

# **Erfaringer med planlægning af sørestaurering i Danmark.**

## **Indledende forundersøgelser – Fremgangsmåde og principper**

Av Henrik Lynghus og Jan Agerholm Høybye

Henrik Lynghus er seniorrådgiver og gruppeleder  
Jan Agerholm Høybye er seniorrådgiver med Ph.D.  
Begge arbejder i COWI A/S, Afdelingen for Vandressourcer og Naturgenopretning,  
Parallelvej 15, DK-2800 Lyngby, Danmark

*Innlegg på fagtreff i Vannforeningen 16. oktober 2006*

### **Sammenfatning**

I forbindelse med det omfattende danske nationale overvågningsprogram som blev påbegyndt sidst i 1980'erne, og siden de to ambitiøse vandmiljøhandlingsplaner, er der etableret en omfattende viden om søers dynamik samt en række erfaringer med naturgenopretning, herunder sørestaurering. Én af de mange erfaringer, der er gjort er, at sørestaureringsprojekter uden grundige og målrettede forundersøgelser indebærer en betydelig risiko for ikke at bringe søens tilstand tilbage til det forventede. En anden erfaring er, at data og dokumenteret viden om den enkelte sø er alfa og omega i vores bestræbelser på at forstå og forbedre vandmiljøet.

I en verden med begrænsede ressourcer bør det derfor være et mål, at overveje og udvikle procedurer, analysemetoder og restaurerings-

metoder, der udnytter de til rådighed værende ressourcer bedst muligt og mest optimalt. Ingen eller kun sporadiske forundersøgelser har tidligere ført til gennemførelse af restaureringstiltag, der af samme årsag har været baseret på en forkert forståelse af søens og oplandets historie og dynamik - og som derfor ikke har medført den forventede forbedring af søens kvalitet.

Efterhånden er der udviklet talrige avancerede og komplekse vandkvalitetsmodeller, og man må forvente at modeller vil få en større betydning i årene fremover. Men selv avancerede distribuerede modeller er, i modsætning til den almindelige forventning, ofte grove kopier af virkeligheden, og både parametre og input data er usikre størrelser eller processer. Følgelig er modellernes resultater også usikre størrelser, hvilket igen har en afgørende betydning for pålideligheden

i de efterfølgende vurderinger og beslutninger. Det er derfor vigtigt, for at sikre en troværdig anvendelse af miljøtekniske modeller, at der foretages en behørig analyse af størrelse og karakter af de usikkerheder, som altid vil forekomme i data og modeller. Usikkerhederne i forudsigelserne skal reduceres til et acceptabelt niveau, der afspejler omfanget og betydningen af de efterfølgende beslutninger.

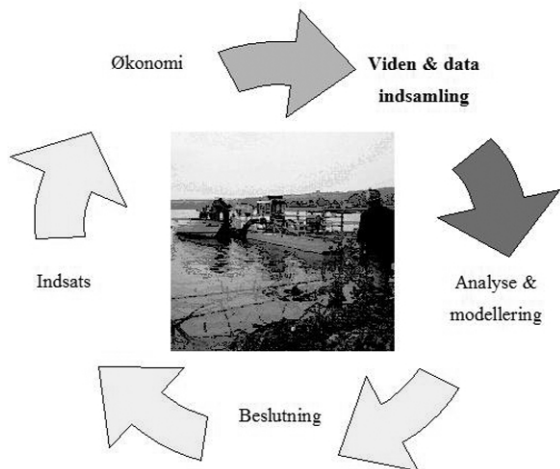
Denne artikel giver en sammenfattet gennemgang af formål med og indhold af forundersøgelser samt en kort introduktion til begrebet usikkerhed, og hvordan endda en simpel usikkerhedsanalyse kan forbedre beslutningsgrundlaget.

## Introduktion

Planlægning og udførelse af naturgenopretningsprojekter, f.eks. sørestaurering, er ofte tværfaglige og komplicerede, da de skal medtage årsager og effekter fra mange forskellige fagområder. Natur og miljø indgår som en integreret del i mange menneskers liv og hverdag på linie med industri, landbrug, fiskeri, rekreative aktiviteter, byplanlægning og trafik. Vand og vandets kvalitet er en del af dette kompleks af ofte konkurrerende krav fra de forskellige brugere, som hver især ønsker deres krav opfyldt, måske endda uden hensyntagen til de øvrige. Hertil kommer de

samfundsmæssige aspekter som f.eks. sundhed og økonomisk udvikling (lokalt/regionalt eller nationalt).

Både det tekniske og faglige grundlag for at træffe beslutninger og den efterfølgende detailplanlægning, indgreb, administration og overvågning af vandmiljøet, er grundlæggende baseret på undersøgelser og data, der skal beskrive hele dette kompleks. Konsekvensen er, at resultater fra målinger foretaget i felten eller resultater af modelsimuleringer ikke længere er slutproduktet. Derimod skal alle data og modelberegninger oversættes til miljømæssige, sociale og økonomiske størrelser, der skal indgå i den større beslutnings-sammenhæng. I vandplanlægning og naturgenopretning – som i så mange andre sektorer – er beslutningerne baseret på relationer mellem de vigtige elementer: Økonomi → Viden/data indsamling → Analyse/modellering → Beslutning → Indsats → Økonomi, se *Figur 1*.



