /3/. Men med de danske vejrforhold er risikoen for resuspension og horisontal transport stor, uanset hvilken tid på året man udbringer Al (se nedenstående). Omvendt er Phoslocks erosionstærskel så høj, at der skal voldsomme meteorologiske begivenheder til før denne resuspenderes.

Betydning i søerne

For økologisk at perspektivere resultaterne fra forsøgene med strømrænder, har vi undersøgt strømforholdene i de 3 søer samt i Nordborg Sø, hvor Al har været anvendt. Ved at kombinere de målte erosionstærskelværdier, se fig. 3, med feltstudier af strømforholdene lige over bunden ved moderate vindforhold ($5-8 \text{ m s}^{-1}$) får man et indblik i, hvor ofte nydannet Al-flok kan blive resuspenderet. Strømhastighederne for alle fire søer ($5,5-8,7 \text{ cm s}^{-1}$) er vist i tabel 2. I alle søerne var strømhastighederne højere end erosionstærskelværdien for nydannet Al-flok, men lavere end den for de naturlige sediment og de andre produkter. Efterfølgende blev 4 års meteorologiske data fra områderne bearbejdet. Disse blev sorteret efter kriterierne: At middelvindhastigheden skulle være højere end $6,5 \text{ m s}^{-1}$ i mere end en time og at vindretningen skulle komme fra enten NØ-SØ eller NV-SV, hvilket ville resultere i størst

muligt fetch i Nordborg Sø, Hostrup Sø og Søbygård Sø. Vedsted Sø er så lille og ligger så vindbeskyttet, at det ikke spiller den store rolle. Behandlingen af de meteorologiske data dannede grundlag for at beregne antal dage pr. år, hvor de nyligt udbragte og sedimenterede produkter potentielt ville kunne resuspenderes. Resultatet ses i tabel 2. Noget skræmmende vil nyudbragt Al kunne resuspenderes 200 til 220 dage om året i Nordborg Sø, Hostrup Sø og Søbygård Sø, og 110 dage i Vedsted Sø. Erosionstærskelværdien for Phoslock er derimod så høj, at nyudbragt Phoslock ikke vil kunne resuspenderes hvert år, mens der er 5-12 dage pr. år, hvor nyligt udbragt Al+Bentonit potentielt kan resuspenderes.

Kombineres beregningerne i tabel 2 med udviklingen i sedimentets Al koncentration i Nordborg Sø, opnås en meget god forklaring på den observerede udbredelse af Al. I søen blev der målt Al i sedimentet før udbringningen, en måned efter og et år efter udbringningen på tre stationer, hvor resuspensionsfrekvensen stiger fra station 1 til station 3. Resultaterne ses i figur 4.

Al-hydroxid-koncentrationen på de tre sta-

tioner er ens inden udbringningen. En måned senere ses en tydelig stigning i Al-koncentrationen på alle 3 stationer; men året efter er der kun et tydeligt signal på akkumuleringsstationen, hvilket bekræfter, at Al-flokken er meget mobil i de første måneder efter udbringning. Det skal dog bemærkes, at sedimentet på alle tre stationer stadig tilbageholder fosfor 3 år efter, men sedimentanalyser, viser, at der er mindre overskud af fosforbindingskapacitet på station 2 og 3 end på station 1.

Med den beregnede resuspensionsfrekvens in mente synes det meget svært at få bragt Al-flok ud, således at den ønskede arealspecifikke dosering opnås og bibeholdes. Det kan således nævnes, at der inden for den undersøgte 4-årige meteorologiske periode ikke fandtes nogen længerevarende sammenhængende periode med vindhastigheder under $6-8 \text{ m/s}$. Dette betyder, at Al-flokken meget let vil blive transporteret til sedimentationsområderne i søerne. Al er dog ikke nødvendigvis uegnet til sørestaurering. Der vil således være søer, hvor det meste af P frigivelsen sker fra relativt afgrænsede akkumulationsområder. I sådanne tilfælde kan man nøjes med at be-

Tabel 1. Data for de fire søer og deres sediment.

