



MILJØINDIKATORER – INDIKATORER TIL VURDERING AF EFFEKTER AF KLIMAÆNDRINGER

Sammenstilling og præsentation af indikatorer og understøttende data til vurdering af effekter af klimaændringer på miljø og natur

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 449

2021



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

MILJØINDIKATORER – INDIKATORER TIL VURDERING AF EFFEKTER AF KLIMAÆNDRINGER

Sammenstilling og præsentation af indikatorer og understøttende data til vurdering af effekter af klimæændringer på miljø og natur

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 449

2021

Per Andersen¹
Christian Damgaard¹
Mathias Neumann Andersen²
Hans Estrup Andersen¹
Erik Jeppesen¹

¹Aarhus Universitet, Institut for Bioscience

²Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 449
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Titel:	Miljøindikatorer – Indikatorer til vurdering af effekter af klimæændringer
Undertitel:	Sammenstilling og præsentation af indikatorer og understøttende data til vurdering af effekter af klimæændringer på miljø og natur
Forfattere:	Per Andersen ¹ , Christian Damgaard ¹ , Mathias Neumann Andersen ² , Hans Estrup Andersen ¹ & Erik Jeppesen ¹
Institutioner:	¹ Aarhus Universitet, Institut for Bioscience & ² Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	Juni 2021
Redaktion afsluttet:	Juni 2021
Faglig kommentering:	Jens Würbler Hansen
Kvalitetssikring, DCE:	Anja Skjoldborg Hansen
Sproglig kvalitetssikring:	Else Vihlborg Staalsen
Ekstern kommentering:	Miljøstyrelsen. Kommentarerne findes her: http://dce2.au.dk/pub/komm/SR449_komm.pdf
Finansiel støtte:	Miljøstyrelsen
Bedes citeret:	Andersen, P., Damgaard, C., Andersen, M.A., Andersen, H.E. & Jeppesen, E. 2021. Miljøindikatorer – Indikatorer til vurdering af effekter af klimæændringer. Sammenstilling og præsentation af eksisterende data, der kan understøtte indikatorer til vurdering af klimæændringer på miljø og natur. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 66 s. - Videnskabelig rapport nr. 449 http://dce2.au.dk/pub/SR449.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	I denne rapport sammenstilles og vurderes eksisterende data, der kan anvendes til vurdering af forskellige potentielle indikatorers anvendelighed til dokumentation af klimæændringernes effekt på det danske miljø og natur. Rapporten er opbygget, så der først gives en introduktion til problemstillingen "effekter af klimæændringer på miljø og natur". Herefter introduceres "den gode indikator", hvor der gives eksempler på klimaindikatorer, som er identificeret/udviklet bl.a. af det europæiske miljøagentur. Med dette som udgangspunkt udarbejdes bruttolisten over potentielle klimaindikatorer, som præsenteres i det efterfølgende afsnit sammen med en præsentation af det datagrundlag, der er til rådighed for arbejdet med indikatorerne. I de efterfølgende afsnit gives en række eksempler på klimaindikatorer for henholdsvis terrestrisk natur, landbrug, ferske og marine miljøer, som er baseret på forskellige typer af data og dataanalyser. Herefter samles overordnet op på vidensgrundlaget med fokus på manglende viden i forbindelse med udviklingen af og arbejdet med de forskellige indikatorer. Endelig konkluderes på anvendeligheden af indikatorerne, det eksisterende datagrundlag og analysemetoder med forslag til potentielle klimaindikatorer der kan arbejdes videre med.
Emneord:	Klimæændringer, indikatorer, natur & miljø,
Layout:	Grafisk Værksted, AU Silkeborg
Foto forside:	Per Andersen
ISBN:	978-87-7156-605-5
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	66
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/SR449.pdf

Indhold

Introduktion	5
Introduktion til klimacændringers effekter på vandmiljø og natur	7
1 Hvad er en god klimaindikator?	8
1.1 Arbejde med klimaeffekter/klimaindikatorer i Danmark og EU	8
2 Bruttolisten over potentielle klimaindikatorer og understøttende datagrundlag	16
2.1 Oversigt over overvågningsdata og andre data, der kan understøtte indikatorer ift. effekter af klimacændringer	17
2.2 Dataanalyse	18
2.3 Forslag til valg af indikatorerne fra bruttolisten	25
3 Udvalgte eksempler på indikatorer	28
3.1 Klimaindikatorer for terrestrisk økologi	28
3.2 Klimaindikatorer inden for landbruget - 1: Vandingsbehov	32
3.3 Klimaindikatorer inden for landbruget - 2: vækstsæson	36
3.4 Klimaindikatorer inden for ferskvand (vandløb) - Udvikling i vandføring	37
3.5 Klimaindikatorer inden for ferskvand (søer) - Forekomst af blågrønalger/cyanobakterier i søer	40
3.6 Klimaindikatorer inden for det marine - tidspunktet for fytoplanktonets forårsopblomstring	48
4 Mulighed for forbedret viden	58
5 Konklusioner	59
6 Referencer	60
7 Bilag	65

Introduktion

Det danske klima er i stadig forandring, og vi oplevede især i perioden fra 1980 og frem en stigende lufttemperatur, hvor årsmiddel i de fleste år efter midten af 1980'erne lå over langtidsmiddel for 30-årsperioden fra 1981-2010, figur 1.1 a og b. Hovedårsagen til temperaturstigningen er udledningen af drivhusgasser – primært i form af kuldioxid (CO₂) i forbindelse med afbrænding af fossile brændsler, som har medført en akkumulering af CO₂ i atmosfæren.

De forhøjede CO₂-koncentrationer og den forhøjede temperatur påvirker både de klimatiske forhold og vores miljø og natur, som er tæt forbundne.

Ud over den stigende temperatur medfører udledningen af CO₂ også en forurening af både terrestriske og akvatiske miljøer.

Den forøgede lufttemperatur betyder, at vi oplever klimaændringer i form af ændringer i de klimatiske forhold bl.a. i form af mere nedbør og mere ustabile vejrforhold samt stigende temperaturer i vores terrestriske og akvatiske miljøer.

Disse ændringer i miljøforholdene vil påvirke både artssammensætning, de enkelte arter og processer i økosystemerne.

Arter, inkl. nye/invasive arter, som er tilpasset de varmere forhold, kan få større succes og få større kvantitativ forekomst og dermed større betydning for økosystemernes funktion, mens arter, som er tilpasset koldere forhold, kan blive reduceret i forekomst eller helt forsvinde.

De ændrede miljøforhold kan også medføre, at den produktive periode af året forlænges, og at fænologien, dvs. den tidsmæssige forekomst af arter over året, forrykkes. Denne tidsmæssige forskydning og forlængelse af den produktive periode kan også få konsekvenser for økosystemernes funktion.

For landbruget kan de ændrede miljøforhold medføre, at der satses mere på nye afgrøder, som er tilpasset de højere temperaturer og den længere produktive periode.

Endelig kan de forhøjede temperaturer, som vil medføre en forøget stofomsætning, sammen med den forøgede afstrømning fra land betyde, at tilførslen af uorganiske næringsstoffer til fjorde og kystvande forøges, hvilket kan føre til hyppigere algeopblomstringer og mere udbredt og intensivt iltsvind.

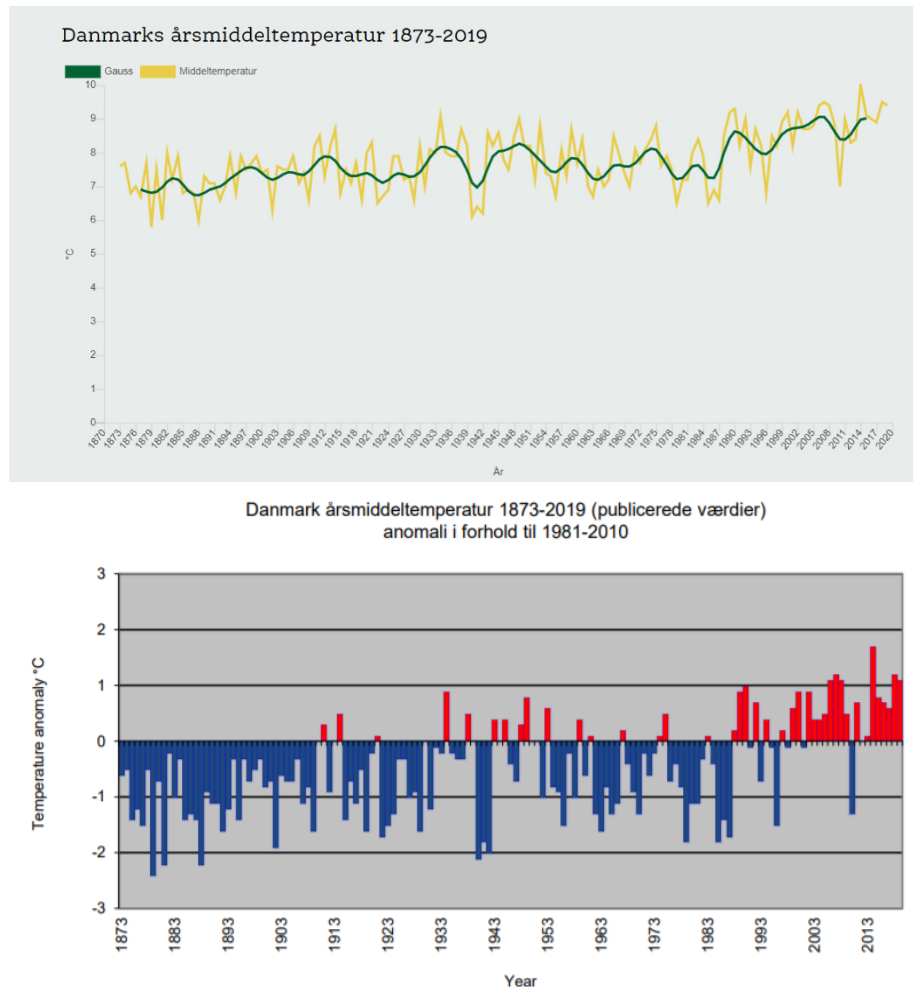
Der findes en række veludviklede klimaindikatorer, som kan dokumentere udviklingen i de meteorologiske og hydrografiske forhold i Danmark heriblandt:

- Temperatur, inkl. hyppigheden af ekstreme temperaturer
- Vindstyrke og -retning
- Nedbørsforhold og tørkeindeks
- Havniveau

se <https://xn--miljtilstand-yjb.nu/temaer/klimaforandringer/>

Et tilsvarende sæt indikatorer, som kan dokumentere klimaændringernes effekt på natur- og miljøforhold, findes ikke pt., men er under udvikling, og denne rapport udgør en del af grundlaget for dette arbejde.

Figur 1.1. (Øverst) Udviklingen i lufttemperaturen i Danmark i perioden 1873-2019. Udviklingen i temperaturen, se <https://xn--milj-tilstand-yjb.nu/temaer/klimafoerandringer/temperatur-og-klimafoerandringer/> (9-12-2020) og (nederst) udviklingen i temperaturen som anomalier i forhold til 30-årsmidlen for perioden 1981-2010, Cap-pelen m.fl. 2020.



I denne rapport sammenstilles og vurderes eksisterende data i form af allerede eksisterende tidsserier med fokus på NOVANA programmet, der kan anvendes til vurdering af forskellige potentielle indikatorers anvendelighed, til dokumentation af klimaændringernes effekt på det danske miljø og natur. I den forbindelse kan det nævnes at vi har afgrænset opgaven, så den ikke omfatter fx grundvand.

I forbindelse med projektet er der afholdt en workshop, hvor de inviterede deltagere blev præsenteret for baggrunden for projektet. Efterfølgende blev bruttolisten opdateret med henblik på at kunne understøtte udviklingen af et dansk indikatorsæt i forhold til dokumentation af status og effekter af klimaændringer på miljø og natur.

Rapporten er opbygget, så der først gives en introduktion til problemstillingen "effekter af klimaændringer på miljø og natur". Herefter introduceres "den gode indikator", hvor der gives eksempler på klimaindikatorer, som er identificeret/udviklet bl.a. af det europæiske miljøagentur. Med dette som udgangspunkt udarbejdes en bruttoliste over potentielle klimaindikatorer, som præsenteres i det efterfølgende afsnit sammen med en præsentation af det datagrundlag, der er til rådighed for arbejdet med indikatorerne.

I de efterfølgende afsnit gives en række eksempler på klimaindikatorer for henholdsvis terrestrisk natur, landbrug, ferske og marine miljøer, som er baseret på forskellige typer af data og dataanalyser.

Herefter samles overordnet op på vidensgrundlaget med fokus på behovet for yderligere viden i forbindelse med udviklingen af og arbejdet med de forskellige indikatorer.

Endelig konkluderes på anvendeligheden af indikatorer, det eksisterende datagrundlag og analysemetoder.

Introduktion til klimaændringers effekter på vandmiljø og natur

Som tidligere nævnt påvirker klimaændringerne grundlæggende de danske økosystemers kvalitative og kvantitative artssammensætning og de grundlæggende proceshastigheder. Klimaændringerne skyldes stigende mængder af klimagasser, primært CO₂ i atmosfæren, se fx det internationale klimapanel (IPCC - <https://www.ipcc.ch/>) og EEA 2017.

De øgede mængder klimagasser har en lang række effekter. De primære effekter er:

- stigende temperatur
- lavere pH i havet

Stigende temperatur har en række afledte effekter på de fysiske og kemiske forhold:

- stigende vandstand i havet
- mere ustabil klima med flere ekstreme vejrhændelser (storme, skybrud, tørke)
- forøget afstrømning fra land
 - medfører faldende salinitet i fjorde og kystvande
 - medfører stigende eutrofiering pga. tilførsel af næringsstoffer fra land
- forøget hyppighed og styrke af springlag i søer og hav.

Som et resultat af de primære effekter og de afledte effekter på de fysiske og kemiske forhold ses også afledte effekter på vores natur og miljø bl.a. i form af:

- ændringer i artssammensætning – herunder introduktion af invasive arter
- ændret fænologi
- længere vækstsæson
- ændringer i vækst- og populationsdynamik
- ændringer i form og funktion af økosystemer / fødenet
- ændringer i økologiske proceshastigheder

1 Hvad er en god klimaindikator?

En god klimaindikator for miljø og natur skal:

- a. være påvirket enten direkte eller indirekte af presfaktorerne, som skyldes/er påvirket af klimaændringer, og den skal være relevant i forhold til økosystemets struktur og funktion. I mange tilfælde vil indikatoren være påvirket af mere end én presfaktor. En god indikator er karakteriseret ved, at det skal være muligt at analysere data i forhold til de væsentlige presfaktorer, så den enkelte presfaktors betydning kan anskueliggøres/kvantificeres nærmere.
- b. være målbar med tilstrækkelig sikkerhed, så data kan anvendes i en analyse.
- c. have et datagrundlaget, som omfatter tid og rum i et omfang, så der foreligger en tilstrækkelig tidsserie for indikatoren, og at den er repræsentativ for dele af eller hele Danmark.

Desuden kan der være krav til, at indikatorerne skal være relevante i forhold til den igangværende politik og de administrative tiltag, og de skal være til at forstå og præsenteres i forbindelse med dokumentation og kommunikation af effekter af klimaændringer, se Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Kvalitetskriterier for en klimaindikator fra rapporten "Signs of climate change in Nordic Nature" TemaNord 2009: 551, Nordic Council of Ministers, Copenhagen 2009.

Quality criteria	Explanation
1. Representative for the Nordic region	Includes a large enough or representative area of the Nordic region. Defines environment class (marine, terrestrial or freshwater) and bio-geographical zone (arctic/alpine, boreal, boreonemoral or nemoral).
2. Sensitive to climate change	Measured qualities are more sensitive to climate change than their environment (i.e. early warning). Buffered from natural fluctuations and other factors (e.g. environmental pollution) that are not caused by climate change.
3. Policy relevant	Linked to politically set targets and agreements. Enables assessing progress towards targets.
4. Easily understood	Possible to display clear messages (with eye-catching graphics) that can be understood in a broader audience.
5. Relevant for ecosystems	Measures changes in nature that are of importance to the functioning and/or stability of ecosystems.
6. Scientifically agreed methodology	Based on scientifically sound methodologies acknowledged by the scientific community.
7. Quantitative	Based on real quantitative observations and statistically sound data collection methods.
8. Time series available	Shows temporal trends and can be updated routinely, e.g. annually
9. Country comparison possible	Enables comparison (e.g. benchmarking of countries).

1.1 Arbejde med klimaeffekter/klimaindikatorer i Danmark og EU

Der udvikles løbende indikatorer for klimaændringer både nationalt, regionalt (HELCOM, OSPAR, Nordisk Ministerråd) og på tværs af fx de europæiske lande (Det europæiske Miljøagentur). I dette afsnit gives en oversigt over forskellige tiltag til identifikation af klimaindikatorer, bl.a. i form af uddrag af en række danske/europæiske rapporter, der har arbejdet med klimaindikatorer. Formålet med denne opsummering er at dokumentere, hvordan der

arbejdes med klimaindikatorer i Danmark og de lande / regioner, vi samarbejder med om miljøovervågning. Specielt i forhold til samarbejdet i HELCOM, OSPAR og EU og FN kan oversigten også bruges til at få et overblik over, hvor det der er krav til, at Danmark skal bidrage eller allerede bidrager med information i form af data for de forskellige klimaindikatorer, der er i brug / under udvikling, se fx krav i forhold til EU, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R1208&from=EN> (annex 1).

1.1.1 Danmark

I Danmark er der udarbejdet flere rapporter, som fokuserer på effekter af klimaforandringer på natur og miljøforhold, bl.a. IGLOO-rapporten fra 2008, Hansen et al. 2008, som arbejder med både våd og tør natur og rapporten Natur og Miljø 2009. Del A: Danmarks miljø under globale udfordringer, Normander et al 2009, som indeholder et afsnit om klimaændringer og deres betydning for natur og miljø i Danmark. Derudover er udarbejdet en rapport, som fokuserer på klimaeffekter med fokus på akvatiske systemer, Jensen et al. 2015.

I IGLOO-rapporten konkluderes det bl.a. ”I Danmark kommer klimaforandringerne oftest til udtryk på mindre dramatisk vis f.eks. i form af stigende temperatur, ændret nedbørsmønster, tidligere start på vækstsæsonen, indvandring af nye og ofte invasive arter, ændret vandføring i vandløb og mindsket iltindhold i bundvand i søer og kystvande.”

Specielt for de akvatiske systemers vedkommende konkluderer Jensen et al. 2015, at der for vandløbenes vedkommende vil være risiko for, at den økologiske tilstand forværres i små vandløb i det østlige Danmark, hvor vandløbene kun modtager relativt lidt grundvand og derfor er særligt sårbare for såvel ændringer i nedbør som temperaturforhold, mens forholdene i mellemstore og store østdanske vandløb både kan blive forbedret og forværret afhængigt af de aktuelle forhold mht. hydrologi og temperatur.

For søernes vedkommende konkluderer Jensen et al. 2015, at der vil ske en forværring af tilstanden i de danske søer i takt med den globale opvarmning. Årsagerne til forværringen tilskrives øges næringsstofftilførslen fra oplandet til søerne og fosforfrigivelsen fra søens bund. Desuden vurderes det bl.a., at de højere temperaturer vil medføre, at der vil være færre rovfisk. Dette vil betyde en større mængde af små zooplanktonædende fisk, som vil reducere mængden af zooplankton og dermed græsningen på planktonalgerne. Resultatet heraf vil være flere og længerevarende algeopblomstringer, som også i højere grad vil blive domineret af potentielt giftige blågrønalger. De større algemængder vil derfor medføre hyppigere og længerevarende badesforbud i badesøer. De større algemængder vil også betyde, at undervandsplanternes dybdegrænse vil blive reduceret. Den forringede vandkvalitet med uklart vand og reduceret dybdegrænse for undervandsvegetationen pga. de forøgede algemængder kan yderligere forværres, både pga. forøget forekomst af karpfisk, som vil medføre forøget resuspension af bundmateriale, og forøget græsning på undervandsplanter fra blishøns og svaner.

For de marine områders vedkommende konkluderer Jensen et al. 2015, at den forøgede mængde nedbør vil medføre en større belastning af især i de kystnære områder og fjorde, og at de forhøjede temperaturer i bundvandet sammenholdt med en forøget lagdeling vil betyde større risiko for iltsvind.

Jensen et al. 2015 forventer desuden, at klimaændringerne vil påvirke det marine fytoplanktons artsammensætning, biomasser og udbredelse, og at den forøgede lagdeling sammen med højere sommertemperaturer vil danne basis for flere algeopblomstringer, der i mange tilfælde kan bestå af skadelige alger, herunder blågrønalger fra Østersøområdet og furealger.

Jensen et al. 2015 forventer, at makroalgevegetationen vil blive presset imod mindre produktivitet og lavere biodiversitet som følge af de forventede klimaændringer med øget vindenergi, varmere havvand, muligvis lavere saltindhold, vandstandsstigning og øget næringssalttilførsel. Klimaforandringer vil således kunne påvirke de makroalgeindikatorer, der anvendes eller forventes at blive anvendt i forhold til de marine direktiver. Specielt nævnes det, at ålegræs forventes at blive stresset yderligere af klimaforandringer, hvilket kan betyde, at vurderingen af miljøtilstanden i de danske farvande på baggrund af ålegræs som indikator vil forrykke sig i en overvejende negativ retning.

1.1.2 Nordisk samarbejde

I regi af nordiske samarbejde er der udarbejdet en rapport, som identificerer 14 klimasensitive indikatorer, Nordic Council of Ministers 2009. De 14 indikatorer omfatter følgende:

- Vækstsæson for vegetation
- Birkepollen – sæsonstart
- Trækfugles ankomst
- Natsværmeres og sommerfugles geografiske forekomst
- Trælinjens placering
- Palsa-mosers udvikling
- Sne – alpine plantesamfund
- Polar ræv - populationsudvikling
- Isbjørn- populationsudvikling
- Invasive marine arter
- Zooplankton – *Calanus finmarchicus* versus *C. helgolandicus*
- Havfugle i nord Atlanten
- Marine fisk – nordlige / sydlige arter
- Ferske økosystemer – bl.a. is på søer samt forekomst af smådyr

De valgte indikatorer, såsom polarræv og **isbjørn**, afspejler, at der er stor interesse for arktiske problemstillinger. Men der er også fokus på indikatorer, som kan være af interesse for danske forhold – fx vækstsæson for vegetation, sæson for birkepollen, trækfugles ankomst, invasive marine fisk og de nævnte indikatorer for ferske økosystemer.

Rapporten kan anvendes som inspiration til overvejelser og forudsætninger omkring årsagssammenhænge og dataanalyse med henblik på udvikling af klimaindikatorer tilpasset danske forhold.

I rapporten konkluderes det bl.a.:

- Klimaindikatorer kan identificeres ved en systematisk gennemgang baseret på udvalgte kriterier for at finde frem til de mest velegnede indikatorer.

- Ved at udvælge et sæt af indikatorer frem for enkelte indikatorer vil det være muligt at følge mere generelle tendenser frem for individuelle udviklingsforløb.
- Mængden og kvaliteten af data kan variere mellem de udvalgte indikatorer.

Hver enkelt indikator er blevet evalueret på baggrund af en række kvalitetskriterier, herunder:

- Sensitivitet over for klimaændringer
- Politisk relevans
- Metode og tilgængelighed af data

Det vurderes i rapporten, at den anvendte metode og de kriterier, der er lagt til grund for udvælgelsen af indikatorer i projektet, meget vel kan anvendes i andre regioner i verden.

Det understreges i rapporten, at klimaforandringen ikke kun rammer enkelte arter eller habitattyper i Norden, men at påvirkningen er generel og rammer økosystemerne på alle niveauer.

1.1.3 HELCOM

HELCOM's arbejde er fokuseret på Østersøen og Kattegat. I regi af HELCOM (<http://www.helcom.fi>) er der i 2007 udarbejdet en rapport "Climate Change in the Baltic Sea Area" (HELCOM, 2007). Denne rapport, som omhandler bl.a. det nuværende klima, klimafremskrivninger og mulige effekter på miljø- og naturforholdene i hele Østersøen, er i vid udstrækning baseret på eksisterende indikatorer. HELCOM's strategi for klimaforandring bør ifølge en efterfølgende rapport fra 2018 bl.a. fokusere på: (1) reduktion af forurening, (2) beskyttelse af truede arter og habitater, og (3) fortsættelse af overvågningen, som er baseret på indikatorer, da lange tidsserier er en forudsætning for dokumentation af klimaeffekter.

