



# KLIMAÆNDRINGERNES BETYDNING FOR INDSATS- BEHOV FOR NÆRINGSSTOFTILFØRSEL TIL SØER

Forsknings- og udviklingsprojekt vedr. anvendelse af dynamiske modeller til  
estimering af klimaeffekter på søer

Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 399

2020



AARHUS  
UNIVERSITET

DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

*[Tom side]*

# KLIMAÆNDRINGERNES BETYDNING FOR INDSATS- BEHOV FOR NÆRINGSSTOFTILFØRSEL TIL SØER

Forsknings- og udviklingsprojekt vedr. anvendelse af dynamiske modeller til  
estimering af klimaeffekter på søer

---

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 399

2020

Dennis Trolle  
Anders Nielsen  
Tobias K. Andersen  
Martin Søndergaard

Aarhus Universitet, Institut for Bioscience



AARHUS  
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

# Datablad

- Serietitel og nummer: Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 399
- Titel: Klimacændringernes betydning for indsatsbehov for næringsstofforførsel til søer  
Undertitel: Forsknings- og udviklingsprojekt vedr. anvendelse af dynamiske modeller til estimering af klimaeffekter på søer
- Forfattere: Dennis Trolle, Anders Nielsen, Tobias K. Andersen & Martin Søndergaard  
Institution: Aarhus Universitet, Institut for Bioscience
- Udgiver: Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©  
URL: <http://dce.au.dk>
- Udgivelsesår: Oktober 2020  
Redaktion afsluttet: Oktober 2020
- Faglig kommentering: Hans Thodsen  
Kvalitetssikring, DCE: Signe Jung-Madsen  
Sproglig kvalitetssikring: Anne Mette Poulsen
- Ekstern kommentering: Miljø- og Fødevareministeriet. Kommentarerne findes her:  
[http://dce2.au.dk/pub/komm/SR399\\_komm.pdf](http://dce2.au.dk/pub/komm/SR399_komm.pdf)
- Finansiell støtte: Miljø- og Fødevareministeriet
- Bedes citeret: Trolle, D., Nielsen, A., Andersen, T.K. & Søndergaard, M. 2020. Klimacændringernes betydning for indsatsbehov for næringsstofforførsel til søer. Forsknings- og udviklingsprojekt vedr. anvendelse af dynamiske modeller til estimering af klimaeffekter på søer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 22 s. - Videnskabelig rapport nr. 399  
<http://dce2.au.dk/pub/SR399.pdf>
- Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
- Sammenfatning: Rapporten beskriver, hvordan målbelastningen for næringsstofforførsel til fire danske søer (Søholm Sø, Bryrup Langsø, Arreskov Sø og Hinge Sø) kan have ændret sig, som følge af klimacændringer fra år 1900 til i dag. Analyserne tager udgangspunkt i procesbaserede sømodeller, som er tilpasset de fire forskellige søer. Det forudsættes, at målsætningen er fast (dvs. sommergennemsnitlig koncentration af klorofyl på 25 µg/l og 12 µg/l for hhv. lavvandede og dybe søer). Analysen viser, at forskellene i målbelastning mellem nutiden og et år 1900 klimascenarie generelt er små og i størrelsesorden 5 %. Dette er væsentligt mindre end den naturlige nutidige år-til-år variation mellem belastning og tilstand. Det vurderes, at den lille effekt især skyldes, at klimacændringerne i sommermånederne generelt er små mellem nutiden og år 1900 klimascenariet. Det forventes dog, at fortsatte klimacændringer på længere sigt vil forstærke symptomerne på eutrofiering.
- Emneord: Klimaeffekter, dynamiske sømodeller, indsatsbehov, klorofyl
- Layout: Grafisk Værksted, AU Silkeborg  
Foto forside: Dennis Trolle
- ISBN: 978-87-7156-525-6  
ISSN (elektronisk): 2244-9981
- Sideantal: 22
- Internetversion: Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som  
<http://dce2.au.dk/pub/SR399.pdf>

# Indhold

<b>Forord</b>	<b>5</b>
<b>Sammenfatning</b>	<b>6</b>
<b>Summary</b>	<b>7</b>
<b>1. Introduktion</b>	<b>8</b>
1.1 Formål	8
<b>2. Modelværktøjet</b>	<b>9</b>
2.1 GOTM-FABM-PCLake	9
2.2 Klimaets indflydelse på processer i modellen	9
<b>3. Metode til afvikling af klimascenarier</b>	<b>11</b>
3.1 Scenariedata	11
3.2 Scenariegenerator	12
3.3 Scenarieanalyse	13
<b>4. De fire søer i analysen</b>	<b>14</b>
<b>5. Resultater</b>	<b>15</b>
5.1 Sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og tilstand	15
5.2 Klimaeffekter på indsatsbehov	17
<b>6. Opsummering</b>	<b>19</b>
<b>7. Referencer</b>	<b>20</b>

*[Tom side]*

## Forord

Dette forsknings- og udviklingsprojekt omhandler analyse af klimaets potentielle effekter på indsatsbehovet for næringsstofftilførsel til udvalgte danske søer. Projektet tager afsæt i dynamiske sømodeller for fire danske søer, som er opsat og kalibreret i forbindelse med Miljøstyrelsen (MST) projektet "Dynamiske modeller som forvaltningsværktøj for danske søer". Disse modeller anvendes i nærværende projekt til at belyse, hvordan klimaændringer fra ca. år 1900 og frem til i dag, har haft indflydelse på indsatsbehovet for disse søer.

Projektet har været fulgt af en styregruppe med følgende medlemmer fra Miljøstyrelsen: Harley Bundgaard Madsen, Kontorchef, Gudrun Frandsen Krog, og Charlotte Adam Jørgensen, projektleder. Medlemmerne takkes for konstruktive kommentarer undervejs. MST har haft mulighed for at kommentere et udkast til rapporten.

## Sammenfatning

Klimaet har indflydelse på dynamikken og miljøtilstanden i søer over hele verden, og flere studier peger på, at klimaforandringer generelt forstærker symptomerne på eutrofiering. Et varmere klima kan således føre til mere udbredt iltsvind samt forøgede planteplanktonkoncentrationer, og typisk også en øget dominans af blågrønalger. For at kunne opretholde en given miljøtilstand under et fremtidigt varmere klima kan det derfor være nødvendigt at reducere den eksterne tilførsel af næringsstoffer yderligere i forhold til i dag.

Formålet med denne rapport er at vurdere sammenhænge mellem danske søers miljøtilstand og næringsstofftilførsel i hhv. det nuværende klima og et klima, som er repræsentativt for perioden omkring år 1900. På den baggrund kan det vurderes, om og hvor meget målbelastningen og indsatsbehovet for næringsstofftilførsel til søerne evt. har ændret sig som konsekvens af et ændret klima. Rapporten undersøger ikke, hvordan miljøtilstanden vil blive påvirket fremadrettet som følge af forskellige klimaprojektioner.

