



KLIMAÆNDRINGERNES BETYDNING FOR INDSATSBEHOV TIL KYSTVANDE

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 479

2021



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI



KLIMAÆNDRINGERNES BETYDNING FOR INDSATSBEHOV TIL KYSTVANDE

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 479

2021

Karen Timmermann¹

Peter A.U. Stæhr²

Cordula Göke²

Sanjina Upadhyay²

Anders Erichsen³

¹Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Akvatiske Ressourcer

²Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience

³DHI



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI



Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 479
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Titel:	Klimacændringernes betydning for indsatsbehov til kystvande
Forfattere:	Karen Timmermann ¹ , Peter A. U. Stæhr ² , Cordula Göke ² , Sanjina Upadhyay ² & Anders Erichsen ³
Institutioner:	¹ Technical University of Denmark, Institute for Aquatic Resources, ² Aarhus University, Institute for Ecoscience, ³ DHI
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	December2021
Redaktion afsluttet:	December2021
Faglig kommentering:	Jesper PA Christensen ² , Trine C Larsen ³
Kvalitetssikring, DCE:	Anja Skjoldborg Hansen
Ekstern kommentering:	Miljøstyrelsen, som ikke havde kommentarer
Finansiel støtte:	Miljøstyrelsen og Landbrugsstyrelsen
Bedes citeret:	Timmermann, K., Stæhr, P.A.U., Göke, C. Upadhyay, S. & Erichsen. 2021. Klimacændringernes betydning for indsatsbehov til kystvande. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 30 s. - Videnskabelig rapport nr. 479 http://dce2.au.dk/pub/SR479.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Rapporten analyserer betydningen af klimacændringer siden år 1900 for det estimerede behov for reduktion i næringsstofftilførsler, som skal sikre mindst god økologisk tilstand i kystvande. Resultaterne viser, at miljømålet for klorofyl ville have været højere i et år 1900 klima sammenlignet med det nuværende klima og indsatsbehovet ville være ca 1500 Ton N/år lavere. Endvidere viser resultaterne, at statusværdien for ålegræs indikatoren i de fleste vandområder ville være lavere i et år 1900 klima, hvilket resulterer i et indsatsbehov som er ca 600 Ton N/år højere, såfremt statusværdien var fastlagt i et år 1900 klima og ikke i det nuværende klima.
Emneord:	Vandrammedirektiv, klimaforandringer, Ålegræs, Klorofyl-a, indsatsbehov, kvælstof
Layout:	Grafisk Værksted, AU Silkeborg
Foto forside:	Peter Bondo Christensen
ISBN:	978-87-7156- 652-9
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	30
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/SR479.pdf

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
Summary	7
1 Introduktion	8
1.1 Baggrund	8
1.2 Formål	9
2 Metode	10
2.1 Klimatiske data for år 1900	10
2.2 Hydrodynamisk model	11
2.3 Økologisk model til klorofyl-a beregninger	11
2.4 Habitatmodellering af ålegræsudbredelse	11
2.5 Ekstrapolering af scenarieresultater til alle vandområder	14
2.6 Beregning af indsatsbehov baseret på hhv. ålegræs og klorofyl	15
3 Resultater	16
3.1 Fysiske parametre	16
3.2 Ålegræssets dybdegrænse	16
3.3 Sommer klorofyl-a koncentrationer	21
3.4 Indsatsbehov for kystvande	24
4 Diskussion	26
5 Referencer	28

Forord

Denne rapport analyserer effekter af de klimatiske forandringer, der er sket fra omkring år 1900 og frem til i dag, på det beregnede indsatsbehov for opnåelse af god økologisk tilstand i danske kystvande. Rapporten er en del af projektet "Klimaændringernes betydning for indsatsbehov for kystvande", som er igangsat af Miljøstyrelsen og finansieret af Landbrugsstyrelsen, og resultaterne indgår som en del af grundlaget for tredje generation af vandområdeplaner. Arbejdet har været styret og udført af DHI, DTU Aqua og AU/DCE og baserer sig på historiske klimatiske data leveret af DMI. Derudover har Miljøstyrelsen indgået i en arbejdsgruppe omkring projektet. Projektet er indgået som en del af de overordnede modeludviklinger under tredje generation af vandområdeplaner og har dermed haft en overordnet styregruppe til dialog, opfølgning på fremdrift mm bestående af MIM, DHI og AU samt en følgegruppe bestående af medlemmer fra Landbrug og Fødevarer, SEGES, Bæredygtigt Landbrug, Danmarks Naturfredningsforening, Danmarks Sportsfiskerforbund, Danske Havne og KL/kommuner.

MIM har haft mulighed for at kommentere udkast til rapporten, og følgegruppen er løbende blevet orienteret om projektet ved møder indkaldt af MIM. Valg af metoder, behandling af data, beskrivelse og præsentation af resultater har udelukkende været DHI, DTU Aqua og AU/DCEs beslutning og ansvar.

Sammenfatning

For kystvande fastlægges indsatsbehov og målbelastninger med udgangspunkt i det nuværende klima og den nuværende målte økologiske tilstand af udvalgte miljøindikatorer. Ligesom ændringer i næringsstofftilførsler kan påvirke indikatorerne, kan ændringer i klimatiske forhold imidlertid også påvirke indikatorerne. I fastlæggelsen af behovet for at reducere næringsstofftilførslerne til danske kystvande har der hidtil ikke været fokus på indflydelsen fra historiske klimaændringer. I denne rapport analyseres betydningen af klimaændringer siden år 1900 for det estimerede behov for reduktion i næringsstofftilførsler, som skal sikre, at alle kystvande opnår mindst god økologisk tilstand, som er miljømålsætningen for kyst-vandområder i henhold til Vandrammedirektivet (VRD).

Til analysen anvendes rumligt fordelte meteorologiske variable for vind, temperatur og nedbør fra perioden omkring år 1900. Ved hjælp af modeller beregnes hvordan tilstanden af hhv. ålegræs og klorofyl ville have været såfremt klimaet havde været som i år 1900. For ålegræs viser model resultaterne, at ålegræssets dybdegrænse i de fleste vandområder ville have været lavere i et år 1900 klima sammenlignet med det nuværende klima. Det betyder, at statusværdier for ålegræsindikatoren generelt ville have været lavere, hvis værdierne var fastlagt i et år 1900 klima. For klorofylindikatoren viser modelresultaterne, at klorofylkoncentrationerne i de fleste vandområder er højere i et historisk klima ift. det nuværende klima. Det betyder, at miljømålet for klorofyl er højere når der anvendes et historisk klima i fastlæggelsen af miljømålet.

Effekten af klimaforandringer for hhv. ålegræs- og klorofylindikatoren har afsmittende effekt på det indsatsbehov, der skal til for at opnå god økologisk tilstand. Man kan således forvente et forøget indsatsbehov på ca 600 ton N/år, såfremt statusværdien for ålegræs var målt i et år 1900 klima ift. det nuværende klima. Tilsvarende ville indsatsbehovet være ca 1500 tons N mindre, hvis klorofyl-miljømålet var fastsat udfra et historisk klima ift. et nuværende klima.

Summary

For coastal waters, nutrient reduction needs and target loads are determined based on current climatic conditions and ecological status of selected environmental indicators. Even though changes in climatic conditions may affect the environmental indicators, climate change and its potential impacts on environmental status and target loads has not been addressed. This report analyzes the potential role of climate changes since year 1900 for the estimated need for nutrient load reductions required to ensure at least good ecological status, which is the environmental objective for coastal water bodies under the Water Framework Directive (WFD).

The analysis is based on spatially distributed meteorological variables for wind, temperature and precipitation from around the year 1900. Models describing the condition of the environmental indicators “depth distribution of eelgrass” and “summer chlorophyll-a” is used to predict, the values of the indicators in a year 1900 climate. For eelgrass, the model results reveal that the depth limit of eelgrass in most water bodies would have been lower in a year 1900 climate compared to the current climate. Hence, the status values of the eelgrass indicator would have been lower if estimated in a year 1900 climate. For the chlorophyll-a indicator, the model results show higher chlorophyll-a concentrations in most water bodies in a historical climate compared to the current climate. Hence, the reference condition and environmental target for the chlorophyll-a indicator would have been higher if the target values were established using a year 1900 climate instead of the current climate.

The effects of climate change for the eelgrass and chlorophyll indicators have a contagious effect on the nutrient load reductions required for achieving good ecological status. Thus, based on the results, an additional effort of approximately 600 tonnes N / year, is expected if the status value for eelgrass was measured in a year 1900 climate compared to the current climate. Similarly, the need for nutrient reductions would be approximately 1500 tonnes N lower if the chlorophyll environmental target had been established based on the historical year 1900 climate instead of the current climate.

1 Introduktion

I perioden 2012-2015 udviklede Aarhus Universitet (AU) og DHI modeller og metoder til fastsættelse af indsatsbehov og målbelastning til danske marine vandområder. De udviklede modeller og metoder indgik efterfølgende i det videnskabelige grundlag for de nuværende vandområdeplaner, vandområdeplaner 2015-2021 (se Erichsen & Timmermann 2017 for detaljer).

Som en del af aftalen om Fødevarer- og landbrugspakken blev det besluttet at gennemføre en international evaluering af modellerne og metoderne bag vandområdeplanerne med inddragelse af udenlandske forskere. Formålet med evalueringen var blandt andet at gennemgå de anvendte modeller og metoder og komme med deres anbefalinger med henblik på at sikre forbedrede beregninger af indsatsbehov frem mod vandområdeplanerne 2021-2027 (VOP3).

Som opfølgning på den internationale evaluering igangsatte Miljøstyrelsen en lang række af faglige udviklingsprojekter med det overordnede formål at udvikle nye data, modeller og metoder til beregning af robuste, gennemsnitlige og differentierede klorofyl-a referenceværdier (og tilsvarende målværdier) og målbelastninger i så mange vandområder som muligt frem mod VOP3.

Centrale forsknings- og udviklingsprojekter, som relaterer sig til den fortsatte udvikling og anvendelse af modeller, dækker over:

- "Videreudvikling af Miljøstyrelsens marine mekanistiske model-setup til brug for vandforvaltningen" og " Videreudvikling af Miljøstyrelsens marine statistiske modeller til brug for vandforvaltningen".
- Anvendelse af MST's marine modelkompleks og metodeudvikling til brug for vandområdeplanerne 2021-2025.