Følgende indikatorer har særlig interesse i relation til klimaændringer:

- Overfladetemperatur
- Bølgeklima
- Isdække og -sæson
- Vandskifte
- Volumen af iltsvind
- Afstrømning
- Vandbårne tilførsler af næringsstoffer
- Luftbårne tilførsler af næringsstoffer
- Koncentration af klorofyl-a i havvand
- Økosystem struktur og funktion

Disse indikatorer er udviklet med det primære sigte at vurdere effekter af eutrofiering, men flere af indikatorerne skal også anvendes ved vurdering af klimaeffekter. Mht. klimaændringer har HELCOM fokus på, at mange af de arter, der forekommer i Østersøen, er både følsomme over for ændringer i saltindhold og temperatur. Klimaændringer vil også medføre forsurening, forhøjet vandstand og ændringer i nedbørsmønstret, som vil påvirke forekomsten

af næringsstoffer. HELCOM konkluderer, at effekterne af klimaforandringerne kan forværre eutrofieringen af Østersøen, og at det derfor er væsentligt, at målene for reduktionen af næringsstoftilførsel nås for at mindske de negative effekter af klimaændringerne, HELCOM 2013 & 2018. I den forbindelse kan det nævnes, at der er udgivet en række specialrapporter om klimaeffekter i Østersøområdet bl.a. på fytoplankton, algevegetation og ålegræs i regi af projektet Baltadapt, se Dahl et al. 2012.

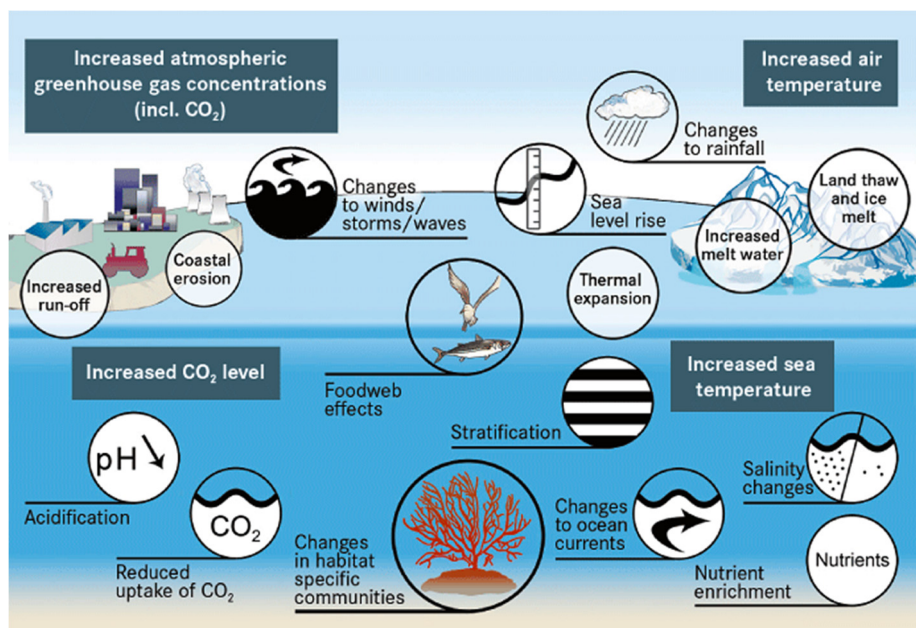
1.1.4 OSPAR

OSPAR's arbejde med monitoring og vurdering af miljøforholdene er fokuseret på Nordsøen og Kattegat. I rapporten OSPAR indicators (2017) <https://oap.ospar.org/en/ospar-assessments/intermediate-assessment-2017/climate-and-ocean-acidification/> fokuseres der på følgende indikatorer i forhold til klimaændringer:

- Temperatur i havoverfladen
- Havis
- pH
- Havniveau
- Bølger og storme
- Nedbør og afstrømning
- Salinitet
- Ændringer i planktonsammensætning
- Ændringer i primærproduktion
- Ændringer i artssammensætning af fisk
- Ikke-hjemmehørende arter (NIS)
- Invasive arter
- Ynglesucces hos havfugle
- Forekomst af marsvin og delfiner

Se figur 1.2 og tabel 1.2.

Figur 1.2. Klimaeffekter på natur og miljø som beskrevet på OSPAR's hjemmeside <https://qsr2010.ospar.org/en/ch03.html>



Tabel 1.2. Opsummering af klimaeffekter på havmiljøet fra OSPAR's hjemmeside <https://qsr2010.ospar.org/en/ch03.html>.

Impact	What might happen	What has been observed
Plankton	Northward shift of species in shelf and open ocean. Region I: Increased productivity with loss of sea ice	1000 km northward shift of many plankton species over the past 50 years → Figure 3.4. Changes in timing of seasonal plankton blooms
Harmful algal blooms	Potentially increasing incidence of harmful algal blooms as a result of changes in sea temperature, salinity and stratification	Anomalous phytoplankton blooms (often harmful) in specific habitats affected by lower salinities (e.g. Norwegian trench) or higher temperatures (German Bight)
Fish	Northward shifts in population, but lack of knowledge of the underlying mechanisms make projections uncertain Increased temperature could increase the incidence of disease for farmed species of fish and shellfish	Northward shifts of both bottom-dwelling and pelagic fish species, most pronounced in Regions I and II
Marine mammals	Loss of habitat for mammals dependent on sea ice. Changes in availability of prey species are likely, especially in Region I, due to mismatches in production	Data on distribution, abundance and condition of marine mammals are limited Ringed seals and polar bear may already be affected by loss of sea ice
Seabirds	Impacts on seabirds are likely to be more influenced by changes in their food supply than through loss of nests due to changed weather	Seabird breeding failure in the North Sea has been linked to variations in food availability as a result of increased sea temperatures
Non-indigenous species	Increased invasions and establishment may be facilitated by climate change and pose a high risk to existing ecosystems	Establishment of Pacific oyster and the barnacle <i>Elminius modestus</i> has been linked to climate change
Intertidal communities	Continued extension and retraction of the ranges of different intertidal species	Some warm-water invertebrates and algae have increased in abundance and extended their ranges around the UK over the past 20 years
Benthic ecology	Benthic sessile organisms are largely tolerant of moderate environmental change over reasonable, adaptive time-scales but are very vulnerable to abrupt and extreme events	Anomalous cold winter conditions have seen outbreaks of cold-water species and die-offs of warm-water species. Species composition changes have occurred, but not major shifts or changes in gross productivity

1.1.5 Det Europæiske Miljøagentur

Det Europæiske Miljøagentur (EEA) har i en række år løbende arbejdet for udvikling og anvendelse af et stigende antal indikatorer for miljø- og naturkvaliteten i Europa. Arbejdet har bl.a. resulteret i beskrivelsen af et fælles sæt klimaindikatorer (EEA 2008, EEA 2017).

Pt. arbejder agenturet med klimaindikatorer, som er fokuseret på følgende overordnede temaer: (I) Atmosfæren, (II) Is og sne, (III) Marine områder, (IV) Ferskvandssystemer, (V) Terrestriske økosystemer – jord og skove, (VI) Økosystemer og deres services, (VII) Effekter af klimarelaterede ekstreme, (VIII) Menneskers sundhed, (IX) Landbrug, (X) Energi, (XI) Transport og (XII) Turisme. I 2008 var der defineret i alt 42 indikatorer, mens der i 2017 var udviklet 53 indikatorer. Klimaindikatorerne for natur og miljø er fordelt på følgende temaer:

Klimacændringernes betydning for de klimatiske forhold

I: Atmosfæren

1. Temperatur, globalt og i Europa
2. Varmeekestremer
3. Nedbør i Europa

- 4. Nedbørsekstremer
- 5. Storme
- 6. Hagl

II: Is og sne

- 7. Is i Arktis og i Østersøen
- 8. Isdække på Grønland
- 9. Gletschere
- 10. Snedække

Klimacændringernes betydning for naturen/miljøet

III: Marine områder

- 11. Forsuring af havet
- 12. Indhold af varme i havet
- 13. Havets overfladetemperatur
- 14. Udbredelse af marine arter
- 15. Iltforhold i havet
- 16. Vandstand i havet

IV: Ferskvandssystemer

- 17. Vandføring i floder
- 18. Oversvømmelser
- 19. Tørke og vandmangel
- 20. Vandtemperatur
- 21. Økosystemer og vandkvalitet

V: Terrestriske økosystemer, jord og skove

- 22. Vandindhold i jorden
- 23. Fænologi af planter og dyr
- 24. Ændringer i arters udbredelse, nord / syd
- 25. Skovenes artssammensætning og udbredelse
- 26. Skovbrande
- 27. Sygdom og skadedyr i skove

VI: Økosystemer og deres services

- 28. Økosystemservices under pres
- 29. Undersøgelse / status for økosystemservices
- 30. Klimaforandringernes effekt på økosystemservices

IX: Landbrug

- 38. Afgrødernes vækstsæson
- 39. Agrofænologi
- 40. Vandbegrænsning af udbytte
- 41. Afgrødernes vandbehov
- 42. Husdyrproduktion

I EEA-rapporten fra 2017 samles der op på udviklingen i de forskellige indikatorer for de forskellige europæiske regioner, se tabel 1.3.

Tabel 1.3. Opsummering af klimaeffekter og deres udvikling for forskellige europæiske regioner, fra EEA (2017).

Table ES.1 Key observed and projected climate change and impacts for the main regions in Europe (cont.)

Direction of observed and projected climate change and impacts for the main regions in Europe											
Section	Indicator/impact domain	Variable	Sensitivity to adaptation policy	Northern		Temperate		Southern		European average	
				Boreal and Arctic		Atlantic	Continental		Mediterranean		
				Obs	Proj	Obs	Proj	Obs	Proj	Obs	Proj
5.3 Agriculture											
5.3.2	Growing season for agricultural crops	Duration	No								
5.3.3	Agrophenology	Day of spring events	Domain								
5.3.4	Water-limited crop yield	Average yield	Variable								
		Adverse climatic conditions	Domain								
5.3.5	Crop water demand	Water deficit	Domain								
5.4 Energy											
5.4.2	Heating and cooling degree days	Heating degree days	No								
		Cooling degree days	No								
5.4.4	Electricity production	Production potential	Domain								
5.5 Transport											
5.5.2	Impacts of climate and weather extremes	Costs of adverse weather events	Domain								
5.6 Tourism											
5.6.2	Summer and beach tourism	Attractivity (summer season)	Domain								
5.6.3	Winter and mountain tourism	Winter sport potential	Domain								
6 Multi-sectoral vulnerability and risks											
6.3	Projected economic impacts	Welfare	Variable								
				Arctic Ocean	Atlantic and North Sea		Baltic Sea		Mediterranean and Black Sea		European seas average
3.3.2	Arctic and Baltic sea ice	Extent	No								
4.1 Oceans and marine environment											
4.1.2	Ocean acidification	Acidity	No								
4.1.3	Ocean heat content	Heat content	No								
4.1.4	Sea surface temperature	Temperature	No								
4.1.5	Range shifts of marine species	Latitude (migration and immigration)	No								
4.1.5	Fisheries	Catch potential	Domain								
4.1.6	Ocean oxygen content	Number of dead zones	Trend								

Legend:

↗	Increase throughout most of a region	Dominating trend in at least two-thirds, opposing trend in less than 10 %	Beneficial change
↘	Decrease throughout most of a region		
↗↘	Increase in substantial parts of a region	Trend in between one-thirds and two-thirds, opposing trend in less than 10 %	Adverse change
↘↗	Decrease in substantial parts of a region		
↗↘↔	Increases as well as decreases in a region	Trends in both directions in at least 10 %	Change classified as neither adverse nor beneficial/small change
→	Only small changes		
* The direction of change (European average) differs depending on the forest species, insect pest, disease and transport mode			

2 Bruttolisten over potentielle klimaindikatorer og understøttende datagrundlag

I forbindelse med arbejdet med dette projekt er der udarbejdet en liste over potentielle klimaindikatorer for natur og miljø i Danmark, se tabel 2.1.

Ved udvælgelse af potentielle klimaindikatorer er der gjort brug af ”ekspert-vurderinger” kombineret med information om klimaindikatorer, som allerede er taget i anvendelse i fx EU-sammenhæng. Udvælgelsen er således ikke baseret på en systematisk og detaljeret analyse af de tilgængelige data. Dette afspejles i at de enkelte potentielle indikatorer i bruttolisten kun vurderes på en to-trins-skala.

I forbindelse med udarbejdelse af bruttolisten over klimaindikatorer har vi bestræbt os på at identificere både akvatiske og terrestriske indikatorer.

Nogle af indikatorerne kan opfattes som støtteparametre for de biologiske parametre. Dette gælder fx vandtemperatur, springlægsstyrke, vandføring og tørkeindeks. Mens de biologiske parametre bl.a. omfatter forekomst af arter, plante-samfund og vækstperiode samt hyppigheden af opblomstringer og iltsvind.

De overordnede kriterier for valget af klimaindikatorer til bruttolisten har været:

- At der er en god forståelse/forventning til at indikatoren påvirkes af klimaforandringerne
- At indikatoren er af stor betydning for økosystemfunktionen og/eller er ”synlig”, dvs. umiddelbart kan kommunikeres ud til befolkningen eller er en truet art/naturtype
- At der er data til rådighed for analyse for indikatoren
- At der er udviklet eller kan udvikles en metode til analyse af data

Prioriteringen af de potentielle indikatorer afspejler disse kriterier. Der gives højest prioritering til de potentielle indikatorer, som kan opfylde kriterierne.

I de tilfælde, hvor der kan identificeres en oplagt potentiel indikator, fx bøgens udspringstidspunkt og/eller udvalgte arters fænologi, men hvor datagrundlaget ikke p.t er til stede, kan indikatoren ikke få den højeste prioritet. I den forbindelse er det nødvendigt, at datagrundlaget undersøges yderligere, og der kan iværksættes arbejde med at få det nødvendige datagrundlag tilvejebragt, så den potentielle indikator kan blive opprioriteret og have mulighed for at komme i anvendelse.

Bruttolisten kan anvendes som grundlag for en dybere analyse af udvalgte indikatorer for at identificere de indikatorer fra bruttolisten, som er mest vel-egnede til at afspejle klimaændringerne. Dette skal vurderes både ud fra tilgængelighed af data, og i hvor høj grad den enkelte potentielle indikator afspejler klimaændringer i forhold til fx ændringer som skyldes ikke-klimabetingede variation i tilførslen af næringsstoffer, forekomst af invasive arter eller fiskerimæssige forhold. I den forbindelse er det også vigtigt at udvikle indikatorer, som kræves i forhold til vores internationale forpligtelser/aftaler

og/eller som i størst muligt omfang også kan anvendes i de lande/organisationer, vi arbejder sammen med om miljøovervågning.

2.1 Oversigt over overvågningsdata og andre data, der kan understøtte indikatorer ift. effekter af klimaændringer

Mht. data for miljø- og naturdata vurderes det, at datagrundlaget for at identificere og analysere data for en lang række parametre, som har potentiale til at fungere som klimaindikatorer, er til stede i form af data fra det nationale overvågningsprogram (NOVANA), se <https://mst.dk/overvaagning> suppleret med data fra fx DOF-databasen (fugle) og markvandingsdata fra GEUS-databasen "Jupiter". Desuden er der mulighed for at trække på kommunernes data for badevandskvalitet, Naturdatabasen (<https://naturdata.miljoeportal.dk/>) mv.

NOVANA-data omfatter bl.a.:

- Afstrømningsdata
- Fysisk/kemiske data for søer (s), vandløb (v) og marine områder(m)
 - Temperatur (overflade (svm)/bundvand (sm))
 - Uorganiske næringsstoffer (N og P i overflade(svm) og bundvand (sm))
 - Iltforhold (overflade (svm) og bundvand (sm))
- Biologiske data for søer, vandløb og marine områder
 - Forekomst af planteplankton/benthiske mikroalger
 - Klorofyl A (sm)
 - Planteplankton (arter, abundans og C-biomasse) (sm)
 - Benthiske mikroalger (v)
 - Hyppighed af algeopblomstringer (sm)
 - Fænologi
 - Timing af forårsopblomstringen af planteplankton (sm)
 - Varigheden af efterårsopblomstringen af planteplankton (sm)
 - Mikrozooplankton (sm)
 - Mesozoplankton (sm)
 - Benthiske invertebrater/smådyr (svm)
 - Fisk (svm)
 - Fugle (sm)
 - Makrofyter (svm)
 - Ændringer i artssammensætningen inkl. forekomst af ikke hjemmehørende arter / NIS/invasive arter (svm)

Specielt for søernes vedkommende påpeges det, at mesozoplankton ikke mere overvåges rutinemæssigt – men at det vurderes, at størrelsesfordelingen af mesozoplankton ville kunne fungere som en god indikator for klimaændringer.

Specielt for vandløbenes vedkommende kan det påpeges, at ændringer i forekomsten af arter af både smådyr og planter som respons på klimaændringer specielt i form af forhøjelser af vandtemperaturen har stort potentiale som klimaindikator, Baranow et al. (2020), Bhowmik & Schäfer (2015), Sand-Jensen et al. (2006). Desuden har gydningstidspunktet for ørred eller andre faktorer relateret til ørreds reproduktion også potentiale som klimaindikator (Jonsson & Jonsson 2009).

Specielt for det marine miljø vedkommende påpeges det, at gopler (storgopler og ribbegople) ikke er omfattet af den eksisterende NOVANA-overvågning – men at især forekomsten af ribbegoplen *Mnemiopsis leidyi* har potentiale som klimaindikator, Nordic Council of Ministers 2009. Arten karakteriseres også som en NIS/invasiv art.

Specielt for vurdering af fugle som indikatorer vurderes det, at der er adgang til NOVANA-data samt data fra DOF-databasen. DOF-databasen er en meget vigtig dataressource sammen med data, som indsamles af et netværk af personer udpeget en af de ansvarlige for fugleovervågningen (Preben Clausen, Institut for Bioscience – Faunaøkologi, pers. komm.).

NOVANA-data kan eventuelt suppleres med data fra NEC-overvågningen. NEC står for National Emission Ceilings <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-pollution-sources-1/national-emission-ceilings>. Der er ved at starte NEC-overvågning op i Danmark, da det er en direktivforpligtelse. En af NEC-stationerne bliver Aarhus Universitets feltundersøgelser i Lild i Nordvestjylland, som kommer til at køre videre i regi af NEC. Det er først og fremmest betydningen af luftforurening, der er fokus for NEC, men da der undersøges vegetation i permanente plots, vil en delmængde af felterne kunne bruges til indikation af effekter af klimaændringer – formentlig vil der også være mulighed for at se på effekter af kombinationen af klimaændringer og anden stress.

En indikator, som bøgens udspring, monitoreres ikke i hverken NOVANA eller anden officiel regi. Der eksisterer dog data for bøgens udspring i Vejle, som er publiceret af Rune (2009). Desuden indsamler TV2-vejret løbende information om bøgens udspring som en slags "Citizen science" overvågning, <https://vejrtv2.dk/2020-03-25-boegen-er-sprunget-ud>.

Mht. indikatorer for landbrugsaktiviteter forventes det, at databehovet for at kunne vurdere en indikator som fx kunstvanding kan dækkes af data fra GEUS-databasen Jupiter. <https://www.geus.dk/produkter-ydelser-og-faciliteter/data-og-kort/national-boringsdatabase-jupiter>.

2.2 Dataanalyse

De data, som beskriver udviklingen i de udvalgte miljøindikatorer, skal være kvantitative og kvalitetssikrede. Desuden skal der være data til rådighed i form af tidsserier, som dækker den periode, der ønskes vurderet i forhold til klimaændringer.

De potentielle klimaindikatorer afspejler i større eller mindre grad klimaeffekterne, men kan også være påvirket af andre miljøpåvirkninger fx tilgængeligheden af næringsstoffer, meteorologiske forhold og biologiske interaktioner. I forbindelse med arbejdet med at analysere de potentielle klimaindikatorer skal lægges vægt på at vurdere, i hvor høj grad de udvalgte klimaindikatorerne også påvirkes af andre forhold.

Til analyse af natur- og miljødata skal der udvikles metoder til at aggregere/sammenholde data fra forskellige lokaliteter/stationer, så den enkelte indikator får størst udsagnskraft. Som udgangspunkt skal analyserne foretages på et datamateriale, som omfatter lokaliteter/stationer, der er repræsentative for specifikke naturtyper. I det omfang, at data fra enkelte udvalgte lo-

kaliteter/stationer er specielt følsomme over for klimaændringerne, kan analysen omfatte både data for de undersøgte lokaliteter/stationer og de aggregerede data for alle stationer/lokaliteter omfattet af undersøgelsen. I det efterfølgende er der eksempler på denne type analyse i arbejdet med klimaindikatorer i forbindelse med analysen af vandføring i danske vandløb, hvor der både angives udvikling for det enkelte vandløb og for alle de undersøgte vandløb samlet. I forbindelse med den marine overvågning arbejdes der også med aggregering af data fra de undersøgte stationer fordelt på de to marine farvandsområder ”åbne vandområder” og ”fjorde og kystvande” for støtteparametre, mens der for tidspunktet for forårsopblomstringen af planteplankton både arbejdes med data fra en station og aggregerede data fra en lang række stationer.

Ved en samlet analyse af klimaeffekter baseret på de udvalgte klimaindikatorer skal der lægges vægt på, i hvor høj grad indikatorerne reagerer i samme retning i forhold til klimaændringerne – og om der sideløbende sker ændringer i andre presfaktorer for de udvalgte indikatorer.

Tabel 2.1: Bruttolisten over potentielle klimaindikatorer. Bemærk at prioritering er 1, når indikatoren har højeste prioritet.

