



KLIMAFORANDRINGERNES BETYDNING FOR VANDOMRÅDER – MED FOKUS PÅ DE BIOLOGISKE KVALITETSELEMENTER

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 146

2015



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

[Tom side]

KLIMAFORANDRINGERNES BETYDNING FOR VANDOMRÅDER – MED FOKUS PÅ DE BIOLOGISKE KVALITETSELEMENTER

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 146

2015

Poul Nordemann Jensen¹ (redaktør)¹

Jens Würgler Hansen²

Erik Jeppesen²

Peter Wiberg -Larsen²

Jørgen L.S. Hansen²

Hans H. Jakobsen²

Peter A. Stæhr²

Karsten Dahl²

¹ Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

² Aarhus Universitet, Institut for Bioscience



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

- Serietitel og nummer: Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 146
- Titel: Klimaforandringernes betydning for vandområder – med fokus på de biologiske kvalitetselementer
- Forfattere: Poul Nordemann Jensen¹ (redaktør), Jens Würgler Hansen² (indledning), Erik Jeppesen² (søer), Peter Wiberg-Larsen², Jørgen L.S. Hansen² (hydrografi og bundfauna), Hans H. Jakobsen² (plankton), Peter A. Stæhr² (blomsterplanter) & Karsten Dahl² (makroalger)
- Institutioner: Aarhus Universitet, ¹DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi & ²Institut for Bioscience
- Udgiver: Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL: <http://dce.au.dk>
- Udgivelsesår: Marts 2015
Redaktion afsluttet: December 2014
Faglig kommentering: Tenna Riis (vandløb), Jens Würgler Hansen (marin)
Kvalitetssikring, DCE: Susanne Boutrup
- Finansiel støtte: Naturstyrelsen
- Bedes citeret: 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>
- Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
- Sammenfatning: Rapporten giver vurderinger af, hvilken indflydelse kommende klimænderinger kan få for de biologiske forhold i vandløb, søer og de kystnære dele af havet. Rapporten fokuserer på de biologiske elementer, som indgår i målsætningerne for vandområdeplanerne, hvilket overordnet set er alger, højere planter, smådyrsfauna og fisk.
De væsentlige klimænderinger, der indgår i analyserne, er øget temperatur og øget nedbør. Der vil dog i visse af vurderingerne også indgå andre klimaelementer som f.eks. vind.
Rapporten gennemgår klimaforandringernes effekt på de økologiske kvalitetselementer (fauna, fisk, planter). Overordnet set fastslår rapporten, at de allerede indtrufne klimaforandringer påvirker de økologiske kvalitetselementer, der anvendes til vurdering af den økologiske tilstand jf. vandrammedirektivet.
- Emneord: Klimaforandringer, økologiske kvalitetselementer, vandrammedirektiv, vandområdeplaner, øget temperatur, ændret nedbør
- Layout: Grafisk Værksted, AU Silkeborg
Foto forside: Peter Lyster Ellermann
- ISBN: 978-87-7156-134-0
ISSN (elektronisk): 2244-9981
- Sideantal: 106
- Internetversion: Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som
<http://dce2.au.dk/pub/SR146.pdf>

Indhold

Resume	5
1 Indledning	8
1.1 Forvaltningsgrundlag	8
1.2 Tidsperspektiv for analysen	10
1.3 Forudsætninger for klimaanalysen	10
1.4 Klimascenarier	11
1.5 Klimaforandringer i andre landes vandplaner	13
1.6 Konsekvenser i forhold til kommende vandplaner	14
2 Vand- og stofafstrømning	17
2.1 Referencer	20
3 Vandløb	21
3.1 Introduktion	21
3.2 Klimaeffekter – hydrologiske forhold	24
3.3 Klimaeffekter - fysisk-kemiske forhold	27
3.4 Forurenende stoffer	31
3.5 Klimaeffekter – biologiske forhold	34
3.6 Referencer	40
4 Søer	45
4.1 Introduktion	45
4.2 Konklusioner og implikationer	59
4.3 Referencer	61
5 Marin	65
5.1 Introduktion	65
5.2 Hydrografi, iltforhold og vandkemi	66
5.3 Plankton	73
5.4 Makroalger (tang)	77
5.5 Blomsterplanter (havgræsser)	83
5.6 Bundfauna	92
5.7 Effekter af klimaforandringer på bundfaunasamfund i danske farvande	93
5.8 Sammenfatning: klimaeffekter og manglende viden	95
5.9 Referencer	98

[Tom side]

Resume

Denne rapport giver en række vurderinger af, hvilken indflydelse kommende klimaændringer kan få for de biologiske forhold i vandløb, søer og de kystnære dele af havet. Rapporten fokuserer på de biologiske elementer, som indgår i målsætningerne for vandområdeplanerne, hvilket overordnet set er alger, højere planter, smådyrsfauna og fisk.

De væsentlige klimaændringer, der indgår i analyserne, er øget temperatur og øget nedbør. Der vil dog i visse af vurderingerne også indgå andre klimaelementer som f.eks. vind.

Rapporten gennemgår klimaforandringernes effekt på de økologiske kvalitetselementer (fauna, fisk, planter). Overordnet set fastslår rapporten, at de allerede indtrufne klimaforandringer påvirker de økologiske kvalitetselementer, der anvendes til vurdering af den økologiske tilstand jf. vandrammedirektivet.

Nogle af klimaforandringernes effekter er rimelig velbeskrevne f.eks. betydningen af øget temperatur på iltindhold eller konsekvenser af en øget tilførsel af næringsstoffer til søer og havet, som følge af øget nedbør. Der er dog stadig væsentlige "huller" i vidensgrundlaget, som skal udfyldes, inden det er muligt mere præcist at beskrive klimaforandringernes direkte virkning på kvalitetselementerne, og hvordan disse forandringer indvirker på det samlede økosystem.

En central konsekvens af en øget nedbør vil være en øget tilførsel af bl.a. næringsstoffer til vandområderne. Stigningen vil dog variere i både tid og rum, idet de øgede tilførsler af kvælstof og fosfor vil være størst om vinteren og variere geografisk afhængig af nedbørs- og jordbundsforhold. Bl.a. som følge af disse effekter af klimaforandringerne vurderes det vanskeligere at opfylde de økologiske mål i vandrammedirektivet uden yderligere tiltag.

Vandløb

Det er vanskeligt at give et helt entydigt billede af, hvordan effekten af klimaforandringerne vil være på de forskellige biologiske kvalitetselementer, som anvendes til at beskrive vandløbenes økologiske tilstand.

Samlet set vurderes der at være risiko for, at den økologiske tilstand forværres i små (type 1) vandløb i det østlige Danmark, hvor vandløbene kun modtager relativt lidt grundvand og derfor er særlig sårbare for såvel ændringer i nedbør som temperaturforhold. I de mellemstore og store østdanske vandløb vil tilstanden til gengæld kunne såvel forbedres som forværres afhængigt af de aktuelle forhold mht. hydrologi og temperatur. Kun for det kommende danske kiselalgeindeks vurderes der at være risiko for en forringelse mere bredt i danske vandløb. Omfanget vil dog i høj grad afhænge af de specifikke nedbørsmæssige afstrømningsforhold.

Søer

Både analyser af de danske data og data indsamlet langs geografiske klimagrader peger på, at der vil ske en forværring af tilstanden i de danske søer i takt med den globale opvarmning. Dels øges næringsstofftilførslen fra oplandet til søerne og fosforfrigivelsen fra søens bund, dels bliver søerne

mere følsomme over for tilførsel af næringsstoffer, og dels sker der forandringer i fødekæden i retning af færre rovfisk, flere og mindre byttedisk med negativ virkning på zooplankton og deres græsningskapacitet. Resultatet er flere alger, som også i højere grad vil blive domineret af potentielt giftige blågrønalger som varer længere end i dag. Hyppigere og længerevarende badeforbud må derfor forventes for en række søer. Undervandsplanterne dybdegrænse må påregnes at blive reduceret.

De største miljøproblemer, som søerne står overfor i relation til de forventede klimaændringer, er:

- Øget eutrofiering med større risiko for og længere varighed af opblomstring af potentielt giftige blågrønalger.
- Øget dominans af karpefisk (måske karpe) på bekostning af rovfisk, hvilket vil have en afledt negativ effekt på vandets klarhed.
- Øget græsning på undervandsplanter som følge af større vinteroverlevelse af blishøns og svaner med risiko for skift til en uklare tilstand uden undervandsplanter.
- Øget risiko for iltvind i bundvandet sommer og efterår med øget frigivelse af næringsstoffer (eutrofiering) til følge.

I søer med undervandsplanter forlænges vækstsæsonen, hvilket kan øge mulighederne for, at søerne kan fastholdes i den klarvandede tilstand. Dog vil planternes indirekte påvirkning af vandets klarhed (skjul for dyreplankton i dagtimerne) mindskes, fordi en større dominans af karpefisk øger prædationstrykket på dyreplanktonet. Trådalger kan blive mere dominerende.

Kystområder

Næringssaltkoncentrationerne i de indre danske farvande er tæt koblet til afstrømningen fra land og dermed nedbøren. Øget nedbør vil derfor betyde mere eutrofe forhold især i de kystnære områder, der er tættest på ferskvandskilden.

Iltforholdene vil selv uden en øget primærproduktion (eutrofiering) blive forværret i et fremtidigt varmere klima. Det skyldes, at temperaturen både har en direkte fysisk indvirkning på iltens opløselighed i vand og en indirekte påvirkning via temperaturens effekt på stofomsætningen i økosystemet og dermed iltodynamikken.

Fytoplanktons artsammensætning, biomasser og udbredelse vil formodentlig blive påvirket af fremtidige klimaændringer. Desuden kan øget lagdeling sammen med højere sommertemperaturer danne basis for algeopblomstringer, der i mange tilfælde kan bestå af toksiske og på anden måde skadelige alger herunder blågrønalger fra Østersøområdet og furealger.

Makroalgevegetationen vil blive presset imod mindre produktivitet og lavere biodiversitet som følge af de forventede klimaændringer med øget vindenergi, varmere havvand, muligvis lavere saltholdighed, vandstandsstigning og øget næringssalttilførsel. Eksempler viser, at klimaforandringer vil påvirke de makroalgeindikatorer, der anvendes eller forventes at blive anvendt i de marine direktiver.

Havgræsserne, herunder ålegræs forventes at blive stresset yderligere af klimaforandringer, hvilket kan betyde, at vurderingen af miljøtilstanden i de danske farvande med baggrund i ålegræs kan forrykke sig i en overvejende negativ retning.

Bundfaunaens diversitet kan påvirkes både negativt og positivt af de forventede klimaændringer. Den samlede effekt formodes at være negativ, fordi data indikerer, at ilt er vigtigere for fordelingen af bundfaunaens diversitet end fødeudbuddet. Men disse vurderinger er usikre, da de er baseret på faunaens fordeling under det nuværende klima og ikke ud fra, hvordan faunaen vil være sammensat i et fremtidigt klima.

1 Indledning

Naturstyrelsen ønsker med dette projekt at afdække, hvorledes klimaforandringerne påvirker den økologiske tilstand i vandområderne, med henblik på at kunne forholde sig til dette i vandplanerne.

Projektets formål er med udgangspunkt i eksisterende litteratur m.m. at beskrive, hvorledes vandområdernes økologiske tilstand påvirkes af et klima i forandring.

Det officielle klimascenarie for Danmark er A1B (se tabel 1.1 og 1.2). De forventede klimaændringer i 2050 i dette scenarie fremgår af tabel 1 med en gennemsnitlig stigning i årstemperatur og årsnedbør på henholdsvis 1,2 °C og 7 %. Referencen er tidsserien 1961-1990, se kommentarer afsnit 1.2 og 1.4.

Med henvisning til EU kommissionens vejledning om tilpasning af vandplaner til et ændret klima (guidance No. 24 "River basin management in a changing climate") er følgende hovedtema identificeret:

- how climate change projections have informed assessments of Water Framework Directive pressures and impacts,
- how monitoring programs are aligned to detect climate change impacts, and
- how choices of measures are as far as possible robust to future projected climate conditions.

For at udmønte EU-Kommissionens første hovedpunkt ønsker Naturstyrelsen udarbejdet en vurdering, der beskriver klimaforandringernes effekt på de biologiske kvalitetselementer i forhold til de klimarelaterede belastninger og påvirkninger af vandområderne. Punkt 2 og 3 behandles i andet regi og indgår derfor ikke i dette projekt.

1.1 Forvaltningsgrundlag

Vandmiljøet forvaltes på grundlag af en række nationale og internationale retningslinjer, som skal forholde sig til en lang række påvirkninger herunder klimaforandringer. Klimaforandringer påvirker nemlig de hydrologiske, fysiske-kemiske og biologiske forhold i vandmiljøet. Klimaforandringer har således indflydelse på miljøtilstand, miljømål og den miljøforbedrende indsats. Nedenfor er kort redegjort for omtalen af klimaforandringer i de internationale retningslinjer angivet i habitatdirektivet, vandrammedirektivet og havstrategidirektivet samt relaterede dokumenter.

1.1.1 Direktiver

Habitatdirektivet og vandrammedirektivet

Habitatdirektivet (Anon. 1992) og vandrammedirektivet (Anon. 2000) forholder sig ikke specifikt til klimaforandringer.

Havstrategi(ramme)direktivet

I havstrategidirektivet (Anon. 2008a) er angivet:

"På grund af de marine økosystemers dynamiske natur og naturlige variabilitet og på grund af, at belastninger og påvirkninger af økosystemerne kan variere afhængigt af udviklingen i de menneskelige aktivitetsmønstre og påvirkningerne fra klimæ-

dringer, er det vigtigt at erkende, at det kan blive nødvendigt at tilpasse beskrivelsen af god miljøtilstand med tiden."

"De alvorlige miljømæssige bekymringer, herunder især dem, som er affødt af klimaændringerne, med hensyn til havområderne i Arktis, der er et nærliggende havmiljø af særlig betydning for Fællesskabet, bør underkastes en vurdering af fællesskabsinstitutionerne og kan nødvendiggøre, at der tages skridt til at sikre miljøbeskyttelsen i Arktis."

og af det supplerende kriterie-dokument (Anon. 2010) fremgår det:

"Klimaændringer har allerede følger for havmiljøet, herunder økosystemprocesser og -funktioner. Under tilrettelæggelsen af deres havstrategier skal medlemsstaterne, når det er relevant, specificere ethvert tegn på følger af klimaændringer."

Klimaforandringer er således slet ikke omtalt eller kun omtalt i meget løse vendinger i direktiverne. Det er derfor nødvendigt at orientere sig i diverse supplerende EU-skrifter såsom strategi-papirer, hvid-bøger og guidance-dokumenter (Anon. 2008b, Anon. 2009a, Anon. 2009b) for en uddybning af, hvordan medlemslandene skal forholde sig til klimaforandringer i relation til direktiverne.

1.1.2 Retningslinjer

I EU's tilpasningsstrategi i forhold til klimaforandringer er fremhævet, at det i første omgang er vigtigt bl.a. gennem overvågning at opbygge viden om effekter og konsekvenser af klimaforandringer. Den erhvervede viden skal bruges til at integrere klimatilpasninger i EU's politik med henblik på at øge økosystemernes robusthed mod klimaforandringer og optimere de politiske virkemidler under hensyntagen til de forventede ændringer i de klimatiske forhold. I de supplerende EU-skrifterne er det for de respektive direktiver beskrevet følgende:

Habitatdirektivet

For natura2000-områder er angivet, at de forventede effekter af klimaforandringer skal inddrages i planlægningen af forvaltningen af områderne.

Vandrammedirektivet

Implementeringen af vandrammedirektivet sker gennem vandplaner. Hver vandplan gælder for en seksårig periode, og de endelige miljømål skal være opfyldt senest ved udgangen af den sidste af tre vandplaner (2027). I den første vandplan (2009-2015) er klimaforandringer ikke specifikt behandlet. Naturstyrelsen har oplyst, at man i vandområdeplaner for 2015-2021, bl.a. på baggrund af ovennævnte EU-vejledning, har forholdt sig til klimaforandringernes effekt på vandmiljøet.

Havstrategidirektivet

Implementeringen af havstrategidirektivet sker gennem havstrategier. Der står ikke meget om klimaforandringerne i retningslinjerne vedrørende havstrategier ud over, at klimaforandringer skal være passende integreret, og der skal indarbejdes en tilpasning i forhold til de forventede klimaforandringer.

1.1.3 Konklusion

Som det fremgår ovenfor er det ikke angivet særlig præcist, hvordan klimaforandringer skal indarbejdes i udmøntningen af direktiverne. Især for habitatdirektivet og havstrategidirektivet er der tale om nogle meget overordne-

de og løse formuleringer. Det gælder også for vandrammedirektivet - dog fremgår det af EU-retningslinjerne, at det for 2. og 3. generations vandområdeplaner forventes, at planerne skal forholde sig til, i hvilket omfang klimaforandringer påvirker vandmiljøet.

Det overordnede formål med denne rapport er at give en opdateret oversigt over de forventede økologiske effekter som følge af klimaforandringerne i perspektiv af vandrammedirektivet. Fokus vil derfor være på, hvorledes klimaændringer påvirker vandrammedirektivets biologiske kvalitetselementer.

1.2 Tidsperspektiv for analysen

NST har ønsket, at tidsperspektivet for denne analyse skal være frem til 2050 med vurdering af evt. effekter i 2021 og 2027, som er årene for afslutningen af 2. og 3. generations vandområdeplaner.

Tilgangen til dette vil være en mere generel beskrivelse af effekterne af klimaforandringer for overfladevand, som ikke vil være knyttet til konkrete årstal. Dog kan der i forbindelse med anvendte scenarier, som er beregnet i anden sammenhæng, blive henvist til et længere tidsperspektiv. Baggrunden for denne tilgang er bl.a., at der i EU-vejledningen vedr. vandplaner og klimaforandringer (anon. 2009) anføres:

“Apart from exceptional circumstances, it is not expected that, within the timeframe of WFD implementation (i.e. up to 2027) and within the metrics used for status assessment, a climate change signal will be statistically distinguishable from the effects of other human pressures at a level requiring reclassification of sites. It is more likely that indirect pressures arising from human responses to climate change will have a greater impact (such as elevated water abstractions for irrigated agriculture, or new flood defence infrastructure).”

Det er således kommissionens forventning, at der frem til 2027 ikke er dokumenterbare effekter på kvalitetselementerne, som alene kan relateres til klimaændringer.

DCE deler til dels denne vurdering. Det er vigtigt i den sammenhæng at fremhæve, at de biologiske kvalitetselementer ikke nødvendigvis reagerer her og nu på klimaforandringerne, men at der for nogle indices må forventes en længere responstid på effekterne. Desuden bør det anføres, at der også i tiden frem til 2027 må forventes at være en påvirkning af kvalitetselementerne fra klimaforandringerne (stigende temperatur, øget nedbør m.m.), selvom effekten af klimaforandringer fra nu og frem til 2027 med de gængse målemetoder i NOVANA – og ikke mindst ud fra en statistisk tilgang - formentlig først kan dokumenteres med sikkerhed på et senere tidspunkt.

1.3 Forudsætninger for klimaanalysen

Projektets formål er med udgangspunkt i eksisterende litteratur m.m. at beskrive, hvorledes vandområdernes økologiske tilstand påvirkes af et klima i forandring.

Rapportens vurderinger af klimaeffekternes indvirkning på de biologiske kvalitetselementer og de fysisk/kemiske elementer er primært foretaget som generelle vurderinger eller via eksempler knyttet til lidt forskellige klimascenarier (se afsnit om klimascenarier). Dette skyldes, at det klimascenarie, som hidtidigt har været det officielle danske ift. 2050 i hovedsagen er ind-

truffet for så vidt angår temperatur og nedbør. Der er derfor ikke en klimaforandring for f.eks. 2050 at holde eksisterende analyser op imod.

Der er i opgaveløsningen ikke medregnet evt. ændringer i arealanvendelse som følge af klimaændringerne – f.eks. andre afgrødetyper, længere vækstsæson (evt. to årlige afgrøder), ændringer i pesticidanvendelse eller næringsstofforhold. Endvidere er der forudsat de effekter af virkemidler m.m., som er indregnet i forskellige sammenhænge som f.eks. baseline, dvs. der er ikke taget højde for evt. ændrede effekter på virkemidlerne som følge af klimaforandringer.

Det betyder videre, at i vurderingen af evt. effekter af klimaændringer på de biologiske kvalitetselementer tager rapporten udgangspunkt i den nuværende landbrugspraksis og nuværende behandling af spildevand.

I gennem de senere år er der gennemført en række beregninger/estimer af konsekvenser af klimaændringer. Disse analyser har som regel taget udgangspunkt i et af de klimascenarier, som fremgår af tabellerne 1.1 og 1.2. Nogle af disse analyser er gengivet i denne rapport som eksempler, selvom det er et andet scenarie, der er det officielt danske (A1B).

Grundlæggende er analyserne primært baseret på ændringer i temperatur og nedbør (afstrømning), men hvor det har været relevant er andre klimarelaterede parametre (som vind eller vandstand) inddraget.

1.4 Klimascenarier

Der er internationalt opstillet og beregnet konsekvenser af flere forskellige klimascenarier – i tabellerne benævnt A1B, A2, B2 og 2C. Den danske regering har anvendt scenarie A1B som det officielle danske klimascenarie med en tidshorisont frem til 2050. I tabel 1.1 og 1.2 er vist klimaeffekterne i forhold til hhv. nedbør og temperatur

Som det fremgår af tabel 1.1 og 1.2 er den forventede gennemsnitlige ændring i klimaet frem til 2050 hhv. en stigning i nedbør på årsbasis på 7 % med en årsvariation fra 4 % om foråret og sommeren til 11 % om vinteren og en stigning i temperatur på årsbasis 1,2 °C med en årsvariation på en stigning på hhv. 0,9 °C om sommeren og 1,5 °C om vinteren.

Det officielle klimascenarie i Danmark (A1B, jf. tabel 1.1 og 1.2) har klimanormalen for perioden 1961-90 som udgangspunkt. Såfremt man sammenligner de forventede klimaændringer i 2050 i A1B-scenariet (tabel 1.1 og 1.2) med de faktiske ændringer i perioden 2001-10 – hvor referenceperioden også er 1961-90 - ses, at den forventede ændring for klimaparametrene i 2050 stort set allerede er indtruffet, idet nedbøren er steget 7 % og temperaturen med 1,1 °C. Analyserne i denne rapport har derfor primært fokus på generelle virkninger af klimaforandringerne på både biologiske og fysisk/kemisk parametre fremfor en relation til et specifikt klimascenarie.

Tabel 1.1. Nedbørsændringerne er angivet som procentvise ændringer i forhold til referenceperioden 1961-1990. Fremskrivningen 2050 dækker over gennemsnittet for perioden 2021-2050, og tilsvarende dækker 2100 over gennemsnittet for perioden 2071-2100. Tallene for 2050 er for A1B-scenariet, mens tallene for 2100 er angivet for hvert af de fire scenarier A1B, A2, B2 og 2C. Tallene i parentes angiver usikkerheden (standardafvigelsen) på ensemble-middelværdien i procentpoint som fremkommer ved en gennemsnitsberegning for ensemblet af 14 klimamodelkørsler for 2050 og 8 klimamodelkørsler for 2100 (Taskforce 2011).

Årstid	2050	2100	A2	B2	2C
	A1B	A1B			
	Nedbør	Nedbør	Nedbør	Nedbør	Nedbør
Årsmiddel	+ 7 % (± 3 %)	+ 14 % (± 6 %)	+ 15 % (± 7 %)	+ 11 % (± 6 %)	+ 9 % (± 4 %)
Forår	+ 4 % (± 3 %)	+ 14 % (± 6 %)	+ 16 % (± 7 %)	+ 12 % (± 5 %)	+ 9 % (± 4 %)
Sommer	+ 4 % (± 4 %)	+ 5 % (± 8 %)	+ 5 % (± 9 %)	+ 3 % (± 7 %)	+ 2 % (± 5 %)
Efterår	+ 7 % (± 3 %)	+ 9 % (± 5 %)	+ 10 % (± 6 %)	+ 8 % (± 5 %)	+ 7 % (± 4 %)
Vinter	+ 11 % (± 3 %)	+ 25 % (± 6 %)	+ 27 % (± 7 %)	+ 21 % (± 5 %)	+ 17 % (± 4 %)

Tabel 1.2. Temperaturangivelsen er ændringer i grader Celsius i forhold til referenceperioden 1961-1990. Fremskrivningen 2050 dækker over gennemsnittet for perioden 2021-2050, og tilsvarende dækker 2100 over gennemsnittet for perioden 2071-2100. Tallene for 2050 er for A1B-scenariet, mens tallene for 2100 er angivet for hvert af de fire scenarier A1B, A2, B2 og 2C. Tallene i parentes angiver usikkerheden (standardafvigelsen) på ensemble-middelværdien, som fremkommer ved en gennemsnitsberegning for ensemblet af 14 klimamodelkørsler for 2050 og 8 klimamodelkørsler for 2100 (Taskforce 2011).

Årstid	2050	2100	A2	B2	2C
	A1B	A1B			
	Temperatur	Temperatur	Temperatur	Temperatur	Temperatur
Årsmiddel	1,2 °C (± 0,2 °C)	2,9 °C (± 0,3 °C)	3,2 °C (± 0,3 °C)	2,5 °C (± 0,2 °C)	1,9 °C (± 0,2 °C)
Forår	1,1 °C (± 0,2 °C)	2,7 °C (± 0,3 °C)	2,9 °C (± 0,3 °C)	2,3 °C (± 0,3 °C)	1,8 °C (± 0,2 °C)
Sommer	0,9 °C (± 0,1 °C)	2,2 °C (± 0,2 °C)	2,6 °C (± 0,2 °C)	2,0 °C (± 0,2 °C)	1,5 °C (± 0,1 °C)
Efterår	1,4 °C (± 0,1 °C)	3,1 °C (± 0,3 °C)	3,4 °C (± 0,3 °C)	2,7 °C (± 0,2 °C)	2,1 °C (± 0,2 °C)
Vinter	1,5 °C (± 0,2 °C)	3,5 °C (± 0,3 °C)	3,8 °C (± 0,3 °C)	3,0 °C (± 0,3 °C)	2,3 °C (± 0,2 °C)

Tabel 1.3. Landstal Danmark 2013. Tal i parentes er normaler for perioderne 1961-1990/2001-2010 (DMI <http://www.dmi.dk/vejr/arkiver/maanedsaesonaar/vejret-i-danmark-aaret-2013/>)

Måned	Gennemsnit °C	maks. °C	min. °C	Nedbør mm	Soltimer
Januar	0,1 (0,0/1,5)	9,9	-17,6	57 (57/66)	49 (43/47)
Februar	-0,4 (0,0/1,2)	8,9	-11,5	22 (38/50)	51 (69/71)
Marts	-0,8 (2,1/3,0)	12,9	-15,0	9 (46/43)	190 (110/146)
April	5,5 (5,7/7,5)	20,4	-8,4	25 (41/37)	212 (162/198)
Maj	12,1 (10,8/11,4)	27,9	-4,5	68 (48/53)	222 (209/235)
Juni	14,0 (14,3/14,6)	27,9	2,4	68 (55/68)	213 (209/239)
Juli	17,3 (15,6/17,4)	31,6	4,5	19 (66/77)	295 (196/232)
August	17,0 (15,7/17,2)	33,3	5,1	49 (67/91)	207 (186/196)
September	13,1 (12,7/13,8)	26,0	-0,2	92 (73/62)	136 (128/162)
Oktober	10,9 (9,1/9,4)	19,4	-1,6	102 (76/83)	94 (87/111)
November	5,8 (4,7/5,7)	13,6	-7,8	69 (79/75)	67 (54/58)
December	5,3 (1,6/2,2)	11,6	-6,4	90 (66/61)	40 (43/45)
Året	8,4 (7,7/8,8)	33,3	-17,6	669 (712/765)	1.773 (1.495/1.739)

Lufttemperaturen i Danmark er steget med cirka 1,5 °C i løbet af de sidste 130 år, og godt 1 °C gennem de sidste ca. 40 år (tabel 1.3). Lufttemperaturen er imidlertid ikke den eneste faktor, der påvirker vandtemperatur og andre fysiske forhold i vandmiljøet. Vindforhold, vindstyrke, soltimer, nedbør og andre klimatiske faktorer har også en indflydelse på de fysiske-kemiske forhold i vandet. Trykforskellen (NAO-indekset) mellem Azorerne og Island er en af de væsentligste styrende mekanismer for klimaet på den nordlige he-

misfære. NAO har stor indflydelse på vindens retning og styrke i den nordatlantiske region og dermed også på Golfstrømmen, som igen har betydning for klimaet i Danmark. NAO er altså et klimafænomen, der på integreret vis påvirker både temperatur og vind over blandt andet Danmark.

1.5 Klimaforandringer i andre landes vandplaner

Det har kun været muligt at se på andre landes behandling af klimaforandringer i deres 1. generation vandplaner, dvs. for de fleste landes vedkommende som situationen og vidensgrundlaget så ud i ca. 2007-2008. I de lande vi kan sammenligne os med er næste generation vandplaner pt. under udarbejdelse lige som i Danmark.

Ifølge EU-kommissionen er klimaforandringerne allerede for alvor sat ind i store dele af unionen og må forventes at tiltage i styrke (European Commission 2012a). EU-direktivet inkluderer imidlertid ikke eksplicit klimaforandringer (jf. afsnit 1.1), men medlemsstaterne er enige om at indarbejde effekten af klimaforandringer i 2. og 3. generations vandplanerne (dvs. fra og med 2015). Det skyldes, at klimaeffekterne har indflydelse på stort set samtlige dele af vandplanlægningsprocessen. Det gælder således for vurdering af direkte og indirekte klimapåvirkninger, herunder tilpasning af overvågningsprogrammer, samt hvordan klimapåvirkningerne økonomisk indvirker på gennemførelsen af direktivet.

Enkelte lande har allerede i første generation vandplaner angivet, hvordan de vil inkludere klimaforandringerne i næste generation af vandplaner. De elementer, der nævnes, er f.eks. at anvende tilpasningsvirkemidler, bedre overvågning og øget forskning i forhold til klimaforandringernes indvirkning.

Selvom det således ikke har været forudsat, at klimapåvirkninger skulle inddrages i 1. generations vandplaner, har det alligevel været tilfældet i flertallet af lande og vandplaner. De mest omfattende og konsistente vurderinger er foretaget i Slovenien, Finland, Irland, Sverige, Tyskland og U.K. I forhold til Danmark er erfaringerne fra nabolandene Sverige, Tyskland og U.K. af størst interesse. Imidlertid har landene primært fokuseret på emner som vandmangel og tørke samt risiko for oversvømmelser. Der har været langt mindre opmærksomhed om effekten af klimaforandringer på de biologiske/økologiske forhold i vandområderne, herunder specifikt påvirkningen af de biologiske kvalitetselementer.

Sverige forventer således, som følge af vådere vintre, mere tørre somre, mere intense regnhændelser og større oversvømmelser, negative påvirkninger af vandkvaliteten i form af patogener, næringsstoffer og humusstoffer (European Commission 2012b). Desuden forventes tilbagegang for fjeldørred og andre koldtvals-tilpassede fisk og makroinvertebrater, invasion af varmvandsarter og større forbrug af pesticider.

Tyskland vurderer, at klimaændringerne allerede har manifesteret sig i alle vanddistrikter (undtagen Elben) i form af ændrede nedbørs- og temperaturforhold, hvilket har indflydelse på vandkvalitet og akvatisk biodiversitet (European Commission 2012c). Eftersom der vurderes at være usikkerhed om de reelle klimaændringer, er der planlagt en revision af vurderingen af klimapåvirkningen i den 2. planperiode.

I U.K. vurderes det, at der i visse områder vil optræde varmere, mere tørre somre samt varmere, mere våde vintre (European Commission 2012d). Det forventes at øge effekten af en række menneskeskabte påvirkninger. Men der gives ingen konkrete vurderinger af, hvordan vandområdernes økologiske status forventes at blive påvirket. Ligeledes er det ikke beskrevet, hvordan klimapåvirkningerne vil blive indarbejdet i kommende vandplaner.

Der er således ikke substantielle erfaringer at hente fra de øvrige EU-lande i forhold til en vurdering af klimaændringernes betydning for såvel den nuværende som fremtidige økologiske status for vandløb, søer eller kystvande.

1.6 Konsekvenser i forhold til kommende vandplaner

Ifølge projektbeskrivelsen er et af formålene med denne rapport at pege på de problemstillinger, der fremtidigt bør adresseres i forhold til klima og vandplaner.

De klimaforandringer, der primært er beskrevet i denne rapport, er øget temperatur og øget nedbør. Den grundlæggende indsats for at imødegå disse forandringer (dvs. sikre at temperatur og nedbør ikke eller kun i mindre grad øges) ligger i de internationale aftaler om reduktion i udledningen af klimagasser (GHG) og kan som sådan ikke adresseres i vandplanerne.

En af de væsentlige problemstillinger i kommende vandplaner vil være så præcist som muligt at beskrive, hvilken effekt klimaforandringer vil have på de biologiske kvalitetselementer. Denne rapport giver et mere generelt indspil til dette, men uden at relatere til et konkret klimascenarie eller årstal. Der er stadig væsentlige "huller" i vidensgrundlaget, som skal udfyldes, inden det er muligt mere præcist at beskrive klimaforandringernes direkte virkning på kvalitetselementerne, og hvordan disse forandringer indvirker på det samlede økosystem.

En anden væsentlig problemstilling vil være, hvordan effekterne på de biologiske kvalitetselementer af klimaforandringerne bedst muligt afbødes. I rapporten gives i det følgende nogle eksempler på afbødende foranstaltninger, men det er ikke muligt at give en fyldestgørende oversigt over mulighederne/udfordringerne i denne sammenhæng. Dels fordi der mangler tilstrækkelig viden på området, dels fordi det ikke er opgaven.

Det forventes, at nogle af de modeller, der er under udvikling til brug i vandplanlægningen, også vil kunne anvendes til nærmere estimer af nogle af klimaforandringernes effekter såsom øget næringsstofftilførsel og mindre iltindhold.

1.6.1 Øget temperatur

Der vil være muligheder for delvist at kompensere for en stigende temperatur, især i vandløbene. Det er i det europæiske Projekt REFRESH (policy brief- se www.Refresh.ucl.ac.uk), vist, at beskygning af vandløb kan reducere vandtemperaturen og dermed afbøde nogle af de effekter, som en stigende temperatur kan have. Træplantning langs vandløb har derudover en række andre positive effekter såsom øget fødegrundlag samt stabilisering af brinker og dermed mindre fosfortilførsel.