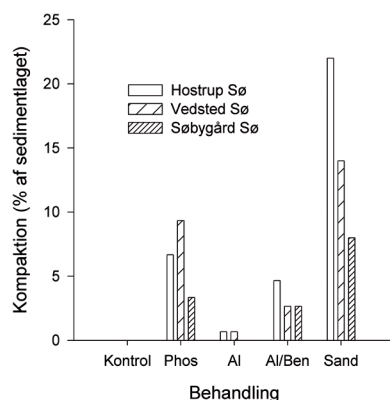
Parameter	Enhed	Hostrup	Vedsted	Søbygaard	Nordborg
Areal	ha	201	7,7	40	54,6
Max. dybde	meter	7,0	11,9	2,0	8,5
Gns. dybde	meter	2,1	5,0	1,1	5,0
Sediment tørvægt	%	8,6	20,5	16,5	7,8
Sediment glødetab	%	40,5	11,6	15,3	20,4
Sediment densitet	mg cm^{-3}	64,5	116,7	151,9	81,7
Sediment kornstørrelse	mm	0,156	0,198	0,067	---

handle disse områder eller alternativt et større søareal velvidende, at Al med tiden vil samles i akkumulationsområderne. I vindeksponerede søer kunne man også overveje at anvende aluminium sammen med et "capping" produkt som bentonit, som det har været afprøvet i New Zealand, eller Phoslock, som det har været afprøvet i Holland. Her blev aluminium dog brugt for at skabe en hurtigere bundfældning af Phoslock. Kombinationen "Al+bentonit" eroderes imidlertid også lidt for hyppigt. Vi tester i øjeblikket om sand er egnet til at lægge ovenpå Al-flokken, idet sand ligesom Phoslock sandsynligvis ikke vil kunne resuspenderes.

Vi undersøgte også produkternes evne til at konsolidere de meget mudrede sedimenter, som findes i de fleste eutrofe danske søer. Her sammenlignede vi, hvor meget kompaktion de enkelte produkter gav det mudrede sediment. Sand blev medtaget i forsøget, idet det har stor densitet og derfor forventes at kunne øge konsolideringen. Resultatet er præsenteret i figur 5. Som det ses bidrager Al-flokken ikke til ekstra konsolidering af sedimentet, hvorimod både Phoslock og specielt sand øger konsolideringen af det mudrede sediment ved at presse porevandet ud af sedimentet. Dette medfører, at sedimenternes evne til at forankre rodfæstede planter øges, hvilket i mange af disse søer er en forudsætning for, at plantesamfund kan reetableres.

Konklusion

Både Phoslock og aluminium er underlagt vejrforholdene og de fysiske forhold i en sø. Fra udenlandske undersøgelser ved vi, at det kan være et problem, at Phoslock synker så langsomt, at produktet kan nå at skylle ned i den ene ende af søen. Man kan dog sikkert finde en stille uge om sommeren, hvor Phoslock kan udbringes, hvorimod det vil være svært at opnå 2-3 måneders roligt vejr for en aluminiumbehandling, der af hensyn til søvandets pH helst skal foregå om efteråret. Alt andet lige betyder det, at Phoslock er et bedre produkt end aluminium for lavvandede, vindeksponerede søer. Der mangler dog stadig et veldokumenteret eksempel på Phoslocks langtidseffekt, før man kan give en generel anbefaling. I de tilfælde, hvor aluminium foretrækkes (f.eks. af hensyn til økonomi), kan man sandsynligvis opnå en



Figur 5. Produkternes evne til at konsolidere mudrede sedimenter fra Hostrup Sø, Vedsted Sø og Søbygård Sø.

bedre horisontal fordeling i søen, hvis udbringningen sker ad flere gange, så flokken har større chance for at blive indarbejdet i sedimentet. En tredje mulighed er at kombinere produkterne, så man udnytter deres positive egenskaber: Den hurtige udsynkning af aluminium og den stabiliserende effekt af Phoslock, når det er nået ned på bunden.

