

2016

geoviden

GEOLOGI OG GEOGRAFI NR. 04

The cover image depicts a field research site in a wetland or coastal area. Three individuals, two men and one woman, are wearing waders and working in the water. The woman on the left is holding a sample bottle. The man in the center is holding a long vertical pole with a white cap, likely a water level marker. The man on the right is also holding a similar pole and a yellow device. Several other white poles are visible in the water. The background shows a dense forest of evergreen trees under a blue sky with light clouds. The foreground is filled with green vegetation and reeds.

SØFORKLARINGER

INTRODUKTION

Dette års julenummer af Geviden indeholder historier om sammenhængen mellem grundvand, søer og biologiske forhold. Der tages udgangspunkt i de tre jyske søer Hampen Sø, Væng Sø og Tvorup Hul. Hampen Sø er påvirket af næringsstof, der udvaskes til søen fra omkringliggende marker med konventionel landbrugsdrift via grundvandet. Tvorup Hul menes at være blevet en brunvandet sø, da oplandet er blevet stærkt påvirket af syrerregn og dermed opbygning af en stor humuspulje, som nu udvaskes til søen, mens Vængsø er belastet af fosforholdige geologiske aflejringer i søens omgivelser, der over en tidsskala på tusinder af år udvaskes til søen. Søerne er derfor påvirket af menneske- og naturskabte forhold. Væng Sø karakteriseres som en naturlig eutrof sø, som der ikke findes så mange af i Danmark. For alle tre søer har det vist sig, at de biologiske forhold i søerne er betinget af forhold, der sker i oplandet og det omgivende grundvand. For Hampen Sø og Tvorup Hul er der gode chancer for, at den gode økologiske tilstand kan genoprettes over en relativ kort tid ved simple omlægninger af arealanvendelsen i nærområdet til søerne. I Hampen Sø ved at omlægge driften af nærliggende landbrugsarealer til skovdrift og ved Tvorup Hul ved i søens nærområde at omlægge klitplantagen til en mere hede-lignende naturtype. Omvendt kan en god økologisk tilstand i Væng Sø nok kun opretholdes, hvis søen i al tid fremover biomanipuleres ved periodevis opfangning af fredfisk. Problemstillingerne er derfor komplekse og betinger et samarbejde på tværs af discipliner som geologi, hydrologi og biologi. 

Et fiberoptisk kabel (Distributed Temperature Sensing, DTS) er ved at blive monteret på bunden af Væng Sø til måling af grundvandsindsivningen. Læs nærmere herom på side 5, 6 og 12.

Foto: Forfatterne.

KOBLINGEN MELLEM LANDSKAB, GRUNDVAND OG SØER

Søernes placering i landskabet, den omgivende geologi og klimatiske forhold betinger i fællesskab, hvilken vandbalance, der kommer til at gælde for den enkelte sø. Søerne kan groft inddeles i tre hovedgrupper: grundvandsdominerede søer, vandløbsdominerede søer og klimadominerede søer. Erfaringerne fra CLEAR-projektet (boks nedenfor) viser, at det er lettere at bestemme indsivning af grundvand til søer end udsivning af søvand til grundvandsmagasinerne, da udsivningszonen ofte er begrænset til et mindre areal af søens bund. Ydermere, er det mere krævende, at bestemme grundvandsbidraget i et leret opland end i et sandet opland.

Grundvandets betydning

Ved et første kig ud over vandoverfladen af en dansk sø kan man få indtryk af, at vandstanden i søen udelukkende er betinget af nedbør, fordampning og hvad der ellers må løbe til og fra søen via overfladiske tilløb og udløb. Grundvandets betydning i den sammenhæng har hidtil været relativt ukendt, da grundvandets kredsløb sker i det skjulte og er vanskeligt at kvantificere. Senere års studier har imidlertid givet ny viden, som afslører, at ikke alene den omkringliggende geologi, men også en søs placering i landskabet er afgørende for, hvor stor en udveksling der sker af søens vand under vandoverfladen med et evt. omgivende grundvandsmagasin.

Grundvandsindsivningen til søerne kan have stor betydning for både vand- og stofbalancen i søerne (næringsstof og kulstof) og dermed for deres økologiske tilstand, som igen har betydning for planter og dyr. Restaurering af søer med kemiske og biologiske metoder har vist sig at være ret effektiv de første år efter opstart, men desværre har den forbedrede økologiske tilstand i mange tilfælde ikke kunnet bibeholdes på lidt længere sigt. I mange tilfælde skyldes det, at søerne modtager alt for meget nærings- eller kulstof fra det omgivende opland.

Studierne viser, at søernes vandbalance er påvirket af deres placering i landskabet. En sø, der ligger højt i landskabet og langt fra havet, vil ofte have et lille opland, der resulterer i lave grundvandsflukse (fluks står for strøm-

ning gennem et givet areal pr. tidsenhed). Den netto-nedbør (dvs. nedbør minus fordampning), der falder på det mindre opland, og som ender i søen via grundvandet, giver ikke anledning til et stort grundvandsbidrag. Om bidraget fra grundvandet er betydningsfuldt for vandbalancen, afhænger også af søens overfladeareal, dvs. hvor meget vand søen modtager/tabter via nedbør/fordampning. Omvendt vil søer, der ligger lavere i landskabet (nærmere havet), ofte have større oplande, hvor grundvandsbidraget kan være ganske betydeligt.

Sammenhængen kan også beskrives ved, at jo højere søen ligger over havet, desto tættere på hovedgrundvandsskellet ligger den

samtidig, hvorfor både opland og grundvandsfluks bliver mindre. Et eksempel herpå er Hampen sø, der er beskrevet på s. 7-11. Tilsvarende: Jo lavere søen ligger i, desto længere væk fra hovedgrundvandsskellet og desto større opland og grundvandsflukse knytter der sig til søen. Væng Sø er et eksempel herpå, se s. 12-14. Figuren på side 12 viser denne sammenhæng.

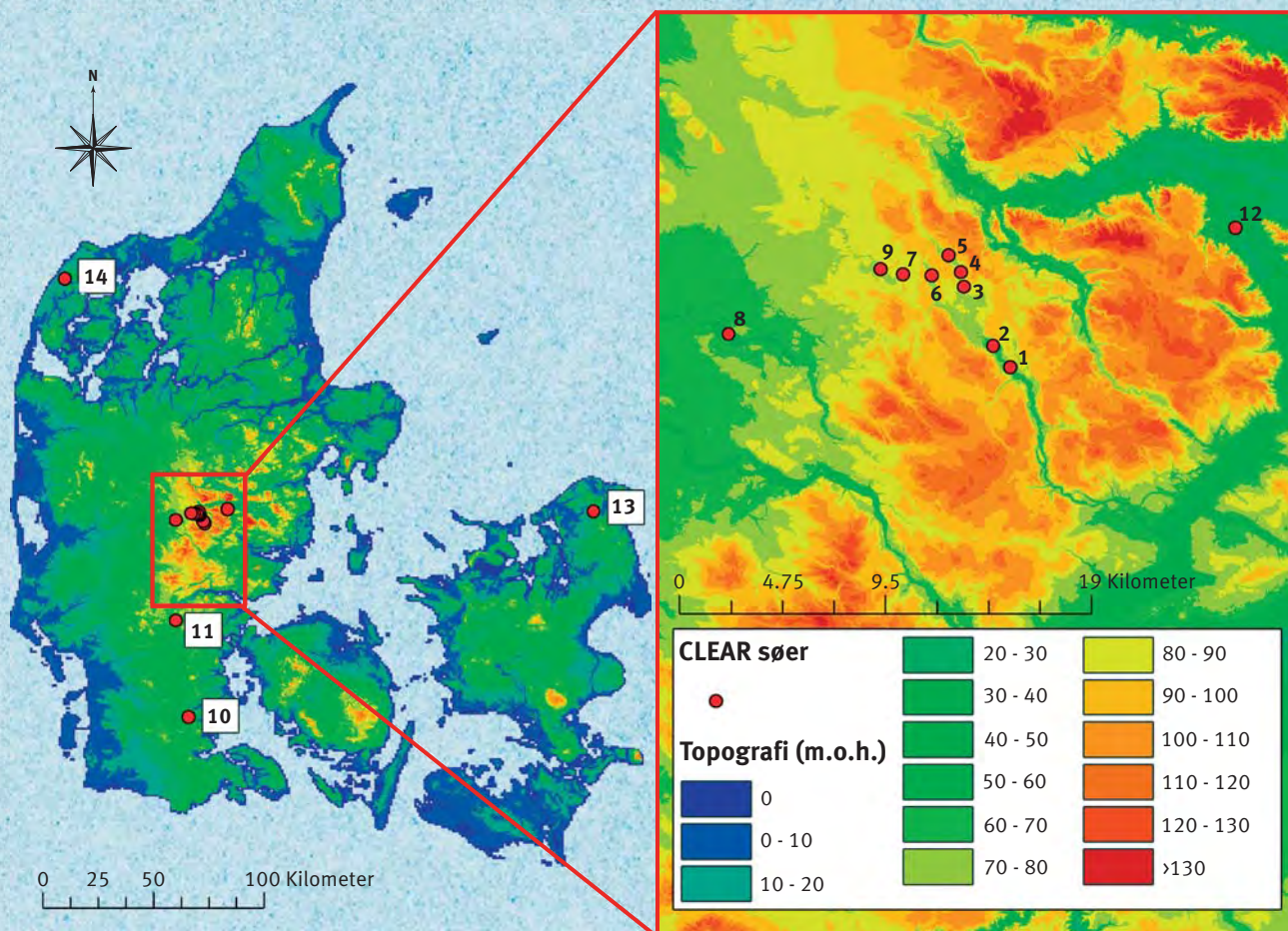
Værkstedssøernes vandbalance

I forbindelse med CLEAR-projektet (se boksen nedenfor) er vandbalancen for 14 værkstedssøer blevet undersøgt, se figur øverst s. 4.

Vandbalancerne er fundet på forskellig vis, men hovedsagelig enten ved målinger/data og/eller via grundvandsmodellering. De forskellige bidrag til vandbalancen er nærmere forklaret i figuren øverst s. 5. Den procentvise fordeling i ind-budgettet er vist i den øverste trekant og ud-budgettet i den nederste trekant, se figuren nederst s. 4.

