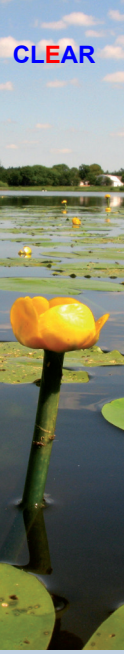


Grundvand og søer

Grundvandsbidraget til søer bliver kun i sjældne tilfælde bestemt direkte. Dette til trods for at grundvandsandelen til søer kan have stor betydning for både vand- og stofbalancen i søerne (kulstof, kvælstof, fosfor) og dermed for søernes økologiske tilstand. I forbindelse med CLEAR projektet er der udviklet en værktøjskasse af metoder der kan bruges til bestemmelse af grundvandsbidraget til søer.

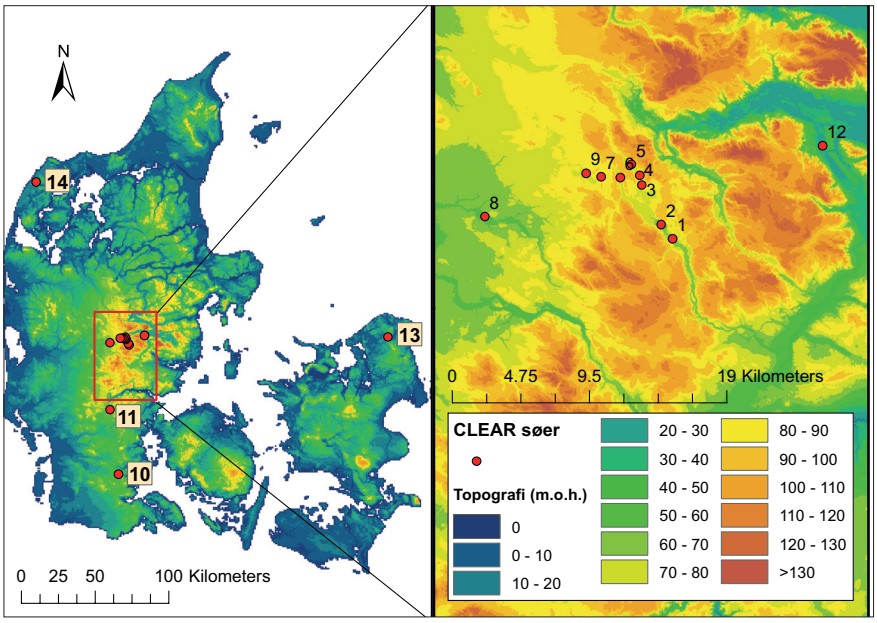
Bertel Nilsson, Peter Engesgaard, Jacob B. Kidmose & Jolanta Kazmierczak

CLEAR værkstedssøer

Figur 1 viser de søer der er blevet undersøgt i forbindelse med CLEAR projektet (2006-2016). Søerne er primært karakteriseret ved deres placering i landskabet og de omkringliggende geologiske aflejringer (sand/ler). CLEAR projektet har blandt andet haft til formål, at forstå grundvandsbidraget til søernes vandbalance og hvordan det påvirker mulighederne for sørestaurering (Boks 1).

Søernes placering i landskabet

Søernes placering i landskabet påvirker vandbalancen. En sø der ligger højt placeret i landskabet langt fra havet, vil ofte have et lille opland der resulterer i lave grundvandsflukse (forklaret Boks 1). Den netto-nedbør (det vil sige 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 grundvand er betydningsfuldt for vandbalancen afhænger blandt andet af søens overfladeareal (As), dvs, hvor meget vand modtager/taber søen via nedbør/fordampning. Omvendt vil søer der ligger lavere i landskabet (nærmere havet), ofte have større oplande, hvor grundvandsbidraget er meget signifikant. Figur 2 viser et 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. Tingdalsøerne 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 på søernes økologiske tilstand vil derfor have forskellige tidshorisonter for de forskellige søer.



Figur 1. CLEAR søernes placering og terrænforhold. Søernes navne (sø numre) kan ses i Figur 3.