En øget temperatur betyder helt generelt lavere iltindhold og hurtigere omsætning af organisk materiale, dvs. et hurtigere iltforbrug. For at modvirke denne udvikling vil det være nødvendigt at reducere mængden af organisk

materiale, for at mindske iltforbruget til dets nedbrydning. En større tilførsel af ilt ved øget vindopblanding af vandsøjlen som følge af en forventet hyppigere forekomst af kraftige vinde er formentlig kun af betydning i mere åbne vandområder som f.eks. Limfjorden. I såvel søer som i fjorde og kystvande er primærproduktionen den væsentligste kilde til organisk stof, og den væsentligste faktor til begrænsning af primærproduktionen er tilførslen af næringsstoffer og lystilgængeligheden.

1.6.2 Øget nedbør

Øget nedbør kan i sig selv have indflydelse (både positiv og negativ) på især vandløbene, som beskrevet i afsnit 2, men også i søerne i form af ændringer i vandets opholdstid. Ekstremer i vandmængden (både meget lave vandføringer og meget høje) kan i højere grad end en generel øget vandføring have en ensidig negativ indvirkning på de biologiske kvalitetselementer i vandløbene. En måde til at imødegå øget nedbør i kommende vandplaner kan derfor være at sikre en bedre vandbalance i visse områder af landet og/eller oplandet til f.eks. mindre vandløb, så en øget nedbør i højere grad opmagasineres i oplandet og dermed mindsker risikoen for ekstremt høje vandføringer. En sådan opmagasinerings vil også kunne sikre en tidsmæssig mere jævn afstrømning til vandløbene med mulighed for en øget vandtilførsel i mere nedbørsfattige perioder. Der vil også være andre positive effekter i forbindelse med de derved etablerede vand-/vådområder.

En central konsekvens af en øget nedbør vil være en øget tilførsel af bl.a. næringsstoffer til vandområderne. Stigningen vil dog variere i både tid og rum, idet de øgede tilførsler af kvælstof og fosfor vil være størst om vinteren og variere geografisk afhængig af nedbørs- og jordbundsforhold. Bl.a. som følge af disse effekter af klimaforandringerne vurderes det vanskeligere at opfylde de økologiske mål i vandrammedirektivet uden yderligere tiltag.

1.6.3 Vidensbehov

Selvom der pågår forskning om klimaforandringernes mulige effekt både på kvalitetselementer og på økosystemniveau, mangler der mere sikker viden om klimaforandringernes indvirkning på den økologiske tilstand og på kvalitetselementerne i hhv. vandløb, søer og marine områder. Manglende viden omkring klimaforandringernes indvirkning på især de biologiske kvalitetselementer er også nævnt i mange andre landes vandplaner.

Der findes og opbygges løbende viden om klimaforandringernes effekter på de økologiske systemer, men ofte er der væsentlige usikkerheder i vurderingen af indvirkningen på de biologiske kvalitetselementer. Udfordringen i kommende vandplaner vil derfor være, hvorvidt den eksisterende viden er tilstrækkelig til at fastsætte passende indsatser..

Der er dog nogle grundlæggende sammenhænge, som må betegnes som velkendte og veldokumenterede, og som derfor kan adresseres i de kommende vandplaner. Den øgede nedbør, som alle klimascenarier forudsiger, vil medføre en øget næringsstofftilførsel til vandområderne, og effekterne af en sådan tilførsel til både søer og kystområder er således velkendte.

1.6.4 Datagrundlag

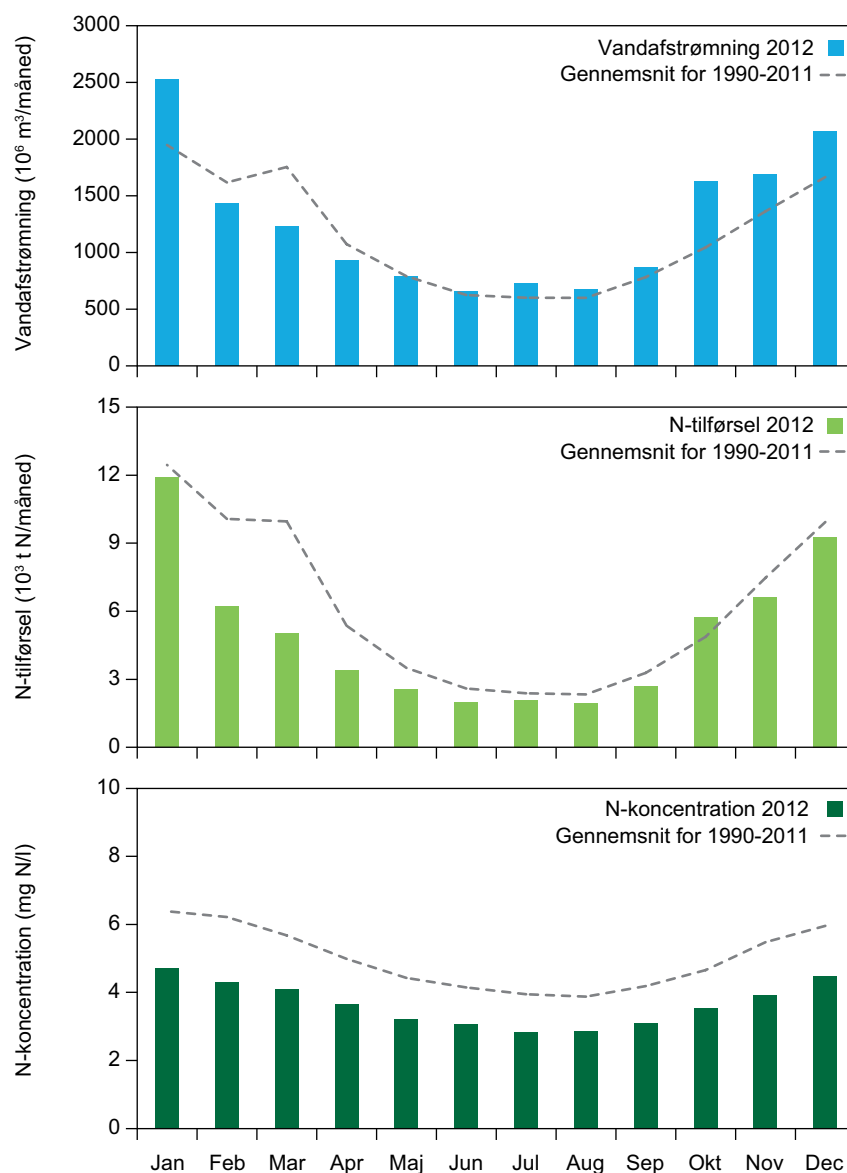
En helt central problemstilling i forhold til videnopbygning og til at kunne dokumentere klimaeffekternes økologiske betydning er tilstedeværelsen af det fornødne datagrundlag. Dette er i lighed med det manglende vidensgrundlag nævnt i flere landes vandplaner. Klimaforandringer er en proces, der forløber over en lang årrække, og hvor sammenhængende dataserier over lang tid er helt afgørende for at kunne påvise effekterne på f.eks. de økologiske kvalitetselementer. Det vurderes som minimum nødvendigt at videreføre de lange tidsserier, som indgår i det nuværende nationale overvågningsprogram NOVANA, men grundlaget vil blive mærkbart forbedret, hvis flere tidsserier kunne etableres/reetableres.

2 Vand- og stofafstrømning

Dette afsnit giver nogle generelle vurderinger af effekten af klimaforandringer på afstrømningen af såvel vand som næringsstoffer. Afsnittet er tænkt som en baggrund for de specifikke afsnit om vandløb, søer og hav, hvor en af de væsentlige påvirkninger fra klimaforandringer vil være en øget afstrømning af vand og næringsstoffer. Der indgår i enkelte af de efterfølgende afsnit også vurderinger af ændringer af vand- og næringsstof, hvor det er nødvendigt for at forklare effekterne på kvalitetselementerne nærmere.

Grundlæggende er mængden af kvælstof og fosfor, som strømmer fra land til søer, vandløb og havet, tæt knyttet til vandmængden, som igen er tæt knyttet til nedbøren. Derfor vil en øget nedbørsmængde også betyde en øget tilførsel af kvælstof og fosfor til vandområderne med mindre der gennemføres tiltag til at modvirke dette.

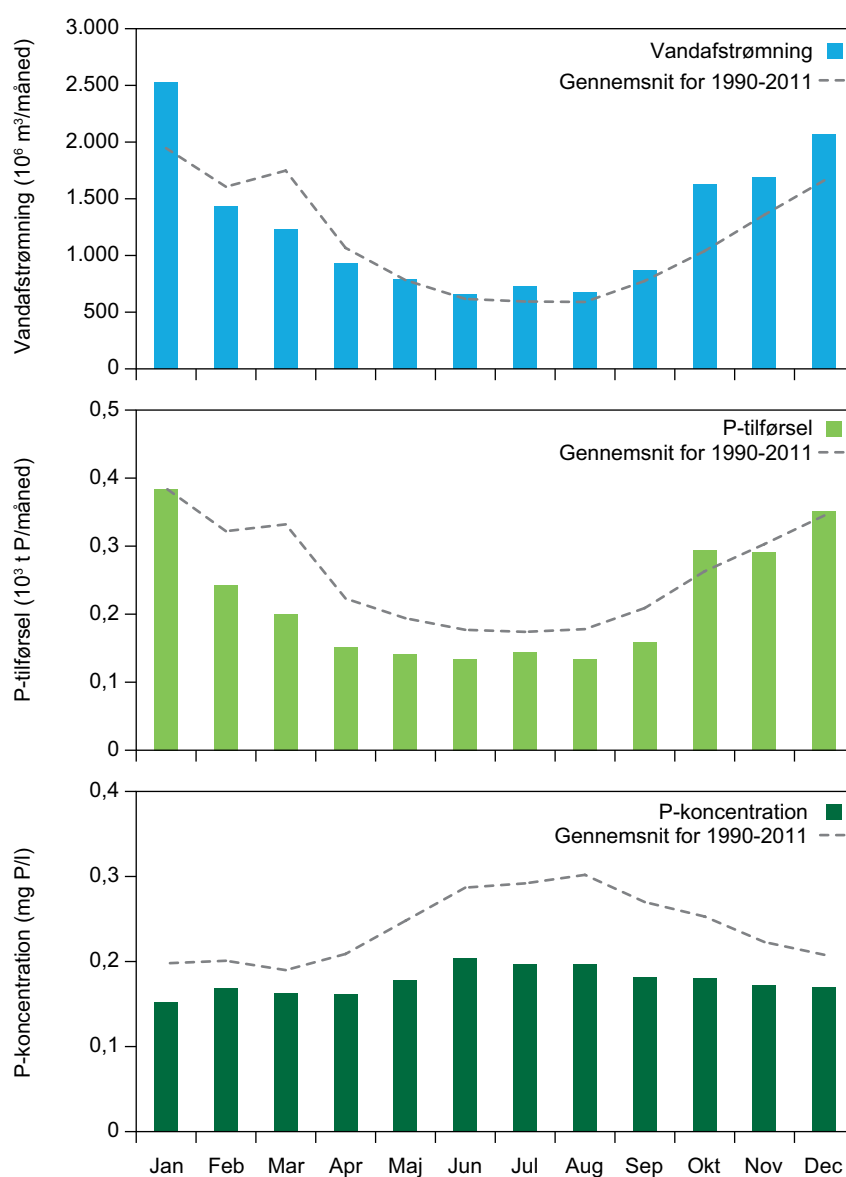
Figur 2.1. Årstidsvariation i hhv. vandafstrømning, N-tilførsel til havet og N-koncentration i afstrømningen (Wiberg-Larsen et al. , 2013). Søjler viser 2012.



Endvidere er ændringen i nedbør ikke jævnt fordelt over året, idet der, jf. tabel 1.2 i alle scenarier, vil ske den største stigning i nedbøren og dermed i afstrømningen om vinteren. Det er samtidig om vinteren, de højeste koncentrationer af kvælstof forekommer, jf. figur 2.1. Samlet betyder det, at der generelt set sker en væsentlig forøgelse af kvælstofafstrømningen om vinteren, mens afstrømningen om sommeren kun kan forventes at stige marginalt.

Mønsteret for fosfor ser lidt anderledes ud, dels fordi en del af fosfortilførslen stammer fra spildevandsudledninger, som ikke på samme måde er drevet af den aktuelle nedbør, dels fordi fosfor har andre transportveje end kvælstof. Figur 2.2 viser således, at fosforkoncentrationen er den samme hen over året 2012, dog med en lille stigning om sommeren (mindre fortynding af spildevandet). Den forøgede nedbør må derfor forventes at øge fosfortilførslen til vandområderne nogenlunde proportionalt med nedbørmønsteret over året, dvs. med den største stigning i absolut mængde i tilførslen om vinteren.

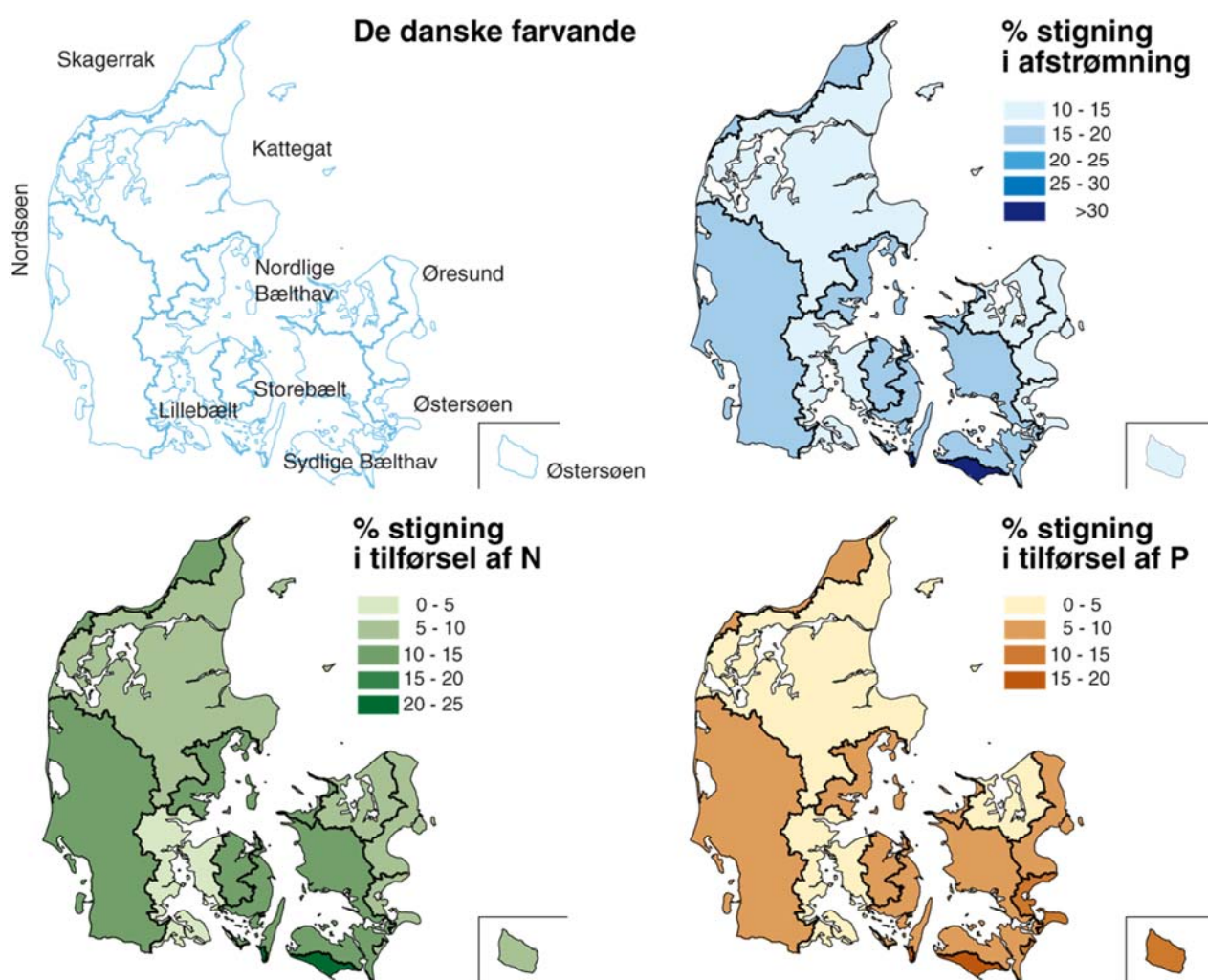
Figur 2.2. Årstidsvariation i hhv. vandafstrømning, P-tilførsel til havet og P-koncentration i afstrømningen (Wiberg- Larsen et al. 2013). Søjlerne viser 2012



Det bør dog nævnes, at en væsentlig del af den diffuse fosforafstrømning stammer fra overfladisk afstrømning fra marker m.m. En forøget frekvens og styrke af ekstreme nedbørshændelser må i sig selv forventes at give en øget tilførsel af fosfor til vandområderne.

I figur 2.3 er vist modelberegnete ændringer i vandafstrømning, kvælstof og fosfor med udgangspunkt i klimascenarie 2A (se tabel 1.1.og 1.2) og perioden 2071-2100.

Det fremgår for dette scenarie, at ændringen i vandafstrømning er forskellig hen over landet med 10-15 % større afstrømning i store dele af Jylland og nordøstlige og østlige dele af Sjælland til mere end 30 % øgning på dele af Lolland. Som tidligere nævnt er kvælstofafstrømningen nært knyttet til vandafstrømningen, hvorfor man ser den største stigning i kvælstofafstrømningen i de samme områder. For fosfor ser billedet lidt anderledes ud, idet ændringerne jf. tidligere ikke i samme grad er afhængige af afstrømningen.



Figur 2.3. Modellerede ændringer i hhv. vandafstrømning samt N og P tilførsel til havet. Sammenstillet fra Søndergaard 2006.

Der kan dog også være klimaeffekter på næringsstofniveau i vandområderne, som ikke relaterer sig til en ændring i nedbør/afstrømning. Et eksempel på dette er denitrifikation (omdannelsen af nitrat til frit kvælstof) som er en af en række processer, som er temperaturafhængig. En højere vandtemperatur vil øge omsætningen af kvælstof til frit kvælstof og dermed "fjerne" noget af den tilførte kvælstof (Baltadapt, in press). I hvor høj grad, det kan opveje en øget afstrømning, er ikke vurderet her i projektet.

Omvendt kan en højere temperatur øge fosforfrigivelsen fra sedimenter (se også søafsnit og Batladapt, in press) og dermed forstærke effekten af den mertilførsel, der vil komme fra en øget afstrømning.

2.1 Referencer

Anon. 1992. Rådets direktiv 92/43/EØF af 21. maj 1992 om bevaring af naturtyper samt vilde dyr og planter. De Europæiske Fællesskabers Tidende L 206/7-50.

Anon. 2000. Europa-parlamentets og rådets direktiv 2000/60/EF af 23. oktober 2000 om fastlæggelse af en ramme for Fælleskabets vandpolitiske foranstaltninger. Den Europæiske Unions Tidende L 0060/ 1-82.

Anon. 2008. Common implementation strategy for the water framework directive. Policy paper 'Climate change and water'. 8 s.

Anon. 2009a. Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC). Guidance document No. 24. River basin management in a changing climate. Technical report 040/1-134.

Anon. 2009b. Commission of the European Communities. White paper 'Adapting to climate change: Towards a European framework for action'. 17 s.

Anon. 2010. Kommissionens afgørelse af 1. september 2010 om kriterier og metodiske standarder for god miljøtilstand i havområder. Den Europæiske Unions Tidende L 232/14-24.

Baltadapt, in press: Climate change impacts on marine biodiversity and habitats in the Baltic Sea.

Søndergaard, M. et al 2006. Vand og vejr om 100 år. Klimaforandringer og det danske vandmiljø. Forlaget Hovedland

Task Force for Klimatilpasning 2012. Kortlægning af klimaforandringer – muligheder og barrierer for handling.

Wiberg-Larsen, P., Windolf, J., Bøgestrand, J., Baattrup-Pedersen, A., Kristensen, E.A., Larsen, S.E., Thodsen, H., Ovesen, N.B., Bjerring, R., Kronvang, B. & Kjeldgaard, A. 2013. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 84 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 75.

3 Vandløb

3.1 Introduktion

3.1.1 Vandløb som økosystemer

Vandløb findes i alle egne af Danmark med en naturlig tæthed på ca. 1,5 km/km². Langt de fleste af Danmarks ca. 70 000 km vandløb er skabt ved naturlige processer, men dertil kommer et stort antal kunstigt anlagte kanaler og grøfter. Vandløbene, og de ådale som de gennemstrømmer, blev skabt under og efter den seneste istid (Pedersen m.fl. 2006). Smeltevandet eroderede dybe dale og aflejrede sand, grus og sten. I det vestlige Jylland koncentreredes smeltevandet i flere store floder, som dannede store udvaskningsflader, hvor sand, grus og sten blev aflejret (de nutidige hedesletter). Efter istiden fortsatte vandløbene med at erodere istidslandskabet og formede flodsletter og ådale (Pedersen m.fl. 2006). Landhævninger har desuden skabt områder med marine aflejringer, som vandløbene har eroderet sig ned i. Det er tilfældet i det nordvestlige og sydvestlige Jylland. Kun på Bornholm forekommer vandløb, som strømmer på rent grundfjeld, og derved afviger fra andre danske vandløb.

Set i en europæisk sammenhæng er danske vandløb små med en forholdsvis lille afstand fra udspring til udløb i havet. Karakteristisk er endvidere, at stort set alle vandløb har sit forløb i Danmark, dvs. meget få vandløb "deles" med andre lande.

Vandløbene består af et fint forgrenet netværk af mange små vandløb, der samles i færre og stadig større vandløb (Pedersen m.fl. 2006). Flere vandløb er primært født af grundvand og har relativt konstant vandføring og temperatur året rundt. De udspringer ofte ved foden af bakker og har stort fald. Selvom vandløbenes hældning generelt aftager i takt med at deres vandføring og størrelse øges, forekommer der ofte strækninger med stærkt skiftende hældning, og undertiden indskudte søer, hvor vandets opholdstid forøges betragteligt. Der er desuden betydelig forskel mellem vandløb vest og øst for israndslinjen. Mod vest er de – uanset størrelse – primært født af grundvand og har derfor ret stabil vandføring, og de har overvejende sandet bund (Kronvang m.fl. 2006). Øst for israndslinjen varierer vandføringen meget mere, fordi kun en relativt lille del af vandføringen skyldes grundvand og en større del direkte afstrømning i forbindelse med nedbørshændelser; og bunden er her meget mere stenet og gruset. Nogle mindre vandløb er helt afhængige af nedbørsmængden og udtørres regelmæssigt i løbet af sommeren. Mønstrene i afstrømning kaldes det hydrologiske regime.

Vandløb er naturligt i en dynamisk ligevægt med deres ådal og flodslette (Pedersen m.fl. 2006). Hældningen og det strømmende vand bidrager med den energi, som er nødvendig for at transportere jordpartikler, som eroderes fra vandløbets bredder og de tilstødende områder. Erosionen er størst i vandløbenes øvre dele, hvor vandløbene er små og talrige, og hvor faldet er størst. I de nedre dele af vandløbene, hvor faldet er mindre, svømmer disse naturligt over fra tid til anden og aflejrer fint sediment og organisk materiale på flodsletterne. Dette nære samspil mellem vandløb og ådal er helt afgørende for udviklingen af naturtyper som ådalenes enge, moser og temporære søer. Vandløbene vil naturligt arbejde sig gennem landskabet i slyngnin-

ger og ofte skifte forløb. Derved afsnøres dele af vandløbet fra tid til anden som "døde" åslynger, der derved bliver til småsøer, damme eller moser.

Uden menneskets indgriben ville den naturlige vegetation langs vandløbene være skov eller kratskov, dog afbrudt af lysåbne strækninger, skabt af bæveres fældning af træer, store hovdyrs græsning, naturlige brande, vandløbet egen erosion og stormfald (Svenning 2002). Træerne skygger for dele af vandløboverfladen, ligesom de leverer dødt bladmateriale og dødt ved til selve vandløbet. Både blade og dødt ved fungerer her som føde for mange smådyr og mikroorganismer, mens især store træstammer og grene desuden fungerer som strukturerende elementer, der tvinger strømmen i ny retninger og medvirker til at skabe variation (uorden). I de mindste vandløb er tilførslen af udefra kommende organisk stof dominerende i forhold til den mængde, som produceres i vandløbene selv (Petersen m.fl. 1995). Produktionen af organisk stof er pga. beskygningen begrænset til fastsiddende alger og visse mosser. Først når vandløbsbredden øges, bliver der lys nok til vækst af neddykkede planter og flydebladsplanter. Disse er i mindre grad direkte føde for vandløbets smådyr, som til gengæld spiser de alger, som gror på planterne. Smådyrene ædes af forskellige fisk, samt enkelte specialiserede fugle og pattedyr, mens fiskene er føde for visse fugle og odderen, som er økosystemets toprovdyr.

3.1.2 Menneskeskabte påvirkninger

Danske vandløb har gennemgået meget omfattende menneskeskabte ændringer i de naturlige processer og levesteder. Regulering af vandløb via rørlægninger, udretning af deres slyngede forløb, uddybning og anlæggelse af diger langs bredderne, opstemninger (fx til anlæg af mange dambrug), har, kombineret med dræning af de tilstødende områder, afgørende ændret vandløbene. Den derved opnåede effektive afvanding har således afbrudt den naturlige hydrologiske forbindelse mellem vandløbene og deres ådal. Mange århundreders skovrydning har fjernet den naturligt forekommende skov langs vandløbene, ligesom de vandløbsnære arealer i dag udnyttes til dyrkning af fx korn, hvor de før blev ekstensivt udnyttet til græsning og høslæt – ofte med engvanding for at gøde arealerne. Resultatet er, at vandløb, hvori de naturlige dynamiske processer har mulighed for at virke, er blevet sjældne (formodentlig bevaret ved under 1 % af vandløbsstrækningerne). Dertil kommer, at det via en lovbestemt vedligeholdelse – gennem oprensning af bundmateriale og grødeskæring – forhindres at de naturlige processer genoprettes. Endelig betyder indvinding af grundvand til hovedstadsregionen at mange sjællandske vandløb stort set tørlægges i sommermånederne. I andre dele af landet kan indvinding af vand til drikkevandsforsyning eller markvanding ligeledes influere på vandføringen. De mest naturlige vandløb findes på det nordlige Bornholm (på klippegrund), men derudover fortrinsvis i dele af Øst- og Vestjylland.

Ud over disse fysiske menneskeskabte påvirkninger, som aktuelt vurderes at være den vigtigste hindring for at nå opstillede miljømål, tilføres vandløbene kemiske stoffer via spildevand, afstrømning fra befæstede arealer, samt ikke mindst udvaskning fra de ca. 60 % af landet, som er opdyrket. Udledt organisk stof via spildevand fra renseanlæg, spredtliggende ejendomme og dambrug er eller har været meget betydende, resulterende i en række ændringer i vandløbenes biologiske struktur og stofomsætning (fx ved forøgede udsving i de naturlige variationer i vandets iltindhold). Disse organiske udledninger er i nyeste tid reduceret meget væsentligt (>90%), ligesom også indholdet af plantenæringsstofferne fosfor og kvælstof er reduceret betyde-

ligt (hhv. ca. 70 og 50 %). Tilførslen af organisk stof, fosfor og kvælstof øges i mange tilfælde i forbindelse med kraftige regnhændelser, hvilket medfører forøgede koncentrationer i vandløbene. Disse tilføres også en lang række miljøfremmede stoffer og tungmetaller. Blandt de miljøfremmede stoffer skal især fremhæves pesticiderne, som i vid udstrækning anvendes i landbruget. Blandt disse har især insekticider erkendte biologiske effekter i vandløbene, hvilket formodentlig også er tilfældet for visse fungicider. Stofferne vurderes primært at tilføres via afstrømning i forbindelse kraftige regnhændelser umiddelbart efter udsprøjtning. Der er ingen konkret viden om udviklingen i pesticidbelastningen af vandløbene.

3.1.3 Vandplanerne 2015-2021

Basisanalysen til vandplanerne for perioden 2015-2021 (2. generationsvandplanerne) omfatter ca. 19.000 km fordelt på ca. 6.900 vandområder (Naturstyrelsen 2014). Vandområderne er aggregeret med et tilstødende vandområde, hvis dette har samme karakterisering, typologi og målsætning. Der er i basisanalysen foretaget en vurdering af aggregeringen i forhold til de væsentligste påvirkninger. Vandområder mindre end ca. 500 meter er aggregeret med tilstødende, længere vandområder uanset karakterisering, typologi og målsætning. Undtaget herfra er dog korte, små, selvstændige tilløb til sø og hav, der i sagens natur ikke har tilstødende vandområder. Der anvendes for "normale" vandløb (som i vandplanerne 2011-2015) som udgangspunkt en typologi efter størrelse (Tabel 3.1).

Tabel 3.1. Klassifikation af danske vandløb efter type (Naturstyrelsen 2014).

	Type 1	Type 2	Type 3
Oplandsareal (km ²)	<10	10-100	>100
Bredde (m)	<2	2-10	>10
Afstand til kilde (km)	<2	2-40	>40

I basisanalysen indgår alle større vandløb (type 2-3). Desuden er medtaget mindre vandløb (type 1), som (citater fra basisanalysen) "på hovedparten af deres udstrækning opfylder miljømålet udtrykt ved DVFI og vandløb med gode faldforhold, slyngning og fysisk indeks. Mindre strækninger, der ikke lever op til ovennævnte krav, kan dog ligge indskudt mellem længere strækninger, der lever op til kravene". Andelen af hhv. mindre og større vandløb er stort set den samme.

Desuden anvendes en yderligere type 4 ("blødbundsvandløb") defineret som "mindre, naturlige vandløb, der på den overvejende del af sin længde har et naturligt ringe fald (< 0,1 - 0,5 ‰ afhængig af vandløbsstørrelsen), ringe vandhastighed og bundsubstrat, som naturligt er blødt og overvejende organisk".

Den økologiske tilstand vurderes (jf. Naturstyrelsen 2014) på baggrund af de biologiske kvalitetselementer bentiske invertebrater, fisk og planter. Større vandløb (type 2-3) vurderes ud fra de EU-interkalibrerede indices for vandløbsplanter (DVPI = Dansk vandløbsplante Indeks), bentiske (bundlevende) invertebrater (DVFI = Dansk Vandløbs Fauna Indeks), og fisk (DFFVa = Dansk Fiskeindeks For Vandløb, version a). Mindre vandløb (type 1) vurderes ud fra DVFI samt et nationalt udviklet indeks for fisk (ørred) i mindre vandløb (DFFVø). Vandløb med blød bund tilstandsvurderes ud fra DFFVa, hvor dette er muligt. På baggrund af en faglig vurdering fra Aarhus Universitet (DCE) anvendes DVFI ikke i tilstandsvurderingen af blødbundsvandløb (Naturstyrelsen 2014).

Således indgår – indtil videre – ikke fytobenthos (kiselalger) som biologisk kvalitetselement, fordi der endnu ikke er udviklet et dansk indeks..

Risikoen for at vandløbene medtaget i vandplanerne 2015-2021 ikke kan opfylde en række foreløbige miljømål i 2021 er vist i tabel 3.2.

Tabel 3.2. Risikovurdering med hensyn til økologisk tilstand for vandløb medtaget i vandplanerne 2015-2021 (Naturstyrelsen 2014)

Biologisk kvalitetselement (Indeks)	Vandløbsstrækninger (km)	IKKE i risiko for manglende målopfyldelse (km)	I risiko for manglende målopfyldelse (km)
Invertebrater: DVFI	16.300	11.300	5.000
Fisk: DFFVa/DVVFø	8.000	1.900	6.100
Planter: DVPI	2.900	1.000	1.900
Samlet	16.700	6.300	10.400
Ukendt	2.200		

Basisanalysen for 2015-2021 indeholder ingen vurdering af hvilke faktorer, som forhindrer opfyldelse af miljømålene, jf. tabel 3.2. DCE har imidlertid i tabel 3.3 forsøgt at give en semikvantitativ prioritering af vigtigheden af disse faktorer. En sådan vurdering er væsentlig forud for en beskrivelse af klimaforandringerne evt. indflydelse på de biologiske kvalitetselementer.

Tabel 3.3. Vurdering af den relative betydning af forskellige menneskeskabte påvirkninger (faktorer) for opfyldelsen af miljømålene om mindst god økologisk tilstand i vandløb medtaget i vandplanerne 2015-2021. Signaturforklaring: XXX - dominerende betydning; XX – stor betydning; X – mindre eller lokal betydning; (X) – potentiel betydning

Påvirkning	Invertebrater (DVFI)	Fisk (DFFVa/DVVFø)	Planter (DVPI)	Alle kvalitetselementer
Dårlige fysiske forhold*	XXX	XXX	X	XXX
Grødeskæring mv.*	X	XX	XX	XXX
Vandindvinding	X	X	X	X
Organisk stof (BOD ₅)	XX	X		XX
Fosfor			X	X
Okker	X	X		X
Pesticider	X	(X)	(X)	X
Andre MFS	(X)	(X)		(X)
Tungmetaller				

*Dårlige fysiske forhold omfatter dels foretagne reguleringer, hvor naturligt slyngede vandløb er blevet rette ud og uddybet, kombineret med dræning/afvanding af tilstødende arealer, eller hvor vandløb er blevet stemmet op til vandkraft, dels en fastholden af den regulerede tilstand via regelmæssigt grønnskæring og opgravning af vandløbsbunden. Grødeskæring mv. foregår imidlertid også i naturlige – ikke væsentlig regulerede – vandløb. Her medfører vedligeholdelsen tilbagevendende forstyrrelser af de biologiske samfund og kan derfor opfattes som en selvstændig påvirkning i forhold til de generelle fysiske forhold.