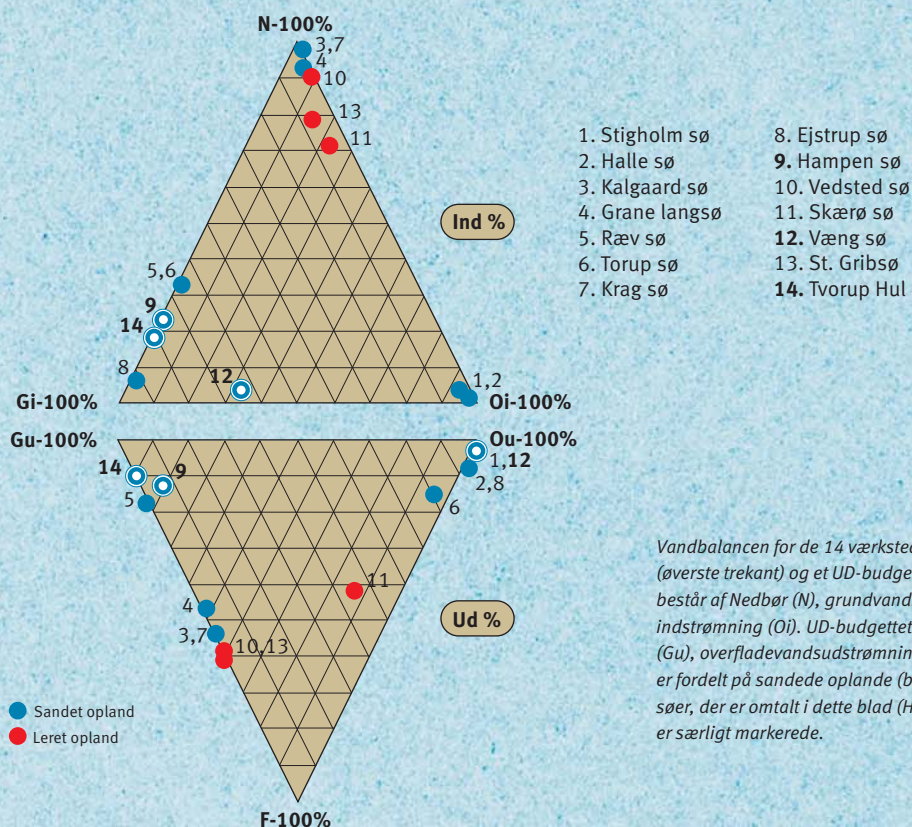
CLEAR – Center for Sørestaurering

Efter ti års bevilling fra Villum Kann Rasmussen Fonden er Center for Sørestaurering ved at nå sin afslutning i foråret 2017. Formålet med centrets arbejde har været at etablere ny viden om, hvordan man kan bringe de meget næringsrige og uklare søer til en mere klarvandet tilstand og hvorledes de mere næringsfattige lobeliesøer kan sikres mod yderligere forringelse. Endelig har der i centrets forskning været fokus på at få en større viden om hvorledes grundvand, søer og biologi er koblet. Det er det sidstnævnte formål, som er centrum for dette nummer af Geoviden. CLEAR-projektets aktiviteter er så vidt muligt blevet koncentreret om et antal såkaldte værkstedssøer, hvor biologiske og hydrogeologiske forhold er undersøgt indgående. Noget af den ny viden, der er kommet ud af CLEAR-projektet, har været anvendt i egentlige sørestaureringstiltag i udvalgte værkstedssøer. Centeret har været ledet af Biologisk Institut på Syddansk Universitet og har desuden haft deltagelse fra Aarhus Universitet (DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi), Københavns Universitet ved Ferskvandsbiologisk Laboratorium og Institut for Geoviden og Naturforvaltning, samt De Nationale Geologiske Undersøgelser fra Danmark og Grønland (GEUS).



Værkstedssøernes placering og højdemæssige forhold. Hampen Sø er nr. 9, Væng Sø nr. 12 og Tvorup Hul nr. 14.

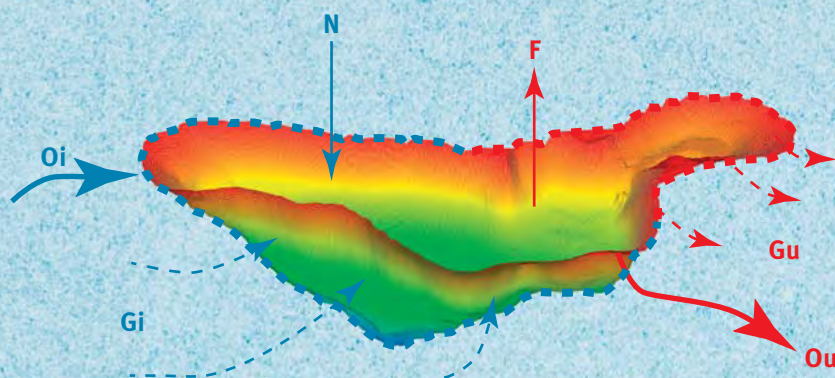
Kilde: Fra Vand og Jord, 2016.



Vandbalancen for de 14 værkstedssøer opgjort som et IND-budget (øverste trekant) og et UD-budget (nederste trekant). IND-budgettet består af Nedbør (N), grundvandsindsivning (Gi) og overfladevandsindstrømning (Oi). UD-budgettet består af grundvandsudstrømning (Gu), overfladevandsudstrømning (Ou) og Fordampning (F). Søerne er fordelt på sandede oplande (blå) og lerede oplande (røde). De tre søer, der er omtalt i dette blad (Hampen Sø, Væng Sø og Tvorup Hul), er særligt markerede.

Kilde: Fra Vand og Jord, 2016.

Vandbalance



Vandbalancen for en sø er bestemt af følgende led: Grundvand ind i søen (Gi), Nedbør (N) og Overfladisk indløb (Oi) via vandløb, grøft eller kildevæld på søbredden som tilsammen er den mængde vand, der tilføres søen. Grundvand ud af søen fra sider eller bund (Gu), potentiel Fordampning (F), og en Overfladisk afstrømning (Ou) via grøft eller naturligt vandløb. Det er bunden (bathymetrien) af Hampen Sø, der er benyttet som eksempel.

Kilde: Modificeret fra Kidmose, 2010.

Sø, samt i lerede oplande: Vedsted Sø, Skærsø og Store Gribssø. Ind-budgettet til disse søer er styret af nedbør og overfladisk tilstrømning (Oi), mens ud-budgettet er præget af potentiel fordampning og resten taber søen via søbunden til grundvandsmagasinet. Data indikerer at Skærsø og Vedsted Sø begge taber vand til grundvandsmagasinet via 'geologiske vinduer' i søbunden. Med andre ord er det søernes placering i landskabet, den omgivende geologi og de klimatiske forhold, der i fællesskab betinger, hvordan vandbalancen kommer til at se ud for den enkelte sø.

Metoder

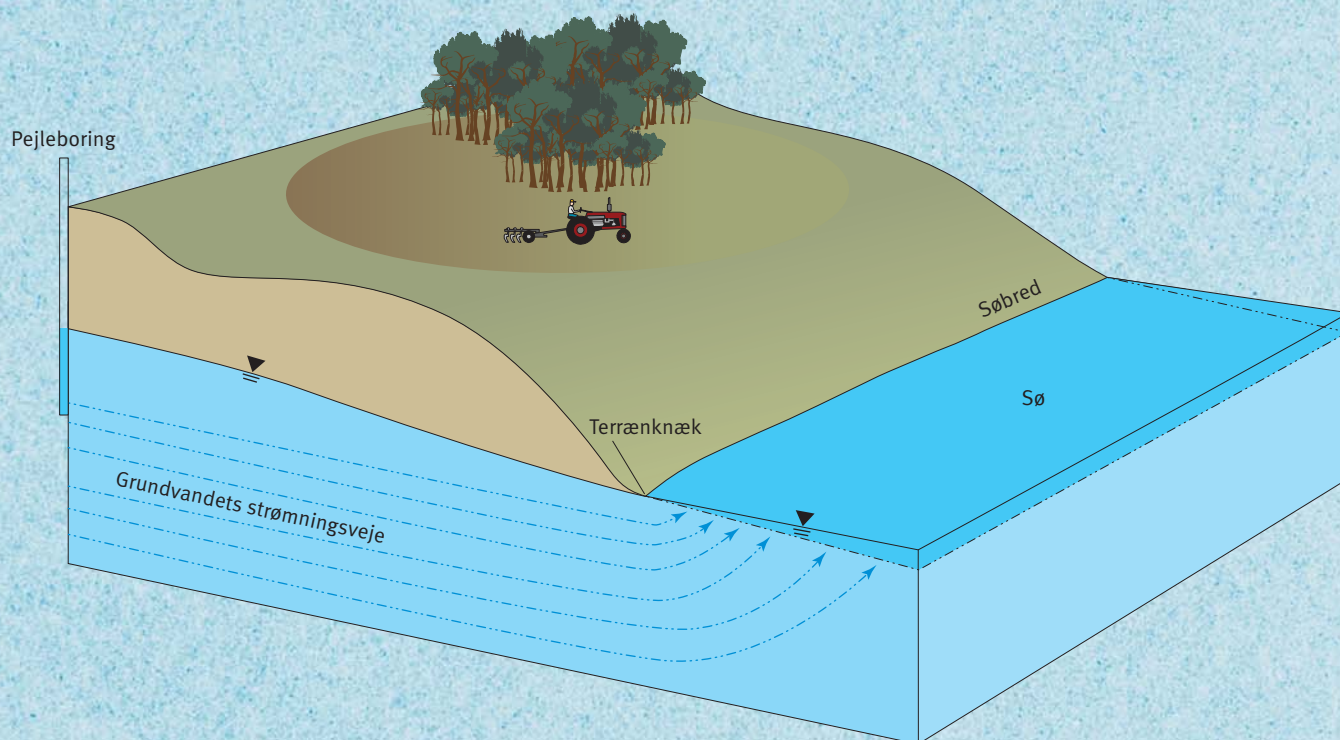
Grundvandsbidraget kan bestemmes med en række metoder. Ofte sker den dominerende ind-/udstrømning af grundvand nær søbredden, hvilket er meget belejligt, da målinger således er relativt nemme at udføre, se figuren nedenfor og på s. 6. De oftest anvendte metoder til bestemmelse af grundvandsudvekslingen mellem grundvand og søer er følgende metoder:

- Seepagemeter-metoden ved anvendelse af en overskåren olietønde

Søerne kan groft inddeles i tre hovedgrupper: grundvandsdominerede søer, vandløbsdominerede søer og klimadominerede søer. De to første grupper omfatter udelukkende søer i sandede oplande, mens de klima-dominerede søer (nedbør og fordampning) findes i både sandede og lerede oplande.

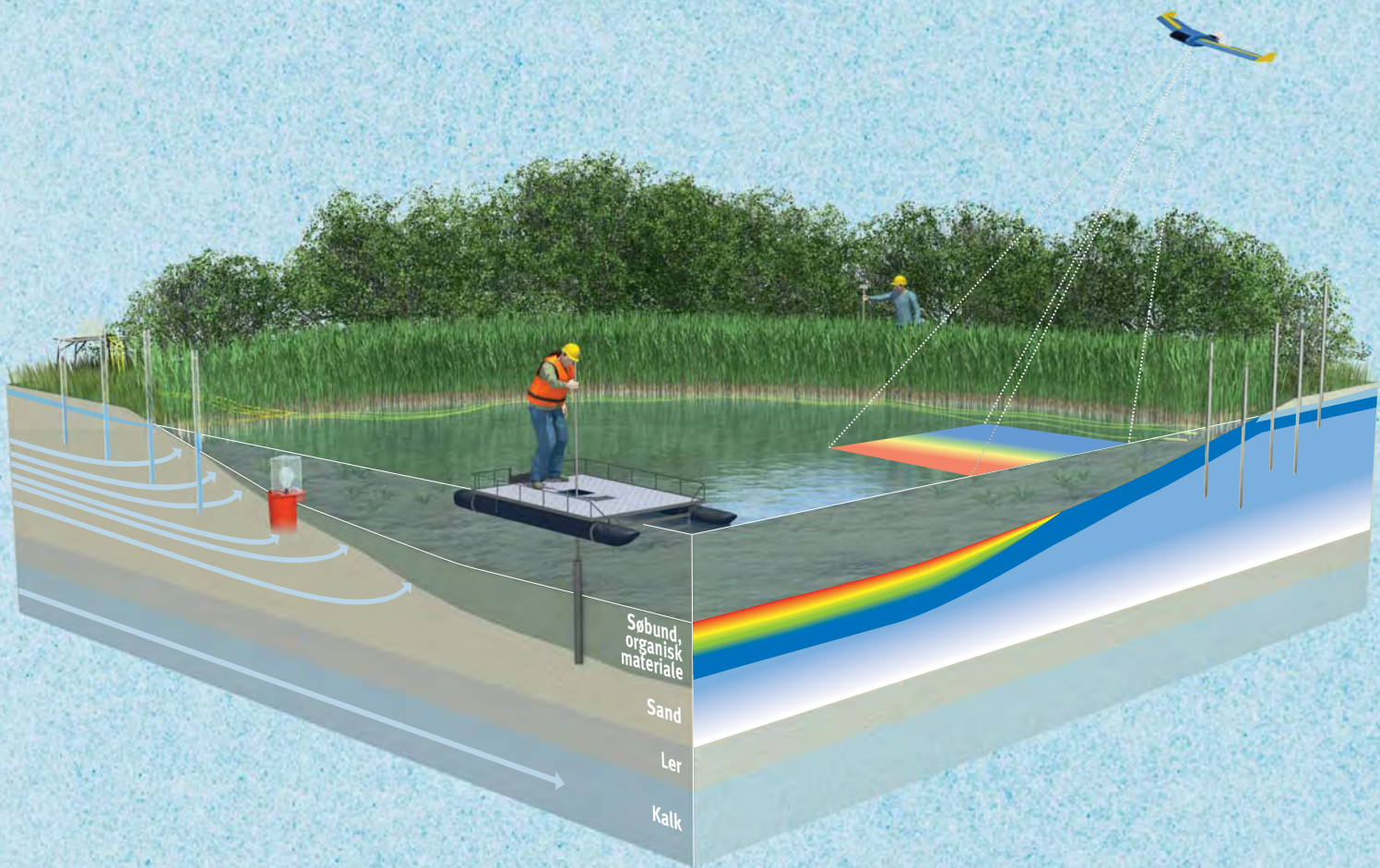
De rent grundvandsdominerede søer omfatter Tvørup Hul, Ræv Sø og Hampen sø og de

rent vandløbsdominerede søer er Stigholm Sø og Halle Sø. Dertil kommer en kombination af disse to grupper, der omfatter Torup Sø, Ejstrup Sø og Væng Sø, der alle karakteriseres ved en stor grundvandsindstrømning (Gi) og en stor overfladisk udstrømning (Ou). Den tredje gruppe af søer, som er præget af klimatiske forhold, omfatter søer i et sandt opland: Kalgaard Sø, Grane Langsø og Krag



Typiske indstrømningsforhold af grundvand til en søbund. Ofte vil indstrømningen til søbunden ske nær søens bredder.