Sideløbende med ovenstående centrale udviklingsprojekter har Miljøstyrelsen igangsat to supplerende projekter: Et projekt, som inddrager effekter af klimaændringer fra år 1900 frem til i dag, og et projekt, som evaluerer potentielle effekter af næringsstoffer tilført vandområderne i sommersæsonen.

Evaluering af muligheder for optimeret sæsonbaseret regulering af næringsstofforsyningen er beskrevet i Erichsen et al., in prep, mens nærværende rapport beskriver metoder og resultater af projektet om effekter af klimaforandringer for indsatsbehov for danske kystvande.

1.1 Baggrund

For kystvande bestemmes reduktionsbehov og målbelastninger i dag ved hjælp af statistiske såvel som mekanistiske modeller. For kystvande tages der udgangspunkt i dagens klima og dagens målte økologiske tilstand, og gennem modelberegninger er effekten på den enkelte indikator af ændringer i næringsstofforsyning (udtrykt ved en hældningskoefficient af sammenhæng mellem loading og indikator) bestemt for hvert vandområde. Baseret på den forskel, der er mellem miljøtilstand og miljømål, og den modelberegnete hældningskoefficient, beregnes herefter et reduktionsbehov og en tilhørende målbelastning. Indikatorerne, som anvendes til vurdering af miljøtilstanden, og som indgår i modelberegning af indsatsbehov, udgøres af "sommer

klorofyl-a koncentrationen” og ”dybdegrænsen for ålegræs”. Ligesom ændringer i næringsstofftilførsler kan påvirke indikatorerne, kan ændringer i klimatiske forhold også påvirke indikatorerne. I fastlæggelsen af behovet for at reducere næringsstofftilførslerne til danske kystvande har der hidtil ikke været fokus på indflydelsen fra historiske klimaændringer, og der er fra Miljøstyrelsens side opstået et ønske om at få estimeret den del af det samlede reduktionsbehov, der kan tilskrives det seneste århundredes klimaudvikling.

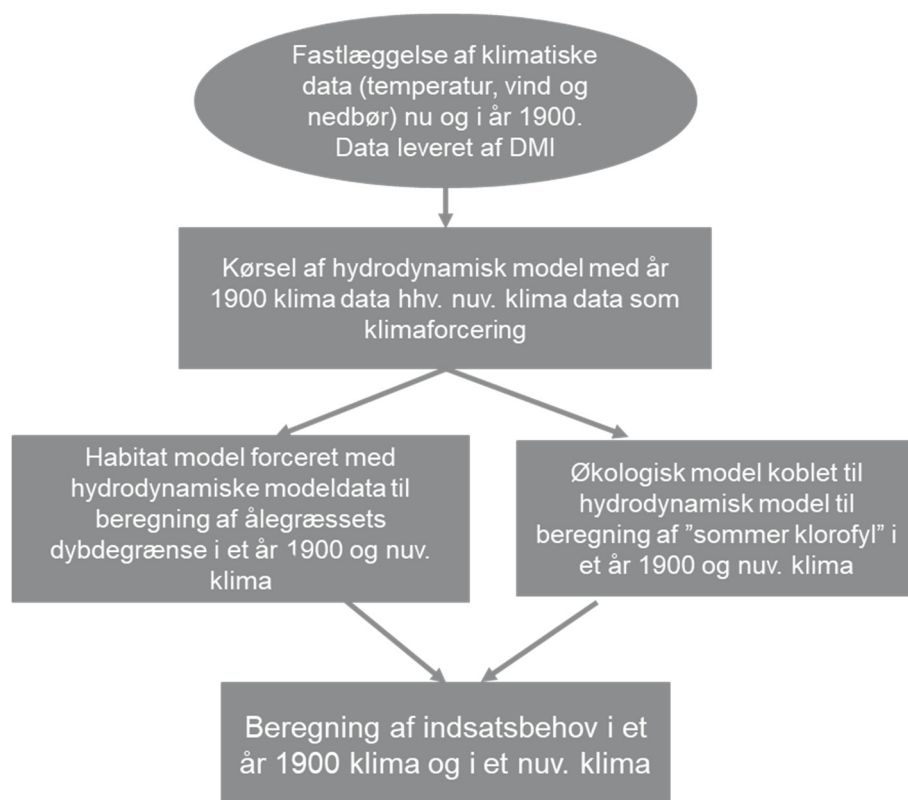
1.2 Formål

Nærværende projekt har til formål at analysere betydningen af klimaændringer siden år 1900 for det estimerede behov for reduktion i næringsstofftilførsler, som skal sikre, at alle kystvande opnår mindst god økologisk tilstand, som er miljømålsætningen for kyst-vandområder i henhold til Vandrammedirektivet (VRD).

2 Metode

Den overordnede metode til analyse af klimaforandringerne betydning for kystvandenes indsatsbehov består af en modelkæde (se figur 2.1), startende med kvantificering af de hydrodynamiske parametre (vandtemperatur, salinitet og strøm) i et historisk (år 1900) klima og i et nuværende klima. De hydrodynamiske parametre driver hhv. en habitatmodel, som simulerer potentiel udbredelse og dækning af ålegræs (Stæhr et al., 2019), samt en økologisk model, som bla. simulerer koncentrationen af klorofyl-a. Begge modeller køres både i et nuværende klima og et historisk klima. Udfra modelresultaterne kan effekten af et år 1900 klima på indikatorerne "sommer klorofyl-a" og "ålegræssets dybdegrænse" kvantificeres og indgå i beregninger, som fastlægger indsatsbehovet i hhv. et historisk (år 1900) og nuværende klima.

Figur 2.1. Skematisk oversigt over data flow og metoden, som er anvendt til at beregne det indsatsbehov, som sikrer god økologisk tilstand i et historisk (år 1900) klima og i et nuv. klima. Forskellen i indsatsbehov i et historisk klima og nuv. klima illustrerer klimaændringerne betydning for indsatsbehov.



2.1 Klimatiske data for år 1900

Data for nedbør, lufttemperatur og vindhastighed omkring år 1900, som skal anvendes til at forcere de hydrodynamiske modeller, er tilvejebragt af DMI og afleveret på nationalt niveau i Vejen 2021. Det historiske datasæt er baseret på historiske målinger for perioden 1890-1910, som på forskellig vis er kvalitetssikret og korrigeret, således at de historiske data kan sammenlignes med de tilsvarende nuværende målinger. Datasættet for de historiske klimaparametre er i DCE-rapporten afleveret på månedsbasis på national skala. Til brug for dette projekt har der været fokus på de kystnære forhold, hvorfor der er anvendt vinddata, som er repræsentative for kystzonen. Til forcering af de hydrodynamiske modeller (nedbør, temperaturer og vind) benyttes nutidige meteorologiske data, mens forskellen mellem de historiske

klimaparametre og tilsvarende nuværende (1999-2018) klimaparametre opgjort på sæsonbasis er blevet påtrykt de samme data og derefter blevet anvendt til at karakterisere det historiske modelscenarie.

2.2 Hydrodynamisk model

Til beregning af klimaændringernes betydning for indikatorerne ”ålegræssets dybdegrænse” og ”sommer klorofyl-a koncentrationen” er der kørt hydrodynamisk modeller (DHI) dækkende alle de danske vandområder og tilstødende fjorde i Nordsøen og i de indre danske farvande (Skagen og indefter) på nær Randers Fjord og Isefjorden. Modellerne er forceret med klimatiske data karakteristisk for forholdene i hhv. år 1900 (Vejen 2021) og de nuværende (2012-2016) klimatiske forhold.

2.3 Økologisk model til klorofyl-a beregninger

Den økologiske model simulerer omsætningen og puljerne af næringsstoffer og fytoplankton-biomasse (klorofyl) og er direkte koblet til den hydrodynamiske model. Modellen er anvendt til at beregne en referencetilstand for klorofyl-indikatoren ud fra bl.a. baggrunds næringsstofftilførsler fra dansk opland i et nuværende (2014-2018) klima. Referencetilstanden for klorofyl er derefter omsat til et miljømål ved brug af interkalibrerede EQR-værdier. For at undersøge, hvordan klimaforandringer påvirker miljømålet for klorofyl og dermed indsatsbehovet, er referencescenariet kørt med historiske (år 1900) klimadata. Udfra det historiske referencescenarie er der beregnet historiske klorofyl-a referencer for danske vandområder, som derefter er omsat til historiske klorofyl miljømål ved brug af de interkalibrerede EQR-værdier.

Til denne del af opgaven er den økologiske model kørt i 3 modeller, der dækker hhv. de indre danske farvande, Smålandsfarvandet og Limfjorden.

2.4 Habitatmodellering af ålegræsudbredelse

Til undersøgelse af, hvordan klimaforandringer påvirker ålegræssets dybdeudbredelse, har vi anvendt en GIS-model, som beskriver udbredelse af ålegræs i danske farvande som et samspil mellem de væsentligste miljøfaktorer, som på forskellig vis påvirker vækst, overlevelse og spredning af planten (figur 2.2). GIS-modellen kombinerer landsdækkende kortlag til at estimere sandsynligheden for tætheder af ålegræs i danske farvande. Datalagene omfatter lystilgængelighed, sedimentforhold, fysisk eksponering, iltkoncentration, vandtemperatur og salinitet (Stæhr et al. 2019).