3.2 Klimaeffekter – hydrologiske forhold

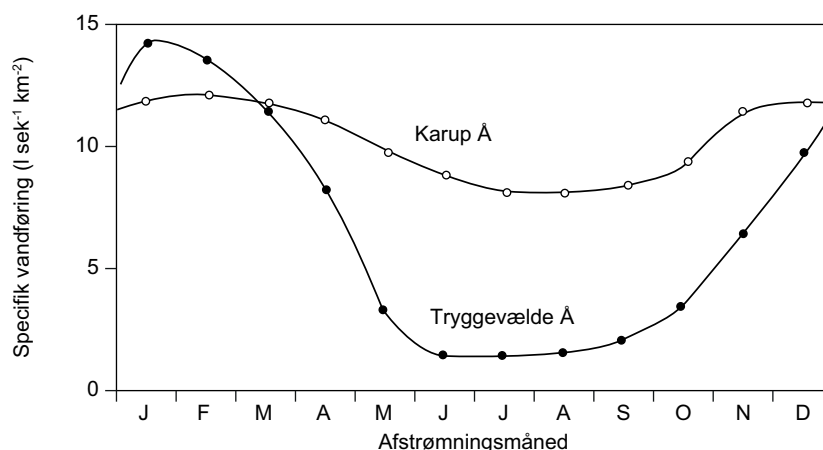
Vandløb er, som allerede nævnt, karakteriseret ved deres ensrettede transport af vand, opløste stoffer og partikler. Partikler og opløste stoffer udnyttes – afhængigt af deres art – af vandløbets organismer. Transporten af vand, dvs. vandføringen (Q) der defineres som den vandmængde som passerer et givet vandløbstværsnit (A) pr. tidsenhed ($Q = v \cdot A$, hvor v er middelvandhastigheden), varierer i både tid og rum. Generelt øges vandføringen ned gennem vandløbssystemerne, fordi der opsamles vand fra et stigende oplandsareal. Derudover varierer vandføringen som en funktion af naturgivne geologiske, topografiske og klimatiske forhold. Dette kan illustreres tydeligst ved forskellen mellem vandløb i Vestjylland og på Sjælland (figur 3.1). I de førstnævnte er vandføringen relativt ensartet, fordi den primært består af en

relativt konstant tilførsel af grundvand, som dannes i stor mængde ved ned-sivning af nedbøren gennem de sandede jorder. På Sjælland, hvor jorderne er overvejende lerede, varierer vandføringen langt mere, fordi der her primært er tale om tilstrømning af overfladevand og drænvand, og i beskedent grad grundvand, som ikke dannes ligeså let som på sandjord.

Vandhastigheden varierer betydeligt i tid og rum, både hvad angår middelhastighed og ikke mindst hastigheden inden for et givet vandløbstværsnit. Den er afhængig af faktorer som vandspejlets fald (S) og den modstand (ruhed), som vandet møder fra bund og sider, samt fra vandplanter (og dødt ved). Ruheden afhænger dels af den hydrauliske radius (R), som angiver længden af den del af vandløbstværsnittet som er i kontakt med bunden, samt af en ruhedskonstant (n) som bl.a. afhænger af modstanden fra planter. Samlet set kan middelvandhastigheden beskrives ved formlen: $v = n^{-1} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/3}$. Sammenhængen betyder, at vandhastigheden er stor i vandløb med stort fald og få planter, mens den er lille hvis faldet er ringe og vandløbet fyldt med planter. Sammenhængen viser dog også, at vandhastigheden kan være stor i selv store vandløb med lille fald, alene fordi ruheden mindskes med stigende vanddybde.

Vandhastigheden øges med stigende vandføring, fx om vinteren, fordi ruheden pga. stigende vanddybde og manglende planter mindskes. Modsat er vandhastighederne mindst om sommeren, hvor vandføringen er mindre og ruheden øget.

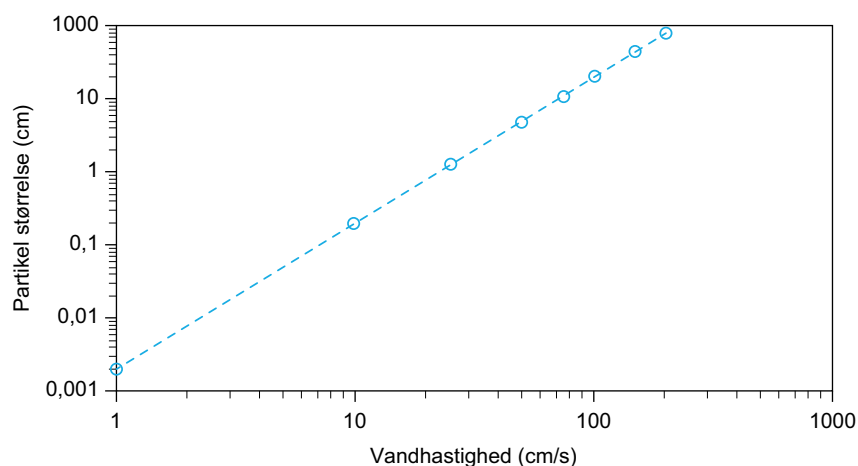
Figur 3.1. Månedlig middelvandføring i hhv. vestjyske Karup Å og sjællandske Tryggevælde Å (fra Sand-Jensen & Lindegaard 2008).



Der er en god sammenhæng mellem strøm- og substratforholdene (figur 3.2). Det skyldes, at der kræves en stigende kraft og vandhastighed til at flytte en given mineralisk partikel; under denne hastighed bliver partiklen liggende.

Vandhastigheden har i både tid og rum indflydelse på fordelingen af organismerne. Arterne har typisk tydelige præferencer for bestemte strømhastigheder, og de bundsubstrattyper, som er nært knyttet til de specifikke strømhastigheder. En række særligt strøm- og iltkrævende smådyr er knyttet til relativt høje vandhastigheder og forekommer på sten (dog ofte placeret i strømløse på disse), mens andre mindre krævende arter foretrækker steder med ringe/ingen strøm, blød bund og aflejret groft detritus (blade, kviste, grene). Ligeledes vokser flere mos-arter på sten, mens mange højere planter primært er knyttet til mere finkornet bund (fint grus, sand, silt). De nævnte krav betyder, at markante ændringer i de hydrologiske forhold, og dermed strøm/substratforholdene, vil have stor betydning for organismerne.

Figur 3.2. Vandhastigheder som er nødvendige for at flytte mineralske partikler af varierende størrelse (tegnet på baggrund af data fra Nielsen 1950).



Klimaforandringerne medfører generelt øgede nedbørsmængder på årsbasis, dels en ændret nedbørsfordeling hen over året (se f.eks.

<http://www.klimatilpasning.dk/viden-om/klima/klimaaendringeridanmark.aspx>). Der vil således falde mere nedbør vinter-forår, mens ændringerne om sommeren vil være mere beskedne. Vejret vil dog blive mere ekstremt, bl.a. med flere storme og kraftige regnskyl. Om sommeren kan der således optræde både perioder med tørke og kraftige regnskyl.

Det ændrede nedbørsmønster medfører, at både afstrømningen via vandløb (via overfladisk afstrømning og tilførsler via fx dræn) og grundvandsdannelsen generelt vil øges. Den øgede grundvandsdannelse vil også føre til en forøgelse af vandløbenes vandføring under "base-flow" situationer, hvor grundvandstilførslen er helt dominerende. Dette vil ses som en stigning i median minimum vandføringen (Henriksen et al. 2013). Stigningen vil være størst på Sjælland (stedvis > 50 %), mindre i det øvrige Danmark (typisk op til 25 %).

En generel – om end i visse områder beskedne - stigning i median minimum vandføringen betyder dog ikke, at vandløbene nødvendigvis bliver mindre udsatte for stærkt reduceret vandføring og ultimativt udtørring. Med øget ustabilitet forøges risikoen for sådanne situationer, som typisk vil indtræffe i august-oktober (Sonnenborg et al. 2009).

Modsat betyder den øgede nedbør og hyppighed af ekstremnedbør, at størrelsen af ekstremt høje vandføringer øges (Henriksen et al. 2013). Således forventes størrelsen af såkaldt 100 års maksimum afstrømninger at øges med op mod 50 % (og stedvis større) på store del af øerne, mens stigningen vil være mere begrænset i det nordlige og østlige Jylland (op mod ca. 10 %). Det samme mønster genfindes generelt for andre ekstremer som 5 års, 10 års, 20 års og 50 års maksimum afstrømninger.

De modellerede trends understøttes af analyser på overvågningsdata fra en række vandløb igennem perioden 1950-2006 (Kronvang et al. 2008). Her kan der således erkendes signifikante stigninger og fald i ekstremvandføringer (maksimum og minimum) ved flere stationer, men også at der er stor variation mellem stationerne afhængigt af deres beliggenhed og hydrologiske regime.

3.3 Klimaeffekter - fysisk-kemiske forhold

3.3.1 Temperatur

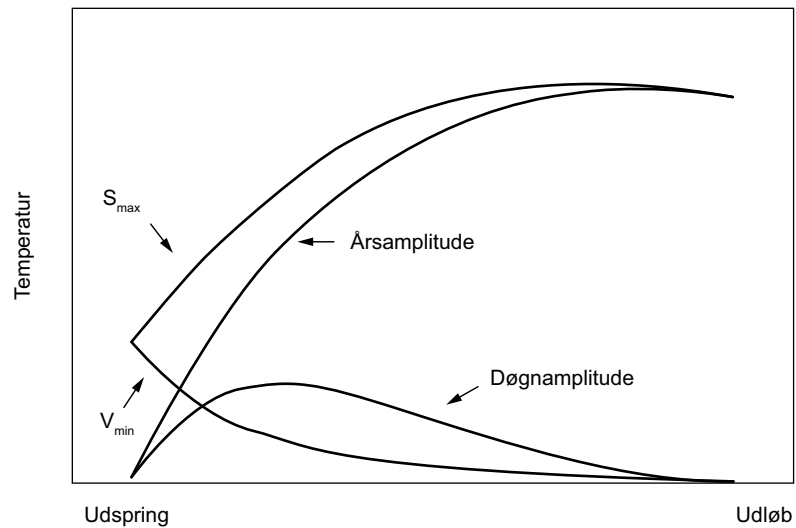
Vandtemperaturen har indflydelse på både kemiske og biologiske processer. Surhedsgrad, iltindhold og ligevægten mellem fri ammoniak og ammonium er temperaturafhængig. Og hastigheden af mange biologiske processer øges med stigende temperatur, fx mikrobiel omsætning af organisk stof og primær produktion (Sand-Jensen & Frost-Christensen 1998, Davidson & Janssens 2006), ligesom bakteriers omdannelse af ammonium til nitrat (nitrifikation) og af nitrat til frit kvælstof (denitrifikation) er temperaturafhængig. Vandplanters overvintring, frøspiring og vækst afhænger af temperaturen, ligesom det er tilfældet for vandinsekters udviklingshastighed og vækst, succes af ægklækning, dvaleudvikling, puppe- og voksenstørrelse og frugtbarhed (Elliott 1994, Wotton 1995). Ligeledes øges væksten hos ørred og andre vandløbsfisk med stigende temperatur (indtil en vis grænse). Samtlige planter og dyr har imidlertid en øvre og nedre grænse for, hvad de kan "tåle". Og de har optimale temperaturer, inden for hvilke de trives bedst. Ændrede temperaturforhold, herunder en generel temperaturstigning, vil derfor potentielt have indflydelse på organismene og de økosystemer, som de indgår i. Temperaturen er derfor en hovedregulator for de biologiske processer i vandløb. Og den definerer arternes overordnede geografiske udbredelse hvad angår længdegrad, breddegrad og højde over havet, ligesom den har indflydelse på udbredelsen inden for det enkelte vandløbssystem (Hynes 1970, Hildrew and Edington 1979, Jacobsen et al. 1997).

Der må som allerede nævnt forventes en stigning i årsmiddeltemperaturen. Stigningen i lufttemperatur vil være relativt størst om vinteren, mindre om sommeren (se fx Christensen et al. 2011).

Der er en god positiv sammenhæng mellem lufttemperatur og temperaturen i vandløbene, om end med en vis tidsforskydning. Det er således muligt på middelværdi-niveau at modellere et vandløbs temperatur ud fra lufttemperaturen ved brug af simple regressionsanalyser på sammenhørende værdier af de to variable (Crisp 1992, Jeppesen & Iversen 1987). Det er endda muligt at modellere på døgnmiddelniveau, hvis data er detaljerede nok (Jeppesen & Iversen 1987, Pedersen & Sand-Jensen 2007). Regressionerne skal dog opstilles for specifikke positioner i de enkelte vandløb. Ud fra data fra Morrill et al. (2005) kan en 1°C's forøgelse i lufttemperatur overordnet set omsættes til en stigning i vandløbstemperatur på ca. 0,7°C. Men helt så simpelt er det naturligvis ikke i praksis.

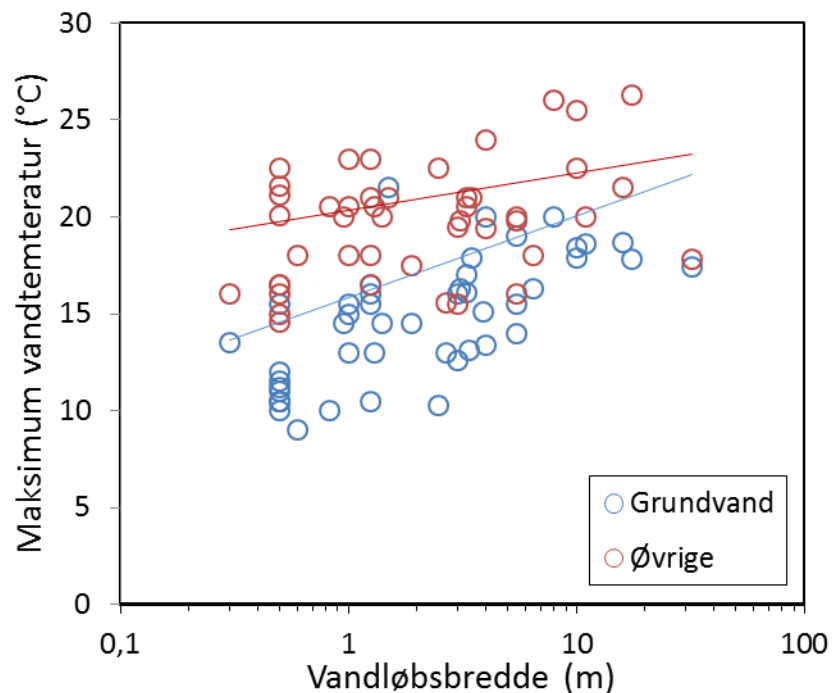
Vandets temperatur afhænger grundlæggende af solindstrålingen og varmeudvekslingen med luften. Vandtemperaturen ændrer sig systematisk ned gennem et vandløbssystem fra de små til de store vandløb (figur 3.3, 3.4). Det skyldes, at der med øget afstand fra udspringet bliver stadig længere tid, hvor vandet kan påvirkes af solindstråling og varmeudveksling med luften. Ligeledes øges vandmængden, hvilket dæmper hurtige ændringer af temperaturen, fordi vandet har en stor varmekapacitet. Generelt bliver den maksimale sommertemperatur gradvist højere og maksimale vintertemperatur gradvist mindre jo længere vandet bevæger sig væk fra vandløbets udspring. Det betyder, at årsamplituden øges i nedstrøms retning for at flade ud i de største vandløb. Figur 3 viser endvidere, at døgnamplituden først øges med stigende vandløbstørrelse for derefter at aftage til stort set nul ved udløbet af de store vandløb.

Figur 3.3. Vandtemperaturen i et "ideelvandløb" fra udspring til udløb. Figuren viser sommermaksimum (S_{max}), vinterminimum (V_{min}) og variationen (amplituden) over døgnet og året (fra Sand-Jensen & Lindegaard 2008).



Dette generaliserede billede påvirkes imidlertid af forholdet mellem tilstrømningen af hhv. overfladevand/drænvand og grundvand. Grundvandet har således en temperatur der er lig med luftens årsmiddeltemperatur (ca. 8 °C), hvis der er tale om vand fra dybtliggende magasiner. Eftersom dette vand gennemsnitlig har en alder > 100 år, vil temperaturen af det udstrømmende grundvand generelt først forventes at stige engang i slutningen af dette århundrede. Situationen kan dog være en anden, og temperaturen noget højere, hvor grundvandet stammer fra mere overfladenære magasiner. Her vil der hurtigere kunne forventes klimabetingede stigninger i temperaturen. Grundvandsdominerede vandløb er typisk koldere om sommeren (i gennemsnit ca. 5 °C) end vandløb, hvor grundvandsbidraget er mindre (figur 3.3), mens det omvendte er tilfældet om vinteren, hvor de ikke-grundvandsdominerede vandløb er koldest.

Figur 3.4. Sammenhæng mellem maksimumtemperaturen i udvalgte danske vandløb af forskellig størrelse og med forskellig andel af tilført grundvand. Signaturer: "Grundvand" angiver vandløb, hvor bidraget af dette er vurderet som væsentligt eller dominerende; "Øvrige" omfatter vandløb, hvor grundvandsbidraget er vurderet som relativt beskedent. (Omtegnat efter Wiberg-Larsen 1999).



Andre forhold har dog en ikke uvæsentlig indflydelse på vandløbstemperaturen. Således dæmper kraftig beskygning fra træer langs bredden (fx i tæt skov) variationerne i temperatur og de maksimale værdier, som kan opnås i sommerhalvåret. Anderledes er forholdet i vandløb, som er eller modtager afløb fra søer, hvor temperaturen typisk vil være høj om sommeren og tæt på lufttemperaturen.

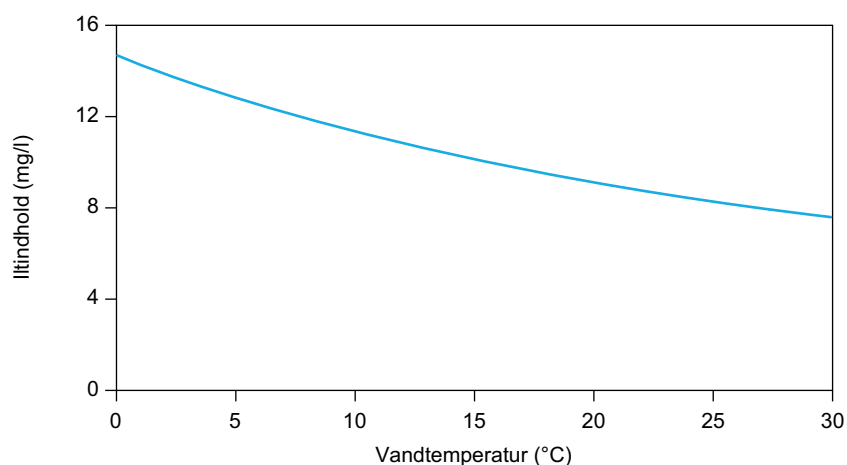
Det kan på baggrund af ovenstående konkluderes, at de klimabetingede temperaturstigninger vil være mest betydende i de ikke-grundvands dominerede vandløb. Her vil stigningen i gennemsnit være størst i de store vandløb, mens der i de mindste vandløb vil være den største stigning i døgnamplituderne. Sådanne stigninger vil forekomme både sommer og vinter. Men især om sommeren må der periodevis forventes forhøjede temperaturer, som kan udgøre et problem for visse plante – og dyrearter. Det vil især være tilfældet, hvor de små vandløb ligger helt eksponerede for solindstråling.

Analyser foretaget på vandtemperaturer målt i en række vandløb over perioden 1975-2006 viser en generel stigning i de fleste af årets måneder, med den største generelle stigning i marts, april og september (Kronvang et al. 2008). Regionale forskelle kan formodentlig forklares ud fra baseflow indeks, dvs. størrelsen af grundvandsbidraget.

3.3.2 Ilt

Både invertebrater (smådyr) og fisk skal bruge ilt til deres livsprocesser (respiration), og i vand kan der nemt opstå problemer med den nødvendige forsyning, fordi et volumen vand i ligevægt med luft funktionelt set indeholder langt mindre ilt end det tilsvarende volumen luft. Dyrene er derfor meget følsomme over for reduktioner i den til rådighed stående iltmængde – og iltkoncentration – i vandløbsvandet. Specielt er det en udfordring, at vandets iltindhold aftager med stigende temperatur (figur 3.5). En forventet stigning i luftens temperatur (se ovenfor) vil derfor øge "ilt-stresset" på dyrene.

Figur 3.5. Opløseligheden af ilt i vand som funktion af temperaturen. Iltmætningen er 100 % ved 0°C, men kun 51,7 % ved 30°C.



Iltindholdet (O) i vandløb kan over korte tidsrum beskrives ved funktionen:

$$dO/dt = P - R - K_2(O_{akt} - O_{mæt}),$$

hvor P er planternes (højere planter og bundlevende algers) fotosyntese, R samtlige vandløbsorganismers respiration, og det sidste led i ligningen er genluftningen med atmosfæren. Her er O_{akt} den aktuelle iltkoncentration og

$O_{mæt}$ er iltkoncentrationen ved fuld mætning med luften ved den aktuelle vandtemperatur, mens K_2 er den såkaldte genluftningskonstant. Der er dog reelt kun tale om en konstant for en given vandløbsstrækning med dens karakteristiske strømningmønster. Genluftningskonstanten er således en funktion af den gennemsnitlige vandhastighed (v), middeldybden (d) og vandløbets hældning/fald (S) og givet ved formlen: $K_2 = k \cdot v^x \cdot d^y \cdot S^z$, hvor k , x , y og z er konstanter. K_2 varierer således med vandets turbulens, der netop er bestemt af de tre faktorer. I lavvandede, hurtigt strømmende, og stort set vegetationsløse vandløb med stort fald – fx skovbække i stærkt kuperet terræn – er K_2 stor og iltkoncentrationen tæt på ligevægt med luften. Her vil døgnsvingninger i iltkoncentrationen følge døgnamplituden i temperatur via den temperaturafhængige opløselighed af ilt. I mere langsomt flydende, dybe vandløb med lille fald – og hvor der typisk er rig vækst af vandplanter – vil K_2 modsat være lille, og her vil døgnsvingningerne være større, fordi fotosyntese og respiration får relativt større vægt. På årsbasis vil økosystemets samlede respiration i øvrigt – uanset vandløbstype – overstige planternes iltproduktion. Det skyldes ikke mindst, at der tilføres væsentlige mængder organisk stof fra vandløbets omgivelser, bl.a. i form af løvfældede blade fra træer langs bredden eller dødt organisk stof fra vandløbsnære mosser og enge, ligesom vandløbsplanterne selv omsættes under iltforbrug, når de visner hen. Om foråret og sommeren er der dog i mange vandløb et iltoverskud fra kiselalgers og højere planters fotosyntese i forhold til systemets respiration, mens respirationen dominerer i sensommeren, efteråret og det tidlige forår.

Ud over de beskrevne naturgivne faktorer kan udledningen af spildevand indeholdende let nedbrydeligt organisk stof bidrage til en reduktion i iltindholdet. Denne faktor var tidligere af stor betydning i mange vandløb og store dele af landet. Indførelsen af forbedret rensning af byernes spildevand, stop for udledning af ensilagesaft, ajle og møddingsvand fra landbruget, samt reduktion i udledninger fra dambrugene (i Jylland) har dog i perioden efter ca. 1990 reduceret disse udledninger betydeligt (se figur 3.7).

Stigende temperatur som forudsat i klimascenariet vil reducere vandløbenes iltindhold, formodentlig med den største biologiske effekt om sommeren. På den anden side vil en øget afstrømning teoretisk set øge vandhastigheden og dermed geniltningen (naturligvis inden for rammerne af "temperaturregimet"), mens vandhastigheden under tørre perioder med væsentlig reduceret vandføring vil mindskes – endda forstærket af plantevæksten og øget nedbrydning af aflejret organisk materiale – og derved føre til reduceret geniltning. Samlet set vil klimaeffekten medføre forringede iltforhold, som primært vil være betydende i østdanske vandløb pga. beskedent tilskud af grundvand.

3.3.3 Erosion og sedimentation

Vandløbene er præget af dynamiske processer, hvor strømmen til stadighed fjerner partikler (se figur 3.2) fra bund og sider, mens disse igen aflejres, hvor forholdene er egnede hertil (dvs. stærkt nedsat vandhastighed). Processerne er grundlaget for at skabe de forskellige levesteder, som dyr og planter er så afhængige af. Den forventede øgede afstrømning, især i vinterhalvåret, vil øge erosionen og samtidig muligheden for efterfølgende aflejringer, hvilket i sig selv ikke er negativt biologisk set. Klimascenariet forudser dog også øget hyppighed og størrelse af meget ekstreme afstrømninger. Disse vil have en særlig markant effekt på erosion- og sedimentationsprocesserne. Denne effekt vil forstærke tilførslen af partikulært materiale fra de vandløbsnære omgivelser. Dette bekræftes af en analyse af data fra Odense Å over perio-

den 1975-2006, hvor der blev fundet en stigning i ekstremt høje værdier af suspenderet stof (Kronvang et al. 2008). Der tilføres således mange steder store mængder sand, silt og humuspartikler fra de dyrkede marker via overfladisk afstrømning og ikke mindst dræn. Denne "unaturlige" tilførsel bidrager til tilsanding af områder med sten/grus, hvilket er til stor skade for de smådyr og fisk, som er særlig afhængige af disse områder. Omvendt vil tilførslen gavne arter som er knyttet til "bløde" sedimenter. Øget tilførsel af fin-partikulært materiale vil primært være fremherskende i forbindelse med meget kraftige regnskyl, især i perioder hvor tilstødende dyrkede arealer ikke er væsentlig plantedeckede (figur 3.6). Aflejring af fin-partikulært materiale vil derudover forventeligt øges under perioder med lav vandføring, fx i forbindelse med særligt tørre perioder om sommeren.

Figur 3.6. Stor overfladisk afstrømning den 23. maj 2014 fra nyligt tilsået mark ved Gudenå (Åstedbro), umiddelbart efter et meget kraftigt regnskyl. Afstrømningen transporterer store mængder jordpartikler ud i Gudenåen. (P. Wiberg-Larsen foto)



3.4 Forurenende stoffer

3.4.1 Kvælstof

Koncentrationen af kvælstof (N) i vandløbene afhænger delvist af afstrømningen (Wiberg-Larsen et al. 2012). Således stiger koncentrationen – og transporten – generelt med afstrømningen, fordi tilførslen fra omgivelserne (især de dyrkede marker) øges via udvaskning. Tilførslen består primært af nitrat-N, men der indgår også organisk bundet kvælstof og ammonium-N. Sidst nævnte stammer dog fortrinsvist fra spildevand. Kvælstof er et vigtigt næringsstof for planter (alger, mosser, højere planter), også de som vokser i vandløbene. Koncentrationerne af kvælstof er dog generelt af en sådan størrelse, at næringsstoffet ikke kan forventes at være begrænsende for planternes vækst.

Høje koncentrationer af ammonium har, afhængigt af andelen af fri ammoniak (som er positivt korreleret med pH og temperaturen), direkte giftvirkning på smådyr og fisk (for ørred > 0,2 mg/L). Koncentrationen er relativt høj i vandløb, der modtager betydende mængder hus- og byspildevand. Øgede afstrømninger vil derfor – som udgangspunkt - fremme fortyndingen af det udledte ammonium. Modsat kan koncentrationen af ammonium øges i situationer med lille vandføring og forhøjet vandtemperatur.

3.4.2 Fosfor

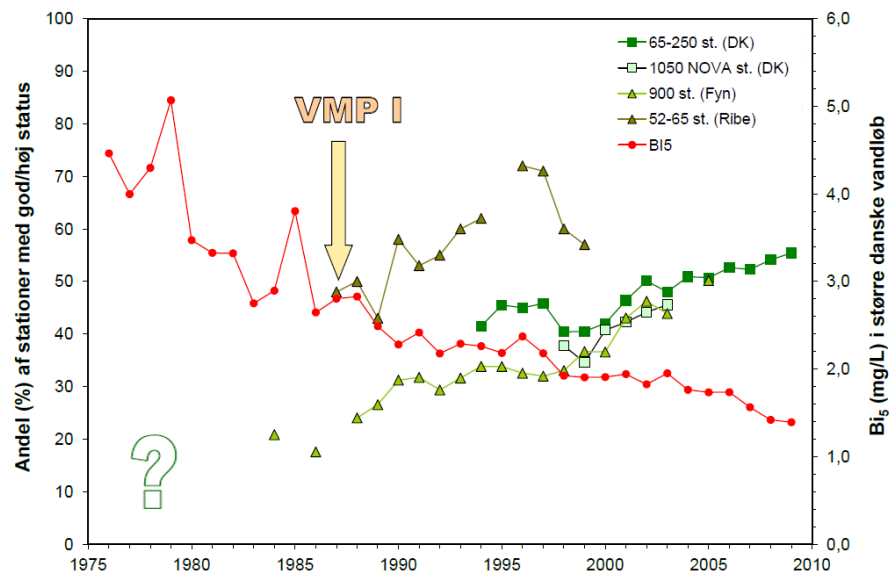
Koncentrationen af fosfor (P) i vandløbene afhænger ligesom for kvælstof delvist af afstrømningen (Wiberg-Larsen et al. 2012). Således stiger koncentrationen – og transporten – generelt med afstrømningen, fordi tilførslen fra omgivelserne (især de dyrkede marker) øges via udvaskning. Der tilføres også væsentlige mængder via spildevand o. lign. - igen med en øget tilførsel i forbindelse med store nedbørshændelser. Fosfor er ligesom kvælstof et vigtigt for "planterne" i vandløbene. Koncentrationerne af fosfor har indflydelse på arts sammensætningen af bundlevende kiselalger (se senere), og i et vist omfang også på mængden af fx trådformede alger af slægten *Cladophora* (Pedersen & Wiberg-Larsen 1997), ligesom visse højere planter begunstiges af forhøjede koncentrationer (Baattrup-Pedersen & Larsen 2013, Baattrup-Pedersen et. al. 2014). Således synes mængden af *Cladophora* at begrænses, hvis den gennemsnitlige sommer-koncentration af opløst fosfor er under 20-30 µg/L (Pedersen & Wiberg-Larsen 1997), mens det ikke er muligt at angive tilsvarende grænseværdier for højere planter. Derimod er det muligt at angive indikatorarter (arter som i særlig grad begunstiges) for forhøjede fosforkoncentrationer, primært kruset og børsteblandet vandaks (Baattrup-Pedersen & Larsen 2013).

3.4.3 Organisk stof

Let nedbrydeligt organisk stof (BOD_5 = "biochemical oxygen demand", målt over 5 døgn) tilføres primært via by- og husspildevand, samt via dambrug. Dertil kommer uforudsete udledninger fra landbrugsbedrifter.

Koncentrationen af BOD_5 er teoretisk en funktion af en relativt konstant udledning, fx fra et offentligt renseanlæg eller dambrug, og fortyndingen af udledningen. Koncentrationen vil derfor typisk være størst, når vandføringen i et vandløb er i minimum. Dette må forventes at nedsætte påvirkningen i en situation med generelt øget afstrømning – som klimaforandringerne forventes at give.. Sammenhængen kan dog være anderledes i mindre vandløb, som modtager (stort set urensset) spildevand fra spredtliggende ejendomme (uden for det offentlige kloaknet). Her kan man opleve situationer, hvor udledningerne stiger med øget afstrømning – indtil en vis grænse. Årsagen er, at spildevandet i nedbørsfattige perioder ikke når frem til vandløbene, men siver i jorden inden, mens øget nedbør vil bidrage til at skylle spildevandet ud i vandløbet. Dertil kommer, at regnvandsoverløb (i forbindelse med spildevandsanlæg) tilfører urensset spildevand med dets indhold BOD_5 under ekstreme regnhændelser. Netop sådanne situationer med markant øget nedbør forventes at blive hyppigere.

Der er for danske vandløb påvist en meget entydig sammenhæng mellem middelkoncentrationen af BOD_5 i vandløbsvand og forekomsten af forskellige arter af makroinvertebrater (Friberg et al. 2008). Nogle arter, som de der regnes som mest følsomme over for spildevand, forekommer således kun, hvis indholdet af BOD_5 er meget lavt (væsentligt under 2 mg/L), mens andre kan tolerere væsentlig højere koncentrationer. Sammenhængen bekræfter i de fleste tilfælde den klassifikation af arternes følsomhed, som er foretaget i Dansk vandløbs Fauna Indeks.



Figur 3.7. Udvikling i miljøtilstanden – udtrykt ved faunaklassen (Dansk vandløbs Fauna Indeks) – ved forskellige grupper af danske vandløbsstationer: 65-250 stationer placeret over det meste af landet, 1050 stationer fordelt over hele landet, 900 stationer inden for det tidligere Fyns Amt, og 52-65 stationer ved større vandløb i det tidligere Ribe Amt. For disse stationer er angivet den andel, som har god eller høj økologisk tilstand (god: faunaklasse 5-6; høj: faunaklasse 7). Desuden er vist udviklingen i en række, primært større, vandløbs indhold af let omsætteligt organisk stof (målt som $BOD_5=BI_5$). Her stammer data før 1990 fra fynske vandløb, data fra 1990 og fremefter fra vandløb fra hele landet. Pilen angiver tidspunktet for vedtagelsen af den første Vandmiljøplan.

Udledningerne og koncentrationen af BOD_5 har været for nedadgående gennem de seneste mere end 30 år (fig. 3.7). Årsagen er en væsentlig forbedret spildevandsrensning i byerne samt et stop for de tidligere så udbredte ulovlige udledninger af ajle, møddingsvand og ensilagesaft (Wiberg-Larsen et al. 2012). Denne udvikling er uden tvivl den vigtigste årsag til en fremadskridende forbedring af faunaklassen (DVFI) i mange danske vandløb (figur 3.7, Wiberg-Larsen et al. 2012).

3.4.4 Okker

I dele af det vestlige og centrale Jylland findes lavbundsområder med aflejring af pyrit, en jern-svovl forbindelse. Når lavbundsområderne afvandes, fx i forbindelse med dræning eller sænkning af vandstanden om sommeren iltes pyritten og der dannes ferrojern og svovlsyre. Disse forbindelser udvaskes til vandløbene, når vandstanden stiger og afstrømningen øges i løbet af vinteren. Herved dannes ferrihydroxid – også kaldet okker. Den forventede klimaforandring indebærer en generel forøgelse af nedbør og afstrømning, samt ekstreme afstrømninger og perioder med tørke. En generelt forhøjet grundvandsstand vil forventes at mindske iltningen af pyrit, men til gengæld øge udvaskningen af ferrojern, især ved intensiv dræning. Ferrojern er giftigt for makroinvertebrater og fisk, ligesom der er en negativ effekt når okkeren udfældes på krop og gæller. Desuden er sænkningen af pH (og stigningen i H^+ koncentrationen) yderst skadelig for de fleste makroinvertebrater, fisk, og adskillige plantearter. Umiddelbart vurderes der dog ikke at være en væsentlig øget risiko (ud over den nuværende) fra ændring i pH eller okker for de nævnte organismegrupper som følge af klimaændringerne.