Vandbalancer i værkstedssøerne

Tre hovedgrupper af søer

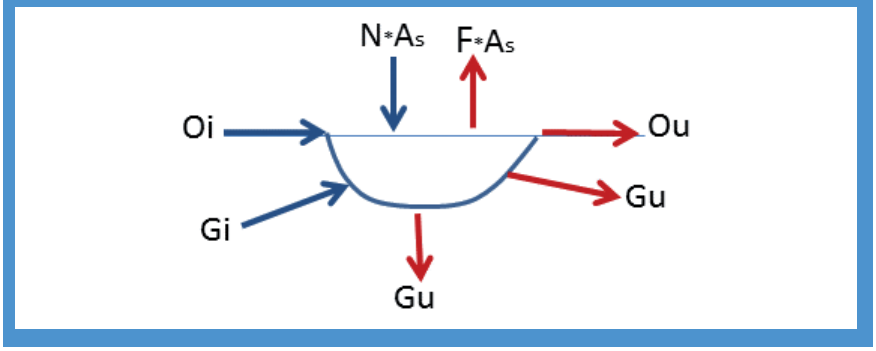
Vandbalancen for 14 søer er vist i Figur 3. Vandbalancerne er fremkommet på forskellig vis, men hovedsagelig enten ved målinger/data og/eller via grundvandsmodellering. Den procentvise fordeling i ind-budgettet er vist i den øverste trekant og ud-budgettet i den nederste trekant. Søerne danner tre hovedgrupper: grundvands-dominerede søer, vandløbs-dominerede søer og klima-dominerede 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 grundvands-dominerede søer omfatter Tvorup Hul, Ræv Sø og Hampen Sø og de rent vandløbs-dominerede søer er Stigsholm 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 sandet opland: Kalgaard Sø, Grane Langsø og Krag Sø, samt i lerede oplande: Vedsted Sø, Skærsø og Store Gribsø. Ind-budgettet til disse søer er styret af nedbør og overfladisk tilstrømning (Oi), mens ud-budgettet er

Boks 1. Vandbalance for søer

Vandbalance for sø:

(1) $(Gi + N + Oi) - (Gu + F + Ou) = \Delta V/\Delta t = 0$

med følgende led; grundvand ind i søen (Gi), nedbør (N) og overfladisk indløb (Oi) via vandløb, grøft, dræn eller kildevæld på søbredden som tilsammen er den mængde vand der tilføres, grundvand ud af søen fra sider eller bund (Gu), potentiel fordampning (F) og en overfladisk afstrømning (Ou) via grøfter eller naturlig vandløb. $\Delta V/\Delta t$ er ændringen i søens vandvolumen (her antaget til nul). De enkelte led kan f.eks. have enheden m^3/år og betegnes ofte flukse. Vores interesse har været på grundvandsfluksene (Gi og Gu) relativt til de andre flukse, hvor N og F styres af klima. Søens overfladeareal er angivet med A_s.



præget af potentiel fordampning og resten taber søen via søens bund 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 klimatiske forhold der i fælleskab betinger hvilken vandbalance der kommer til at gælde for den enkelte sø.

Hvor siver grundvandet ind og ud – Metoder

Grundvandsbidraget til søer er derfor ikke uvæsentligt. Bidraget kan bestemmes med en række metoder, se Boks 2. Ofte sker den dominerende ind/udstrømning af grundvand nær søbredden, hvilket er meget belejligt, da målinger derfor er relativt nemme at udføre. CLEAR projektet har i udstrakt grad benyttet en "multi-tracer" metode, hvor naturlige tracere som temperatur og vands stabile isotoper sammen med parametre for vandkvalitet (f.eks. nitrat/fosfat) bruges til at kortlægge hvor, hvornår og hvor meget vand siver ind/ud, samt hvor det kommer fra. Metoderne med temperatur /1/ og vands stabile isotoper udnytter, at der er en kontrast mellem grundvand og søen, f.eks. er temperaturen af dansk grundvand ca. 8 °C, hvor søen om sommeren eller vinteren er henholdsvis ca. 20 og 2 °C. Fordampning fra søen vil give et større indhold af de tunge ilt-isotoper i søen (18_O, der ikke fordamper så let som 16_O) end i grundvandet, som så også kan udnyttes til at udpege ind/udsivningsområder. Da de anvendte målemetoder alle repræsenterer en punkt skala, er det nødvendigt at opstille en grundvandsmodel, der kan knytte de lokale målinger sammen til et regionalt billede af udvekslingen af grundvand og søvand. Skal belastning med kvælstof til en sø beregnes vil det udgøre Q*CN, hvor Q er grundvandsindsivning og CN er koncentrationen af kvælstof. Begge kan variere betragteligt langs en søbred. Erfaringerne fra CLEAR projektet viser, at der er lettere at bestemme indsivning af grundvand til søer end udsivning af søvand til grundvandsmagasinerne, da udsivningszonen ofte er fokuseret og udgør et mindre areal af søens bund. Udenlandske undersøgelser har lignende erfaringer. Ydermere, er det mere krævende, at bestemme grundvandsbidraget i et leret opland end i et sandet opland.

