

SØENS DIGITALE TVILLING

En virksomhedscase udarbejdet af WaterITech, Aarhus Universitet
og Naturvidenskabernes Hus

I samarbejde med



Med støtte fra



PROBLEMBASERET PROJEKTFORLØB

Fosfor – fra problem til løsning?

Fosfor er en begrænset ressource, og det forventes at blive en mangelvare inden for de næste 50-100 år. Specielt i landbruget og industrien er anvendelsen af fosfor høj. Industrielt anvendes fosfor i en lang række produkter for eksempel glasproduktion, rengøringsmidler og i produktionen af stål. I landbruget anvendes fosfor blandt andet til gødning og er et essentielt næringsstof for planter vækst. Fra landbrugsjorden bliver fosfor i nogen grad transporteret ud til vandløb, søer og marine områder via overfladisk og underjordisk afstrømning. Hvor fosfor fra industrien i højere grad transporteres ud i vandmiljøet via spildevand.

Cirka 25 % af alt fosfor går tabt fra fosforkredsløbet, hvor det blandt andet bliver begravet i sedimenter i søer. Her bliver det f.eks. bundet i svært nedbrydelige organiske forbindelser eller lagres som ionforbindelser i porevandet i sedimentet, hvorfra fosfor i form af fosfat kan frigives til det overliggende vand, hvor det fører til eutrofiering af vandmiljøet.

Manglen på fosfor kan i fremtiden risikere at føre til hungersnød og ændret global magtbalance. I Danmark er fosfor kendt som et problematisk grundstof, der skaber algeopblomstring og forurening af søer.

I et stort tværfagligt projekt omkring Ormstrup Sø i Midtjylland er forskere fra Aarhus Universitet, Aalborg Universitet, Københavns Universitet, Danmarks Tekniske Universitet, Syddansk Universitet samt ingeniørfirmaet DIS gået sammen omkring det overordnede spørgsmål:

Kan vi genskabe en klar sø fuld af biodiversitet ved at fjerne fosfor og bringe det hen, hvor det gør gavn, ud på markerne?



CASE > SØENS DIGITALE TVILLING

Der findes mange tusindvis af danske søer – alle med unikke naturgivne forhold. Men også med en del fællestræk. Disse fællestræk anvendes til at gruppere søer i forskellige typer, f.eks. klarvandede Lobelie-søer eller næringsrige eutrofe søer.

Søer kan have forskellig pH-værdi – være sure, neutrale eller basiske, de kan være dybe eller lavvandede, være store eller små osv.

Nogle søer er kunstigt fremstillede, andre er naturligt dannede.

Danske søer er ofte klare om vinteren, på grund af begrænset sollys, og dermed færre planktonalger. Om sommeren, hvor der er mere lys og varme, formeres algerne og vandet bliver dermed uklart. Hvor klart eller uklart vandet bliver afhænger af mængden af næringsstoffer, der er i søen – specielt er fosfor et afgørende næringsstof i mange søer.

Hvilke fisk der kan trives i en given sø afhænger i høj grad af, hvor klar søen er. I en klar sø dominerer andelen af rovfisk. Jo mere uklar søen bliver, jo flere planktonalger er der i den, og dermed er der også mere dyreplankton, som spiser planteplankton, hvilket giver anledning til flere fredfisk, der spiser dyreplanktonet. Dette betyder, at uklare søer er domineret af fredfisk.