Klimascenariet, som repræsenterer år 1900, er genereret ud fra en delta-change metode, hvor lufttemperaturen samt vandtilførslen fra nutidens klima (baseret på baselineperioden 2001-2005) korrigeres med månedlige faktorer, som er baseret på udviklingen i det danske klima fra år 1900 til i dag. Sammenlignes nutidens klima med klimaet i år 1900, er ændringerne generelt størst i vintermånederne, hvor der i nutidens klima er en højere vandafstrømning til søerne og også en højere lufttemperatur. For sommerperioden er forskellene imidlertid små, dvs. at vandtilførslen og lufttemperaturen er nogenlunde sammenlignelige mellem nutidens klima og klimaet omkring år 1900.

Analyserne er lavet med udgangspunkt i procesbaserede modeller, som er opsat og tilpasset fire danske søer, hhv. Søholm Sø, Bryrup Langsø, Arreskov Sø og Hinge Sø. Disse søer varierer i karakteristika fra dyb og sommerlagdelt til lavvandet og fuld opblandet, og det er derfor muligt, at søerne vil respondere forskelligt på et ændret klima.

Modellsimuleringerne viser, at der generelt er betydelig forskel fra sø til sø, ift. hvordan den beregnede målbelastning ændres fra år 1900 og til nutidens klima. Forskellene i målbelastning – og dermed også potentielt indsatsbehovet, der kan associeres til klimaændringer – er dog generelt små og i størrelsesorden 5 %, hvilket er væsentligt mindre end den naturlige år-til-år variation mellem belastning og tilstand. Analyserne viser desuden, at målbelastningen er steget lidt i nutidens klima for to af søerne, faldet for en sø og er uforandret for en sø. At målbelastningen kan stige, kan muligvis skyldes, at vandopholdstiden i søerne er steget lidt i sommerperioden som følge af det ændrede afstrømningsmønster. Opholdstiden i nutidens klima er således reduceret i vintermånederne som følge af forøget vandafstrømning og er øget en smule i sommermånederne. Empiriske studier viser generelt, at en øget opholdstid resulterer i reduceret næringsstoffkoncentrationer og klorofyl i søer.

Det konkluderes, at der er forskel fra sø til sø i responsen på et ændret klima, samt at de beregnede ændringer i indsatsbehov som følge af klimaændringer i perioden fra ca. 1900 til i dag er små og væsentlig mindre end den naturlige år-til-år variation mellem belastning og tilstand.



## Summary

The climate influences the dynamics and the state of the environment in lakes all over the world, and several studies suggest that climate change generally exacerbates the symptoms of eutrophication. A warmer climate can lead to more widespread oxygen depletion and increased phytoplankton concentrations, and typically also increased dominance of bluegreen algae. In order to be able to maintain a given environmental state in a warming climate, it may therefore be necessary to further reduce today's external nutrient load.

The purpose of this report is to assess the connections between the environmental state of Danish lakes and the nutrient load in today's climate and a climate representing the period around 1900. On this basis, it is possible to assess whether - and how much - the nutrient target load and the effort to reduce the nutrient load to lakes have changed as a consequence of a changing climate. The report does not examine how the state of the environment will be affected in the future as a result of various climate projections.

The climate scenario, which represents the year 1900, was generated using a delta-change method, in which the air temperature and the water supply in today's climate (based on the baseline period 2001-2005) were corrected by monthly factors based on the development of the Danish climate from the year 1900 until today. A comparison of today's climate with the climate in the year 1900 shows that the changes are generally most pronounced in the winter months where the water flow as well as the air temperature are higher in today's climate. For the summer period, however, the differences are small, i.e. the water supply and the air temperature are more or less similar in today's climate and the climate around the year 1900.

The analyses are based on process-based models that were set up and adapted to four Danish lakes: Lake Søholm, Lake Bryrup Langsø, Lake Arreskov and Lake Hinge. The lakes exhibit various characteristics from deep and summer-stratified to shallow and fully mixed conditions, making it likely that they will respond differently to a changed climate.

Overall, the model simulations show considerable differences between the lakes as to how the calculated target load changes from the year 1900 to today's climate. However, the differences in the target load, and thus potentially also the need for reduction efforts associated with the impact of climate change, are generally small, around 5%, which is significantly less than the natural year-to-year variation between load and environmental state. The analyses also show that the target load has increased slightly in today's climate in two of the lakes, declined in one lake and remained unchanged in the last lake. The fact that the target load may increase could possibly be ascribed to the slightly increased water retention time in the lakes during summer as a result of the changed flow pattern. Empirical studies generally show that increased retention time results in reduced nutrient and chlorophyll concentrations in lakes.

We conclude that there is a difference between the lakes responses to a changed climate and that the calculated changes in reduction efforts as a result of climate change in the period from approx. 1900 to today are minor and significantly smaller than the natural year-to-year variations between load and environmental state.

# 1. Introduktion

Klimaforandringerne har indflydelse på tilstanden i søer og forstærker generelt symptomerne på eutrofiering (Moss et al. 2011, Jeppesen et al. 2014). Adskillige studier har således påvist, at for at kunne opretholde den nuværende tilstand i danske søer vil det være nødvendigt at reducere den eksterne næringsstofftilførsel til søerne i et fremtidigt varmere klima (Jeppesen et al. 2010, Nielsen et al. 2014, Rolighed et al. 2016).

Indsatsbehovet i forhold til næringsstofftilførsel til danske søer er i vandplanarbejdet baseret på brugen af simple empiriske modeller. Disse modeller baserer sig på sammenhænge mellem den eksterne fosfortilførsel, den enkelte søs opholdstid samt koncentrationen af fosfor i søen (Trolle et al. 2015, Søndergaard et al. 2020). Sidstnævnte kan relateres til en række biologiske tilstandsvariable (eksempelvis planteplanktonkoncentration og dækningsgrad af undervandsvegetation), for hvilke der er fastsat målsætninger ift. Vandrammedirektivet (Søndergaard et al. 2015).

Vandrammedirektivet tilsigter endvidere, at medlemslandene tager højde for klimaforandringer, når der laves indsatsplaner. De simple modeller, der for nuværende anvendes for søer i Danmark, kan imidlertid ikke medtage effekter af klimaforandringer og dermed heller ikke anvendes til at få en forståelse for sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og tilstand i et fremtidigt klima.

I projektet "Dynamiske modeller som forvaltningsværktøj for danske søer", finansieret af MST, er der blevet opsat og testet dynamiske, procesbaserede sømodeller for en række udvalgte søer (baseret på det koblede hydrodynamisk-økologiske modelkompleks GOTM-FABM-PCLake). Til forskel fra de empiriske modeller bygger disse dynamiske, procesbaserede modeller på et langt mere omfattende og komplekst ligningsapparat (Hu et al. 2016). Ligningerne bygger på anerkendte naturvidenskabelige sammenhænge og beskrivelser af processer og årsagssammenhænge i søernes økosystem. Klimaets indflydelse på søernes tilstand er i disse modeller bl.a. inkluderet ved temperaturafhængige procesrater samt temperaturmæssige talegrænser og optimums for forskellige biologiske variable. Denne type model er således også bredt anvendt inden for forskningen til at belyse, hvordan klimaet påvirker akvatiske økosystemer (fx Elliott et al. 2006, Mooij et al. 2007, Trolle et al. 2011).