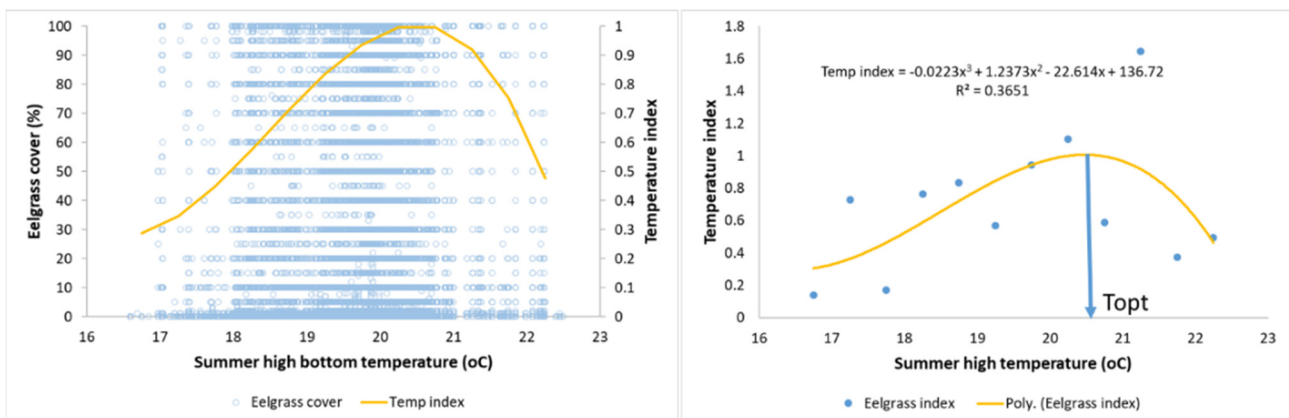
Ålegræsmodel:

Den anvendte ålegræs GIS-model (habitat suitability model) modellerer sandsynligheden (ålegræs-indeks) for ålegræs (0 – 100%) for et givet område (100 x 100 m raster) som et produkt af geografiske data for lys, temperatur, ilt, fysisk eksponering, salinitet og sediment på bunden.

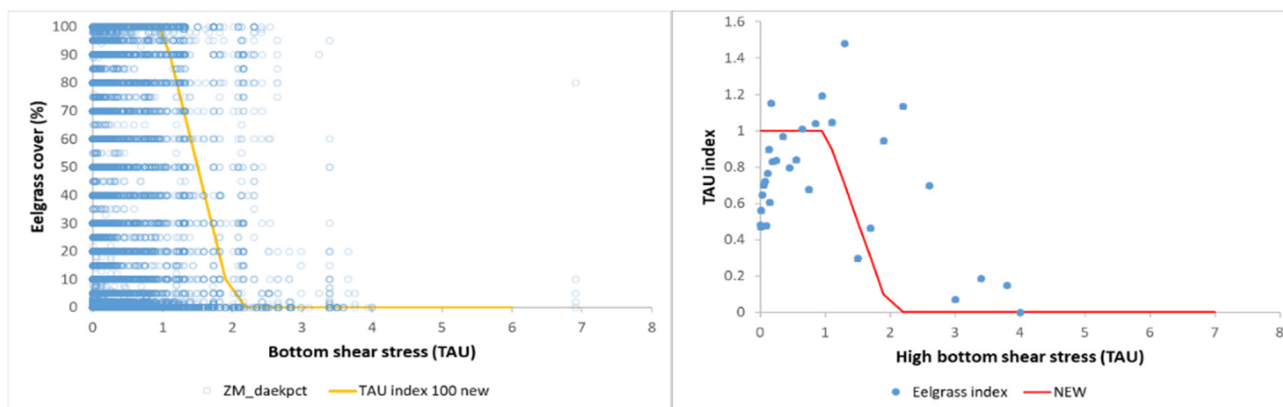
$$\text{Ålegræs_indeks} = \text{Lysindex} \times \text{temp_index} \times \text{ilt_index} \times \text{eksponerings_index} \times \text{salinitets_index} \times \text{sediment_index}$$

Alle landsdækkende GIS -datalag blev konverteret til en rumlig opløsning på 100 x 100 meter. Den oprindelige opløsning kan være højere (fx DHI-model Roskilde Fjord) eller lavere (fx DHI-model i Kattegat). Kalibrering og validering af ålegræsdækning blev udført på to uafhængige datalag. Anvendelse af data fra DHIs mekanistiske model for perioden 2012-2016 gjorde det muligt at forbedre flere af de vigtige datalag. Specifikt anvendte vi de høje bundvandtemperaturer (95 percentil) og de høje fysiske eksponeringsgrader beregnet som 95 percentilen af bundforskydningsspændingen (tau). For saliniteten og iltkoncentrationen anvendte vi de laveste værdier (5 percentilen). Disse kortlag repræsenterer mere ekstreme miljøforhold end den oprindelige GIS-model, som anvendte sommermiddelværdier, hvilket forventes at forbedre GIS-modellen, da det i højere grad er ekstremværdier, som repræsenterer begrænsende miljøforhold for ålegræssets vækst, overlevelse og spredning. For lys-indekset anvendes lysniveauer beregnet som en funktion af dybden (bathymetri), lyssvækkelse og sommermiddel overfladeindstråling.

De enkelte parametre blev konverteret til indekslag ved hjælp af ålegræsobservationer langs monitoringstransektorer for baseline-tidsperioden. Der var samlet over 100.000 ålegræsobservationer i baselineperioden. Omkring halvdelen af disse blev tilfældigt udvalgt til at kalibrere indeks-modellerne. De resterende observationer blev brugt til kontrol af ålegræsmodellen. De opdaterede, kalibrede indeks-modeller for de mest centrale parametre "temperatur" og "tau" fremgår af figur 2.3 og figur 2.4.



Figur 2.3. Sammenhængen mellem observerede ålegræsdækningsprocent (NOVANA data 2012-2016) og høje sommertemperaturer (95 percentil – DHI-model data). Den gule linje viser temperaturindeks- modellen, som har et optimum omkring 20,5 °C.



Figur 2.4. Sammenhængen mellem fysisk eksponering (95 percentil værdier – DHI-model) og dækningsprocent (NOVANA data 2012-2016) af ålegræs. Figuren til højre viser middelværdier for tau-intervaller. Den fuldt optrukne linje repræsenterer tau-indeksmodellen.

Dataanalyse:

Effekten af klimaforandringer for hovedudbredelsesdybden blev undersøgt ved at beregne hovedudbredelsesdybden for baseline (år 2012-2016) og klimascenarie (år 1900) i 13 udvalgte områder (figur 2.5). Hovedudbredelsesdybden er defineret som den dybde, der definerer grænsen for 10% dækning af ålegræs. I GIS-modellen svarer dette til dybden, hvor der er beregnet 10% sandsynlighed for ålegræs. Dybden for hovedudbredelsen blev beregnet på midtpunktet af segmenter med 100 meters længde. De 13 områder blev udvalgt, så de repræsenterer områder med både lav og dyb dybdeudbredelse af ålegræs.

Figur 2.5. Udvalgte vandområder til vurdering af ændringer i hovedudbredelsen af ålegræs. Områder blev udvalgt, så de repræsenterer områder med både lav og dyb dybdeudbredelse af ålegræs.



2.5 Ekstrapolering af scenarieresultater til alle vandområder

Beregninger af indikatorværdier for ålegræs og klorofyl i hhv. nuværende og historisk klima er udført for udvalgte vandområder. Resultaterne fra disse områder er derefter blevet ekstrapoleret til samtlige 109 vandområder. For

ålegræsindikatoren er ekstrapoleringen foretaget ved brug af regressionsanalyse på modelestimerede ålegræsdybdegrænser i et nuværende og et historisk klima. Den fremkomne regressionsmodel er derefter anvendt på de enkelte vandområders observerede ålegræsdybdegrænser til estimering af, hvordan den nuværende observerede statusværdi for ålegræsindikatoren ville have været i et historisk klima.

For klorofyl-indikatoren er ekstrapoleringen foretaget ved en GAM (Generalized Additive Model) analyse. Til analysen benyttes de vandområdespecifikke hydro-morfologiske parametre bestemt i Erichsen et al. (2019); breddegrad, længdegrad, tidevandsamplitude, overfladesalinitet, vandudveksling, ferskvandspåvirkning og gennemsnitlige vanddybde. Disse parametre blev testet for co-variation og sammenholdt med den relative forskel mellem sommerklorofyl-a referencekoncentration i henholdsvis nutidigt og historisk klima. Resultatet af GAM-analysen blev anvendt til beregning af klorofyl- reference og miljømål i samtlige vandområder i et historisk klima udfra de GAM-udvalgte hydro-morfologiske parametre.

2.6 Beregning af indsatsbehov baseret på hhv. ålegræs og klorofyl

Klimaforandringernes effekt på klorofyl og ålegræs har betydning for, hvor langt de enkelte indikatorer er fra miljømålet om mindst god økologisk status og dermed betydning for det beregnede indsatsbehov, som skal sikre målopfyldelse. Betydningen af klimaforandringer for indsatsbehov (og målbelastning) beregnes på samme måde som beskrevet i Eichsen et al., 2020, men hvor miljømål for klorofyl erstattes med klorofyl miljømål beregnet i år 1900 klima, og hvor status for ålegræssets dybdegrænse erstattes med beregninger af dybdegrænser i et år 1900 klima og omsættes til et minimumslyskrav ved bunden. Omsættelse fra dybdegrænser til lys er nødvendig, da ålegræssets dybdegrænse ikke indgår direkte i indsatsbehovsberegningerne, men er erstattet af proxy-indikatoren "lysnedtrængning" (Christensen et al., 2021). Der beregnes et indsatsbehov for hvert vandområde under antagelse af indsatser i næringsstofftilførsler fra andre lande og fra atmosfæren. Indsatsbehov for de enkelte vandområder aggregeres med indsatser til opstrøms vandområder, som beskrevet i Erichsen et al., in prep.

3 Resultater

3.1 Fysiske parametre

Vandtemperaturen var generelt lavere i det historiske klimascenarie. Resultater fra udvalgte vandområder viste, at bundtemperaturerne i det historiske klimascenarie var mellem 0,3 og 0,8 grader koldere, med tendens til størst temperaturforskel i mere lavvandede områder.