3.4.5 Pesticider og andre miljøfremmede stoffer

Der anvendes talrige forskellige pesticider i Danmark, og forbruget og behandlingshyppigheden og belastningen af "miljøet" har i de seneste 5-10 år været stigende (Ørum & Samsøe-Petersen, 2013). Langt de fleste pesticider anvendes i jordbruget til bekæmpelse af ukrudtsarter (herbicider), samt angreb fra patogene svampe (fungicider) og skadevoldende insekter (insekticider). Set i forhold til organismerne i vore vandløb er insekticider og fungicider de mest problematiske midler. De mest anvendte insekticider (de såkaldte pyrethroider) har således meget alvorlige skadevirkninger på leddyr som krebsdyr, vandmider og insekter. Der er således påvist alvorlige adfærdsmæssige effekter ved koncentrationer helt ned omkring 10 ng/L, i enkelte tilfælde endnu lavere. Ved koncentrationer omkring 30 ng/L vil skønsmæssigt omkring 40 % af arterne være i risiko (fx Wiberg-Larsen et al. 2013). Også visse fungicider (triazoler) har giftvirkning på makroinvertebrater, men påvirker derudover via deres effekt på vandlevende svampe (hydromyceter) nedbrydningen af organisk stof, og derigennem også kvaliteten af den føde, som mange invertebrater foretrækker (Rasmussen et al. 2012).

Pesticider som pyrethroider og triazoler tilføres primært til vandløbene i situationer, hvor der lige er sprøjtet på arealerne op til vandløbene, og der umiddelbart efter forekommer kraftige regnskyl (se fx Solomon et al. 1996, Styczen et al. 2003, Kronvang et al. 2003, Rasmussen et al. 2011). Herved vaskes stofferne via bioporer ned i drænene og derfra ud i vandløbene (Petersen et al. 2013). Dette fænomen forekommer især på lerholdige jorder i det østlige Danmark. Med tiltagende ekstreme nedbørshændelser øges risikoen for denne påvirkning.

3.5 Klimaeffekter – biologiske forhold

Som det fremgår af ovenstående redegørelse er de klimatiske faktorer temperatur og nedbør helt centrale styrende faktorer for de biologiske/økologiske forhold. Disse beregnes typisk i form af gennemsnitlige værdier på års- eller sæsonniveau. Spørgsmålet er imidlertid i hvor høj grad sådanne værdier har biologisk/økologisk mening, eller om ekstremværdier er mere betydende. Spørgsmålet kan næppe besvares entydigt, idet der formentlig er tale om et "både og". Således vil stigninger i middeltemperatur og middel vandføring også indebære stor sandsynlighed for forekomst af stigninger i maksimum værdierne. For vandføring er det vist, at øget forekomst af minimum værdier, ligesom middelværdier og ekstremt store værdier har biologiske implikationer.

Fokuseres der på ekstremværdier er der imidlertid utallige muligheder. Der kan således være tale om absolutte maksimum eller minimum værdier (fx maksimum vandtemperatur over et år eller årrække), der dog formentlig ikke har samme biologiske eller økologiske relevans sammenlignet med parametre som fx antal dage under/over eller frekvens af specifikke statistisk bestemte værdier. Analyser af over 70 forskellige vandføringsvariable i forhold til biologiske indikatorer har således vist, at varighed og frekvens er bedre forklarende parametre end den langt mere simple – men hidtil meget administrativt anvendte - parameter medianminimum vandføring (Graeber et al. 2014, i trykken).

I det følgende er der primært fokuseret på ændringer, som direkte må forventes at blive afspejlet i de valgte indikatorer for økologisk tilstand. Der er derfor kun perifert omtalt processer som omsætning af næringsstoffer og primærproduktion.

3.5.1 Effekter af temperaturændringer

Baseret på en nylig metaanalyse af data fra diverse publicerede studier (Kristensen et al. 2013) blev det for tempererede vandløb (hvortil de danske hører) fundet, at artsrigdom af fisk øges med stigende temperatur, størrelsen af voksne vandløbsinsekter aftager med stigende temperatur, men at stigende temperaturer ikke har signifikant effekt på artsrigdom af Ephemeroptera (E) = døgnfluer, Plecoptera (P) = slørvinger og Trichoptera (T) = vårfluer, og total artsantal og "evenness" af samtlige makroinvertebrater.

Konklusionen på analysen er således, at klima-inducerede ændringer i vandløbenes temperatur sandsynligvis vil medføre væsentlige ændringer i økosystem funktion og struktur. Formodentlig vil størrelsen af makroinvertebraterne i vandløbene reduceres, hvilket kan ændre arternes "fitness" og også have mere overordnede økosystem effekter (fx effekter på fisk). Desuden vil artsrigdommen af fisk øges, dog kun i det omfang at temperaturstigningen holder sig inden for "ikke-dødelige" grænser for koldtvals-tilpassede arter (fx ørred og laks).

Det mest bemærkelsesværdige ved analysen er imidlertid manglen på data. Det var eksempelvis ikke muligt at finde tilstrækkeligt med data til at undersøge temperatureffekter på andre parametre og biologiske elementer, herunder ikke mindst effekter på vandløbsplanter.

Noget tilsvarende er tilsyneladende gældende også for effekten af klimabetingede ændringer i vandføring.

Det betyder, at vurderinger af den specifikke effekt af ændret temperatur- og hydrologisk regime på de biologiske kvalitetselementer (fytobenthos, vandløbsplanter, makroinvertebrater og fisk) vil bygge på et forholdsvist svagt evidensbaseret grundlag.

3.5.2 Fytobenthos

Der er endnu ikke udviklet noget nationalt indeks baseret på bundlevende kiselalger (diatoméer). Det forventes dog, at det svenske kiselalgeindeks udviklet til vandløb umiddelbart vil kunne overføres til danske forhold, idet det allerede har vist sig egnet til danske søer (Johansson et al. 2014, in prep.).

Kiselalger responderer på forskellige miljøfaktorer og -påvirkninger, herunder temperatur, næringsstoffer, pH, men også på siltpåvirkning af de faste substrater hvortil mange arter primært er knyttet. Til danske forhold forventes indekset at skulle afspejle koncentrationen af næringsstoffer (primært forfor) i vandløbene. Rationalet er, at forskellige arter af kiselalger har mere eller mindre veldefinerede fosfor-optima (såkaldt "weighted averaging" = WA), således at den kvantitative sammensætning af arterne vil indikere et givet niveau af fosfor. Men selvom der typisk vil være en stærk sammenhæng mellem fosfor og diverse kiselalgeindices, og selvom kiselalgeindices inden for et relativt snævert geografisk område, hvor de typisk vil være konstrueret på samme WA-grundlag (fx inden for CB-GIG, hvortil Danmark hører, og hvor der forekommer et klima som det danske temperaturmæssigt må formodes at komme til at ligne), kan det ikke afvises at temperaturændringer vil påvirke disse sammenhænge sådan som det synes at være tilfældet for søer (se fx Anderson 2000). En temperatureffekt må forventes at være mest sandsynlig i små vandløb i Østdanmark, beliggende relativt lysåbent uden for områder med skov. Ligeledes kan det ikke afvises, at ændringer i hydrologi vil have effekt på et dansk kiselalgeindeks. Ganske vist indsamles

prøverne som standard primo maj, hvor sandsynligheden for fx perioder med tørke og meget lave vandføringer er ringe, men der kan til gengæld i forbindelse med fx skybrud forekomme ekstremt store vandføringer med afslidning af algerne til følge, ligesom algerne kan dækkes via aflejret finkornet materiale, hvilket potentielt kan påvirke artssammensætningen. Endelig kan artssammensætningen påvirkes som følge af klimabetingede ændringer i fosforkoncentrationerne: generelt øget afstrømning og flere store og større afstrømninger må forventes at medføre stigende koncentrationer.

Det er imidlertid på det foreliggende grundlag vanskeligt at forudsige, hvordan de forventede ændringer i klimaet konkret vil påvirke scorerne af det fremtidige danske kiselalgeindeks og ikke mindst grænserne mellem moderat-god og god-høj økologisk tilstand.

3.5.3 Vandløbsplanter

De danske vandløbsplanter omfatter næsten udelukkende arter med en relativt stor geografisk udbredelse og dermed forekomst inden for et klimaregime, som kan forventes inden for Danmarks grænser. Således forventes stigende temperatur på få grader ikke umiddelbart at få indflydelse på arternes forekomst/udbredelse, men reelt ved vi det ikke. Derimod forventes ændringer i afstrømning af kunne få betydning. Ny analyser viser således en positiv sammenhæng mellem Dansk Vandløbsplante Indeks og bestemte vandføringsparametre (Graeber et al. 2014). Således er DVPI positivt korreleret med hyppigheden af vandføringer større end 25% percentilen af vandføringsvarighedskurven (defineret som den mindste observation, hvor alle de observationer der er mindre end den, udgør mindst $\frac{1}{4}$ af alle observationerne), mens indekset er negativt korreleret med såvel varigheden af vandføringer 3 gange over 50% percentilen og frekvensen af vandføringer under 75% percentilen. Det betyder "på almindeligt dansk", at generelt stigende vandføringer over et vist niveau øger DVPI scorerne, mens ekstremafstrømninger – høje som lave – mindsker indeksscorerne. Forklaringen er formodentlig, at de "gode" arter (som bidrager til høje scorer) i DVPI profiterer af relativt stabile men stigende vandføringer, mens "dårlige" arter (som bidrager til lave scorer) som fx en række amfibiske former er mest modstandsdygtige ved store afstrømninger og meget konkurrencedygtige og hurtigt voksende ved lave afstrømninger, således at de udkonkurrerer mere "følsomme" langsomt voksende arter.

På den baggrund må der forventes en effekt af de forventede klimaændringer på DVPI under de kommende vandplanperioder. Effekten vil afhænge af forholdet mellem den generelle nedbørsbetingede stigning i vandføringen og hyppigheden af ekstreme variationer i afstrømningen. Der kan således både forventes stigende og aftagende værdier af DVPI efter et desværre "stokastisk mønster". Effekten må forventes at være mest udtalt i østdanske vandløb, hvor grundvandsbidraget er relativt lille – og ekstremt mest udtalt i områder med høj grad af befæstet areal.

3.5.4 Makroinvertebrater

Den danske vandløbsfauna af makroinvertebrater er – ligesom for vandløbsplanternes vedkommende – præget af arter med en bred geografisk europæisk udbredelse. De er typisk knyttet til det nordlige europæiske lavland, hvor de findes inden for et relativt stort temperaturregime, der er større end de ændringer, der må forventes i danske vandløb som følge af klimaforandringerne. Antallet af arter, som på en eller anden vis indgår i DVFI, omfatter mindst 440 (hvoraf alene de ca. 150 tilhører tovinge-familien Chi-

ronomidae). Blandt samtlige DVFI-arter findes kun 10 i Danmark på deres udbredelsesmæssige nordgrænse; de vurderes derfor at blive begunstiget af den forventede temperaturstigning. Kun to af arterne tilhører nøglegrupperne 1 eller 2, resten tilhører nøglegrupperne 3 eller 4 og/eller er positive diversitetsgrupper. Modsat har 4 arter en nordlig udbredelse (eller forekommer i det central Europas bjergegne), hvilket indikerer at de kan være truede af temperaturstigninger. Imidlertid er de også – af samme grund – knyttet til vore grundvandsdominerede, relativt kolde, vandløb, hvor temperaturstigningerne først for alvor vil slå igennem på et relativt sent tidspunkt. Kun én af de 4 arter tilhører nøglegruppe 2, resten tilhører nøglegrupperne 3-5. De øvrige arter vurderes at være indifferente.

Kombineret med at der (som nævnt tidligere) ikke forventes nogen signifikant direkte effekt af temperaturstigningen på artsrigdommen af EPT taxa må konklusionen være, at der er lille sandsynlighed for, at temperaturstigningen vil medføre væsentlige ændringer i de faunaklasser, som må forventes ud fra de basale fysiske og vandkemiske forhold. Det gælder også, når den relativt lille reduktion i iltopløseligheden, som den generelle temperaturstigning medfører, indregnes. Det kan dog ikke udelukkes, at der under tørkeperioder også forekommer forhøjede temperaturer, som vil udgøre et problem for visse af de arter, som scorer højt i DVFI.

En generel forøgelse af afstrømningen vurderes overordnet at øge scorerne af DVFI. Således fandt Graeber et al. (2014) en positiv sammenhæng mellem DVFI-faunaklasser og 4 specifikke vandføringsparametre, som indikerer store afstrømninger (som generelt niveau, hyppighed og varighed). Forklaringen er formodentlig, at mange af de taksonomiske grupper som scorer højt i indekset, typisk er "strømkrævende" (dvs. er afhængige af relativt høje vandhastigheder) og typisk knyttet til "hård" bund. Det er især blandt disse at andelen af nøglegruppe 1 og 2 taxa er høj. Ligeledes må ekstreme afstrømninger formodes at øge "udspulningen" af "strømfølsomme" taxa, mens "strømkrævende" taxa vil være bedre tilpasset sådanne hændelser. "Strømfølsomme" taxa er typisk knyttet til blød bund og omfatter en relativt stor andel af taxa typiske for nøglegruppe 3-6. "Strømfølsomme" taxa vil begunstiges og "strømkrævende" taxa udfordres (hvis de livscyklus-mæssigt forekommer som larver/nymfer) i de situationer med små afstrømninger, som også vil forekomme. Graeber et al. (2014) fandt således signifikant negativ sammenhæng mellem faunaklasse og ekstremt lave vandføringer, ligesom Hille et al. (2014) eksperimentelt kunne påvise markante ændringer i arts-sammensætningen som følge af kortvarige stop i vandføringen (som et udtryk for "tørke"). Også andre faktorer spiller sammen med vandføringerne. Som nævnt vil aflejringen af fint partikulært materiale og økosystemets respiration og iltforbrug øges i perioder med tørke og væsentlig reduceret vandføring. Dette vil øge presset på de strømfølsomme og iltkrævende arter, og samtidig begunstige mere tolerante arter. Der kan også forventes et pres på de iltkrævende arter i forbindelse med ekstremt store afstrømninger, især i sommerhalvåret, fordi der her er øget risiko for tilførsel af urensset spildevand via overløb fra kloaksystemerne. Endelig må påvirkningen via insekticider (pyrethroider, som typisk skylles ud under stor afstrømning) forventes at øge presset på en stor del af vandløbsleddyrene (krebsdyr og insekter).

På den baggrund må der – som for vandløbsplanterne - forventes en hydrologisk effekt (med diverse allerede nævnte afledte effekter) af de forventede klimaændringer på DVFI frem mod 2027. Effekten vil afhænge af forholdet mellem den generelle nedbørsbetingede stigning i vandføringen og hyppigheden af ekstreme variationer i afstrømningen. Der kan således både forventes

stigende og aftagende værdier af DVFI efter et "stokastisk mønster". Effekten må forventes at være mest udtalt i østdanske vandløb, hvor grundvandsbidraget er relativt lille – og spildevandsmængden større. Det skal dog fremhæves, at der vil være en vis biologisk responstid, før effekterne indtræffer, ligesom der er en responstid før effekterne kan påvises rent statistisk.

Et interessant spørgsmål er, om det allerede nu er muligt at påvise effekten af det ændrede klima i vore vandløb, en ændring som i givet fald skulle være sket inden for de seneste ca. 20 år. Den nationale årlige overvågning af op til 250 specifikke vandløbsstationer har påvist en markant forbedring i perioden 1994-2013 af faunaklassen, en fremgang som primært er tilskrevet en generel forbedring af vandkvaliteten (BOD₅ indhold, se fig. 3.7) og en fremadskridende geografisk spredning af de taxa, som tæller "positivt" i DVFI, samt at begrænsningen for yderligere forbedringer beror på tilstedeværelsen af basale fysiske livsbetingelser. Det er muligt, at forbedringerne også i et vist omfang kan tilskrives generelt forøget afstrømning, men betydningen vurderes trods alt at være relativt underordnet i forhold til vandkvalitet og fysiske/vandløbsmorfologiske forhold.

3.5.5 Fisk

Den forventede temperaturstigning kan potentielt forøge artsrigdommen af fisk i danske vandløb. Dette er i givet fald mest sandsynligt i østdanske vandløb. Vi har allerede set indvandring (dog kun via direkte udsætninger, idet naturlig indvandring vil være vanskelig) af sydlige arter, som udmærket synes at trives under danske forhold. Det er dog usikkert i hvilket omfang en sådan "berigelse" af vandløbenes fiskefauna påvirker det fiskeindeks, DFFVa, som anvendes i type 2-3 vandløb. Dette afhænger af hvilke arter, der er tale om, og hvordan de indgår i de 8 delelementer, som DFFVa består af (se Kristensen et al. 2014).

Mere markante og periodiske temperaturstigninger vil i ikke-grundvandsdominerede vandløb kunne medføre problemer for visse "koldtvandsarter". Disse omfatter primært laksefiskene helt, laks, stalling, og ørred samt karpeslægtede fløder (Lehtonen 1996). Stigninger i vandtemperaturen (især på døgnbasis) vil primært være et problem i lysåbne, små vandløb med lille tilskud af grundvand. Det vil derfor næppe i væsentlig grad berøre helt, laks og stalling, som primært vil være knyttet til større vestjyske, grundvandsdominerede vandløb. Ørreden, som har en fremtrædende rolle i begge danske fiskeindices, forekommer derimod typisk i små vandløb. I engelske vandløb har arten et vækstoptimum ved 3,5-19,5°C (Solomon 2008), mens individerne ikke overlever temperaturer over 25°C (over 7 dage) eller 27°C (over ca. 16 timer). For små laks er de tilsvarende temperaturgrænser ca. 2-3°C højere (Solomon 2008). De angivne værdier for ørred dækker formentlig også danske forhold (temperaturoptimum omkring 16°C), idet der dog kan være betydelige forskelle i fx temperaturoptimum mellem forskellige bestande. Temperaturtilpasning er således ingen fast egenskab, men underlagt en betydelig og formentlig relativt hurtig evolution. Trods dette er det sandsynligt, at forhøjede temperaturer i sommerperioden allerede nu er en stærkt medvirkende årsag til manglende – eller meget ringe – forekomst af ørred i mange vandløb, alene fordi de høje temperaturer nedsætter deres fødeoptagelse og vækst (se figur 3.4). Denne effekt må formodes at forstærkes ved øget temperatur.

En generelt øget vandføring vurderes umiddelbart at være positivt for samtlige fiskearter. Således viser en analyse på NOVANA data, at DFFVa er positivt korreleret med det såkaldte baseflowindeks (defineret som baseflow volumen divideret med total volumen af afstrømningen; baseflow forekommer i situationer, hvor tilførslen af vand stort set alene udgøres af grundvand) og hyppigheden af vandføringer over 25% percentilen af vandføringsvarighedskurven (Graeber et al. 2014). Ekstremt store afstrømninger vurderes dog også at være til skade for flere arter. Således betyder forhøjede vintertemperaturer, at ægudviklingen hos ørred sker hurtigere, således at ynglen kommer væsentlig tidligere frem, netop i en periode (februar-marts) hvor der kan forventes ekstremt store afstrømninger (Kristensen et al. 2009). Danske undersøgelser viser en signifikant sammenhæng mellem store afstrømninger i april måned og overlevelsen af ørredyngel (Kristensen et al. 2009). Det betyder, at der ved højere frekvens af store afstrømninger kan forventes en øget dødelighed blandt ørredyngel. Dertil kommer, at store afstrømninger også øger sedimenttransporten og dermed også risikoen for tilslamning af ørredens gydebanks med øget dødelighed for æg og yngel i blommesækstadiet til følge. Små afstrømninger – ikke mindst i forbindelse med tørkeperioder – har modsat negativ indflydelse på fiskesammensætningen og DFFVa. Således var DFFVa negativt korreleret med frekvensen af afstrømninger mindre end 75% percentilen (Graeber et al. 2014). Dette er forventeligt af flere grunde. Dels bliver der mindre areal til rådighed for fiskene, når vandføringen bliver meget lille, dels vil temperaturen også typisk stige i sådanne lowflow situationer, ligesom iltindholdet reduceres pga. temperaturstigningen. Endelig øges risikoen for prædation fra fx hejrer, når vanddybden mindskes. For ørred vil det reducerede areal kombineret med ringe vanddybde desuden øge den interne konkurrence (og dødeligheden) mellem individerne, som er stærkt territoriehævdende.

I små østdanske vandløb (type 1) – og i et vist omfang også visse vestjyske type 1 vandløb - må klimaændringerne (temperaturstigning, ekstremt store/ekstremt små afstrømninger, og afledte effekter) overordnet set forventes at føre til lavere scorer af DFFVø. For DFFVa kan der også forventes effekter i primært østdanske vandløb, men ligesom for DVPI og DVFI vil mønstret formodentlig være stokastisk, fordi effekten afhænger af den aktuelle hyppighed af de ekstreme afstrømninger. Er der få sådanne, kan effekten være positiv med stigende scorer; er der mange, bliver effekten negativ med faldende scorer.

3.5.6 Samlede effekter på de biologiske kvalitetslementer

Der fremgår af de oven for beskrevne klimaændringer, fysiske og økologiske sammenhænge, at det er vanskeligt at give et helt entydigt billede af, hvordan effekten af først nævnte vil være på de forskellige biologiske kvalitetslementer, som anvendes til at beskrive vandløbenes økologiske tilstand.

Det er derfor i tabel 3.4 forsøgt at give et overordnet, kvalitativt, billede af effekten af de forventede klimaændringer.

Tabel 3.4. Vurdering af den relative betydning af klimaændringer. Signaturforklaring: X - betydning; (X) – potentiel betydning; ° – primært østdanske vandløb med lille tilskud af grundvand; T1 – type 1 vandløb; T23 – type 2-3 vandløb; ↑↓ - angiver hhv. stigende eller faldende scorer af de nævnte indices.

Klimabetinget ændring i:	"Dansk Kiselalge Indeks"	Dansk Vandløbs Plante Indeks (DVPI)	Dansk Vandløbs Fauna Indeks (DVFI)	Dansk Fiskeindeks For Vandløb DFFVa	Dansk Fiskeindeks For Vandløb DFFVø
Hydrologi	X° ↑↓	X°T23 ↑↓	X° ↑↓	X°T23 ↑↓	X°T1 ↑↓
Temperatur	X° ↑↓		X° ↓	(X°T23) ↑↓	X°T1 ↓
Ilt					X°T1 ↓
"Tilslamning"			X° ↓		X°T1 ↓
BOD ₅			X°T1 ↓		X°T1 ↓
Fosfor	X ↓				
Okker					
Pesticider			X°T1 ↓		
Samlet ændring	X ↓	X°T23 ↑↓	X°T1 ↓	X°T23 ↑↓	X°T1 ↓

Samlet set vurderes der at være risiko for, at den økologiske tilstand forværres i små (type 1) vandløb i det østlige Danmark, hvor vandløbene kun modtager relativt lidt grundvand og derfor er særlig sårbare for såvel ændringer i nedbør og temperaturforhold. Til gengæld vil tilstanden kunne såvel forbedres som forværres – afhængigt af de aktuelle forhold mht. hydrologi og temperatur – i de mellemstore og store østdanske vandløb. Kun for det kommende danske kiselalgeindeks vurderes der at være risiko for, at den økologiske tilstand forværres mere bredt i danske vandløb. Omfanget vil dog i høj grad afhænge af de specifikke nedbørmæssige afstrømningsforhold.

3.6 Referencer

Anderson, N.J. 2000. Miniview: Diatoms, temperature and climatic change, *European Journal of Phycology*, 35:4, 307-314.

Baatrup-Pedersen, A. & Larsen, S.E. 2013. Fokus: Spiller næringsstoffer en rolle for plantesammensætningen i danske vandløb? I: Wiberg-Larsen, P., Windolf, J., Bøgestrand, J., Baatrup-Pedersen, A., Kristensen, E.A., Larsen, S.E., Thodsen, A., Ovesen, N.B., Bjerring, R., Kronvang, B. & Kjeldgaard, A.: Vandløb 2012. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 84 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 75. <http://dce2.au.dk/pub/SR75.pdf>.

Baatrup-Pedersen, A., Wiberg-Larsen, P., Larsen, S.E. & Bøgestrand, J. 2014. Brug af Dansk Vandløbsplante Indeks i små danske vandløb. Verifikation af de økologiske grænseværdier for Dansk Vandløbsplante Indeks (DVPI) i forhold til den fælleseuropæiske interkalibrering. Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 21 pp. (i trykken).

Christensen, O.B., Goodess, C.M., Harris, I. & Watkiss, P. 2011. European and Global climate projections: discussions of climate change model outputs, scenarios and uncertainty in the EC RTD ClimateCost project In: I. Watkiss (Ed), *The ClimateCost Project Final Report, Volume 1: Europe*, Stockholm Environmental Institute, Sweden.

Crisp, D.T 1992. Measurements of stream water temperature and biological application to salmonid fishes, grayling and dace (including ready reckoners for calculation median eyeing, hatching and swim-up of embryos, and growth rates, maximum, optimum and minimum maintenance rations for brown trout at various temperatures). Freshwater Biological Association Occasional Publication, 29: 1-71.

Davidson, E.A., Janssens, I.A. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440, 165-173.

Elliott, J.M. 1994. *Quantitative Ecology and the Brown Trout*. Oxford University Press, Oxford, 286 pp.

European Commission 2012a. COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT European Overview (1/2) Accompanying the document REPORT FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL on the Implementation of the Water Framework Directive (2000/60/EC) River Basin Management Plans. Brussels, 14.11.2012 SWD (2012) 379 final 1/30.

European Commission 2012b. COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT Member State: Sweden Accompanying the document REPORT FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL on the Implementation of the Water Framework Directive (2000/60/EC) River Basin Management Plans. Brussels, 14.11.2012 SWD (2012) 379 final 26/30.

European Commission 2012c. COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT Member State: Germany Accompanying the document REPORT FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL on the Implementation of the Water Framework Directive (2000/60/EC) River Basin Management Plans. Brussels, 14.11.2012 SWD (2012) 379 final 8/30.

European Commission 2012d. COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT Member State: United Kingdom Accompanying the document REPORT FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL on the Implementation of the Water Framework Directive (2000/60/EC) River Basin Management Plans. Brussels, 14.11.2012 SWD (2012) 379 final 29/30.

Friberg N., Skriver J., Larsen S.E., Pedersen M.L. & Buffagni A. 2008. Stream macroinvertebrate response to gradients in organic pollution and eutrophication. *Freshwater Biology* 55: 1405-1419.

Graeber, D., Wiberg-Larsen, P., Bøgestrand, J. & Baattrup-Pedersen, A. 2014. Vurdering af effekten af vandindvinding på vandløbs økologiske tilstand. Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 29 s.

Henriksen, H.J., Olsen M. & Troldborg, L. 2013. Klimaeffekter på hydrologi og grundvand (klimaekstremvandføring). *Naturstyrelsen*, 67 pp. (<http://www.nst.dk>).

Hildrew, A.G., Edington, J.M. 1979. Factors affecting the coexistence of hydropsychid caddis larvae (Trichoptera) in the same river system. *Journal of Animal Ecology* 48, 557-576.

Hille, S., Kristensen, E.A., Graeber, D., Riis, T., Jørgensen, N.K. & Baattrup-Pedersen, A. 2014. Fast reaction of macroinvertebrate communities to stagnation and drought in streams with contrasting nutrient availability. *Freshwater Science* xx (in press).

Hynes, H.B.N. 1970. *Ecology of running waters*. Liverpool University Press.

Jacobsen, D., Schultz, R., Encalada, A. 1997. Structure and diversity of stream invertebrate assemblages: the influence of temperature with altitude and latitude. *Freshwater Biology* 38, 247-261.

Jeppesen, E. & Iversen, T.M. 1987. Two Simple Models for Estimating Daily Mean Water Temperatures and Diel Variations in a Danish Low Gradient Stream. *Oikos* 49: 149-155.

Johansson, L.S., Bjerring, R. & Søndergaard, M. 2014. Nyt dansk kiselalgeindeks til brug ved fastsøttelse af økologisk tilstand i søer. Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. xx, 37 pp. (in prep.)

Kristensen, E.A., Kronvang, B., Thodsen, H. & Rasmussen, J. 2009. Små og sårbare – livet i mindre vandløb i et fremtidigt klima. *Vand & Jord* 16: 153-156.

Kristensen, E.A., Baattrup-Pedersen, A. & Friberg, N. 2013. Summary report on the key ecological, functional and biodiversity responses to temperature changes upon management measures in rivers across Europe. REFRESH (Adaptive strategies to Mitigate the Impacts of Climate Change on European Freshwater Ecosystems), Deliverable 2.6. EU- SEVENTH FRAMEWORK PROGRAMME - THEME 6: Environment (including Climate Change).

Kristensen, E.A., Jepsen, N., Nielsen, J., Pedersen, S. & Koed, A. 2014. Dansk Fiskeindeks for Vandløb (DFFV). Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 95, 58 pp.

Kronvang, B., Iversen, H.L., Vejrup, K., Mogensen, B.B, Hansen, A.-M. & Hansen, L.B. 2003. Pesticides in streams and subsurface drainage water within two arable catchments in Denmark: Pesticide application, concentration, transport and fate. *Pesticide Research* 69, Danish Environmental Protection Agency, 141 pp.

Kronvang, B., Grant, R., Hoffmann, C.C., Ovesen, N.B. & Pedersen, M.L. 2006. Hydrology, sediment transport and water chemistry. Pp. 27-43 i: Sand-Jensen, K., Friberg, N. & Murphy, J. (red.), *Running Waters – Historical development and restoration of lowland Danish streams*. National Environmental Research Institute, Ministry of the Environment, Denmark, 159 pp.

Kronvang, B., Larsen, S.E., Lassen, J. & Müller-Wohlfeil, D.-I. 2008. Vandløb (stoftransport). I: Hansen, J.W., Nedergaard, M. & Skov, F. (red.) *IGLOO – Indikatorer for globale klimaforandringer i overvågningen*. By- og Landskabsstyrelsen, Miljøministeriet, 91 pp.

Lehtonen, H. 1996. Potential effects of global warming on northern European freshwater fish and fisheries. *Fisheries Management and Ecology*, 1996, 3, 59-71

Morrill, J.C., Bales, R.C. & Conklin, M.H. 2005. Estimating stream temperature from air temperature: implications for future water quality. *Journal of Environmental Engineering* 131, 139-146.

Naturstyrelsen 2014. Basisanalyse for Vandområdeplaner 2015-2021. Naturstyrelsen, Haraldsgade 53, 2100 København Ø, 41 pp.

Nielsen, A. 1950. The torrential invertebrate fauna. *Oikos* 2: 177-196.

Pedersen, M.L., Kronvang, B., Sand-Jensen, K. & Hoffmann, C.C. 2006. Lowland river systems – processes, form and function. Pp. 13-25 i: Sand-Jensen, K., Friberg, N. & Murphy, J. (red.), *Running Waters – Historical development and restoration of lowland Danish streams*. National Environmental Research Institute, Ministry of the Environment, Denmark, 159 pp.

Pedersen, N.L., Sand-Jensen, K., 2007. Temperature in lowland Danish streams: contemporary patterns, empirical models and future scenarios. *Hydrological Processes* 21, 348-358.

Pedersen, S.E. & Wiberg-Larsen, P. (red.) 1997. Den fynske vandløb. *VANDMILJØOVERVÅGNING*. Tema: Ferskvand. Fyns Amt, Natur- og Vandmiljøafdelingen, 250 pp.

Petersen, R.C., Gislason, G.M. & Vought, L.B.-M. 1995. Rivers of the Nordic countries. *Ecosystems of the World 22: River and Stream Ecosystems* (red. Cushing, C.E., Cummins, K.W. & Minshall, G.W.). pp. 295-341. Elsevier, Amsterdam.

Petersen, C.T., Nielsen, M.H., Hansen, S., Abrahamsen, P. & Koch, C.B. 2013. Undersøgelse af makroporekontinuitet ved markdræn og effekter af direkte forbundne makroporer på jords filterfunktion. *Bekæmpelsesmiddelforskning* nr. 144, Miljøstyrelsen.

Rasmussen, J.J., Baattrup-Pedersen, A., Wiberg-Larsen, P., McKnight, U.S. & Kronvang, B. 2011a. Buffer strip width and agricultural pesticide contamination in Danish lowland streams: Implications for stream and riparian management. *Ecological Engineering* 37: 1990-1997.

Rasmussen, J., Wiberg-Larsen, P., Baattrup-Pedersen, A., Juul Monberg, R., Kronvang, B. 2012. Impacts of pesticides and natural stressors on leaf litter decomposition in agricultural streams. *Science of the Total Environment* 416: 148-155.

Sand-Jensen, K. & Lindegaard, C. 2008. *Ferskvandsøkologi*. Gyldendal. 2. udgave.

Sand-Jensen, K., Frost-Christensen, H. 1998. Photosynthesis of amphibious and obligately submerged plants in CO₂-rich lowland streams. *Oecologia* 117, 31-39.

Solomon, K.R., Baker, D.B., Richards, R.P., Dixon, K.R., Klaine, S.J., La Point, T.W., Kendall, R.J., Weisskopf, C.P., Giddings, J.M., Hall, L.W. & Williams, W.M. 1996. Ecological risk assessment of atrazine in North American surface waters. *Environmental Toxicology and Chemistry* 15: 31-76.

- Sonnenborg, T., Jensen, K.H., Søgård, H., Friberg, T., Engesgaard, P. & Kidmose, J. 2009. Fremtidens vandressourcer i Danmark. *Geoviden* 2/2009: 2-15.
- Styczen M., Wiberg-Larsen, P. & Aagaard, A. 2003. Tag pulsen på pesticiderne i vandmiljøet. *Vand & Jord* 10, 84-87.
- Svenning, J.-C. 2002. A review of natural vegetation openness in north-western Europe. *Biological Conservation* 104: 133-148.
- Wiberg-Larsen, P. 1999. Lad os tage temperaturen på vandløbene. *Vand & Jord* 6: 158-160.
- Wiberg-Larsen, P., Windolf, J., Bøgestrand, J., Larsen, S.E., Thodsen, H., Ovesen, N.B., Kronvang, B. & Kjeldgaard, A. 2012. Vandløb 2011. NO-VANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 70 s. - Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 32. <http://www.dmu.dk/Pub/SR32.pdf>
- Wiberg-Larsen, P., Friberg, N., Baattrup-Pedersen, A. & Kristensen, E.A. 2012. Er miljøkvaliteten i vore vandløb forbedret? *Vand & Jord* 19: 65-68.
- Wiberg-Larsen, P., Kristensen, E.A., Friberg, N., Rasmussen, J.J. & Bjerregaard, P. 2013. Rangordning af vandløbssmådyrs tolerance over for miljørealistiske koncentrationer af pyrethroider. *Bekæmpelsesmiddelforskning fra Miljøstyrelsen* nr. 151, 71 pp.
- Wotton, R.S. 1995. Temperature and lake-outlet communities. *Journal of Thermal Biology* 20, 121-125.
- Ørum, J.E. & Samsøe-Petersen, L. (red.) 2013. Bekæmpelsesmiddelstatistik 2012 - Behandlingshyppighed og pesticidbelastning, baseret på salgsstatistik og sprøjtejournaldata. *Orientering fra Miljøstyrelsen* nr. 4, 2013, 114 pp.