*Figur 1. Projektplanlægningscirklen*

Denne interaktion kan eksempelvis illustreres med et par tilbagevendende spørgsmål fra private eller offentlige investorer og interessenter i vandmiljøprojekter (f.eks. naturrestaurering): (1) hvor mange penge skal vi anvende på monitoringsprogrammer og indledende dataindsamling for at sikre tilstrækkelig viden til at gennemføre projektet? (2) hvad er sandsynligheden for at projektet, hvis udformning og mål er baseret på data og modelsimuleringer, bliver en succes?

I denne artikel vil vi forsøge at demonstrere forbindelsen mellem forundersøgelser og valg af metoder i forbindelse med sørestaurering - og at forundersøgelser gennemført med omtanke i langt de fleste sammenhænge er en praktisk og ikke mindst økonomisk fordel.

## **Forundersøgelser – og sammenhæng med valg av metode**

Formålet med forundersøgelser er ofte at gøre rede for to særdeles vigtige forhold:

1. At forstå søens og oplandets dynamik - og identificere huller i vores viden
2. At tilvejebringe et troværdigt grundlag for at vælge den/de rigtige restaureringsmetoder

Valg af restaureringsmetode for f.eks. en forurenede sø forudsætter nemlig, at vi, med en given sikkerhed, kender baggrunden for og forstår årsagerne til den uønskede tilstand, d.v.s. at vi bringer os i stand til at svare på følgende spørgsmål:

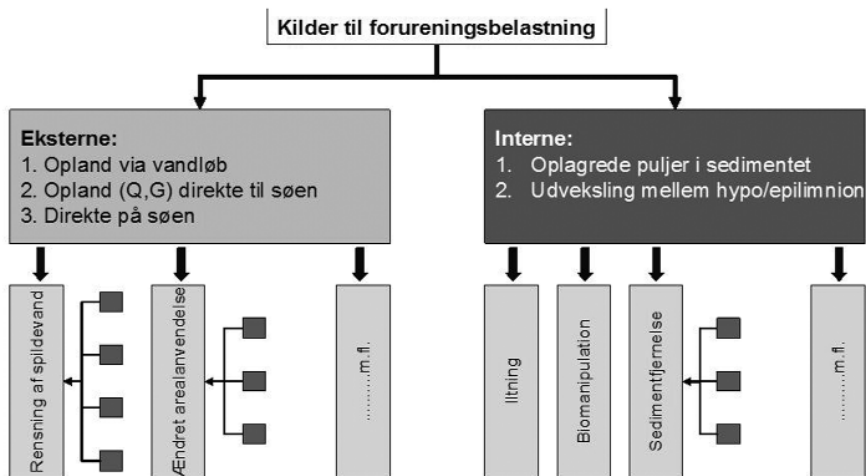
1. Er belastningen primært ekstern eller intern, eller en kombination?
2. Hvordan er fordelingen af de eksterne kilder i sted og tid?
3. Hvorledes er kilder til belastningen rent fysisk lokaliseret?
4. Hvordan foregår processerne i søen – kumulative, reversible eller irreversible?
5. Kan der opstå bieffekter (utilsigtede, positive/negative) i oplandet, søen eller nedstrøms som følge af vores indgreb?

Før beslutning omkring restaureringsmetode, omfang, forventet effekt, tidsforløb, prissætning osv. kan træffes skal disse spørgsmål besvares. En række overvejelser i forbindelse med dette er gennemgået i det følgende.

### Ad. 1: Er belastningen primært ekstern eller intern, eller en kombination?

Der er per definition to kilder til forureningsbelastning, eksterne og interne. De restaureringsmetoder vi har til rådighed er følgelig opdelt på tilsvarende måde; der findes således metoder til reduktion af ekstern belastning og metoder til at reducere en eventuel intern belastning.

For at kunne gennemføre de mest effektive metoder i forbindelse med restaureringen af en konkret sø, er det derfor helt fundamentalt, at årsager identificeres og kvantificeres så korrekt som muligt - set i forhold til opgavens omfang og forventede omkostning. Når det er gjort, vælges en eller flere metoder, der netop



Figur 2. Opdeling af årsager til forurening og tilhørende restaureringsmetoder. Af yderligere metoder kan nævnes rensning af tilløbssvand, ændring af tilstrømning og renovering af kloakker (eksterne), og kemisk fældning (interne).

passer til de dokumenterede problemer.

Ad. 2: Hvordan er fordelingen af de eksterne kilder i sted og tid?

Den eksterne forureningsbelastning opstår forskellige steder i oplandet til søen - hvilket også inkluderer søens overflade, f.eks. i forbindelse med luftbåren forurening eller belastning direkte på søen. Samtidig vil der, afhængigt af årsagerne, være forskellige tidslige variationer i den måde forureningen bliver transporteret til søen på. Visse typer forurening, f.eks. kvælstof, vil primært være tæt koblet til nedbøren. I perioder med kraftig eller vedvarende regn, øges transporten af kvælstof fra landbrugsområder til vandløbene og videre til søer og kyster. Andre typer forurening stammer fra udledningen af spildevand, hvilket typisk er en

relativ tidskonstant tilførsel, der er uafhængig af årstider, vejr og vind.