Klima-indikatorer	Bruttoliste	Indikator-type									NO-VANA	andre kilder
Indikator		Presfaktorer					Biologiske kvalitetselementer	Fysisk-kemiske kvalitetselementer				
		klima	Eutrofi-ering	invasive arter	fiskeri	land-brug	MFS	Økologisk tilstand	Støtte-parameter			Prioritering
1. Terrestrisk natur	Timing af "udspring"/blomstring	X						X		2	nej	
	Længde af vækstsæson	X						X		2	nej	
	Nye arter/tabte arter (sydlige/nordlige)	X		X				X		1	ja	
	Invasive arter	X	X	X		X		X		1	ja	
	Samfundsstruktur/vegetationstype	X	X	X				X		1	ja	
	Plantesamfundsstruktur/økologisk funktion/vegetationstype (klitter og heder)	X	X	X			X	X		2	ja	
	Jordbund	X	X					X	X	2	ja	
	Pollen sæsoner	X						X		1	nej	DMI/Astma-Allergi Danmark
	Skadedyr/sygdomme	X		X				X		2	nej	

		Presfaktorer					Biologiske	Fysisk-kemiske kvali-				
							kvalitetselementer	tetselementer				
Indikator		klima	Eutrofi- ering	invasive arter	fiskeri	land- brug	MFS	Økologisk tilstand	Støttepa- rameter			priorite- ring
2. Landbrug/ skovbrug	Vækstsæson for afgrøder	X				X		X		1	nej	satellitdata
	Fænologi - timing af afgrøder	X				X		X		1	nej	satellitdata, landforsøg, sortsforsøg
	Nye afgrøder	X				X		X		2	nej	Landbrugsstyrelsens data- base
	Variation i udbytte	X	X					X		2	nej	Landsforsøg, sortsforsøg, Danmarks Statistik, satellit- data
	Behov for markvanding	X				X			X	1	nej	DMI, Vandregnskab model, Jupiter databasen
	Tørkeindex	X							X	1	nej	DMI, Vandregnskab model
	Vækst hos skovtræer	X						X		2	nej	
	Risiko for skovbrand	X							X	2	nej	
	Skadedyr/sygdomme	X		X				X		2	nej	

	Indikator	Presfaktorer					MFS	Biologiske kvali- tetslementer	Fysisk-kemiske kvalitetselementer			
		klima	Eutrofi- ering	invasive arter	fiskeri	land- brug		Økologisk tilstand	Støttepa- rameter	priorite- ring		
3. Hav	Havniveau	X							X	1	nej	DMI
	Vandtemperatur - overflade/bund	X							X	1	ja	
	Springlagsstyrke	X							X	1	ja	
	pH	X	X						X	1	ja	
	Isdække	X							X	2	nej	
Plankton	Iltsvinds hyppighed/udbredelse	X	X						X	1	ja	DMI
	Sydlig/nordlige arter	X	X	X				X		1	ja	
	Invasive arter	X	X	X				X		1	ja	
	Fænologi for udvalgte arter	X	X	X				X		1	ja	
	Timing af forårsopblomstring	X	X	X				X		1	ja	
	Varighed af efterårsopblomstring	X	X	X				X		1	ja	
	Længde af vækstsæsonen	X	X	X				X		1	ja	
	Hyppighed af opblomstringer	X	X	X				X		1	ja	
Vegetation	Dybde grænse - ålegræs	X	X		X			X		2	ja	DTU-aqua
	Dybde grænse - alger	X	X	X				X		2	ja	
	Ålegræs på lavt vand	X	X		?			X		2	nej	
	Sukkertang - temperaturstress	X	X	?				X		1	ja/nej	
	Invasive makroalgearter	X	X	X				X		1	ja	
Bunddyr	Sydlig/nordlige arter	X	X	X	?			X		1	ja	DTU-aqua
	Invasive arter	X		X	?			X		1	ja	
	Fænologi for udvalgte arter	X			?			X		2	nej	
	Ændringer i biodiversitet-flere generalister	X	X	X	X	X	?	X		2	ja	
Fisk/fugle/pat- tedyr	Sydlig/nordlige arter	X			?			X		1	nej	DTU-aqua
	Invasive arter	X			?			X		1	nej	
	Fænologi for udvalgte arter	X	X	X	X			X		2	nej	

		Presfaktorer					Biologiske kvali- tetslementer	Fysisk-kemiske kvali- tetslementer				
Indikator		klima	eutrofi-invasive ring	arter	fiskeri	land- brug	MFS	Økologisk tilstand	Støttepa- rameter	priorite- ring		
4. Ferskvand - sø	Vandtemperatur - overflade/bund	X							X	1	ja	
	Springlagsstyrke	X	X						X	2	ja	
	Isdække	X							X	2	ja	
	Iltindhold I bundvand	X	X						X	2	nej	
	Nye arter/tabte arter	X	X	X				X		1	ja	
	Sydlig/nordlige arter	X	X	X				X		2	ja	
	Udvalgte invasive arter	X	X	X				X		1	ja	
	Fytoplanktonbiomasse/Klorofyl a	X	X					X		2	ja	
	Timing af forårsopblomstring	X	X	X				X		2	nej	
	Varighed af efterårsopblomstring	X	X	X				X		2	nej	
	Cyanobakteriebiomasse	X	X					X		1	ja	
	Relativ andel af cyanobacteria - biomasse	X	X					X		1	ja	
	Fiskenes gennemsnitsstørrelse	X	X		X			X		1	nej	DTU-aqua

Indikator		Presfaktorer					MFS	Biologiske kvali- tetslementer	Fysisk-kemiske kvali- tetslementer		
		klima	eutrofi-invasive			land- brug		Økologisk tilstand	Støttepa- rameter	priorite- ring	
			ring	arter	fiskeri						
5. Ferskvand - Maksimum, minimum, middel, median, vandløb	baseflow-indeks	X				X			X	1	ja
	Hyppighed af ekstremhændelser - fx. over- svømmelse	X				X			X	1	ja
	Vanddybde, sommer	X				X			X	1	ja
	Temperatur	X							X	1	ja
	Iltindhold	X	X						X	2	nej
	Koncentration af næringsstoffer i natur- vandløb	X	X			X			X	2	ja
	Koncentration af suspenderet stof	X	X			X			X	2	ja
	Faunaindeks	X	X	X		X		X		2	
	Andel af makroinvertebrater med præfe- rence for koldt vs varmt vand	X								1	ja
	Andel af plantearter med præference for koldt vs varmt vand	X								1	ja
	Ørreds fænologi	X								2	nej
	Overvintrende plantebiomasse	X								2	nej
	Emergenstidspunkter for udvalgte akvati- ske insekter	X								2	nej
	Parring og æglægning hos visse frøer	X								2	nej

2.3 Forslag til valg af indikatorerne fra bruttolisten

I dette afsnit præsenteres og prioriteres potentielle klimaindikatorer fra bruttolisten.

Terrestrisk natur

Der er et godt datagrundlag i NOVANA-overvågningen for at inkludere specielt udviklingen i forekomsten af henholdsvis sydlige og nordlige arter som klimaindikatorer med fokus på arter, som kan være invasive. Desuden kan der fokuseres på plantesamfund, som skitseret i afsnittet vedr. hedevegetation i denne rapport.

Fænologi inkl. tidspunktet for "udspring"/blomstring hos planter samt pollensæsoner er ikke omfattet af NOVANA-programmet, men overvåges i andet regi. Hvis der kan etableres kvalitetssikrede data for disse potentielle indikatorer, vil det være relevant at inkludere dem som klimaindikatorer i Danmark. Disse potentielle indikatorer er allerede udviklet som klimaindikatorer og anvendes som en del af overvågningen af klimaændringer i EU-regi. Desuden er det indikatorer, som kan kommunikeres ud bredt, fordi der er almindeligt kendskab til dem i befolkningen.

Landbrug/skovbrug

Landbrugs- og skovbrugsforhold er ikke omfattet af NOVANA-overvågningen. Vækstsæsonen/fænologi hos afgrøder og behov for markvanding/tørkeindeks har et potentiale som klimaindikatorer, og der findes anvendelige kvalitetssikrede data fx i form af markvanding.

Havet

NOVANA-overvågningen omfatter en række parametre, som kan anvendes som klimaindikatorer. Parametrene omfatter parametre som vandtemperatur, data til beregning af springlagsstyrke og pH, som alle er anerkendte indikatorer for klimaændringer. Desuden kan NOVANA-overvågningen af iltsvindshyppighed og den geografiske og tidsmæssige udbredelse af iltsvind levere data, som kan anvendes ved udvikling af en klimaindikator.

NOVANA-overvågningen leverer gode og kvalitetssikrede data vedr. udviklingen i forekomsten af bl.a. marine arter, som sikrer, at etablering/forekomst af nye arter og tab af "gamle" arter dokumenteres. Der er specielt fokus på invasive arter, som også kan anvendes som klimaindikatorer. Biodiversiteten i fiskefaunaen er ikke dækket af NOVANA-programmet, men er omfattet af DTU Aquas overvågning. Men der findes kvalitetssikrede fiskedata, som indrapporteres til ICES og kan inddrages i indikatorarbejdet med fokus på udviklingen i den marine biodiversitet og introduktion af sydlige arter og tab af nordlige arter i danske farvande.

NOVANA-overvågningen leverer data for fænologien i plankton, som kan anvendes til analyse af fx tidspunktet for fytoplanktons forårsopblomstring, efterårsopblomstring og vækstsæson, som alle har potentiale som klimaindikator. Udviklingen af disse parametre som klimaindikatorer kræver, at primært effekten af eutrofiering på disse parametre udredes, så effekten af kli-

maændringer kan isoleres. Denne type analyse kan gennemføres ved anvendelse af data for udvalgte arters populationsdynamik og modelanalyse af betydningen af især eutrofiering og de hydrografiske forhold (forekomst af springlag og opholdstid i undersøgelsesområderne).

Mht. vegetationsforhold bør det overvejes at undersøge nærmere, om ekstremtemperaturer kan have betydning for udbredelsen af ålegræs, specielt på lavt vand og sukkertang mere generelt i danske farvande. Begge arter lever på deres sydlige udbredelsesgrænse i danske farvande, og stigende temperaturer kan derfor have en negativ effekt på deres forekomst og udbredelse. I den forbindelse kan det nævnes, at nye observationer, indikerer, at ”marine varmebølger”, dvs. kortvarige perioder med markant forhøjede vandtemperaturer, som der kan forventes flere af i fremtiden pga. klimaforandringerne, kan medføre sammenbrud af bestande af sukkertang, som lever på grænsen af deres udbredelsesområde fx i Sydnorge (Filbee-Dexter et al. 2020).

Mht. bunddyrssamfund bør det undersøges, om ændringer i artssammensætningen kan relateres til klimaændringer, så analyse af biodiversiteten kan udvikles som en klimaindikator.

Søer

Som for havets vedkommende omfatter NOVANA søovervågningen en række parametre, som kan anvendes som klimaindikatorer. Parametrene omfatter ”støtteparametre” som vandtemperatur og data til beregning af springlagsstyrke, herunder temporær lagdeling. Højfrekvente målinger af temperatur og iltindhold kan understøtte dette væsentligt.

NOVANA-overvågningen leverer gode og kvalitetssikrede data vedr. udviklingen i forekomsten af arter generelt som sikre, at etablering/forekomst af nye arter og tab af ”gamle” arter dokumenteres og kan anvendes som klimaindikatorer.

Specielt udviklingen i forekomsten af blågrønalger / cyanobakterier i sommerperioden har stort potentiale som klimaindikator, se afsnittet om søer i denne rapport.

Også fænologiske ændringer og varighed af algeopblomstringer kan opgøres, specielt hvis data understøttes af satellitdata, klorofylsensorer og anvendelse af droner.

NOVANA-overvågningen omfatter ikke længere zooplankton i søer. Der er god dokumentation for, at udviklingen i forekomsten af zooplankton og at specielt zooplanktonets størrelsesfordeling kan være end god indikator for klimaforandringer bl.a. pga. et ændret græsningstryk fra småfisk på zooplanktonet som respons på stigende temperaturer.

Det kan bemærkes, at simuleringer med eksisterende komplekse modeller og modeller er under udvikling og vil blive vigtige redskaber i endnu højere grad i fremtiden i vurderingen af klimaeffekter på søer.

Vandløb

Som for søernes vedkommende omfatter NOVANA-overvågningen af vandløb en række parametre, som kan anvendes som klimaindikatorer. Parametrene fysiske parametre som vandtemperatur, vandføring (gennemsnit, min./max) og vanddybde i sommerperioden.

NOVANA-overvågningen leverer desuden gode og kvalitetssikrede data vedr. udviklingen i forekomsten af smådyr, fisk og planter i vandløb, så etablering/forekomst af nye arter og tab af "gamle" arter kan dokumenteres. Ligeledes kan den relative forekomst af arter med præference for koldt henholdsvis varmere vand opgøres både for planter, smådyr og fisk og anvendes som potentielle klimaindikatorer.

3 Udvalgte eksempler på indikatorer

I dette afsnit præsenteres en række udvalgte potentielle biologiske indikatorer samt en fysisk indikator (afstrømning via vandløb) for klimaændringer, som omfatter både terrestriske og akvatiske naturtyper / økosystemer i Danmark.

De udvalgte terrestriske indikatorer omfatter dels udviklingen af klokkel ynglokaliteter på våde heder og dels vandingsbehov og vækstsæson i landbruget. De udvalgte akvatiske indikatorer omfatter vandføring i vandløb, forekomsten af blågrønalger / cyanobakterier i søer og timingen af forårsopblomstringen i havet. Vi har fokuseret på netop disse eksempler, da Aarhus Universitet har stor viden om, hvordan de udvalgte indikatorer påvirkes af klimaændringer. Vi gør opmærksom på, at der er data til rådighed og dermed gode muligheder for også at udvikle / arbejde med andre af de potentielle klimaindikatorer, som fremgår af bruttolisten. De valgte eksempler skal således fungere som eksempler på, hvordan der kan arbejdes med data i udviklingen af indikatorerne.

I afsnittet om timingen af forårsopblomstringen i det marine miljø gives også eksempler på, hvordan eksisterende marine fysiske støtteparametre, som indgår i NOVANA-overvågningen, kan analyseres og præsenteres som klimaindikatorer.

3.1 Klimaindikatorer for terrestrisk økologi

Christian Damgaard, Bioscience, Aarhus Universitet

I forbindelse med overvågningen af de terrestriske lysåbne naturtyper, som bliver foretaget inden for kontrolovervågningen i NOVANA-program (Nielsen et al. 2012), er der flere af de målte indikatorer, som er relevante som klimaindikatorer.

3.1.1 Dækningsdata

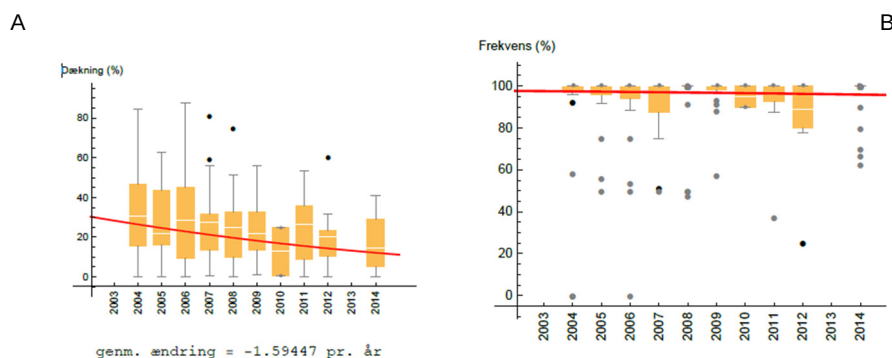
Planters abundans måles ofte ved deres dækning, som er den projicerede dækning af de forskellige plantearter ned på jordoverfladen (Damgaard & Irvine 2019). I kontrolovervågningen måles dækningen ved pin-point metoden (Nielsen et al. 2012). Indtil for nylig er dækningsdata blevet indsamlet for alle de lysåbne naturtyper. Men siden 2018 er der kun indsamlet dækningsdata for klit og hede naturtyper, hvilket fremadrettet medfører, at muligheden for via NOVANA-programmet at opdage eventuelle effekter af klimaændringer på baggrund af dækningsdata, reelt er udelukket på andre naturtyper end klit og hede.

Dækningsdata anvendes både som selvstændige indikatorer og i beregningen af forskellige indikatorer for naturtypernes tilstand, udvikling samt struktur og funktion (Nygaard et al. 2019). Dækningsdata indgår også i den samlede vurdering af bevaringsstatus i EU's artikel 17-rapportering for flere naturtyper (Nygaard et al. 2014).

Dækningsdata giver i modsætning til data, som blot redegør for tilstedeværelse eller ej (frekvensdata), et mål for artens relative abundans og dermed

viden om, hvilke arter der er dominerende. En spredt, men jævnt forekommende plante kan således godt have en høj frekvens ved en undersøgelse, som er baseret på tilstedeværelse eller ej, uden at være dominerende. Ændringer af abundansen af dominerende arter kan dokumenteres tidligere ved brug af dækningsgradsdata end frekvensdata og er vigtig til at vurdere den forventede udvikling af naturtyper, som er karakteriseret ved relativt få dominerende eller økosystemskabende plantearter (Figur 3.1).

Figur 3.1. Ændringen i abundansen af klokkeløng, som er en karakteristisk dominerende art for de våde heder (4010), ses betydeligt hurtigere ved dækningsdata (A) end ved "absence-presence" data i 5 m cirklen (B).



3.1.2 Ratio af plantearter

Forskellige påvirkningsfaktorer, fx et ændret klima, forventes at forskyde forholdet mellem forskellige plantearter/grupper. Derfor er dækningsgradsratioen mellem forskellige højere plantearter/grupper en vigtig indikator for vegetationsudvikling på forskellige naturtyper. For eksempel så afhænger dækningsgradsratioen mellem hedelyng og bølget bunke på tørre heder af nedbøren (Damgaard 2015), og den øgede nedbør, som er et resultat af klimaændringerne, forventes at ændre dækningsgradsratioen mellem de to arter, så dækningen af hedelyng øges på bekostning af bølget bunke (Figur 3.2). Da forholdet mellem arternes dækning ikke alene afhænger af nedbøren, men også af jordbund og næringsstofftilførsel, forventes der en interaktion mellem øget nedbør og fx depositionen af kvælstof.

3.1.3 Økosystemfunktion

I de fleste terrestriske økosystemer kan systemets funktion beskrives vha. den observerede vegetation (Hairston et al. 1960). Mere specifikt kan økosystemers funktion beskrives ved at beregne det vægtede gennemsnit af forskellige planteegenskaber,

$$funktion = \sum_{i=1}^S p_i \text{ egenskab}_i$$

hvor p_i er den relative abundans, og S er antallet af arter (fx Garnier et al. 2016). Hvis man ikke har et mål for den relative abundans sættes $p_i = 1/S$, og alle arter vægtes lige højt, fx både dominerende og sjældne arter. At det er vigtigt at vægte med den relative abundans i beskrivelsen af økosystemfunktioner blev påpeget af Grime (1998), hvor han formulerede dominanshypotesen ("mass ratio hypothesis"). Han påpegede, at det ikke er muligt at måle habitaternes struktur og funktion uden at vægte vegetationssammensætning med abundans (se også Fig. 3.2).

Forskellige påvirkningsfaktorer, fx et ændret klima, forventes at føre til ændringer i det vægtede gennemsnit af plantesamfundets funktionelle egenskaber, fx forholdet mellem én- og flerårige planter samt mellem høje og lave planter.

Figur 3.2. Fotografier fra det samme sted på Randbøl Hede henholdsvis 1979 (øverst) og 2011 (nederst) (Hans Jørgen Degn 2019). På begge tidspunkter kan man ved en målrettet eftersøgning finde nogenlunde de samme arter. Men set ud over den store hedeblade er det tydeligt, at det på de to tidspunkter er forskellige arter, som er helt dominerende (blåtop vs. hedelyng). Det ville en analyse af dækningen tydeligt have kunnet vise."

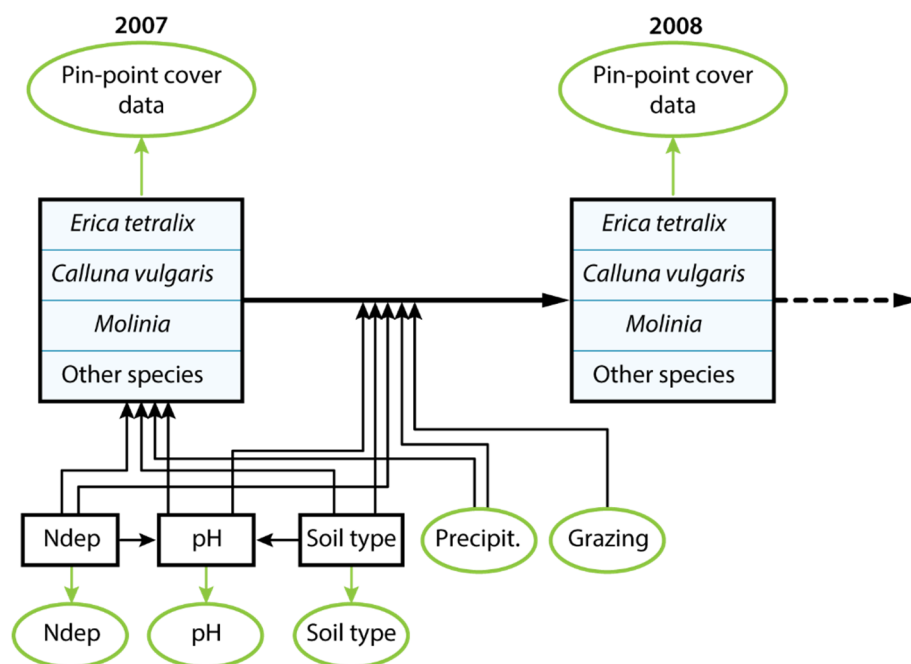


3.1.4 Strukturelle ligningsmodeller

Et af formålene med den nationale overvågning er at bestemme effekterne af forskellige påvirkningsfaktorer på forskellige naturtyper. Da effekten af forskellige påvirkningsfaktorer og plejetiltag interagerer, er det vigtigt at modellere denne interaktion i en model. Dækningsgradsdata anvendes i strukturelle ligningsmodeller til at undersøge årsagssammenhænge mellem påvirkningsfaktorer og pleje på naturtypens vegetationssammensætning. For eksempel er effekten af kvælstof, forsuring, nedbør, jordbund og græsning på dækningen af de dominerende arter klokkeløg, hedelyng og blåtop på våde heder undersøgt i en strukturel ligningsmodel (Figur 3.3, Damgaard 2019).

Derudover er det muligt at lave prognoser for effekten af fx mere nedbør på vegetationssammensætningen i et lokalt område. Disse lokale prognoser kan anvendes til at lave kvantitative adaptive forvaltningsplaner, hvor effekten af forskellige nedbørsscenarier kan forudsiges med et kvantitativt estimat af usikkerheden (Damgaard 2020).

Figur 3.3 Strukturel ligningsmodel til vurdering af udviklingen i plantesamfundet fra 2007 baseret på udvalgte påvirkningsfaktorer og græsning på vegetationssammensætningen af de dominerende arter på våd hede. De fir-kantede bokse symboliserer de anvendte latente variable på stationsniveau og runde bokse symboliserer data som anvendes ved beregning. Et af modelresultaterne var, at jordbunden havde stor betydning for udviklingen af den våde hede.



3.1.5 Værkstedsområder

Som nævnt ovenfor så forventes forskellige påvirkningsfaktorer og plejetiltag at interagere. For bedre at forstå denne interaktion samt kortlægge årsagsvirkningssammenhængene af disse faktorer på biodiversiteten i lysåbne naturtyper, er der planlagt en række faktorielle manipulationsforsøg med kvælstofdeposition og forstyrrelse i lysåbne naturtyper langs en fugtighedsgradient. I disse værkstedområder vil vegetationssammensætning, vegetationshøjde, næringsindhold i løv, jordbund etc. blive observeret (Nygaard et al. 2020)

Fordelen ved at anvende faktorielle manipulationsforsøg i forhold til at anvende de kvælstof- og forstyrrelsesgradienter, som allerede findes i Danmark, er, at det i faktorielle manipulationsforsøg er muligt at kontrollere for alternative faktorer, som man ikke *a priori* har en viden om, har nogen betydning eller ikke kan måle, og som muligvis ko-varierer med de eksisterende gradienter. Dette betyder, at testningen af hypoteser om de overordnede sammenhænge er på mere sikker grund. Baseret på denne metodik er det således muligt at udskille effekter af klimaforandringer i forhold til andre faktorer i spil.

3.1.6 Forekomsten af nye og invasive arter

I et ændret klima forventes det, at der kan indvandre nye eller invasive arter, som er tilpassede det ændrede klima. Disse arter forventes at være relativt sjældne i starten, men vil kunne detekteres vha. "citizen science" som forekomst data ("presence-only data"), der bliver indrapporteret i fx Naturbasen og arter.dk. Senere hen, når arten er mere almindelig, vil man kunne få et mere præcist billede af deres udbredelse ved hjælp af kontrolovervågningens "absence-presence" data (Damgaard et al. 2019; Damgaard et al. 2011).

3.1.7 Jordbundsdata

Klimaændringer forventes at ændre jordbundsprocesserne i de forskellige naturtyper. Overvågningen af jordbundsvariableerne kulstof, kvælstof, fosfor og pH forventes derfor at kunne bidrage med vigtig information til analyse af de mere langsigtede effekter af et ændret klima. For eksempel forventes det, at C/N i hedejord afhænger af nedbørsmængden (Strandberg et al. 2018).

3.1.8 Datagrundlag - kontrolovervågning i NOVANA

Metodik

Se Fredshavn et al. (2009) og Nielsen et al. (2012).

Geografisk dækning

Mange stationer i hele Danmark med god geografisk dækning, men afhænger af naturtypen (Nygaard et al. (2019)).

Tidsserie

Fra 2004 og frem.

Behandling af data

Der er udviklet metoder til at analysere de indsamlede rumlige og temporale økologiske data (se referencer ovenfor).

3.1.9 Mulighed for forbedret vidensgrundlag

Det vil styrke datagrundlaget for beskrivelsen af klimaændringer i terrestriske økosystemer at genindføre indsamling af dækningsdata for alle de lys-åbne naturtyper.