4 Søer

4.1 Introduktion

4.1.1 Vandområdeplan 2015-21

I Vandområdeplan 2015-21 (basi-analysen, NST 2014) indgår i alt indgår 856 søer primært med en størrelse over 5 ha. I Vandområdeplan 2015-21 indgår også flere kvalitetselementer end klorofyl a (Tabel 4.1), som var det eneste kvalitetselement i første generation vandplaner.

Tabel 4.1. Oversigt over graden af målopfyldelse for en række kvalitetselementer i danske søer (NST,2014)

Tilstands- vurdering	Biologisk kvali- tets-element	Anvendt i antal søer/procent		Foreløbig miljømål opfyldt		Foreløbig miljømål ej opfyldt	
		Antal søer	% af alle	Antal søer	% af målsatte	Antal søer	% af målsatte
Søer	Klorofyl a	628	73	258	41	370	59
	Fytoplankton	84	10	17	20	67	80
	Makrofytter	334	39	120	35	214	65
	Fytobenthos	-	-	-	-	-	-
	Fisk	145	17	36	25	109	75
	Samlet	646	75	189	29	457	71
	Ukendt	210	25				

Der foreligger nu også EU-interkalibrerede værdier for undervandsplanter. For fisk, hvor EU-interkalibrering endnu ikke har fundet sted, anvendes et nationalt indeks som et foreløbigt vurderingsredskab. Tilstandsvurderingen kan dermed ændres frem mod vandområdeplaner 2015-21. Tilstandsvurdering baseret på klorofyl a anvendes både alene og som del af det samlede planteplankton-indeks, hvor der er et datagrundlag herfor. For klorofyl a anvendes samme metode som i første generation Vandområdeplaner. For planteplankton, undervandsplanter og fisk fremgår metoden af Søndergaard 2013a. I forbindelse med udarbejdelsen af vandområdeplanerne 2015-2021 skal det nærmere vurderes, om klorofyl-kriterieværdierne for god økologisk tilstand fra første generation Vandområdeplan fortsat skal anvendes som et selvstændigt grundlag for fastlæggelse af indsatsbehov for søer, hvor der ikke foreligger data for øvrige kvalitetselementer. Denne viden tilvejebringes gennem arbejdet med sømodeller, som er udarbejdet af DCE.

Der er i basianalysen til Vandområdeplan 2015-21 foretaget en vurdering af, hvorvidt der er risiko for, at en given sø ikke opfylder miljømålet i 2021 med allerede vedtagne initiativer, herunder indsatser forudsat i første generation Vandområdeplaner (Tabel 4.2). Risikoanalysen tager blandt andet udgangspunkt i det foreliggende udkast til første generation Vandområdeplaner, således at vurderingen er baseret på, at vandområder, hvor der planlægges for en fuld indsats inden 2015, forventes at nå målopfyldelse inden 2021, mens vandområder, hvor direktivets undtagelsesbestemmelser er anvendt, vurderes at være i risiko for ikke at nå målopfyldelse inden 2021, såfremt der ikke iværksættes yderligere foranstaltninger.

Klimabetingede ændringer i søernes næringsstofkoncentration som følge af ændringer i næringsstofførslen

Table 4.2. Vurdering af risikoen for forskellige kvalitetselementer ikke opfylder målsætningen i 2021 (NST, 2014).

Risiko for ikke at opfylde miljømål 2021	Biologisk kvalitets-element	Anvendt i antal søer/procent		Ikke i risiko for manglende målopfyldelse		I risiko for manglen de målopfyldelse	
		Antal søer	% af alle	Antal søer	% af målsatte	Antal søer	% af målsatte
Søer	Klorofyl a	640	75	304	48	336	52
	Fytoplankton	84	10	21	25	63	75
	Makrofytter	334	39	131	39	203	61
	Fisk	145	17	43	30	102	70
	Samlet	658	77	226	34	432	66
	Risiko for manglende målopfyldelse kan ikke vurderes	198	23				

Som beskrevet i kapitel 2 kan der forventes en øget næringsstofftilførsel til søerne i et fremtidigt varmere klima, og samtidigt ændres den hydrauliske opholdstid - begge faktorer som indvirker på søerne næringsstofniveau.

Der er tidligere foretaget en beregning af ændringer i totalfosfor og totalkvælstofindhold (TP, TN), som kan forventes i danske søer med forskellig opholdstid, og som er beliggende i oplande med forskellig jordbunds- og nedbørs-/afstrømningsforhold (Fig. 4.1, Jeppesen et al, 2009, 2011).

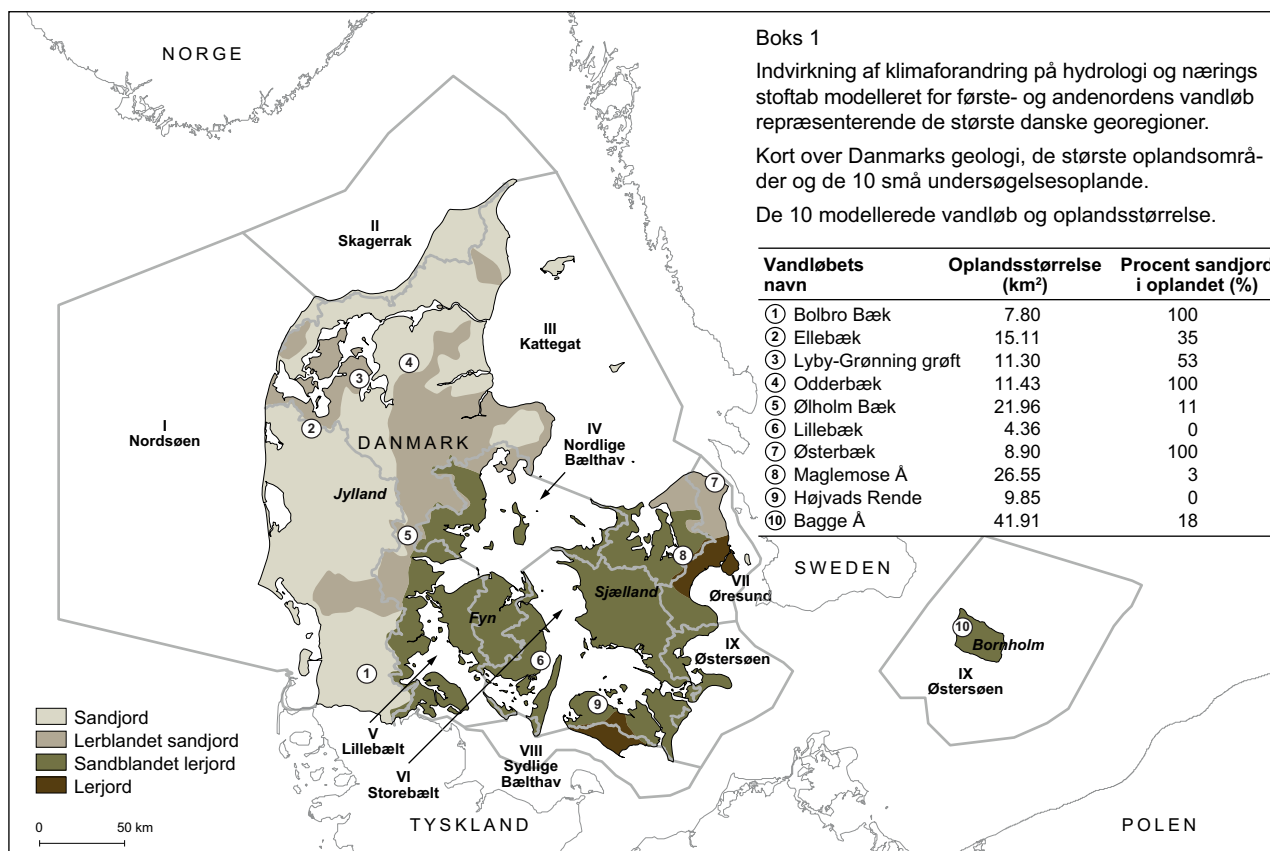


Figure 4.1. Kort, der viser 10 udvalgte oplande der dækker de vigtigste jordbundstyper og nedbørsområder i Danmark (Jeppesen et al., 2009)

Klimaberegninger i dette studie var baseret på ECHAM4/OPYC GCM (IPCC A2-scenariet), dynamisk nedskaleret til danske forhold med HIR-HAM RCM (25x25 km kvadrater) med 1961-1990 som kontrol periode og 2071-2100 som scenarie periode. De meteorologiske data er så brugt som input til NAM modellen (DHI, 2003). Den gennemsnitlig årlige afstrømning fra kontrolperioden (1961-1990) til scenarie periode (2071-2100) for de anvendte oplande forventes at blive øget markant (Tabel 4.3). Den største stigning er beregnet for Storebæltsområdet (20%) og det sydlige Bælthav (34%), mens den laveste stigning forventes for Kattegat området (9%) (Tabel 4.3, se også Andersen et al., 2006).

Tabel 4.3. Model resultater ved kørsel af NAM modellen visende vandafstrømning i en 30 års kontrolperiode (1961-1990) og i A2 scenariet for perioden (2071-2100) (Jeppesen et al, 2009).

Vandløbsnavn	Vandafstrømning	Vandafstrømning	Ændring i vandafstrømning	Forskel i vandafstrømning
	A2 scenarie periode (2071-2100)	Kontrolperiode (1961-1990)	mellem scenarie- og kontrolperiode	ning mellem scenarie- og kontrolperiode
		mm år ⁻¹		%
Bolbro Bæk	602	524	78	15
Ellebæk	325	275	50	19
Lyby-Grønning grøft	180	151	29	20
Odderbæk	226	191	35	18
Ølholm Bæk	391	344	47	14
Lillebæk	214	179	35	20
Østerbæk	81	71	10	14
Maglelose	90	83	7	9
Højvads Rende	188	141	47	34
Bagge Å	292	262	30	11

Effekterne heraf på de månedlige belastninger af TP og TN i de ni oplande blev beregnet på basis af statistiske modeller for sammenhænge mellem diffuse TP og TN tab fra oplandene til overfladevand og afstrømningen, procentdelen agerjord, sandjord og organiske jorder samt andelen af vådområder i oplandet (Jeppesen et al, 2009,2011). For fosfor beregnes en stigning i tabet af TP fra diffuse kilder på mellem 3,3-16,5% i de ni regioner i Danmark (Tabel 4.4, Jeppesen et al. 2009).

Tabel 4.4. Modelberegnete ændringer i den diffuse tilførsel af fosfor og vandføringsvægtede koncentration af fosfor in indløbsvandet til søer fra 9 kystregioner in Danmark i kontrolperioden (1961-1990) og i A2 scenariet for perioden 2071-2100 (Jeppesen et al, 2009).

	Fosfortab		Vandføringsvægtet fosforkoncentration	
	Kontrolperiode (1961-1990)	Scenarieperiode (2071-2100)	Kontrolperiode (1961-1990)	Scenarieperiode (2071-2100)
	Kg P ha ⁻¹		mg P L ⁻¹	
Nordsøen	0,343	0,365 (6,4 %)	0,078	0,074 (-5,1 %)
Skagerrak	0,240	0,258 (7,5 %)	0,070	0,066 (-5,7%)
Kattegat	0,291	0,302 (3,8 %)	0,089	0,087 (-2,2 %)
N. Bælthav	0,265	0,285 (7,5 %)	0,096	0,089 (0,089 %)
Lillebælt	0,334	0,345 (3,3 %)	0,101	0,097 (-4,0 %)
Storebælt	0,294	0,323 (9,9 %)	0,128	0,117 (-8,6 %)
Øresund	0,177	0,188 (6,2 %)	0,093	0,088 (-5,4 %)
S. Bælthav	0,236	0,275 (16,5 %)	0,127	0,110 (-13,4 %)
Østersøen	0,281	0,297 (5,7 %)	0,120	0,115 (-4,2 %)

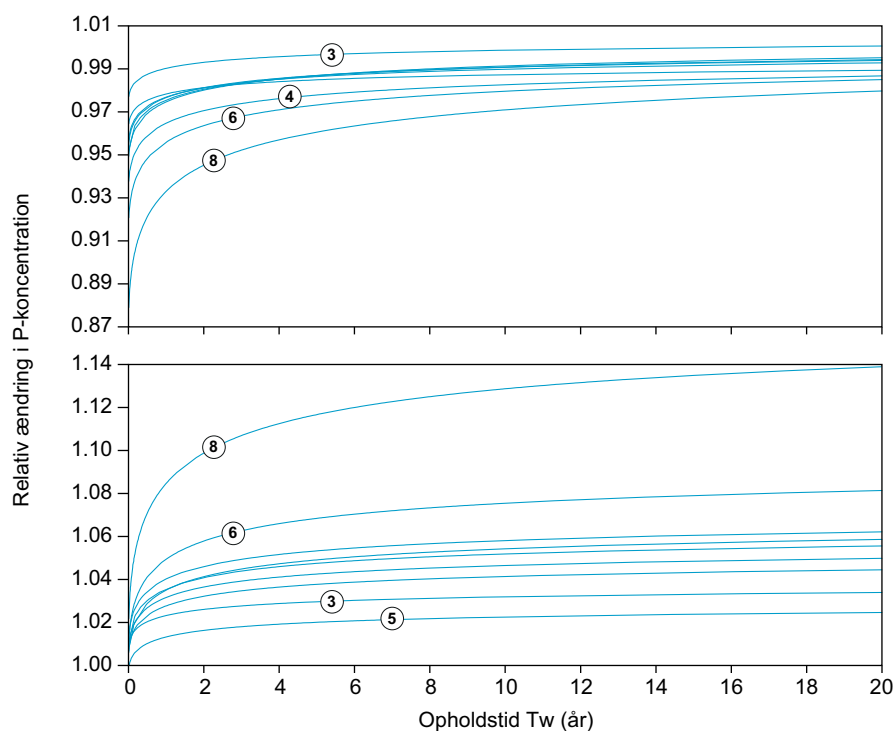
Ud fra disse tal er middel søkoncentrationen af TP på årsbasis for en række tænkte søer med forskellige opholdstid beregnet ud fra Vollenweieder modellen (OECD, 1982), der relaterer årsmiddel søkoncentrationen til den vandføringsvægtede årsmiddel indløbskoncentration og vandets gennemsnitlige opholdstiden (TW, år⁻¹) i søen:

$$P_{\text{lake}} = P_{\text{in}} / (1 + TW^{0.5})$$

Ligning 1

I Fig. 4.2 ses modelberegninger for tænkte søer i oplandet med forskellige opholdstider:

Figur 4.2. Øverst: relative ændringer i middel søkoncentrationer af fosfor fra kontrolperioden (1961-1990) til A2 scenarieperioden (2071-2100) beregnet med Vollenweieder ligningen (ligning 1) for søer med forskellig hydraulisk opholdstid baseret på de simulerede indløbskoncentrationer af totalfosfor (Tabel 6). Nederst: relative ændringer i tilbageholdelsen af P i søer for de samme søer. Tallene i figurerne refererer til numrene i Fig. 5..Der forefindes ikke nogen simulering for Bagge Å (nr. 10) (Jeppesen et al.,2009).



En lavere indløbskoncentration fører således til en lidt mindre søkoncentration ifølge Vollenweieder ligningen (Fig. 4.2 - øverst), men samtidig øges akkumuleringen af fosfor i søen pga. den øgede belastning, hvilket så igen kan give anledning til øget fosforfrigørelse om sommeren ved frigivelse fra søbunden (se næste afsnit) og dermed resultere i øget eutrofiering.

For kvælstof er der også tale om en samlet årlig stigning i tilførslen (Jeppesen et al, 2011). Tilførslen vil være størst i foråret (2.7 til 25%), men lavere end i dag sent på sommeren og i efteråret (op til 37% lavere) (Jeppesen et al, 2011).

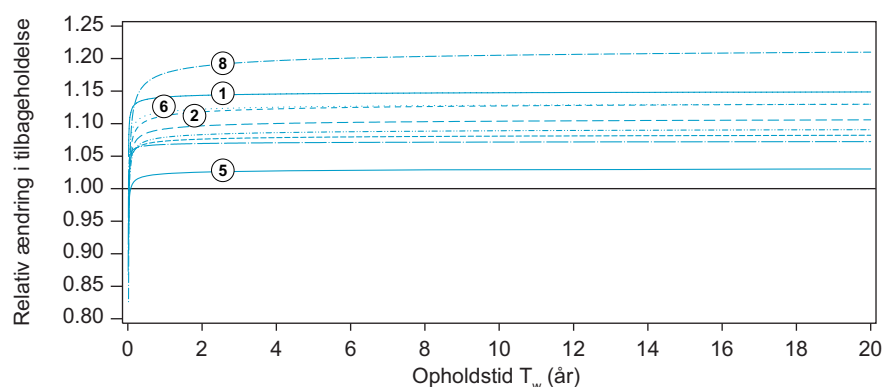
I søerne tabes N ved sedimentation og denitrifikation, og tabet er påvirket af den hydrauliske opholdstid (OECD, 1982; Lijklema et al., 1989), sødybde, trofisk struktur (Jeppesen et al., 1998) og temperatur (Windolf et al. 1996). Flere simple empiriske modeller er blevet udviklet til at beskrive tabsprocent på årsbasis (OECD, 1982; Bachmann, 1984; Saunders & Kalff, 2001) eller for forskellige sæsoner(Windolf et al., 1996) som en funktion af den eksterne N-belastning. En nylig opdateret årsbalancemodel for danske søer (Jeppesen et al., upublicerede data) er:

$$TN_{sø} = \exp(-0.80 \pm 0,08 (SE) 0,82 \pm 0,03 \log(TN_{ind}) + 0,13 \pm 0,03 \log(Z) - 0.20 \pm 0.02 \log(TW)), N = 295, r^2 = 0,76 \text{ (ligning 2)}$$

hvor TN_{ind} er vægtet årsgennemsnit indløbskoncentration, $TN_{sø}$ årsmiddelkoncentrationen i søen, Z middelværdien dybde (m) og TW den hydrauliske opholdstid (år).

Anvendes denne relation vil der kun ske mindre ændringer i søerne årsmiddelkoncentration (-1 % - 4 %, gennemsnit 1 %) i A2-scenariet, mens kvælstoftilbageholdelsen (herunder tab ved denitrifikation) generelt vil stige (3-21 %), mindre ved lave opholdstider (Fig. 4.3). I disse modelberegninger er effekter af ændringer i temperaturen dog ikke indregnet.

Figur 4.3. Relative ændringer i årsmiddelkoncentrationen af totalkvælstof fra kontrolperioden (1961-1990) til A2-scenarieperioden (2071-2100) beregnet vha. ligning (2) for søer med forskellig hydraulisk opholdstid og simulerede årsmiddelt af TN indløbskoncentrationer. Tallene i figuren refererer til numrene i Fig. 4.1 (Jeppesen et al, 2011)



Disse og andre beregninger peger på en øget eutrofiering af søerne i et varmere og vådere klima pga. øget tilførsel af næringsstoffer.

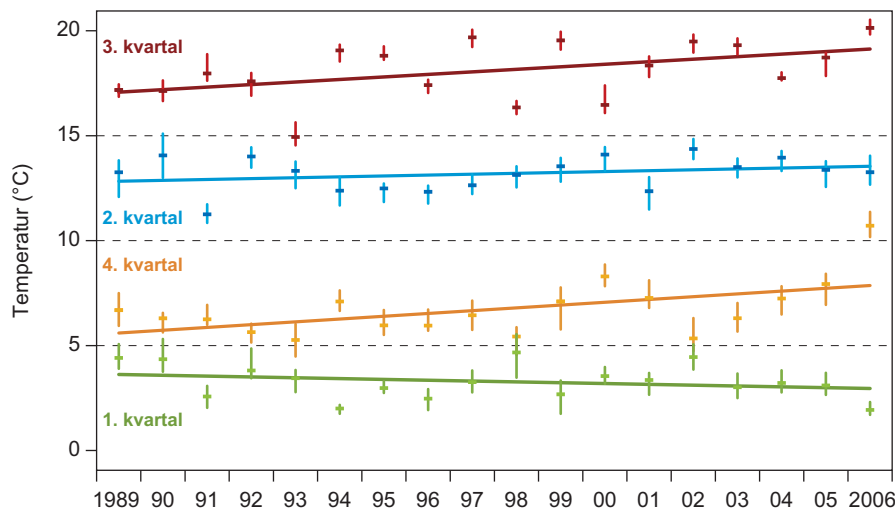
Klimaændringerne effekter på søernes temperatur og springlags dannelse

I takt med stigende lufttemperatur stiger vandtemperaturen også. Analyser af temperaturmålingerne har vist stigende temperaturer i overfladevandet siden overvågningsprogrammets start i 1989. Dette gælder både for lavvandede, mellemdybe og dybe søer. De største ændringer er sket i sommermånederne (3. kvartal), hvor vandtemperaturen i overfladevandet er steget omkring 2 °C i perioden 1989-2006. I efteråret (4. kvartal) er søerne også blevet varmere, hvorimod der har været et temperaturfald i vintermånederne betinget koldere vintre sidst i måleperioden (Fig. 4.4).

Vandtemperaturen er faldet i søerne i første kvartal i både overflade- og bundvand uanset dybde, areal eller vandsøjleens stabilitet (Naturstyrelsen 2009). I tredje kvartal har der været en markant forøget vandtemperatur i overfladen i alle søer uanset dybde, areal og vandsøjleens stabilitet. I bundvandet er der i denne periode væsentlige forskelle. I de små lavvandede søer med hyppig omrøring er temperaturen steget i samme omfang som i overfladen.

Generelt er der blevet større forskel på temperaturen i overflade- og bundvand i søerne, hvilket betyder, at søernes lagdeling er blevet mere stabil og lagdelingen ophører senere. Dette gælder såvel i lavvandede med springlag som i dybere søer. Nogle fuldt opblandede søer bliver også temporært lagdelte.

Figur 4.4. Den generelle temperaturudvikling i overfladen i de 20 intensivt overvågede søer fra 1989 til 2006 beskrevet ved 25 % (den lodrette stregs nederste punkt), 50 % og 75 % fraktiler (den lodrette stregs øverste punkt) for første, andet, tredje og fjerde kvartal (Naturstyrelsen, 2009)..



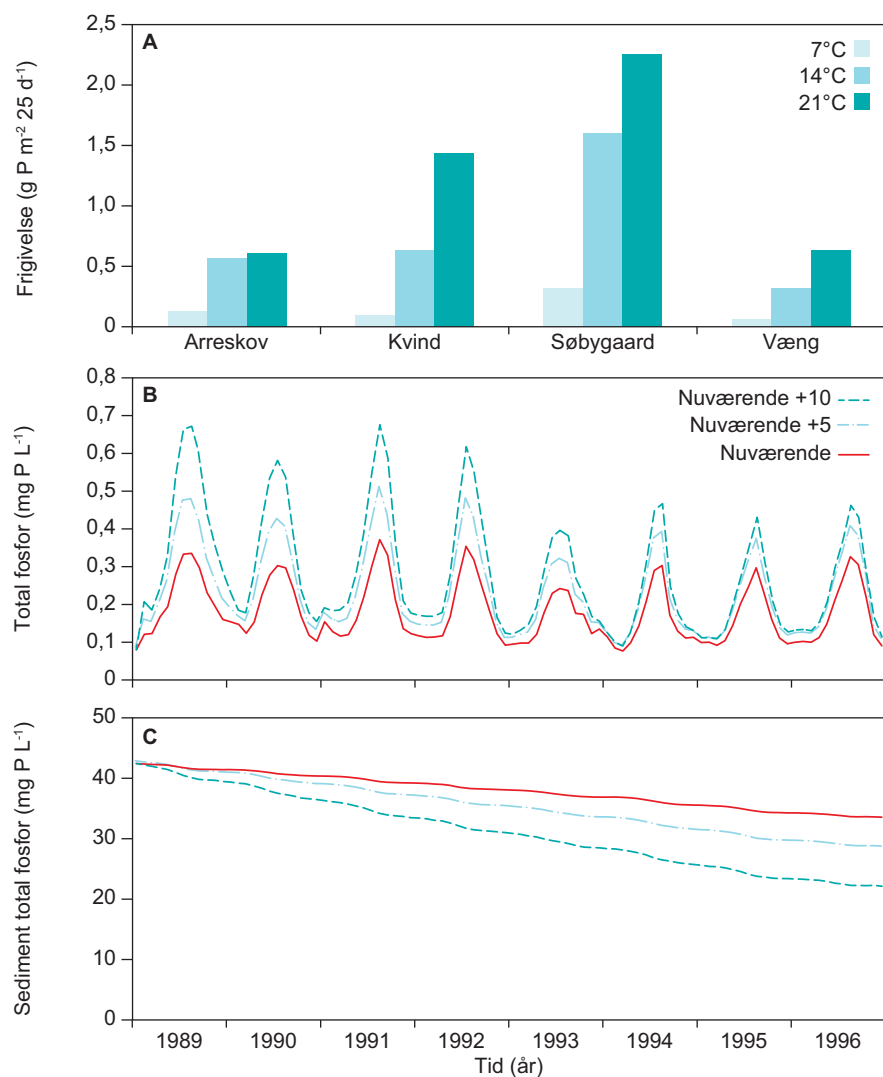
Den stigende vandtemperatur på op imod 2 °C på ca. 20 år – altså omkring 0,1 °C pr. år – påvirker ilt- og omsætningsforhold. Iltforbruget bliver større, og med et reduceret iltniveau vil fosforfrigivelsen stige. Ændringer i søens interne processer kan altså have en eutrofierende effekt på søerne i form af intern frigivelse af fosfor. Springlagets placering i vandsøjlen har betydning for udbredelsen af den zone under springlaget, som er potentielt iltfri. Et højere liggende springlag vil forøge denne zone, et dybereliggende lag vil gøre zonen mindre. Springlagets stabilitet påvirker imidlertid også omfanget af iltvind. Bedømt ud fra data fra de danske søer er der en tendens til, at springlaget nu ligger dybere end tidligere og dermed, at den iltfrie zone er blevet mindre. Samtidigt er springlaget dog blevet mere stabilt, hvilket betyder, at den omrøring, som tidligere tilførte iltfyldt vand til bunden, nu er mindre hyppig og dermed, at sandsynligheden for iltmangel ved bunden er blevet større. Det betyder større fosforfrigivelse fra søbunden i de næringsrige dybe søer.

I de lavvandede, fuldt opblandede og næringsrige søer vil temperaturstigningen umiddelbart forplante sig til søbunden, og det vil betyde en øget frigivelse af fosfor fra bunden, fordi den biologiske aktivitet i søbunden øges. Frigivelsen fra søbunden om sommeren vil yderligere forstærkes af, at der i vinterhalvåret sker en større ophobning på bunden, fordi fosfortilførslen i denne periode vil blive større.

Laboratorieforsøg har vist øget fosforfrigivelse fra søbunden med højere temperatur (Fig. 4.5) med højere fosforkoncentration i søerne som resultat (se modelkørsler i Fig. 4.5 for Dons Sø).

Eksperimenter i damme i England viste ligeledes øget fosforfrigivelse fra bunden med øget temperatur (Mckee et al., 2002). Disse resultater passer godt med prognoser, som er foretaget med fosformodeller for lavvandede danske søer (Jensen et al., 2006) og massebalance (Søndergaard et al, 2013), som viser, at fosforfrigivelsen øges med øget temperatur i næringsrige søer. Modelresultaterne peger endvidere på, at søerne som beskrevet ovenfor hurtigere kommer af med overskudspuljen i sedimentet efter en reduktion i belastningen. Men selv når søerne er i ligevægt med den aktuelle tilførsel, vil fosforkoncentrationen i søerne ifølge modelresultaterne være højere om sommeren, end tilfældet er i dag.

Figur 4.5. Laboratorieeksperimenter, der viser frigivelsen af fosfor (P) i korterevarende eksperimenter ved tre forskellige temperaturer i fire lavvandede danske søer (efter Jensen & Andersen, 1992) (A). Simulerede ændringer i P i lavvandede Dons Sø (afvandingsområde: 24 km²), overfladeareal: 0,36 km²; Z_{max}: 1,5m; Z_{mean}: 0,9 m) efter en reduktion af næringsstofbelastningen i perioden 1989-1996; visende P koncentrationer (B), og ændring i P-puljen i de øvre 20 cm af sedimentet (c) under tre temperaturscenarier (den aktuelt målte temperatur og 5 og 10°C højere) ved brug af en simpel model udviklet for lavvandede danske søer (Jensen et al., 2006) med mindre justeringer, inklusive permanent aflejring i sedimentet (Jeppesen et al, 2010b).



4.1.2 Biologiske forhold

For at vurdere effekter af ændringer i temperaturen har vi analyseret, hvordan de biologiske samfund i danske søer er relateret til temperaturen, når også næringsstofniveauet og søens dybde inddrages. Dette har vi gjort via multiple regressionsanalyser af data fra mere end 250 danske søer og 800 sø-år. Udgangspunktet har været modellen:

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

(ligning 3)

hvor TP og TN er indholdet af totalfosfor og totalkvælstof i søvandet, DYBDE er middeldybden, og TEMP er temperaturen i overfladevandet (Jeppesen et al., 2010a,b).

Overvågningsdata har i andre studier været anvendt til at beskrive, hvordan ændringer i temperaturen kan påvirke planktonet i søerne. Tidsserierne er dog ikke perfekte til dette formål, fordi de er etableret for at vurdere effekterne af ændringer i næringsstofftilførslen, som påvirker plankton. Desuden er der siden 1989 sket meget markante ændringer i næringsstofniveau (Søndergaard et al., 2002 & 2005) og i planktonet (Jeppesen et al., 2002 & 2005a) som følge af belastningsreduktionen. Det er derfor vanskeligt helt at adskille

effekter af små ændringer i temperaturen fra store ændringer i næringsstoffiltførslen. Men på sigt er tidsserierne unikke og vil kunne give helt uvurderlige og mere præcise vurderinger af effekten af klimaændringer og samspillet mellem klimaeffekter og næringsstoffeffekter.

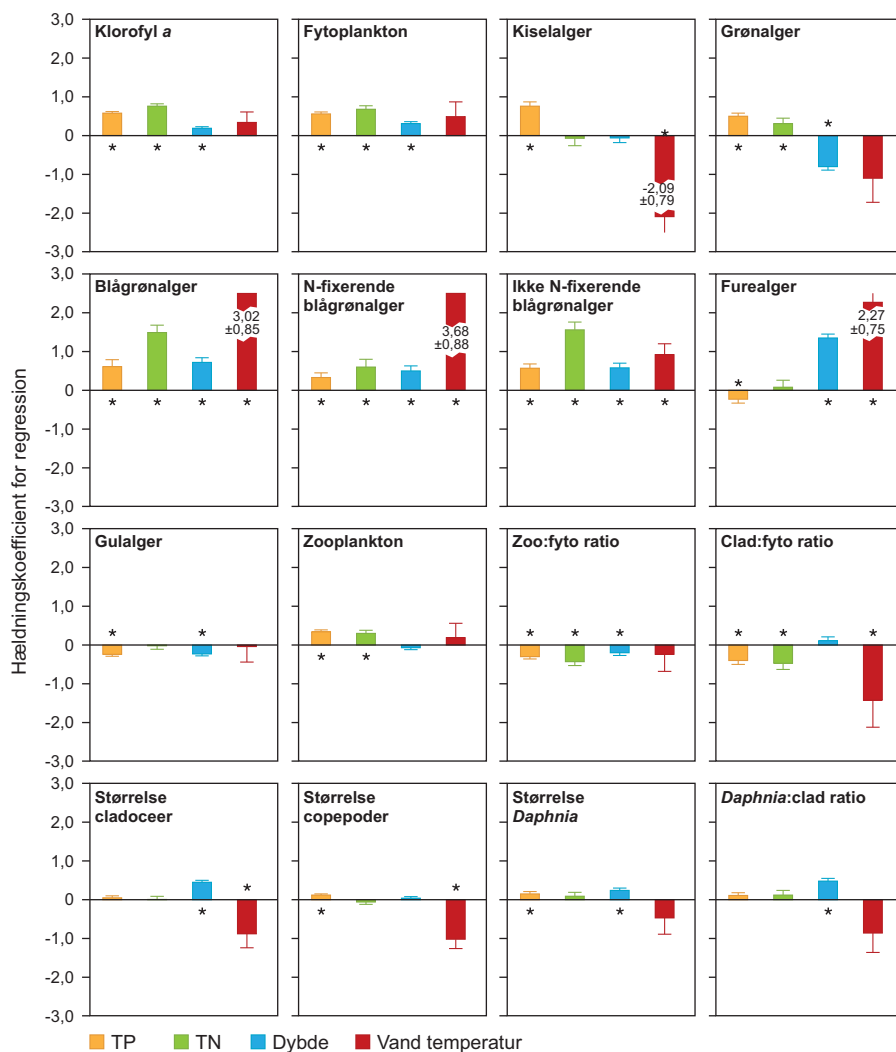
4.1.3 Planteplankton

En analyse af data fra højsommeren (august) (Fig. 4.6, Jeppesen et al., 2010a,b) viser, at mens der er en relativ beskeden effekt af temperaturen på klorofyl a og planteplanktonets biovolumen (biomasse), er der stor effekt af ændringer i temperaturen på planteplanktonets sammensætning. Især kiselalger, men også grønalger, er negativt relateret til stigende temperatur, mens blågrønalger og furealger er stærkt positivt relateret til temperaturen. Der er tale om meget markante effekter af temperaturen på disse sidstnævnte planteplanktonklasser, og blandt blågrønalgerne er især de kvælstoffikserende blågrønalger følsomme over for temperaturændringer i august. Vi kan altså forvente markante ændringer i planteplanktonet, når det bliver varmere – blandt andet en større dominans af blågrønalger. Samtidigt mindskes græsningen på planteplanktonet, fordi dyreplanktonet ændres i retning af mindre arter, som ikke så let kan græsse på de store alger, såsom blågrønalger. Både størrelsen af vandlopper (copepoder) og dafnier (cladoceer) og andelen af de store og effektive græssere af slægten *Daphnia* blandt dafnierne mindskes med øget temperatur, ligesom dyreplankton:planteplankton biomasse-ratioen og ikke mindst cladoceer:planteplankton biomasse-ratioen bliver mindre (dog ikke alle signifikante) (Fig. 4.6). Vi får altså mindre og færre dafnier per enhed af planteplankton og dermed ringere græsningskapacitet i højsommeren.