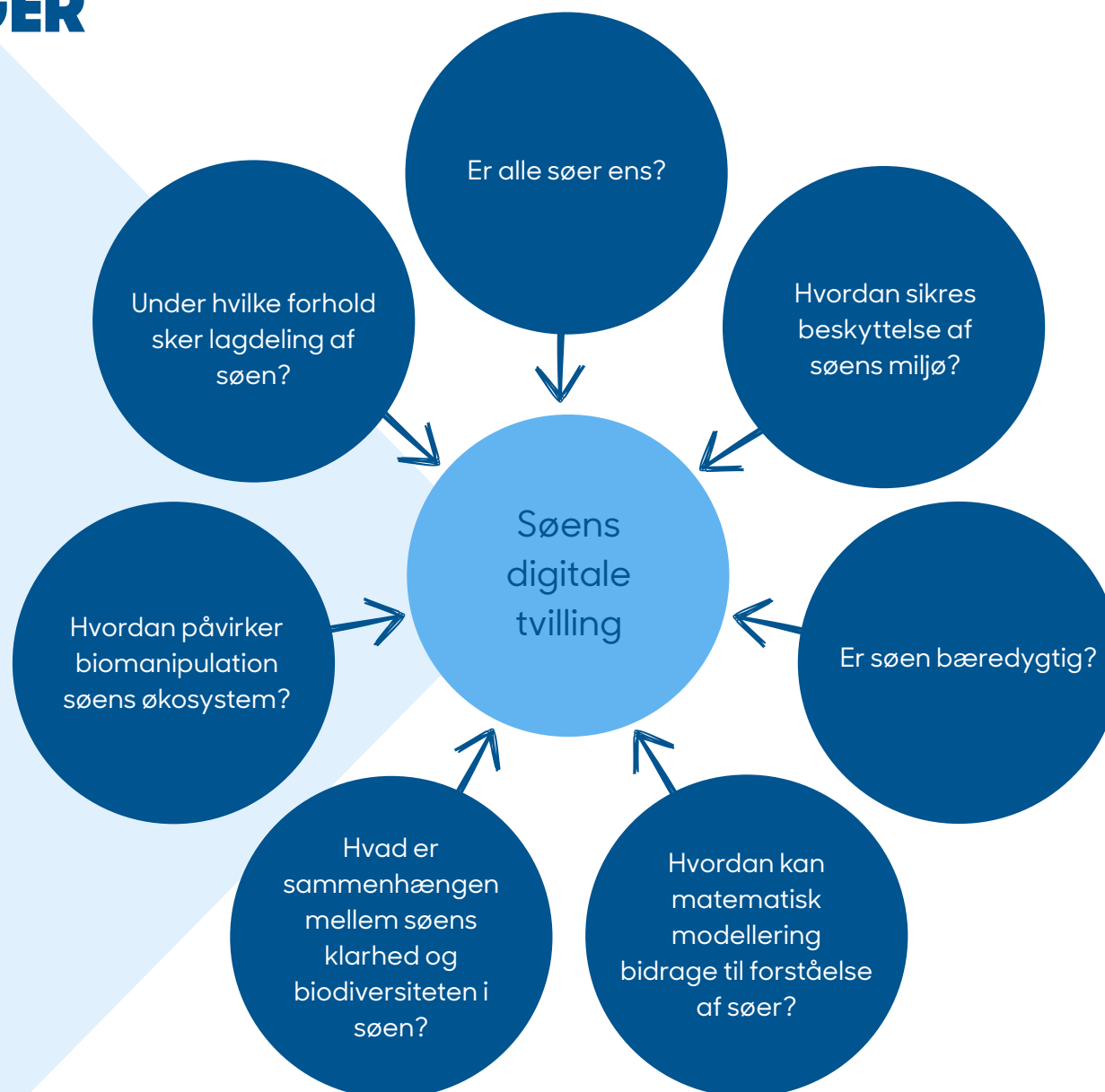
Modelleringsprojektet ved Ormstrup Sø har til formål at skabe en bedre forståelse for mekanismerne, der er på spil i søen, og på denne måde tydeliggøre, hvilke tiltag der er de mest optimale, og dermed hjælpe med at sikre en overgang fra eutrof til klarvandet sø.

Ved Ormstrup Sø er der udlagt en målebøje på søens dybeste sted, der optager data hvert 15. minut. Disse data anvendes løbende til at forbedre modellen. Derudover er det muligt via en hjemmeside at følge fiskenes bevægelser i Ormstrup sø og sammenholde disse data med de aktuelle fysiske forhold i søen. Siden opdateres hvert 30. sekund, og der er blandt andet informationer om den enkelte fisks placering, svømmehastighed og meget andet. Til sammen giver disse højfrekvente data fra søen mulighed for at etablere en digital tvilling af Ormstrup Sø.