Illustration: Annabeth Andersen, GEUS.
Kilde: Modificeret fra USGS, 2008.



Principskitse af de mest almindeligt brugte målemetoder til bestemmelse af grundvandsindsivning til en sø. Søen ligger i en lavning i et landskab af sand og ler på et kalklag, og selve søbunden er dækket af organisk materiale. Fra en tømmerflåde forankret i søens bund udtages prøver af jordlagene under søen med en kerneprøvetager ('russerbor'). Langs bredden ligger nogle gule kabler (DTS-kabler), som måler temperatur, og som er forbundet til en PC til venstre i billedet. Vinkelret på søens bred er installeret vandstandsør i rækker, så grundvandets tilstrømning og vandtrykket under søen kan måles. Til venstre ses et seepage-meter (rød tønde med pose) til måling af indstrømmende grundvand. Over søen svæver en drone med infrarødt kamera, der tager digitale billeder af temperaturen på søbunden. Om sommeren er søens vand varmere end det indsvivende grundvands temperatur (typisk 8 °C). Røde farver svarer til søvandets temperatur og blå farver til grundvandets temperatur som vist til højre i figuren. Temperaturfordelingen viser en typisk sommersituation.

Illustration: Stefan Sølberg, GEUS.

- Temperatur-metoden ved anvendelse af temperatur-spyd
- Fiberoptisk kabel (DTS) (se også foto s. 2), eller
- Termografiudstyr på droner
- Darcy-metoden, der gør brug af borer og hydraulisk ledningsevne af geologien, og
- Isotop-metoden, der er baseret på målinger af indholdet af stabile ilt-isotoper ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$).

Udvalgte metoder fra ovenstående liste er illustreret i figuren ovenfor.

CLEAR-projektet har i udstrakt grad benyttet en 'multi-tracer'-metode, hvor naturlige trace-re som temperatur og vands stabile isotoper sammen med parametre for vandkvalitet (fx nitrat/fosfor) bruges til at kortlægge hvor, hvornår og hvor meget vand siver ind/ud, samt hvor det kommer fra. Metoderne med temperatur og vands stabile isotoper udnyt-ter, at der er en kontrast mellem grundvand

og søen, fx er temperaturen af dansk grund-vand ca. 8 °C, hvor søen om sommeren eller vinteren er henholdsvis ca. 20 og 2 °C. For-dampning fra søen vil give et større indhold af de tunge ilt-isotoper i søen (^{18}O , der ikke for-damper så let som ^{16}O) end i grundvandet, som så også kan udnyttes til at udpege ind-/udsvivningsområder. Da de anvendte måle-metoder alle repræsenterer et meget begræn-set område ved søen, er det nødvendigt at op-stille en grundvandsmodel, der kan knytte de lokale målinger sammen til et regionalt bille-de af udvekslingen af grundvand og søvand.

Erfaringer

Erfaringerne fra CLEAR-projektet viser, at søer-ne groft kan inddeles i tre hovedtyper: grund-vandsdominerede søer, vandløbsdominerede søer og klimadominerede søer. De to første grupper omfatter udelukkende søer i sandede oplande, mens de klima-dominerede søer (ned-bør og fordampning) findes i både sandede og

lerede oplande. Undersøgelserne ved værk-stedssøerne viser, at det er lettere at bestem-me indsvivning af grundvand til søer end udsviv-ning af søvand til grundvandsmagasinerne, da udsvivningszonen ofte er begrænset til et mindre areal af søens bund. Udfordringen be-står i at lokalisere udsvivningszonen – det kan sammenlignes med 'at finde en nål i en hø-stak'. Hvis man er så heldig at lokalisere ud-svivningszonen, er det til gengæld forholdsvist enkelt at måle selve fluksen.

Udenlandske undersøgelser har lignende erfaringer. Ydermere, er det mere krævende at bestemme grundvandsbidraget i et leret op-land end i et sandet opland. Dette skyldes, at de geologiske forhold i et sandet opland over-ordnet set er mere homogene og dermed min-dre komplicerede end i et leret opland, hvor primært sandlinser/-lag styrer grundvandets strømning til søernes bund.



Peter Engesgaard
Professor, IGN
pe@ign.ku.dk

Frede Østergaard Andersen
Lektor, Biologisk Institut, SDU
foa@biologi.sdu.dk

Ole Pedersen
Lektor, Ferskvandsbiologisk lab., Bio-KU
opedersen@bio.ku.dk

Jacob B. Kidmose
Seniorforsker, GEUS
jbki@geus.dk

Bertel Nilsson
Seniorforsker, GEUS
bn@geus.dk

HAMPEN SØ – ER DANMARKS FJERDE STØRSTE LOBELIESØ TRUET AF FORURENING MED NÆRINGSSTOFFER?

Hampen Sø er Danmarks fjerdestørste lobeliesø (boks s. 8). Op igennem 1970'erne til midt-90'erne blev søen mere alkalisk. Disse ændringer kunne være forårsaget af en stigende tilførsel af næringsstoffer fra et nærliggende landbrug. Resultatet har også været en mindre klarvandet sø og et skift i plante-økosystemet. Grundvandets rolle har været stort set ukendt, men undersøgelser har nu vist, at søen er grundvandsdomineret. Søens økologiske tilstand er derfor også styret af arealanvendelsen i oplandet.



Hampen Sø og kort over grundvandsstanden målt i april 2008. Søens vandstand var 79,21 m.o.h. Det jyske vandskel er vist med stiplede linje. Hampen Sø modtager grundvand fra syd, øst og nordøst. Søen siver ud til grundvand mod vest. Ved den nordøstlige søbred ses en gård med landbrugsarealer lige ned til søen. Området markeret med en firkant vises i figuren på s. 10.

Kilde: Forfatterne.

BOKS SØTYPER

Skematiske tværsnit af søer med forskellig eutrofieringsgrad.

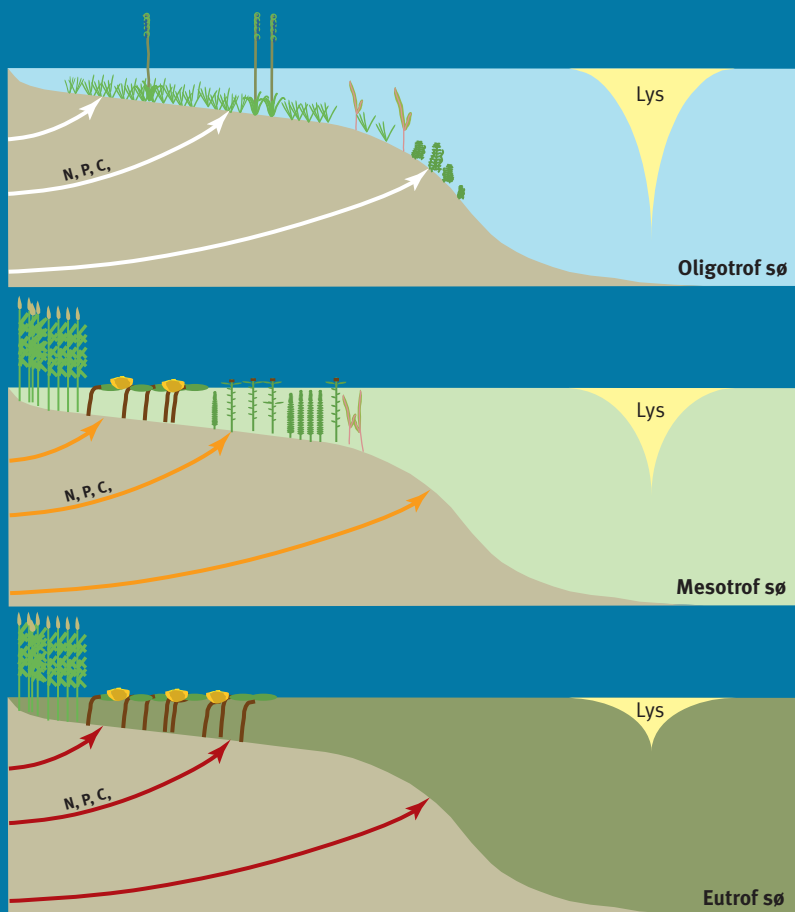
Den *oligotrofe sø*, eller *lobeliesøen*, er næringsfattig og har kun lidt planteplankton. Vandet er derfor klart og lyset når ned til søbunden, hvor især de små rosetplanter (fx tvepibet lobelie, som har givet navn til søtypen) kan vokse.

Den *mesotrofe sø* er en medium-næringsrig sø, hvor der er lys nok til store undervandsplanter med lange skud (fx vandpest). Rosetplanter trives ikke i denne søtype pga. skygning fra planktonet og fra store vandplanter.

Den *eutrofe sø* er næringsrig og har derfor meget planteplankton, som hæmmer lysets nedtrængning i vandet. Derfor er der for lidt lys til undervandsplanterne på søbunden. Sumpplanter (fx tagrør) og flydebladsplanter (fx gul åkande), som har bladene oppe i lyset, vokser dog fint i denne søtype.

De omvendte gule kegler angiver, hvor langt ned i søvandet lyset trænger.

Pilene viser grundvandsindstrømning med Nitrogen (N), Fosfor (P) og organisk materiale (C).



Baggrund

Hampen Sø ligger i Midtjylland lige vest for den jyske højderyg. Søen er 76 ha stor og er dermed Danmarks fjerdestørste lobeliesø, se boksen ovenfor og figur s. 7. Søen er sandsynligvis dannet som et dødishul efter isen smel-

tede tilbage og består af to bassiner: 'Lillesø' mod vest, som er op til 2,5 meter dyb og 'Storesø' mod øst, som er op til 13 meter dyb.

Geologien i området består øverst af kvartære sand- og lerlag efterfulgt af Miocæne ler- og sandlag. Søens opland består af skov (62 %

og landbrug (30 %), og søen har kun ganske få og små overfladetilløb. I søens vestende findes et mindre afløb, hvor der dog ikke altid løber vand. I ældre rapporter om søen har man antaget, at der forekom ind- og udsivning af grundvand, men uden at der var direkte estimater på grundvandets ind- og udstrømning og dets betydning for søens næringssaltbalance. Figuren på s. 7 viser et kort over grundvandsstanden (april, 2008) i det øverste kvartære sandlag, der er i direkte kontakt med søen. Det jyske vandskel går lige øst for søen. Overskudsnedbør, der falder øst og vest for denne linje, hører til henholdsvis Gudenå og Skjern Å systemet. I april 2008 var vandstanden i søen 79.21 meter (m.o.h.). Sydøst, øst og nordøst for søen står grundvandet højere end søens vandspejl og grundvandet strømmer derfor til søen. Indstrømningen kan måles direkte ved brug af et 'seepagemeter', se figur s. 6 og foto s. 9. I indstrømningsområderne indsiver der typisk 5–50 liter grundvand per døgn per m² søbund. Vest for søen står grundvandet lavere end søens vandspejl og søens vand strømmer derfor ud i grundvandet. Hampen Sø er med andre ord en gennemstrømningssø. Vandbalancen for søen viser, at grundvandet udgør ca. 2/3 af det vand, der løber til søen og modtager 3/4 af det vand, der løber ud af søen. Ved den nordøstlige side af søen dyrkes markerne stort set lige ned til søbredden. Udsivning af fx nitrat til søen er derfor en potentiel næringsstofkilde til søen.