## 1.1 Formål

Formålet med dette projekt er at belyse effekten af de seneste ca. 120 års klimaforandringer på danske søer med fokus på klimaets indflydelse på indsatsbehovet for søerne. Specifikt undersøges og sammenlignes målbelastning i nutidens klima, med den målbelastning, der ville have været i et klima, som er repræsentativt for perioden omkring år 1900. Denne rapport undersøger ikke, hvordan miljøtilstanden vil blive påvirket fremadrettet i forskellige fremtidige klimaprojektioner.

Analyserne laves med udgangspunkt i fire søer, Søholm Sø, Bryrup Langsø, Arreskov Sø og Hinge Sø, for hvilke der er opsat dynamiske modeller i et tidligere projekt. Som en del af projektet udvikles der software (Python scripts), som muliggør og effektiviserer afvikling og analyser af klimascenarier.

## 2. Modelværktøjet

### 2.1 GOTM-FABM-PCLake

I nærværende projektet er anvendt den koblede hydrodynamiske-økosystem model GOTM-FABM-PCLake (nu omdøbt til GOTM-WET), som repræsenterer state-of-the-art inden for økologisk modellering af søer. Modellen beskriver et endimensionelt modeldomæne, hvor koncentrationen af de forskellige variable varierer med dybden, afhængig af lagdeling og opblandingsforhold. Denne egenskab er især relevant for dybe søer med lagdeling i sommerperioden, men er også relevant ift. lavvandede danske søer, der normalt er fuldt opblandede, men som i stille og varme perioder kan opleve kortvarige lagdelinger hen over sommeren, der kan have betydning for eksempelvis udvikling af algeopblomstringer. Den endimensionelle antagelse i modellen betyder, at modellen ikke beskriver potentielle horisontale gradienter, hvilket ville kræve en to- eller tredimensionel tilgang. Modellen simulerer den tidslige og vertikale udvikling i temperatur, iltodynamik, organiske og uorganiske former for kvælstof, fosfor og silicium, tre forskellige grupper af planteplankton (som udgangspunkt blågrønalger, kiselalger og grønalger, dog kan algeegenskaber tilpasses til at repræsentere andre grupper), dyreplankton, bunddyr, fredfisk (repræsenteret af hhv. yngel og voksne fisk), rovfisk samt undervandsvegetation. Udviklingen af de økologiske komponenter i modellen er drevet af Aarhus Universitet ([www.wet.au.dk](http://www.wet.au.dk)). Modellen er open source, og hele kildekode er derfor tilgængelig for alle, hvorfor modellen også anvendes aktivt i en lang række lande. Modellen er beskrevet i detaljer i Hu et al. (2016).

### 2.2 Klimaets indflydelse på processer i modellen

Modellen forceres med en række klimainput samt randbetingelser i form af vand- og næringsstofftilførsler. Der kan således manipuleres med disse inputs for at få et indblik i de potentielle ændringer, som én eller flere klimaparametre vil resultere i for en given sø.

*Vandtemperaturen* har betydning for en lang række processer i modellen og indvirker fx på mineraliseringsrater i både vand og bundsediment samt respirations-, vækst-, græsnings- og prædationsrater for de biologiske variable, som hver især har forskellige temperaturafhængigheder. Eksempelvis har blågrønalger et højere temperaturoptimum end kiselalger. Når temperaturen øges, kan dette derfor resultere i, at dominansen af blågrønalger øges. Samtidig kan balancen mellem pelagisk (vandsøjle) og bentisk (bund) primærproduktion også ændres, hvor en øget pelagisk algeproduktion kan føre til en reduceret bentisk produktion (se fx Vadeboncoeur et al. 2001), og klorofyl-til-totalfosfor-ratioen kan stige (se fx Chen et al. 2020). Det vil sige, at sammenhængen mellem næringsstofftilførsler og tilstand kan være anderledes i forskellige temperaturscenarier. At klimaet i løbet af de seneste 120 år er blevet varmere, kan derfor potentielt medvirke til, at indsatsbehovet for reduktion af næringsstofftilførsler i dag er større sammenlignet med det hypotetiske indsatsbehov, der ville være under et tidligere og køligere klima. Tilsvarende skal næringsstofftilførslerne sandsynligvis reduceres yderligere i et fremtidigt varmere klima, hvis målet er at opretholde eller forbedre tilstanden i de danske søer.

*Vandtilførslen*, og dermed opholdstiden af vandet i søen, har også betydning for søernes respons på ekstern næringsstofftilførsel (Janse et al. 2010). Øget vandtilførsel fører til reduceret opholdstid og vice versa. Simple empiriske relationer (fx Vollenweider 1976) viser typisk, at næringsstofniveauerne i søer, og dermed også mængden af planteplankton, falder med stigende opholdstid ved samme næringsstofftilførsel. Klimaændringer har indflydelse på vandafstrømningen, bl.a. som følge af ændringer i nedbørmængden, hvilket derfor også kan påvirke søernes tilstand. Ændringer i nedbøren omfatter også ændret nedbørmønster, så den sæsonmæssige tilførsel ændres, samt mere og flere ekstreme nedbørshændelser (Cappelen 2020), der kan påvirke transporten af næringsstoffer. Sammenlignet med studier i temperatureffekter på søernes økosystemer er der dog meget få studier, som har belyst indflydelsen af netop ændret opholdstid på en søs miljøtilstand (fx Janse et al. 2010), og ingen, der viser, hvordan miljøtilstanden evt. kan ændres, når temperaturen og opholdstiden ændres samtidigt. Simple empiriske relationer (fx Vollenweider 1976) viser dog typisk, at næringsstofniveauerne, og dermed også mængden af planteplankton, falder med stigende opholdstid. I ekstreme tilfælde, hvor en øget vandtilførsel fører til meget hurtigt gennemstrømmede søer, kan udviklingen af planteplankton dog hæmmes, da dette reducerer den tid, som planteplankton har til vækst, inden de skylles ud.

### 3. Metode til afvikling af klimascenarier

#### 3.1 Scenariedata

For at kunne estimere og sammenligne målbelastning i det nuværende klima med det hypotetiske indsatsbehov, der ville have været i et klima i ca. år 1900, har det været nødvendigt at definere et klimascenarie, som er repræsentativt for år 1900. Det har ligget uden for rammerne og formålet med nærværende projekt at lave egentlige analyser af klimaets karakteristika omkring år 1900. I stedet baserer år 1900-klimascenariet sig på projektet "Næringsstofbelastning til kysten år 1900" (herefter kaldet "År 1900-projektet"), hvori Danmarks Meteorologiske Institut (DMI), De Nationale Geologiske Undersøgelser For Danmark og Grønland (GEUS) og Aarhus Universitet (AU) bl.a. evaluerer klima- samt vandafstrømningsforhold i Danmark omkring år 1900. År 1900-projektet har således bidraget med de månedlige delta-change faktorer, som er anvendt i nærværende projekt (Tabel 1).