Endelig bør det også indgå i overvejelserne, om sedimenternes forankringskapacitet bør styrkes, hvilket er specielt relevant i forhold til reetablering af en rodfæstet undervandsvegetation. Er dette tilfældet kan sand bruges i kombination med begge produkter.

Villum Kann Rasmussen Fonden takkes for støtte til Center for Sørestaurering og Carlsbergfondet takkes for støtte til strømreudviklingen.

Tablet 2. Bundnærer strømmålinger og mobiliteten af naturligt sediment og nyligt udbragt Phoslock, aluminium+bentonit og aluminium. Mobiliteten er beregnet som antal dage pr. år, hvor et nyligt udbragt produkt potentielt vil kunne resuspenderes.

Parameter	Enhed	Hostrup Sø	Vedsted Sø	Søbygaard Sø	Nordborg Sø
Max. bundnær strøm	cm s ⁻¹	8,6	5,5	8,7	8,1
Sediment mobilitet	dage år ⁻¹	20	5	18	25
Phoslock mobilitet	dage år ⁻¹	0	0	0	0
Al+Ben mobilitet	dage år ⁻¹	12	5	22	17
Al mobilitet	dage år ⁻¹	200	110	220	210

Referencer

- /1/ Reitzel, K., Jensen H.S., Mortensen S., Egemose S., Flindt M. & Andersen F.Ø. 2010: Kemisk sørestaurering 1: Undersøgelse af et nyt fosfatbindende produkt. *Vand & Jord* 17: 32-34.
- /2/ Søndergaard, M., Jeppesen E., Jensen J.P. & Amsinck S.L. 2005: Water Frame directive: Ecological classification of Danish lakes. *J. Appl. Ecol.* 42: 616-629.
- /3/ Egemose, S., Wauer G. & Kleeberg A. 2009: Resuspension behaviour of aluminium treated lake sediments: effects of ageing and pH. *Hydrobiologia* 636: 203-217.
- /4/ Rydin, E., Huser B. & Welch E. B. 2000: Amount of phosphorus inactivated by alum treatments in Washington lakes. *Limnol. Oceanogr.* 45: 226-230.
- /5/ Lewandowski, J., I. Schauer, M. Hupfer, 2003: Long term effects of phosphorus precipitations with alum in hypereutrophic Lake Süßer See (Germany). *Water Res.* 37: 3194-3204.
- /6/ Reitzel K., Hansen J., Hansen K., Andersen F. Ø. & Jensen H. S. 2003: Fosforinaktivering ved kemisk sørestaurering. *Vand & Jord* 3: 109-111.
- /7/ Egemose, S., Reitzel, K., Andersen, F.Ø. & Flindt, M. 2010: Chemical Lake Restoration Products: Sediment Stability and Phosphorus Dynamics. *Environ. Sci. Technol.* 44(3): 985-991

KASPER REITZEL OG SARA EGEMOSE er post docs på Biologisk Institut, Syddansk Universitet, og arbejder med fosfors biogeokemi i søer med særligt henblik på sørestaurering.

HENNING SKOVGAARD JENSEN, MOGENS FLINDT OG FREDERIK ØSTERGAARD ANDERSEN er lektorer i økologi på Biologisk Institut, Syddansk Universitet.

Forfattervejledning for Vand & Jord

1 Aflevering

Artikler til Vand & Jord afleveres dels digitalt via e-mail eller på cd-rom og dels som papirudskrift.

Artiklen sendes til et medlem af redaktionen:

2. Artiklens omfang

Manuskripterne må ikke fylde mere end 2.000 ord (15.000 enheder medregnet mellemrum).

3. Artiklens opbygning

Indled artiklen med en kort menu på maksimalt 400 enheder. Menuen er ikke et resumé af artiklen, men en kort appetitvækkende præsentation af artiklens problemstilling og indhold. Del artiklen ind i korte afsnit, fx for hver 1500-2000 enheder, og forsyn dem med korte overskrifter.