Rosetplanter

Søen er især kendt for sin artsrigdom af undervandsplanter, hvor der i 2007 blev registreret 24 arter. Blandt disse finder vi rosetplanterne: tvepibet lobelie, strandbo og sortgrøn brasenføde (se foto s. 9), som er karakteristiske for de sjældne næringsfattige søer (se boks til venstre). Disse planter har korte, stive blade i en roset (normalt kortere end 15 cm) og kan vokse i tætte måtter på søbunden. De kan ikke strække sig op mod lyset ved vandoverfladen, som de såkaldte langskudsplanter (fx vandaksarter) kan. For at få tilstrækkeligt lys gror rosetplanterne på lavt vand – ud/ned til ca. 4 meters dybde – og de tåler derfor ikke eutrofiering, hvor alger gør vandet uklart. Rosetplanterne har ofte en stor rodbiomasse, som er en tilpasning til at gro i næringsfattige søer, hvor koncentrationen af næringssalte er meget højere i sedimentet end i søvandet. Koncentrationen af uorganisk kulstof er også lavt i søvandet i de næringsfattige



C



A

A. Tvepibet lobelie (*Lobelia dortmanna*) og liden siv (*Juncus bulbosus*) på blød bund. Tvepibet lobelie har givet navn til gruppen af blødvandede og næringsfattige søer. I Danmark er der ca. 90 lokaliteter med Tvepibet lobelie, men langt de fleste er små – mere eller mindre permanente vandsamlinger i Nationalpark Thy og kun 10 af vores lobeliesøer er større end 10 ha., heriblandt Hampen Sø.

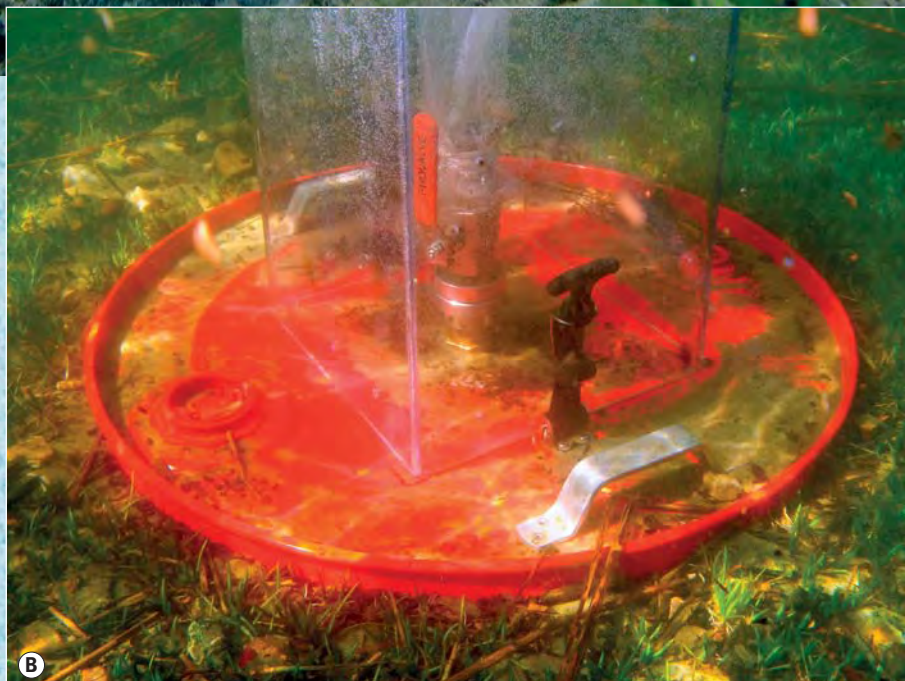
Foto: Ole Pedersen.

B. Et standard seepagemeter til måling af indstrømmende (eller udstrømmende) grundvand i Hampen Sø. Her er seepagemeteret placeret på relativt lavt vand, hvor der er store sammenhængende bestande af strandbo (*Littorella uniflora*).

Foto: Ole Pedersen.

C. Sedimentkerne der viser rodzone med strandbo (*Littorella uniflora*). Måtten af planter kan påvirke, hvor let/svært grundvandet strømmer gennem rodzonen.

Foto: Peter Engesgaard.



B



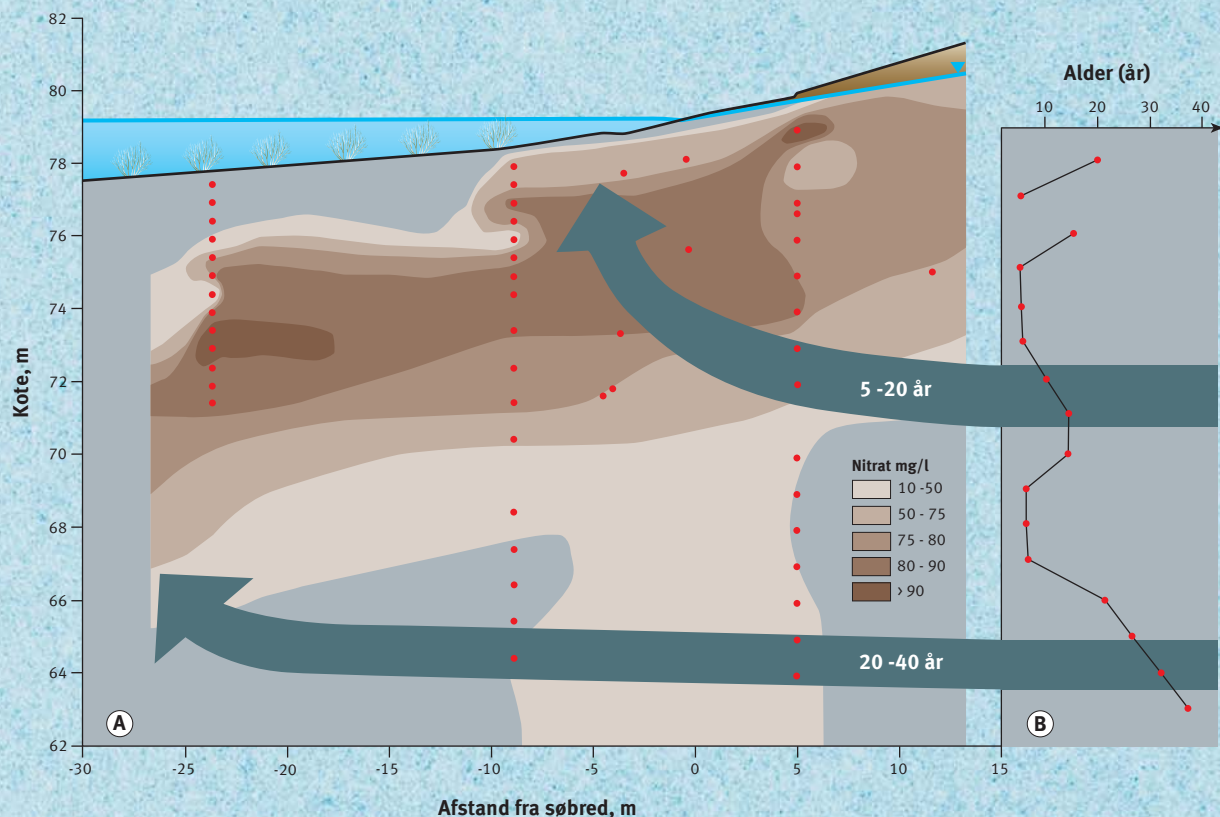
søer, men rosetplanterne er i stand til at optage kuldioxid fra sedimentet og transportere det op til bladene, hvor det bruges i fotosyntesen. Til gengæld transporteres ilt, som dannes ved fotosyntesen, den modsatte vej ned igennem planten, hvor en del af det udskilles gennem rødderne. Denne frigivelse ilter sedimentet, hvilket har stor betydning for de biogeokemiske processer i sedimentet.

Samspillet mellem planter og udsivning af grundvand

Da rosetplanterne er den dominerende plantetype på lavt vand i Hampen Sø, hvor en stor

del af grundvandsudsivningen forekommer, er det relevant at se på, om planterne påvirkes af udsivningen – og omvendt, om planterne påvirker udsivningen. Eksperimentelle undersøgelser med udsivende grundvand har vist, at rosetplanterne effektivt kan nedsætte frigivelsen af fosfat fra sedimentet til vandet. Det skyldes iltningen af sedimentet i rodzonen, hvor der dannes oxiderede jernforbindelser, som fosfat kan binde til. I nogle tilfælde sker dette direkte på røddernes overflade, hvor der dannes jernudfældninger (jernplak). Kvælstofkredsløbet påvirkes også af planterne, idet den koblede nitrifikation - denitrifikation

i sedimentet stimuleres. Den bagvedliggende mekanisme er, at den ilt, der siver ud af planterødderne, anvendes til at drive nitrifikationen, hvor ammonium iltes til nitrat. Nitraten kan så efterfølgende bruges som elektronacceptor i anoxiske (iltfrie) nicher længere væk fra rødderne, når bakterierne i søbunden nedbryder organisk stof uden brug af ilt. Planternes egen optagelse af næringssalte til vækst nedsætter ligeledes frigivelsen af fx nitrat og fosfat fra sedimentet til vandet. Planterne er derfor vigtige for at fastholde søen i en klarvandet tilstand, fordi de sikrer, at næringsstofferne (fx nitrat, der kommer med udsivende grund-



A. Nitratmålinger ved søbredden ud for gården, der er vist med firkant i figuren s. 7. Prikkerne viser målepunkter. Profilet går fra 25 meter ude i søen til 15 meter inde på land. Grundvandsmagasinet består her af sand ned til 62 meter, hvor der træffes et lerlag. Et bælte af høje koncentrationer på > 80 mg/l ses midt i profilet.

B. Grundvandets alder er målt med CFC aldersdatering og viser relativt ungt grundvand (5–20 år) i de øverste 15 meter og lidt ældre grundvand (20–40 år) nederst i magasinet. Det unge grundvand strømmer op mod søen tæt ved søbredden og det lidt ældre grundvand siver ud i søen længere ude.

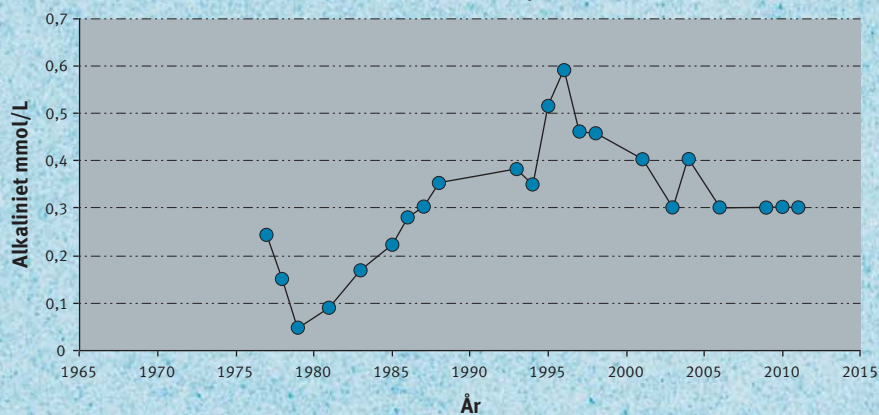
Illustration: Annabeth Andersen, GEUS.
Kilde: Peter Engesgaard.



Hampen sø.

Foto: Jacob B. Kidmose.