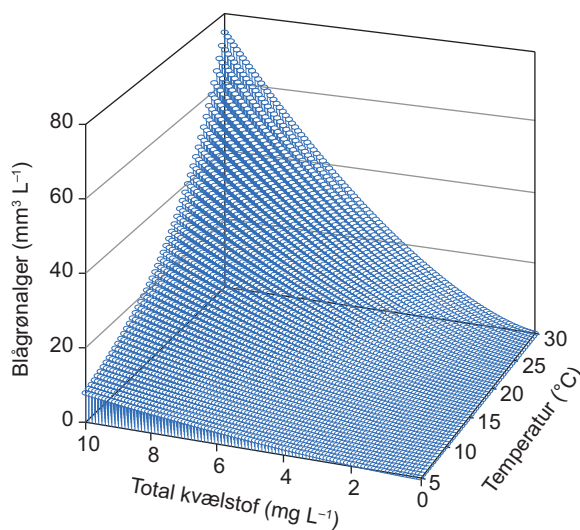
Flere næringsstoffer, færre store græssere og højere temperaturer giver øget blågrønalgevækst og der er tale om synergistiske effekter mellem næringsstof og temperatur, så temperatureffekten er størst ved højt næringsstofniveau (Jeppesen et al, 2011, Moss et al, 2012). Effekten af temperaturen og indirekte også græsning er illustreret i Fig. 4.7 for en typisk dansk sø (3 m dyb og TP på $100 \mu\text{g P L}^{-1}$). I den typiske danske sø fører den anvendte temperaturstigning ved slutningen af dette århundrede til en 30-40 % forøgelse i biomassen af blågrønalger og en markant øget varighed af høje koncentrationer. Dertil kommer effekten af øget tilførsel af næringsstoffer.

For udvalgte biologiske variable er der gennemført en tilsvarende analyse af data fra hele året, hvor regressionerne er gennemført på månedsbasis. Klorofyl a stiger med temperaturen fra februar til november undtagen i maj, hvor den aftager (Fig. 4.8). Der kan altså forventes flere alger og mere grumset vand ved et givet fosfor- og kvælstofniveau, når temperaturen stiger i denne periode. Størst positiv effekt ses i marts og september. I maj bliver vandet derimod mere klart, og det kan forklares ved ændringer i dyreplanktonet og specielt dafnie-slægten *Daphnia*. I et varmere klima vil der derfor det meste af sommeren være færre og mindre algegræssere og dermed ringere naturlig kapacitet til at holde algevæksten nede.

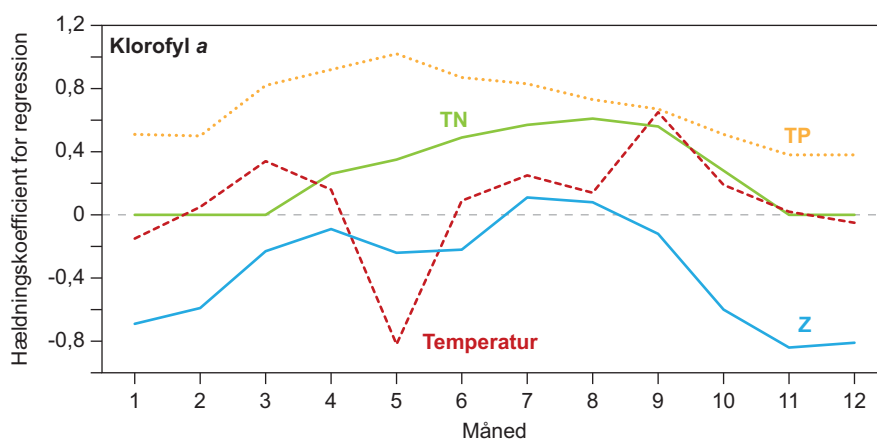
Figur 4.6. Multiple regressioner mellem forskellige planktonvariable (logetransformerede) og totalfosfor, totalkvælstof og vandtemperaturen i overfladelaget samt søens middeldybde – alle loge-transformerede. Når værdien er positiv, er der en positiv effekt af en given variabel (når de øvrige variable også er inkluderet) og omvendt hvis negativ. Alle data er fra august. Signifikante værdier er angivet med *. (Jeppesen et al., 2008).



Figur 4.7. Blågrønalger. Totalkvælstof. Temperatur. Ændringer i biomassen af blågrønalger i august måned i relation til ændringer i temperatur og totalkvælstof for en 3 m dyb sø, med TP indhold på 100 ug L⁻¹. Resultaterne er baseret på empiriske modeller (Jeppesen et al, 2011).



Figur 4.8. Multiple regressioner (på månedsbasis) mellem klorofyl a på den ene side og totalfosfor, totalkvælstof og vandtemperaturen i overfladelaget samt søens middeldybde – alle loge-transformerede. Figuren viser hældningskoefficienterne for de fire variable. Når værdien er positiv, er der en positiv effekt af en given variabel (når de øvrige variable også er inkluderet) og omvendt, hvis den er negativ.



4.1.4 Simuleringer af Engelsholm Sø og Søbygård Sø

Et alternativ til de empiriske modeller er de komplekse dynamiske modeller, som kan give mere detaljerede beskrivelser af dynamiske sammenhænge. For Engelsholm Sø er der opstillet tre komplekse dynamiske modeller (PCLake, DYRESM-CAEDYM og PROTECH). Klorofyl a, biomassen af blågrønalg og deres andel af planteplanktonet er beregnet både med de enkelte modeller og som gennemsnit i forskellige scenariosituationer (Trolle et al., 2014). Antallet af dage, hvor WHO's kritiske grænse for blågrønalg i drikkevand på 50 mg m^{-3} overskrides, øges markant fra 8 dage til 27 dage.

For Søbygård sø er PCLake opstillet og kalibreret på et omfattende dataset (Rolighed et al., indsendt), og herefter er et stort antal scenariekørsler gennemført med effekter af øget temperatur med og uden ændringer i den eksterne belastning med N og P og med og uden intern P belastning. En temperaturforøgelse på 6°C vil betyde en 65% forøgelse i klorofyl a. Endvidere vil fiskebestanden ændres mod større andel af små fisk og zooplankton:phytoplankton ratioen (udtryk for græsningskapaciteten) vil mindskes. Der vil kræves en 60% reduktion i tilførslen af N og P for at opnå samme klorofyl a koncentration som i dag. Nyere simuleringer på tre danske søer peger ligeledes på, at der skal ske tilsvarende markante reduktioner i næringsstofftilførslen i 6°C scenariet for at nå samme klorofylniveau som i dag (Trolle et al, i trykken).

4.1.5 Fisk og effekter på dyreplankton

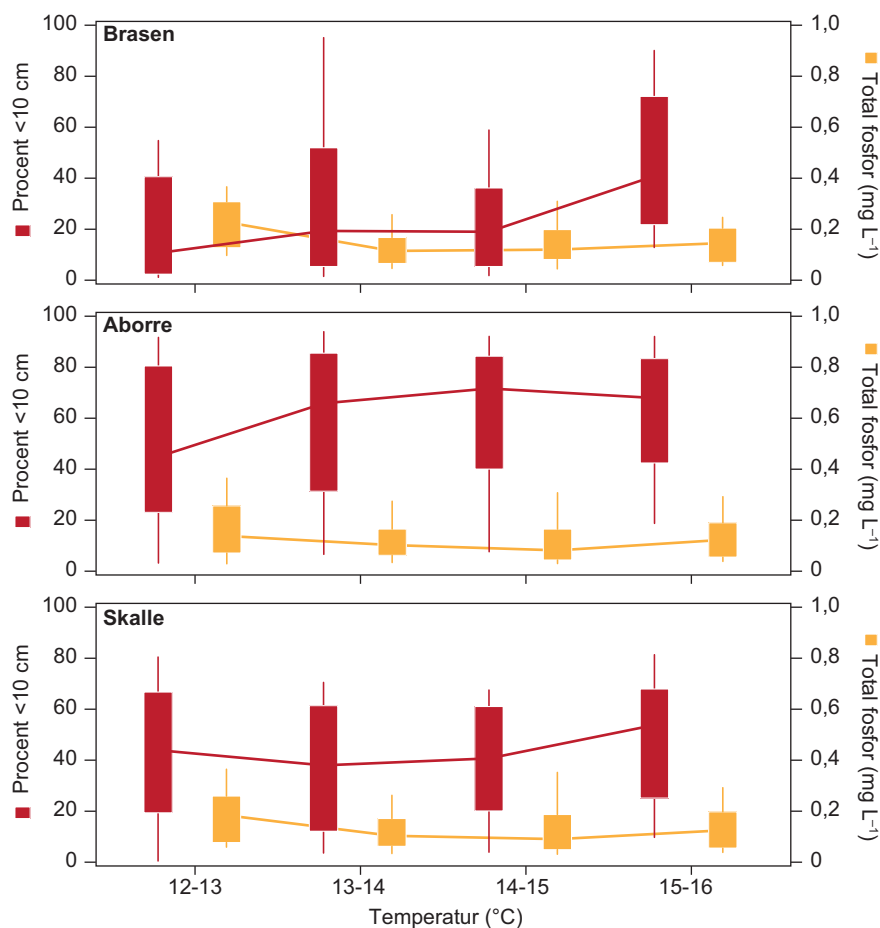
Fiskebestanden vil blive berørt af klimaændringer. Analyser af data fra en lang række lavvandede søer i Europa i EU-projekterne BIOMAN og ECOFRAME tyder på, at en opvarmning på sigt måske vil betyde en øget artsrigdom af fisk i danske søer, og der vil være en større risiko for indvandring af eksotiske arter. De arter, der dominerer, vil opnå en større årlig tilvækst pga. den højere temperatur og den længere vækstsæson og bliver tidligere kønsmodne. Den øgede temperatur fremmer karpes fisk som skalle og brasen. Dertil kommer, at arter af karpe må forventes at brede sig i danske søer, og at der oftere vil være gydesucces på grund af den højere temperatur. Når de forekommer i stort antal, har karpen ligesom brasen en betydelig negativ effekt på søernes tilstand, bl.a. fordi de via fødesøgningen ophvirvler næringsstoffer og sediment, som fremmer en uklar tilstand.

Blandt rovfiskene vil sandart nok blive mere udbredt på bekostning af gedde, og især sø-ørred og aborre. Ål er den kommercielt mest interessante ferskvandsfisk. Dens vækst vil nok øges med en øget temperatur, men da den samlede ålebestand i dag især er begrænset af tilgangen af glasål, kan man næppe forvente en øget produktion. De europæiske projekter omtalt ovenfor og eksperimenter i et andet EU-projekt, SWALE, peger ligeledes på, at fiskebestanden med øget opvarmning i højere grad end i dag vil blive domineret af omnivore ("altædende") arter, mens rovfiskenes andel vil aftage, og dermed mindskes kontrollen på byttfisk, som æder dyreplankton. Det betyder så igen et større pres på dyreplanktonet, som kommer til at bestå af mindre arter, og græsningen på det mikroskopiske planteplankton aftager, hvorved vandet bliver mere uklart.

Analyser af fisk langs geografiske længdegradienter i Europa (Lappalainen et al., 2008; Jeppesen et al., 2012b) peger ligeledes på, at fisk af en given art (fx skalle og aborre) er mindre, når de som følge af øget temperatur gyder tidligere og lever kortere. Resultaterne fra kølevandspåvirkede polske søer (Wilkonska, 1988) giver samme indtryk. Dette underbygges også af komparative undersøgelser af søer langs en nord-syd gradient. Små fisk dominerer i mange syd-tempererede og subtropiske søer. Det betyder større prædationstryk på dyreplankton, da fødeindtag per biomasse stiger markant med aftagende størrelse. Dertil kommer, at flere fisk bliver omnivore (altædende), og en del spiser alger på bunden og på planternes overflade. Resultaterne fra de danske søer stemmer med en breddegrad gradient undersøgelse fra Gyllström et al. (2005) af lavvandede europæiske søer, der viste, at forholdet mellem fiskenes biomasse (udtrykt som fangster pr. net i gællenet med et varieret maskestørrelse) til dyreplanktonbiomasse er steget fra nord til syd, og at dyreplankton:planteplankton biomasse-forholdet er faldet, begge betydeligt. Ved højere breddegrader er fiskearter ikke kun større som helhed, men vokser langsommere, kønsmodnes senere, har længere levetid og afsætter mere energi til reproduktion end populationerne på lavere breddegrader (Blanck & Lammouroux, 2007). Selv inden for arterne ses sådanne ændringer langs en breddegradsgradient (Blanck & Lammouroux, 2007; Jeppesen et al., 2010a).

Data fra de danske søer peger også på, at andelen af små individer (< 10 cm) af både aborre og ikke mindst brasen øges, når sommertemperaturen stiger, mens der ikke er noget entydigt billede for skalle (Fig. 4.9). Denne ændring ses på trods af, at TP-niveauet er faldet i måleperioden (Fig. 4.9). Ser vi bort fra temperaturen, skulle vi derfor forvente den modsatte respons, da andelen af små fisk typisk falder med aftagende TP (Jeppesen et al., 2000). I Søbygaard sø, hvor fiskebestanden har været fulgt i en årrække, er størrelsen af fiskene også mindsket i takt med en øget temperatur og på trods af et fald i næringsstofniveauet (Jeppesen et al., 2012b). Man kan således sige, at de forbedringer, som kan forventes ved at nedsætte næringsstofførslen, mere end modvirkes af en stigning i temperaturen.

Figur 4.9. Boxplot (median, 10, 25, 75, 90 % percentiler) af andelen af fisk <10 cm fanget med gællenet med varierende maskestørrelse i en række danske søer i perioden 1989-2006 fordelt på år med forskellige middeltemperaturer fra maj til juli. Vist er også et boxplot af den gennemsnitlige sommerkoncentration af totalfosfor i søernes overfladevand. I en multipel regressionsanalyse bidrog lufttemperaturen ($p < 0,01$) signifikant til andelen af små brasen ($n=137$), lufttemperatur ($p < 0,04$) og TP ($p < 0,003$) til andelen af små abborer ($n=238$) og kun TP ($p < 0,0004$) til andelen af små skaller ($n=235$) (Jeppesen et al., 2009)



En kortere periode med isdækning vil ydermere betyde større overlevelse af fisk i næringsrige søer, fordi de nu ikke udsættes for vinterudtynding af bestanden, fx. på grund af dårlige iltforhold under isen. Dette vil betyde forværring af tilstanden i næringsrige søer. Dette illustreres meget godt af overvågningsresultater fra danske søer, som viste en forbedring i tilstanden i mange søer i 1996 efter en lang isdækningsperiode i vinteren 1995-96 (Bailly et al., 2010). Forbedringen var sammenfaldende med en øget koncentration af store dafnier, formentlig fordi prædationstrykket fra fiskene var mindre. Det understøttes også af et komparativt studium af danske og canadiske lavvandede søer, hvor de canadiske søer er langt mere klarvandede end de danske søer med samme næringsstofniveau, simpelt hen fordi der under langvarigt isdække i de canadiske søer sker en markant udtynding eller elimination af fiskebestanden. I en finsk sø (Ruuhijärvi et al., 2010) forekom lignende resultater af fiskedød om vinteren. Med højere vintertemperaturer kan vi derfor forvente, at næringsrige søer alene af den grund vil blive mere uklare, end tilfældet er i dag. Dertil kommer de andre effekter af opvarmningen som beskrevet i de forrige afsnit som peger i samme retning.

4.1.6 Undervandsplanter

Undervandsvegetations vækst er især betinget af tre faktorer: næringsstoffer, lys og temperatur. Under næringsfattige forhold er væksten især styret af næringsstoffer og ved meget næringsrige betingelser især af lys, det sidste som følge af skygning fra alger, som vokser på planternes overflade eller i vandet. Ved middelhøje næringsstofkoncentrationer er der optimale vækstbetingelser (Wetzel, 1982). Desuden kan varigheden af isdækket formentlig spille en rolle. I moderat næringsrige og næringsfattige søer, som ikke er alt

for vindeksponerede, vil isfrie forhold muliggøre, at bundplanterne danner overvintrende bestande. Det vil alt andet lige (se dog nedenfor) forbedre disse planters konkurrencebetingelser over for planteplankton i den kritiske forårsperiode, og da høj tæthed af bundplanter normalt er forbundet med klart vand, vil bedre konkurrencebetingelser for bundplanterne være ensbetydende med en bedre sigtbarhed i vandet.

En højere temperatur øger dog risikoen for, at trådalger bliver dominerende på bekostning af de større bundplanter, som det fx er set i kølevandsbassiner ved Forsmark (Sandström, 1990) og til dels i forsøg i opvarmede tanke (Trochine et al, 2011). Risikoen vil være størst i bundplanterige søer med højt næringsstofniveau. Øget kvælstoftilførsel kan betyde øget dominans af trådalger (James et al., 2005), men kan også føre til et skift til en uklar tilstand med meget planteplankton, hvis fosforkoncentrationen er tilstrækkeligt høj. Nye undersøgelser i danske søer peger således på, at undervandsplanter typisk forsvinder, hvis kvælstofkoncentrationen overstiger 1,2-2 mg N l⁻¹ i søvandet om sommeren, hvilket formentlig kan tilskrives en øget vækst af planteplankton og alger på planternes overflade, som medfører, at undervandsplanterne skygges væk.

Risikoen for indvandring og dominans af eksotiske arter må forventes at øges. Det sidste understøttes af eksperimenter i England, hvor den eksotiske undervandsplante *Lagosiphonia* til dels fortrængte de hjemmehørende arter ved en 3 °C opvarmning. Mildere vintre betyder som nævnt også øget overlevelse af fuglebestanden, og det vil kunne øge græsningstrykket på undervandsplanter (knopsvaner, blishøns) med større risiko for, at klarvandede søer med undervandsplanter skifter til den uklare, algedominerede tilstand.

Undervandsplanter har stor indflydelse på vandets klarhed i danske søer. Når der er mange undervandsplanter til stede, er vandet klart. Der er mange grunde hertil. Planterne konkurrerer med planteplanktonet om næringsstoffer, de mindsker risikoen for og omfanget af resuspension af bundmateriale, og de forbedrer levevilkårene for rovfisk, som så bedre kan kontrollere bytdefiskene. Dermed bedres vilkårene for dyreplankton, som græsser på planteplanktonet, fordi færre bliver ædt af fisk. Men planterne virker også som skjulested for dyreplankton i dagtimerne. Dermed kan de opretholde en høj tæthed, med øget græsning på planteplankton til følge.

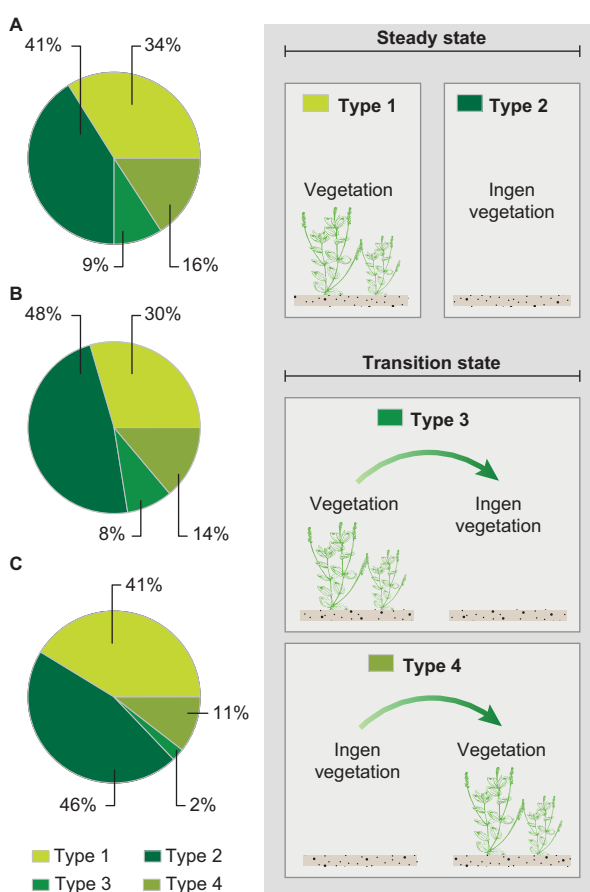
Men der er dog klare indikationer på, at undervandsplanternes samlet set påvirkes negativt af opvarmning. Det skyldes dels den forventede øget eutrofieringen, som er omtalt ovenfor, men også at planterne mister noget af deres refugievirkning, når det bliver varmere. Således har sammenlignende studier i søer i Uruguay og Danmark vist, at der er 5-10 gange flere fisk i vegetationen i søer i det varmere Uruguay end i Danmark (Meerhoff et al., 2007). Det betyder øget prædation for dyreplankton, som nu ikke længere kan gemme sig i vegetationen i dagtimerne. Effekten er, at græsningen på planteplankton mindskes, og vandet bliver mere uklart. Meget tyder på, at med en opvarmning vil undervandsplanterne miste noget af den styrke, de har til at holde vandet klart. Endvidere er der ringere skjulemuligheder for dyreplankton i vegetationen, fordi de små fisk også optræder her. Vi kan altså forvente, at med et gradvist varmere klima vil det blive sværere at opnå klart vand i danske søer.

4.1.7 Arreskov sø- eksempel på mellem plante og planteplankton dominans

For Arreskov sø er den dynamiske model PCLake anvendt, og der er foretaget en multipel kalibrering af modellen (Nielsen et al., 2014), som giver mulighed for at vurdere sandsynligheden for at en given tilstand opnås. Fire typer optræder, plantedomineret, planteplanktondomineret og skift fra plante til planteplankton og omvendt.

Resultaterne viser, at sandsynligheden for at være i den uklare tilstand stiger fra 41 til 48% ved en stigning på 2°C relativt til i dag (Fig 4.10A,B). Ved en 6°C stigning i temperaturen er sandsynligheden meget lavere, og her skal der ske en betydelig reduktion i næringsstofftilførselen (ca. 75%) for at opnå høj sandsynlighed for dominans af undervandsplanter og dermed klart vand (Fig. 4.10C).

Figur 4.10. Andelen af fire adskilte søtyper omfattende to stabile typer (1 og 2) med og uden undervandsplanter i alle de simulerede år og to overgangstyper (3 og 4), der udviser enten en markant reduktion af vegetationsdækket eller en markant stigning i vegetationsdækket mellem to tilstødende år. Disse søtyper er hentet fra modelsimuleringen PCLake, hvor modellen pga. mange sæt af parameterværdier producerede forskellige mulige simuleringer af sø-økosystemet i Arreskov Sø (Nielsen, 2014). De nuværende forhold er beskrevet i A) mens (B) repræsenterer den nuværende næringsstoffbelastning til søen, med en 2°C temperaturstigning i forhold til de nuværende klimatiske forhold og (C) en reduktion på 75% af den nuværende næringsstoffbelastning med en 6°C temperaturstigning (Nielsen, 2013).



4.1.8 Hvordan påvirkes kvalitetsindeksene for søer

Som det fremgår af ovenstående, peger resultaterne entydigt på, at det bliver sværere at opnå og/eller opretholde mindst god kvalitetsstatus for de danske søer i et fremtidigt varmere og vådere klima.

Klorofyl a vil øges, og dermed mindskes vandet klarhed (sigtdybden). Der bliver større risiko for opblomstring af blågrøn alger om sommeren, og perioden med dominans af disse alger, som kan være potentielt toksiske øges, hvilket kan betyde hyppigere og længevarende badeforbud, ligesom vandet egnethed som drikkevand mindskes. Klorofyl a og blågrøn algedominans er to af de biologiske kvalitetselementer i VRD.

Der er større risiko for helt at tabe undervandsplanterne i søer, som ligger tæt på grænsen mellem moderat og god, og hvis de forbliver i søen, mindskes deres dybdegrænse fordi vandet bliver mere grumset. Det betyder mindre udbredelse af undervandsplanter i søerne i areal og volumen. Dybdegrænsen er et af kvalitetsmålene i VRD. Alle fører til nedklassificering af tilstanden.

Fiskebestanden ændres i retning af mere varmetolerante arter og andel af rovfisk mindskes. Desuden må gennemsnitsstørrelse af fiskene forventes at blive mindre, mens den samlede biomasse formentlig er uændret eller øget. Andelen af rovfisk og gennemsnitsstørrelsen af fisk er to af de kvalitetsindices, som indgår i vurderingen af fisk i relation til VFD. Begge forringes.

Der er meget lidt information tilgængelig omkring makroinvertebrater og bentiske algers respons i søernes littoralzone på klimaændring. Men en forventet øget eutrofiering og en mindsket udbredelse af undervandsplanter vil alt andet lige betyde, at de indices, som er under udvikling, vil vise en forværret tilstand i søerne i takt med klimaændringerne.

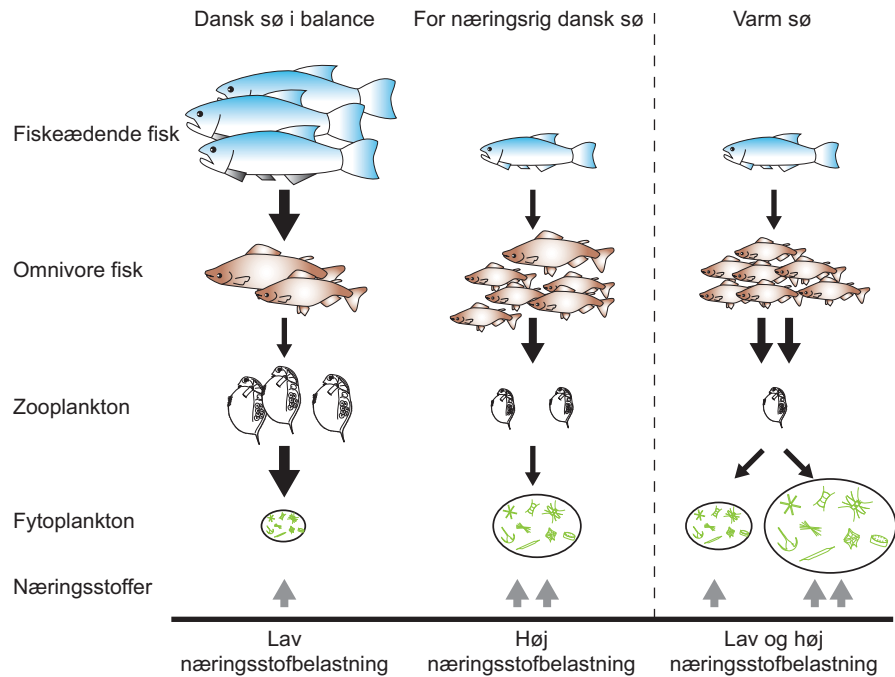
Stort set alle biologiske indices som anvendes eller tænkes anvendt i den nærmeste fremtid vil derfor pege i retning af en ringere tilstand i søerne i et fremtidigt varmere og vådere klima.

4.2 Konklusioner og implikationer

Både analyser af de danske data og data indsamlet langs geografiske klimagradienter peger på, at der vil ske en forværring af tilstanden i de danske søer i takt med den globale opvarmning. Dels øges næringsstofftilførslen fra oplandet til søerne og fosforfrigivelsen fra søens bund, dels sker der forandringer i fødekæden i retning af færre rovfisk, flere og mindre byttedyr med negativ virkning på zooplankton og deres græsningskapacitet. Resultatet er flere alger, som også i højere grad vil blive domineret af potentielt giftige blågrønalger, hvis forekomst varer længere end i dag. Hyppigere og længerevarende badeforbud må derfor påregnes for en række søer. Undervandsplanterne dybdegrænse må påregnes at blive reduceret. Søerne bliver mere følsomme over for tilførsel af næringsstoffer.

De største miljøproblemer, som søerne står overfor i relation til de forventede klimaændringer, er:

- Øget eutrofiering med større risiko for og længere varighed af algeblomst af potentielt giftige blågrønalger.
- Øget dominans af karpfisk (måske karpe) på bekostning af rovfisk, hvilket vil have en afledt negativ effekt på vandets klarhed. Mindre vinterdødelighed af fisk, fordi islægningsperioden mindskes, vil have samme effekt.
- Øget græsning på undervandsplanter som følge af større vinteroverlevelse af bluishøns og svaner med risiko for skift til den uklare tilstand uden undervandsplanter
- Øget risiko for iltsvind i bundvandet om sommeren med øget fosforfrigivelse og øget eutrofiering til følge.



Figur 4.11. Konceptuel model, der viser ændringer i trofisk struktur i middelnæringsrige og næringsrige lavvandede søer i nordligt tempererede og subtropiske søer og følgervirkningerne på følsomheden over for næringsstofftilførsel. I nordligt tempererede middelnæringsrige søer kontrolleres de plankti-benthivore fisk af rovfiskene, hvorved prædationen på det større dyreplankton (*Daphnia*) mindskes. Græsningen på planteplankton er altså forholdsvis intens, og søerne er kun moderat følsomme over for en lille stigning i næringsstofbelastningen. Når søerne bliver næringsrige, reduceres rovfiskenes kontrol, og de planktivore fisk øger deres prædation på det større dyreplankton. Følgelig er der få *Daphnia* og lav græsning på planteplanktonet. Disse søer er ekstremt følsomme over for en øget næringsstofftilførsel, idet denne kanaliseres direkte over i øget planteplanktonvækst. De subtropiske søer er derimod domineret af mange små "altædende" (omnivore) fisk, og antallet af dyreplankton er lavt i både middelnæringsrige og næringsrige søer. Disse søer er derfor alle yderst følsomme over for øget næringsstofftilførsel.

I søer med undervandsplanter forlænges vækstsæsonen, hvilket kan øge mulighederne for, at søerne kan fastholdes i den klarvandede tilstand. Dog vil planternes indirekte påvirkning af vandets klarhed (skjul for dyreplankton i dagtimerne) mindskes, fordi en større dominans af karpfisk øger prædationstrykket på dyreplanktonet. Trådalger kan blive mere dominerende.

På positiv siden kan man forvente, at

- varmere klima betyder øget artsrigdom; dog vil en række koldtvandsarter, især lagesefisk, få sværere vilkår
- øget tab af kvælstof på grund af den højere temperatur, der dog må forventes at blive mere end modvirket af en større tilførsel i kraft af en øget nedbør.
- større rekreativ værdi for badegæster, der dog i næringsrige søer modvirkes af en øget risiko for eutrofiering og øget risiko for forekomst af giftige alger
- større interesse for at anvende søerne rekreativt, for eksempel til badning og kanosejls på grund af de forventede varmere somre.

4.3 Referencer

- 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*, Vol. 365, 2006, s. 223-237.
- Balayla, D. J., T. L. Lauridsen, M. Søndergaard & E. Jeppesen, 2010. Larger zooplankton in Danish lakes after cold winters: are fish kills of importance? *Hydrobiologia* 646: 159-172.
- Bachmann RW 1984. Calculation of phosphorus and nitrogen loadings to natural and artificial lakes. *Verh. int. Verein. Limnol.* 22: 239-243.
- Blanck A. & N. Lammouroux, 2007. Large-scale intraspecific variation in life-history traits of 44 European freshwater fish. *J. Biogeogr.* 34: 862–875.
- DHI Water and Environment. 2003. Mike 11 reference manual. DHI Water and Environment, Horsholm, Denmark.
- Gyllström, M., L.-A. Hansson, E. Jeppesen et al. 2005. The role of climate in shaping zooplankton communities of shallow lakes. *Limnol. & Oceanogr.* 50: 2008–2021.
- James, C., J. Fisher, V. Russell, S. Collings & B. Moss, 2005. Nitrate availability and plant species richness: implications for management of freshwater lakes. *Freshwat. Biol.* 50: 49-63.
- Jensen, H.S., and F.O. Andersen. 1992. Importance of temperature, nitrate and pH for phosphorus from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes. *Limnol. Oceanogr.* 37:577. 37.
- Jensen, J.P., A.R. Pedersen, E. Jeppesen & M. Søndergaard, 2006: An empirical model describing the seasonal dynamics of phosphorus in 16 shallow eutrophic lakes after external loading reduction. *Limnol. Oceanogr.* 51): 791-800.
- Jeppesen, E., J.P. Jensen, M. Søndergaard, T. Lauridsen & F. Landkildehus, 2000: Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: changes along a phosphorus gradient. - *Freshwat. Biol.* 45: 201-213.
- Jeppesen, E., B. Kronvang, M. Meerhoff et al., 2009. Climate change effects on runoff, catchment phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations. *J. Envir. Qual.* 38:10301041.
- Jeppesen, E., J.P. Jensen & M. Søndergaard, 2002. Response of phytoplankton, zooplankton and fish to re-oligotrophication: an 11-year study of 23 Danish lakes. - *Aquat. Ecosys. Health & Managm.* 5: 31-43.
- Jeppesen, E., Meerhoff, M., Holmgren, K., González-Bergonzoni, I., Teixeira-de Mello, F., Declerk, 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., Balayla, D., Lazzaro, X., 2010a. Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function. *Hydrobiologia* 646, 73–90.

Jeppesen, E., Moss, B., Bennion, H., Carvalho, L., De Meester, L., Feuchtmayr, H., Friberg, N., Gessner, M.O., Hefting, M., Lauridsen, T.L., Liboriussen, L., Malmquist, H., May, L., Meerhoff, M., Olafsson, J.S., Soons, M.B., Verhoeven, J.T.A., 2010b. Chapter 6: Interaction of climate and eutrophication. In: Kernan, M., R. Battarbee and B. Moss (eds) *Changing climate and changing freshwaters: a European perspective*. Wiley-Blackwell, Oxford, 119-151.

Jeppesen, E., Kronvang, B., Olesen, J.E., Audet, J., Søndergaard, M., Hoffmann, C.C., Andersen, H.E., Lauridsen, T.L., Liboriussen, L., Larsen, S.E., Beklioglu, M., Meerhoff, M., Ozen, A., Ozkan, K., 2011. Climate change effects on nitrogen loading from cultivated catchments in Europe: implications for nitrogen retention, ecological state of lakes and adaptation. *Hydrobiologia* 663, 1-21.

Jeppesen E, Mehner T, Winfield IJ, Kangur K, Sarvala J, Gerdeaux D, Rask M, Malmquist HJ, Holmgren K, Volta P, Romo S, Eckmann R, Sandström A, Blanco S, Kangur A, Stabo HR, Tarvainen M, Ventelä AM, Søndergaard M, Lauridsen TL, Meerhoff M, 2012a. Impacts of climate warming on lake fish assemblages: evidence from 24 European long-term data series. *Hydrobiologia* 694:1-39.

Jeppesen E, Søndergaard M, Lauridsen TL, Liboriussen L, Bjerring R, Johansson LS, Landkildehus F, Kronvang B, Andersen HE, Trolle D, Jørgensen T, 2012b. Recent climate induced changes in freshwaters in Denmark, p. 156-171. In: CR Goldman, M Kumagari and RD Robarts (eds.). *Climatic Change and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies*. John Wiley & Son Ltd.

Kristensen E., Kronvang B., Thodsen H. og J. Rasmussen, 2009. Små og sårbare – livet i mindre vandløb i et fremtidigt klima. *Vand og Jord* (4).

Lappalainen, J., A. S. Tarkan & C. Harrod, 2008. A meta-analysis of latitudinal variations in life-history traits of roach, *Rutilus rutilus*, over its geographical range: linear or non-linear relationships? *Freshw. Biol.* 53: 1491–1501.