PROBLEMSTILLINGER

Til hver problemstilling er der tilknyttet en materialeliste med forslag til litteratur og aktiviteter. Der er ikke medtaget lærebogslitteratur i materialebanken, da det er forskelligt, hvilket lærebogsmateriale der findes på de forskellige ungdomsuddannelser. Arbejdet omkring den enkelte problemstilling kan udfoldes i forskellig grad, ligesom problemstillingerne kan tages i tilfældig rækkefølge.

Det er også muligt at arbejde med flere indfaldsvinkler til de overordnede cases ved at undersøge andre problemstillinger end dem, der her er præsenteret eller at udelade nogle af problemstillingerne.



ER ALLE SØER ENS?

Sø-typer

Der findes mange tusindvis af danske søer – alle med unikke naturgivne forhold. Men også med en del fællestræk. Disse fællestræk anvendes til at gruppere søer i forskellige typer, f.eks. klarvandede Lobelie-søer eller næringsrige eutrofe søer. Søer kan have forskellig pH-værdi – være sure, neutrale eller basiske, de kan være dybe eller lavvandede, være store eller små osv. Nogle søer er kunstigt fremstillede, andre er naturligt dannede.

Faktorer, der påvirker søtypen

Søer kan være meget forskellige – både på grund af forskel i jordbundsforhold, morfologi og påvirkning fra søernes oplande. Men også menneskelig påvirkning i form af næringsstoftilførsel har stor betydning for søen.



MATERIALEBANK



Litteratur

[Varmere klima giver mere iltsvind](#)

Aktuel Naturvidenskab (2007) nr. 3

[Søernes balance trues](#)

Virtuel Galathea 3 (Det gode og det onde kredsløb)

[Danske søtyper](#)

Nationalt Center for Miljø og Energi (2018)

[Søtyper i Danmark](#)

Virtuel Galathea 3

[Forundersøgelser af Ormstrup Sø](#)

Nationalt Center for Miljø og Energi (2015)

[Små søer – talrige, oversete og oplagte studieobjekter](#)

Aktuel Naturvidenskab (2017) nr. 4



Aktiviteter

[Arbejdsark – Varmere klima giver mere iltsvind](#)

Aktuel Naturvidenskab (2007) nr. 3

[Quiz om iltsvind](#)

Aktuel Naturvidenskab (2007) nr. 3

[Eksperiment – Lav et springlag](#)

WWF

[Biologi til tiden – Undersøgelse af en sø](#)

Nucleus

[Arbejdsark om søers økologi](#)

Aktuel Naturvidenskab



Figurer

[Søtyper i Danmark](#)

Virtuel Galathea 3

[Det gode og det onde kredsløb](#)

Virtuel Galathea 3

UNDER HVILKE FORHOLD SKER LAGDELING AF SØEN?

Lagdeling

Om sommeren bliver overfladevandet opvarmet af solen og temperaturen af vandet her vil ofte være højere end af det vand, der ligger dybere nede i søen. Koldt vand har en højere densitet end varmt vand, og derfor vil det kolde vand blive liggende nederst i søen. Jo dybere søen er, jo større er sandsynligheden for, at den er lagdelt.

Forskellige lag i søen

På grund af sammenhængen mellem temperaturen og densiteten af vand, vil der kunne ske en lagdeling af søen. Det øverste lag epilimnion er varmt, det mellemliggende lag termoklinen kan ændre dybde afhængigt af døgnrytme og årstid, og det nederste lag hypolimnion er koldere og strækker sig ned mod bunden.

Lagdeling sker oftere end tidligere antaget

Traditionelt måles søers tilstand en gang om måneden eller endnu sjældnere. Undersøgelser ved Ormstrup sø, hvor søens tilstand monitoreres kontinuert viser, at temperatur og iltforhold kan svinge på meget kortere basis end tidligere antaget. Via en live-app kan man få indblik i forskellige parametre relateret til søen.