Alkalinitet i Hampen sø



Tidsserie af alkalinitet i Hampen Sø. Fra sidst i 1970'erne stiger alkaliniteten med ca. en faktor 2, sandsynligvis pga. af denitrifikation, som følge af en højere belastning med nitrat end i dag. En svag nedadgående tendens i alkaliniteten ses dog i de senere år.

Efter: M. Frandsen (2014) og B. Moeslund (2000).

vand fra landbrug) forbliver utilgængelige for algerne, samtidigt med at de også mindsker resuspension (ophvirvling) af sedimentet.

Undersøgelser fra Hampen Sø har vist, at der er en høj udsivning af nitratholdigt grundvand i nærheden af landbruget. Figuren nedenfor viser målte nitratkoncentrationer i grundvandet ved søbredden og ude under søbunden ned til en dybde af 17 m, hvor det kvartære lerlag træffes. Der er målt høje nitratkoncentrationer på op til næsten 100 mg/l. Bemærk, at de høje koncentrationer ligger i et bælte, hvilket kan skyldes, at udsivning fra marken typisk sker om efteråret. Generelt er der målt høje iltkoncentrationer, så fjernelse af nitrat ved denitrifikation er ikke en mulighed, da denitrifikationen kun forløber, hvis der ikke i forvejen er ilt til stede. Nitraten stammer fra landbrugsarealet ved siden af søen og aldersdatering af grundvandet tæt ved søen viser, at alderen stiger fra ca. 5–20 år i toppen af grundvandet til omkring 20–40 år nede ved lerlaget. Det unge grundvand er infiltreret under marken tæt ved søen, mens det ældre grundvand er infiltreret længere oppe på marken.

Det er bemærkelsesværdigt, at nitratholdigt grundvand findes under søen helt ud til omkring 25 meter fra søbredden. Forklaringen

kan være, at planterne på søbunden fysisk påvirker grundvands- og nitratudsvivningen. Tætte bevoksninger af rosetplanter (~9000 planter pr. m², se fotos s. 9) nedsætter gennemtrængeligheden (permeabiliteten eller hydraulisk ledningsevne) af plante-søbunden, således at en del af grundvandet strømmer under plantemåten og siver ud på dybere vand eller gennem huller i bevoksningen. Nedsættelsen af den hydrauliske ledningsevne skyldes både den kompakte rodmåtte og at der sedimenterer finkornet materiale mellem bladene, hvilket mindsker porøsiteten.

Planterne og næringssaltbalancen

Modellering har vist, at op mod 50 % af det nitratholdige grundvand siver ud til søen længere ude (hvor vanddybden bliver for stor til, at der kan gro planter), mens 50 % siver gennem søbunden med plantedække. Hvad sker der med dette nitrat? Planterne kan optage det meste af den stadige tilførsel af næringssalte, men når planterne henfalder, frigives nogle af næringssaltene igen. Hvad der sker med den del, der siver til søen længere ude, er ikke helt kendt. Vi formoder dog, at der længere ude på dybere vand er iltfrie forhold,

således at nitrat omsættes ved hjælp af organisk materiale i søbunden. Dette vil give en stigning i alkalinitet (se grafen ovenfor), som også er observeret gennem en årrække. Bemærk, at den højeste alkalinitet er observeret midt i 1990'erne og at der nu ses en faldende tendens. Dette kan tolkes som at nitratudvaskningen er langt mindre nu end for 20 år siden og kan være resultatet af vandmiljøplanerne fra sidst i 80'erne og midt 90'erne.

Er søen så ren og i god økologisk ligevægt? En del af søvandet siver ned gennem bunden i søens vestlige del for at ende i grundvandet. Søvandet bliver således filtreret gennem sedimentet, så det kun er de opløste næringssalte, der tabes fra søen. Hvis tilførslen af næringssalte fra landbruget opretholdes, vil der derfor tilbageholdes fosfor og kvælstof i søen i form af levende biomasse i planterne eller dødt organisk stof ophobet i søens sedimentet, hvilket over tid vil gøre søen mere næringsrig. En god ting er, at ethvert tiltag for at nedbringe udvaskningen fra landbruget vil have en hurtig effekt på søen. Som nævnt er det øvre nitratholdige grundvand relativt ungt, 5–20 år, så ved en aktiv indsats vil søen kunne opleve en forbedring indenfor denne tidshorisont.



VÆNG SØ – EN NATURLIG EUTROF SØ

Væng Sø er den sø i Danmark, hvor der er længst erfaring med biomanipulation af fiskebestanden (30 år). Undersøgelser af de geologiske og grundvandsmæssige forhold tyder på, at søen kan være et eksempel på en naturlig eutrof sø, hvor tilførslen af fosfor af geologisk oprindelse er så høj, at søen vanskeligt kan fastholde en klarvandet tilstand. Opfiskning af fredfisk med jævne mellemrum kan være en metode til at sikre en god økologisk tilstand i søen.

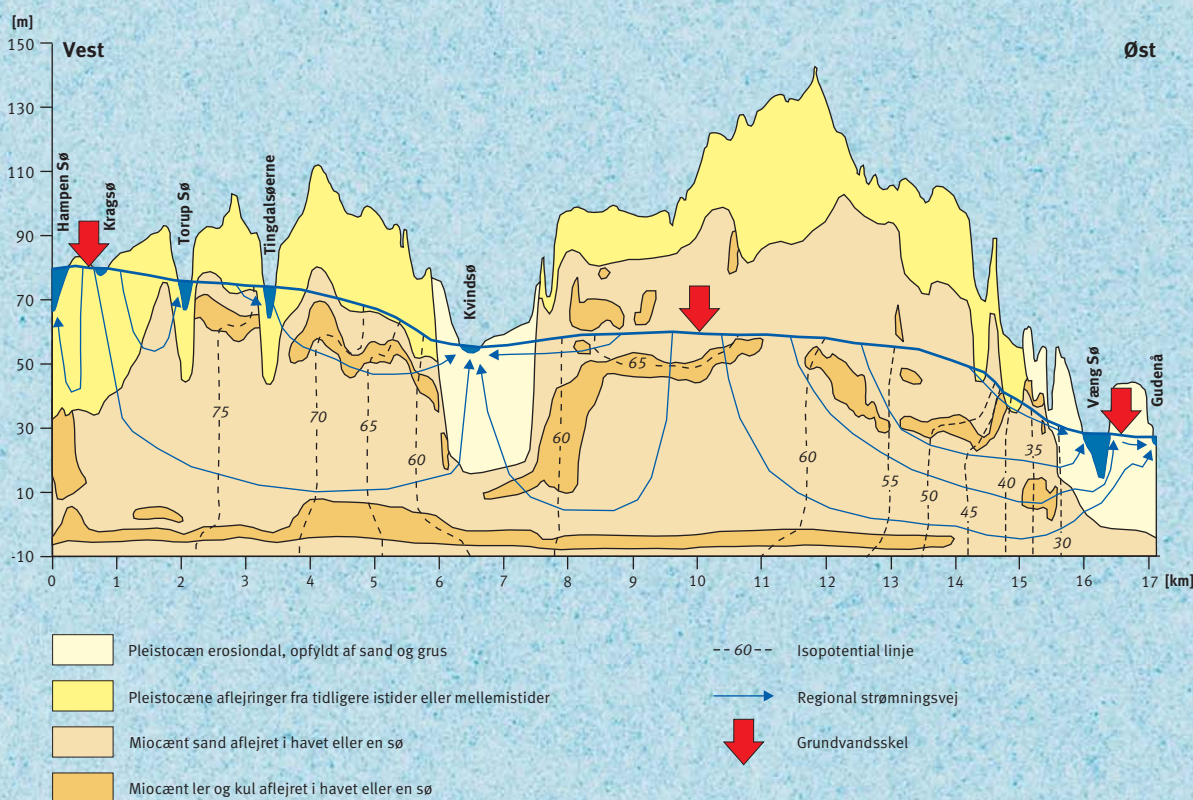
Geologiske forhold

Væng Sø er beliggende i Midtjylland, øst for den jyske højderyg og Gudenådalen. Den er 16 ha stor og er forholdsvis lavvandet med en middeldybde på 1,2 meter. En mindre del af søen er 2 meter dyb. Søen er beliggende i en erosionsdal dannet af istidernes gletsjere engang i Pleistocæn tid, se nedenfor. Erosionsdalen er i

Pleistocæn tid (ca. 2,6 mio. til 11.500 år før nu) eroderet ned i sand- og lerlag af Miocæn alder (ca. 23 til 5,3 mio. år før nu) og er derefter fyldt op med pleistocæne sand- og gruslag.

Søbunden indeholder et næsten impermeabelt lag af tørve- og gytjeflejringer med en tykkelse på op til 11,5 meter i den vestlige del af søen. En undersøgelse af søens organi-

ske sedimenter viste, at de indeholder et arkiv af klima- og miljøhistoriske oplysninger, hvor de nederste tørvelag stammer fra overgangen mellem sidste istid og nuværende mellemistid (Holocæn). Søen må altså tilbage i tid have været væsentlig dybere end den er i dag. Det er ikke så tit, man har mulighed for at få et kig direkte ned i et grundvandsmagasin, men umiddelbart vest for Vængsø ligger en stor råstofgrav, hvor firmaet Dansand A/S opgraver miocænt sand af fineste kvalitet til industriel brug, se figur V2. Søens opland består af 67 % landbrug og 20 % skovbrug.



Tværsnit gennem midtjyske søer fra nær den jyske højderyg ved Hampen Sø til Gudenåen, hvor Væng Sø er beliggende. Det er tydeligt, at søerne øst for højderyggen 'spilder vand' fra vest mod øst via lokale og mere regionale grundvandsstrømninger. Tingdal-søerne har små oplande, og grundvand der siver til søerne er ungt, hvorimod Væng Sø har et stort opland og modtager både ungt og gammelt grundvand. Ændringer i arealanvendelse, der påvirker søernes økologiske tilstand, vil derfor have forskellige tidshorisonter for de forskellige søer.

Kilde: Fra Vand og Jord, 2016.

Bertel Nilsson

Seniorforsker, GEUS
bn@geus.dk

Martin Søndergaard

Seniorforsker, Inst. For Bioscience, AU
ms@bios.au.dk

Jola Kazmierczak

Post Doc, GEUS
jka@geus.dk

Jacob B. Kidmose

Seniorforsker, GEUS
jbki@geus.dk

Peter Engesgaard

Professor, IGN
pe@ign.ku.dk



Råstofgrav i Miocæn sand (Dansand A/S) ved byen Addit 400 meter vest for Væng Sø.

Foto: Forfatterne.

Søens vandbalance

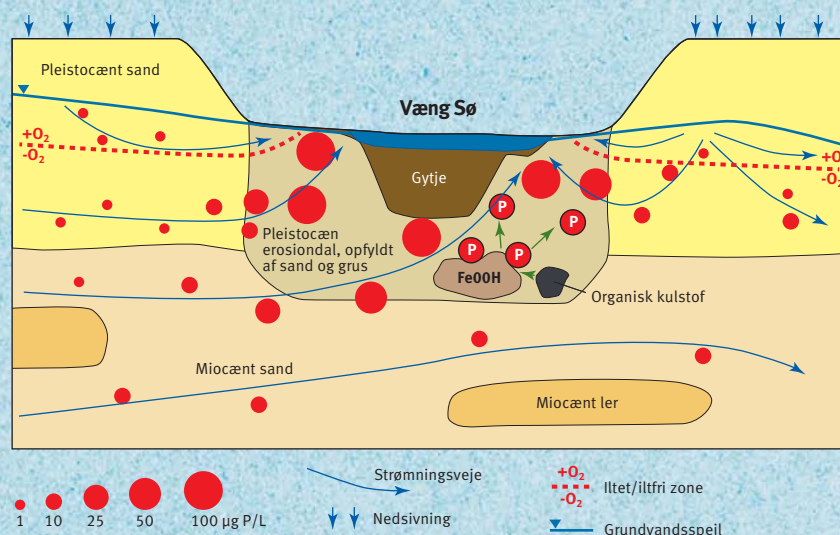
I nordenden af søen findes få mindre tilløb og i sydenden et enkelt større udløb. Hydrogeologisk er søen ret speciel, idet grundvandspejlet hele vejen rundt om søen står højere end søens vandspejl. Med andre ord modtager søen potentielt grundvand hele vejen rundt om søen, hvilket er ret atypisk for danske søer. Et andet karakteristika ved søen er, at hele søens volumen udskiftes i gennemsnit ca. hver tredje uge, hvilket giver en meget kort opholdstid af vandet i søen. En vandbalance for søen viser, at grundvandet bidrager med 2/3 af det vand, der løber til søen, og 1/3 kommer til søen via de mindre tilløb (se figur på s. 4). Alt søvandet forlader søen udelukkende via udløbet i sydenden af søen. Nedbøren og fordampningen udgør få procent af vandbalancen for den grundvandsdominerede sø. Grundvandet strømmer hovedsageligt mod søen fra vest og ca. 2/3 af grundvandet er tvunget til at strømme ud ved vådområder ved den vestlige og sydlige søbred. Den sidste 1/3 af grundvandet strømmer under laget af organiske sedimenter for til sidst at strømme ind i søen ved den østlige sandede søbred.