Artiklen består derudover af følgende elementer:

- Titel – højst 40 enheder
- Menu – højst 400 enheder
- Forfatternavn(e)
- Artiklen – delt op i underafsnit
- Referencer
- Biografi
- Tabeller
- Bokse
- Tabeltekster
- Figurtekster

Figurer leveres særskilt, se nedenfor.

4. Teksten

Tidsskriftet Vand & Jord henvender sig til en stor målgruppe med forskellige faglige forudsætninger. Vores mål er, at så mange som muligt skal have udbytte af bladets indhold. Artiklerne skal skrives på et let og indbydende dansk. Her er et par gode råd og anvisninger

for artikler til Vand & Jord:

- Skriv korte sætninger.
- Brug generelt danske ord i stedet for fremmedord.
- Forklar svære ord, begreber og specielle forkortelser første gang, de forekommer i teksten. Man kan evt. forklare begreber o.l. i en boks, der markeres i layoutet.
- Begræns brugen af matematiske udtryk. Saml artiklens større formler o.l. i bokse. Formlerne skrives med fortløbende numre og placeres i en eller flere bokse.
- Måleenheder skal være enkle – brug fx mg/l i stedet for potenser. Anvendes der præciserende tal i brødtekst, skal de skrives med tal og ikke bogstaver, dvs. 1, 2, 3 m.v.
- Del ikke teksten op med for mange pinde eller punkter. Er det nødvendigt at rømme punkter op, kan de evt. flyttes til en boks.
- Brug kun ordinær skrift i teksten. Marker på papirudskriften, hvor man ønsker speciel typografi anvendt (fx kursivering af artsnavne).

5. Figurer, tabeller og bokse

Figur-, tabel- og boks-tekster skrives ind i filen med tydelig markering af, hvad det er.

Figurer skal afleveres som særskilte figurfiler af typen Illustrator, Photoshop, .pdf, .eps, .tiff, .pict, .gif, .jpg i 300 dpi v/ 1:1. Figurer kan også afleveres i papirudgave på særskilte ark som rentegnede tegninger i overstørrelse.

Husk at figurer bliver tilpasset spaltestørrelsen som 1- eller 2-spaltede (meget sjældent 3-spaltede). Nedfotograferingen betyder, at man skal sikre sig, at tal, bogstaver og streger er så tydelige, at de kan klare nedfotograferingen. Fremsendte figurer, som må omtegnes, forsinker artiklernes publicering.

Marker på papirudskriften, hvor de enkelte figurer ønskes placeret. I teksten henvises der

til dem med: se fig. 1, se tab. 2, se boks 3 osv. Fotos kan leveres som papir (højglans) eller dias. Desuden kan digitale fotos modtages som Photoshop, .eps, .jpg m.v. i min. 300 dpi v/ 1:1.

Digitale udgaver af figurer og fotos modtages kun på cd-rom.

6. Referencer

Brug kun de mest nødvendige referencer, og hold antallet under 10. Er der særlige grunde til flere, aftales dette med redaktionen. Henvis i teksten til referencen med respektive nummer mellem skråstreger inden for punktum. Eksempel:

/1/ Hansen, V. H. og Jensen, K. 1993: Bundplanterne i Vejle Fjord. Vand & Miljø 10, 405-409.

7. Biografi

Efter artiklen placeres en forfatterbiografi med tilhørssted (max. 200 enheder). Anfør adresse og e-mail i biografien.

8. Korte indlæg

Debatindlæg, boganmeldelser, orientering om kongresser o.l. er velkomne. De bør ikke overstige 1500 enheder, og redaktionen forbeholder sig ret til forkortelser.

9. Ophavsrettigheder til artiklen

Selskabet Vand & Jord arbejder for at formidle viden om miljøforhold. Forfattere kan kun få en artikel optaget i tidsskriftet Vand & Jord, såfremt de accepterer, at artiklen kan gøres alment tilgængeligt på Internettet efter beslutning truffet af Selskabet Vand & Jord.