MATERIALEBANK



Litteratur

[Iltsvind](#)

Miljøbiblioteket 4

[Forskere streamer livet i søer](#)

Aktuel Naturvidenskab (2022) nr. 4

[Temperaturdynamik i små søer – daglig lagdeling og opblanding](#)

Vand og jord (2017) nr. 4

[Danske søer](#)

Videnskabelig rapport fra Nationalt Center for Miljø og Energi (2018) afsnit 4.3



Aktiviteter

[Eksperiment – Lav et springlag](#)

WWF

[Live data fra Ormstrup Sø](#)



Figurer

[Temperaturforløb i en lavvandet sø i løbet af et sommerdøgn](#)

Vand og Jord (2017) nr. 4, fig. 1

[Den maksimale daglige temperaturforskel mellem overfladen og bunden opgjort måned for måned i søer med forskellig dybde](#)

Vand og Jord (2017) nr. 4, fig. 4

[Fordelingen af lagdelte søer som funktion af sø-dybden](#)

Danske Søtyper – Nationalt Center for Miljø og Energi (2018) s. 47, kap. 4.3, fig. 4.3.2

[Konturplot af temperaturfordelingen ned gennem vandsøjlen i Ormstrup Sø over tid](#)

Aktuel Naturvidenskab (2022) nr. 4, s. 17

HVORDAN PÅVIRKER BIOMANIPULATION SØENS ØKOSYSTEM?

Økosystemet i den klare sø

Vandet er ofte klart i en næringsfattig sø, og sollys kan derfor trænge langt ned i vandet og give anledning til plantevækst. Fiskebestanden domineres af større fisk og rovfisk.

Økosystemet i den uklare sø

Ved tilførsel af næringsstoffer til søen (f.eks. fosfat og nitrat) bliver søen ofte uklar pga. opblomstring af planteplankton. Det uklare vand gør det svært for solens lys at nå dybt ned, og derfor kan der ikke gro så mange planter på bunden af søen. Fiskebestanden domineres af småfisk, der æder meget af det dyreplankton, der skulle æde planteplanktonet. Småfiskebestanden er derfor med til at fastholde det uklare vand i søen.

Biomanipulation

For at bryde den onde cirkel, hvor småfiskene spiser dyreplankton, så planteplankton ikke bliver fjernet og søen derfor er uklar, kan man ændre på fiskebestanden. Dette gøres primært på to måder – ved opfiskning af fredfisk (småfisk) eller ved udsætning af rovfisk, der kan spise småfiskene.



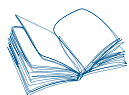
FISHTRACKING

Følg fiskenes bevægelser i Ormstrup sø. Siden opdateres hvert 30. sekund med informationer om fiskenes placeringer, svømmehastigheder og meget andet

SE



MATERIALEBANK



Litteratur

[Små søer](#)

Aktuel Naturvidenskab (2017) nr. 4

[Søens vandkvalitet](#)

Syddansk Universitet

[Evaluerings af de økologiske skadeeffekter i DYRESM-CAEDYM](#)

Aalborg Universitet (2008)

[Biomanipulation](#)

Den Store Danske

[Forundersøgelser af Ormstrup Sø](#)

Nationalt Center for Miljø og Energi (2015)



Aktiviteter

[Arbejdsark – små søer](#)

Aktuel Naturvidenskab (2017) nr. 4

[Fishtracking – hvor er fiskene](#)

Ormstrup Sø, DTU Aqua

[Om dafnier – film om dyreplanktons betydning i en sø](#)

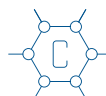
Naturvidenskabernes Hus (2022)

[Biomanipulation i sø – rovfisk og fredfisk](#)

Naturfilm Info (2018)

[Vilde vidunderlige Danmark – søer og vandløb](#)

Danmarks Radio Dokumentar (58 min)



Figurer

[Temperaturforskelle i vandsøjlen i en dyb og lavvandet sø](#)

Aktuel Naturvidenskab (2017) nr. 4. s. 17

[Fishtracking i Ormstrup Sø](#)

Ormstrup Sø, DTU Aqua

[Positiv og negativ kobling mellem trofiske niveauer i en sø](#)

Aalborg Universitet (2008), s. 13, figur 1.1

[Sammensætning af fisk i Ormstrup Sø i 2004 og 2010](#)

Forundersøgelse af Ormstrup Sø, Aarhus Universitet (2015)
s. 10, fig. 1.2

HVAD ER SAMMENHÆNGEN MELLEM SØENS KLARHED OG BIODIVERSITETEN I SØEN?