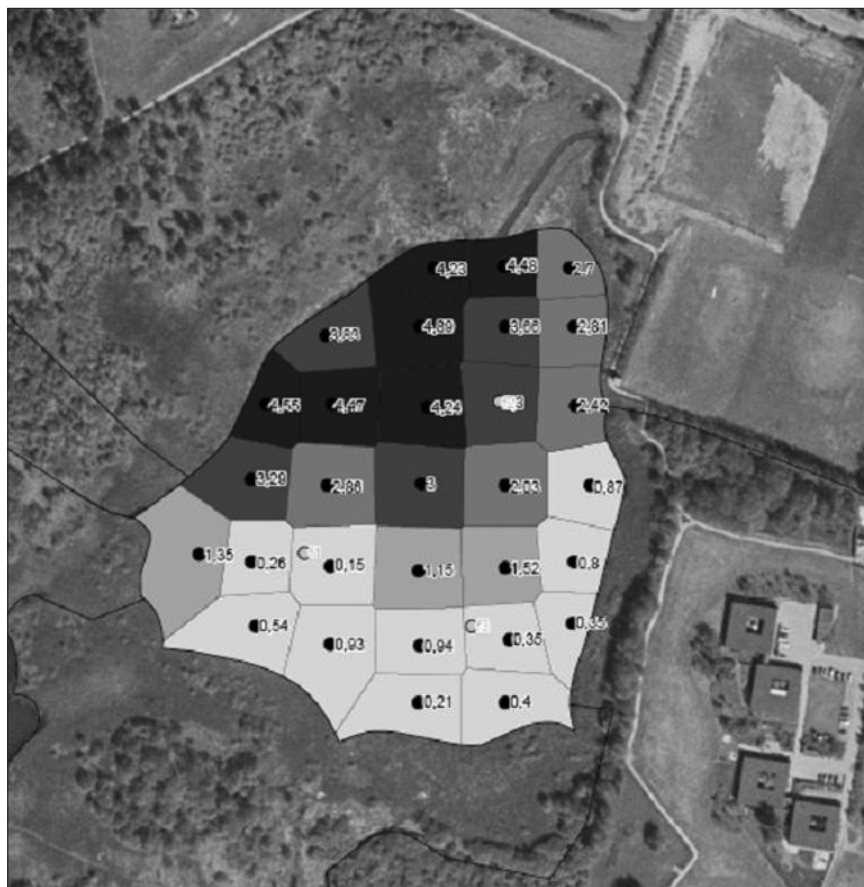
Foranstaltninger til reduktion af den eksterne belastning skal naturligvis foretages så tæt på kilden som muligt - og på tidspunkter, der sikrer at både den samlede belastning og årstidsvariationen kan klarlægges. Især er det fundamentalt at identificere de maksimale belastninger, der oftest forekommer som stødbelastninger over meget korte tidsrum.

Ad 3: Hvorledes er kilder til belastningen rent fysisk lokaliseret

Interne forureningskilder i søen er oftest bundet til søens sedimenter, enten permanent eller i bestemte perioder af året. Og ofte er sedimentets sammensætning og lagfølge historisk defineret. Sediment i tidligere eller eksisterende spildevandspåvirkede søer har ofte et øverste lag,

der er langt kraftigere påvirket af næringsstoffer end de underliggende sedimenter, der stammer fra perioder

før søen blev påvirket af spildevandsudledning.



Figur 3: Kortlægning af fosforfrigivelsespotentiale fra sediment. (Mørk = høj koncentration, Lys = lav koncentration)

I sådanne søer er det vigtigt at kende sedimentets art i varierende dybder gennem stratificerede analyser. tilsvarende er det afgørende for valg af indsats at kende de årlige pulser og variationer i stofkoncentrationer, der forekommer gennem optagelse eller frigivelse af forurenende nærings-

stoffer imellem søvandet og søens sediment. I større søer vil sedimentation af partikelbunden forurening (f.eks. fosfor og tungmetaller) foregå i områder, hvor strømningshastigheden er lille. I visse tilfælde kan der derfor også være store stedlige forskelle i den interne belastning. Når man skal

vælge metoder til fjernelse/fiksering af intern belastning, er det følgelig meget vigtigt at lokalisere de områder, hvor sedimentationen er foregået i tidens løb - og hvorfra f.eks. fosforfrigivelsen nu finder sted.

Ad. 4: Hvordan foregår processerne i søen – kumulative, reversible eller irreversible?

Søer er komplekse verdener, der indeholder en mængde indbyrdes relationer mellem de forskellige fysiske, kemiske og biologiske/økologiske processer. Når søen bliver belastet udover det mange-dimensionale rum, der (af og til og med noget besvær) kan karakteriseres som naturligt, så vil en række processer og sammenhænge blive ændret, afbrudt og/eller skabt som følge af det ændrede miljø.