McKee, D., K. Hatton, J.W. Eaton, D. Atkinson, A. Atherton, I. Harvey & B. Moss, 2002. Effects of simulated climate warming on macrophytes in freshwater microcosm communities. *Aquat. Bot.* 74: 71-83.

Meerhoff M., Clemente J.M., Teixeira de Mello F., Iglesias C., Pedersen A.R. & E. Jeppesen, 2007. Can warm climate-related structure of littoral predator assemblages weaken the clear water state in shallow lakes? - *Global Change Biology* 13:1888-1897.

Meerhoff, M., Clemente M., Teixeira de Mello F. et al., 2009 *Klimaændringer i Danmark: Ændringer i undervandsplanternes rolle i søer*. *Vand og Jord* (4)
Moss B., S. Kosten, M. Meerhoff R.W., Battarbee, E. Jeppesen, N. Mazzeo, K. E. Havens, G. Lacerot, ZW. Liu, L. De Meester, H. Paerl and M. Scheffer, 2011. Allied attack: climate change and nutrient pollution- *Inland Waters* 1:101-105.

Naturstyrelsen 2009. IGLOO – Indikatorer for globale klimaforandringer i overvågningen.

Naturstyrelsen 2014. Basisanalyse for Vandområdeplaner 2015-2021. Naturstyrelsen, Haraldsgade 53, 2100 København Ø, 41 pp.

- Nielsen 2013 Predicting the future state of freshwater lake ecosystems influenced by climate and landuse changes. PhD thesis, Aarhus University.
- Nielsen A., D. Trolle, R. Bjerring, M. Søndergaard, J. E. Olesen J.H. Janse, W. M. Mooij & E. Jeppesen, 2014. Effects of climate and nutrient load on the water quality of shallow lakes assessed through ensemble runs by PCLake – Ecol. Applications 24:1926-1944.
- OECD 1982. Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessments and Control. OECD, Paris. 210 pp.
- Rolighed J, D. Trolle, M. Søndergaard, R. Bjerring, J. H. Janse, W. M. Mooij, E. Jeppesen, indsendt. Climate change makes recovery from eutrophication more difficult - a PCLake model study of shallow Danish Lake Søbygaard.
- Ruuhijärvi, J., M. Rask, S. Vesala, A. Westermarck, M. Olin, J. Keskitalo & A. Lehtovaara, 2010. Recovery of the fish community and changes in the lower trophic levels in a eutrophic lake after a winter kill of fish. *Hydrobiologia* 646: 145-158.
- Sandström O., 1990. Environmental monitoring at the Forsmark nuclear power plant. Nat. Swedish Environ. Protect. Board, r. 3868.
- Saunders, D. L., and J. Kalff. 2001. Denitrification rates in the sediments of Lake Memphremagog, Canada-USA. *Water Res.* 35:1897-1904.
- Søndergaard, J.P. Jensen, E. Jeppesen & P.H. Møller, 2002. Seasonal dynamics in the concentrations and retention of phosphorus in shallow Danish lakes after reduced loading. - *Aquat. Ecosys. Health & Managm.* 5: 19-23.
- Søndergaard, M., J.P. Jensen & E. Jeppesen, 2005. Seasonal response of nutrients to reduced phosphorus loading in 12 Danish lakes. – *Freshwat. Biol.* 50: 1605-1615.
- Søndergaard, M., Lauridsen, T.L., Kristensen, E.A, Baattrup-Pedersen, A., Wiberg-Larsen, P., Bjerring, R. & Friberg, N. 2013a. Biologiske indikatorer til vurdering af økologisk kvalitet i danske søer og vandløb. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 32 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 59.
- Søndergaard M, R. Bjerring & E. Jeppesen, 2013b. Persistent internal phosphorus loading in shallow eutrophic lakes – *Hydrobiologia* - 710:95-107.
- Trochine C., M. Guerrieri, L. Liboriussen, M. Meerhoff, T.L. Lauridsen, M. Søndergaard & E. Jeppesen, 2011. Filamentous green algae inhibit phytoplankton and create clear water conditions – particularly when enriched shallow lakes get warmer.- *Freshwat. Biol.* 56:541-553.
- Trolle D., A. Nielsen, J. Rolighed, H. Thodsen, H. E. Andersen, I. B. Karlsson, J. C. Refsgaard, J. E. Olesen, K. Bolding, B. Kronvang, M. Søndergaard & E. Jeppesen, I trykken. Projecting the future ecological state of lakes in a 6 degree warming scenario.

Trolle, D., A. Elliott, W.M. Mooij, J.H. Janse, K. Bolding, D.P Hamilton & E. Jeppesen, 2015. Advancing projections of phytoplankton responses to climate change through ensemble modeling. - *Environmental Modelling & Software* 61:371-379.

Wetzel, R.G., 1982. Review of "Wetland Functions and Values: The State of Our Understanding." (P. E. Greeson, J. R. Clark, and J. E. Clark, Editors). *Ecology* 63:1193-1194.

Wilkonska, H., 1988. The effect of heated-water discharge in the Konin lakes (Poland) on their ichthyofauna. *Ekol. Pol.* 36: 145-164.

Windolf, J., E. Jeppesen, J.P. Jensen & P. Kristensen, 1996. Modelling of seasonal variation in nitrogen retention: a four-year mass balance study in 16 shallow lakes. *Biogeochemistry* 33: 25-44.

5 Marin

5.1 Introduktion

I Danmark gør der sig en række specielle forhold gældende, som betyder, at havet spiller en større rolle i befolkningens bevidsthed og forvaltningsmæssigt end i de fleste andre lande. Danmark har en kyststrækning på ca. 7.300 km, hvilket er meget sammenholdt med landets samlede areal på 43.000 km². I Danmark er der ikke noget sted længere end ca. 50 km til den nærmeste kyst. Det betyder, at langt de fleste danskere med jævne mellemrum oplever og forholder sig til havet, og at havet derfor udgør en væsentlig del af den nationale identitet. Danmark er historisk et søfartsland, da havet alle dage har spillet en væsentlig rolle i forhold til ressourcer, transport, handel og rekreative aktiviteter.

De danske kystområder er kendetegnet ved en overordentlig stor variation, hvad angår såvel de fysiske, kemiske som de biologiske forhold. Der er bugter, bredninger og nor men også mere åbent vand, stræder, bæltter og sund. Saltholdigheden spænder fra lav-salint til høj-salint, hvilket sammen med variationen i de fysiske forhold og graden af belastningen med næringsstoffer giver basis for en meget forskellig artssammensætning af plante- og dyreliv områderne imellem. Ligeledes er der en stor dynamik i kystområderne som følge af påvirkningen fra skiftende vindforhold, tidevand, strøm, ferskvandspåvirkning og en stor variation mellem årstider og mellem år.

Desuden er Danmark kendetegnet ved en betydelig belastning af havmiljøet som følge af en stor befolkningstæthed, et intensivt landbrug og ved at være et velfærdssamfund med et stort ressourceforbrug. Men de danske farvande påvirkes også af belastning fra andre lande, som tilføres via luft, vand og sejllads. Disse forhold betyder, at den menneskelige aktivitet bevirker et væsentligt pres på især de kystnære områder gennem tilførsel af næringsstoffer, miljøfarlige stoffer og fremmede arter samt fysisk forstyrrelse i tilknytning til erhvervsfiskeri, transport, byggeri og rekreative aktiviteter. Som konsekvens er de danske havområder generelt og de kystnære områder i særdeleshed sårbare over for yderligere påvirkning fra igangværende og fremtidige klimaforandringer.

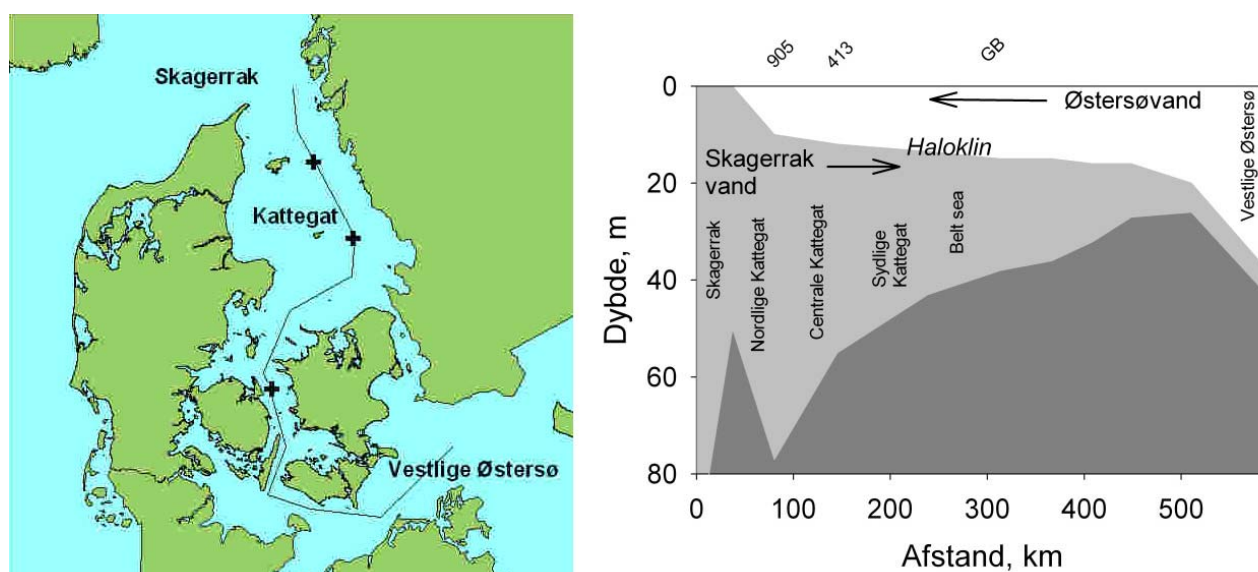
Der er meget høj grad af usikkerhed forbundet med fremskrivninger og forudsigelser af klimaændringers effekt på økosystemer og især sammensætningen af arter. Dette skyldes, at ændringer i de primære klimaparametre (temperatur, nedbør og vind) medfører en kaskade af afledte effekter, som er svære at fremskrive. For de biologiske parametre er det oftest de afledte effekter (f.eks. ændret iltkoncentration), der er vigtigst. I nogle tilfælde vil klimaforandringer have modsatrettede effekter, hvilket yderligere komplicerer forholdene. Eksempelvis vil øget nedbør medføre en større ferskvandsafstrømning fra land og dermed både bevirke en mindsket saltholdighed og en øget tilførsel af næringsstoffer til de kystnære områder. Mange bunddyr vil reagere negativt på ændringen i saltholdighed, mens flere næringsstoffer både kan have en positiv effekt pga. mere føde til bunddyrene eller en negativ effekt, hvis belastningen med næringsstoffer i forvejen er høj og giver problemer med iltvind. Den resulterende økosystemrespons vil desuden afhænge af, om der samtidig sker en stigning i temperaturen. Det er desuden muligt, at effekten af klimaforandringerne er positiv til at starte med og negativ efterfølgende eller omvendt. Uafhængigt af typen af respons gælder dog, at et økosystem, som minimum i en overgangsperiode, bliver mere ustabil eller "stresset" som følge af klimaforandringer.

I dette kapitel omtales de forventede effekter af klimaforandringer for de centrale marine kvalitetselementer i 2. generations vandplaner. Det drejer sig om planteplankton, bunddyr og bundplanter. Da de biologiske komponenter i høj grad er reguleret af de hydrografiske og kemiske forhold indledes med en kort status for klimaforandringernes indflydelse på disse komponenter. Beskrivelsen af de observerede og formodede fremtidige konsekvenser af et ændret klima for kvalitetselementerne er baseret på den eksisterende viden om de økologiske sammenhænge i kystnære områder, effekten af de allerede indtrufne klimaforandringer (f.eks. er havvandstemperaturen steget 1-1½ grad i løbet af de sidste 30-40 år, (Hansen et al. 2015) samt vurderinger af effekten af ændringer i temperatur, nedbør og vind beskrevet i den videnskabelige litteratur.

5.2 Hydrografi, iltforhold og vandkemi

I dette kapitel beskrives kort de karakteristiske hydrografiske forhold i de indre danske farvande, som i særlig grad sætter de fysiske rammer for det marine økosystems funktion og struktur, og som forventes at blive påvirket af klimaforandringer. Det gælder i særlig grad fordelingen af ilt og salt. Men forhold som vandets klarhed og mængden af næringsstoffer har også betydning og vil blive omtalt.

Kattegat, Bælterne, Øresund og vestlige Østersø udgør sammen med de tilstødende fjorde, de indre danske farvande. Der er en frontzone i det nordlige Kattegat, der adskiller vandet i Skagerrak og Kattegat (figur 5.1). Hydrografisk set udgør området den overgangszone, hvor vandmasserne fra Østersøen, som er verdens største indhav, blandes med mere salt oceanisk vand, der strømmer til området fra det åbne Skagerrak og Nordsøen. Områdets bundtopografi er kendetegnet ved forholdsvis lave vanddybder. Bortset fra nogle mindre huller i det centrale Kattegat, med dybder ned til ca. 150 m, er vanddybden lavere end 100 m og gennemsnits dybden er kun ca. 27 m i hele området (Bendtsen et al 2009). Der er to tærskler i området; Drogden i Øresund og Darss ved indgangen til den vestlige Østersø, der hver især blokerer for indstrømningen af bundvand til Østersøen fra hhv. Øresund og Femern Bælt. Tærsklerne har væsentlig indflydelse på hydrografien i hele Østersøområdet og på vandudvekslingen mellem Østersøen og Nordsøen/Skagerrak.

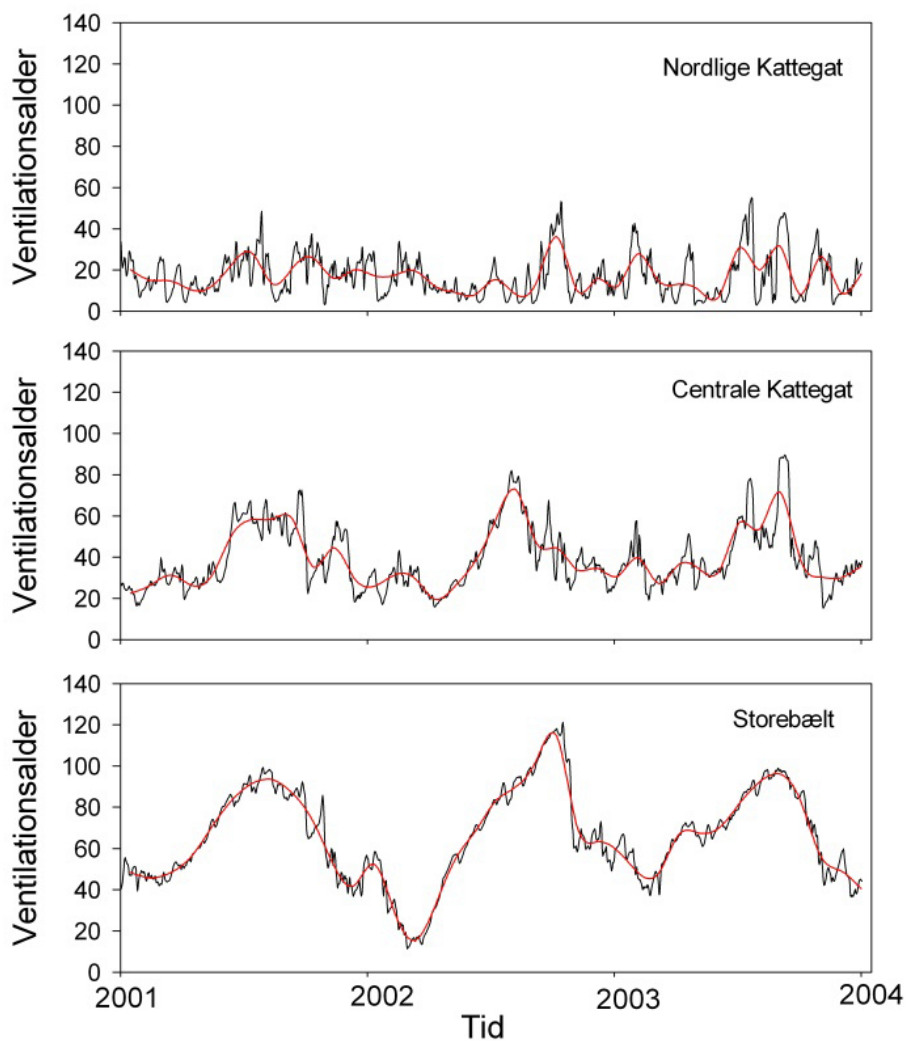


Figur 5.1. Venstre: Transekt gennem de indre danske farvande (+ angiver placeringen af stationerne 905, 413 og 6700053, se også fig. 2). Højre: Tværsnit langs transektet med angivelse af vanddybde og springlag samt afstanden fra fronten i km (fra Bendtsen & Hansen 2009).

Hydrografien er bestemt af blandingen mellem Østersø vandet og Nordsø-/Skagerrak vandet, og kan overordnet beskrives som en "estuarin cirkulation" med en udadgående overfladestrøm af brakvand og modstrøm af højsalint bundvand. Hele området er saltlagdelt med et saltspringlag (haloklin), der gradvis stiger mod overfladen jo tættere man kommer på frontzonen i det nordlige Kattegat. Centralt i området er haloklinen oftest placeret i ca. 15 dybde (Hansen & Bendtsen 2013, Rasmussen 2003). Om sommeren er der tillige et temperaturspringlag (termoklin), der er sammenfaldende med haloklinen i Kattegat og Bælterne. Men temperaturen spiller en mindre rolle end saliniteten for lagdelingen, dog med undtagelse af de dybere dele af den vestlige Østersø, hvor der ofte etableres et sekundært temperaturspringlag mellem haloklinen og overfladen. Den estuarine cirkulation drives af ferskvandsoverskuddet i Østersøen og den deraf følgende højere vandstand samt af densitetsforskellen imellem de to vandmasser. Under vandmassernes transport gennem de indre danske farvande sker der en gradvis opblanding af saltvand til overfladelaget, således at saltholdigheden i overfladelaget stiger fra ca. 7 psu omkring Bornholm til mere end 20 psu i det nordlige Kattegat. Ferskvandsoverskuddet i Østersøen medfører en nettoudstrømning på $15.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Bendtsen et al. 2009). Cirkulationsstrømningen gennem de enkelte farvandsafsnit varierer, men cirkulationsstrømninger er væsentlig større end nettoudstrømningen fra Østersøen og er vigtig for ventilationen af området (Bendtsen et al. 2009, Jonasson et al. 2012). Strømningsmønstret er ikke konstant, da der foregår både nord- og sydgående transporter i begge vandlag med en stor variation i strømningerne. Strømningerne drives primært af skiftende vandstandsforskelle mellem Skagerrak og den vestlige Østersø. Indstrømningen af højsalint bundvand til Østersøen sker ved overstrømning af tærsklerne med bundvand i forbindelse med højvande nord for Bælterne. Lejlighedsvis, og med års mellemrum, sker der store indstrømningshændelser til Østersøen, og i den forbindelse kan hele bundvandsvolumen i de indre danske farvande blive skiftet i løbet af kort tid (Mätthaeus 1992).

Modelstudier af denne transport (Bendtsen et al. 2009, Hansen & Bendtsen 2014) har vist, at bundvandet i det centrale Kattegat har været undervejs fra den nordlige frontzone i 1 til 2 måneder (ventilationsalder), mens det vand, der ligger i bunden af Bælthavet, har været undervejs i 2-3 måneder (figur 5.2). Transporten er hurtigst om vinteren, og der er store mellemårige variationer, som korrelerer med bundvandets iltindhold (Bendtsen og Hansen 2013; Hansen og Bendtsen 2006, 2013). Vinden genererer vertikal blanding af vandsøjlen og bidrager dermed til ventilationen af bundvandet i de åbne farvande. Især i Storebælt genererer den kraftige horisontale strømning i nogen grad også en vertikal blanding (Bendtsen et al. 2009). Overordnet og lidt forsimplet kan man sige, at ventilationen under springlaget (ca. 15 m) hovedsageligt sker ved horisontal advektion af vandmasserne, medens det er vinden og den vertikale blanding, der er vigtigst for ventilationen af de mere lavvandede kystnære områder og i fjordene.

Figur 5.2. Modellerede daglige middelværdier af bundvandets ventilationsalder (i dage) i perioden 2001 – 2003 af i 30 m dybde i det nordlige Kattegat (station 905, øverst), det centrale Kattegat (station 413, midten) og i Storebælt ved Romsø (station 6700053, nederst). Røde kurver angiver løbende middelværdi for en måned. Begrebet ventilationsalder er forklaret i teksten ovenfor. Fra Hansen & Bendtsen 2009.



Bundvandets transporttid gennem de indre danske farvande er, i kombination med den vertikale blanding i vandsøjlen (ventilationsalderen), afgørende for iltkoncentration i bundvandet. Det skyldes, at bundvandet er isoleret fra atmosfærisk kontakt, og da der samtidigt ikke foregår nogen væsentlig fotosyntese i bundvandet (Lyngsgaard et al. 2014), tilføres der kun lidt ny ilt, der kan kompensere for det respiratoriske iltforbrug i bundvandet under dets transport gennem de indre danske farvande.

Den mængde ilt, der er opløst i bundvandet, når det strømmer ind i Kattegat, forbruges gradvist af de respirationskrævende processer i vandet og bunden. Jo længere transporttid desto større er risikoen for, at der opstår iltsvind i bundvandet. Det betyder, at der vil være en større tilbøjelighed til, at der opstår iltsvind i den sydlige del af de indre danske farvande, herunder især det sydlige Lillebælt og den Vestlige Østersø, hvor vandet i bundlaget har været undervejs i længst tid (Hansen og Bendtsen 2013). Vandets og bundens respiration har også indflydelse på, hvor hurtigt der udvikles iltsvind. Temperaturen er vigtig for iltforbruget, da den typisk forøges med en faktor 2.5-3 hver gang temperaturen stiger 10 grader (Q_{10} -faktoren). Iltsvind opstår derfor oftest i den periode, hvor vandtemperaturen er højest (juli-oktober). De få direkte målinger af bundvandets respiration har vist, at der ikke er nogen markant rumlig variation, som kan forklare den typiske fordeling af iltsvind i de indre danske farvande (Hansen og Bendtsen 2014b). I de lavvandede fjorde og kystnære områder er det, som beskrevet, vinden

der er vigtigst, når det gælder ventilation af bundvandet, og iltvind opstår primært i vindstille perioder om sommeren. I de fleste fjorde og kystnære områder er respirationsraten ikke målt, men det må formodes, at raten er tæt koblet til eutrofieringsgraden (Manticki et al. submitted).

Ferskvandstilstrømningen fra dansk område har ringe indflydelse på saltbalancen og hydrografien i de åbne dele af de indre danske farvande. Men, for de mere lukkede farvandsområder spiller den lokale ferskvandstilstrømning en stor rolle. Ferskvandsafstrømning fra land er helt afgørende for, hvor mange næringssalte (kvælstof og fosfor) der tilføres fjordene, mens den spiller en relativt mindre rolle i de åbne farvande, hvor den atmosfæriske deposition er af større betydning, og hvor stoftransporten tillige er reguleret af vandudvekslingen mellem Østersøen og Skagerrak, og dermed af baggrundskoncentrationerne af næringssalte i disse vandmasser.

5.2.1 Effekt af klimaforandringer på hydrografien i de indre danske farvande

Hydrografien reguleres i høj grad af klimatiske forhold og vil derfor blive påvirket af lokale/regionale klimaforandringer. Herudover spiller globale klimaforandringer også en rolle, når f.eks. vandstanden i verdenshavene stiger som følge af afsmeltning fra gletschere/iskapper og termisk udvidelse af vandsøjlen (IPCC 2007, IPCC 2014).

Temperaturen i overfladelaget i alle danske farvande følger tæt de sæsonmæssige og den mellemårige variation i lufttemperaturen. Det samme gælder for bundvandet, men i de indre danske farvande viser sæsonsvingningerne en tidsforsinkelse på et par måneder i forhold til lufttemperaturen pga. transporttiden gennem de indre danske farvande. Temperaturen i bundvandet i det centrale Kattegat og sydover reguleres primært i det nordlige Kattegat og Skagerrak, før det bliver til bundvand. Her har det overfladevand, som senere bliver til bundvand, kontakt til atmosfæren og kan derfor opvarmes/afkøles. I forhold til de forventede klimaændringer, så betyder den forholdsvis lave vanddybde i de danske farvande, at vandsøjleens temperatur som helhed (dvs. bundvand og overfladevand) vil følge den opvarmning, der sker af atmosfæren (BACC 2008, Bendtsen & Hansen 2013; Hansen & Bendtsen 2014). Den fremtidige vandtemperatur i de danske farvande vil derfor kunne bestemmes med stort set samme sikkerhed som klimamodellernes fremskrivning af lufttemperaturen. Fremskrivningerne af vandtemperaturen må derfor siges at være en forholdsvis robust prognose. Som det vil fremgå senere i dette kapitel, så vil stigende temperatur især få negativ indflydelse på iltforholdene. Herudover vil stigende temperatur generelt øge hastigheden af stofomsætningen og de trofiske interaktioner i økosystemet samt bevirke sæsonmæssige forskydninger i de biologiske processer.

Nedbøren forventes at stige i Østersøregionen (BACC 2008), om end det vurderes, at der er mere usikkerhed forbundet med denne klimavariabel, end det er tilfældet med temperaturstigningen. Øget nedbør vil øge nettoudstrømningen fra Østersøen og påvirke saltbalancen i de indre danske farvande. Saltindholdet i især overfladelaget forventes således at blive reduceret på grund af den øgede ferskvandstilførsel fra Østersøen. Den lavere salinitet vil især påvirke biologien over springlaget, samt den bundlevende flora og fauna, der lever i de lavvandede områder, hvor der ikke er noget saltspringlag. Med en større udstrømning fra Østersøen kan den estuarine cirkulation potentielt medvirke til øget ventilation af bundvandet. Lagdelingsforholdene dvs. vandsøjlestabiliteten, udbredelse af lagdelingen og lagdelingsdybden kan blive på-

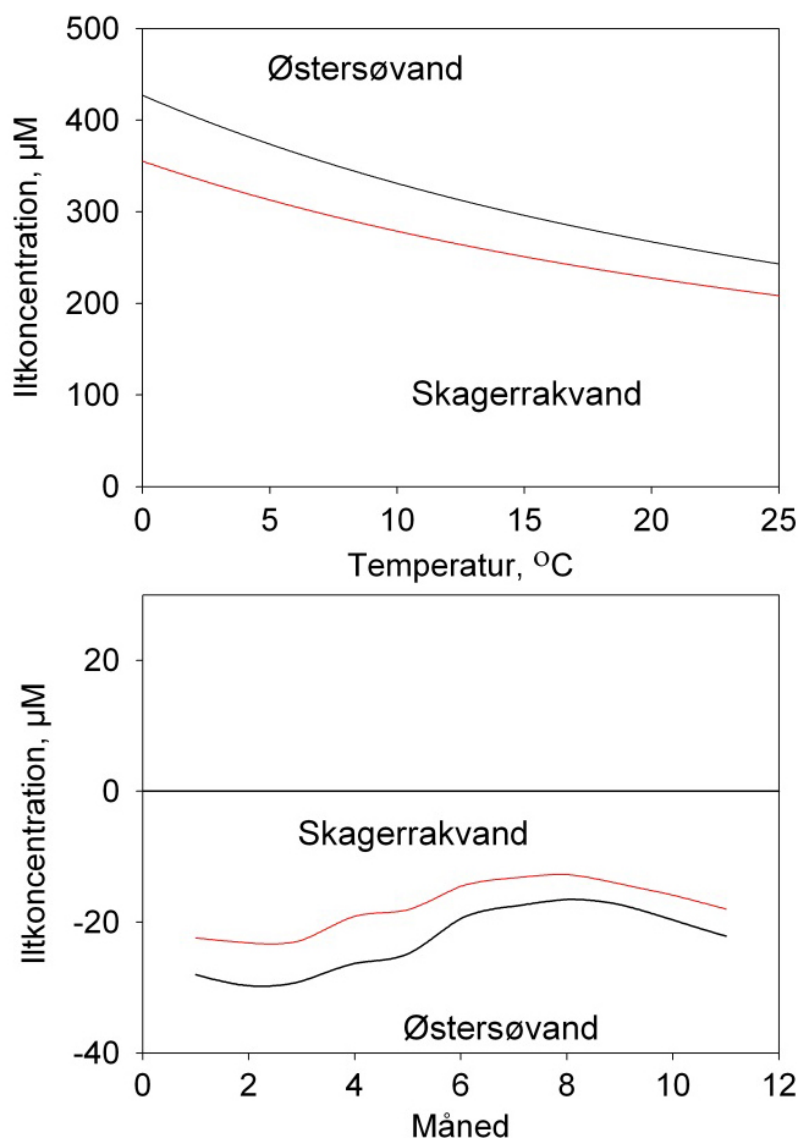
virket af en ændret Østersøudstrømning, hvilket kan have stor effekt på planktonproduktionen og dens fordeling i vandsøjlen (Lynggaard et al., in press). Det må dog formodes, at der er stor usikkerhed forbundet med en beskrivelse af de forventede ændringer i lagdelingen pga. usikkerheden omkring ændringer i nedbøren, og fordi andre klimatiske faktorer såsom vind og temperatur i et komplekst samspil har indflydelse på lagdelingen. Ud over de lokale klimaændringer vil lagdelingen og vandudveksling i de indre danske farvande blive påvirket af vandstandsstigninger (Meier et al. 2004). Vandstandsstigninger vil kunne kompensere for den øgede udstrømning fra Østersøen og bidrage til øget salttransport ind i de indre danske farvande fra Nordsøen og Skagerrak. Når vandstanden stiger, vil tværsnittet af bundvandslaget i de indre danske farvande blive større, og den indadgående vandtransport mod Østersøen øges. Den samlede effekt af vandstandsstigning og øget udstrømning er dog meget usikker, men giver grundlag for følgende hypoteser: Hvis den zone, hvor der er lagdeling (fra Femern Bælt til nord for Læsø), forskydes mod nord eller syd vil dette i høj grad påvirke udbredelsen af en lang række organismer, som har udbredelsesmønstre, der er styret af saltholdigheden. En nordlig forskydning af front og lagdelingszone forventes at mindske diversiteten af bunddyr og makroalger især på lavere vand i den nordlige del af området. En forskydning i sydlig retning kan medføre en øget udbredelse af marine arter i retning mod Østersøen (euhaline arter). Ændringer i springlagsstyrken og dybden forventes især at påvirke iltforhold, idet den vertikale blanding mindskes, hvorved risikoen for iltsvind øges. Herudover vil en ændret lagdeling kunne påvirke fordelingen af planteplanktonets produktion (Lynggaard et al. in press).

Næringssaltkoncentrationerne i de indre danske farvande er tæt koblet til afstrømningen fra land og dermed nedbøren. Øget nedbør vil derfor betyde mere eutrofe forhold især i de kystnære områder, der er tættest på ferskvandskilden og det vil være disse områder hvor effekten af nedbørsændringer er nemmest at forudsige. For de mere åbne områder i de indre danske farvande gælder (i lighed med nutidige forhold), at næringssaltkoncentrationerne for en stor del vil være bestemt af transporterne over de åbne rande, som er vanskeligt at fremskrive, fordi det er uvist, hvordan de regionale baggrundskoncentrationer vil udvikle sig, når vandtemperaturen stiger.

5.2.2 Effekt af klimaforandringer på iltforhold i de indre danske farvande

Betydningen af den globale opvarmning for iltforholdene i de indre danske farvande, i Østersøen og Nordsøen er i de senere år indgående behandlet i en lang række modelstudier (se f.eks. Bendtsen & Hansen 2013; Hansen & Bendtsen 2006, 2009, 2013, 2014b; Jonasson et al. 2012, 2013, Meier et al. 2011, Eilola et al. 2011, 2013, Skogen et al. 2014). Herudover er der en række hindcast-studier af tidlig udvikling af iltforhold, der dækker de seneste årtier, hvor der allerede er sket klimatiske ændringer (f.eks. Conley et al. 2007, Jonasson & Hansen 2013 og mange flere). For de indre danske farvande er udviklingen endvidere beskrevet i de fire årlige iltsvindsrapporter og den årlige havrapport. Endelig er der lavet en lang række mere proces-orienterede modelstudier af iltodynamik og omsætning (for review se Peña et al. 2010). Disse studier viser stort set samstemmende, at iltforholdene vil blive forværret i et fremtidigt varmere klima; men det er forskellige mekanismer, der fremhæves i de forskellige studier. Det skyldes, at temperaturen både har en direkte fysisk indvirkning på iltens opløselighed i vand og en indirekte påvirkning via temperaturens effekt på stofomsætningen i økosystemet og dermed iltodynamikken. Desuden vil andre klimatiske faktorer, såsom nedbør, også påvirker eutrofieringsniveauet og dermed den mængde organisk kulstof, som omsættes i økosystemet (Skogen et al. 2014).