Søens fiskefauna

Der er stor forskel på, hvor forskellige og hvor mange fisk, der findes i en given sø. Det afhænger af søens størrelse, placering, tilløb af vand fra vandløb, forbindelse til andre søer samt næringsstofindholdet.

Fiskebestand i klar vs. uklar sø

Danske søer er ofte klare om vinteren, på grund af begrænset sollys, og dermed færre planktonalger. Om sommeren, hvor der er mere lys og varme, formeres algerne og vandet bliver dermed uklart. Hvor klart eller uklart vandet bliver afhænger af mængden af næringsstoffer, der er i søen – specielt er fosfor et afgørende næringsstof i mange søer.

Hvilke fisk der kan trives i en given sø afhænger i høj grad af, hvor klar søen er. I en klar sø dominerer andelen af rovfisk. Jo mere uklar søen bliver, jo flere planktonalger er der i den, og dermed er der også mere dyreplankton, som spiser planteplankton, hvilket giver anledning til flere fredfisk, der spiser dyreplanktonet. Dette betyder, at uklare søer er domineret af fredfisk.

Vilkårene i den eutrofe sø

I den eutrofe sø har sollys svært ved at nå ned på bunden, hvilket gør at undervandsplanterne bliver fåtallige eller forsvinder helt. Dette har stor betydning for, hvilke rovfisk der trives i søen. Gedden har brug for vandplanterne til at gemme sig i mens den er lille, og fisken har derfor svære opvækstbetingelser. Hvis gedden bliver voksen er der til gengæld rigeligt med føde til den, da den ikke bliver påvirket af det uklare vand, og de fleste gedder her er derfor store. Aborren (en anden rovfisk) jager ved hjælp af synet, hvilket er en udfordring i den eutrofe sø. Til gengæld har den lettere ved at klare yngeltilværelsen, da den ikke er så afhængig af bundplanterne som skjulested. Samlet set er der behov for begge slags rovfisk i den eutrofe sø for at opretholde en nogenlunde konstant biomasse af disse.



MATERIALEBANK



Litteratur

[Fremtidens biodiversitet](#)

Aktuel Naturvidenskab (2020) nr. 2

[Søen som levested for fisk](#)

Naturen i Danmark

[Fiskenes fødevalg og øvrige livsstrategier](#)

Naturen i Danmark (2014)



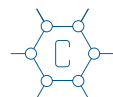
Aktiviteter

[Forløbsbeskrivelse inkl. Arbejdsopgaver til Fremtidens Biodiversitet](#)

Aktuel Naturvidenskab (2020) nr. 2

[Quiz: Fremtidens biodiversitet](#)

Aktuel Naturvidenskab (2020) nr. 2



Figurer

[Kort over variationen i det Humane Foodprint](#)

Aktuel Naturvidenskab (2020) nr. 2, s. 10

[Aborre og gedde](#)

Naturen i Danmark

HVORDAN KAN MATEMATISK MODELLERING BIDRAGE TIL FORSTÅELSE AF SØER?

Økologisk modellering

Modeller er effektive i beskrivelsen og kontrollen af økosystemer. Mentale modeller bruges f.eks. til at holde styr på tanker, matematiske modeller bruges til at opnå præcision i kommunikation og computermødeller anvendes til udforskning og planlægning af økosystemerne.

Modellering af fiskebestande

Statistiske modeller kan blandt andet bruges til at vurdere størrelsen på fiskebestande, og kan således estimere det som kan være svært direkte at observere. Dette gøres ved at regne på data fra stikprøver. Man behøver derfor ikke tælle alle fiskene i en sø for at få et billede af, hvor mange der er af hver type fisk.