Visse af disse processer kan genetableres indenfor en rimelig tidshorisont - forudsat at forureningsbelastningen ikke har været så omfattende, at fundamentale forhold i søen er ødelagt. Sådanne processer/

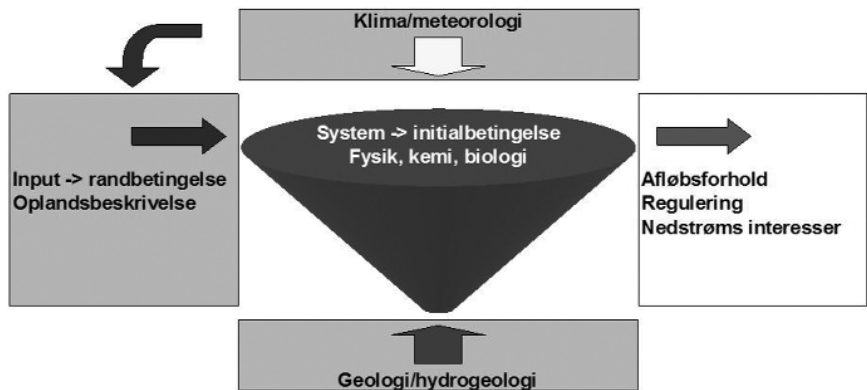
mekanismer kaldes reversible. Hvis den naturlige tilstand ikke kan genskabes, kaldes skaderne irreversible. En del af forundersøgelsen bør derfor undersøge om den konstaterede forurening har bragt søen over i en tilstand, hvorfra det kun meget vanskeligt eller eventuelt slet ikke er muligt at vende tilbage til den naturlige tilstand.

Ad. 5: Kan der opstå bieffekter (utilisgtede, positive/negative) i oplandet, søen eller nedstrøms som følge af vores indgreb?

Endelig skal søens nærområde og de nedstrøms liggende områder undersøges med henblik på at vurdere, om der her kunne være effekter (positive og/eller negative) af en eventuel sørestaurering, inklusive de metoder, der forventes at blive anvendt.

**Indhold af forundersøgelsen**

Forundersøgelser i forbindelse med søer og sørestaurering bør tage udgangspunkt i en overordnet systembetragtning, se Figur 4.



Figur 4: En skematisk beskrivelse af en sø og dens omgivelser og indflydelsessfære

Helt generelt kan søer anskues ud fra den klassiske system-teori: *Input* → *System* → *Output*, hvor pilene antyder procesretningen og afhængigheden mellem de tre forskellige stadier. I almindelighed har søen (*System*) ingen indflydelse på tilløb (*Input*), mens afløbet (*Output*) er en funktion af *System* og ikke omvendt. De processer og forhold (randbetingelser), der driver søens liv og karakter udgøres af tilstrømningen fra oplandet og de gældende meteorologiske forhold (nedbør, temperatur, vind, hydrologi, jordbundsforhold, næringsindhold, etc.). Søen selv består af en fysisk ramme (udformning, areal, volumen, etc.) og den kemiske/biologiske struktur, disse givne rammer og omgivelserne giver mulighed for. De fleste søer har et afløb, hvorigennem overskydende vand strømmer til de nedstrømsliggende områder. Enkelte søer har intet naturligt afløb og fordampningen (og måske udsivning til grundvandet) er den eneste mekanisme, der fjerner vand fra søen. Visse stoffer kan ligeledes borttransporteres fra søens overflade via luften, men de fleste stoffer vil blive akkumuleret i søen, i vandfasen eller i sedimentet.

Forundersøgelser vil typisk blive gennemført i to trin ((1) indledende identifikation af søens tilstand, de primære forureningskilder og karakteristika; og (2) supplerende undersøgelser) og efter ovenstående principper:

### Input

De primære eksterne processer, der styrer søens biologi og vandkvalitet

udgøres primært af de meteorologiske (nedbør, temperatur, fordampning) og hydrologiske (afstrømning, tilløb/afløb, grundvand) forhold. Derudover har arealanvendelsen (både nu og før) i oplandet (diffuse kilder og punktkilder) en stor betydning for, hvilke forureningsmængder, der bliver - og tidligere er blevet - tilført søen. I forbindelse med vurderingen af eventuelle restaureringstiltag, skal man desuden beskrive den forventede fremtidige udvikling i oplandet, d.v.s. planlagt byudvikling, landbrug, skovbrug, ændret spildevandshåndtering samt mulige klimaændringer.

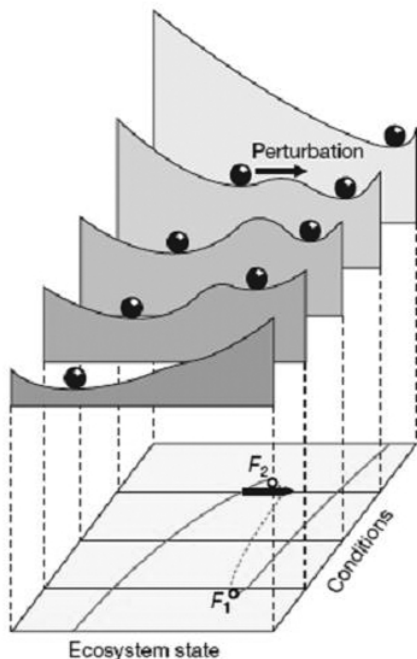
### System

Søen selv beskrives v.h.a. en række fysiske og morfologiske data såsom:

- Klima/meteorologi
- Geografisk orientering (e.g. i forhold til vind)
- Areal, vanddybde (bathymetri), vandvolumen (lagdeling)
- Geologi/hydrogeologiske forhold

Søens historie kan give et vigtigt bidrag til kendskabet til søens natur og forståelsen af søens dynamik. Følgende informationer skal så vidt muligt findes og systematiseres:

- Historiske kort, nuværende og tidligere infrastruktur i søens nær-område og andre historiske data
- Menneskelige aktiviteter omkring søen gennem tiden og kvalitative beskrivelser af området, fiskeri, dyreliv, vandstandsvariationer, etc.
- Vurdering af naturlig referencetilstand



Figur 5. Den naturlige referencetilstand kan være klarvandet og næringsfattig eller uklar og næringsrig (eller forskellige kombinationer heraf) som resultat af jordtype, arealanvendelse og meteorologi. (Efter Scheffer et al., 2001)

Endelig skal søens aktuelle tilstand (baseline) beskrives for at kunne vurdere ændringer og konsekvenser af de planlagte tiltag (initialbetingelse):

- Vandkvalitet i søen (indikatorparametre) og årstidsvariation
- Sedimentkarakteristik (type, mængde, fordeling, stratificering)
- Fauna (arter, antal, fordeling og årstidsvariation)
- Flora (arter, antal, fordeling)

#### Output (det nedstrøms opland)

For at fuldstændiggøre forundersøgelsen skal der foretages en

beskrivelse af nedstrømsliggende arealer, interesser og naturlige forhold. De forskellige restaurerings tiltag, der måtte finde anvendelse, kan have forskellige virkninger på nedstrømsliggende områder. Disse effekter kan være både positive (fosforfældning, der vil have en positiv effekt på eventuelle nedstrømsliggende søer) og negative (forkert doseret iltning kan medføre en øget fosfortransport ud af søen), og skal inddrages i analysen af de mulige konsekvenser.

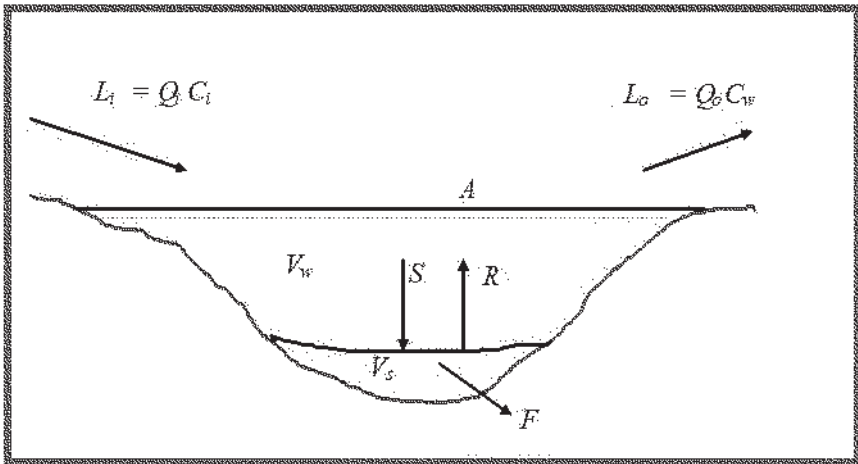
## **Indledende undersøgelse**

### Anvendelse af fysisk-baserede matematiske modeller

Oftentimes anvender vi matematiske modeller af varierende kompleksitet til at analysere søens tilstand og de mulige konsekvenser af forskellige tiltag. Før vi med passende sikkerhed kender årsagen til forureningen, d.v.s. hvordan fordelingen er mellem eksternt tilført stof og intern forurening, der ligger akkumuleret på søens bund, kan man nemlig ikke tilrettelægge det optimale restaureringsprogram.

Det er kendt, at ingen sø bliver ren ved blot at fjerne de interne kilder. Den eneste metode, der kan sikre en permanent ren sø, er at reducere de eksterne forureningskilder til et acceptabelt niveau. Vidundermidlet er desværre endnu ikke opfundet og bliver det nok heller ikke. Det primære virkemiddel vil altid være at finde gennem aktiviteter udenfor søen, der sikrer kontrol over de eksterne kilder.





Figur 6. En simpel vandkvalitetsmodel. Symbolerne angiver:  $Q$  er vandføring,  $C$  er koncentration,  $M$  er masse,  $V$  er volumen,  $A$  er søens areal,  $S$  er sedimentation,  $R$  er frigivelse, og  $F$  er permanent binding i sedimentet.

Sammenhængen mellem de interne og de eksterne kilder er illustreret i det følgende eksempel, der viser en simpel massebalancemodel. Hvis man for eksemplets skyld beskriver en sø som en kasse med to lag (vand og sediment), så kan man principielt beskrive udviklingen i tilstanden (ændringen af et givet stof med koncentrationen  $C$ ) i søen ved en første-ordens differentilligning på formen:

$$V \frac{dC(t)}{dt} \{ T_{ind} - T_{ud} - T_{sediment} \} - Q_i C_i - Q_o C(t) - k_s A C(t) \quad (1)$$

hvor  $V$  er søens volumen,  $A$  er søens areal,  $Q_i$  er tilstrømning ( $m^3/s$ ),  $C_i$  er koncentration i tilstrømningen ( $g/m^3$ ),  $Q_o$  er afløbsvandføringen og  $k_s = f(S, R, F)$  er netto-sedimentationsraten. Denne box-model har løsningen:

$$C(t) = C(0)e^{-\beta t} + \frac{L}{\beta} \{ 1 - e^{-\beta t} \} \quad (2)$$

hvor  $L$  er den volumen-specifikke eksterne belastning ( $Q_i C_i / V$ ), og  $\beta$  er en parameter, der beskriver selve søens reaktionsevne, og som inkluderer effekter af f.eks. sedimentation og lagdeling. Denne parameter er omvendt proportional med søens effektive tidsskala ( $\tau_w$ ), der er et udtryk for den gennemsnitlige opholdstid af et givet stof. Det skal bemærkes, at  $\tau_s$  er forskellig fra den hydrauliske opholdstid ( $\tau_w$ ), der er defineret som forholdet mellem søvolumen og afløbsvandføring.