3.2 Klimaindikatorer inden for landbruget - 1: Vandingsbehov

Mathias Neumann Andersen, Agroøkologi, Aarhus Universitet

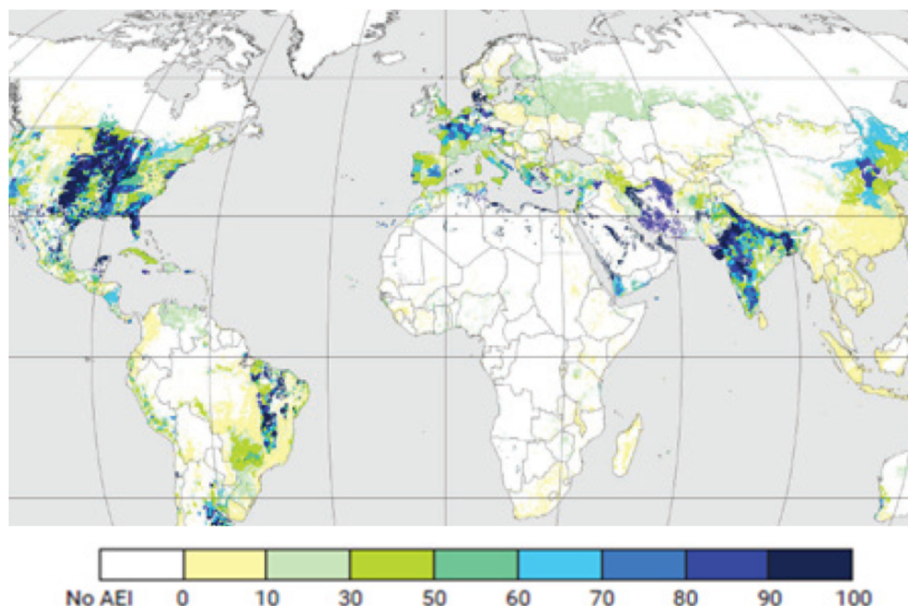
3.2.1 Vandingsbehov/tørke

Landbruget råder over vandingsanlæg til dækning af cirka 450.000 ha, svarende til tæt på 20 % af det samlede landbrugsareal i Danmark. Behovet for vanding er især bestemt af tre faktorer: jordbundsforhold, en række klimatiske variable samt hvilke afgrødetyper, der indgår i dyrkningen på de enkelte landbrugsbedrifter. Klimaændringerne vil påvirke alle tre faktorer, og vandingsbehovet er derfor en relevant klimaindikator.

Oppumpningen har afsmittende virkning på vandføring i vandløbene, især i tørre somre som senest i 2018. I sådanne år overgår indvindingen af vand til markvanding alle andre indvindingsformål (husholdninger, industri) i store dele af Jylland. I Jylland er hovedparten af vandingsanlæggene lokaliseret på de mest sandede jorde, som hører til de mest intensivt vandede arealer i verden (Figur 3.4).

Globalt set bidrager vanding på 20 % af landbrugsarealet med ca. 40 % af fødevareproduktionen og ses derfor som en afgørende faktor i tilpasningen til klimaændringer (UNESCO, 2020).

Figur 3.4. Procent af landbrugsarealet, der vandes med grundvand (UNESCO, 2020).



3.2.2 Jordbundsforholdenes betydning for vandingsbehovet

Dyrkningsjorden er det primære vandreservoir for landbrugets afgrøder, og det kan typisk indeholde op til mellem 50 og op til 400 mm vand i rodzonen på hhv. sand og lerjord – den såkaldte rodzonekapacitet. Cirka halvdelen af dette vand (25-200 mm) kan udnyttes af planterne, inden de begynder at lide af tørkestress. Da tørkestress er den mest begrænsende faktor for planteproduktionen i Danmark, er rodzonekapaciteten i høj grad forbundet med jordens bonitet, som jo har været kortlagt langt tilbage i tiden mhp. beskatning. Der er to faktorer, der bestemmer, hvor mange mm vand, der kan oplagres i rodzonen, nemlig jordens porestruktur og afgrødens roddybde. Mellemstore porer kan tilbageholde nedbøren imod tyngdekraften, så vandet ikke afdræner, som det gør fra de store porer. Små porer binder vandet så kraftigt, at planternes rødder ikke kan optage det.

Klimaændringerne påvirker jorden på flere måder. Den øgede temperatur vil betyde, at mængden af organisk stof i overjorden vil aftage, da nedbrydningen går hurtigere. Dette organiske stof spiller en betydelig rolle for at opretholde mængden af mellemstore porer i jorden og dermed dens kapacitet til at lagre vand. Desuden spiller det organiske stof en rolle for, hvor hurtigt nedbør kan optages af jorden. Kombinationen af forventet større nedbørsintensitet og mindre indhold af organisk stof i jorden vil resultere i, at en større del af nedbøren løber af på jordoverfladen med mulig erosion til følge.

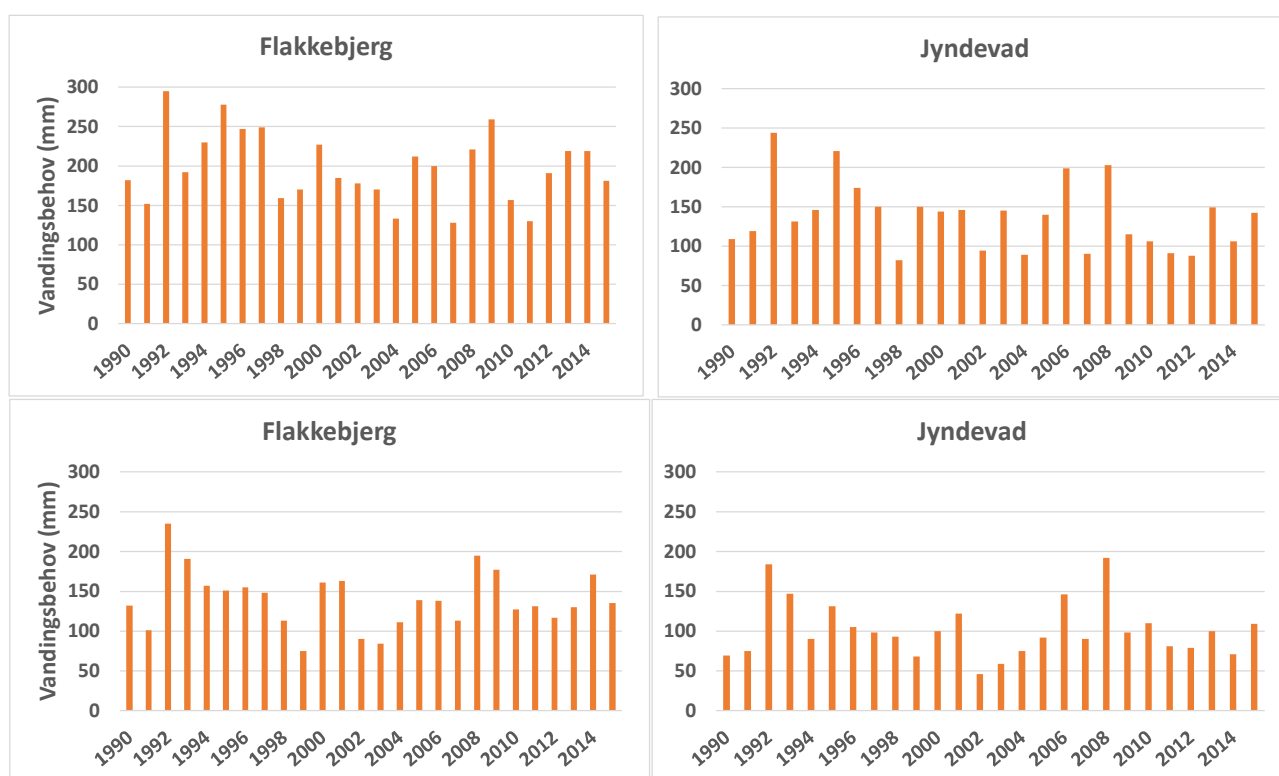
Sammenlagt vil klimaændringerne således medføre mindre tilførsel til og tilbageholdelse af vand i rodzonen med større risiko for erosion ved overfladeafstrømning samt tørke og dermed øget vandingsbehov.

3.2.3 Afgrødesammensætning

Da fordampning, ud over de klimatiske variable, er bestemt af størrelsen af afgrødedækket (Plauborg og Olesen, 1991), spiller afgrødesammensætningen en betydelig rolle for forekomst af tørke i landbruget. Græs med en vækstsæson fra april til oktober har således det største behov for vanding. Majs med

hovedvækstsæson i august og frem har derimod et af de mindste vandingsbehov, da majsens vækstsæson passer bedre i forhold til sæsonvariationen i nedbør og fordampning. Nedbøren er typisk høj i august og frem, medens fordampningstrykket i samme periode er aftagende pga. af faldende indstråling.

Da driftsformen (kvæg, svin eller planteavl) på det enkelte landbrug i høj grad bestemmer afgrødevalget, er de enkelt landbrug kun i begrænset omfang i stand til at udnytte disse forskelle i vandingsbehov mellem afgrøder. I øvrigt har alle afgrøder behov for at vokse i juli, som også er højsæson for tørke. Kvægbrug med meget græs i sædskiftet har således typisk det største vandingsbehov (Figur 3.5).



Figur 3.5. Vandingsbehov på hhv. kvægbrug (øverst) og svinebrug (nederst) på to lokaliteter estimeret med Vandregnskabmodellen over en 26-årig periode (1990-2015) ved en rodzonekapacitet på 60 mm tilgængeligt vand. Forskelle mellem brugstyperne skyldes forskelle i afgrødesammensætning (ten Damme og Andersen, 2018).

3.2.4 Klimaforholdenes betydning for vandingsbehovet

Vandingsbehovet er ud over størrelsen af rodzonekapaciteten bestemt af en række klimavariabler, hvoraf de vigtigste er solstråling, luftfugtighed, vind, luftens CO_2 -indhold og nedbør. De fire første variable bestemmer den såkaldte referencefordampning, som er fordampningen af vand fra en veludviklet afgrøde, der ikke lider af tørkestress. Denne varierer typisk mellem 2-5 mm pr dag i sommerperioden under danske forhold.

Da nedbøren i gennemsnit er mindre end fordampningen i sommermånederne maj-august, opstår der et klimatisk betinget jordvandsunderskud, som afhængigt af rodzonekapaciteten kan give anledning til tørkestress hos landbrugsafgrøderne. Dette underskud varierer meget fra år til år og udviser pga. variationer i nedbør mellem landsdelene også forskelle mellem lokaliteter (Figur 3.5). Desuden spiller hyppigheden af nedbør en stor rolle for udviklingen

af tørkestress (Mogensen & Hansen, 1978). Da nedbøren forventes at komme i større portioner, medens mængden af sommernedbøren forventes uændret eller svagt faldende (DMI, Klimaatlas), må der påregnes stigende forekomst af tørke i et fremtidig klima. Stigende temperatur og den resulterende større kapacitet til at holde på vanddamp i atmosfæren taler også for en stigende fordampning og dermed større hyppighed af tørke, men modvirkes af, at den stigende CO₂-koncentration dæmper fordampningen (Long et al., 2004) via dets effekt på åbningsgraden af bladenes spalteåbninger.

Modelberegnete vandingsbehov i en række landbrugsafgrøder i en række amter blev opgjort for perioden 1957-1976 af Gregersen & Knudsen (1981) og senere for perioden 1990-2015 på 10 lokaliteter i 10 afgrøder ved 6 forskellige rodzone-kapaciteter (ten Damme & Andersen, 2018). Sidstnævnte opgørelse viste, at vandingsbehovet var steget fra den førstnævnte 20 års periode til sidstnævnte 26 års periode. Det er imidlertid uvist, om stigningen kan relateres til klimaændringer, idet der var metodeforskelle mellem de to studier. Dels var der forskelle i målingerne af fordampning og nedbør mellem de to perioder, dels blev der anvendt forskellige modeller ved opgørelsen af vandingsbehovet.

Sammenfattende gør de forventede ændringer i nedbørsmængde og især nedbørsmønstre, vandingsbehovet/tørke til en velegnet klimaindikator. Det skyldes ikke kun klimaændringernes forventede effekt på indikatoren, men i høj grad også pga. den økologiske betydning af denne variabel for både landbrug og natur.

3.2.5 Datagrundlag:

Klimadata fra DMI og Jordbundsdata fra AU-Agroøkologi. Jupiter-databasen fra GEUS over landbrugets oppumpning af vand til markvanding er frit tilgængelig.

3.2.6 Metodik

Se ten Damme og Andersen (2018)

3.2.7 Geografisk dækning

God - se under 3.2.5 Datagrundlag

3.2.8 Tidsserie

Fra ca. 1980, men med ændringer i målemetoder, som gør ældre data svært sammenlignelige med nutidige data.

3.2.9 Behandling af data

Der er udviklet metoder til at analysere de indsamlede rumlige og temporale data (ten Damme og Andersen, 2018; Olesen og Plauborg, 1991; Gregersen og Olesen 1982).

3.2.10 Mulighed for forbedret vidensgrundlag

Der er ikke pt udviklet et system, som kan estimere jordvandunderskud/tørke i et givet punkt på et givet tidspunkt. SEGES arbejder dog på et sådant, som kombinerer vandbalancemodellering med satellitdata. Viden om roddybde og dermed rodzonekapacitet på en given lokalitet i Danmark er begrænset og simuleres i forskellige modeller på et spinkelt og derfor tvivlsomt grundlag. Tørke har formentlig også en stor indflydelse på artssammensæt-

ningen i naturlige biotoper og blev fundet mere betydningsfuld for biodiversiteten hos jordens fauna end en forholdsvis stor temperaturstigning (Aupic-Samain et al., 2021).

3.3 Klimaindikatorer inden for landbruget - 2: vækstsæson

Mathias Neumann Andersen, Agroøkologi, Aarhus Universitet

3.3.1 Vækstsæson og fænologi for afgrøder

Vækstsæsonen for landbrugets afgrøder er bestemt af hastigheden af afgrødernes udvikling i vækstsæsonen samt den tidligste mulighed for at så om foråret. Mulighederne for at så om foråret, der kun er relevant i forhold vårsæd, er primært bestemt af jordens temperatur og vandindhold. For vinterafgrøderne er det primært arts- og sortspecifikke egenskaber i kombination med temperaturforholdene i vinterperioden, der bestemmer deres vækststart om foråret.

Den fænologiske udvikling af vinter- og vårsæede kornarter kan modelleres relativt præcist baseret på data, der kun inddrager daglig lufttemperatur og daglængde (Pullens et al., 2020). Usikkerheden ved modelleringen er dog større for vårsæd en vintersæd muligvis pga., at indflydelse af jordens vandindhold i foråret på såtidspunktet ikke tages i betragtning.

Mere generelt findes der en lang række dynamiske modeller, der beskriver afgrøders vækst mm., som alle indeholder algoritmer for afgrøders fænologiske udvikling, fx modellen "Daisy" (Hansen et al., 1991). Generelt for disse algoritmer er, at den fænologiske udvikling accelereres af højere temperaturer. Selvom meget høje temperaturer kan bremse den fænologiske udvikling af afgrøder, er dette sjældent relevant under danske forhold.

På grund af temperaturens store indflydelse er den fænologiske udvikling en velegnet indikator for klimaændringer. Det er velkendt, at de stigende temperaturer allerede har haft stor indflydelse på længden af vækstsæsonen af afgrøder i Danmark (se Olesen et al., 2012). Generelt vil den hurtigere udvikling have tendens til at medføre mindre udbytte, da de højere temperaturer giver kortere tid for afgrøden til at lave fotosyntese og øger tabet ved den forøgede respiration. For vårafgrødernes vedkommende kompenseres denne tendens dog helt eller delvist, ved at afgrøderne sås tidligere, således at de temperaturer de vokser under ikke ændres så voldsomt, som det ellers ville være tilfældet (Olesen et al., 2012). Den øgede vinternedbør vil dog i stigende grad påvirke, hvornår der kan sås, og således trække i den modsatte retning. Den fænologiske udvikling inden for de enkelte arter af landbrugsplanter er desuden sortsafhængig. Analyse af langtidsdatasæt viser, at indflydelsen af dette kan være relativ stor. Det kan dog ikke konkluderes ud fra datamaterialet, at ændringer i fænologisk udvikling alene skyldes klimaændringer. Rezaei et al. (2018) fandt således, at vinterhvedes krav til temperatursum for at nå blomstringsstadiet var 14-18%, mindre for nyere sorter end for sorter fra 50'erne og 60'erne. Dette forklarer cirka halvdelen af fremrykningen af blomstringen, medens den anden halvdel kan forklares ved temperaturstigningen. Ændringer i såtidspunktet havde derimod ingen sikker betydning for den tidligere blomstring, i overensstemmelse med Olesen et al. (2012).

Der er således ingen tvivl om, at afgrødernes fænologiske udvikling er en følsom indikator for klimaændringer pga. dens temperaturafhængighed.

Fænologisk udvikling observeres rutinemæssigt i forsøg med landbrugsafgrøder både hos SEGES og ved AU og KU. Der ville imidlertid kunne opnås en bredere dækning af både landbrugsafgrøder og naturlig vegetation (fx Coops et al., 2012) ved analyse af satellitdata, der er tilgængelig over en efterhånden meget lang periode tilbage til 70'erne. På satellitbilleder er man i stand til at klassificere afgrøder både mht. art og med hensyn til fænologisk udvikling med god præcision (fx Bandaru et al., 2020).

Der er en lang række satellitprodukter til rådighed for dette (fx Duncan et al., 2015).

3.3.2 Datagrundlag:

Klimadata fra DMI, Forsøgsdata fra SEGES, AU, KU, Satellitbilleder og satellitprodukter, der for manges vedkommende er gratis tilgængelig.

3.3.3 Metodik

fx Bandaru et al. (2020)

3.3.4 Geografisk dækning

Særdeles høj for satellitdata.

3.3.5 Tidsserie

Fra ca. 1970, med ensartet metodik for så vidt angår satellitdata.

3.3.6 Behandling af data

Der er udviklet metoder til at analysere de indsamlede rumlige og temporale data fx Bandaru et al. (2020), men disse skal kalibreres mht. de afgrøder, der ikke er analyseret endnu.

3.3.7 Mulighed for forbedret vidensgrundlag

Se ovenstående.

3.4 Klimaindikatorer inden for ferskvand (vandløb) - Udvikling i vandføring

Hans Estrup Andersen & Søren E. Larsen (BIOS/DCE)

3.4.1 Introduktion

Ændringer i den årlige variation i vandføring og ændringer i ekstremer i vandføring ved en målestation er at betragte som slutresultatet af ændringer i klima over en kortere eller længere forudgående periode, når andre påvirkninger af det hydrologiske kredsløb som arealanvendelse, dræning mv. er konstante (Kronvang et al., 2008). Vandføring i vandløb er dermed en god indikator for klimaændringer.

Den årlige nedbørsmængde er steget fra 650 mm i 1870'erne til 750 mm i de senere år (DMI, 2020a). Prognoser for det fremtidige klima i Danmark viser, at nedbørsmængderne vil stige (DMI, 2020b). Med hydrologiske modeller er det vist, at klimaforandringerne vil medføre en stigning i afstrømningen og hyppigere og større ekstremer (Andersen et al., 2006).

3.4.2 Datagrundlag

Med udgangspunkt i data over døgnmiddelvandføringer fra 18 vandløbsstationer er udviklingen i middel-, minimum- og maksimumvandføring siden 1950 analyseret (Tabel 3.1). De 18 vandløbsstationer har tidligere været anvendt i tidsserieanalyser (Kronvang et al., 2008) og repræsenterer nedbørsgradienten fra vest til øst. For hver station og for hvert år er der beregnet middel-, minimum- og maksimumvandføring. Disse tidsserier er blevet analyseret for trends ved anvendelse af Kendall's trend test (Hirsch et al., 1982), som er en meget anvendt og effektiv metode inden for bl.a. analyse af vandkvalitetsdata. Testen er en ikke-parametrisk metode, og der testes for en monoton trend. Under antagelse af lineær trend kan et estimat for den årlige ændring (hældningsestimatet) beregnes ved anvendelse af metoden (Kronvang et al., 2008).

Tabel 3.1. Oversigt over de 18 vandløbsstationer, som er anvendt i den statistiske test af udviklingstendenser i vandføring. Middelfaflstrømningen er beregnet som gennemsnit for hele tidsserien.

Stationsnummer	Vandløb	Oplandsareal km ²	Middelfaflstrømning l s ⁻¹ km ⁻²
3000003	Uggerby Å, Astedbro	153	10.3
7000003	Lindholm Å, Elkær Bro	106	9.0
11000016	Årup Å, Årup	105	13.3
14000022	Lindborg Å, Lindborg Bro	214	11.2
21000084	Gudenå, Tvilumbro	1282	12.7
21000085	Gudenå, Åstedbro	184	14.1
25000082	Skjern Å, Alergård	1055	14.5
26000082	Århus Å, Skibby	119	8.5
38000024	Ribe Å, Stavnager Bro	675	13.2
40000001	Brede Å, Bredebro	290	12.8
45000004	Odense Å, Nørre Broby	302	9.5
46000030	Brende Å, Årup	71	8.5
55000018	Åmose Å, Bromølle	292	6.5
56000006	Harrestad Å, Kramsvadgård	16	6.0
56000007	Tude Å, Ørslev	148	6.0
57000049	Saltø Å, Grønbro	64	6.6
57000058	Suså, s.f. Holløse Bro	763	7.4
59000006	Tryggevælde Å, Ll. Linde	129	6.8

3.4.3 Resultater

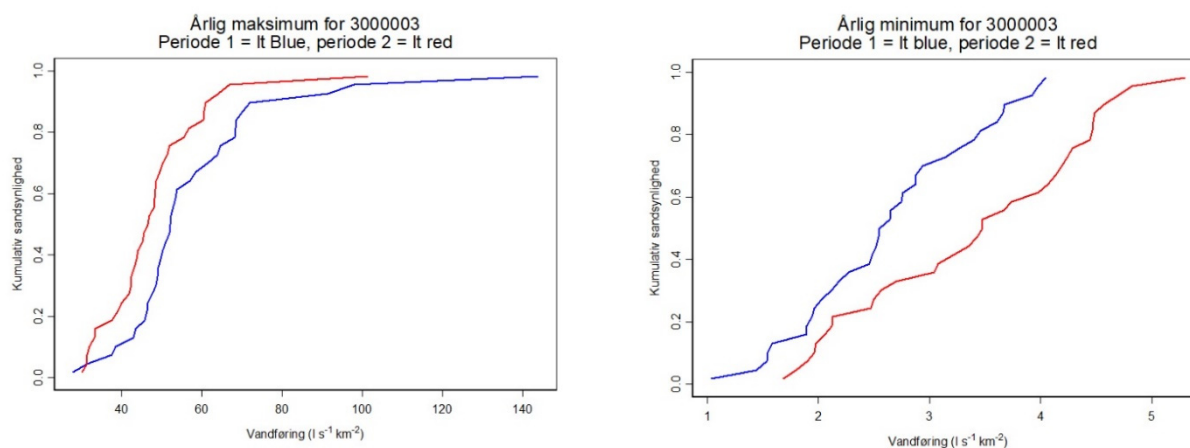
Resultaterne af de gennemførte trendanalyser er vist i tabel 3.2. De beregnede trends er vist som afstrømningsværdier, dvs. vandføringer vægtede med oplandsarealet, for at lette en sammenligning på tværs af oplandsstørrelser. Middelfaflstrømningen viser en stigende tendens for alle 18 vandløb. For fire vandløb, alle nord- og sydvestjyske, er stigningen statistisk signifikant. For disse fire vandløb kan det beregnes, at trenden svarer til en samlet stigning i vandføringen over perioden 1950 – 2020 på hhv. 0,35 m³ s⁻¹ for Uggerby Å, 0,27 m³ s⁻¹ for Lindholm Å, 1,77 m³ s⁻¹ for Ribe Å og 1,06 m³ s⁻¹ for Brede Å. Stigningen i vandføringen er beregnet ved at multiplicere den gennemsnitlige årlige stigning i middelvandføringen i tabel 3.2 med hhv. antallet af år mellem 1950 og 2020 og oplandsarealet i tabel 3.1. Den årlige maksimumafstrømning udviser et fald i 12 vandløb, en stigning i fem vandløb og ingen udvikling i et vandløb. Trenden i maksimumvandføring er kun signifikant i to vandløb: et signifikant fald i Uggerby Å i Nordjylland og et signifikant fald i Brende Å på Fyn. Minimumsvandføringen udviser faldende tendens i 8 vandløb, heraf et

signifikant fald i tre vandløb, som alle ligger på Sjælland: Harrestad Å, Saltø Å og Tryggevælde Å. Minimumsvandføringen er stigende i ni af de 18 vandløb. Stigningen er signifikant for syv vandløb, som alle på nær et (Suså) er beliggende i Jylland.

Tabel 3.2. Årlige trends i middel-, minimum- og maksimum-afstrømning samt signifikansniveauer for perioden 1950-2020.