For at generere klimascenariet for år 1900 er der taget udgangspunkt i klimadata fra nutidsscenariet (repræsenteret ved perioden 2001-2005), som er brugt i forbindelse med opsætningen af sømodellerne. Med delta-change fremgangsmåden er ændringer i hhv. lufttemperatur og vandtilførsel i perioden fra år 1900 til nutiden (2001-2005) anvendt til at korrigere data fra nutidsscenarioet, således at der opnås en tidsserie, der repræsenterer klimaet i år 1900. Delta-change værdierne baserer sig på ændringen i lufttemperatur og vandafstrømning på månedsbasis mellem perioderne 1990-2010 og 1890-1910 opgjort som et landsgennemsnit (Tabel 1).

**Tabel 1.** Landsgennemsnitlige månedlige delta-værdier for hhv. lufttemperatur og vandafstrømning (tilførsel) til generering af et år 1900-klimascenarie. Delta-værdier er baseret på forskelle i lufttemperatur og vandafstrømning mellem perioden 1990-2010 og perioden 1890-1910 – dvs. positive værdier betyder, at hhv. temperatur og afstrømning er steget siden år 1900. Data er baseret på resultater fra År 1900-projektet. Der gøres opmærksom på, at År 1900-projektet for nuværende ikke er afsluttet, hvorfor disse delta-værdier i princippet kan ændres efter afslutningen af nærværende rapport. Det forventes dog ikke, at disse vil ændres nævneværdigt, da de generelt er i overensstemmelse med tidligere studier, som har analyseret klimaforhold og afstrømning omkring år 1900 i de nordiske lande og det nordlige Tyskland (fx Roald et al. 1997, Müller-Wohlfeil et al. 2000).

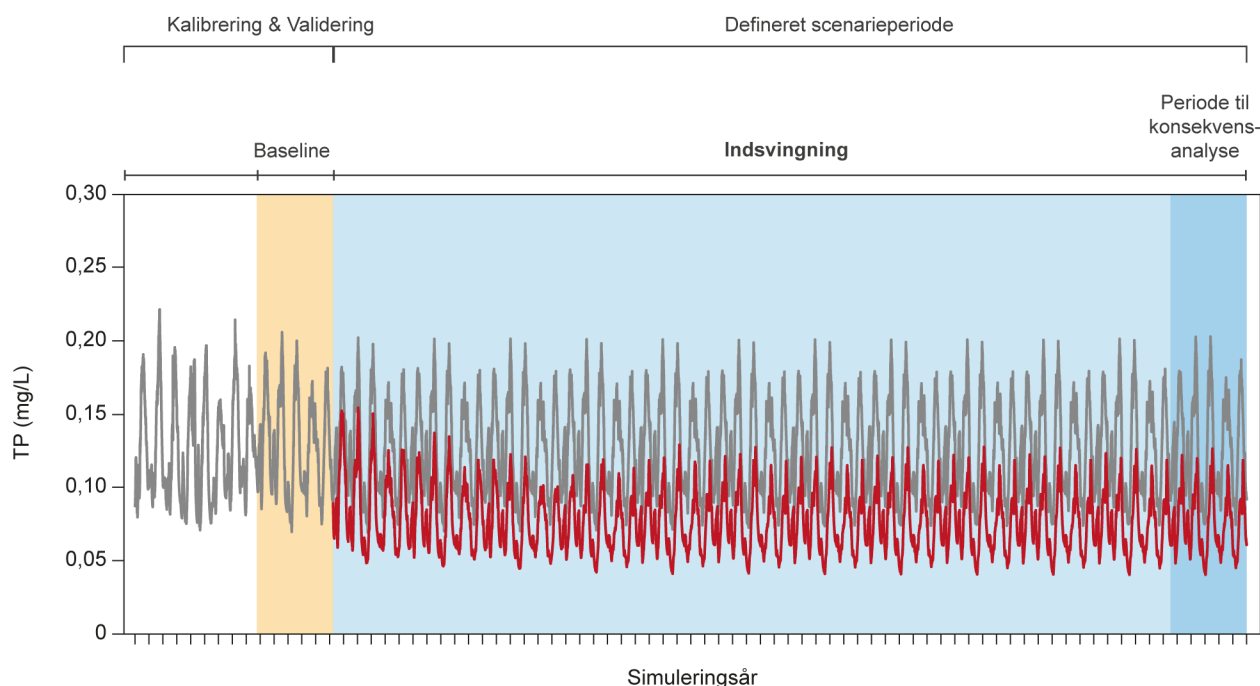
Måned	Lufttemperatur delta (°C)	Vandafstrømnings delta (%)
Januar	1,8	35
Februar	1,9	44
Marts	1,3	13
April	1,4	-2
Maj	0,7	-1
Juni	-0,5	-0,1
Juli	0,4	-3
August	1,3	-14
September	1	0,3
Oktober	0,9	8
November	1,5	28
December	1,4	33

Nutidens klima repræsenteres af årene 2001-2005, der fungerer som studiets baseline. Det skal her bemærkes, at den periode, der er analyseret i År 1900-projektet er lidt anderledes (år 1990-2010). Det har ligget uden for rammerne af dette projekt at opdatere sømodelopsætninger til at repræsentere præcis denne periode. Det forventes imidlertid at have mindre betydning for delta-change faktorerne, der anvendes til at generere klimascenariet, som bygger på ændringer over en ca. 120-årig periode.

### 3.2 Scenariengenerator

For at kunne afvikle scenariosimuleringer på en standardiseret måde og dermed reducere risikoen for fejl, er der udviklet en "scenariengenerator", som er baseret på Python script. Da der anvendes dynamiske sømodeller med bl.a. dynamisk varierende næringsstofpuljer i bundsedimentet, vil modellernes respons på ændringer i forcering indstille sig over en længere tidsperiode, hvilket scenariosimuleringerne skal tage højde for. Eksempler fra søer forskellige steder i verden har vist, at der typisk går et årti eller mere, før tilstanden i en sø er i nogenlunde ligevægt, efter at næringsstofftilførslen er blevet ændret (Jeppesen et al. 2005).

For at få et billede af søernes tilstand og respons i nogenlunde ligevægt med nutidens klima samt klimaet omkring år 1900 er der udviklet et script, som kan læse klima- samt vand- og næringsstofftilførselsdata fra baselineperioden (2001-2005) og gentage dette for en 50-årig periode (Fig. 1). I samme script er der udviklet funktionalitet til at kunne ændre lufttemperatur, vandtilførsel samt næringsstofkoncentrationer i indløbet med månedlige faktorer (delta-change, Tabel 1). Sidstnævnte anvendes til at generere en lang række scenarier, hvor næringsstofftilførslen ændres (ved at ændre på indløbskoncentrationer) i hhv. nutidsklimascenariet og år 1900-klimascenariet. Næringsstofftilførslen vil i disse scenarier starte med baselinebelastningen (dvs. næringsstofftilførslen i baselineperioden 2001-2005) og reduceres herefter trinvis i hvert scenarie med 5 %-intervaller, indtil belastningen er på 5 % af den nuværende belastning.