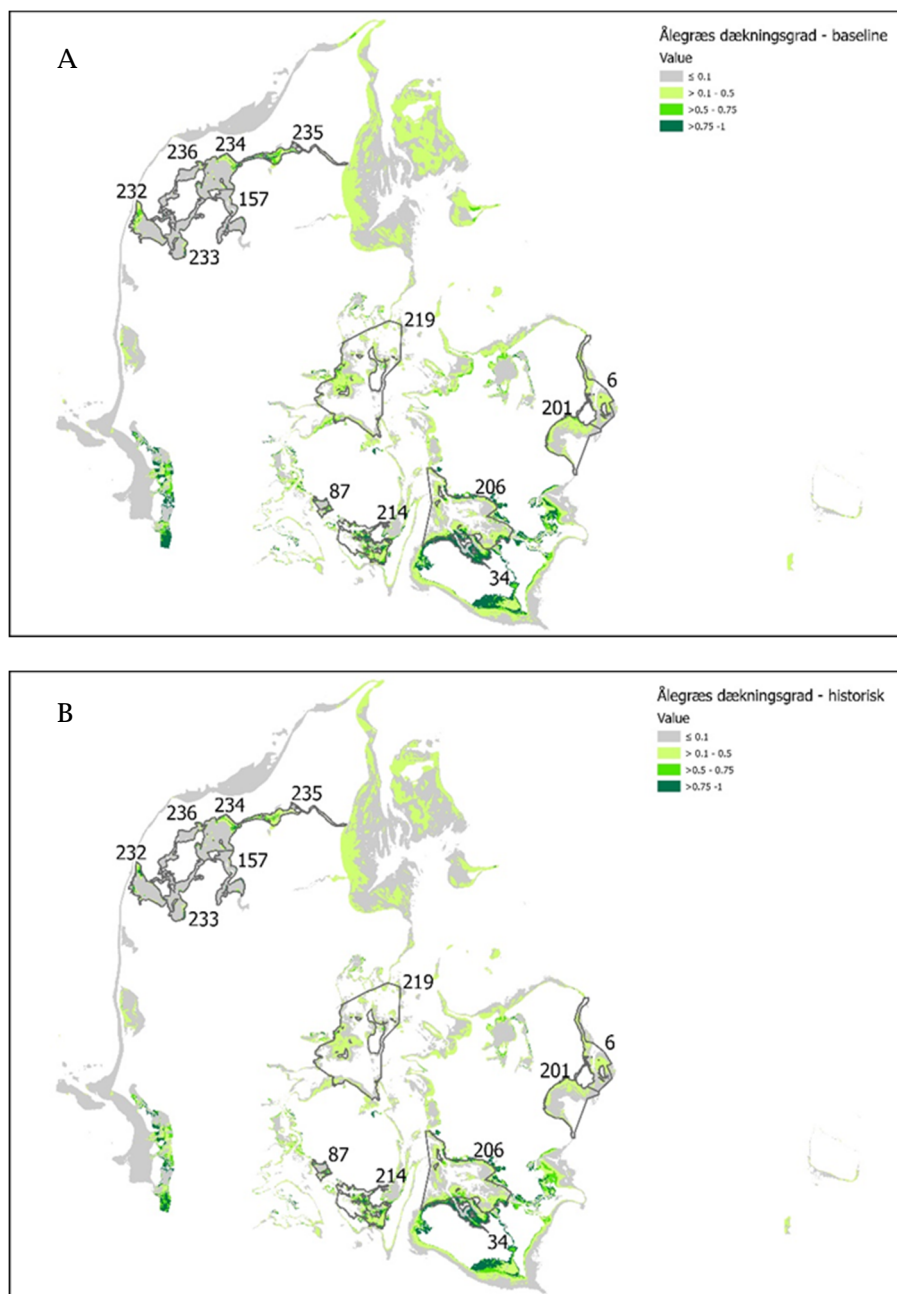
Alle de udvalgte vandområder viste en signifikant forskel i fysisk eksponering (målt ved tau) mellem det nuværende og historiske klimascenarie. Overordnet tyder resultaterne på, at tau på lavt vand er højere i det nuværende klima ift. et historisk klima, hvorimod tau på dybere vand er lavere i det nuværende klima. I hvert vandområde varierer tau med dybden. Bortset fra enkelte dybdeintervaller, især på lavt vand, viste de fleste vandområder en signifikant forskel i tau mellem baseline og klimascenarie for alle dybdeintervaller, selvom forskellene var små.

Forskellene i salinitet mellem det nuværende og historiske klimascenarie var meget små og havde ingen reel fysiologisk betydning hverken for den landsdækkende udbredelse af ålegræs eller for klorofyl, hvorfor vi ikke har fokuseret på salinitetsændringerne i den videre analyse.

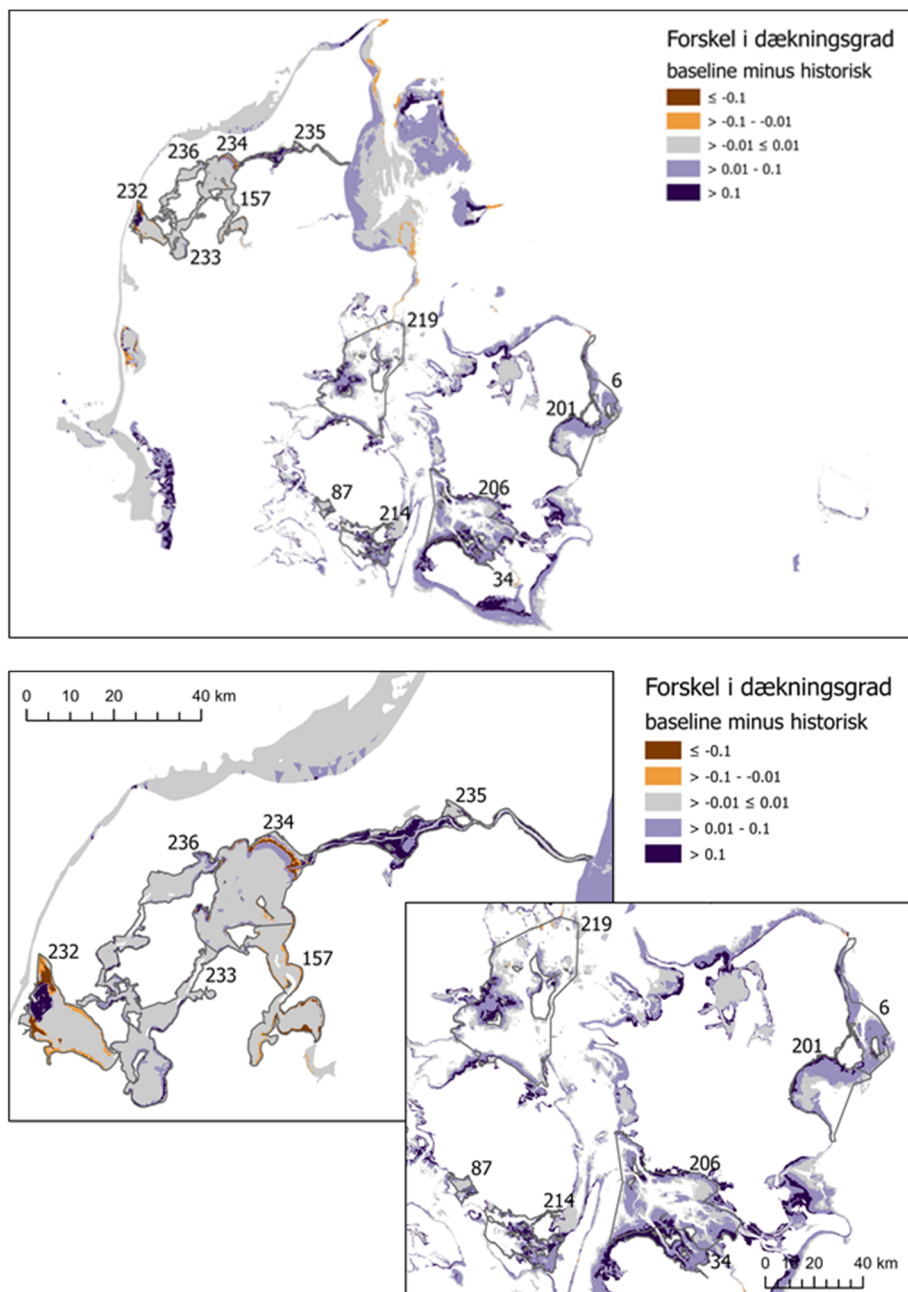
3.2 Ålegræssets dybdegrænse

Analysen af betydningen af et historisk klima omfatter kombinationen af ændringer i de høje niveauer af fysisk eksponering ved bunden (tau 95% percentil), og høje bundvandtemperaturer (95% percentil). Hovedudbredelsesdybden beregnes som den dybde, hvor GIS-modellen estimerer den dybe grænse for 10% potentiel dækning af ålegræs. Udbredelse og tæthed af ålegræs blev modelleret for både baseline (år 2012-2016) og et historisk scenarie (år 1900). Resultaterne for baseline og klimascenariet er vist i figur 3.1, og forskellen mellem baseline og et historisk klima er vist i figur 3.2. Hvis man beregner det dækkede areal som dækningsgrad * dækket areal, var det samlede areal i baseline 2881 km² sammenholdt med 2347 km² for det historiske klima. Den samlede arealreduktion var på 534 km² svarende til 18,5 % på landsplan.