Landbrugspåvirkning af Hampen Sø

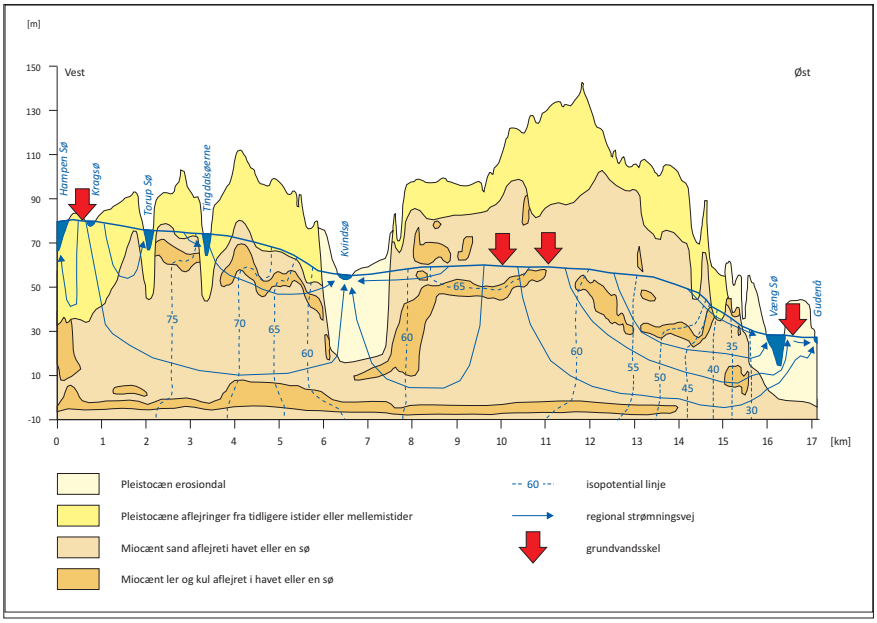
Eksempel: Hampen Sø – en grundvandsfødt sø

Hampen Sø er en såkaldt grundvandsfødt gennemstrømningssø, Figur 4 og 5. Søens opland består primært af skov (77 %), og kun en mindre del opdyrkes (ca. 5 %), Figur 4. Søens vandbalance domineres af henholdsvis grundvandsind- og udstrømning (Figur 3). Indstrømning sker fra nordøst hvor grundvandsstanden er højere end søens vandstand (~ 79 m). Udstrømning sker mod vest, hvor grundvandsstanden er lavere end søens vandstand.

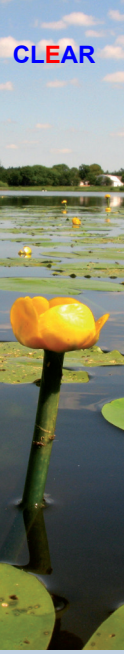
Indstrømning, grundvandets alder og N belastning

Den primære kilde til kvælstofbelastningen er markerne i det nære opland lige nord-øst for Hampen Sø. Indsivning er målt til ca. 0.1-2 cm/dag, hvilket er forholdsvis lavt (1 cm/dag svarer til 10 L/(dag*m2)). Ved søens landbrugspåvirkede indstrømningszone er der foretaget CFC datering, dvs en aldersbestemmelse af grundvandet få meter før det strømmer til søen. Disse viser også at grundvandet er relativt ungt (<10 år gammelt nær grundvandsspejlet til ~ 40 år gammelt i 18 m dybde).