Vandløb	Årlig middel $\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2} \text{ år}^{-1}$	p-værdi	Årlig max. $\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2} \text{ år}^{-1}$	p-værdi	Årlig min. $\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2} \text{ år}^{-1}$	p-værdi
Uggerby Å, Astedbro	0.033	0.015	-0.168	0.006	0.020	0.002
Lindholm Å, Elkær Bro	0.037	0.031	-0.077	0.282	0.012	0.003
Årup Å, Årup	0.031	0.081	0.000	0.984	-0.004	0.484
Lindenberg Å, Lindenberg Bro	0.011	0.201	-0.054	0.256	0.014	0.035
Gudenå, Tvilumbro	0.012	0.236	-0.003	0.956	0.011	0.080
Gudenå, Åstedbro	0.021	0.306	-0.007	0.927	-0.002	0.761
Skjern Å, Alergård	0.023	0.052	0.002	0.992	-0.001	0.879
Århus Å, Skibby	0.021	0.156	-0.119	0.062	0.008	0.020
Ribe Å, Stavnager Bro	0.038	0.032	0.083	0.232	0.017	0.014
Brede Å, Bredebro	0.053	0.013	0.181	0.055	0.015	0.043
Odense Å, Nørre Broby	0.008	0.612	-0.078	0.465	-0.003	0.429
Brende Å, Årup	0.010	0.556	-0.140	0.013	0.000	0.863
Åmose Å, Bromølle	0.008	0.630	-0.037	0.504	0.004	0.067
Harrestad Å, Kramsvadgård	0.006	0.591	0.141	0.372	-0.005	0.000
Tude Å, Ørslev	0.007	0.563	-0.057	0.378	-0.002	0.058
Saltø Å, Grønbro	0.013	0.491	0.028	0.808	-0.002	0.008
Suså, s.f. Holløse Bro	0.002	0.943	-0.016	0.730	0.011	0.000
Tryggevælde Å, Ll. Linde	0.006	0.713	-0.279	0.050	-0.004	0.005

For yderligere at illustrere udviklingen over den betragtede periode er der som et eksempel i figur 3.6 vist de empiriske fordelinger af hhv. årlige minimums- og maksimumsafstrømninger for hhv. den første og sidste halvdel af perioden. Figuren illustrerer for Uggerby Å den signifikante stigning i minimumsafstrømning og det ligeledes signifikante fald i maksimumafstrømning, jf. tabel. 3.2.



Figur 3.6. Sammenligning mellem kumulative fordelingsfunktioner for årlig maksimumafstrømning (venstre panel) og årlig minimumsafstrømning (højre panel) for Uggerby Å. Den blå kurve angiver perioden 1950 – 1984, og den røde kurve angiver perioden 1985 – 2019.

3.4.4 Datagrundlag - nationale kontrolovervågning (NOVANA)

Metodik

Data er tilgængelig for 18 stationer med start i 1950 eller tidligere. Analysen af vandføringsdata gennemføres vha. velafprøvede rutinemetoder.

Geografisk dækning

Der er en god geografisk dækning.

Tidsserie

Data er tilgængelig for perioden med start i 1950 eller tidligere.

Behandling af data

Se tekst ovenfor.

3.4.5 Mulighed for forbedret vidensgrundlag

Det skal undersøges, om afstrømningen som indikator skal beregnes for hele datasættet, eller om der skal fokuseres på de stationer, som er mest følsomme over for klimaforandringer.

3.5 Klimaindikatorer inden for ferskvand (søer) - Forekomst af blågrønalger/cyanobakterier i søer

Erik Jeppesen (BIOS/DCE)

3.5.1 Introduktion - tidligere analyser

For at vurdere effekter af ændringer i temperaturen på klorofyl a, fytoplankton og zooplankton blev der i IGLOO-rapporten (Hansen et al., 2008) foretaget en analyse af data fra danske søer af effekten af temperaturen, når også næringsstofniveauet og søernes dybde var inddraget. Dette blev gjort ved anvendelse af multiple regressionsanalyser af data fra mere end 250 danske søer og 800 sø-år, baseret på følgende model:

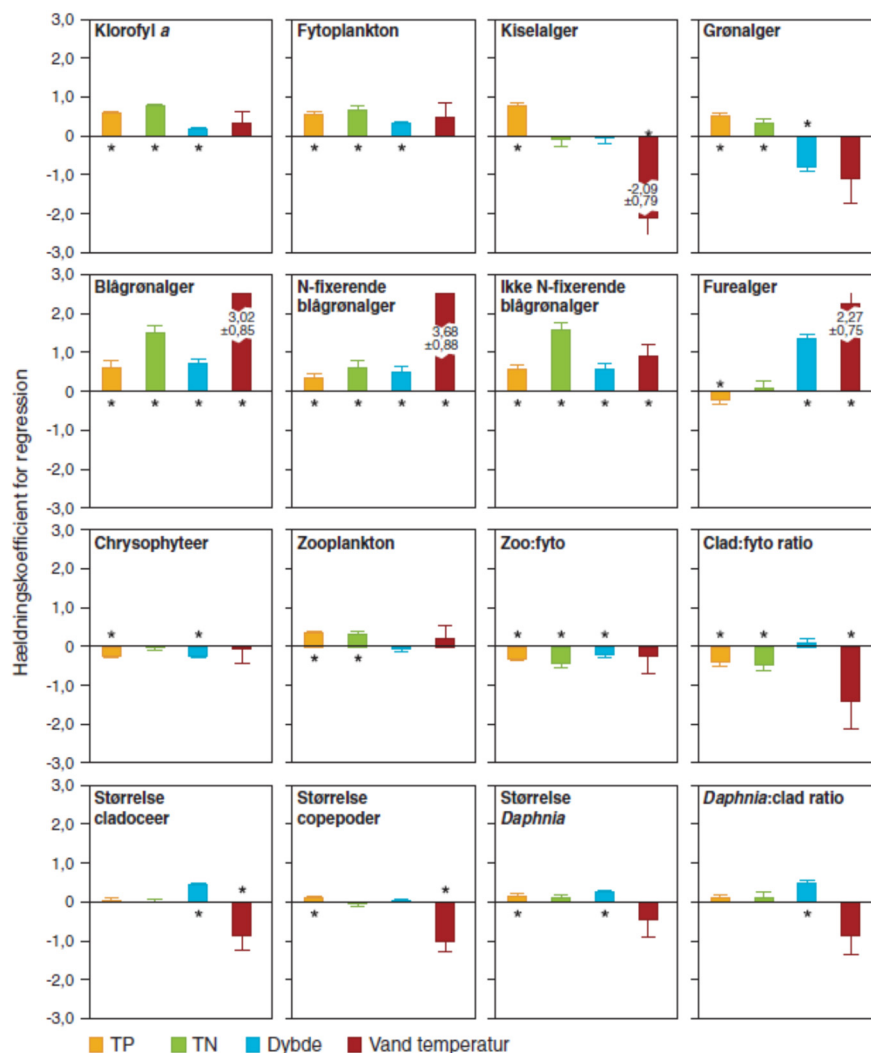
$$\log(\text{biologisk variabel}) = \text{Intercept} + \log(\text{TP}) + b \log(\text{TN}) + c \log(\text{DYBDE}) + d \log(\text{TEMP}) \quad (1)$$

TP og TN er indholdet af total-fosfor og total-kvælstof i søvandet, DYBDE er middeldybden og TEMP er temperaturen i overfladevandet.

Data fra højsommeren (august) (Figur. 3.7), viste en relativ beskeden effekt af temperaturen på mængden af klorofyl a og fytoplanktonets samlede biovolumen (biomasse), mens der var stor effekt af ændringer i temperaturen på fytoplanktonets sammensætning. Især kiselalgers, men også grønalgers, biomasse var negativt påvirkede af de stigende temperatur, mens cyanobakteriers (blågrønalger) og furealgers biomasse var stærkt positivt påvirkede af temperaturen. Der er tale om meget markante effekter af temperaturen på de to sidstnævnte fytoplanktonklasser, og blandt blågrønalgerne er det især de kvælstoffikserende blågrønalger, som er følsomme over for temperaturændringer i sensommeren (august). Der kan altså forventes markante ændringer i fytoplanktonet, når det bliver varmere – blandt andet kan der forventes en større dominans af blågrønalger. Samtidigt mindskes græsningen på fytoplanktonet, fordi zooplanktonet ændres i retning af mindre arter, som ikke så let kan græsse på de store alger, såsom blågrønalger. Både størrelsen af vandløpper (copepoder)

og dafnier (cladoceer) og andelen af de store og effektive græssere af slægten *Daphnia* blandt dafnierne, mindskes med øget temperatur, ligesom zooplankton:fytoplankton biomasse-ratioen og ikke mindst cladoceer:fytoplankton biomasse-ratioen bliver mindre (dog ikke alle signifikante) (Figur 3.7). Der kan således forventes mindre og færre dafnier pr enhed af fytoplankton og dermed ringere græsningskapacitet i højsommeren. Dette tilskrives øget predation fra flere og mindre fisk (Jeppesen et al., 2010).

Figur 3.7. Multiple regressioner mellem forskellige planktonvariable (logtransformerede) og totalfosfor, totalkvælstof og vandtemperaturen i overfladelaget samt søens middeldybde – alle logtransformerede. Der er anvendt værdier for biomasse for alger og zooplankton. Når værdien er positiv, er der en positiv effekt af en given variabel (når de øvrige variable også er inkluderet) og omvendt hvis negativ. Alle data er fra august. Signifikante værdier er angivet med *. (Jeppesen et al., 2010).



3.5.2 Nye analyser

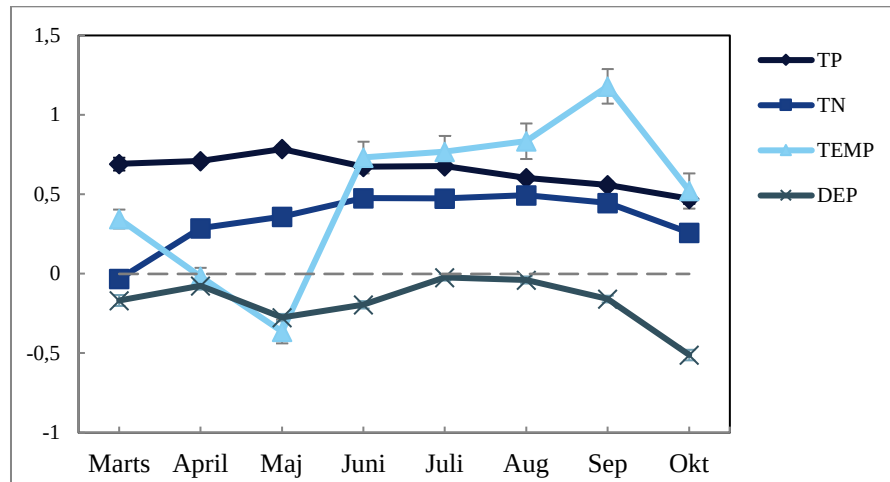
Siden IGLOO- rapporten blev til, er datagrundlaget blevet forbedret for klorofyl a og fytoplankton, mens der ikke er et forbedret datagrundlag for zooplankton.

I den opdaterede analyse, som præsenteres her, er der fokuseret på klorofyl a, volumenbiomassen af fytoplankton, samt volumenbiomassen og procentandelen af cyanobakterier. Der er kun medtaget data fra søer med en salinitet < 1 promille, et farvetalet < 30 og et areal > 5 ha. Analysen omfatter data for perioden fra marts til og med oktober, da datamaterialet fra denne periode er mest robust. Resultaterne af regressionsanalyserne er vist i bilag 2 og nøgleresultaterne er vist i det følgende.

Klorofyl a

Hældningskoefficienter baseret på regressionsanalyse (formel (1)) er vist i Figur 3.8.

Figur 3.8. Hældningskoefficienter (med Standard Error) for relationen mellem logtransformerede klorofyl a (mikrogram l⁻¹) og TP (mg l⁻¹), TN (mg l⁻¹), vandtemperatur (°C) i overfladevandet (TEMP) og middeldybden i m (DEP) baseret på multipel regression på månedsbasis.



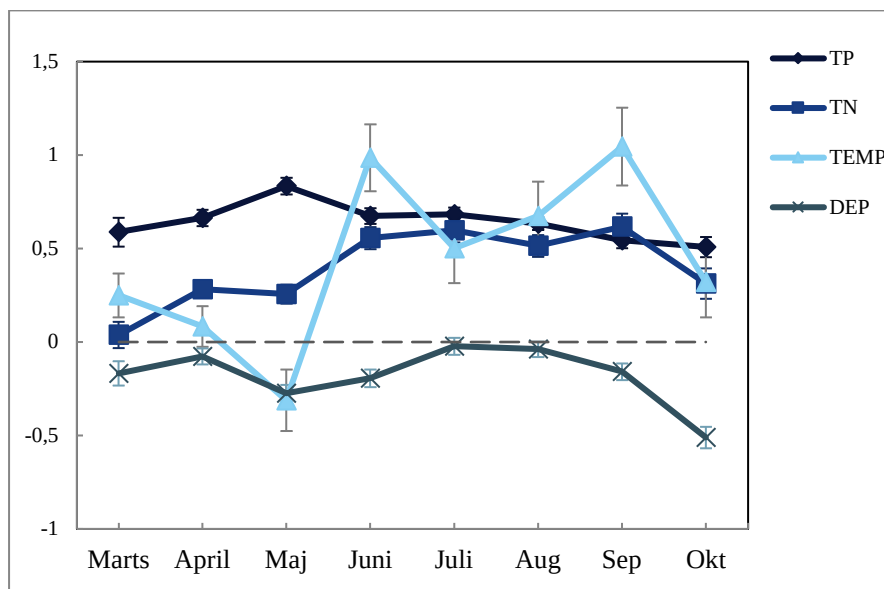
Mens klorofyl a er signifikant positivt relateret til TP i alle måneder og TN fra april og frem, er dybdeeffekten som ventet negativ eller af ringe betydning. Temperatureffekten varierer en del over sæsonen og er stærkt positiv fra juni – oktober. I maj er temperatureffekten negativ og den er af ringe betydning i april, hvilket kan tilskrives, at ”klarvandsperioden” i forsommeren forstærkes, når det er varmt. Det kan forklares ved ændringer i zooplankton og specielt dafnie-slægten *Daphnia*. For slægten *Daphnia* er der i foråret og specielt i maj en meget positiv effekt af temperaturen, idet antallet af dafnier stiger markant ved øget temperatur (Hansen et al., 2008). Det bevirker en større græsning på algerne og mere klart vand i maj. Senere på sommeren og i efteråret bliver der færre dafnier på grund af et øget predationstryk fra fisk på dyreplankton (Jeppesen et al., 2009). Også størrelsen af vandlopper og dafnier aftager markant i sommermånederne, når temperaturen stiger (Hansen et al., 2008).

Der er således en markant effekt af temperaturen på fytoplanktonbiomassen målt som klorofyl a, ikke mindst ved de høje temperaturer i august.

Totalvolumen af fytoplankton

Hældningskoefficienter baseret på regressionsanalyse (formel (1)) er vist i Figur 3.9.

Figur 3.9. Hædningskoefficienter (med Standard Error) for relationen mellem logtransformerede totalvolumen af fytoplankton ($\text{mm}^3 \text{l}^{-1}$) og TP (mg l^{-1}), TN (mg l^{-1}), vandtemperatur ($^{\circ}\text{C}$) i overfladevandet (TEMP) og middeldybden i m (DEP) baseret på multipel regression på månedsbasis.

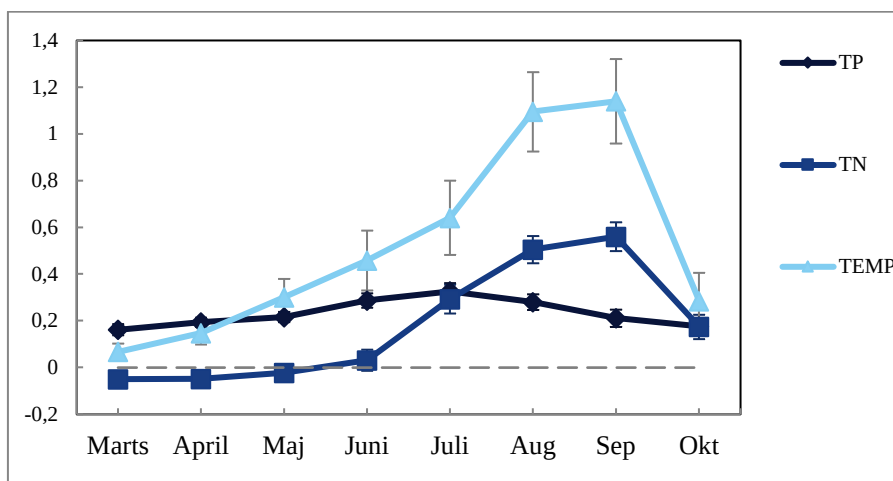


Totalvolumenet følger mønsteret for klorofyl a. Temperatureffekten er dog her mere markant i juni end for klorofyl a. (Figur 3.9).

Volumen af cyanobakterier

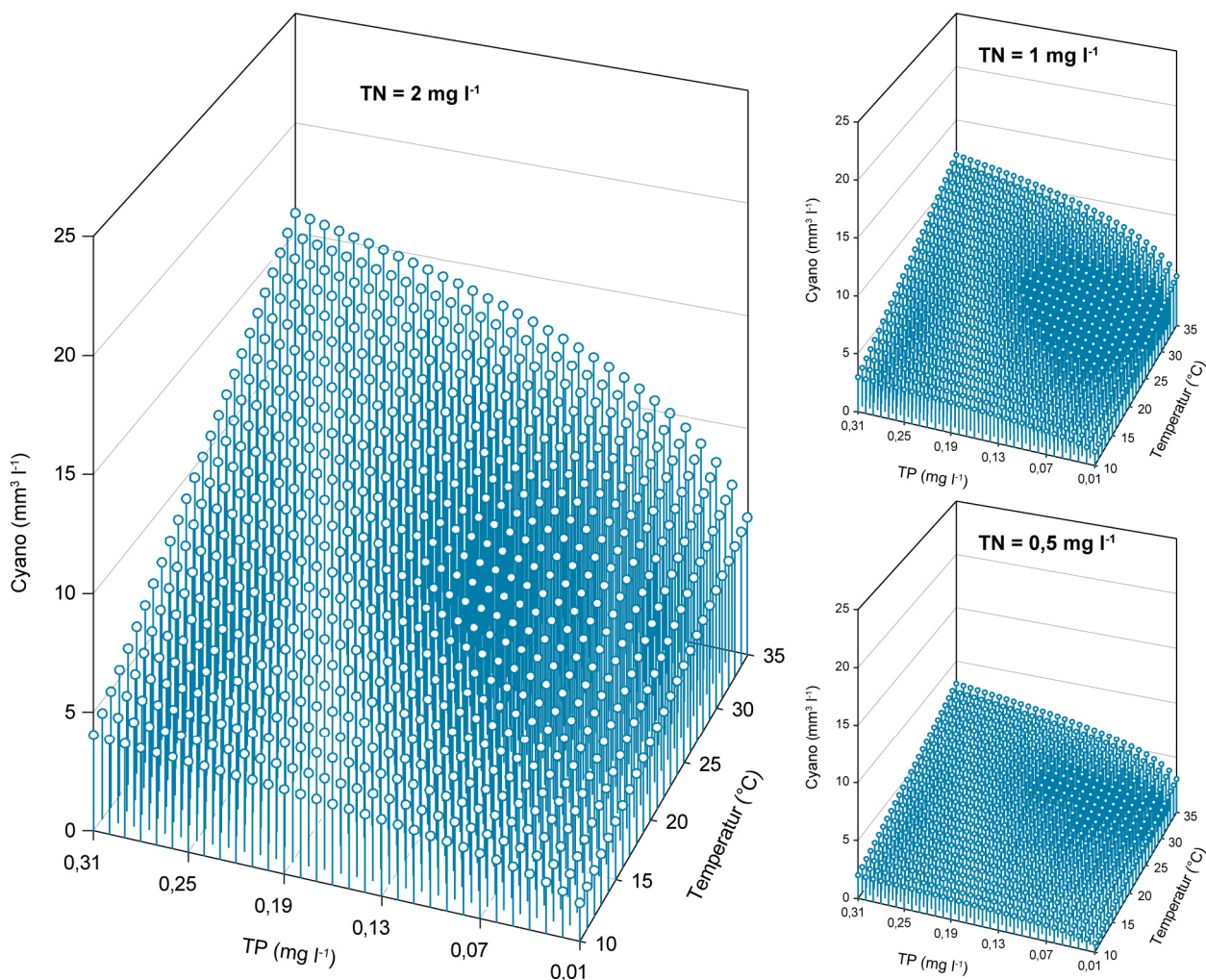
Hædningskoefficienter baseret på regressionsanalyse (formel (1)) er vist i Figur 3.10.

Figur 3.10. Hædningskoefficienter (med Standard Error) for relationen mellem logtransformerede værdier af totalvolumen af cyanobakterier ($\text{mm}^3 \text{l}^{-1}$) og TP (mg l^{-1}), TN (mg l^{-1}), vandtemperatur ($^{\circ}\text{C}$) i overfladevandet (TEMP) baseret på multipel regression på månedsbasis.



Som for ovenstående er hældningen for TP positiv i hele perioden. For TN er det kun tilfældet fra juli til oktober. Temperatureffekten er positiv i hele perioden fra marts til september. Der blev ikke fundet en signifikant dybdeeffekt (data ikke vist).

Figur 3.11 viser volumen af cyanobakterier som funktion af TP og vandtemperaturen i august ved forskellige TN-niveauer bestemt ved anvendelse af formel 1. Der ses en stor stigning i TP-effekten på volumen af cyanobakterier med stigende temperaturer (synergetiske effekt af de to variable) og specielt er den synergetiske effekt af TN stor (Figur 3.10).



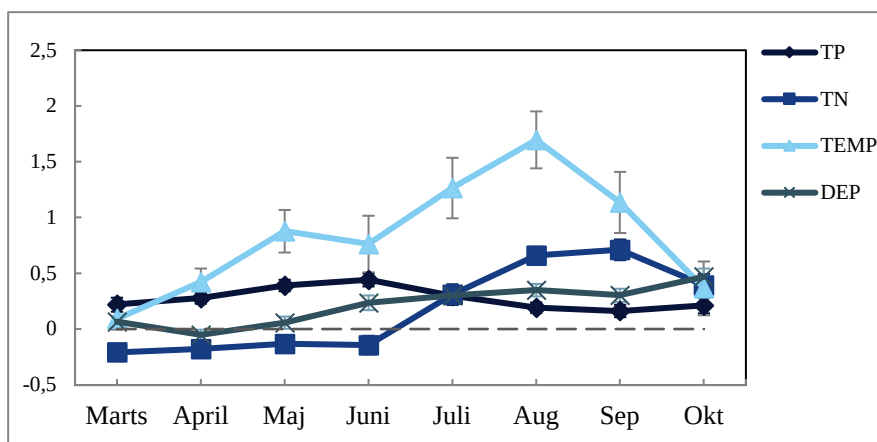
Figur 3.11. Volumen af cyanobakterier i august afbildet mod vandtemperaturen ($^{\circ}\text{C}$) og TP (mg l^{-1}) ved en TN koncentration på 2 mg l^{-1} (til venstre) og ved to lavere TN koncentrationer til højre (xyz skalerne er de samme som i figuren til venstre).

Risikoen for negative effekter af cyanobakterier i forhold til WHO's grænser for badegæster på $2 \text{ mm}^3 \text{ l}^{-1}$ (lav til moderate risiko) og $10 \text{ mm}^3 \text{ l}^{-1}$ (høj risiko) forøges således markant med øget temperatur i næringsrige søer, se figur 3.11.

Cyanobakteriers procentandel af totalvolumen af fytoplankton

Hædningskoefficienter baseret på regressionsanalyse (formel (1)) er vist i Figur 3.12.