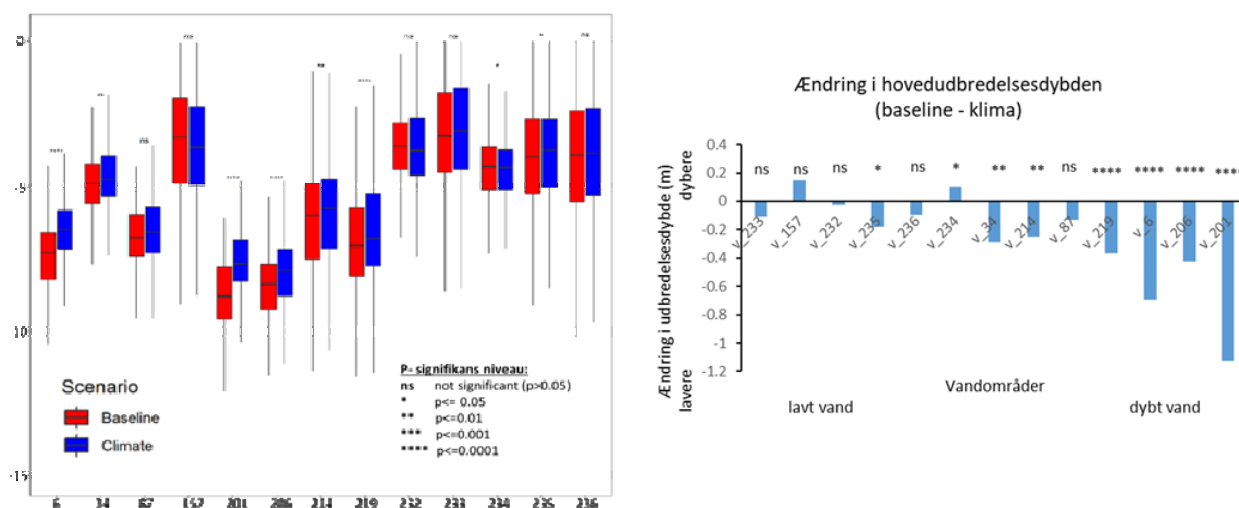
Figur 3.1. Landsdækkende kort over den potentielle dækning og udbredelse af ålegræs. A) baseline (år 2012-2016) og B) historisk klima (år 1900). Dækningsgrader over 10% dækning bliver vist i grøntoner, mindre end 10% vises som gråt. Uden for de farvelagte områder (>11 m dybde) foreligger der ikke modelleringsdata



Figur 3.2. A) Landsdækkende og B) regionale kort over forskellen i den potentielle dækning og udbredelse af ålegræs (baseline-klimascenarie). Negative tal betyder, at den historiske dækningsgrad var højere, positive tal, at den i baseline scenariet er højere.



Forskelle i hovedudbredelsen (vanddybde med 10% dækningsprocent) af ålegræs mellem baseline og klimascenariet, er kvantificeret for hvert af de 13 udvalgte vandområder. Den kombinerede effekt af ændringer i fysisk eksposering (tau) og vandtemperatur på hovedudbredelsen er vist i figur 3.3.



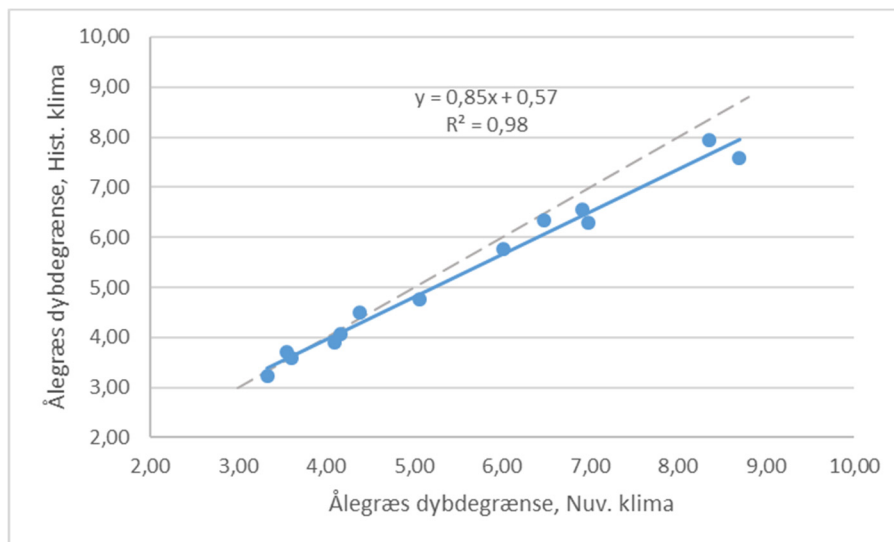
Figur 3.3. Sammenligning af hovedudbredelsesgrænsen af ålegræs i baseline (år 2012-2016) og historisk klima (år 1900) beregnet vha. en GIS-model. I det historiske klima indgår en kombineret effekt af ændret bundtemperatur og fysisk eksponering (tau). Figuren til venstre viser boks-plots med middelværdi, 5, 25, 75 og 95% percentilværdier for hvert vandområde. I figuren til højre er vandområderne sorteret med stigende dybde, og søjlerne repræsenterer den absolutte forskel i middelværdierne og de tilhørende signifikansniveauer.

Resultaterne viser, at der især på dybere vand er forskel i ålegræssets dybdeudbredelse, og at det nuværende klima betyder, at ålegræsset vokser til større dybder end i et historisk klima. På lavere vand er forskellen mellem scenarierne mindre, og her ses vandområder, hvor dybdegrænsen er mindre i det nuværende klima. Analyserne viste, at det primært er forskelle i temperatur mellem det historiske og nuværende scenarie, som forklarer de modellerede forskelle i dybdeudbredelse.

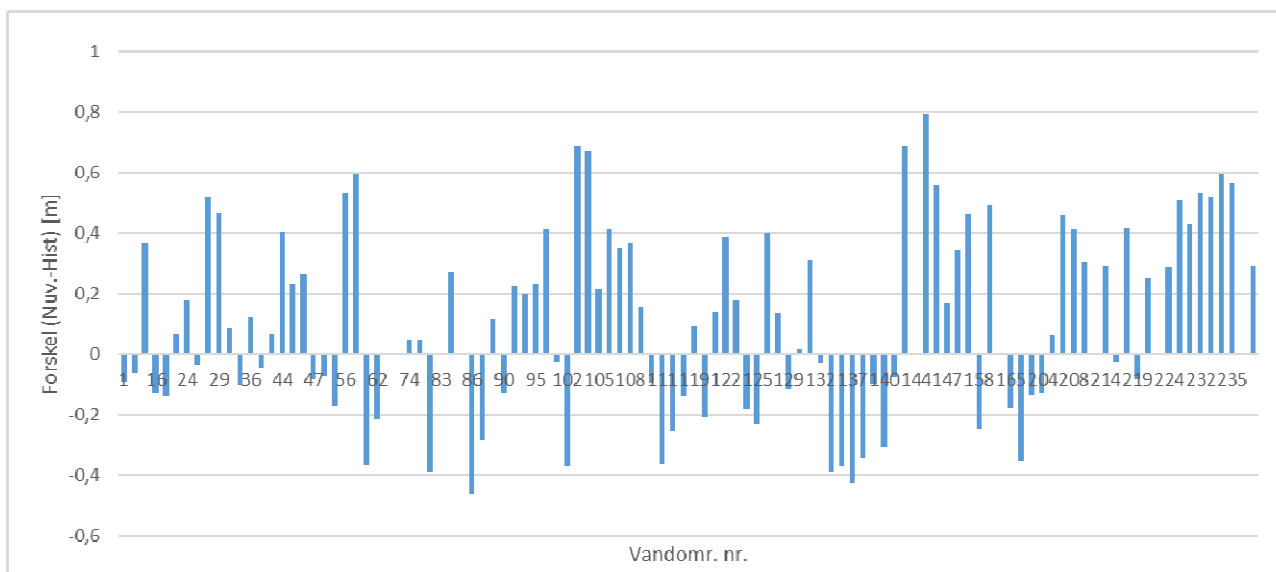
Ekstrapolering til flere vandområder

Regressionsanalysen baseret på de 13 udvalgte vandområder viste en klar sammenhæng ($p < 0,001$) mellem den nuværende ålegræsdybdegrænse og dybdegrænsen i samme vandområde, men i et historisk klima (figur 3.4). Af figuren (og relationen) ses, at forskellen i dybdegrænse bliver større, jo dybere bestanden vokser, og at dybdegrænsen for de dybe bestande er større i det nuværende klima. På lavere vand mindskes forskellen i dybdegrænser mellem scenarierne, og for dybdegrænser på lavt ($< 3,5$ m) vand vil dybdegrænsen i det historiske klima, ifølge relationen, vokse dybere end i det nuværende klima.

Figur 3.4. Sammenhæng mellem ålegræssets dybdegrænse [m] i det nuværende klima og dybdegrænsen [m] i et historisk klima bestemt ud fra udvalgte områder ekstraheret fra GIS-model. Punkter viser modelresultater fra GIS-model, og blå line er regressionslinien. Den grå linie viser 1:1 relationen.



Relationen mellem ålegræsdybdegrænser i et nuværende og historisk klima anvendes til at estimere, hvordan dybdegrænser for alle vandområder ville have været i et historisk klima. Selvom relationen er velbestemt ($R^2 = 0,98$) og dækker et relativt stort spænd i ålegræsdybdegrænser, er den fastlagt ud fra kun 13 vandområder, hvorfor ekstrapoleringen til alle vandområder er behæftet med usikkerheder, især for meget lave (< 3 m) og dybe (> 9 m) dybdegrænser. Figur 3.5 viser forskellen mellem dybdegrænser i de to scenarier.