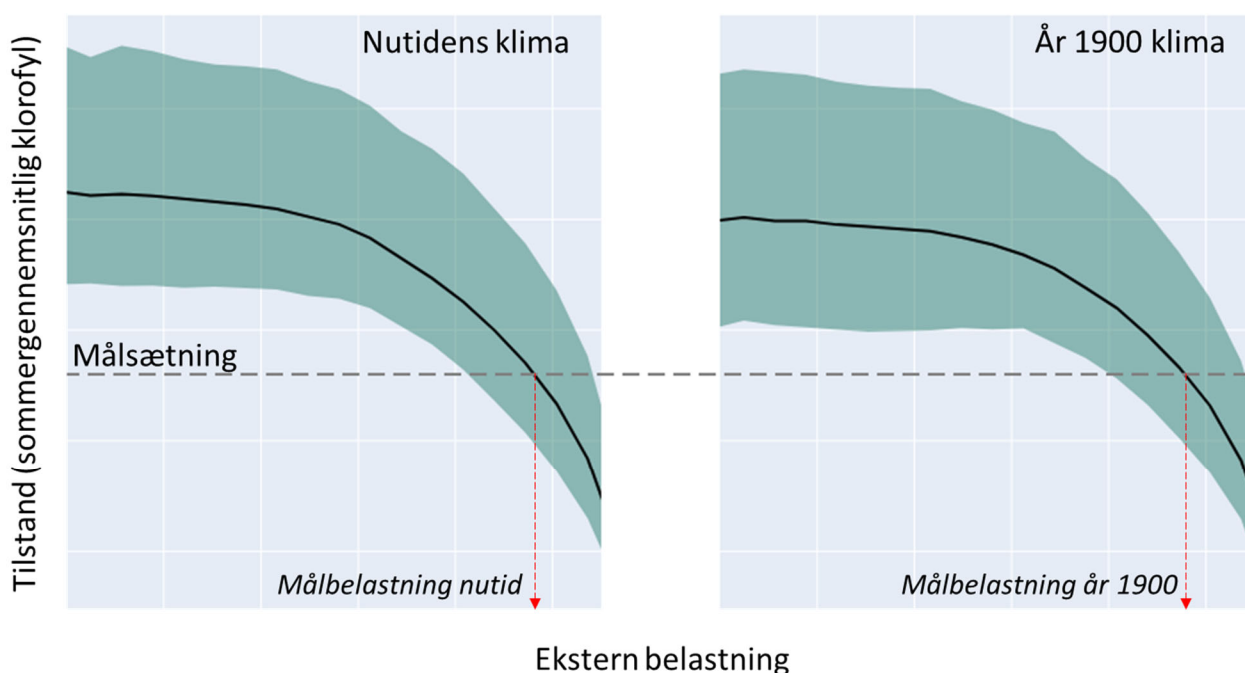


**Figur 1.** Illustration af kørsel med det udviklede scenariengeneratorscript. Der ses en kørsel for Hinge Sø med baselineperiode fra 2001-2005, der er loopet 10 gange frem i tid til en 50 år lang periode. Der er i eksemplet specificeret en reduktion på 40 % i fosfortilførslen, hvilket producerer den viste reduktion (rød linje) i simuleret totalfosforkoncentration i søen i forhold til baseline (grå linje).

### 3.3 Scenarieanalyse

Efter afvikling af hver scenariesimulering er de sidste 5 års modeldata ekstraheret fra den 50 årige simuleringsperiode, da det her forventes, at søens økosystem har indstillet sig på scenariets forceringsdata og randbetingelser.

Efterfølgende er den sommergennemsnitlige klorofylkoncentration beregnet for hvert af de fem år for hvert scenarie. Ved at sammenstille alle scenarierne kan belastningen, hvor den økologiske tilstand opnår målsætning under nutidens klima, sammenlignes med den hypotetiske målbelastning, der ville have været med år 1900-klima (Fig. 2). For hver enkelt sø er der sammenstillet 20 scenarier med varierende næringsstofftilførsel ved baselineklima samt 20 scenarier med varierende næringsstofftilførsel ved år 1900-klima. Forskellen i målbelastning, og dermed også i muligt indsatsbehov, kan hermed estimeres.



**Figur 2.** Illustration af princip til estimering af målbelastning i nutidens og år 1900-klima. Y-aksen repræsenterer en tilstandsvariabel (klorofyl) er anvendt i nærværende projekt), og x-aksen repræsenterer den eksterne næringsstofftilførsel, som starter ved baseline og er faldende mod højre. Den sorte linje repræsenterer middelværdien for sommermiddel-koncentrationen af klorofyl for en 5-årig periode (tilsvarende længden af den periode, der er anvendt som udgangspunkt til at generere scenarierne). Variationen omkring den sorte linje repræsenterer år-til-år variationer i søen, hvor den øvre grænse af det skraverede bånd repræsenterer den maksimale sommermiddel-koncentration inden for en 5-årig periode, og den nedre grænse repræsenterer minimum sommermiddel-koncentration i samme periode.

På tilsvarende vis kan det også simuleres, hvor stort indsatsbehovet vil være under scenarier for fremtidigt klima, således at søerne stadig kan imødekomme de nuværende krav til tilstand. Dette ligger dog uden for rammerne af dette projekt.

## 4. De fire søer i analysen

Simuleringer af nutidens klimascenarie og år 1900-klimaet er afviklet for fire forskellige søer (Tabel 2, Fig. 3). Disse søer varierer fra dyb og stabil lagdeling over sommeren (Søholm sø) til temporær lagdeling (flere midlertidige lagdelinger, særligt i Bryrup Langsø og i nogen grad også Arreskov Sø), og lavvandet og fuldt opblandet (Hinge Sø). Det forventes derfor, at søerne vil vise et bredt spektrum af respons på ændringer i klimaet.

**Tabel 2.** Søkaraktistika for de fire søer.

Karakteristik	Søholm Sø	Bryrup Langsø	Arreskov Sø	Hinge Sø
Maksdybde (m)	14.7	9	3.6	2.6
Middeldybde (m)	6.5	4.6	1.9	1.2
Overfladeareal (km <sup>2</sup> )	0.26	0.37	3.2	0.93

**Figur 3.** Lokalteten for de fire søer, der indgår i projektet.



For alle søer er der i projektet "Dynamiske modeller som forvaltningsværktøj for danske søer" opsat, kalibreret, valideret og afrapporteret en dynamisk model. Sømodellernes præstationsevne er generelt på niveau med eller bedre end det niveau, der typisk findes i den videnskabelige litteratur. Modellerne udgør således et godt grundlag for scenarieanalyser.