Størrelsen  $L/\beta$  er lig med søens ligevægtskoncentration, d.v.s. når begyndelsestilstanden er klinget af og der er indtruffet en balance mellem tilført og fjernet stofmængde. Det ses

dermed, at den eksterne belastning (udtrykt ved  $L$ ) alene bestemmer søens endelige tilstand, mens den interne belastning, der indgår i udtrykket for søens effektive opholdstid (reaktionstid)  $\tau_s = 1/\beta$  (hvor  $\beta = \frac{Q_u}{V} + k_s A$ ), alene bestemmer hastigheden hvormed restaureringstiltag vil have en effekt. Populært sagt, så afgør størrelsen af den eksterne belastning søens endelige tilstand, mens omfanget af interne restaureringstiltag primært vil have en indflydelse på, hvor lang tid der går, før ligevægtstilstanden indtræffer. Hvis netto-sedimentationsraten,  $k_s$ , er stor i forhold til afløbsvandføringen, så bliver opholdstiden mindre og ligevægtskoncentrationen reduceres. En væsentlig og effektiv reduktion af den interne belastning (d.v.s. hvor  $k_s A$  er af samme størrelsesorden som  $Q_u$ ) vil derfor også kunne bidrage til at forbedre søens fremtidige tilstand. Modeller kan på denne måde hjælpe til at organisere data og analysere reaktionsmønstre, effekter og responstider af en række mulige restaureringsindgreb.

### Usikkerheder i data og modeller

Det er imidlertid en udbredt tro, at matematiske modeller giver et sandt billede af den virkelighed de trods alt kun er kopier af, måske fordi de kan være uhyre komplicerede og producere overbevisende farvebilleder og animationer af strømninger eller udbredelsen af en lokal forurening. Men modeller, uanset deres kompleksitet og præsentationsfaciliteter, er ikke bedre end de data (både kvalitet og kvantitet) som de fodres

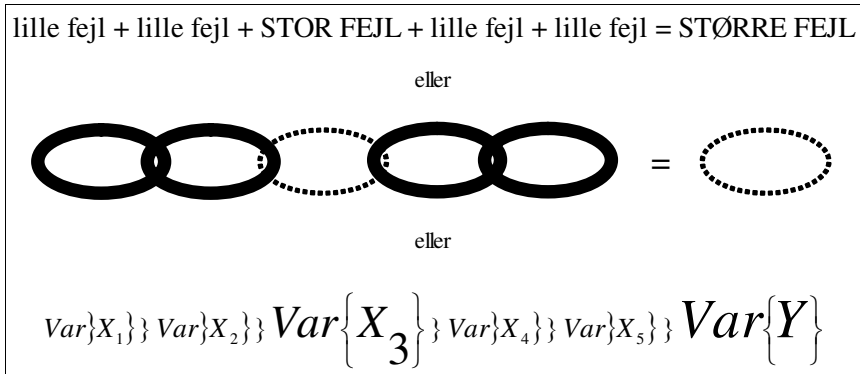
med – og data er også usikre størrelser. Faktisk er variation, spredning og fejl – sammenfattet i begrebet 'usikkerhed' – mere reglen end undtagelsen. Det gælder også data, der bliver indsamlet rutinemæssigt til overvågning af vandkvaliteten, og data som vi reglen opfatter som konstante er per definition usikre størrelser. Eksempelvis vil et sæt af kemiske analyser udtaget i et vandløb eller afløbet fra et renselanlæg resultere i forskellige koncentrationsværdier, enten som følge af reelle ændringer i koncentrationen, eller fordi prøvetagningen ikke har været repræsentativ. Endda vil den samme vandprøve, sendt til kemisk analyse på forskellige laboratorier, give forskellige koncentrationsværdier som følge af forskellige laboratorieprocedurer og analysemetoder.

Denne kæde af usikkerheder som ophobes fra prøvetagning i søer og vandløb, naturlig variation, repræsentativitet, laboratorieanalyser, tolkning, omsætning af koncentrationsdata til stoftransport og så videre, vil naturligvis influere kalibreringen af modellerne og dermed deres evne til at beskrive det betragtede system. Det er derfor vigtigt at foretage en vurdering af størrelsesordenen af de enkelte fejlkilder inden modellens resultater anvendes i beslutningstagningen.

En anden udbredt tro er nemlig, at det er antallet af (relative) fejl der har den største betydning, frem for den absolutte størrelsesorden, og at fejlene i øvrigt udjævner hinanden. Fejl i data og beregninger skal ses i en sammenhæng, og det kræver en analyse af

hvert usikkerhedselement som indgår i en model eller beslutning. Hvis der blot findes en enkelt absolut stor

fejlkilde vil nok så mange minimale fejlbidrag ikke kunne reducere virkningen herfra.