Modelsimulering af Ormstrup Sø

Modelleringsprojektet ved Ormstrup Sø har til formål at skabe en bedre forståelse for mekanismerne, der er på spil i forbindelse med restaureringen af søer generelt. På denne måde vil det tydeliggøre, hvilke tiltag der er mest optimale, og dermed hjælpe med at sikre en overgang fra eutrof til klarvandet sø.

Ved Ormstrup Sø er der udlagt en målebøje på søens dybeste sted, der optager data hvert 15. minut. Disse data anvendes løbende til at forbedre modellen.



MATERIALEBANK



Litteratur

[Søens digitale tvilling](#)

Aktuel Naturvidenskab (2022) nr. 4

[Matematiske modeller](#)

Aktuel Naturvidenskab (2019) nr. 6

[Differentialligninger og matematisk modellering, Model 3 \(2019\)](#)

[En undersøgelse af matematisk økologi](#)

RUC (1982)

[Kan vi bruge matematiske modeller i miljødebatten?](#)

RUC

[Processes and Patterns of interactions in marine fish populations \(2005\)](#)



Aktiviteter

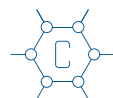
[Arbejdsark – Matematiske modeller \(Til læreren\)](#)

Aktuel Naturvidenskab (2019) nr. 6

[Arbejdsark – Matematiske modeller \(Til eleverne\)](#)

Aktuel Naturvidenskab (2019) nr. 6

[Matematiske fiskerimodeller](#)



Figurer

[Matematisk modellering](#)

Slide 12

[Observerede og modellerede temperatur- og iltprofiler i Ormstrup Sø](#)

Aktuel Naturvidenskab (2022) nr. 4, s. 21

[WET \(Water Ecosystem Tool\) modellen](#)

Aktuel Naturvidenskab (2022) nr. 4, s. 22

[Virtuelt modeleksperiment over betydningen af sedimentfjernelse](#)

Aktuel Naturvidenskab (2022) nr. 4, s. 23

ER SØEN BÆREDYGTIG?

Cirkulær fosfor-økonomi i søen

I den ideelle cirkulære verden forbliver alle ressourcerne i et kredsløb. Dette er desværre ikke tilfældet for fosfor, der i høj grad ender som overskydende næringsstof i vandmiljøet. Ved at oprense fosfor fra søens sediment og vand og anvende det som gødning på marker, vil fosfor igen indgå i det biologiske kredsløb.

Danmarks fosforressourcer

En stor del af Danmarks fosfor tabes ud af dets kredsløb – f.eks. Ved madaffald, ved afbrænding af spildevandsslam samt ved tilførsel fra landbruget til vandmiljøet.

Den sunde sø

I en sund bæredygtig sø er der balance mellem dels de fysiske og kemiske processer og dels mellem dyre- og planteliv. Ændres der på denne balance, f.eks. ved tilførsel af fosfor til søen, kan søen ændre tilstand og gå fra at være klar til at blive uklar.

Den bæredygtige sø

For at søen skal være bæredygtig er det nødvendigt, at det ikke kun er den miljømæssige tilstand, der har bevågenhed, men også optimering af forvaltningen og den kulturelle/rekreative anvendelse af søen.



MATERIALEBANK



Litteratur

[Hvad er bæredygtighed](#)

Danmarks Tekniske Universitet

[Søforklaringer](#)

Geviden 4 (2016) om forskellige restaureringsprojekter

[Vi har behov for en national fosforstrategi](#)

ING/wastetech (2021)

[Bæredygtig sørestaurering](#)

Poul Due Jensen Foundation

[Hvad er bæredygtighed?](#)

EMU

[Søernes balance trues](#)

Virtuel Galathea 3



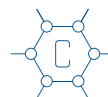
Aktiviteter

[Søer i fritiden](#)

Book en formidler (Syddansk Universitet)

[Videoer om bæredygtighed](#)

Aalborg Universitet



Figurer

[Bæredygtighedsbegrebet – de tre cirkler](#)

Danmarks Tekniske Universitet

[Søtyper](#)

Geviden (2016) nr. 4, s. 8

[Grundvandsudsivning i sø](#)

Geviden (2016) nr. 4, s. 5

[Alkalinitet i Hampen Sø](#)

Geviden (2016) nr. 4, s. 11

[Sørestaureringens betydning for en række parametre i Væng sø fra 1986–2009](#)

Geviden (2016) nr. 4, s. 14

[Fra hypereutrof til eutrof sø](#)

Virtuel Galathea 3, første figur

HVORDAN SIKRES BESKYTTELSE AF SØENS MILJØ?