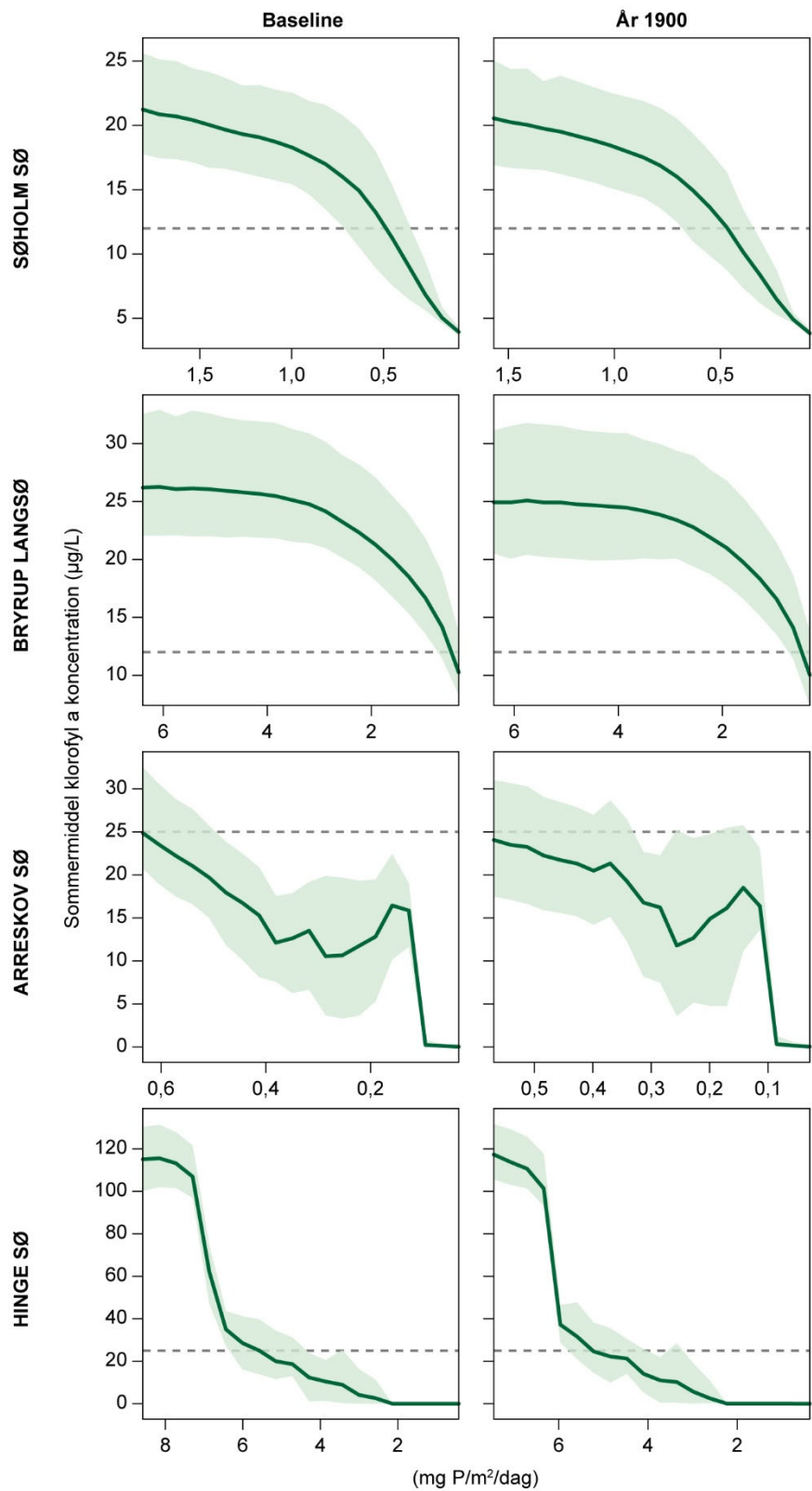
## 5. Resultater

### 5.1 Sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og tilstand

Simulering under både nutids- (baseline) og år 1900-klimaet viser, at der generelt er betydelige forskelle fra sø til sø ift., hvordan tilstanden responderer på ændret næringsstofftilførsel (Fig. 4). For alle søerne er det gældende, at der simuleres en ikke-lineær sammenhæng mellem søernes tilstand og den eksterne belastning. For Bryrup Langsø sker der eksempelvis en relativt lille ændring i tilstand, indtil næringsstofftilførslen er reduceret med ca. 50 %, hvorefter der sker en mere markant udvikling og forbedring i tilstand, når næringsstofftilførslen reduceres yderligere. Denne effekt kan tilskrives modellens evne til i nogen grad at simulere hysteresis, som betyder, at den enkelte søs respons på ændret næringsstofftilførsel afhænger af dens historik (herunder bl.a. næringsstoffpuljerne i søens bund), hvilket kan give et ikke-lineært respons. Dette betyder, at skiftet fra "uklar" til "klar" tilstand i en sø ligger ved en lavere næringsstofftilførsel sammenlignet med den næringsstofftilførsel, der kan forårsage et skift fra "klar" til "uklar" tilstand. Sammenhængen mellem næringsstofftilførsel og tilstand er generelt forholdsvis lineær for de to dybe søer (Søholm sø og Bryrup Langsø), mens der ses et mere varierende forløb for de to lavvandede søer (Arreskov Sø og Hinge Sø).

For alle fire søer er det gældende, at måledata viser, at de for nuværende ikke overholder målsætningen ift. klorofylkoncentration. Tilsvarende viser model-simuleringerne af nutidens klima også, at Søholm Sø, Bryrup Langsø og Hinge Sø ikke opnår målsætning ift. sommergennemsnitlig klorofyl *a*-koncentration. For Arreskov Sø derimod viser modelsimuleringen, at søen er meget tæt på målopfyldelse. Det skal her bemærkes, at simuleringen af nutidens klima for alle søer er kørt på 10 gange perioden 2001-2005, altså en 50-årig periode, hvoraf de sidste 5 år er anvendt i resultatanalysen. Det er muligt, at den nuværende tilstand i Arreskov Sø ikke er i ligevægt med den nuværende eksterne belastning for den periode (2001-2005), der er loopet. Såfremt denne belastning fortsættes i mange år frem, kan dette muligvis resultere i en løbende forbedring af tilstanden, efterhånden som eksempelvis sedimentets næringsstoffpuljer langsomt indstilles ift. belastningen, hvilket er det, som model-simuleringerne indikerer.

**Figur 4.** Scenarieresultater for de fire søer. For hver sø er der kørt 20 scenarier af både nutidens (baseline) og år 1900-klima, hvor næringsstofftilførslen reduceres i intervaller af 5 %. Variationen omkring den sorte linje repræsenterer år-til-år variationer i søernes tilstand. Den horisontale stiplede linje repræsenterer målsætningen ift. klorofyl for den enkelte sø. Måbelastningen bestemmes efterfølgende som skæringen mellem den sorte linje (den simulerede sommergennemsnitlige koncentration af klorofyl ift. næringsstofftilførsel) og den stiplede linje.