Figur 7. Illustrationer af fejlophobningsloven

Datausikkerheder kan inddeles i de tre hovedgrupper:

- Usikkerheder i belastningsdata
- Usikkerheder i fysiske data
- Usikkerheder i proces/interne data (primært sedimentation/frigivelse)

Det kan vises (Høybye), at den tidligere massebalancemodel (ligning 2) kan løses som en stokastisk differentiaalligning, hvoraf den relative usikkerhed (variationskoefficienten CV) på ligevægtskoncentrationen i søen kan bestemmes som:

$$CV_{C_{we}} = \sqrt{CV_{Q_i}^2 + CV_{C_i}^2 + \frac{1}{(1 + \gamma_s)^2} CV_{Q_u}^2 + \frac{1}{(1 + 1/\gamma_s)^2} CV_{k_s}^2 + CV_A^2} \quad (3)$$

hvor  $\gamma_s = Q_s/Q_u$ ,  $Q_s = k_s A$  og  $k_s = k_s' k_F$ . Det ses af faktorerne foran de enkelte led, at usikkerheden på den eksterne belastning ( $Q_i$  og  $C_i$ ) altid tæller med fuld vægt (= 1), uanset søens udformning og sedimentkarakteristik i øvrigt. Bidraget fra usikkerheden på afløbsvandføringen (det tredje led) er afhængig af forholdet mellem afløbsvandføringen selv og den effektive nettosedimentation ( $k_s A$ ). Hvis  $Q_u$  dominerer, så går vægten mod 1.

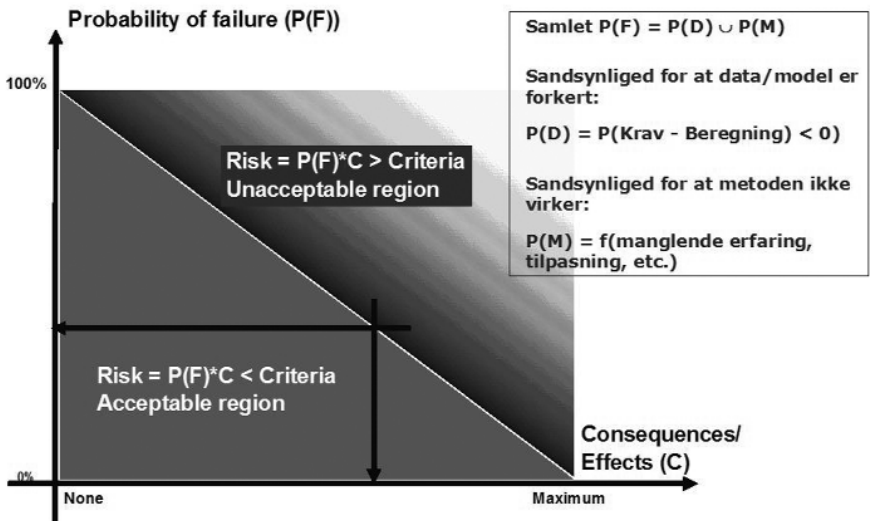
Omvendt for søer, hvor nettosedimentationen er større end afløbsvandføringen - her vil usikkerheden på afløbsvandføringen være af mindre betydning, hvorimod større præcision skal sikres i bestemmelsen af søens geometri og sedimentkarakteristika og -historie. På denne måde kan man på baggrund af relativt få generelle data få et overblik søens dynamik og de mest betydende variable/proces.

## Planlægning af tiltag

Som nævnt er kendskabet til usikkerheder - kilder og størrelsesorden - vigtigt, idet de sammen med de øvrige data afgør, om der er data og viden nok til at planlægge og gennemføre de rigtige restaureringsindgreb.

Figur 8 viser den principielle sammenhæng mellem konsekvenser af et

restaureringsprojekt (investering og vedligehold, inklusive summen af mulige positive og negative konsekvenser) og vidensniveau udtrykt ved sandsynligheden for at investeringen/indsatsen ikke vil føre til det ønskede resultat (*Probability of Failure* =  $1 - \text{Probability of Success}$ ).



Figur 8. Sammenhæng mellem projektkonsekvenser (omkostninger og effekter) og den maksimale risiko man kan acceptere for at restaureringsprojektet ikke opnår sit formål

Figuren siger, at hvis investeringen (og konsekvenserne) er små, så kan man acceptere en stor usikkerhed i beslutningsgrundlaget. Hvis projektet fejler, så kan man jo bare gøre det om uden de store udgifter. Hvis investeringen og de mulige negative konsekvenser derimod er betydelige, så skal man sørge for, at sandsynligheden for succes er tilsvarende stor. Og da vi

ofte baserer beslutninger på baggrund af data og modelberegninger, så er det af afgørende nødvendighed, at vi kan etablere en sammenhæng mellem data, beregninger, usikkerheder og beslutninger.