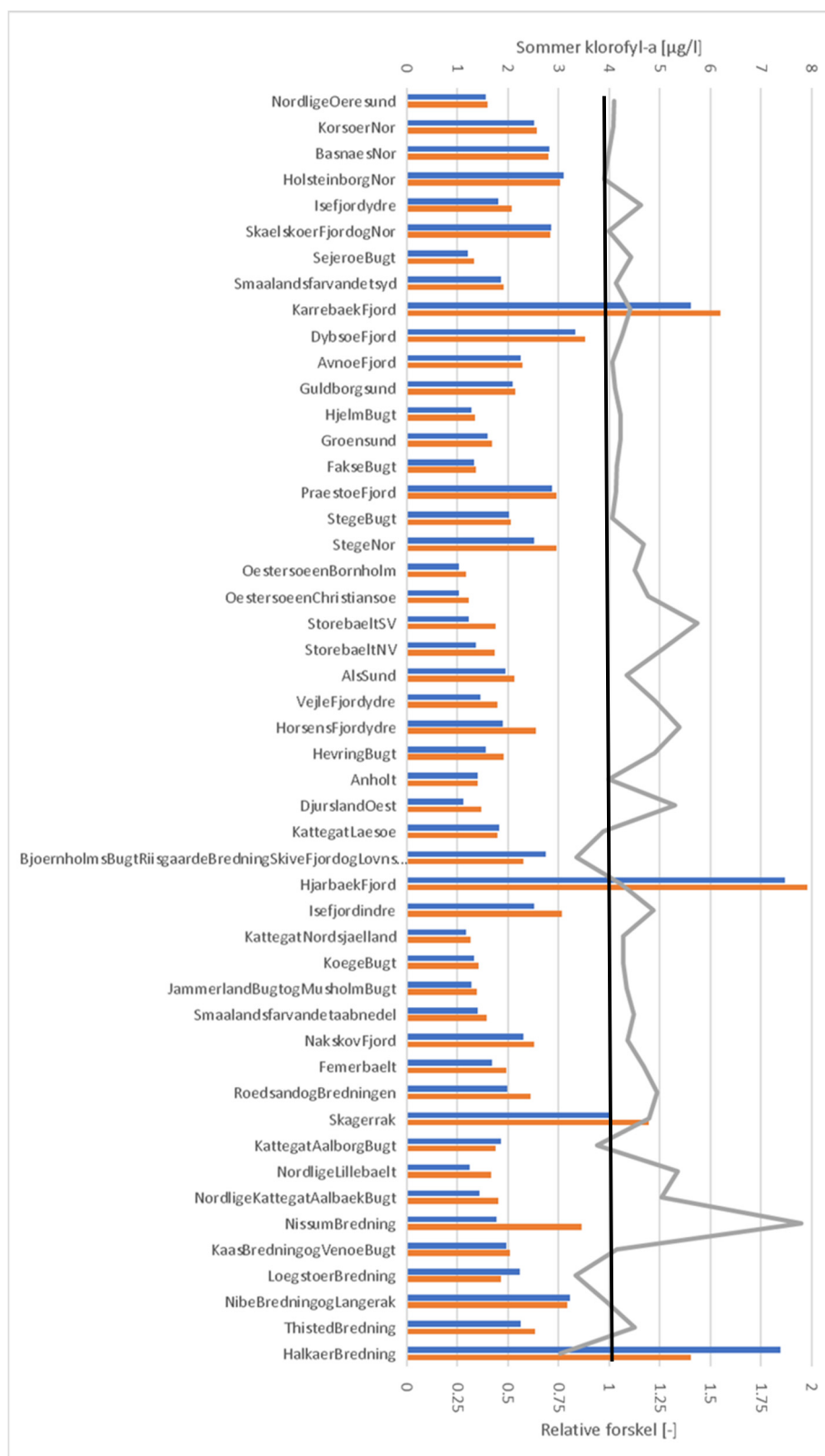
Figur 3.5. Forskel i dybdegrænser [m] i et nuværende og historisk (år 1900) klima. Positive værdier indikerer, at dybdegrænsen i det pågældende vandområde er dybere i det nuværende klima, end den ville have været i et historisk klima. Negative værdier indikerer, at dybdegrænsen er lavere i det nuværende klima end i et historisk klima. På lavt vand er dybdegrænsen generelt højere i et historisk klima, hvorimod dybdegrænsen på dybere vand generelt er højere i det nuværende klima. Vandområder med lav (< 3 m) og dyb (> 9 m) dybdegrænse er markeret, idet disse områder ikke er dækket af regressionsintervallet.

3.3 Sommer klorofyl-a koncentrationer

Baseret på resultaterne af de to scenarier (nuværende klima og historisk klima) blev sommer klorofyl-a koncentrationer fra de vandområder, der indgår i de tre mekanistiske modeller beregnet, og de modellerede forskelle omsat til en ændring i miljømål. Derefter blev den relative forskel beregnet som værende forskellen mellem et historisk klimamål og målet i et nuværende klima. Resultater fra de modellerede vandområder er vist i Figur 3.6.

For sommer klorofyl-a koncentrationerne viste resultaterne for de udvalgte områder, at koncentrationerne i gennemsnit var ca 11% højere i det historiske klima end i det nuværende klima, men med store variationer mellem vandområder (Figur 3.6).

Figur 3.6: Sommer klorofyl-a grænsen mellem GM i et nuværende klima (blå søjler) og i et historisk klima (orange søjler). Den grå linje viser den relative forskel mellem de to sommer klorofyl-a koncentrationer. Når den relative forskel er 1,0, er de to værdier altså ens.



Ekstrapolering til flere vandområder

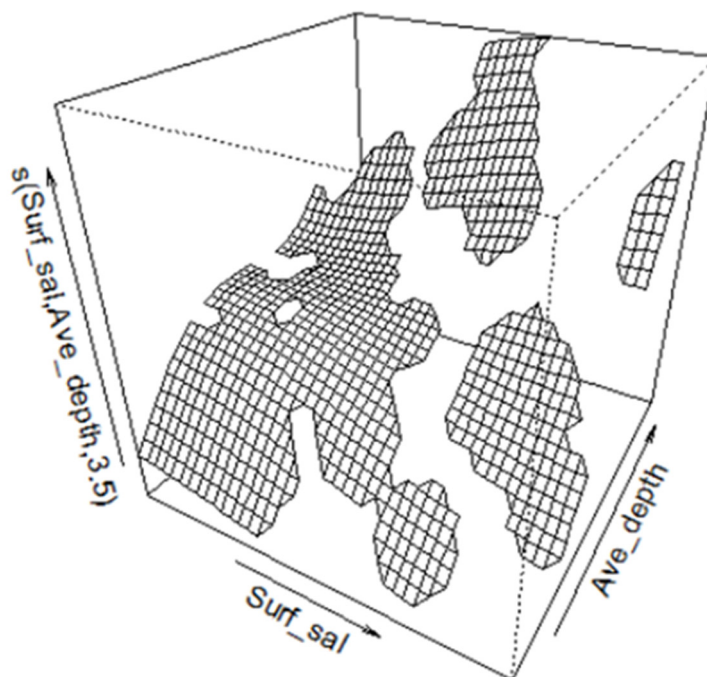
Med de tre økologiske modeller, der indgår i nærværende analyse, dækkes alle vandområder ikke. For at udrulle effekterne af et ændret klima på sommer klorofyl-a koncentrationerne fra de vandområder, der er dækket af en af de tre økologiske modeller, til hele landet, er der efterfølgende foretaget en

GAM-analyse baseret på vandområdespecifikke hydro-morfologiske forklaringsvariable (breddegrad, længdegrad, tidevandsamplitude, overfladesalinitet, vandudveksling, ferskvandspåvirkning og gennemsnitlige vanddybde) bestemt i Erichsen et al. (2019) og den relative forskel mellem sommer klorofyl-a reference koncentration i nutidigt henholdsvis historisk klima.

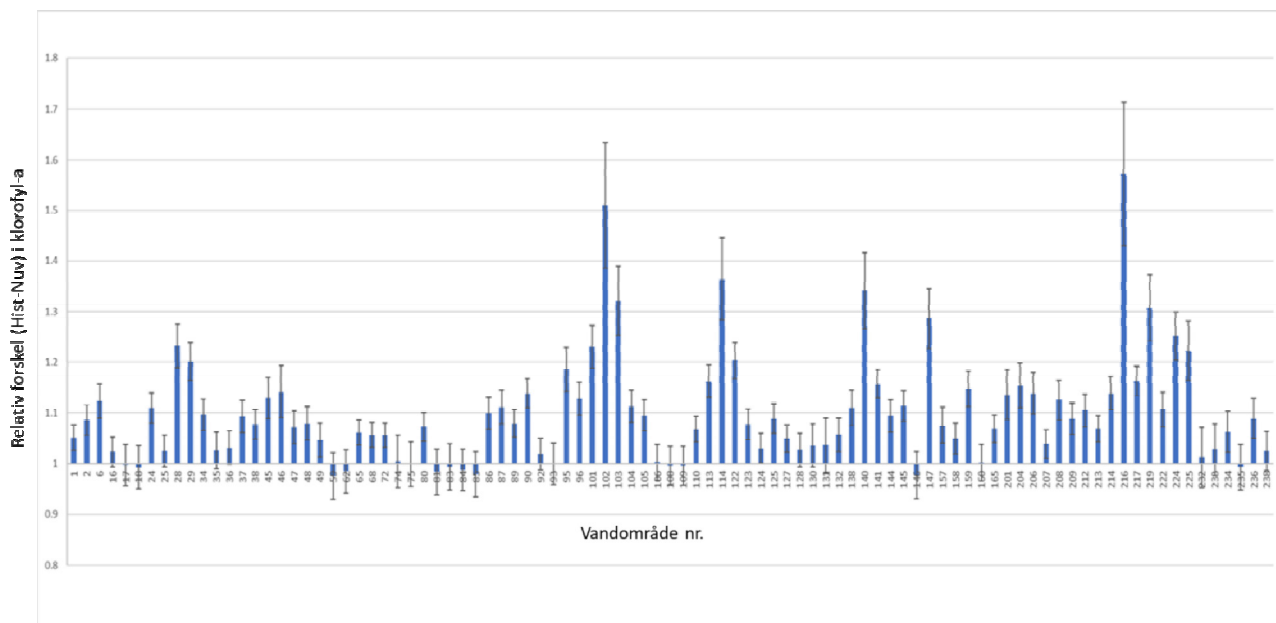
I første omgang blev parametrene undersøgt med henblik på at afdække eventuelle ko-linieritet. Der blev fundet en delvis ko-linieritet mellem breddegrad og overfaldesalinitet (Pearson $r^2 = 0.57$), men derudover var ko-linieriteten lav (Pearson $r^2 < 0.14$). For at undgå en eventuel konflikt mellem de to parametre blev breddegrad ikke inkluderet i den efterfølgende GAM-analyse.

Den første model indeholdt samtlige forklaringsparametre (undtaget breddegrad) som 'smoother'-variable ($k=5$) og blev efterfølgende reduceret i henhold til AIC (Akaike information criterion) og p-værdi. Den resulterende model viste signifikant sammenhæng mellem relative sommer klorofyl-a koncentrationer og overfaldesalinitet og gennemsnitlig vanddybde. Sammenhængen viste øget klorofyl-a med stigende salinitet og vanddybde (se figur 3.7). Efterfølgende analyse af residualerne og kovarians viste ingen signifikante mønstre (data ikke vist).

Figur 3.7. Resultater af GAM analysen, som beskriver den relative forskel i klorofyl a værdier i hhv. nuværende og historisk klima, som funktion af salinitet og vanddybde.