Heterogenitet i den sandede søbunds hydrauliske forhold påvirker indsivningen signifikant. For eksempel er der observeret grundvandskilder med meget høje indsivningsrater (målt til op mod 7000 l/dag/1 m² søbund ved brug af seepagemeter; sammenlign fx med Hampen Sø og Tvorup Hul, hvor raterne højst er 50–60 l/dag/m²).

Fosfor i grundvandet

Naturligt forekommende sporstoffer i grundvandet har været anvendt til at beregne den generelle fordeling af indstrømning af grundvand og til at spore grundvandets strømningsveje, se figuren nedenfor. Koncentrationen af fosfor i grundvandsprøver fra det pleistocæne sand- og gruslag, som er forbundet med Væng Sø, stiger fra 9 µg/l i søens opland til 127 µg/l nær søen. Forholdet mellem fosfor

og opløst jern indikerer, at en stor del af fosforen, som tilgår søen via grundvandsindstrømning, bliver mobiliseret i ældre sedimenter beliggende under søen. Her vil organisk stof reducere Fe-hydroxider, hvor fosfor er adsorberet. Processen igangsættes af tilstrømning af iltfrit grundvand fra dybereliggende dele af grundvandsmagasinet, med det resultat at fosfor bliver frigivet. Forskellige modelberegninger indikerer, at grundvandet til Væng Sø bidrager med 190–335 kg fosfor/år via søbunden.

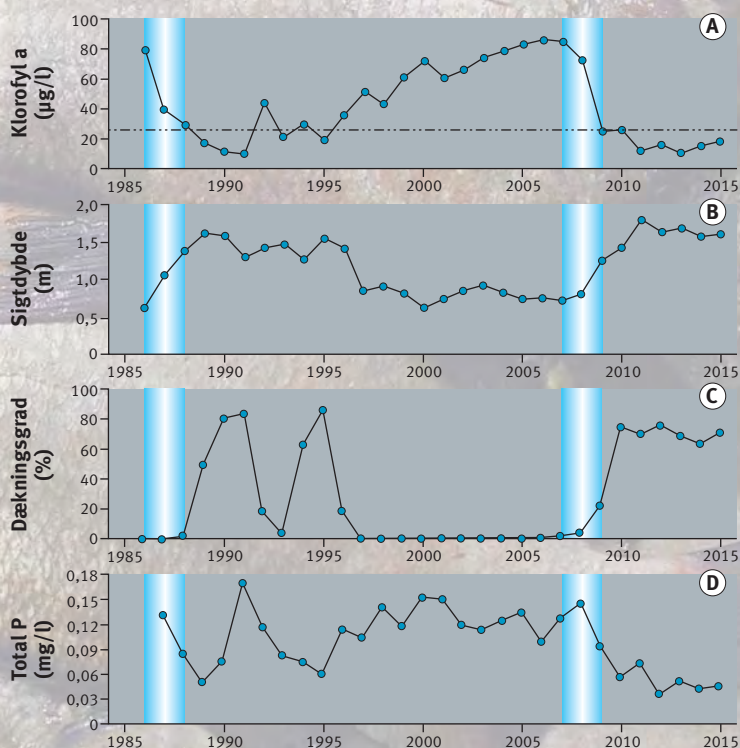


Konceptuelt tværprofil igennem Væng Sø og de omgivende sedimenter. Grundvandets strømningsretning og ændringen i fosfor-koncentrationer langs strømningsvejene er vist. Desuden kan ses de kemiske reaktioner, der sker fra fosforen bundet til jernhydroxider i grundvandsmagasinet strømmer til zonen med pleistocæne aflejringer beriget på organisk stof, hvor det organiske stof reducerer jernhydroxiderne. Ved denne kemiske reaktion frigives fosforen, så den i opløst form kan strømme ud i Væng Sø.

Illustration: Annabeth Andersen, GEUS.
Kilde: Modificeret fra Jola Kazmierczak, 2014.

Opfiskning i 2007 af fredfisker brasen. Ved en biomanipulation opfisker man så mange som muligt af de fiskearter – typisk skalle og brasen – som æder dyreplankton (dafnier m.m.). Det gør man, fordi meget dyreplankton betyder mindre planktonalger. Dvs. dyreplanktonet filtrerer planktonalgerne bort og jo mindre planktonalger, des klarere søvand.

Foto: Forfatterne.



I perioden 1986–88 og 2007–09 er gennemført opfiskning i Vængsø. (A) Klorofyl indholdet, (B) sigtedybden og (C) dækningsgraden af undervandsplanterne er vist gennem de seneste 30 år. Grænsen mellem god og moderat økologisk tilstand (jf. Vandrammedirektivet) defineret ud fra indholdet af klorofyl er angivet.

Kilde: Fra Vand og Jord, 2016.

Sørestauring

Væng Sø modtog indtil starten af 1980'erne spildevand fra et mindre bysamfund. Søen var præget af uklart vand og de eneste planter i søen var planktonalgerne i søvandet. Selv efter at spildevandet blev ledt til søens afløb, forblev søen uklar, og det blev derfor besluttet at søge at restaurere søen ved at gennemføre en opfiskning (se ovenfor). I perioden 1987–1989 blev der således fjernet 4 tons fisk fra søen og det resulterede som ønsket i en forbedret vandkvalitet, hvor mængden af planteplankton (udtrykt som mængden af klorofyl i figur A ovenfor) blev markant reduceret. Dette skabte mere klart vandt (øget sigtedybde, figuren B ovenfor), som i sidste ende også gjorde det muligt for undervandsplanterne at etablere sig (figur C). De første år betød opfiskningen, at søen kunne opretholde en god økologisk ligevægt og dermed opfylde vandrammedirektivets krav om, at indholdet af klorofyl i lavvandede søer højst må være 25 µg/l (figur A).

Effekten af opfiskningen holdt sig i ca. 10 år, hvorefter søen igen vendte tilbage til en uklar tilstand, hvor undervandsplanterne forsvandt og klorofylindholdet igen steg til over 25 µg/l. Som konsekvens heraf fjernede man i perioden 2007–2009 igen en god del af fiskebestanden i søen, og ligesom ved den første opfiskning, førte dette til klarvandede forhold og genvækst af undervandsplanter. Siden 2009 har indholdet af klorofyl således været under 25 µg/l.

Hvad er perspektivet?

Spørgsmålet er imidlertid om søen - ligesom efter den første opfiskning - igen vil vende tilbage til en uklar tilstand? For at kunne skabe en længerevarende virkning, når man restaurerer søer, ved blandt andet opfiskning, er det en forudsætning, at den eksterne næringsstofftilførsel (især fosfor) er tilstrækkelig lav. Hvis tilførslen er for høj, vil fosforkoncentrationen i søen også blive høj, og søen vil før eller siden vende tilbage til en uklar tilstand med

en høj vækst af planteplankton. Den beregnede fosfortilførsel til Væng Sø via grundvandet, som angivet ovenover, er relativt høj. Dette vil give anledning til fosforkoncentrationer på over 0,1 mg/l, hvilket i de fleste søer vil føre til uklart vand. Væng Sø kan således være et eksempel på en naturlig eutrof sø, hvor den eksterne tilførsel af fosfor af geologisk oprindelse kan medføre, at søen normalt vil være i en uklar tilstand.

Der er dog en del usikkerhedsfaktorer forbundet med at beregne koncentrationen i det indstrømmende grundvand, og det gør det vanskeligt at udtale sig om søens fremtidige tilstand. Ligeledes er det usikkert, i hvilket omfang søens sediment kan bidrage til at tilbageholde fosfor, og hvor stabil en undervandsvegetation, der kan opretholdes. Begge forhold vil påvirke søens muligheder for at forblive klarvandet. Indtil videre, - her 8 år efter den seneste opfiskning - er søen stadigvæk klarvandet.



TVORUP HUL I NATIONAL-PARK THY – EN BRUN-VANDET SØ – KAN DEN REDDES?

Tvorup Hul i Nationalpark Thy var for 20 år siden en klarvandet typisk lobeliesø, med en veludviklet bestand af grundkudsplanter, hvoraf de fleste var rødlistede, altså i risiko for at forsvinde. I søen voksede gulgrøn og sortgrøn brasenføde, tvepibet lobelie, sylblad, strandbo, liden siv og sekshannet bækarve, hvoraf de fleste er såkaldte grundkudsplanter eller sjældne arter. Søen har på nuværende tidspunkt næsten mistet alt grundkudsvegetation som konsekvens af tidligere tiders syrerregn og efterfølgende udvaskning af humusstoffer fra nåleskovsplantagen omkring søen.

Søens problem

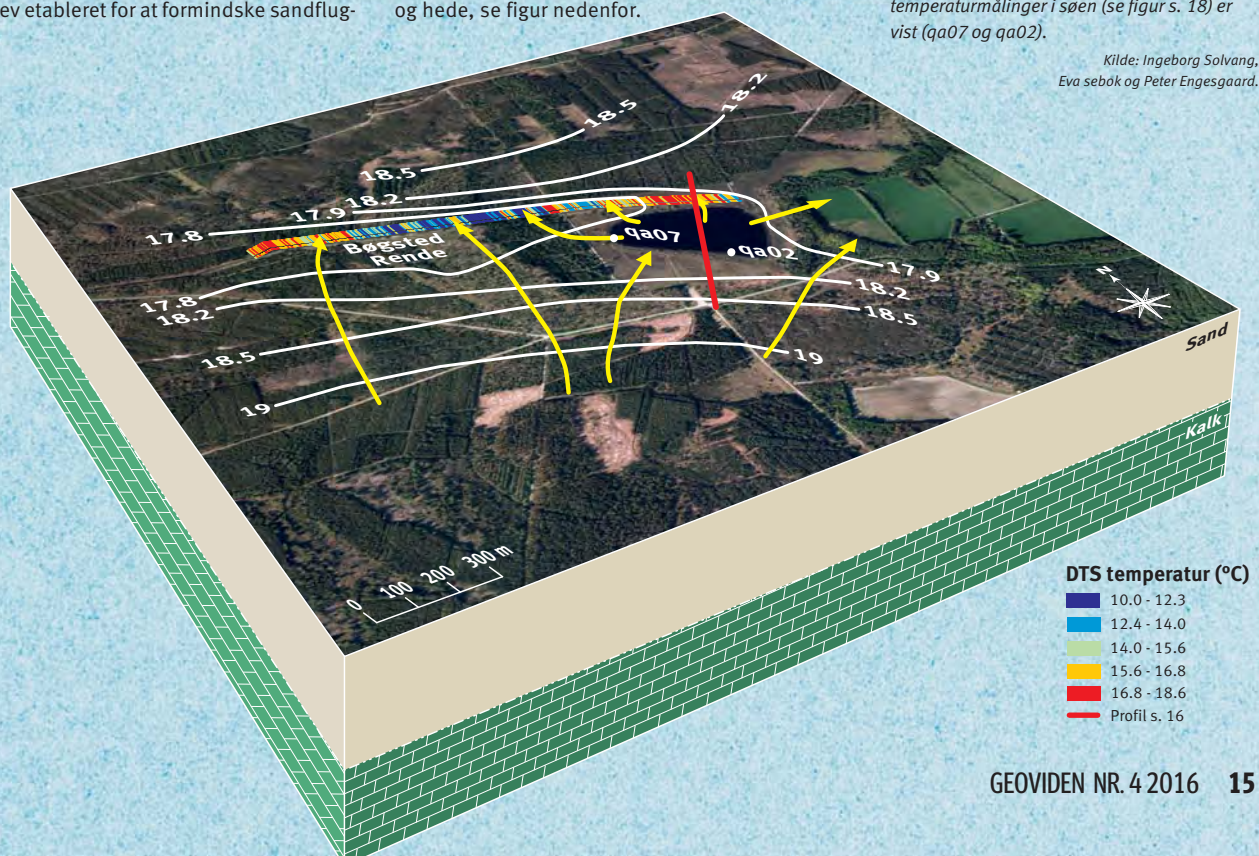
Oprindelig har Tvorup Hul været en meget større klitsø, måske 80 ha, beliggende i bunden af den afblæste flade, se nedenfor. Den gang hed den Vester Sø. For 100–150 år siden forsøgte man at aflede så meget vand som muligt bl.a. ved at grave afvandingsgrøften Bøgsted Rende vest på med det resultat, at vandstanden og udbredelsen af Tvorup Hul (Vester Sø) blev reduceret meget betydeligt. Søen er nu langt mindre, kun på 4 ha. Plantagen blev etableret for at formindske sandflug-

ten, og grøftesystemer indgik i den almindelige vedligeholdelse af skovdriften.