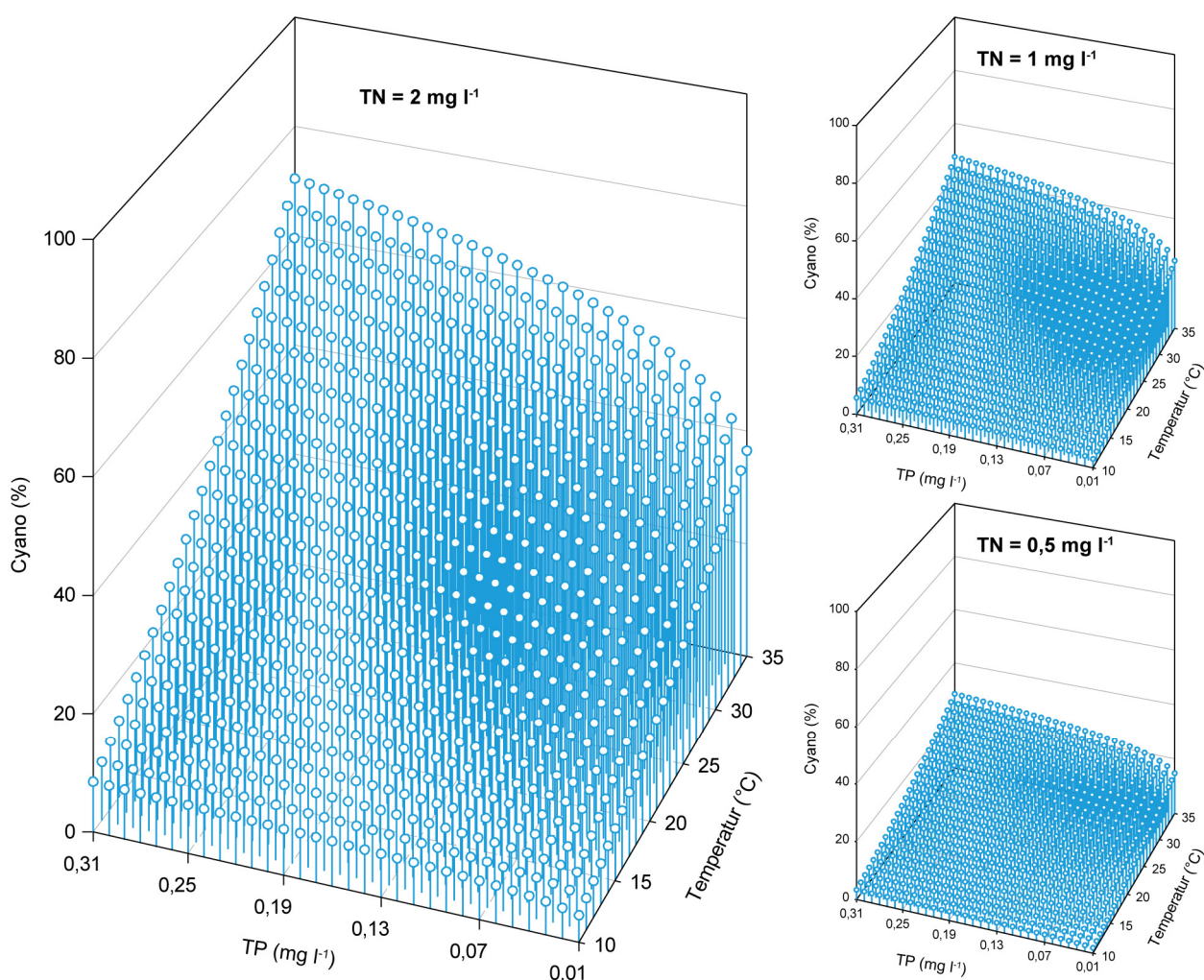
Figur 3.12. Hædningskoefficienter (med Standard Error) for relationen mellem logtransformerede værdier af andelen af cyanobakterier på volumenbasis (%) og TP (mg l^{-1}), TN (mg l^{-1}), vandtemperatur ($^{\circ}\text{C}$) i overfladevandet (TEMP) og middeldybden i m (DEP) baseret på multipel regression på månedsbasis.



Mønsteret for cyanobakteriernes procentandel af biomassen følger til dels det, der blev set for volumen af cyanobakterier. Temperatureffekten er positiv i hele perioden (signifikant fra april og frem), og effekten er særlig stor i perioden juli-september med maksimum i august. Desuden er effekten af dybden nu signifikant og positiv i perioden juni-oktober. Dybe søer har altså gennemgående større andel af cyanobakterier end de lavvandede søer med samme TN, TP og vandtemperatur.

Som for ovenstående er hældningen for TP positiv i hele perioden. For TN er det kun tilfældet fra juli til oktober. Temperatureffekten er positive i hele perioden (signifikant fra april og frem) og effekten er særlig stor i august og september.

Figur 3.13 viser procentandelen af cyanobakterier som funktion af TP og vandtemperaturen i august i en sø med en middeldybde på 3 m ved forskellige TN-niveauer - bestemt ved anvendelse af formel 1. Der ses også her en stor stigning i TP-effekten på volumen af cyanobakterier med stigende temperatur, som klart forstærkes af et højt TN.



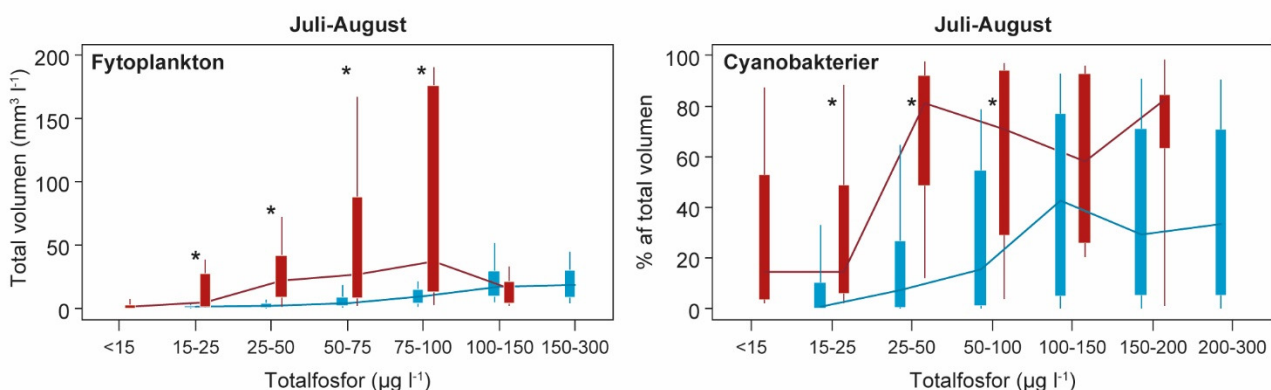
Figur 3.13. Cyanobakteriernes procentandel af totalvolumen i august i en sø med en middeldybde på 3 m afbildet mod vandtemperaturen (°C) og TP (mg l⁻¹) ved en TN-koncentration på 2 mg l⁻¹ (til venstre) og ved to lavere TN-koncentrationer til højre (xyz skalerne er de samme som i figuren til venstre).

Procentandelen af cyanobakterier er særligt påvirket af temperaturen og når knap 80% ved høje næringsstofkoncentrationer og temperaturer (Figur 3.13).

3.5.3 Sammenligning med søer i Florida (subtropisk klima).

Det kan altid diskuteres, om multiple regressioner giver et sikkert billede af de ændringer, som kan forventes, når temperaturen stiger. Dels er der risiko for indflydelse af autokorrelation, og dels kan der være tale om andre relationer end simple lineære. Dertil kommer, at der ikke tages højde for, at nye arter kan komme ind og andre forsvinde, når det bliver permanent varmere. For fisk er der for eksempel risiko for, at karpe kan blive en af de dominerende fiskearter, og at gennemsnitsstørrelse af fisk vil aftage, hvilket kan give markante ændringer i søernes økosystem (Jeppesen et al., 2010).

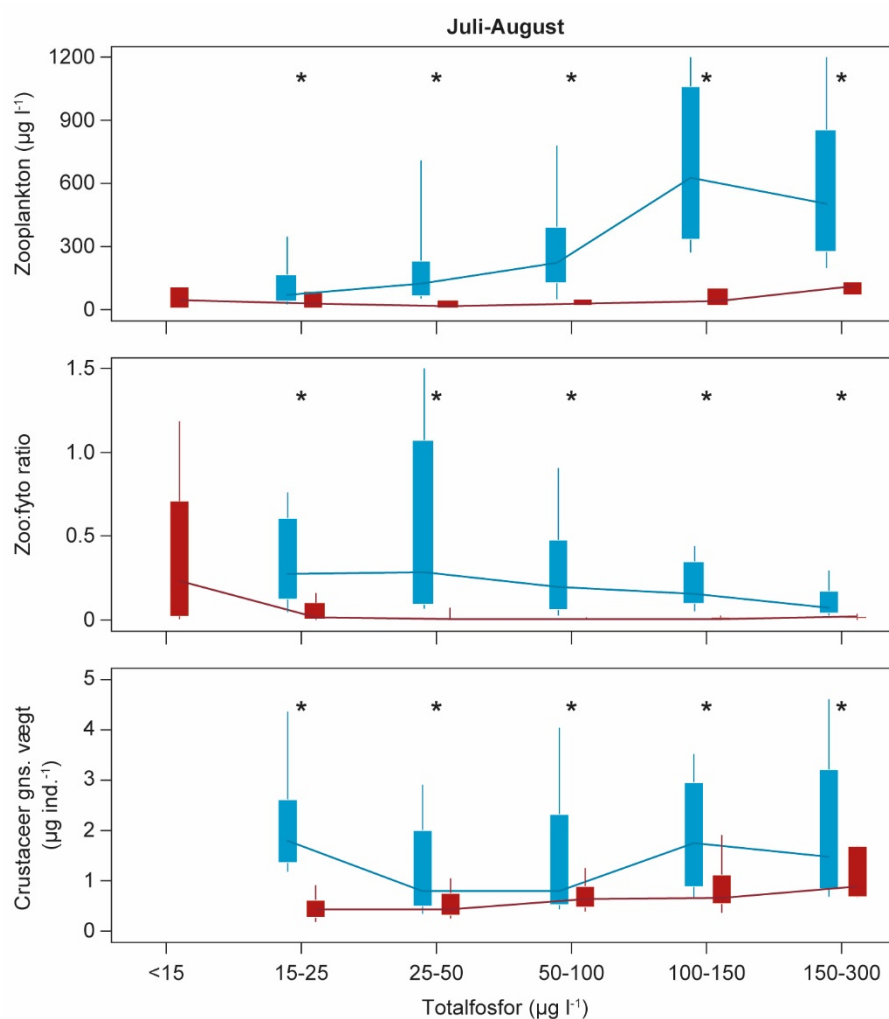
En nylig sammenlignende analyse af et stort antal lavvandede søer i Florida (subtropiske zone) og danske søer understøtter dog tendenserne i analyserne af danske søer (Figur 3.14 a og b), til trods for at artsammensætningen af bl.a. fisk er forskellig. I juli-august, hvor lysindstrålingen i de to regioner er omtrent ens, er totalvolumen af fytoplankton og andelen af cyanobakterier ved et givet TP-niveau ($< 100 \mu\text{g l}^{-1}$) således meget større i de varmere søer i Florida end i danske søer. Samstemmende med vores analyse er risikoen for opblomstring af cyanobakterier ved relativt lave koncentrationer også større, når temperaturen er (figur 3.14b).



Figur 3.14 Sammenligning af totalvolumen af fytoplankton (venstre figur) og den procentvise andel af cyanobakterier (højre figur) i lavvandede søer (middeldybde < 3 m) i Florida (rød) og Danmark (blå) langs en gradient i totalfosfor. * markerer signifikante forskelle. NB: Der er kun få data fra Florida for søer med et TP-indhold $> 100 \mu\text{g l}^{-1}$.

Der er også tydelige forskelle i biomassen af zooplankton, græsningstrykket på alger indikeret ved zooplankton:phytoplankton ratioen og i gennemsnitsbiomassen af zooplankton (Figur 3.15) – alt sammen indikerende højere predationstryk på zooplankton fra fisk i søer i Florida end i søer i Danmark (Jeppesen et al., 2020). Det mønster stemmer godt med resultaterne præsenteret i IGLOO-rapporten for effekten af temperatur på disse variable. Dette viser også, at zooplankton er en meget følsom indikatorvariabel på klimaændringer.

Figur 3.15. Sammenligning af totalvolumen af biomassen af zooplankton, zooplankton:fytoplankton biomasse-ratioen og gennemsnitsvægten af crustaceer (mikrokrebsdyr) i lavvandede søer (middeldybde < 3 m) i Florida (rød) og Danmark (blå) langs en gradient i totalfosfor. * markerer signifikante forskelle. NB: Der er kun få data fra Florida for søer med et TP-indhold >100 $\mu\text{g l}^{-1}$.



3.5.4 Konklusion

Klorofyl, totalvolumen af fytoplankton og ikke mindst biovolumen og %-andel af cyanobakterier er gode indikatorer på effekter af temperaturændringer. Effekten er stor og forstærkes af forøget tilgængelighed af næringsstoffer, og tilførslen af næringsstoffer forventes at øges ved klimaændringerne pga. mere nedbør (Hansen et al, 2008).

3.5.5 Datagrundlag - national kontrolovervågning (NOVANA)

Metodik

Den anvendte metode til dataanalyse er velkendt og anvendes rutinemæssigt til analyse af data fra danske søer.

Geografisk dækning

Der er en god geografisk dækning – og analysen omfatter et stort antal søer, som er udvalgt netop for at repræsentere hele Danmark.

Tidsserie

Der foreligger en lang tidsserie af overvågningsdata til analyse.

Behandling af data

Se tekst ovenfor.

3.5.6 Mulighed for forbedret vidensgrundlag

Det vil være meget ønskeligt at genoptage overvågningen af zooplankton i søer, så nyere zooplanktondata kan inddrages i analyserne.

3.6 Klimaindikatorer inden for det marine - tidspunktet for fytoplanktonets forårsopblomstring

Per Andersen (BIOS/DCE)

3.6.1 Introduktion til fytoplankton og klimacændringer i det marine miljø

I dette afsnit fokuseres der på klimaforandringernes effekt på tidspunktet for det marine fytoplanktons forårsopblomstring.

Forårsopblomstringen er af stor betydning for de marine økosystemer, da den bidrager med ny føde til dyrene i både de frie vandmasser og på havbunden. Tidspunktet og størrelsen af forårsopblomstringen har således både stor betydning for udviklingen af zooplanktonet og bunddyrene, som bl.a. er vigtig føde for fiskene. Desuden er fytoplanktons optag af uorganiske næringsstoffer under forårsopblomstringen af betydning for tilgængeligheden af uorganiske næringsstoffer for fytoplanktonet i den efterfølgende sommerperiode.

I forbindelse med projektet IGLOO (Hansen et al. 2008) blev der dokumenteret en fremrykning af forårsopblomstringen på en række danske stationer i perioden 1990-2005 på 1-2,5 dage pr år afhængigt af station og beregningsmetode. Sideløbende blev der registreret en temperaturstigning om sommeren på 1-3 °C som gennemsnit for perioden 1975-2005. Wasmund et al. (2019) registrerede en tilsvarende fremrykning (1,4 dag pr. år) af forårsopblomstringen på en lokalitet i den vestlige del af Østersøen i perioden 1988-2017. Poloczanska et al. (2013) rapporterede en fremrykning af forårsopblomstringen på 0,4 dage pr år baseret på en review-analyse af en række datasæt fra forskellige marine lokaliteter.

Der er således god dokumentation for, at det marine fytoplanktons forårsopblomstringen er rykket markant frem i løbet af de sidste ca. 30 år. Det vurderes, at fremrykningen er et resultat af ændringer i det marine miljø affødt af klimaforandringerne. Tidspunktet for fytoplanktonets forårsopblomstring er derfor en god kandidat som biologisk indikator på klimacændringer i det marine miljø.

Stigende temperatur kan i sig selv eller i samspil med faktorer som påvirkes af klimacændringerne påvirke artssammensætningen af fytoplanktonet i forårsperioden. Arter, som allerede er til stede i vores farvande og som favoriseres ved de forhøjede temperaturer, vil forekomme hyppigere og i større mængder. Sideløbende kan nye mere varmekrævende arter, som enten kommer passivt eller tilføres aktivt fx i forbindelse fx udskiftning af ballastvand, begynde at få større succes og kan etablere sig, mens arter som kræver lavere temperaturer kan forsvinde eller blive reduceret i deres kvantitative forekomst.

Ændringer i vækstraten hos fytoplanktonet i forårsperioden, som et resultat af stigning i vandtemperaturen, kan kun bidrage med en mindre del af forklaringen på den fremrykkede forårsopblomstring. Det kan således beregnes, at der ved en Q_{10} på 2, dvs. en fordobling i vækstraten hos fytoplanktonet ved en temperaturstigning på 10°C, kan forventes en fremrykning af opblomstringen på 1-3 dage pr °C afhængigt af udgangskoncentrationen af fytoplankton,

dvs. 2-6 dage ved en temperaturstigning på 2°C. Den resterende og væsentligste del af fremrykningen af opblomstringen skal derfor sandsynligvis tilskrives en kombination af ændringer i artssammensætning af fytoplanktonet i vinter-/forårsperioden pga. de forhøjede temperaturer, forhøjede start-koncentrationer af fytoplanktonarterne op til forårsopblomstringen pga. **mindsket vinterdødelighed/forøget overlevelse** ved de forhøjede temperaturer og ændringer i de hydrografiske forhold, specielt lagdelingsdynamikken pga. svagere vind og højere solindstråling i forårsperioden.

Sammenfattende vil tidspunktet for fytoplanktonets forårsopblomstring påvirkes af klimaændringerne ved de nedenfor listede effekter på **støtteparametrene**:

- stigende vandtemperaturer
- forøget ferskvandsafstrømning fra land
- faldende saltholdighed i overfladevandet i især de kystnære områder og fjordene pga. øget afstrømning fra land
- forøget belastning med næringsstoffer i især de kystnære områder og fjordene pga. øget afstrømning fra land
- ændringer i lagdelingsforholdene / omrøringen af vandet pga. ændringer i vindforholdene og større tilførsel af ferskvand og opvarmning af overfladevandet
- stigende koncentrationer af CO₂ og dermed faldende pH

Forøgelsen i nedbøren generelt og de forventede hyppigere voldsomme regnhændelser vil føre til en øget afstrømning af vand fra land og dermed øge tilførslen af næringsstoffer til kystvande og fjorde. Det tilførte ferskvand er desuden med til at forstærke den lagdeling, som kan opstå mellem det lettere og varmere ferske overfladevand og det koldere og saltere og dermed tungere bundvand, som kan have sin oprindelse fx i Nordsøen. En lagdelings styrke, dvs. den vindenergi, der skal til for at opblande overfladevand og bundvand, er afhængig af forskellen i vandlagenes massefylde, som er styret af vandets temperatur og saltholdighed. Derfor vil øget temperaturforskelle mellem overflade- og bundvand, mindre vind og øget nedbør styrke vandsøjleens lagdeling.

Nedenfor præsenteres overvågningsdata (NOVANA) for en række støtteparametre og efterfølgende opdateres analyserne fra IGLOO-projektet (Hansen et al. 2008) med overvågningsdata fra de sidste 15 år på en udvalgt station i det nordlige Lillebælt.

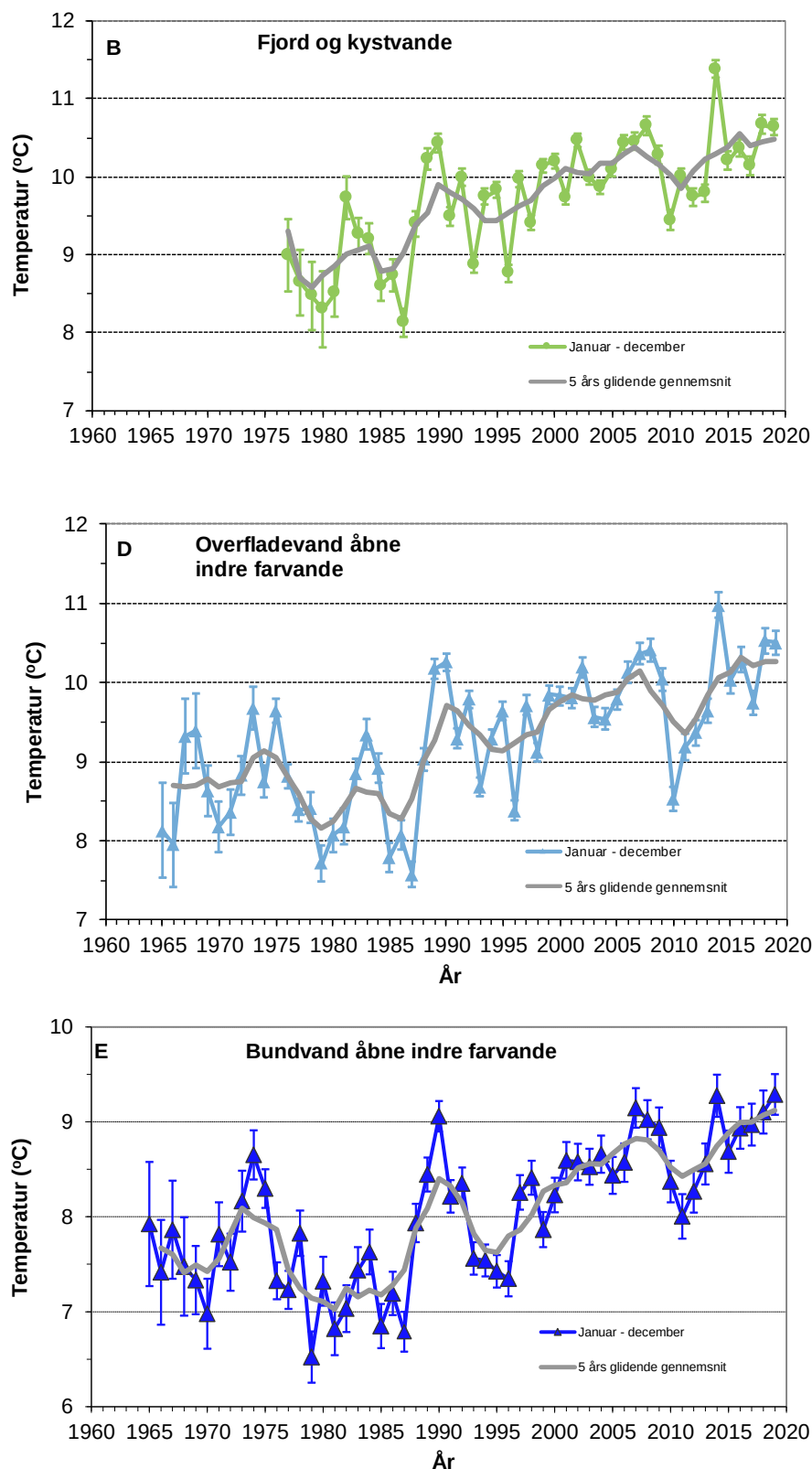
3.6.2 Udviklingen i støtteparametrene

Den tidsmæssige udvikling i de overordnede fysiske forhold i de marine områder dokumenteres løbende i forbindelse med NOVANA-overvågningen. Der foreligger således en god dokumentation for udviklingen i støtteparametre, som afspejler klimaforandringerne over en periode på mere end 30 år (Hansen & Høgslund 2021):

- Total solindstråling
- Vindhastighed og retning
- Afstrømning fra land
- Vandtemperaturen (kystvande og fjorde / åbent vand)
 - Overflade
 - Bund
- pH og alkalitet

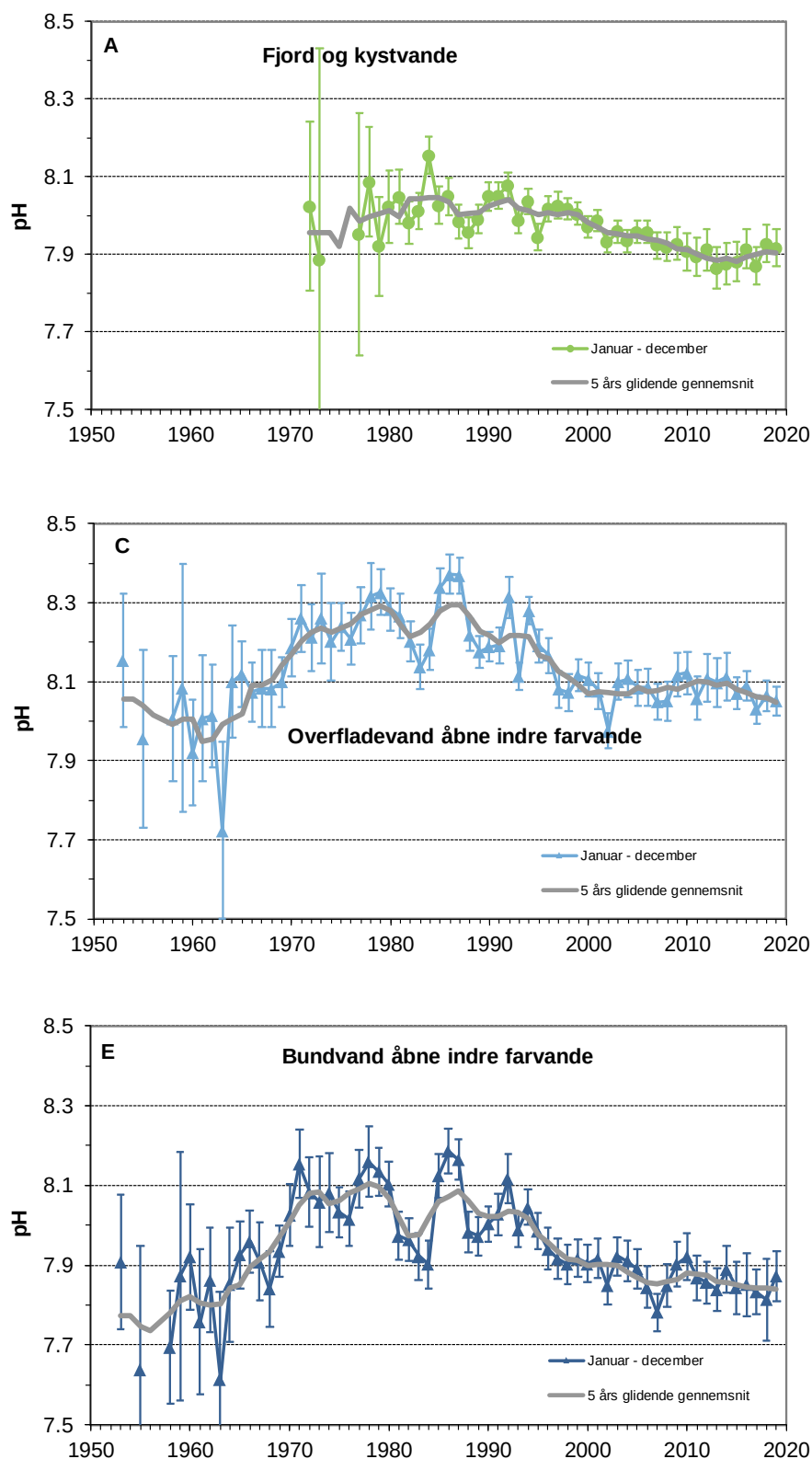
Nedenstående sammenfatning af udviklingen i de marine støtte parametre er baseret på Carstensen 2020 (Hansen & Høgslund 2021). En mere detaljeret analyse af udviklingen i støtteparametrene fokuseret på forholdene op til og under forårsoptionblomstringen er mulig baseret på det eksisterende datagrundlag, men er ikke blevet gennemført pga. begrænsede ressourcer.