Sørestaurering

En sø kan restaureres ved forskellige tiltag. Søens fysiske, kemiske eller biologiske forhold kan ændres ved for eksempel at fjerne søbund, iltning af bundvandet, mindske mængden af næringsstoffer, ændre på mængden af vandplanter, opfiske fredfisk og udsætte rovfisk og meget andet. Det kræver omfattende tiltag og viden at restaurere en sø, og det er derfor normalt myndighederne, der står for det.

EU's vandrammedirektiv

EU's vandrammedirektiv fastlægger rammerne for beskyttelse af blandt andet søer i alle EU-lande. Vandrammedirektivet har til formål:

- At forebygge yderligere forringelse og beskytte og forbedre vandøkosystemernes tilstand og hvad angår deres vandbehov, også tilstanden for jordbaserede økosystemer og vådområder, der er direkte afhængige af vandøkosystemerne.
- At fremme bæredygtig vandanvendelse baseret på langsigtet beskyttelse af tilgængelige vandressourcer.
- At sigte mod forøget beskyttelse og forbedring af vandmiljøet bl.a. gennem specifikke foranstaltninger til progressiv (vedvarende) reduktion af udledninger, emissioner og tab af prioriterede farlige stoffer.
- At sikre progressiv reduktion af forurening af grundvand og forhindre yderligere forurening heraf.
- At bidrage til at afbøde virkningerne af oversvømmelser og tørke.

Bestemmelse af søens tilstand

Viden om sigtedybden i en sø og hvordan den udvikler sig i løbet af året er vigtig for bestemmelse af søens tilstand.

Man kan bestemme sigtedybden i en sø ved at nedsænke en hvid skive i vandet indtil den ikke længere kan ses.

Er vandet uklart, er det oftest et udtryk for, at der vokser mange alger i vandet. Og er dermed afgørende for, hvor meget lys der kan komme ned på bunden af søen. Vandets klarhed har afgørende betydning for, hvilke fisk der kan leve i vandet.



MATERIALEBANK



Litteratur

[EU's vandrammedirektiv](#)

Miljøstyrelsen

[Naturgenopretning – nu med videnskab](#)

Aktuel Naturvidenskab (2015) nr. 4

[Management og restaurering af søer i Danmark](#)

LakePromo (2006) Nordjyllands Amt Kap. 2

[Miljøtilstand i danske søer](#)

Virtuel Galathea 3



Aktiviteter

[Måling af sigtedybde i en sø](#)

DTU Aqua (2014)

[MiljøGIS – kortværktøj](#)

Miljøstyrelsen

[Aktuelle MiljøGIS profiler](#)

Miljøstyrelsen

[Jordforurening – sådan passer vi på vores overfladevand](#)

YouTube-video fra Miljøstyrelsen



Figurer

[Målsætning for søer](#)

LakePromo (2006), s. 16, boks 2.1.1

[Væsentlige love på sø-området](#)

LakePromo (2006), s. 18 og 19

[Vandmiljøets tilstand](#)

Miljø- og fødevareministeriet, Slide 10



OM NATURVIDENSKABERNES HUS

Naturvidenskabernes Hus tænder gnisten hos børn og unge for de naturvidenskabelige og tekniske fag. Det sker i tæt samarbejde med danske virksomheder og undervisere i grundskolen og gymnasiet – og ved at understøtte skolevirksomhedssamarbejde i de danske kommuner. Sammen gør vi en forskel for børn og unge, erhvervsliv og samfund. Læs mere på nvhus.dk