I dag modtager søen det mest af sit vand fra grundvand og farven på grundvandet varierer fra kaffefarvet til klart kildevand, se øverst s. 16-17, hvilket skyldes koncentrationsforskelle i humusstoffer, som er svært nedbrydelige og absorberer lys. Konsekvensen er, at grundkudsplanterne har sværere ved at gro på større vanddybder. Kilden til humusstofferne findes i søens opland bestående af nåleskov og hede, se figur nedenfor.

Kort over Tvorup Hul i National Park Thy. Området består af plantage med nåletræer og hede. Søen er ca. 4 ha. Søens vandstand er i middel 18 m. Grundvandsstanden er vist ved isopotentialer (meter) som varierer fra 19 meter i syd ned mod søen (18 meter) og Bøgsted Rende (<17,8 meter). Retningen af grundvandsstrømningen er vist med pile. Fra syd vil grundvandet fordele sig til søen og Bøgsted Rende. Udstrømningen fra søen er mod vest, nord og øst. I Bøgsted Rende er vist målte temperaturer (juni 2015) ved brug af DTS, hvor temperaturen ved bunden varierer fra 10 til 19 °C. Placering af to temperaturmålinger i søen (se figur s. 18) er vist (qa07 og qa02).

Kilde: Ingeborg Solvang, Eva Sebok og Peter Engesgaard.



Peter Engesgaard

Professor, IGN
pe@ign.ku.dk

Theis Kragh

Forskningskonsulent,
Ferskvandsbiologisk lab., BIO-KU
tkragh@bio.ku.dk

Eva Sebok

Industriel Post Doc, IGN-KU & COWI
es@ign.ku.dk

Ingeborg Solvang

Tidl. Specialestud., IGN
xvl478@alumni.ku.dk

Emil Kristensen

Laboratorieassistent
Ferskvandsbiologisk lab., BIO-KU
rqj332@alumni.ku.dk

Henrik Schjødt Kristensen

Klitplantør
Naturstyrelsen Thy
hsk@nst.dk

Vandprøver taget i ca. 1 meters dybde hele vejen rundt om Tvorup Hul. Nogle prøver er stærkt farvede af humusstoffer, mens andre er forholdsvis klare. Forskellene i farve afspejler delvist, hvad arealerne i oplandet til Tvorup Hul anvendes til.

Foto: Ole Pedersen.

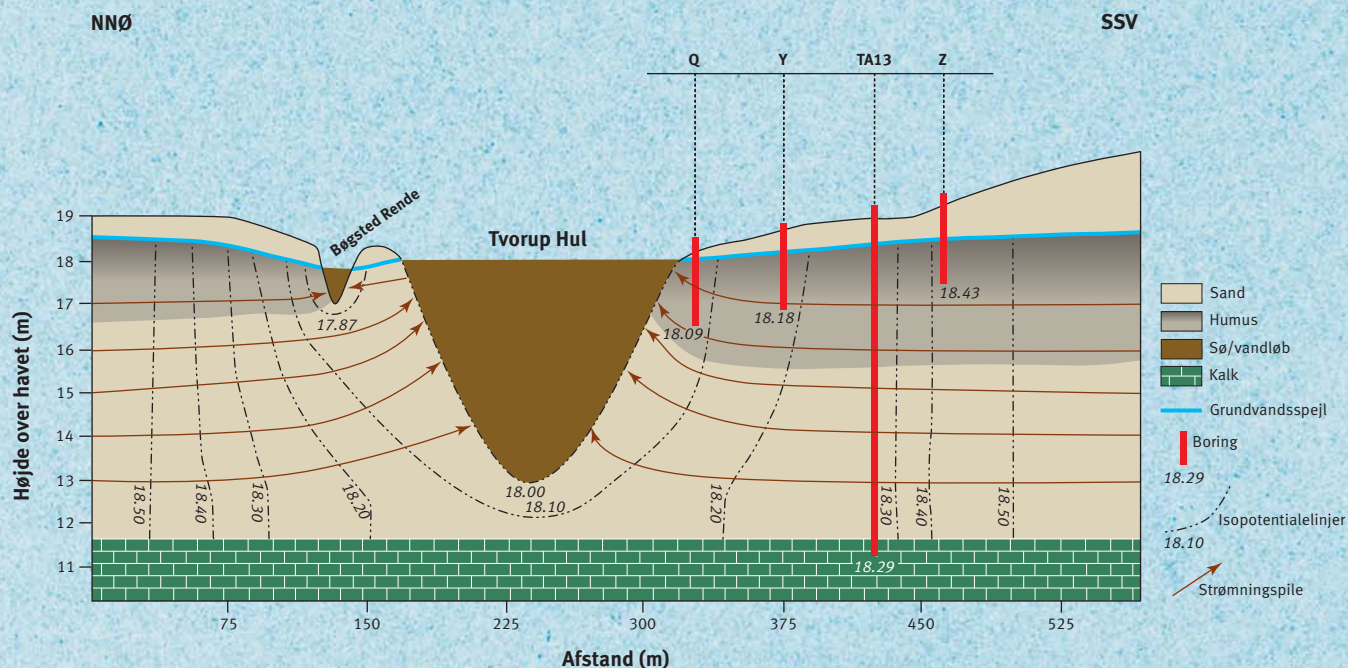


I slutningen af 1990'erne steg tilførslen af farvet opløst organisk materiale til søen fra oplandet gennem grundvandet. En af årsagerne menes at være en formindskelse af syrerregn, der især stammede fra industriel forurening. Syreregn betød oprindeligt en lav pH i jordvandet og at det opløste farvede organiske materiale fældede ud som partikler i jorden og der-

for ikke blev udvasket til grundvandet og søen. Når pH i regnen igen steg, ville de lav-alkaline jorde med lav buffer-kapacitet blive mindre sure og udfældning af opløst organisk stof i jorden blev derfor mindre. Udvasnkningen af den pulje af humusstoffer, der blev opbygget i oplandet i årene med lav pH, udvaskes derfor den dag i dag.

Hydrologi

Naturstyrelsen i Thy har taget forskellige initiativer for at reducere brunfarvningen af Tvorup Hul, bl.a. ledes det meget brune drænvand fra nåleskovsplantagen nu udenom søen og hen til Bøgsted Rende, nåleskoven ned til søen er blevet fældet og kvæg er sat ud for at holde området omkring søen åbent. Drænka-



Hydrogeologisk profil i (nord-syd) gennem Tvorup Hul og Bøgsted Rende. Profillets beliggenhed er vist på figuren s. 15. Figuren viser grundvandets interaktion med søen og Bøgsted Rende og hvorledes man tænker sig, at humus tilføres søen.

Kilde: L. M. K. Kolthoff, IGN.



nalen har haft en positiv indvirkning på søen, men søen tilføres fortsat for mange humusstoffer med det indsvivende grundvand, og de nedbrydes kun langsomt af bakterier og solens UV-lys ude i søen. For at komme videre var det derfor nødvendigt at undersøge hydrogeologien omkring søen, hvor og hvor meget grundvand siver til søen, hvor meget kanalerne og Bøgsted Rende kan dræne oplandet, samt opstille en vandbalance, der samtidig kan give et bud på søens opholdstid (dvs. hvor hurtigt vandet bliver skiftet ud).

På kortet s. 15 er vist grundvandstanden rundt om Tvorup Hul (juni 2015), hvor søens vandstand var i kote 18.0 meter. Syd for søen står grundvandet i 19 meter, altså betydeligt højere end søens vandspejl. Denne gradient er tydelig på alle tidspunkter af året og der er derfor indstrømning til søen fra det sydlige opland i hele året. Det ses dog, at grundvand, der kommer fra syd, også afbøjes mod Bøgsted Rende. Dette har en gunstig virkning på søen derhen, at søen modtager mindre humus-holdigt grundvand og opholdstiden af vand i søen stiger (da vandudskiftningen bliver mindre). Nord og vest for søen er grundvandstanden kun 10–20 cm lavere end søens vandstand og udsivningen fra søen til grundvandet er derfor mere beskedent. Igen spiller Bøgsted Rende ind på de lokale strømningsforhold. Øst for søen er der kun en enkelt måling, der dog tydeligt viser en udstrømning fra søen til grundvandet.

Et hydrogeologisk profil gennem søen og Bøgsted Rende er vist nederst s. 16. Profilets

placering ses på s. 15. Geologien består af ca. 5–10 meter sand, der overligger kalk. Grundvandsstanden er også vist på profilet. Heraf fremgår det, at søen ligger med den laveste vandstand og grundvandet nord og syd for søen har en højere vandstand. Grundvand strømmer derfor til søen fra syd, men også fra nord via den del, der siver under Bøgsted Rende til dybereliggende dele af søen. Bøgsted Rende har en lidt lavere vandstand end søen og vil derfor dræne vand fra søen tæt ved sø-

bredden og grundvand, der strømmer til fra nord. Figuren viser også, hvordan man tænker sig, at humus tilføres søen, hvor de øverste dele af grundvandet har en højere koncentration, da humus infiltreres ned fra overfladen. Boksen nedenfor viser, hvordan man kan udregne grundvandstilførslen og humusbelastningen.

Temperatur – som er naturens egen tracer – er benyttet ved Tvorup Hul til at komme lidt nærmere på udvekslingen af vand mellem søen og grundvandet samt betydningen af

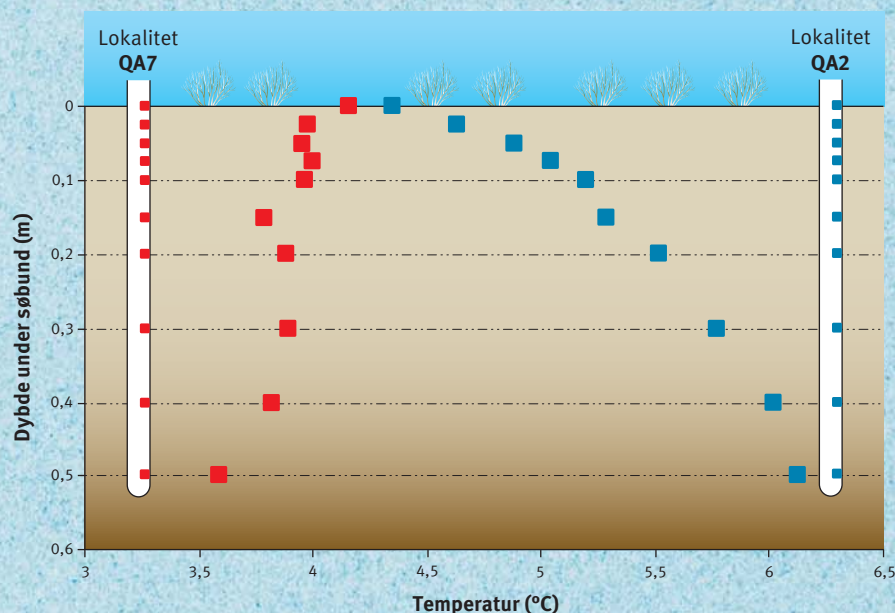
Hvordan udregnes grundvandstilskuddet? – et eksempel

Hvor meget grundvand der siver til søen syd fra kan beregnes med Darcy's lov;

$$Q = -KA \frac{\Delta h}{L}$$

Hvor Q er grundvandsstrømningen (m³/dag), K er den hydrauliske ledningsevne af sand (m/dag), A er tværsnitsarealet (m²), Δh er faldet i grundvandsstand (m) over afstanden L (m).