## 5.2 Klimaeffekter på indsatsbehov

Målbelastningen er den næringsstofftilførsel, som teoretisk set vil resultere i målopfyldelse. Såfremt en sø ikke har målopfyldelse, og den eksterne næringsstofftilførsel er for høj, kan indsatsbehovet beregnes som forskellen mellem den aktuelle belastning og målbelastningen. Jævnfør bekendtgørelse BEK nr. 1001 af 29/06/2016 (Tabel 6) er målsætningen for dybe søer (type 10, middeldybde > 3 m) og lavvandede søer (type 9, middeldybde < 3 m) for den sommergennemsnitlige klorofylkoncentration på hhv. 12 µg/L og 25 µg/L.

Modellsimuleringerne viser, at der generelt er betydelig forskel fra sø til sø ift., hvordan målbelastningen ændres fra år 1900-klima til nutidens klima (Tabel 3). Forskellen i målbelastning, og dermed potentielt også indsatsbehovet, mellem år 1900 og nutidens klima er i størrelsesordenen 5 %. År-til-år variationen mellem belastning og tilstand er dog væsentlig større end 5 % for alle søerne (repræsenteret af x-aksens interval mellem skæringsgrænserne for det skraverede område og den stiplede linje i Fig. 4).

For Søholm sø er der ikke forskel i målbelastningen mellem nutidens klima og år 1900-klimaet. I begge tilfælde vil en belastning på omkring 45 kg P/år således resultere i en sommergennemsnitlig klorofylkoncentration på 12 µg/L.

For Bryrup Langsø er målbelastningen en smule lavere under i nutidens klima ift. år 1900-klimaet. Næringsstofftilførslen skal således reduceres yderligere i nutidens klima ift. år 1900-klima for at kunne opfylde en målsætning om en sommergennemsnitlig klorofylkoncentration på 12 µg/L.

For både Arreskov Sø og Hinge Sø, som begge har en målsætning om en sommergennemsnitlig klorofylkoncentration på 25 µg/L, er målbelastningen en smule højere i nutidens klima ift. år 1900-klima. Ifølge modellsimuleringerne kan disse søer således have en smule lavere klorofylkoncentrationer i nutidens klima ift. år 1900-klimaet ved samme belastning, omend forskellene i målbelastningen i de to klimascenarier er små (ca. 5 %). Dette er umiddelbart et overraskende resultat, men kan sandsynligvis forklares med, at gennemstrømningsdynamikken og derfor også opholdstiden er ændret fra år 1900-klimaet til det nuværende klima. Opholdstiderne er generelt faldet i vintermånederne og steget en smule i sommermånederne i det nuværende klima (Tabel 3). Følsomhedsanalyser (fx Janse et al. 2010) har også tidligere påvist, at modellernes signaler kan være følsomme over for opholdstiden i en sø. Denne effekt er dog typisk ikke indregnet i publicerede studier, der har analyseret klimaeffekter på søer (disse har typisk fokuseret udelukkende på temperatureffekter). Nærværende studie er således blandt de første til at belyse og kvantificere denne effekt.

Modellsimuleringerne peger generelt på, at effekten af ændringer i klimaet fra år 1900 til i dag er små, og at der ikke ses et ensartet mønster i responsen på tværs af de undersøgte søer. Denne rapport illustrerer, at år-til-år variationer er væsentligt højere end de enkelte søers respons på ændret klima i denne periode. Der er endvidere usikkerheder forbundet med eksempelvis parameteriseringen af modellerne samt delta-change faktorerne brugt til at generere år 1900-klimascenariet, hvilket dette projekt ikke har inkluderet en analyse af.

**Tabel 3.** Gennemsnitlig tilførsel (kg P/år), målbelastning (kg P/år) samt opholdstid (måneder) i hhv. nutidsscenariet (baseline, 2001-2005) og år 1900-klimascenariet for de fire søer. Perioden for baselinebelastning samt metoden til bestemmelse af målbelastning i nærværende rapport er forskellig fra vandområdeplan 2015-2021.

	<b>Søholm Sø</b>	<b>Bryrup Langsø</b>	<b>Arreskov Sø</b>	<b>Hinge Sø</b>
Baselinebelastning	170	870	735	2910
Målbelastning baseline	45	63	740	1885
Målbelastning år 1900	45	64	700	1775
Opholdstid baseline	12,1	2,1	7,4	0,5
Opholdstid år 1900	14,0	2,3	8,4	0,6

## 6. Opsummering

Dette projekt har belyst, hvordan ændringer i klimaet fra ca. år 1900 frem til i dag kan have indflydelse på indsatsbehovet for fire danske søer repræsenteret af Søholm Sø, Bryrup Langsø, Arreskov Sø og Hinge Sø.

I projektet er der blevet udviklet en række Python-baserede scripts, der udgør værktøjer, som standardiserer og effektiviserer afviklingen af klimascenarier igennem en kompleks procesbaseret model, som i et andet projekt ("Dynamiske modeller som forvaltningsværktøj for danske søer") er blevet tilpasset de enkelte søer.

Udviklingen i klimaet fra år 1900 til nutiden viser generelt de største ændringer i vintermånederne, hvor der i nutidens klima er en højere vandafstrømning og også en højere lufttemperatur. For sommerperioden er forskellene imidlertid små, dvs. at vandtilførslen og lufttemperaturen er nogenlunde sammenlignelige mellem nutidens klima og klimaet omkring år 1900, og for juni måned er nutidens klima endda en smule køligere.

Modellsimuleringerne viser, at der generelt er lille forskel på søernes målbelastning i dag og den hypotetiske målbelastning, der ville have været under år 1900-klima. Forskellene i målbelastning, og dermed også potentielt indsatsbehov, er generelt i størrelsesorden 5 %, hvilket er væsentligt mindre end den naturlige år-til-år variation, der ses i næringsstofftilførsel og tilstand. Sammenlignet med år 1900-klimascenariet er målbelastningen steget lidt i nutidens klima for to af søerne, hvorimod den er faldet for en enkelt sø og er uforandret for en enkelt sø. At målbelastningen kan stige lidt i nutidens klima, kan skyldes, at opholdstiden er ændret – dvs. reduceret i vintermånederne og øget en smule i sommermånederne – sammenlignet med år 1900-scenarierne. Fremadrettet, når klimaet ændrer sig yderligere med forventeligt højere temperaturer og afstrømning samt flere ekstreme hændelser, peger forskningen på, at dette stadig vil resultere i forværring af tilstanden i søerne.

Det konkluderes, at der er forskel fra sø til sø i responsen på et ændret klima i perioden år 1900 til i dag, og at der ikke umiddelbart kan ses et klart mønster på tværs af søerne. De beregnede ændringer i indsatsbehov som følge af klimaændringer i perioden fra ca. 1900 til i dag er væsentligt mindre end den naturlige år-til-år variation i belastning og tilstand.