Der er kun en 25 m bred randzone mellem søen og marken. Langs denne randzone (300



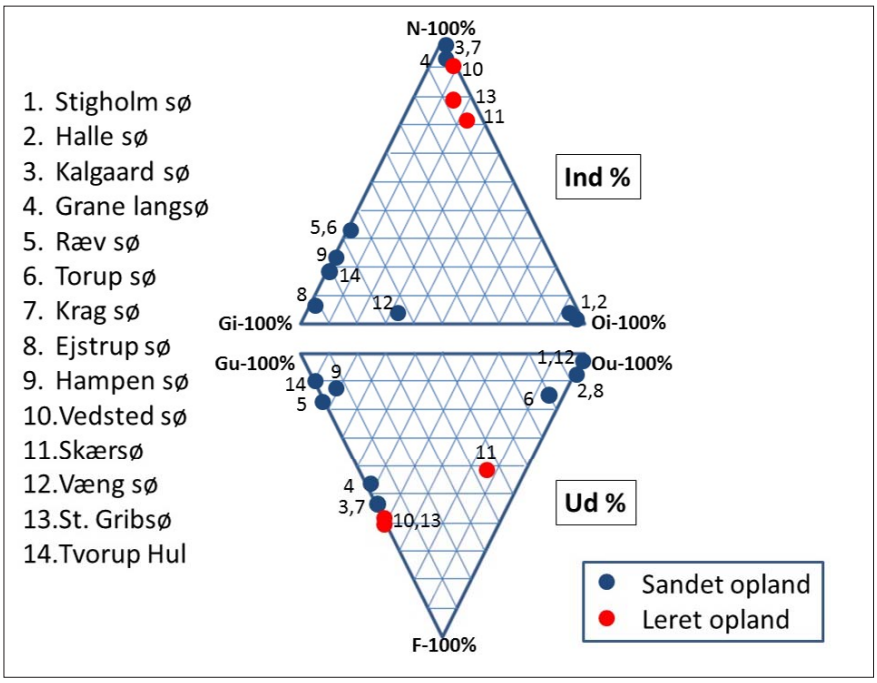
Figur 2. Midtjyske søers placering i et geologisk snit fra Hampen Sø i vest til Væng Sø i øst (fra /2/).



m lang), og i hele grundvandsmagasinets dybde til 18 m, er målt en gennemsnitlig koncentration på 65 mg NO_3/l (54 observationer). Den maksimale koncentration er målt til 175 mg NO_3/l i grundvandet.

Hvornår ville tilstrømningen af nitrat kunne reduceres, hvis kilden forsvandt? Ved hjælp af grundvandsmodellen kan det vises, at efter bare fire år uden udvaskning fra marken (ændret arealanvendelse), vil koncentrationen være halveret. Efter bare 7-9 år vil den være reduceret til baggrundskoncentrationen (få mg NO_3/l). Årsagen til det hurtige fald i udledningen skal findes i det forhold, at markerne ligger så tæt ved søen og meget korte opholdstider (grundvandet er ungt).

N tilførsel fra grundvandet til søen fra marken er med modellen simuleret til 16 ton NO_3/år /3/. Målinger viser, at grundvandet er aerobt stort set op til søbunden. En egentlig omsætning/fjernelse/optagelse af N skal derfor ske i rodzonen under anaerobe forhold.



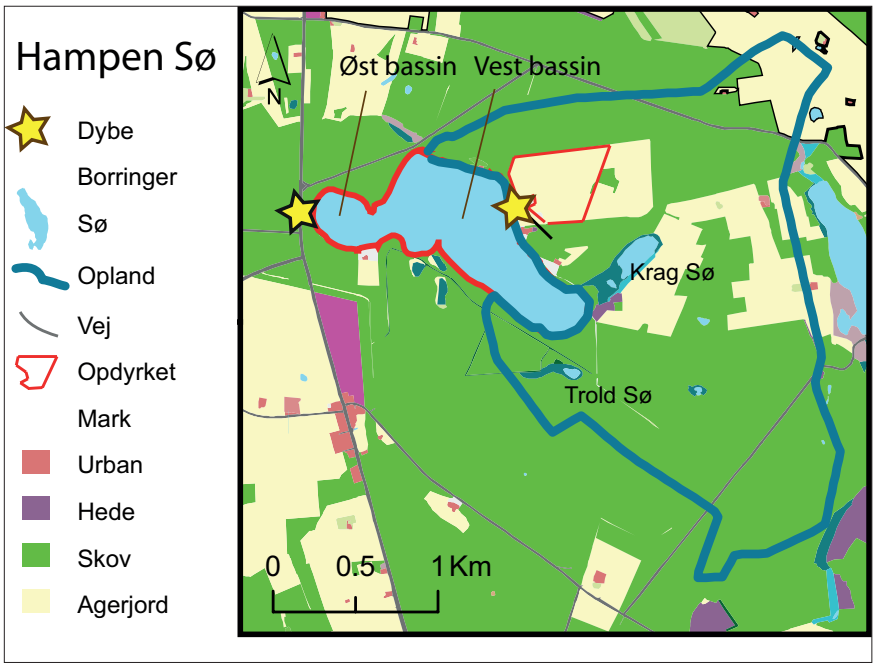
Figur 3. Vandbalancer for søer beliggende i både sandede og lerede oplande.