Grundvandstanden er målt i borerne tæt ved søen (Q, Y, TA13 og Z, figur s. 16) og viser en faldende grundvandsstand fra boring Z (18,43 m) til Q (18,09 m) og videre til søen (18,0 m). Benyttes boring Z kan Δh aflæses mellem søen og denne til Δh = (18,0–18,43) = -0,43 m og dette fald sker over afstand L på ca. 150 m. Hydraulisk ledningsevne er målt til ca. 40 m/dag, hvilket karakteriserer sand. Arealet skal ses som bredden af den sydlige del, hvor der sker indstrømning (kan aflæses af figuren s. 15 til ca. 200 m) ganget med tykkelsen af sandlaget (ca. 6 m, figur s. 16). Q bliver derfor ca. 138 m³/dag. Er det så en stor eller lille tilførsel? Nedbør er målt til 953 mm/år i 2015 eller 0,953 m/år. Samtidig sker der fordampning fra søens frie overflade. Denne er vanskeligere at måle, men kan typisk ligge på ca. det halve af nedbøren. Så netto, nedbør minus fordampning, kan man regne med ca. 500 mm/år eller 0,5 m/år. Med et søareal på 4 ha (40.000 m²) giver det et input fra netto-nedbør på ca. 55 m³/dag. Grundvandstilskuddet sydfra er derfor en del større, og hvis tilskuddet fra nord indregnes, vil søen blive karakteriseret som grundvandsdomineret. Humus tilføres søen med dette grundvand.



Målte temperaturprofiler (februar, 2016) i søbunden ved lokalitet QA2 og QA7, se s. 15. Figuren viser, hvordan et termometer med 10 temperatursensorer er presset 50 cm ned i søbunden ved hver af de to lokaliteter. Søen har en temperatur på ca. 4,2 °C. Ved QA2 stiger temperaturen op til 6 °C og viser derfor indsigning af varmere grundvand. Ved QA7 er temperaturen næsten konstant og viser udsivning af koldt søvand.

Kilde: Ingeborg Solvang.

Bøgsted Rende på dræningen af området. Grundvand vil i en given dybde (2–5 meter) have en temperatur svarende til middel lufttemperaturen (~8 °C i Danmark). En sommerdag (juni 2015), hvor luften er 20 °C, vil man derfor få kolde fødder, hvis man går i Bøgsted Rende eller lidt ude i søen, i områder, hvor der siver meget grundvand ind. Omvendt, siver der vand ud, vil man blot mærke søens/rendens temperatur og derfor have varme fødder. Det omvendte er tilfældet om vinteren.

Temperaturen ved bunden af Bøgsted Rende er blevet kortlagt ved en teknik, der hedder Distributed Temperature Sensing (DTS). DTS består af et km langt fiber-optisk kabel udlagt på bunden og en laser. En laserimpuls sendes gennem kablet og da temperaturen langs kablet påvirker glassets egenskaber, bliver impulsen returneret med forskellige bølglængder. På denne måde kan temperaturen aflæses for hver meter med en præcision på ~0.1 °C. Figuren s. 15 viser resultatet fra juni 2015, hvor kablet blev udlagt langs hele den nordlige side af søen og ca. 1 km nedstrøms. Temperaturen ved bunden varierer fra 10 til 19 °C. De kolde temperaturer (blå-grønne farver) viser områder med betydelig grundvandsindsivning til renden fra nord og syd. Med andre ord ser det ud til, at renden dræner en betydelig del af grundvandet, der kommer syd fra, som i stedet for at strømme til søen ender i renden. Dette er i overensstemmelse med iso-potentialekortet s. 15. I de andre områder er der langt mindre udveksling; her ligger temperaturen mellem 17 og 19 °C (gule til røde farver).

Figuren ovenfor viser to eksempler med en lidt anden teknik, hvor temperaturen er målt i søbunden med et termometer og ikke kun på overfladen. Et instrument med 10 temperatur-

sensorer er presset 50 cm ned i søbunden på de to lokaliteter vist på s. 15. Målingerne er foretaget i februar 2016, hvor søens temperatur (ca. 4 °C) nu er koldere end grundvandet og indsigning af grundvand vil nu ses som varme områder. Lokalitet QA2 er placeret ved den sydlige bred og man ser tydeligt, at temperaturen stiger fra lidt over 4 °C til lidt over 6 °C med dybden og nærmer sig altså de 8 °C. Dette er et tegn på, at der siver grundvand ind. Omvendt, ved lokalitet QA7 ses stort set ingen ændring i temperaturen, hvilket fortæller, at her siver søens kolde vand ud i grundvandet. Begge målinger er i overensstemmelse med tolkningen baseret på grundvandsstanden. Temperaturmålinger kan også give et bud på størrelsen af indsigningen, fx er det beregnet, at ved lokalitet QA2 siver der hver dag ca. 60 liter grundvand ind per m² søbund. Kender man størrelsen på indsigningen langs hele søen og samtidig humuskoncentrationen vil man kunne sige noget om grundvands betydning for belastningen af humus fra hele oplandet. Foreløbige undersøgelser viser, at tilførslen stadig er et stort problem.

Biologi

Den øgede tilførsel af humusstoffer og brunfarvning medfører ikke kun en direkte lysbegærsning af undervandsvegetationen, men den øgede omsætning af det tilførte organiske stof er også problematisk. Når nedbrydningen af organisk materiale i søen stiger, forøges frigivelsen af CO₂, som sænker pH. Dette betyder, at pH i perioder med høj bakteriel aktivitet vil være lav og dannelsen af flokkulater (sammenklumpninger) af humusstoffer øges og disse synker til bunden af søen, fotos A og C s. 19. En stor del af respirationen rykkes derfor fra vandsøjlen til sedimentet, hvilket skaber pro-

blemer for grundskudsplanternes rødder. Den øgede mængde af bundfældet organisk materiale medfører, at sedimentets iltforbrug bliver så højt, at planterne ikke længere har tilstrækkeligt med O₂ i luftkanalerne til at rødderne kan holdes iltede. Det betyder, at planter, der står på dybere vand, får mindre lys til fotosyntesen. For at sikre, at der kommer ilt til rodspidsen, bliver planternes rødder kortere, hvilket igen mindsker næringsstofoptaget og som et resultat mistrives planterne, se fotos s. 19. Sammen med det øgede indhold af blødt organisk substrat øger planternes kortere rødder risikoen for, at planterne mister rodfastelse.

Fremtiden

Fremtiden for Tvorup Hul ser lidt 'mørk ud'. Hvis søen skal gøres mere klar, ser det ud til, at det eneste mulige indgreb er at mindske tilførslen af humus fra oplandet. Det kan ske ved at omlægge fyrreplantagen til hede (mindsk koncentrationen af humus, der ender i grundvandet) og/eller mindske grundvands tilførslen. Det sidste kan kun gøres ved at anlægge yderligere nye omskærende dræn, så mere af grundvandet ledes forbi søen og vandets opholdstid i søen derved forlænges yderligere. En forlænget opholdstid betyder, at nedbrydningen ved sollys (ultra-violet stråling) forstærkes.

Tvorup Hul, som vi kender den i dag, er derfor meget langt fra at være naturlig, men er et resultat af vi menneskers adfærd. Og omvendt kan søens fremtid måske også sikres ved en aktiv indsats fra vores side.

Er man interesseret i Nationalpark Thy, kan det anbefales at følge med i Nationalpark TV (<http://nationalparktv.blogspot.dk/>)



A

A. Grundskudsplanter i en klarvandet sø. På billedet ses strandbo, sortgrøn brasenføde og tvepibet lobelie. Tvorup Hul har indtil 1990'erne haft denne type af undervandsvegetation, men tilførslen af brunfarvet vand har betydet, at planterne nu kun vokser sparsomt i søen ned til en maksimal dybde på 20 cm.

Foto: Theis Kragh.



B

B. Tvepibet lobelie fra Tvorup, maj 2007. Planten strækker sig kraftigt efter lyset i det brune vand; bladene er næsten dobbelt så lange som normalt og de er helt parallelle frem for at sidde i åben roset. Den nederste del af bladene er dækket af sorte aflejringer (jern- og manganoxider) og roden er næsten helt forsvundet; normalt vil de hvide rødder udgøre 50% af plantens samlede masse.

Foto: Ole Pedersen.

C. Sedimentsøjle fra Tvorup Hul. Man ser tydeligt det fine grå sand, som er blevet overlejret af et ca. 20 cm tykt slammet lag, som er rigt på organisk stof. Øverst ses vandsøjlen med det brunfarvede vand, der er stærkt farvet af humusstoffer.

Foto: Ole Pedersen.



C



Hampen Sø, kerneboring af søens bundsedimenter.

Foto: Peter Warno-Moors.

DANMARK

PP

Magasinpost UMM
ID-nr. 46439

GEOCENTER DANMARK

GEOCENTER DANMARK

Er et formaliseret samarbejde mellem de fire selvstændige institutioner De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), Institut for Geoscience ved Aarhus Universitet samt Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, samt Geologisk Museum (Statens Naturhistoriske Museum) begge ved Københavns Universitet. Geocenter Danmark er et center for geovidenskabelig forskning, uddannelse, rådgivning, innovation og formidling på højt internationalt niveau.

UDGIVER

Geocenter Danmark.

ISSN 1604-6935 (PAPIR)

ISSN 1604-8172 (ELEKTRONISK)

REDAKTION

Geoviden – Geologi og Geografi redigeres af Seniorforsker Merete Binderup (ansvarshavende) fra GEUS i samarbejde med en redaktionsgruppe.

Geoviden – Geologi og Geografi udkommer fire gange om året og abonnement er gratis. Det kan bestilles ved henvendelse til Annette Thy, tlf.: 91 33 35 03, e-mail: athy@geus.dk og på www.geocenter.dk, hvor man også kan læse den elektroniske udgave af bladet.

Produktion: Annabeth Andersen, GEUS.

Tryk: Rosendahls - Schultz Grafisk A/S.

Forsidefoto: Tvorup Hul. Feltkursus 2015.

Foto: Peter Engesgaard, IGN.

Reprografisk arbejde: Benny Schark, GEUS.

Illustrationer: Forfattere og Grafisk, GEUS.

Eftertryk er tilladt med kildeangivelse.



GEUS

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER
FOR DANMARK OG GRØNLAND (GEUS)

Øster Voldgade 10

1350 København K

Tlf: 38 14 20 00

E-mail: geus@geus.dk



INSTITUT FOR GEOVIDENSKAB OG
NATURFORVALTNING (IGN)

Øster Voldgade 10

1350 København K

Tlf: 35 32 25 00

E-mail: ign@ign.ku.dk

GEOLOGISK MUSEUM (SNM)

Øster Voldgade 5-7

1350 København K

Tlf: 35 32 23 45

E-mail: snm@snm.ku.dk



INSTITUT FOR GEOSCIENCE (IG)

Aarhus Universitet

Høegh-Guldbergs Gade 2, B.1670

8000 Århus C

Tlf: 89 42 94 00

E-mail: geologi@au.dk