Figur 3.17. Tidslig udvikling for B) vandtemperatur i fjorde og kystvande, D) overfladevands-temperatur i de åbne indre farvande og E) bundvandstemperatur i de åbne indre farvande. Mid-temperaturer er angivet med 95 % konfidensgrænser. Datakilder: DCE og Miljøstyrelsen.



Temperaturen i de danske farvande er steget med ca. 1,5 °C i løbet af de sidste 40 år. Efter fire relativt kolde år (2010-2013) var havtemperaturen den hidtil højest registrerede i overfladevandet og i bundvandet i henholdsvis 2014 og 2019, figur 3.17. I 2018 og 2019 har temperaturen været også meget høj i overfladevandet med en årsmiddel omkring 10,5 °C.

Figur 3.18. Årsmiddel ($\pm$ 95 % konfidensgrænser) for pH i fjorde og kystvande (A), overfladevand i de åbne indre danske farvande (C), og bundvand i de åbne indre farvande (E). Datakilder: DCE, Miljøstyrelsen og SMHI.



Havvandets pH har ændret sig en del i løbet af de seneste 50 år som følge af flere og modsatrettede processer, figur 3.18. Den forøgede primærproduktion som følge af eutrofieringen har medført et større forbrug af CO₂ og en stigning i pH frem til 1980'erne. Efterfølgende er pH faldet ca. 0,1 i fjorde og kystvande og ca. 0,2 i de åbne indre danske farvande, formentlig som en kombineret effekt af øget CO₂ i atmosfæren og faldende tilførsler af næringsstoffer fra land og atmosfæren, som har reduceret primærproduktionen.

Der er data fra NOVANA-overvågningen på artssammensætningen af fyto-, mikro- og mesozooplankton som sammen med ferskvandsafstrømningen fra land, tilførsler af kvælstof og fosfor til det marine miljø med samt vandkemiske data (kvælstof og fosfor (opløst uorganisk og total) samt kisel (opløst silicium)), som kan understøtte en dybere analyse af dynamikken i forbindelse med fytoplanktonets forårsopblomstring.

3.6.3 Datagrundlag for analysen af timingen af forårsopblomstringen

Den marine overvågning omfatter p.t. 16 stationer som prøvetages 20 gange pr år, en station ved Bornholm som prøvetages 6 gange pr år samt 10 stationer i Nordsøen som prøvetages 2 gange pr år, figur 3.19. Over de sidste mere end 30 år er der sket ændringer i både antallet af stationer og deres placering. Som udgangspunkt er der dog som minimum data tilgængelige for analyse af den tidsmæssige udvikling af fytoplankton i forårsperioden på mere end 10 stationer, som er blevet undersøgt i alle årene.

3.6.4 Analyse af data

Analysen af tidspunktet for fytoplanktonets forårsopblomstring kan foretages både ved analyse af udviklingen i koncentrationen af klorofyl, som anvendes som en proxy for den autotrofe planktonbiomasse eller ved analyse af abundans og beregnet biomasse af fytoplankton baseret på kvantificering af arter og beregning af kulstofbiomasse.

I IGLOO-rapporten blev forårsopblomstringen defineret ved tidspunktet for overskridelse af forskellige ”tærskel/indikatorværdier” for klorofyl eller kulstofbiomasse i perioden januar-marts g.

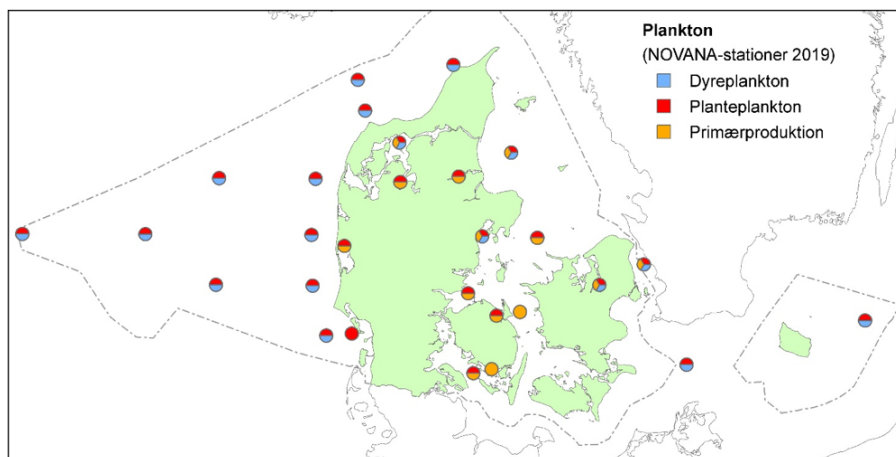
For klorofyl anvendtes en koncentrationsgrænse på > 3 eller $> 5 \mu\text{g Chl-a/L}$ på henholdsvis en station i det sydlige Lillebælt (station: FYN6300043), en station i det nordlige Lillebælt (Station: VEJ0006870) eller for et datasæt bestående af data fra en række stationer.

I denne rapportering arbejdes der videre med data fra stationen i det nordlige Lillebælt (Station: VEJ0006870), hvor der foreligger data for perioden fra 1991 til 2019 fra henholdsvis overflade- og bundvand. Analysen er baseret på målinger af klorofyl a i overfladevandet.

Data for perioden 2007-2019 er hentet i databasen ODA (<https://odaforalle.au.dk/login.aspx>). Data for perioden 1991 – 2006 er aflæst på figuren i IGLOO-bilagsrapporten (Bilag 4 s. 40).

Der gøres opmærksom på, at der mangler data for årene 2000 og 2002, og at data fra 2015 er udeladt af analysen, da der ikke blev registreret klorofyl a koncentrationer $> 5 \mu\text{g Chl-a/L}$ i perioden januar-marts, hvilket formentlig skyldes, at opblomstringen har været kortvarig og har fundet sted mellem to overvågningsbesøg.

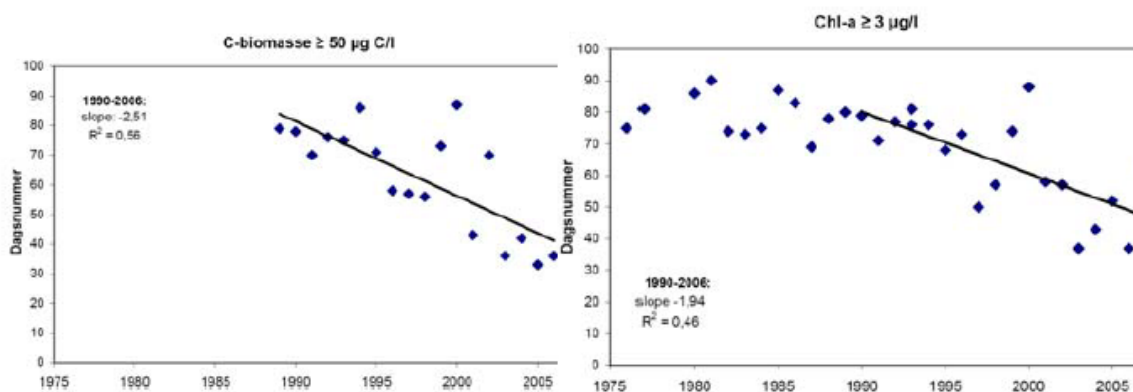
Figur 3.19. Prøvetagningsstationer for dyreplankton, planteplankton og primærproduktion besøgt i 2019. Plankton overvåges 20 gange på et år undtagen på stationen øst for Bornholm, som overvåges 6 gange årligt og på de 10 åbenvandsstationer i Nordsøen, som overvåges 2 gange årligt. Afgrænsning af de danske farvandsområder er angivet ved den stiplede linje (EEZ-grænse, Exclusive Economic Zone).



3.6.5 Resultater og diskussion

I forbindelse med IGLOO-projektet blev det dokumenteret, at tidspunktet for forårsopblomstringen af fytoplankton for en række stationer i perioden fra 1977 til 2005 rykkede frem med godt 1 dag pr år i gennemsnit over undersøgelsesperioden på næsten 30 år, og at fremrykningen var en fremadskridende proces som var i gang i hele perioden.

Analyse af data fra en station i det sydlige Lillebælt (station: FYN6300043) for perioden 1976-2006 viste en tendens til svag fremrykning af forårsopblomstringen i perioden fra 1976 til ca. 1990. Derefter skete der et markant skifte i tidspunktet for forårsopblomstringen, som i perioden 1990-2005 flyttede frem med 2,5 dag pr år, Figur 3.20. På tværs af hele perioden 1976-1990 rykkede forårsopblomstringen således frem i gennemsnit ca. 1 dag pr år.



Figur 3.20 a og b. Tidspunktet for forårsopblomstringen på station FYN6300043 i det sydlige Lillebælt i perioden 1976-2006 defineret som det dagsnummer i perioden januar-marts, hvor kulstofbiomassen først var $> 50 \mu\text{g C/L}$ (venstre figur), og hvor klorofylindholdet først var $> 3 \mu\text{g Chl a/L}$ (højre figur) (Hansen et al. 2008).

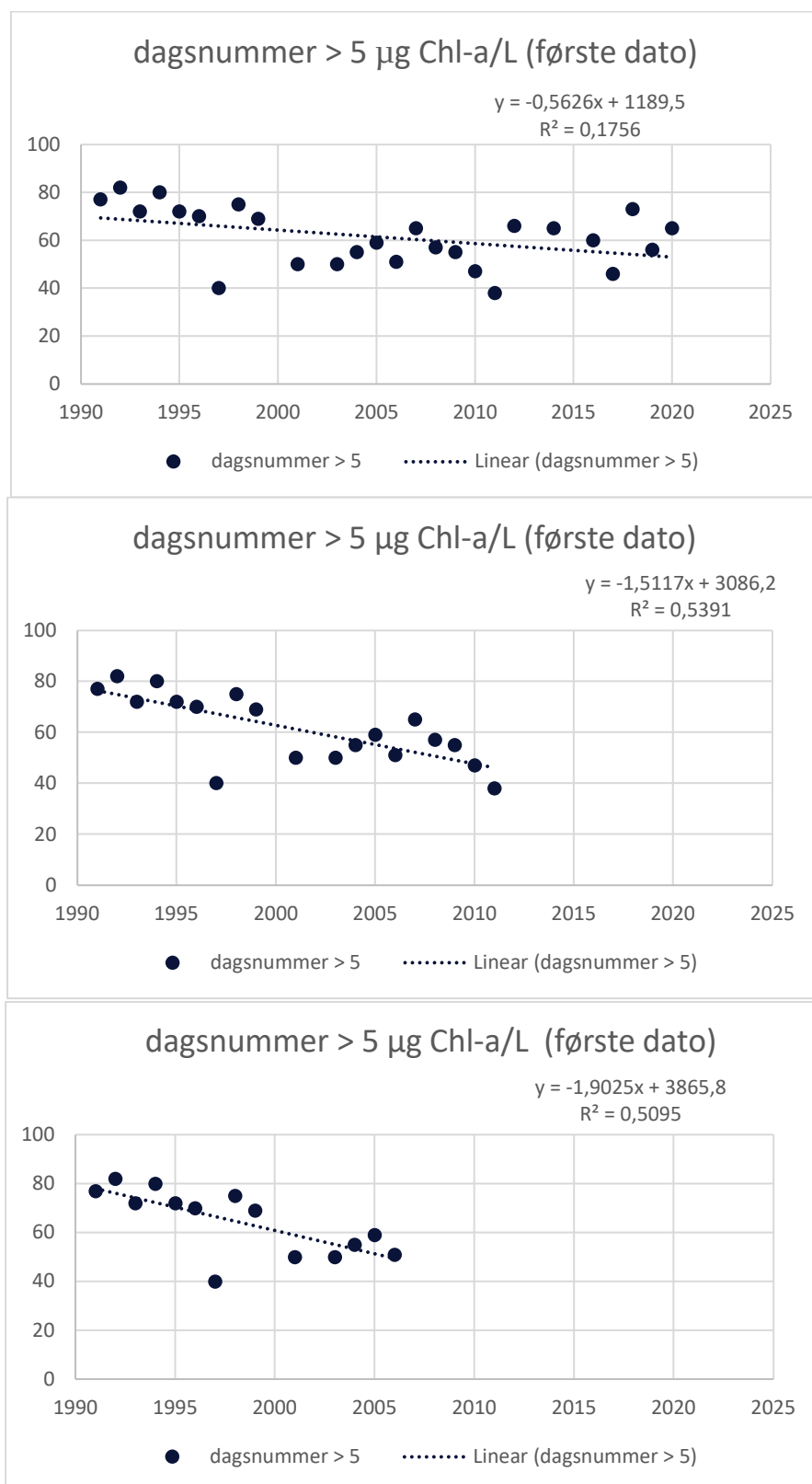
På stationen i det nordlige Lillebælt (station VEJ0006870) blev der registreret en fremrykning af forårsopblomstringen i perioden 1991 – 2005 på ca. 1,9 dag pr år.

3.6.6 Ny analyse inkl. årene 2007-2019

En analyse af data fra stationen i det nordlige Lillebælt (station VEJ0006870), som også inkluderer data fra perioden 2007 – 2019, viser, at fremrykningen af forårsopblomstringen fortsatte frem til og med 2011. Derefter ændres tidspunktet for forårsopblomstringen til niveauet for 2007-2009 dog med en specielt tidlig forårsopblomstring i 2017, figur 3.21. I hele perioden 1991-2019 var der en

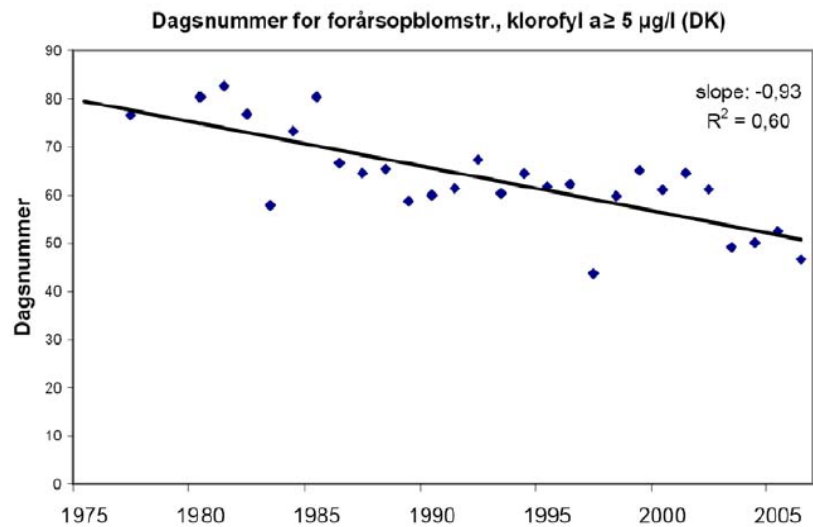
gennemsnitlig fremrykning på 0,6 dag pr år. I perioden 1991-2011 var der en gennemsnitlig fremrykning på 1,4 dag pr år, mens der i perioden 1991-2006 var en fremrykning på 1,9 dag pr år. Der ses således en tendens til, at fremrykningshastigheden af forårsopblomstringen er størst i begyndelsen af undersøgelsesperioden frem til omkring 2006, og at fremrykningen efterfølgende fortsætter med en lavere hastighed frem til 2011, hvorefter tendensen til fortsat fremrykning af forårsopblomstringen stagnerer dog stadig med en markant tidligere forårsopblomstringer end i starten af undersøgelsesperioden.

Figur 3.21. Tidspunktet for forårsopblomstringen (første dato, hvor klorofyl-koncentrationen > 5 µg Chl a/L) på station VEJ0006870 i det nordlige Lillebælt. Den øverste figur viser udviklingen i hele perioden 1991-2019, den midterste figur viser udviklingen i perioden 1991-2011, mens den nederste figur viser udviklingen i perioden 1991-2006.



Baseret på hele det nationale datasæt (og et kriterium på klorofyl $a \geq 5 \mu\text{g/l}$), synes dagsnummeret for opblomstringens start at være faldet over en længere periode (siden 1977), dvs. fremrykningen af forårsopblomstringen ser ud til at omfatte de sidste ca. 30 år (Figur 3.22).

Figur 3.22. Timingen af forårsopblomstringen for alle danske overvågningsstationer, defineret som det første dagsnummer i perioden januar-marts, hvor klorofylindholdet oversteg $5 \mu\text{g Chl } a/L$, fra IGLOO-rapporten, Hansen et al (2008).



Det kan således dokumenteres på flere stationer og over en lang tidsperiode fra slutningen af 1970'erne til 2019, at forårsopblomstringen af fytoplankton registreres tidligere og tidligere på året med en fremrykningsrate på ca. 0,6 dag pr år i gennemsnit for hele perioden. Forårsopblomstringen markerer begyndelsen på den produktive periode for fytoplanktonet, og en tidlig opblomstring vil påvirke de trofiske interaktioner i plankton og mellem plankton og højere trofiske niveauer både i de frie vandmasser og i de benthiske økosystemer.

Hvis fremrykningen, uagtet mekanismen i øvrigt, skyldes opblomstringen af andre typer alger end dem, der normalt dominerer forårsopblomstringen (kiselalger), vil de trofiske interaktioner påvirkes yderligere. Især hvis det er algetyper, som fx græsses med en noget anden dynamik end de ofte dominerende kiselalger. I perioden efter 1998 er der registreret en tendens til, at andre algetyper, som kan være toksiske, kan dominere forårsopblomstringen sammen med eller på bekostning af kiselalgerne.

Når der tages udgangspunkt i en Q_{10} -værdi på 2 for temperaturens påvirkning af fytoplanktonets vækstrate, vil en temperaturstigning på $2-3^{\circ}\text{C}$ i forårsperioden kun bidrage med en fremrykning af forårsopblomstringen på 1-3 dage pr $^{\circ}\text{C}$. Temperaturstigningens påvirkning af fytoplanktonets vækstrate kan således langt fra alene forklare den observerede fremrykning af forårsopblomstringen.

Den resterende og væsentligste del af forklaringen kan sandsynligvis tilskrives en kombination af ændringer i artssammensætning af fytoplanktonet i vinter-/forårsperioden pga. de forhøjede temperaturer, forhøjede start-koncentrationer af fytoplanktonarterne op til forårsopblomstringen pga. mindsket vinterdødelighed/forøget overlevelse ved de forhøjede temperaturer, en tidligere og stærkere lagdeling pga. svagere vind og endelig større solindstråling i forårsperioden, som alle også bidrager til den fremrykkede forårsopblomstring.

3.6.7 Datagrundlag - NOVANA kontrolovervågning

Metodik

I forbindelse med den igangværende NOVANA-overvågning dokumenteres den tidsmæssige udvikling af det marine fytoplankton i form af både klorofylla (overflade og bundvand), fluorescens (som måles som vertikale profiler vha. sonde) og som artssammensætning, abundans og kulstofbiomasse af fytoplankton i overfladevandet.

Den igangværende overvågning kan suppleres med satellitbaseret overvågning af klorofyl.

Geografisk og tidsmæssig dækning

Den igangværende NOVANA-overvågning omfatter stationer både i en række forskellige fjorde, kystvandet og de mere åbne havområder. I forhold til analyse af tidspunktet for forårsopblomstringen er det nødvendigt med god dækning (både hvad angår antal stationer og prøvetagningsfrekvens) i perioden januar-marts, hvilket begrænser anvendeligheden af data fra overvågningen på de 10 stationer i Nordsøen, mens der er en god geografisk og tidsmæssig dækning på de resterende stationer.

Tidsserie

NOVANA-overvågningen samt den overvågning, der er foretaget i forbindelse med de tidligere marine overvågningsprogrammer, betyder, at der i Danmark er en unik tidsserie for fytoplankton, som omfatter både klorofyl, fytoplanktons biomasse og artssammensætning samt fysiske og kemiske støt-teparametre. Tidserien dækker en periode på mere end 30 år på en lang række stationer.

Behandling af data

Det er muligt at lave en analyse af den tidsmæssige udvikling i tidspunktet for forårsopblomstringen baseret på fastlæggelse af tærskel / indikatorværdier for både klorofyl, fluorescens og fytoplanktonbiomasse.

Ændringer i artssammensætningen i forbindelse med forårsopblomstringen kan analyseres baseret på opgørelserne af fytoplanktonets artssammensætning.

Analyse af i hvor høj grad fytoplanktonsamfundet i forårsperioden er baseret på "overhængere" og reduceret vinterdødelighed af arter fra efterårs- / vinteropblomstringen kan også baseres på opgørelserne af fytoplanktonets artssammensætning.

Græsningens betydning for udviklingen af forårsopblomstringen kan baseres på en analyse af forekomsten af mikro- og mesozooplankton samt abundansen af filtrerende bunddyr, som er registreret på nogle NOVANA-stationer.

Analyse af de fysiske og kemiske forhold i forbindelse med forårsopblomstringen (vandtemperatur, salinitet, lagdelingens styrke og dybde, vindforhold og koncentrationerne af uorganiske næringsstoffer i overflade og bundvand) er tilgængelige fra NOVANA-overvågningen og DMI.

3.6.8 Mulighed for forbedret vidensgrundlag

Datagrundlaget for at dokumentere tidspunktet for forårsopblomstringen kan forbedres ved at inkludere målinger af fytoplanktons biomasse med høj, tidsmæssig opløsning fx ved anvendelse af målebøjer og satellitovervågning.

Ved anvendelse af modellering kan det anskueliggøres, i hvor høj grad den tidsmæssige forekomst af forårsopblomstringen er styret af klimarelaterede ændringer i fx overfladevandtemperatur, springlagsdannelse/stabilitet og opholdstiden af vandet på lokaliteten (afhænger af vind- og strømforhold) samt de vandkemiske forhold i form af tilgængelighed af uorganisk kvælstof, fosfor og opløst kisel i forhold til biologiske forhold som artssammensætning og græsning fra zooplankton.

4 Mulighed for forbedret viden

Der findes naturdata for bl.a. skovens fænologi fx i form af data om bøgens udspring og forekomst af fugle, men data ligger pt. ikke i kvalitetssikret form tilgængelig for analyse.

For de potentielle biologiske indikatorer er den/de kausale sammenhænge mellem klimaændringer og udviklingen i indikatorerne ikke i samme grad entydige, som for de fysiske og kemiske indikatorer. Dette skyldes, at de biologiske indikatorer også er påvirkede af andre forhold end de umiddelbart klimarelaterede. Ved udvikling og anvendelse af potentielle biologiske klimaindikatorer er det derfor vigtigt, at der gennemføres analyser til belysning af de andre forhold, som påvirker miljø- og naturindikatorerne, for at fastslå i hvor høj grad en udvikling kan tilskrives klimaændringer i forhold til andre miljøpåvirkninger.