I forbindelse med sørestaurering er der principielt to primære kilder til fejl (som igen kan inddeles i undergrupper):

1. Data og modelberegninger er behæftede med usikkerheder i en grad, så det ikke er muligt på tilstrækkelig præcis måde at identificere årsager/forureningskilder ( $P(D)$ ); og
2. Den eller de metoder, der planlægges anvendt, skal matche til årsagen - hvilket hænger sammen med ovenstående. Samtidig findes der restaureringsmetoder, der ikke er testet under alle forhold og det er desuden nødvendigt med stor praktisk erfaring i implementering af restaureringsmetoder for at undgå fejl ( $P(M)$ ).
4. Vælg den kombination af metoder, der med størst sandsynlighed giver den største effekt for den laveste pris - med færrest negative bivirkninger. Ofte er en kombination af metoder den mest omkostnings-effektive indsats

Ovennævnte kan ses som en optimeringsprocedure, hvor opgaven er vælge de metoder, der giver enten (1) størst mulig forbedring af forureningstilstanden med en given sikkerhed, hurtigst muligt og indenfor en fast budgetramme; eller (2) et anslået budget til, med en given sikkerhed, at reducere forurenings-niveauet til et fast niveau indenfor en given tidshorisont.

Forbindelsen mellem forundersøgelser og valg af metoder i forbindelse med sørestaurering er derfor åbenlys: Hvis man ikke med investerer i forundersøgelser, som med tilstrækkelig sikkerhed kan give dokumentation for årsager og løsninger, vil restaureringstiltag (og ofte betydelige omkostninger) have en stor risiko for ikke at føre til det ønskede formål.

## Konklusion

Viden er vigtig - og viden om pålideligheden af den viden vi har, er vigtig. Det overordnede formål med forundersøgelser i forbindelse med naturgenopretning og sørestaurering er at etablere et tilstrækkeligt godt data- og vidgrundlag til at træffe de rigtige beslutninger. Værdien af forundersøgelsen er direkte proportional med de forventede omkostninger (investeringer, vedligehold,

Den samlede usikkerhed - sandsynligheden for fejl - er lig med fællesmængden af de to fejlbidrag. Princippet og proceduren i valg af restaureringsmetode(r) er generelt følgende:

1. Gennemfør forundersøgelser og bestem pålidelighed/nøjagtighed af data og beslutningsgrundlag;
2. Vælg et antal mulige restaureringsmetoder
3. For hver mulig løsning/metode, specificeres følgende:
  - Pris (supplerende dataindsamling, anskaffelse/installation, drift og vedligehold)
  - Effekt – målt i reduktion af P, N, BOD, koncentration i søen og tidshorisonten
  - Eventuelle bivirkninger (positive, negative) i oplandet og nedstrøms
  - Sandsynlighed for at metoden virker (inkl. korrekt kildeidentifikation og data/modelpræcision)

nedstrøms effekter) et restaureringsprojekt måtte kræve: Jo større investering, des mere sikker skal man være på, at man ved hvad man gør.

Denne artikel præsenterer formål og indhold af forundersøgelser, samt en procedure til vurdering/vægtning af årsager og konsekvenser. Endvidere præsenteres simple metoder til indledende vurdering af hovedforureningskilder og huller/mangler i den basisviden, der allerede måtte eksistere - eller som i første omgang kan skønnes via kort og arealanvendelser. På den måde kan en forundersøgelse tilrettelægges og optimeres i forhold til projektets formål, skala og fysiske forhold (i og omkring søen samt nedstrøms), søens og forureningens forventede karakter, mulige restaureringsmetoder - og projektets samlede økonomi/budget.

Videre gælder det om at vælge de rette metoder, til analyse såvel som til restaurering, til hvert enkelt projekt. Analysemetoder, primært fysiske-matematiske modeller, skal skræddersys til det konkrete projekt og her gælder den gode gamle regel om at gøre det så simpelt som muligt - hvis en simpel sømodel kan beskrive et givet problem, hvor det fysiske grundlag er veldokumenteret og målemetoderne pålidelige, er det ikke nødvendigt at opstille en mere kompliceret model. På den anden side, hvis der er tale om vigtige beslutninger som f.eks. medfører store investeringer, kan det være nødven-

dig at detaljere analysegrundlaget og vurdere modelsimuleringernes og resultaternes pålidelighed (usikkerhed) - samt risikoen for at beregningerne ikke beskriver virkeligheden med den efterfølgende risiko, at projektet ikke opfylder det givne formål.

Der er gennem de sidste årtier udviklet, testet og anvendt en lang række restaureringsmetoder til reduktion af henholdsvis eksternt og intern belastning. Også restaureringsmetoderne skal vælges og kombineres i henhold til de aktuelle årsager til forureningen, til økonomien og til de fysiske og infrastruktur-mæssige forhold i og omkring søen. Dette valg blandt mange mulige restaureringsmetoder skal indgå som en del af forundersøgelsen, hvor det skal vurderes, hvordan egnethed og dokumenterede funktionserfaringer bedst balanceres med sikkerheden i beslutningsgrundlag (data og modelberegninger), økonomi og de fysiske forhold.

## Referencer

Høybye, J. Model Error Propagation and Data Collection Design, 1996. An Application in Water Quality Modelling. Water, Air and Soil Pollution, Vol. 103: 101-119.

Marten Scheffer, Steve Carpenter, Jonathan A. Foley, Carl Folke & Brian Walker, 2001. *Catastrophic shifts in ecosystems*. Nature Vol 413, 11 October 2001 ([www.nature.com](http://www.nature.com))