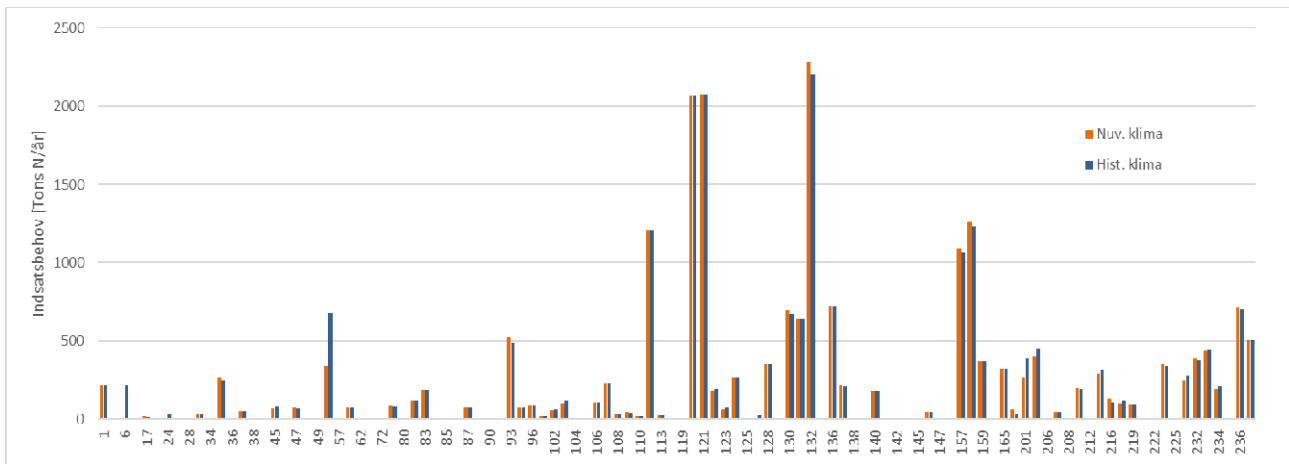
Resultater fra GAM analysen blev anvendt til beregning af den relative forskel i sommer klorofyl-a koncentrationer i samtlige vandområder i et historisk klima (figur 3.8), som derefter blev anvendt til beregning af god-moderat grænseværdien i et historisk klima, ud fra grænseværdier bestemt i det nuværende klima.



Figur 3.8. Relative forskel i sommer klorofyl-a koncentrationer i en reference situation i et historisk og nuværende klima i alle danske vandområder. Forskellen er angivet i % ift. klorofyl-a koncentrationen i det nuværende klima. Værdier > 1 indikerer at klorofyl koncentrationen er større i et historisk klima, hvorimod værdier < 1 viser områder, hvor klorofyl-a koncentrationen er lavere i et historisk klima.

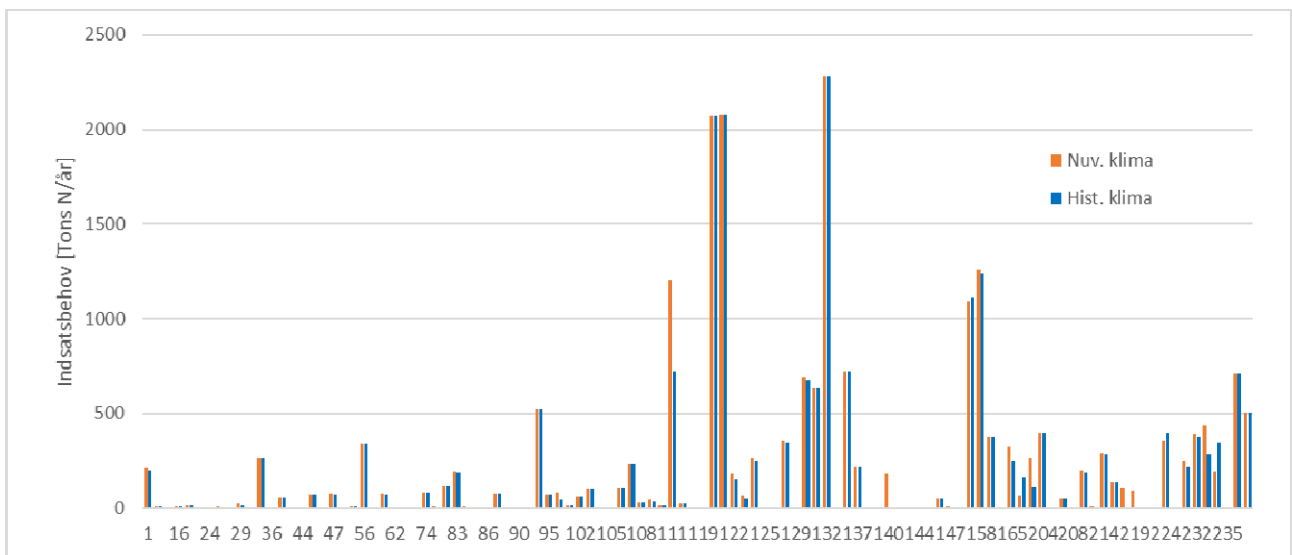
3.4 Indsatsbehov for kystvande

Ændringer i ålegræssets dybdegrænse og sommer klorofyl-a koncentrationer som følge af ændringer i klimaet kan have indvirkning på behovet for reduktion af næringsstoffer, som skal sikre, at alle vandområder opnår god økologisk tilstand i et nuværende klima. Resultaterne for ålegræssets dybdegrænse viser, at ålegræsset i mange vandområder kan gro til større dybder i et nuværende klima, hvilket alt andet lige bevirker, at vandområderne for så vidt angår ålegræs indikatoren pga klimaforandringer (primært stigende temperaturer) i dag er tættere på miljømålet sammenlignet med et historisk klima. Havde det ikke været for klimaforandringerne, ville indsatsbehovet derfor have været endnu større. Indsatsbehovet til de enkelte vandområder beregnet i et nuværende klima og når ålegræsdybdegrænsen er som i et historisk klima kan ses i figur 3.9. I mange vandområder ændres indsatsbehovet kun marginalt ($< \pm 5$ tons N/år), men i enkelte mere åbne vandområder, Øresund, Køge Bugt og Bornholm ændres indsatsbehovet meget (> 100 tons N/år), i et historisk klima ift. det nuværende klima. De klima relaterede ændringer i ålegræs dybdegrænsen betyder, at det samlede indsatsbehov for alle vandområderne er ca 600 tons N mindre i det nuværende klima ift. indsatsbehovet i et historisk klima.



Figur 3.9. Indsatsbehov til danske vandområder i det nuværende klima og i et historisk klima. I beregningerne indgår kun effekter af ændret dybdegrænse for ålegræs pga ændringer i klima. Indsatsbehovet er samlet set (nationalt) ca 600 tons N mindre i det nuværende klima ift. indsatsbehovet i et historisk klima.

For klorofyl-a indikatoren er miljømålet beregnet ud fra et nuværende klima (Timmermann et al., 2021), og resultaterne viste, at miljømålet i de fleste vandområder ville have været højere, såfremt der var anvendt et historisk klima. Alt andet lige betyder et højere klorofyl mål, at indsatsbehovet for klorofyl-a indikatoren ville have været mindre i et historisk klima. På figur 3.10. ses indsatsbehovet beregnet ud fra det nuværende klima sammenholdt med en situation, hvor miljømålet for klorofyl er fastsat ud fra et historisk klima. På nationalt plan er indsatsbehovet samlet set ca. 1500 tons N større, når miljømålet fastsættes ud fra det nuværende klima ift. indsatsbehovet i et historisk klima.



Figur 3.10. Indsatsbehov til danske vandområder i det nuv. klima og i et historisk klima. I beregningerne indgår kun effekter af ændret miljømål for sommer klorofyl-a koncentrationen pga ændringer i klima. Indsatsbehovet er samlet set (nationalt) ca. 1500 tons N større, når miljømålet fastsættes ud fra det nuværende klima ift. indsatsbehovet i et historisk klima.

4 Diskussion

Resultaterne af undersøgelsen viste, at både ålegræsindikatoren (dybdegrænsen) og klorofylindikatoren (sommer klorofyl-a) påvirkes af de klimaforandringer, som er sket siden år 1900. For ålegræs viste modelresultaterne overordnet, at nuværende dybdegrænser ville have været ca. 0,5 m lavere i et år 1900 klima. Undtaget er dog de meget lavvandede vandområder (< 3,5 m), hvor høje vandtemperaturer i det nuværende klima er mindre optimale end i et historisk klima. Resultaterne afspejler vores måde at parameterisere sammenhængen mellem ålegræstætheder og hhv. temperatur og tau. For temperatur anvender vi en indeks-model med et optimum omkring 20,5 grader °C (figur 2.3), hvilket er i overensstemmelse med resultater fra eksperimentelle studier af temperaturens betydning for den fysiologiske ydeevne hos hele ålegræsplanter (Staehr & Borum 2011) samt feltobservationer af tab i dækningsgrad ved høje temperaturer (Moore et al. 2012). På lavt vand finder vi således, at det bliver for varmt for ålegræs i det nuværende klima, hvorfor dybdegrænsen ville være dybere i et historisk klima. På dybere vand betyder et varmere nutidigt klima imidlertid, at vandtemperaturen er tættere på optimum, hvorved ålegræsset formegentlig vokser på større dybde i dag sammenholdt med et historisk klima.