## 7. Referencer

Cappelen, J. (ed.). 2020. Denmark - DMI Historical Climate Data Collection 1768-2019. DMI Report 20-02, 112 s.

Chen, W., Nielsen, A., Andersen, T.K., Hu, F., Chou, Q., Søndergaard, M., Jeppesen, E. & Trolle, D. 2020. Modelling the ecological response of a temporarily summer-stratified lake to extreme heatwaves. *Water* 12(1): 94.

Elliott, J.A., Jones, I.D. & Thackeray, S.J. 2006. Testing the sensitivity of phytoplankton communities to changes in water temperature and nutrient load, in a temperate lake. *Hydrobiologia* 559: 401–411. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1233-y>

Hu, F., Bolding, K., Bruggeman, J., Jeppesen, E., Flindt, M.R., van Gerven, L., Janse, J.H., Janssen, A.B.G., Kuiper, J.J., Mooij, W.M. & Trolle, D. 2016. FABM-PCLake – linking aquatic ecology with hydrodynamics. *Geoscientific Model Development* 9: 2271-2278.

Janse, J.H., Scheffer, M., Lijklema, L., Liere, L. van, Sloot, J.S. & Mooij, W.M. 2010. Estimating the critical phosphorus loading of shallow lakes with the ecosystem model PCLake: Sensitivity, calibration and uncertainty. *Ecological Modelling* 221: 654-665.

Jeppesen, E., Søndergaard, M., Jensen, J.P., Havens, K., Anneville, O., Carvalho, L., Coveney, M.F., Deneke, R., Dokulil, M., Foy, B., Gerdeaux, D., Hampton, S.E., Kangur, K., Köhler, J., Körner, S., Lammens, E., Lauridsen, T.L., Manca, M., Miracle, R., Moss, B., Nöges, P., Persson, G., Phillips, G., Portielje, R., Romo, S., Schelske, C.L., Straile, D., Tatrai, I., Willén, E., & Winder, M., 2005. Lake responses to reduced nutrient loading—an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies. *Freshwater Biology* 50: 1747–1771.

Jeppesen, E., Meerhoff, M., Holmgren, K. et al. 2010. Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function. *Hydrobiologia* 646: 73–90. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0171-5>.

Jeppesen, E., Meerhoff, M., Davidson, T.A., Trolle, D., Lauridsen, T.L., Beklioglu, M., Brucet, S.B., Volta, P., Gonzalez-Bergonzoni, I. & Nielsen, A. 2014. Climate change impacts on lakes: an integrated ecological perspective based on a multi-faceted approach, with special focus on shallow lakes. *Journal of Limnology* 73: 88-111.

Mooij, W.M., Janse, J.H., De Senerpont Domis, L.N. et al. 2007. Predicting the effect of climate change on temperate shallow lakes with the ecosystem model PCLake. *Hydrobiologia* 584: 443–454. <https://doi.org/10.1007/s10750-007-0600-2>.

Moss, B., Kosten, S., Meerhoff, M., Battarbee, R.W., Jeppesen, E., Mazzeo, N., Havens, K., Lacerot, G., Liu, Z., Meester, L.D., Paerl, H. & Scheffer, M. 2011. Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters* 1:2: 101-105, doi: 10.5268/IW-1.2.359.

Müller-Wohlfeil, D.-I., Bürger, G. & Lahmer, W. 2000. Response of river catchment to climatic change. Application of expanded downscaling to Northern Germany. *Climatic Change* 47: 67-89.

Nielsen, A., Trolle, D., Bjerring, R., Søndergaard, M., Olesen, J.E. & Jeppesen, E. 2014. Effects of changes in climate and nutrient loading on the water quality of shallow lakes assessed by ensemble PCLake model runs. *Ecological Applications* 24(8): 1926-1944.

Roald, L.A., Hisdal, H., Hiltunen, T., Hyvärinen, V., Jutman, T., Gudmundsson, K., Jonsson, P. og Ovesen, O. 1997. Historical runoff variation in the Nordic countries. *Regional Hydrology: Concepts and Models for sustainable Water Resource Management. Proceedings of the Slovenia Conference, Sep-Oct 1997.*

Rolighed, J., Jeppesen, E., Søndergaard, M., Bjerring, R., Janse, J.H., Mooij, W.M. & Trolle, D. 2016. Climate change will make recovery from eutrophication more difficult in shallow Danish Lake Søbygaard. *Water* 8: 459.

Søndergaard, M., Trolle, D. & Bjerring, R. 2015. Sammenhænge mellem næringsstofindhold og biologiske kvalitetselementer i danske søer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 36 s. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 136.

Søndergaard, M., Nielsen, A., Levi, E.E., Johansson, L.S., Sørensen, P.B. & Trolle, D. 2020. Empiriske sømodeller for sammenhænge mellem indløbs- og søkoncentrationer af fosfor og kvælstof. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 32 s. - Videnskabelig rapport nr. 376.

Trolle, D., Hamilton, D.P., Pilditch, C.A., Duggan, I.C. & Jeppesen, E. 2011. Predicting the effects of climate change on trophic status of three morphologically varying lakes: Implications for lake restoration and management. *Environmental Modelling & Software* 26: 354-370.

Trolle, D., Søndergaard, M. & Bjerring, R. 2015. Sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og søkoncentrationer i danske søer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 34 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 138.

Vadeboncoeur, Y., Lodge, D.M. & Carpenter, S.R. 2001. Whole-lake fertilization effects on distribution of primary production between benthic and pelagic habitats. *Ecology* 82: 1065-1077.

Vollenweider R. A. 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia* 33: 53-83.

## KLIMAÆNDRINGERNES BETYDNING FOR INDSATS- BEHOV FOR NÆRINGSSTOFTILFØRSEL TIL SØER

Forsknings- og udviklingsprojekt vedr. anvendelse af dynamiske modeller til estimering af klimaeffekter på søer

Rapporten beskriver, hvordan målbelastningen for næringsstofftilførsel til fire danske søer (Søholm Sø, Bryrup Langsø, Arreskov Sø og Hinge Sø) kan have ændret sig, som følge af klimaændringer fra år 1900 til i dag. Analyserne tager udgangspunkt i procesbaserede sømodeller, som er tilpasset de fire forskellige søer. Det forudsættes, at målsætningen er fast (dvs. sommergennemsnitlig koncentration af klorofyl på 25 µg/l og 12 µg/l for hhv. lavvandede og dybe søer). Analysen viser, at forskellene i målbelastning mellem nutiden og et år 1900 klimascenarie generelt er små og i størrelsesorden 5 %. Dette er væsentligt mindre end den naturlige nutidige år-til-år variation mellem belastning og tilstand. Det vurderes, at den lille effekt især skyldes, at klimaændringerne i sommermånederne generelt er små mellem nutiden og år 1900 klimascenariet. Det forventes dog, at fortsatte klimaændringer på længere sigt vil forstærke symptomerne på eutrofiering.