I forbindelsen med præsentationen af timingen af planteplanktonets forårsopblomstring som en potentiel klimaindikator i denne rapport gøres der opmærksom på, at den registrerede temperaturforøgelse ikke alene kan forklare fremrykningen af tidspunktet for forårsopblomstringen som et resultat af en forøget væksthastighed af fytoplanktonet. Andre forhold spiller således også en rolle, fx forøget overlevelse af planteplankton i vinterperioden og ændringer i springlagsdybde og vandsøjleens stabilitet i vinter- og forårsperioden. Den slags kausale sammenhænge og de enkelte faktorerers betydning for indikatoren skal afklares i forbindelse med udviklingen af de specifikke indikatorer, for at det kan vurderes, i hvor høj grad indikatoren afspejler / påvirkes af klimaændringer.

5 Konklusioner

Der er en stor mængde data tilgængelig for udvikling af klimaindikatorer for Danmarks natur og miljø. Hovedparten af data stammer fra NOVANA-overvågningen, men der eksisterer også data fra anden overvågning, som kan anvendes fx. data for fisk, som overvåges af DTU.

NOVANA-data indeholder lange tidsserier af kvalitetssikrede data, som omfatter både kemiske og fysiske og biologiske parametre. Der er således et godt datagrundlag for at undersøge, i hvor høj grad de registrerede ændringstendenser og udviklingsmønstre kan tilskrives klimaændringer eller ændringer i andre forhold fx eutrofiering og introduktion af ikke-hjemmehørende arter herunder invasive arter.

Der er udviklet en række klimaindikatorer både på EU-plan og regionalt i regi af HELCOM og OSPAR samt nordisk råd, som umiddelbart kan overføres til danske forhold. Det er oplagt at arbejde med fysiske parametre som vandtemperatur og lagdelingsforhold for de akvatiske miljøer. For vandløb er det yderst relevant at arbejde videre med temperaturforhold og afstrømningsforholdene, som er velbeskrevne og vigtige for forståelsen af udviklingen i tilførslen af næringsstoffer til søer, fjorde og havet.

For den tørre natur og landbrug kan der arbejdes med udvikling af klimaindikatorer baseret på ændringer i plantesamfund og afgrøder samt markvanding og tørkeindeks.

For alle naturtyper kan der arbejdes med ændringer i artssammensætningen i forhold til klimaændringerne med fokus på registrering af ”nye” arter og tab af ”gamle” arter. Især etablering af ikke hjemmehørende (NIS) og invasive arter kan have stor betydning. For alle naturtyper kan der også analyseres på ændringer i fænologien såsom en tidligere start på den produktive periode, en senere afslutning af den produktive periode og dermed en forlængelse af hele den produktive periode.

For en række af støtteparametrene foreligger der allerede analyser af den tidsmæssige udvikling i forbindelse med den rutinemæssige afrapportering af NOVANA-data. Det er oplagt, at disse data og analyser inddrages og tilpasses i vurderingen af effekterne af klimaforandringerne i Danmark.

Udviklingen af klimaindikatorer omfatter analyse af eksisterende data, enten for enkelte lokaliteter eller /og for aggregerede data, som omfatter hele Danmark eller bestemte naturtyper. Ud over at analysere på den generelle udvikling af en parameter, kan der også analyseres på ekstremer. Det er desuden vigtigt, at udviklingen af klimaindikatorer også omfatter analyse af, i hvor høj grad de registrerede ændringer kan tilskrives klimarelaterede forhold eller ændringer i andre forhold fx eutrofiering eller invasive arter.

6 Referencer

- Aupic-Samain, A., Baldy, V., Delcourt, N., Krogh, P.H., Gauquelin, T., Fernandez, C., Santonja, M. 2020. Water availability rather than temperature control soil fauna community structure and prey-predator interactions. *Functional Ecology*. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13745>
- Andersen, H. E., Kronvang, B., Larsen, S. E., Hoffmann, C.C., Jensen, T. S. & Rasmussen, E. K. 2006. Climate-change impacts on hydrology and nutrients in a Danish lowland river basin. - *Science of the Total Environment* 365: 223-237.
- Bandaru, V., Yaramasu, R., PNVR, K., He, J., Fernando, S., Sahajpal R., Wardlow, B. D., Suyker, A., Justice, C. 2020. PhenoCrop: An integrated satellite-based framework to estimate physiological growth stages of corn and soybean. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 92, 102188. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102188>
- Baranov, V., Jourdan, J., Pilotto, F., Wagner, R., Haase, P. 2020. Complex and non-linear climate-driven changes in freshwater insect communities over 42 years. *Conservation Biology*, Vol. 34 (5): 1241-1251.
- Bhowmik, A. K. & Schaefer, R. B. 2015. Large scale relationship between aquatic insect traits and climate. *PLoS ONE* 10(6): e0130025. doi: 10.1371/journal.pone.0130025
- Cappelen, J. C., Kern-Hansen, E., Vaarby Laursen, P., Viskum Jørgensen, B. Vraa Jørgensen 2020. Denmark – DMI climate historical data 1768-2019. DMI report 20-02. Damgaard C. 2015. Modelling pin-point cover data of complementary vegetation classes. *Ecol Inform.* 30: 179-184.
- Coops, N. C., Hilker, T., Bater, C. W., Wulder, M. A., Nielsen, S. E., McDermid, G., Stenhouse, G. 2012. Linking ground-based to satellite-derived phenological metrics in support of habitat assessment. *Remote Sensing Letters* 3, 191-200. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.550330>
- Dahl, K.; Josefson, A. B.; Göke, C., Aagaard Christensen, J. P.; Hansen, J.; Markager, S.; Rasmussen, M. B.; Dromph, K.; Tian, T.; Wan, Z.; Krämer, I; Viitasalo, M.; Kostamo, K.; Borenäs, K.; Bendtsen, J.; Springe, G.; Bonsdorff, E. 2012: Climate Change Impacts on Marine Biodiversity and Habitats in the Baltic Sea – and Possible Human Adaptations. Baltadapt Report # 3.
- Damgaard, C. 2019. Spatio-temporal structural equation modeling in a hierarchical bayesian framework: What controls wet heathland vegetation? *Ecosystems*. 22: 152-164.
- Damgaard, C. 2020. Adaptive management plans rooted in quantitative ecological predictions of ecosystem processes: Putting monitoring data to practical use. *bioRxiv*.2020.2010.2011.334789.
- Damgaard, C. & Irvine, K. M. 2019. Using the beta distribution to analyze plant cover data. *J Ecol.* 107:2747–2759.

Damgaard, C., Nygaard, B., Ejrnæs, R., Bruus, M., Strandberg, B., Strandberg, M., Timmermann, A., Ehlers, B. K. 2019. Has the frequency of invasive higher plants stabilized? Results from a long-term monitoring program of Danish habitats. *Applied Vegetation Science*. 22(2):292-299.

Damgaard, C., Nygaard, B., Ejrnæs, R., Kollmann, J. 2011. State-space modeling indicates rapid invasion of an alien shrub in coastal dunes. *Journal of Coastal Research*. 27:595–599.

Degn, H. J. 2019. Heden. Aarhus: Aarhus Universitetsforlag.

DMI, 2020a. Danmarks klima 2019. DMI rapport 20-01 www.dmi.dk/publikationer/

DMI, 2020b. Klimaatlas-rapport Danmark www.dmi.dk/klimaatlas/

Duncan, J. M. A., Dash, J. Atkinson, P. M. 2015. The potential of satellite-observed crop phenology to enhance yield gap assessments in smallholder landscapes. *Front. Environ. Sci.*, 11 August 2015 | <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00056>

EEA 2008. Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator based assessment. EEA Report no. 4/2008.

EEA 2017. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016 – An indicator-based report. EEA Report no. 1/2017.

Ellenberg, H., Weber, H. E., Düll, R., Wirth, V., Werner, W., Paulißen D. 1992. Zeigerwerte von pflanzen in mitteleuropa. *Scripta Geobotanica*. 18(2. Ed): 1-258.

Filbee-Dexter, K., Wernberg, T., S. P. Grace, Thormar, J., Fredriksen, S., Narvaez, C. N., Feehan C. J., Norderhaug K. M. 2020. Marine heatwaves and the collapse of marginal North Atlantic kelp forests. *Scientific Reports* 10: 13388. Fredshavn J, Nielsen KE, Ejrnæs R, Nygaard B, Skov F, Strandberg B, Johannsen VK. 2009. Tekniske anvisninger til overvågning af terrestriske naturtyper. <http://www.dmu.dk/myndighedsbetjening/overvaagning/fagdatacentre/fdc biodiversitet/tekniskeanvisninger/>.

Garnier, E, Navas, M. L., Grigulis K. 2016. Plant functional diversity. Organism traits, community structure, and ecosystem properties. Oxford, UK: Oxford University Press.

Gregersen, A. K. & Knudsen, H. (1981) Normalværdier for vandingsbehov, afstrømning og nettovandbehov ved forskellig rodzonekapacitet, *Tidsskrift for Planteavl's Specialserie*, nr. S 1537, p. 1–21 (in Danish with English summary).

Grime, J. P. 1979. Plant strategies and vegetation processes. Chichester, UK: John Wiley and Sons.

Grime, J. P. 1998. Benefits of plant diversity to ecosystems: Immediate, filter and founder effects. *J Ecol*. 86(6):902-910.

Hairston, N. G, Smith F. E, Slobodkin, L. B. 1960. Community structure, population control, and competition. *Am Nat*. 94(879):421-425.

Hamilton, A. T., Stamp, J. D., Bierwagen, B. G. 2010. Vulnerability of biological metrics and multimetric indices to effects of climate change. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 29(4): 1379-1396.

Hansen J.W. & Høgslund S. (red.) 2021. Marine områder 2019. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 174 s. - Videnskabelig rapport fra DCE nr. 418.

Hansen, J. W., Nedergaard, M., Skov, F., Jensen, M. H., Lassen, J., Lindeborg, N. C., Marsbøll, S., Müller-Wohlfeil, D-I., Hansen, J., Jeppesen, E., Jørgensen, T. B., Kronvang, B., Larsen, S. E., Nielsen, K. E., Andersen, J., Andersen, P. 2008. IGLOO-Indikatorer for globale klimaforandringer i overvågningen. By og Landskabsstyrelsen, Miljøministeriet.

Hansen, S., Jensen, H. E., Nielsen, N. E., Svendsen, H. 1991. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model Daisy. *Fertilizer Research* 27 245-259

HELCOM 2013. Climate change in the Baltic Sea Area: HELCOM thematic assessment in 2013. *Balt. Sea Environ. Proc.* No. 137.

HELCOM 2013. HELCOM core indicators: Final report of the HELCOM CORESET project. *Balt. Sea Environ. Proc.* No. 136

HELCOM 2018. State of the Baltic Sea – Second HELCOM holistic assessment 2011-2016. *Baltic Sea Environment. Proceedings* 155.

Hirsch, R. M., Slack, J. R., Smith, R. A. 1982. Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. *Water Resources Research*, 27: 803- 813.

Jensen, P. N., Hansen, J. W., Jeppesen, E., Wiberg-Larsen, P., Hansen, J. L. S., Jakobsen, H. H., Stæhr, P., Dahl, K. 2015. Klimaforandringernes betydning for vandområder – med fokus på de biologiske kvalitetselementer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 106 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 146
<http://dce2.au.dk/pub/SR146.pdf>

Jeppesen, E., Meerhoff, M., Holmgren, K., González-Bergonzoni, I., Teixeira-de Mello, F., Declerck, S. A. J., De Meester, L., Søndergaard, M., Lauridsen, T. L., Bjerring, R., Conde-Porcuna, J. M., Mazzeo, N., Iglesias, C., Reizenstein, M., Malmquist, H. J., Liu, Z. W., Balayla, D., Lazzaro, X. 2010. Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential ecosystem effects- *Hydrobiologia* 646:73-90.

Jeppesen, E., Kronvang, B., Olesen, J. E., Søndergaard, M., Hoffmann, C.C., Andersen, J. H. E., Lauridsen, T.L., Liboriussen, L., Meerhoff, M., Beklioglu, M., Özen, A. 2011. Climate change effect on nitrogen loading from catchment in Europe: implications for nitrogen retention and ecological state of lakes and adaptations- *Hydrobiologia* 663:1-21.

Jeppesen, E., Canfield Jr, D. E., Bachmann, R.W., Søndergaard, M., Havens, K. E., Johansson, L. S., Lauridsen, T. L., S, T., Rutter, R. P., Warren, G., Gaohua, J., Hoyer, M. V. 2020. Towards predicting climate change effects on lakes: a comparative study of 1656 shallow lakes from subtropical Florida and temperate Denmark reveals substantial differences in nutrient dynamics, metabolism, trophic structure and top-down control.- *Inland Waters* 10:197-211.

Jeppesen, E., Jørgensen, T. B., Lauridsen, T. L., Meerhoff, M., Liboriussen, L., Holmgren, K. 2009. Klimaændringer i Danmark – effekter på søer. Vand & Jord, vol 16 (4): 157-160.

Jonsson, B. & Jonsson, N. 2009. A review of the likely effects of climate on anadromous Atlantic salmon *Salmo salar* and brown trout *Salmo trutta*, with particular reference to water temperature and flow. Journal of Fish Biology 75: 2381-2447.

Kendall, M.G. 1975. Rank Correlation Methods. Charles Griffin, London.

Kronvang, B., Larsen, S. E., Lassen, J., Müller-Wohlfeil, D.-I., 2008. Vandløb (stoftransport) i: IGLOO – Indikatorer for globale klimaforandringer i overvågningen (red. Hansen, J.W., Nedergaard, M, Skov, F.)

Long, S.P., Ainsworth, E.A., Rogers, A., Ort, D.R. (2004). Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future. Ann. Rev. Plant Biol. 55, 591–628.

Mogensen, V. O. & Hansen, B. S. (1978) Drought periods in Denmark 1956-1976 - Calculations for field irrigation, Den Kongelige Veterinær- og Landbohøjskole, 1979, pp. 25–42.

Mogensen, V. O. & Hansen, B. S. (1978) Drought periods in Denmark 1956-1976 - Calculations for field irrigation, Den Kongelige Veterinær- og Landbohøjskole, 1979, pp. 25–42.

Nielsen, K. E, Bak, J. L, Bruus, M, Damgaard, C, Ejrnæs, R, Fredshavn, J. R, Nygaard, B, Skov, F, Strandberg, B, Strandberg, M. 2012. Naturdata. Dk - danish monitoring program of vegetation and chemical plant and soil data from non-forested terrestrial habitat types. Biodiversity & Ecology 4:375.

Nygaard, B., Damgaard, C., Ejrnæs, R. 2020. Teknisk anvisning til overvågning af lysåbne terrestriske habitatnaturtyper i netværksområder. DCE - Aarhus Universitet.

Nygaard, B., Nielsen, K. E., Damgaard, C., Bladt J, Ejrnæs, R. 2014. Fagligt grundlag for vurdering af bevaringsstatus for terrestriske naturtyper. Aarhus Universitet, Institut for Bioscience.

Normander, B., Jensen, T.S., Henrichs, T., Sanderson, H. & Pedersen, A.B. (red.) 2009: Natur og Miljø 2009 – Del A: Danmarks miljø under globale udfordringer. Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. 94 s. – Faglig rapport fra DMU nr. 750, http://www.dmu.dk/Pub/FR750_A.pdf

Novana.Au.Dk. Rapportering af NOVANA's delprogram for terrestriske naturtyper og arter. 2019. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. www.novana.au.dk.

Nordic Council of Ministers 2009. Signs of Climate Change in Nordic Nature. Temanord 2009: 551.

Olesen, J. E., Børgesen, C. D. D., Elsgaard, L., Palosuo, T., Rötter, R. P. P., Skjelvåg, A. O. O., Peltonen-Sainio, P., Börjesson, T., Trnka, M., Ewert, F., Siebert, S., Brisson, N., Eitzinger, J., van Asselt, E. D. D., Oberforster, M., van der Fels-Klerx, H. J. J., 2012. Changes in time of sowing, flowering and maturity of cereals in Europe under climate change. Food Addit. Contam. - Part A

Chem. Anal. Control. Expo. Risk Assess. 29: 1527–1542.
<https://doi.org/10.1080/19440049.2012.712060>

Plauborg, F. & Olesen, J. E. (1991) Udvikling og validering af modellen MARKVAND til vandingssstyring i landbruget, Tidsskrift for Planteavl's Specialserie, nr S2113, p. 1–103 (in Danish with English summary).

Poloczanska, E. S., Brown, C. J., Sydeman, W. J., Kiessling, W., Schoeman, D. S., Moore, P. J., Brander, K., Bruno, J. F., Buckley, L. B., Burrows, M. T., Duarte, C. M., Halpern, B. S., Holding, J., Kappel, C. V., O'Connor, M. I., Pandolfi, J. M., Parmesan, C., Schwing, F., Thompson, S. A., Richardson, A. J. (2013). Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change* 3: 919-925.

Pullens, J. W. M., Sørensen, C. A. G., Olesen, J. E. 2020. Prediction of harvest date in winter and spring cereals. Notat til Landbrugstyrelsen.

Raunkiær, C. 1910. Formationsundersøgelse og formationsstatistik (english translation 1934: Investigation and statistics of plant formations. In: The life forms of plants and statistical plant geography, oxford). *Botanisk Tidsskrift*. 30:20-132.

Rezaei, E. E., Siebert, S., Hüging, H., Ewert, F. 2018. Climate change effects on wheat phenology depends on cultivar change. *Nature Scientific Reports* 8, 4891. DOI:10.1038/s41598-018-23101-2
Rune, F. (2009). Bøgen springer tidligere ud. *Skoven* nr. 5 (2009). Udgivet af Dansk Skovforening.

Sand-Jensen, K., Friberg, N., Murphy, J. 2006. Running Waters. Historical development and restoration of lowland Danish Streams. NERI, Denmark.

Strandberg, M, Nielsen, K. E, Damgaard, C. 2018. Habitat monitoring reveals decreasing morlayer C:N ratios in Danish heathlands. *Ecological Indicators*. 89: 538-542.

ten Damme, L. & Andersen, M. N. (2018) The gross- and net-irrigation requirements of crops and model farms with different root zone capacities at ten locations in Denmark 1990-2015. DCA rapport, no. 112, vol. 112, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.

UNESCO, 2020: United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change, Paris, UNESCO. cf. FAO-AQUASTAT/Universität Bonn. 2013. Global Map of Irrigation Areas (GMIA).
<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/irrigationmap/index10.stm>

UNESCO, UN-Water (2020) United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change, Paris, UNESCO.

Wasmund, N., G. Nausch, M. Gerth, S. Busch, C. Burmeister, R. Hansen, B. Sadkowiak 2019. Extension of the growing season of phytoplankton in the western Baltic Sea in response to climate change. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* Vol. 622: 1-16.

7 Bilag

Bilag 1. Tabel af intercept (afskæring med y-aksen) og hældningskoefficienter og Standard Error (SE) af regressioner for de enkelte måneder baseret på formel (1). For biovolumen af cyanobakterier var dybden ikke signifikant og derfor ikke medtaget.

Klorofyl		Marts	Marts_SE	April	April_SE	Maj	Maj_SE	Juni		Juni_SE	Juli	Juli_SE	August	August_SE	September	September_SE	Oktober	Oktober_SE
Intercept		4,698	0,156	5,15	0,141	6,05	0,21	2,69		0,293	2,64	0,3	2,4	0,34	1,57	0,31	3,39	0,28
logtp	TP	0,691	0,04	0,709	0,023	0,786	0,022	0,674		0,021	0,677	0,018	0,603	0,018	0,559	0,02	0,472	0,031
logtn	TN	-0,032	0,039	0,287	0,023	0,36	0,026	0,477		0,031	0,474	0,031	0,495	0,033	0,445	0,035	0,258	0,047
logtemp	TEMP	0,345	0,059	-0,018	0,055	-0,364	0,075	0,732		0,099	0,769	0,099	0,835	0,112	1,18	0,109	0,522	0,111
logdep	DEP	-0,168	0,035	-0,077	0,022	-0,275	0,023	-0,195		0,023	-0,023	0,021	-0,039	0,022	-0,159	0,022	-0,511	0,033
Totalvolumen		Marts	Marts_SE	April	April_SE	Maj	Maj_SE	Juni		Juni_SE	Juli	Juli_SE	August	August_SE	September	September_SE	Oktober	Oktober_SE
intercept		2,287	0,29	2,736	0,269	4,039	0,467	0,013		0,537	1,519	0,577	1,133	0,565	-0,0063	0,595	1,889	0,476
logtp	TP	0,588	0,077	0,664	0,044	0,834	0,044	0,673		0,042	0,682	0,038	0,633	0,034	0,544	0,043	0,508	0,054
logtn	TN	0,038	0,07	0,282	0,042	0,256	0,051	0,555		0,059	0,596	0,064	0,514	0,058	0,617	0,07	0,312	0,081
logtemp	TEMP	0,249	0,118	0,083	0,108	-0,312	0,164	0,985		0,179	0,501	0,186	0,673	0,184	1,045	0,208	0,321	0,189
logdep	DEP	-0,206	0,065	-0,025	0,042	-0,246	0,046	-0,134		0,047	0,103	0,045	-0,0027	0,041	-0,216	0,044	-0,708	0,057
Cyanobacteria -vol		Marts	Marts_SE	April	April_SE	Maj	Maj_SE	Juni		Juni_SE	Juli	Juli_SE	August	August_SE	September	September_SE	Oktober	Oktober_SE
intercept		0,508	0,086	0,443	0,119	0,082	0,226	-0,022		0,384	-0,237	0,49	-1,15	0,51	-1,69	0,51	0,303	0,31
logtp	TP	0,162	0,024	0,194	0,02	0,216	0,022	0,287		0,031	0,326	0,035	0,28	0,034	0,211	0,037	0,176	0,034
logtn	TN	-0,05	0,022	-0,0487	0,02	-0,023	0,0256	0,0308		0,045	0,293	0,061	0,505	0,058	0,56	0,062	0,174	0,052
logtemp	TEMP	0,067	0,036	0,147	0,048	0,3	0,079	0,458		0,128	0,641	0,159	1,095	0,17	1,14	0,181	0,284	0,122
% Cyanobakteria - vol		Marts	Marts_SE	April	April_SE	Maj	Maj_SE	Juni		Juni_SE	Juli	Juli_SE	August	August_SE	September	September_SE	Oktober	Oktober_SE
intercept	int	1,22	0,24	0,704	0,304	-0,177	0,548	0,453		0,76	-1,06	0,84	-2,394	0,783	-0,64	0,785	1,066	0,608
logtp	TP	0,219	0,063	0,278	0,05	0,39	0,052	0,442		0,059	0,298	0,055	0,191	0,047	0,162	0,056	0,211	0,069
logtn	TM	-0,208	0,058	-0,178	0,047	-0,132	0,059	-0,143		0,084	0,31	0,093	0,658	0,081	0,711	0,093	392	0,103
logtemp	TEMP	0,093	0,098	0,421	0,122	0,877	0,192	0,762		0,254	1,265	0,271	1,696	0,255	1,134	0,274	0,366	0,241
logdep	DEP	0,065	0,054	-0,052	0,047	0,058	0,054	0,236		0,066	0,301	0,066	0,348	0,056	0,303	0,058	0,469	0,073

MILJØINDIKATORER – INDIKATORER TIL VURDERING AF EFFEKTER AF KLIMAÆNDRINGER

Sammenstilling og præsentation af indikatorer og understøttende data til vurdering af effekter af klimaændringer på miljø og natur

I denne rapport sammenstilles og vurderes eksisterende data, der kan anvendes til vurdering af forskellige potentielle indikatorers anvendelighed til dokumentation af klimaændringernes effekt på det danske miljø og natur. Rapporten er opbygget, så der først gives en introduktion til problemstillingen "effekter af klimaændringer på miljø og natur". Herefter introduceres "den gode indikator", hvor der gives eksempler på klima-indikatorer, som er identificeret/udviklet bl.a. af det europæiske miljøagentur. Med dette som udgangspunkt udarbejdes bruttolisten over potentielle klimaindikatorer, som præsenteres i det efterfølgende afsnit sammen med en præsentation af det datagrundlag, der er til rådighed for arbejdet med indikatorerne. I de efterfølgende afsnit gives en række eksempler på klimaindikatorer for henholdsvis terrestrisk natur, landbrug, ferske og marine miljøer, som er baseret på forskellige typer af data og dataanalyser. Herefter samles overordnet op på vidensgrundlaget med fokus på manglende viden i forbindelse med udviklingen af og arbejdet med de forskellige indikatorer. Endelig konkluderes på anvendeligheden af indikatorerne, det eksisterende datagrundlag og analysemetoder med forslag til potentielle klimaindikatorer der kan arbejdes videre med.