Denne konklusion er interessant i forhold til tidligere studier, som indikerer, at klimaforandringer generelt forventes at påvirke dybdeudbredelse og bestandstæthed af havgræsser negativt, men at man i nogle områder kan finde øget arealudbredelse (eg. Waycott et al. 2009). Ålegræsplanter er dog naturligt forekommende fra temperaturer lavere end 0 °C under vinterisdække og op til 35 °C om sommeren i Baja California (Meling-Lopez & Lbarra-Obando, 1999). Dette kæmpe udbredelsesområde vidner om, at ålegræs har en stor temperaturtolerance samt en udtalt evne til at tilpasse stofskifte og livscyklus til forskellige temperaturforhold. Eksperimentelle studier af direkte temperatureffekter viser da også, at stofskifte, vækst og reproduktion hos ålegræs har en ganske bred temperaturtolerance med et optimum mellem 15 til 25 grader (Nejrup & Pedersen 2008) samt en meget stor tilpasningsevne til temperaturer (Staehr & Borum 2011). Ved ålegræssets sydligste udbredelse, hvor planterne vokser nær deres fysiologiske og fænologiske grænser, forventer man markante ændringer i udbredelse og tæthed af ålegræs, samt ændringer i havgræssernes artssammensætning som følge af klimaforandringerne (Short et al. 2007). I Chesapeake Bay har et studie vist, at to ugers eksponering til temperaturer, som var 4–5 °C over sommernormalen (20–25 °C), medførte en markant uddøen af ålegræs, som efterfølgende blev erstattet af almindelig havgræs (*Ruppia maritima*), som er mere temperaturtolerant (Moore et al. 2012). Eftersom temperaturen i de danske farvande ligger langt fra disse grænser, selv under fremtidige klimascenarier, vil den forventede stigning i temperaturen formodentlig have en mere moderat og muligvis positiv effekt på udbredelse, tæthed af havgræsser i danske farvande (Nordemann et al. 2015). Modelstudiet af ålegræs indikerer da også, at den hidtidige temperaturstigning generelt har gavnet udbredelsen af ålegræs i danske farvande.

Effekterne af ændringer i fysisk eksponering (tau) er beskedne, hvilket afspejler, at de største ændringer i tau sker på lavt vand, svarende til dybder, som ligger lavere end hovedudbredelsen. På hovedudbredelsesdybderne er den fysiske eksponering ikke begrænsende for ålegræsset (tau < 1, figur 2.4), hverken i et historisk eller nuværende klima.

For klorofylindikatoren viser modelresultaterne, at klorofylkoncentrationerne i de fleste vandområder er højere i et historisk klima ift. det nuværende klima, hvilket resulterer i et højere klorofylmål (og dermed lavere indsatsbehov), når der anvendes et historisk klima i fastlæggelsen af miljømålet. De højere klorofylkoncentrationer i et historisk klima passer med globale mønstre fra oceanerne, hvor fytoplanktonbiomassen har været faldende siden 1899, og dette fald kobles til stigende havtemperaturer (Boyce et al., 2010). Sammenhængen mellem stigende temperatur og faldende fytoplanktonbiomasse skyldes sandsynligvis, at zooplankton og andre græssere er mindre aktive i køligere vand og derudover generelt mere temperaturfølsomme end fytoplankton. Det betyder, at primærproduktionen ikke påvirkes af lavere vandtemperaturer, men græsningstrykket på fytoplankton vil være lavere i koldere vand, resulterende i en højere klorofylkoncentration. Tilsvarende er observeret ved tidsserieanalyser startende fra 1960 for bl.a. Nordsøen, som viser, at timingen af fytoplanktonopblomstringen (forår) ikke har ændret sig betydeligt med stigende vandtemperaturer, hvorimod fremkomsten af holo- og zooplankton har forskubbet sig op mod 1 måned (Edwards & Richardson, 2004).

Effekten af klimaforandringer for hhv. ålegræs- og klorofylindikatoren har afsmittende effekt på det indsatsbehov, der skal til for at opnå god økologisk tilstand. Man kan således forvente et forøget indsatsbehov på ca 600 ton N, såfremt statusværdien for ålegræs var målt i et år 1900 klima. Tilsvarende ville indsatsbehovet være ca 1500 tons N mindre, hvis klorofylmiljømålet var fastsat ud fra et historisk klima ift. et nuværende klima.

GIS-modellen, som er anvendt til beregning af klimaforandringernes betydning for ålegræs, er en opdateret version af modellen fra Staehr et al., 2019. Den nye landsdækkende model viste i flere områder en mere realistisk udbredelse af ålegræs. Dette var særligt tydeligt langs højeksponerede kyststrækninger. Forbedringen tilskrives nye og højt opløste (i tid og rum) datalag for hydrodynamiske parametre samt en parametrisering baseret på ekstreme værdier (høj bundtemperatur, fysisk eksponering vs lav ilt og lav salinitet) sammenlignet med sommermiddelværdier i den oprindelige model. En analyse af modelestimer på kontroldatasættet viser dog, at modellen i gennemsnit overestimerer den potentielle dækningsgrad. Det gælder især i vandområder med lave observerede dækningsgrader. Endvidere er der områder, fx i dele af Kattegat, Øresund og Køge Bugt, hvor den lavere opløsning af modelinputparametrene (pga triangulation), har ført til, at modellen i nogle områder har en mindre detaljeret og varieret beskrivelse af ålegræsudbredelsen.

Analysen af klimaets betydning for indsatsbehovet til danske vandområder er baseret på modelstudier af klimaændringernes effekt på indikatorerne: ålegræssets dybdegrænse og sommer klorofyl-a. Her har vi fokuseret på de direkte effekter af klimaforandringer (vind, lufttemperatur og nedbør) på de fysiske forhold i havet (vandtemperatur, strøm/eksponering, salinitet, lagdeling) og deres effekter på de biologiske indikatorer. Der vil dog være andre sekundære klimaforandringer (fx ændringer i pCO₂, pH, vandstand, biotiske interaktioner, biologisk adaptation), som også kan forventes at påvirke indikatorerne og dermed indsatsbehovet. Analysen er endvidere alene baseret på historiske klimaforandringer og kan kun i mindre grad anvendes til en forudsigelse af det fremtidige klimas betydning for indsatsbehovet og muligheden for at opnå god økologisk tilstand i de danske kystvande. Vores viden om de samlede klimaeffekter, både historiske og især fremtidige, er derfor stadig ganske mangelfuld.

5 Referencer

Boyce DG, Lewis MR, Worm B (2010) Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466: 591–596

Christensen JPA, Shetty, N, Andersen NR, Damgaard C. & Timmermann K (2021) Modelling light conditions in Danish coastal waters using a Bayesian modelling approach. Model documentation. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 48 pp. Scientific Report No. 422 <http://dce2.au.dk/pub/SR422.pdf>

Edwards M, Richardson AJ (2004) Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature* 430 (7002): 881-884 DOI: 10.1038/nature02808

Erichsen AC (ed), Timmermann (ed) K, Larsen TC, Markager S & Christensen JPA (2020). Application of the Danish EPA's Marine Model Complex and Development of a Method Applicable for the River Basin Management Plans 2021-2027. Conceptual Method for Estimating Maximum Allowable Inputs. DHI report

Erichsen AC (Ed.), Timmermann K (Ed.), Christensen JPA, Kaas H, Markager S, Møhlenberg F (2017). Development of models and methods to support the Danish River Basin Management Plans. Scientific documentation. Aarhus University, Department of Bioscience and DHI, 191 pp.

Erichsen AC, Møhlenberg F, Timmermann K, Christensen JPA, Göke C (2019) Gennemgang af grundlaget for afgrænsning, karakterisering og typeinddeling af kystvande i vandområdeplanerne, DHI rapport

Meling-Lopez, A.E. & Ibarra-Obando, S.E. (1999). Annual life cycles of two *Zostera marina* L. populations in the Gulf of California: contrasts in seasonality and reproductive effort. *Aquatic Botany* 65(1-4), 59-69.

Moore, K. A., Shields, E. C., Parrish, D. B., & Orth, R. J. (2012). Eelgrass survival in two contrasting systems: role of turbidity and summer water temperatures. *Marine Ecology Progress Series*, 448, 247-258.

Nejrup, L.B. & Pedersen, M.F. (2008). Effects of salinity and water temperature on the ecological performance of *Zostera marina*. *Aquatic Botany* 88(3), 239-246.

Nordemann, P.J., Hansen, J.W., Jeppesen, E., Wiberg-Larsen, P., Hansen, J.L.S., Jakobsen H.H., Stæhr, P.A., Dahl, K. (2015). Klimaforandringerne betydning for vandområder - med fokus på de biologiske kvalitetselementer. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 106 p. Videnskabelig rapport, Vol. 146.

Short, F., T. Carruthers, W. Dennison, & Waycott, M. (2007). Global seagrass distribution and diversity: a bioregional model. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 350: 3–20.

Staehr P.A., & Borum J. Seasonal acclimation in metabolism reduces light requirements of eelgrass (*Zostera marina*). (2011). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 407: 139-146

Staehr, P.A., Göke, C., Holbach, A.M., Krause-Jensen, D., Timmermann, K., Upadhyay, S. and Ørberg, S.B. (2019). Habitat model of eelgrass in Danish coastal waters: development, validation and management perspectives. *Frontiers in Marine Science*. 6(175). doi: 10.3389/fmars.2019.00175.

Timmermann, K, Christensen, J.P.A. & Erichsen, A. 2021. Establishing Chlorophyll-a reference conditions and boundary values applicable for the River Basin Management Plans 2021-2027. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 32 pp. Scientific Report No. 461 <http://dce2.au.dk/pub/SR461.pdf>

Vejen, F. 2021. Climate around year 1900. Aarhus University, DCE - Danish Centre for Environment and Energy, 42 s. – Scientific briefing no. 2021 | 52 https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Ntater_2021/N2021_52.pdf

Waycott, M., C.M. Duarte, T.J.B. Carruthers, R.J. Orth, W.C. Dennison, S. Olyarnik, A. Calladine, J.W. Fourqurean, K.L. Heck Jr., A.R. Hughes, G.A. Kendrick, W.J. Kenworthy, F.T. Short, & Williams, S.L. (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106: 12377-12381.

KLIMAÆNDRINGERNES BETYDNING FOR INDSATSBEHOV TIL KYSTVANDE

Rapporten analyserer betydningen af klimaændringer siden år 1900 for det estimerede behov for reduktion i næringsstofftilførsler, som skal sikre mindst god økologisk tilstand i kystvande. Resultaterne viser, at miljømålet for klorofyl ville have været højere i et år 1900 klima sammenlignet med det nuværende klima og indsatsbehovet ville være ca 1500 Ton N/år lavere. Endvidere viser resultaterne, at statusværdien for ålegræs indikatoren i de fleste vandområder ville være lavere i et år 1900 klima, hvilket resulterer i et indsatsbehov som er ca 600 Ton N/år højere, såfremt statusværdien var fastlagt i et år 1900 klima og ikke i det nuværende klima.