Udstrømning

Ud fra måling af den hydrauliske gradient mellem søen og det omgivende grundvandsmagasin, langs den vestlige søbred, har det ikke været mulig at påvise nogen egentlig udstrømningszone i søbredden. En kampagne med installation af vandstandsrør i centrale dele af søen blev iværksat. Denne kampagne viste høje negative hydrauliske gradienter, dvs. udstrømning, på en forhøjet tærskel midt i søen, hvor aflejring af lav-permeable søsedimenter ikke findes. Udstrømning fra denne zone bekræftes af stabil-isotop-målinger i en boring ved den vestlige side af søen, hvor sø-værdier af $\partial 18_O$ ses mellem 10 og 27 meter under terræn ses, Figur 5.

Perspektivering

Den ny viden bør udnyttes i den næste generation af Statens Vandplaner. Det vil kræve en indsamling af data med udgangspunkt i søers placering i landskabet, geologiske forhold og klimatiske forhold på de specifikke steder. Med et måleprogram kan grundvandsbidraget til og fra søen kunne bestemmes med udgangspunkt i værktøjskassen udviklet i forbindelse med CLEAR projektet.



Figur 4. Hampen Sø og opland.

Referencer

/1/ Engesgaard, P., Jensen, J.K., Karan, S., Kidmose, J.B. og Nilsson, B. 2009: Varme som tracer for udveksling mellem grundvand og overfladevand. Vand & Jord 3, 109-113.

/2/ Kazmierczak, J. 2014: Hydrogeology and hydrochemistry of groundwater-dominated lakes: from catchment to the groundwater-lake interface. PhD afhandling fra Institut for Geovidenskab og Naturressourcer, KU.

/3/ Kidmose, J., Engesgaard, P., Ommen, D.A.O., Nilsson, B., Flindt, M.R. og Andersen, F.Ø. 2015: The role of groundwater for lake-water quality and quantification of N-seepage. Groundwater 53, 709-721.

Bertel Nilsson er seniorforsker i Hydrologisk Afdeling, GEUS. E-mail: bn@geus.dk

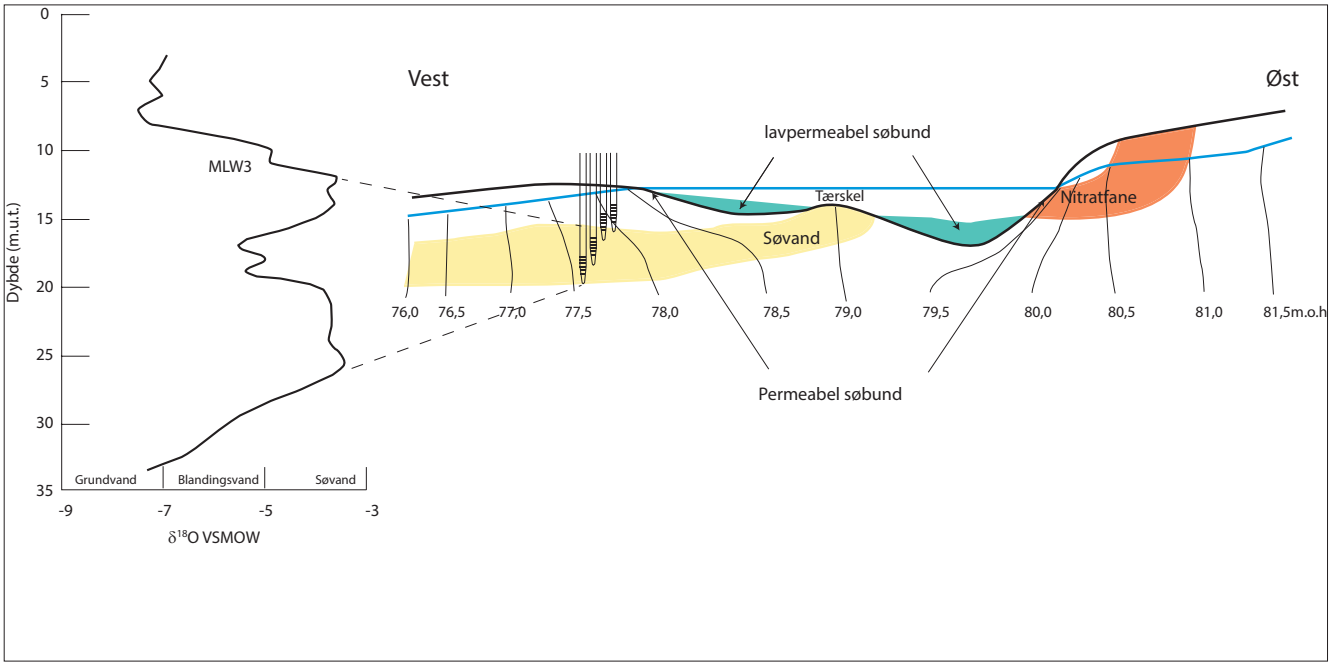
Peter Engesgaard er professor på Institut for Geovidenskab og Naturressourcer, KU. E-mail: pe@ign.geo.ku

Jacob B. Kidmose er seniorforsker i Hydrologisk Afdeling, GEUS. E-mail: jbki@geus.dk

Jolanta Kazmierczak er Post Doc i Geokemisk afdeling, GEUS. E-mail: jka@geus.dk

Boks 2. Metoder anvendt til bestemmelse af grundvandsbidraget til værkstedssøerne

Metode	Parameter	Bemærkning
Pejlinger	Hydraulisk gradient (i) mellem grundvand og søens overflade (i=△ h/L)	Kræver en boring tæt ved søbredden. Viser kun retning af udveksling (ind/udstrømning). Hurtig ligevægt i sand og meget langsomt i ler. Kan være svær at måle præcis da forskellen mellem det hydrauliske trykniveau i grundvand og søens vandstand kan være < △ h 1 cm. L er afstand mellem boringens filter og søbund.
Darcy	Fluks (q) og hydraulisk ledningsevne af søbund (K)	Fluksen i et punkt bestemmes ved q=-K*i (m/d). K bestemmes ved hydrauliske tests eller kornstørrelsesfordeling. Ønskes fluksen over et bestemt areal (A) bestemmes den ved Q=q*A (m^3/d).
Tracer	Q (m^3/d), bestemt ved:	
	Vand (indsivning)	Direkte måling ved brug af seepagemetre
	Stabile isotoper (ilt)	Indirekte måling; effektiv til at skelne mellem grundvand og sø. Ved brug af model kan indsivning (q) udregnes.
	Temperatur	Indirekte måling; effektiv til at skelne mellem grundvand og sø. Ved brug af model kan indsivning (q) udregnes.
	Aldersdatering (fx CFC)	Lokale og regionale strømninger samt tilsyneladende alder fastlægges
	Næringsstoffer	Nyttig til kortlægning af næringsstofbelastning
Modellering		Effektiv til integration af dynamiske grundvand-sø systemer. Beregner udveksling (Q) mellem grundvand og sø.



Figur 5. Konceptuel skitse over Hampen Sø med indstrømning i nordøstlige del af søen, herunder nitratfanen fra et nærtliggende område (rød), samt udstrømning på en tærskel mellem det flade vestlige og dybe østlige bassin. Bemærk højere hydraulisk trykniveau i grundvandsmagasin nord-øst for søen (blå streg) og lavere vest for søen i forhold til søens vandspejl. Mens den lavpermeable søbund i det vestlige bassin består af nedbrudt tørv, fra en periode med ca. 2-3 meter lavere vandstand, består den lavpermeable søbund i det østlige dybere bassin, af gyttja. Til venstre er vist profil af indhold af vands stabile isotoper. Hampen Sø har et indhold på ca. -3.5 o/oo hvilket kan genfindes i dybere mellem ca. 10 og 27 m (gule fane).