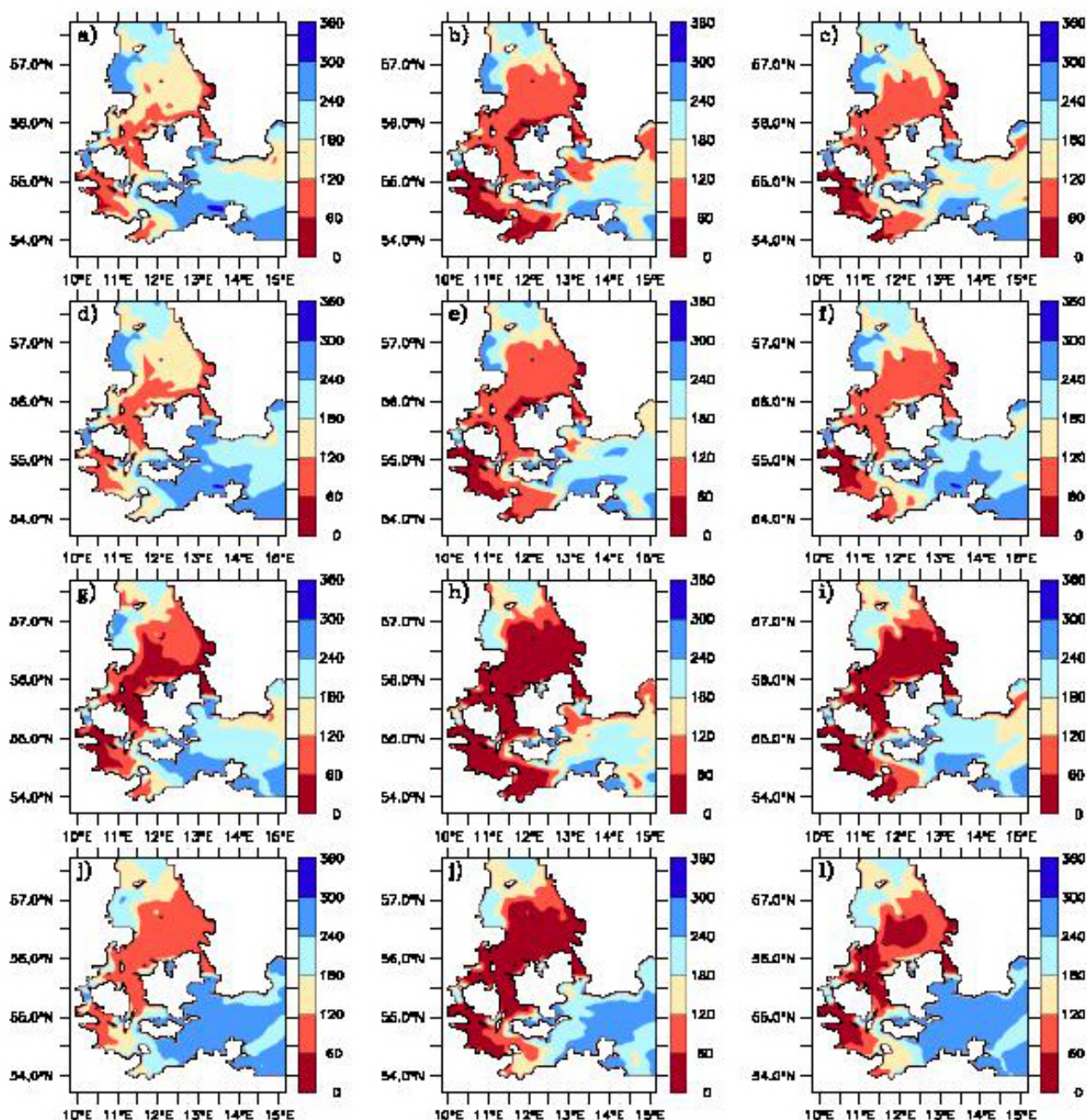
Figur 5.3. Øverst: Iltindhold (μM) for mættet havvand med en salinitet svarende til Østersøvand (ca. 7 psu) og Skagerrakvand (ca. 30 psu) mod temperatur. Nederst: Forskellen i den sæsonmæssige udvikling i iltindhold af Østersøvand og Skagerrakvand i et scenarie, hvor temperaturen er tre grader højere end i dag (angivet v. 0-linjen). Fra Hansen og Bendtsen 2009.



Iltsvind i en vandmasse opstår, når iltforbruget over en periode overstiger tilførslen af ilt fra atmosfæren og fotosyntesen. Hvor hurtigt iltsvindet udvikler sig afhænger af forbrugsraten og af, hvor meget ilt der er opløst i vandet. Jo højere temperatur desto mindre ilt er der opløst i vand, når det er 100 % mættet. En temperaturstigning på f.eks. tre grader vil medføre en reduktion i mætningsindholdet på ca. $20 \mu\text{M/l}$ (ca. $0,6 \text{ mg/l}$) (figur 5.3), og iltsvind vil derfor kunne udvikles hurtigere i de vandmasser, hvor der er et netto-iltforbrug. Hvis iltforbruget eksempelvis sættes til $24 \mu\text{g l}^{-1}\text{d}^{-1}$, som der er blevet målt i Kattegat (Hansen & Bendtsen 2014), svarer det til, at iltten i en vandmasse er opbrugt 24 dage før, når vandet er tre grader varmere, og det alene pga. den lavere opløselighed af ilt. Hertil kommer at iltforbruget i sig selv ville være højere pga. temperatureffekten på omsætningen af det organiske stof.

Når det gælder tilførslen af ilt, så er det sværere at vurdere effekten af fremtidige klimaforandringer, fordi ventilationen af bundvandet, som beskrevet, er bestemt af flere forskellige klimatiske faktorer med den dertil hørende usikkerhed. Men det forventes, at det vil være de samme områder som i det nutidige klima, der vil være særligt følsomme over for at udvikle iltsvind (Bendtsen & Hansen 2013). I et scenarie, hvor produktionsforholdene er uændret (for definition se Bendtsen & Hansen 2013), vil resultatet af et var-

mere klima være lavere iltkoncentration, længerevarende iltsvind med større udbredelsesområde. Den direkte effekt af en temperaturstigning på tre grader på iltindholdet i bundvandet vil betyde, at det samlede iltsvindets areal ca. vil fordobles. Hvis klimaændringerne medfører, at der samtidigt sker en øget eutrofiering i kombination med en højere temperatur vil dette forstærke iltsvindet yderligere (figur 5.4). Ved en temperaturforøgelse på mere end to grader forventes således en markant forøgelse af iltsvindets udbredelse i de indre danske farvande.



Figur 5.4. Modellering (3D) af iltkoncentration (i μM) ved bunden i de indre danske farvande i september. Venstre, midterste og højre kolonne viser resultater ved modelkørsler baseret på meteorologiske data fra henholdsvis 2001, 2002 og 2003. I øverste række er resultaterne baseret på temperaturen i et nutidigt klima, svarende til klimaet 2001-2003. I anden, tredje og fjerde række er temperaturen øget med henholdsvis 2, 4 og 6 grader. Respirationsraterne er justeret således, at den samlede respiration svarer til omsætning af den samme mængde organisk materiale som i det nutidige scenarium. Fra Bendtsen og Hansen 2009

5.3 Plankton

Fytoplankton er en bred betegnelse for enkeltcellede alger. Alger fungerer grundlæggende som planter uden at besidde specialiserede vævstyper som for eksempel rodnet og ved, som det kendes fra landplanter. I stedet fordeler fytoplankton sig i vandsøjlen, underlagt de gældende fysiske betingelser, såsom vind, strøm, sollys og næringssalte. Fytoplankton udnytter solens energi til at fikserer kuldioxid (CO₂) via fotosyntesen vha. en række specialiserede pigmenter, der fastholder sollys og omdanne dette til energi og ny kulstofbiomasse. Det vigtigste pigment, der findes i alle planter herunder alger, betegnes klorofyl *a*. Udover CO₂ og lys kræves en række næringssalte, der afhængig af sæsonen i større eller mindre grad tilføres det marine miljø fra land. Kvælstof, silicium og fosfor regnes som langt de vigtigste næringssalte. Da kvælstof er den dominerende vækstbegrænsende faktor i det marine miljø omkring Danmark (Carstensen et al. 2006), er det i forhold til klimaændringer nødvendigt at forholde sig til tilførslen af kvælstof. Fytoplankton fjernes fra vandsøjle via flere processer. Under de sæsonbetingede algeopblomstringer om foråret og i mindre grad om efteråret sedimenterer fytoplankton ud på havbunden i større mængder, hvorved der i visse situationer kan tilføres nok organisk materiale til, at det kan give grundlag for iltsvind grundet iltforbruget ved omsætningen af det organiske materiale. Den del af det organiske materiale, som ikke omsættes, begravnes permanent i havbunden. Uden for algeopblomstringsperioderne omsættes hovedparten af fytoplanktonet i vandsøjlen af mikroorganismer i en proces der betegnes den mikrobielle løkke. I denne proces frigives hovedparten af kulstofbiomassen som CO₂ i vandsøjlen, mens kun en mindre andel omsættes på bunden, og en endnu mindre andel deponeres i havbunden. Når omsætningen i vandsøjlen er dominerende, forbliver næringssaltene i langt højere grad i vandsøjleens stofkredsløb.

Fytoplankton er en central biologisk indikator for miljøtilstanden både i forhold til vandrammedirektivet og havstrategidirektivet. For at imødekomme direktivernes krav om overvågning af de vigtigste indikatorer identificeres artssammensætningen samt biomasse af fytoplankton løbende i det nationale overvågningsprogram, NOVANA. Da pigmentet klorofyl *a* er universelt for alt fytoplankton, er der en løbende overvågning af koncentrationen af dette pigment i NOVANA-programmet som et proxy for fytoplanktons samlede biomasse. Det skal bemærkes, at forholdet mellem biomassen af fytoplankton og klorofyl *a* ikke er lineær og meget variabel, da forholdet bl.a. er bestemt af vækstbetingelserne samt lysforhold (Taylor et al. 1997).

5.3.1 Klimapåvirkninger

De primære ændringer i klimaet udgøres af stigende temperatur, øget nedbør og ændrede vindforhold. Øget nedbør fører til en øget afstrømning af vand fra land til havmiljøet. Det tilførte ferskvand ledes gennem Østersøen og de indre danske farvande ud i Nordøen via Skagerrak. Ofte opstår der derved en lagdeling mellem det lettere og varmere ferske overfladevand og det koldere og tungere oceaniske bundvand. Styrken af lagdelingen, dvs. den vindenergi, der er nødvendig for at opblande overfladevand og bundvand, er bestemt af forskellen i temperatur og saltholdighed mellem de to lag. Derfor vil stigende lufttemperatur, mindre vind og øget nedbør styrke vandsøjleens lagdeling. En styrket lagdeling vil hæmme tilførslen af næringssalte fra bundvand til overfladevand og dermed potentielt begrænse væksten af fytoplankton i overfladevandet. En øget tilførsel af ferskvand mindsker desuden saltholdigheden og påvirker dermed artssammensætningen af fytoplankton. Endvidere medfører en øget afstrømning en større tilførsel af

næringsalte og organisk stof fra land, hvilket stimulerer væksten af fytoplankton og evt. ændrer dens artsammensætning. Stigende temperatur kan også i sig selv eller i samspil med de andre ændringer påvirke i retning af en ændret artssammensætning af plankton. Endelig er det i fremskrivning af klimarelaterede effekter på plankton også nødvendigt at forholde sig til øget koncentration af CO₂ i havvandet, som bevirker faldende pH (forsuring), der negativt kan påvirke kalkdannende organismer.

De klimabetingede ændringer i havets fysisk-kemiske miljø vil have konsekvenser for det planktoniske økosystem. Da de nævnte ændringer ikke optræder uafhængigt af hinanden, vil der formodentlig være tale om en synergetisk effekt af samtlige klimavariabler. Desuden vil effekten af klimændringer på plankton variere fra område til område, da havet omkring Danmark er karakteriseret af store geografiske forskelle, der typificerer det planktoniske fødenet (Conley et al. 2000). Oftest testes klimaeffekter enkeltvis i laboratoriet, dvs. den samlede synergetiske effekt bliver ikke undersøgt. Der er derfor begrænset viden til rådighed, om klimændringernes kombinerede overordnede effekter og vekselvirkninger på økosystemniveau.

5.3.2 pH

Udover temperaturstigninger og øget tilførsel af kvælstof har de forgående 250 års industrielle ekspansion medført en betydende global stigning i luftens indhold af CO₂. Den atmosfæriske koncentration af CO₂ er steget fra et før industrielt niveau på ca. 280 ppm CO₂ til ca. 400 ppm, der er det hidtil højeste målte niveau - og koncentrationen forventes at stige yderligere frem mod udgangen af det 21'ende århundrede (IPCC, 2007). Når CO₂ opløses i vand, dannes der bl.a. kulsyre. I løbet af de sidste ca. 30 år er pH faldet fra ca. 8,3 til ca. 8,1 i de åbne danske farvande og fra ca. 8,1 til ca. 8,0 i de kystnære områder (Hansen, 2013) - og pH vil falde yderligere, hvis CO₂-indholdet i atmosfæren fortsætter med at stige (IPCC 2007). De arter af fytoplankton, der optræder i det kystnære område herunder hovedparten af Danmarks havområder, er ganske tolerante over for pH på niveauer ned til 7.4 (Berge et al., 2010; Nielsen et al., 2010), da variabilitet i algernes nærmiljø er ganske stor (Middelboe and Hansen, 2007; Pedersen and Hansen, 2003). I forsøg, hvor den synergetiske effekt af både temperaturstigninger og reducerede pH-niveauer er undersøgt, er der dog indikationer på, at reducerede pH værdier, mindsker energi transporten mellem fødenettets kulstofproducerende primærproducenter og deres prædatorer delvist, hvilket kan medføre, at en mindre del af fytoplanktons biomasse føres videre i fødenettet til f.eks. fisk (Calbet et al. 2014).

5.3.3 Organisk stof

Ændringer i afstrømning fra land vil udover en øget tilførsel af uorganiske næringsalte, der direkte indgår i fytoplanktonets vækst, også medføre en øget koncentration af organisk stof (karakteriseret som total eller opløst organisk kulstof - TOC eller DOC) i havområderne omkring Danmark. Dette underbygges bl.a. af undersøgelser i den indre del af Østersøen i Rigabugten, hvor der de sidste årtier er observeret stigninger i DOC (Klavins et al. 2012; Kokorite et al. 2012). Betydningen af ændringer i puljen af TOC/DOC vil være størst i de indre farvande herunder fjordsystemerne og aftage med afstanden fra kysten. Forøgede input af TOC/DOC har flere effekter på vandsøjlen, herunder at lysets spektrale sammensætning ændres, og sigtdybden mindskes. Ligeledes kan mange alger ernære sig osmotroft¹ og an-

¹ Osmotrof ernæring betyder, at organismen, i det her tilfælde fytoplankton, ernærer sig ved at optage kulstof frem for at fikse kulstof via fotosyntesen.

vende opløst kulstof som kulstofkilde (Tittel et al., 2009). Således vil en forøget mængde opløst kulstof i sig selv kunne ændre artssammensætningen som følge af det ændrede fødegrundlag.

5.3.4 Temperatur

Temperaturen har kun ringe direkte virkning på algevæksten, da fytoplanktons vækst hovedsageligt er bestemt af tilgængeligheden af næringsstoffer og lys. Det er ikke givet, at klimaændringerne såsom øgede næringsstofkoncentrationer og temperatur vil medføre øget vækst af de dominerende fytoplanktonarter. Et mere sandsynligt scenario er nok snarere en forskydning mellem grupper og arter.

Stigende havtemperatur over hele vækstsæsonen har siden indgangen til det 20. århundrede fremrykket forårsopblomstring i størrelsesorden to til tre uger (Henriksen, 2009). Derudover bevirker højere temperatur om vinteren, at den mikrobielle omsætning øges, og dermed at vandsøjlets tilgængelige kulstof omsættes tidligere på året. Når både forårsopblomstringen fremrykkes og en stigende del af den mikrobielle omsætning forgår om vinteren og i det tidlige forår, opstår der et misforhold i energi-flow fra primærproducererne til fødenettets øvrige trofiske led, såfremt disse ikke formår at tilpasse sig de relativt hurtigere forskydninger i sæsonvariationen.

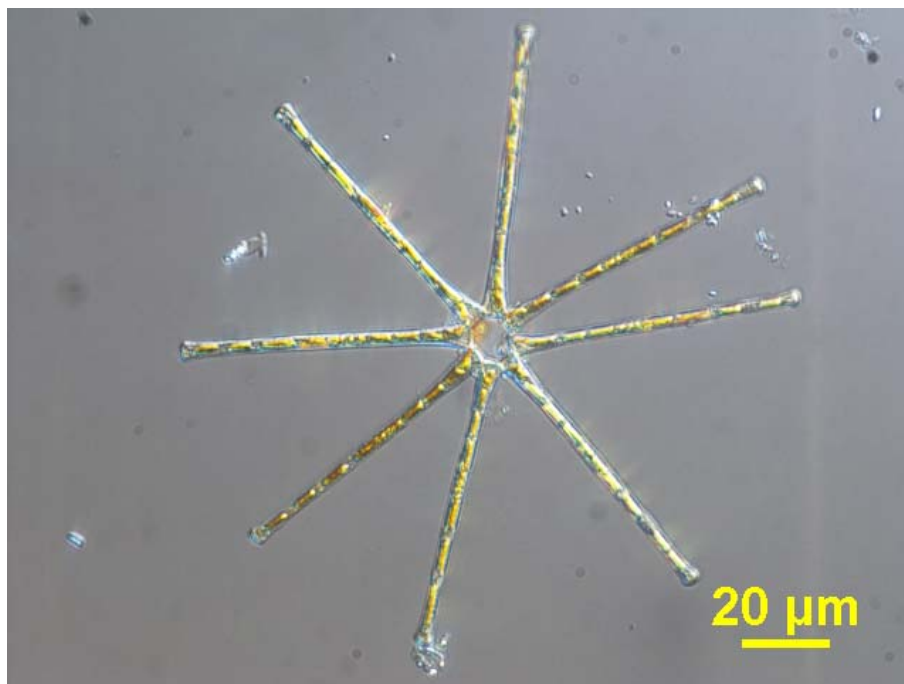
Dette bekræftes af både globale tidsserier samt også lokale observationer fra Nordsøen, hvor en række af fødenettes størrelsesfraktioner gående fra furealger til vandlopper og bunddyrslarver har fået forskudt sæsonen for deres maksimale forekomst (Burthe et al., 2012; Edwards and Richardson, 2004). Konsekvensen af forskydningen mellem fødeemner og deres prædatorer antages at være hovedårsagen til den svage rekruttering af eksempelvis torsk, der er observeret i Nordsøen (Beaugrand et al., 2003). I Østersøen forventes den stigende temperatur at føre til et fald i væksteffektiviteten og stigende dødelighed for vandloppen *Pseudocalanus* sp. (Isla et al., 2008). Konsekvensen er, at det planktoniske fødenets nuværende struktur forskydes i forhold til timingen mellem algeopblomstringer, vandlopper samt fiskenes gydetidspunkter i Østersøen med negative konsekvenser for dele af fiskebestandene, som det er set for torsk i Nordsøen.

5.3.5 Artssammensætning

Forandringer i fytoplanktonets artssammensætning er kendt fra de danske farvande og Østersøen som helhed. Overordnet er der sket en langsigtet og dramatisk ændring i artssammensætningen siden begyndelsen af det 20'ende århundrede, formodentlig som følge af allerede indtrufne klimaændringer og ændret belastning med næringssalte (Henriksen, 2009). Med yderligere klimaforandringer vil der forsat være basis for en løbende udskiftning af fytoplanktonarter og forskydninger mellem dominerende arter.

Der er således registreret en række nye arter inden for de sidste 30 år, antageligvis som følge af ændrede næringssaltforhold og stigende temperatur (Olenina et al., 2010). F.eks. har den potentielt giftige furealge *Prorocentrum minimum* etableret sig i de danske farvande og langt ind i Østersøen. Dette kan have uheldige effekter på havmiljøet, da mange arter, inklusiv *Prorocentrum minimum*, danner periodiske opblomstringer og potentielt er giftige, og dermed periodisk kan kortslutte vandsøjlets stofomsætning (Glibert et al., 2012). Hvis klimaforandringerne fortsætter, må det således også forventes, at flere nye arter vil indvandre.

Figur 5.5. *Asterionellopsis glacialis* er en typisk kiselalge, der periodisk dominerer foråret og sommerens fytoplanktonsamfund i de danske fjorde. Foto Hans H. Jakobsen



Ændret arealanvendelse i kombination med øget nedbør kan ligeledes ændre de støkiometriske forhold mellem vigtige næringssalte. F.eks. fandt Danielsson et al. (2008) i den Finske Bugt en tendens til et fald i koncentrationen af silikat² i perioden fra 1970 og frem til 2000. Det skyldtes formodentligt ikke mindsket tilførsel af silikat fra land, men var derimod et resultat af stigende tilførsel af kvælstof fra land. Når det vækstbegrænsende næringsalt ændres fra at være kvælstof mod at være silikat, vil vandsøjlels sammensætning af fytoplankton ændres fra en dominans af kiselalger mod alternative algesamfund domineret af eksempelvis furealger.

5.3.6 Saltholdighed og lagdeling

Global opvarmning vil sandsynligvis føre til en styrket lagdeling og dermed en øget stabilisering af vandsøjlen i de åbne indre danske farvande, såfremt stabiliseringen som følge af varmere og mere ferskt overfladevand bliver større end destabiliseringen som følge af evt. mere ekstreme vindforhold. En hæmmet opblanding af vandsøjlen vil reducere opblandingen af kiselalger samt spore af furealger fra havbunden til vandsøjlen. I modsætning til kiselalger, foretrækker furealger stabile vandsøjler og forventes derfor at drage fordel af stabilisering af vandsøjlen i vækstperioden. Dette er bl.a. observeret i Bornholmsbassinet samt i den Tyske del af Østersøen (Wasmund et al., 1998).

Reduceret saltholdighed og øget stabilisering af vandsøjlen som følge af øget temperatur og stigende ferskvandsafstrømning fra landende omkring Østersøen vil begunstige opblomstringer af potentielt toksiske blågrønalger i den danske del af Østersøen. Ligeledes er det sandsynligt, at mindsket saltholdighed i overfladevandet vil rykke opblomstringen af blågrønalger mod nord og ind i de åbne indre danske farvande, hvilket kan være til gene for menneskelige aktiviteter i de berørte områder.

Faldende saltindhold er en vigtig styrende parameter for den biologiske mangfoldighed i Østersøen. Lavere saltholdighed kan forårsage osmotisk stress hos både fytoplankton og zooplankton og resultere i et skift i arts-

² Silikat er et nøglemineral i dannelsen af de skaller, der omgiver og beskytter kiselalger.

sammensætningen fra marine til mere ferske arter. Det betyder, at det forventede fald i saltholdigheden i Østersøen vil ændre udbredelsesmønstret og artsammensætningen fra marine mod mere ferske arter.

5.3.7 Ekstremer

Det forventes, at frekvensen af ekstreme klimatiske begivenheder vil stige herunder forlængede perioder med ekstreme lave eller høje temperaturer, perioder med høje eller lave vindhastigheder samt skybrud, der lokalt kan påvirker planktonfødenettes struktur (Valdes-Weaver et al., 2006; Yeager et al., 2005). Det betyder, at ekstreme begivenheder kan skabe et ganske dynamisk miljø lokalt, der fører til ændret artssammensætning af fytoplankton og masseforekomster af uønskede arter (Hall et al., 2008). Ekstremt lange og kolde perioder om vinteren kan ligeledes give anledning til forekomsten af uønskede arter. F.eks. oplevede Danmark en meget kold og lang vinter i 2011, hvilket menes at have været årsagen til en stor forekomst af potentielt skadelige alger (Hansen, 2012).

5.4 Makroalger (tang)

5.4.1 Introduktion

Tangskove af makroalger på rev er meget vigtige og produktive habitater, der rummer et stort antal forskellige alge- og fauna-organismer tilpasset livet på stenenes overflader eller i selve vegetationen. Tangskovene er også en vigtig habitat for et stort antal fiskearter.

Langs den sydlige Østersø og i danske farvande består lagt hovedparten af havbunden af finkornede sedimenter med en glacial oprindelse. Stenrev og forekomster af mere spredte sten er en mere sjælden bundtype, der er dannet ved, at erosionsprocesser har udvasket de finere sedimenter og efterladt stenene på havbundens overflade. Stenrev er typisk lokaliseret langs undersøiske morænebakker eller på skrænter langs forhistoriske flodløb fra perioden efter sidste istid. I disse områder kan stenrev karakteriseres som biologiske hot spots med høj diversitet, store biomasser og generelt høje individtætheder.

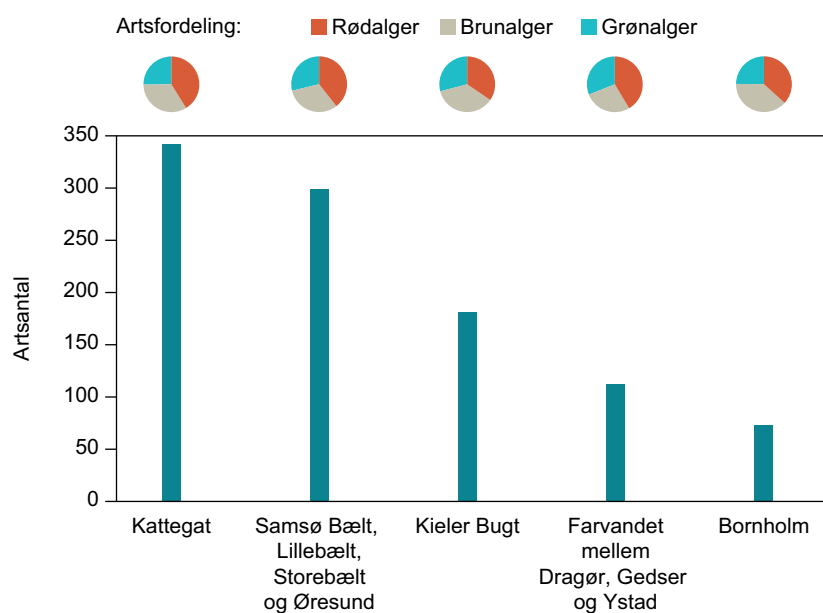
Makroalger har brug for et hårdt substrat, de kan fæstne sig på, og tilstrækkelig lys ved bunden til at sikre fotosyntesen. Efterhånden som lyset aftager med stigende dybde, vil bundfauna gradvist overtage pladsen på stenenes overflader (figur 5.6).

På grund af forskellig artsspecifik tolerance over for salinitet ændres diversiteten og dominansforholdene i tangskovene markant fra Nordsøen til Østersøen og igen fra de åbne marine områder og ind i fjordene (Nielsen et al. 1995) (figur 5.7). I mange farvandsområder med lagdeling af vandsøjlen, er der også markante forskelle på saliniteten fra overfladevand til bundvand, men her vil effekten af stigende salinitet med dybden på algesamfundets sammensætning ske i et samspil med faldende lysniveau. Generelt falder antallet af arter med dybden men øges med saliniteten.

Figur 5.6. Tangsamfund på lavt vand domineret af blæretang (tv.) og faunasamfund på dybere vand på stenrev i det centrale Kattegat (th.) Foto: Karsten Dahl.



Figur 5.7. Identificeret antal algearter og fordeling på brun-, rød- og grønalger i forskellige danske farvandsafsnit (Dahl et al. 2005, baseret på Nielsen et al. 1995)



Næringssalte stimulerer vækst og biomasse af fytoplankton (mikroalger i vandsøjlen), som skygger for lysets nedtrængen gennem vandsøjlen til de bundlevende plantesamfund. Næringssaltkoncentrationer og derved også eutrofieringseffekter spiller en vigtig rolle for den vertikale fordeling af makroalger, samfundsstrukturen og tangskovens overordnede dybdeudbredelse.

Samlet set er der tale om en række naturlige og menneskelige påvirkningsfaktorer, som på en kompleks måde påvirker og strukturerer den biologiske diversitet og samfundsstrukturen i algesamfund på stenrev i de danske farvande.

Saliniteten påvirker ikke alene makroalgernes evne til at overleve men også den bundfauna, der græsser på algerne eller som konkurrerer med algerne om pladsen på det hårde substrat. Det grønne søpindsvin (*Strongylocentrotus droebachiensis*), der kan forårsage betydelig skader på tangskove, kan ikke

trives under 22-24 psu. Almindelig søstjerne (*Asterias rubens*), som er blåmuslingernes (*Mytilus edulis*) væsentligste rovdyr, trives heller ikke ved lavere salinitet. Derfor har blåmusling bedre mulighed for at brede sig, hvis saliniteten bliver lavere og dermed konkurrere med makroalgerne om pladsen på de hårde substrater. Desuden er den fysiske forstyrrelser i form af bølgeenergi på lavere vanddybder begrænsende for en lang række arter, mens andre som fx blæretang (*Fucus vesiculosus*), savtang (*Fucus serratus*) og en række andre brunalger er specialiseret til netop denne type habitat.

Den vertikale udbredelse, mængden og artssammensætningen af makroalger anvendes i danske farvande som indikator for natur- og miljøkvaliteten i relation til de marine EU-Direktiver. Det er derfor væsentlig at overvåge makroalgerne og de parametre, som påvirker makroalgesamfundet. Det betyder, at det også er vigtigt at vurdere effekten af klimaforandringer på påvirkningsfaktorerne og dermed på makroalgesamfundet.

5.4.2 Effekter af klimaforandringer på makroalgesamfund i danske farvande

De forventede klimaændringer forventes at påvirke de marine alger på både arts- og samfundsniveau. Da algesamfund i danske farvande udfolder sig i en kompleks tredimensionel "verden", styret af et samspil mellem forskellige vertikale og horisontale gradienter af naturlige og menneskabte faktorer, er det svært at forudsige præcis, hvad vi kan forvente om fremtidens liv på stenrevne. Der er imidlertid lavet en del undersøgelser på specifikke sammenhænge mellem arter og klimarelevante variabler som præsenteres i dette kapitel.

Effekter af øget vind på algesamfund

De forskellige klimascenarier indikerer, at de danske farvande vil blive påvirket af mere vind samt hyppigere og kraftigere vindhændelser. Vindscenarierne er forholdsvis usikre, især hvad angår ændringer i styrken af vindhændelserne. Hyppigere og især øget vindstyrker vil påvirke artsammensætningen af algesamfund på lavere vanddybde. Der er ikke lavet undersøgelser i danske farvande, der kan dokumentere, om det overordnet vil føre til lavere produktivitet på revne, men det kan ikke udelukkes.

Effekt af øget vandtemperaturer på algesamfundets diversitet

Gennem de sidste 30-40 år er der observeret en temperaturstigning i overflade og bundvand i de indre danske farvande på 1-1½ °C (Hansen 2015). Temperaturen forventes at fortsætte med at stige i takt med, at lufttemperaturen ifølge klimascenarierne øges. Klimascenarier forudser en markant nedgang i isdækket i den nordøstlige Østersø og en deraf betydelig opvarmning af Østersøen som følge af reduceret tilbagestråling af solenergi fra isdækket (Kjellström & Christensen 2013). Udstrømmende overskud af Østersøvand kan derfor tænkes at tilføre de danske havområder yderligere varmeenergi særligt i det øvre vandlag.

Stigende havtemperatur forventes at få indflydelse på den biogeografiske fordeling af makroalgerne, især på de levesteder, hvor arterne lever tæt på ved deres øvre grænse for varmetolerance.

I Nordvesteuropa har der været bekymring vedrørende effekten af stigende havtemperaturer for den store brunalge sukkertang (*Saccharina latissima*, figur 5.8). Arten er meget produktiv og kan træffes i så store forekomster, at den omtales som en habitatstrukturerende organisme. Arten har desuden en

hastigt voksende kommerciel interesse som dyrkningsart i danske farvande. Sukkertang findes i alle danske farvande, og den er registreret ned til ca. 20 m vanddybde under gode vækstforhold. Sukkertang har en liscyklus med et stort bladformet stadie kaldet sporofyt og meget små hanlige og hunlige planter kaldet gametofytter. Det store bladformede stadie har en levetid på 3-5 år. Sporofytstadiets vækst hæmmes generelt ved temperaturer over 17 til 20 °C, og gametofytstadiet og unge individer af sporofytstadiet kan ikke overleve temperaturer over 22–23 °C (Lee & Brinkhuis 1988).

Figur 5.8. Sukkertang på ralbund på stenrevet Hatter Barn i Natura-2000 området af samme navn. Den store bladformede alge er sporofytstadiet. Foto: Peter Bondo Christensen.

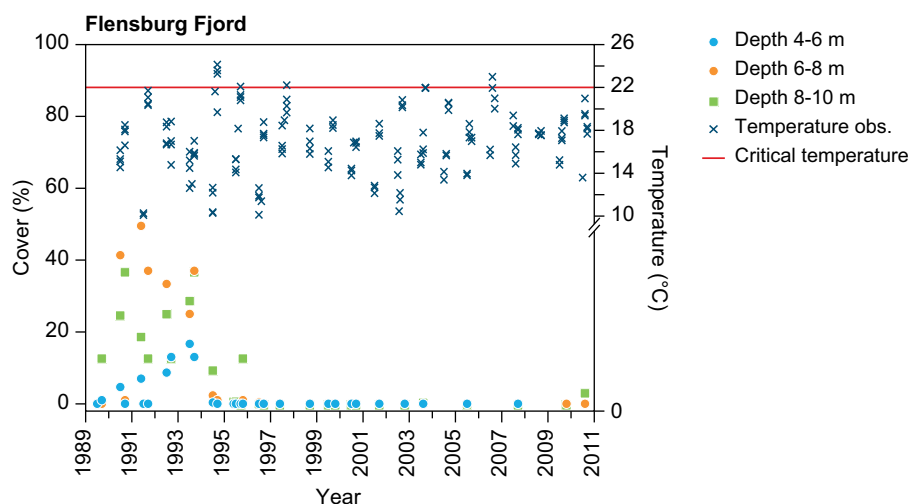


I et norsk studium konkluderes, at vandtemperatur over 19 °C over lang tid i 1997 langs kysten af Sydvestnorge var en af flere årsager til et strukturskifte fra samfund domineret af sukkertang til samfund domineret af trådalger (Moy et al. 2008). Der blev også registreret høje temperaturer langs den sydvest norske kyst i 2002 og 2006, og feltundersøgelser i samme område indikerede også en tilbagegang af sukkertang i området.

Et dansk studie har set på, om der var en statistisk sammenhæng mellem fem udvalgte arters forekomst i juni og varme temperaturforhold i havet året inden (Dahl et al. 2013). Data blev analyseret for en 20-årig periode frem til og med 2010. De fem arter, hvoraf sukkertang var den ene, er alle almindelige og vigtige komponenter i algesamfund i både åbne områder og fjorde. Arterne blev udvalgt på baggrund af et litteraturstudium, der pegede på, at de danske farvande kunne være tæt på deres temperaturmæssige sydlige udbredelsesområde. Undersøgelsen var dog ikke i stand til at påvise en signifikant effekt af temperaturen for nogen af arterne. Alligevel kollapsede bestandene af sukkertang i de fleste danske fjordssystemer i 1993 og 1994. Men kollapse skete før der blev målt usædvanlige høje og for sukkertang skadelige temperaturer i overfladevandet i de centrale dybere dele af fjordområderne. Dykkerobservationer indikerede, at kraftig sneglegræsning, massenedslag af blåmuslinger og meget dårlig vandkvalitet var grund til tangens tilbagegang (Dahl et al. 1995). Sukkertang er dog kendt for hurtig rekolonisering (Kain 1979), men kritisk høje temperaturer for sukkertang blev imidlertid målt efterfølgende gentagende gange i 1995, 2003 og 2006 i danske fjordområder. Det kan derfor ikke udelukkes, at forhøjede temperaturer var en medvirkende årsag til, at bestanden af sukkertang i nogle områder som fx Flensborg Fjord ikke eller kun delvist er restitueret i forhold til be-

gyndelsen af 90'erne (figur 5.9). Der er ikke i hele den 20-årige periode observeret sammenlignelige ændringer i sukkertangs udbredelse på stenrev i åbne farvande, men i disse områder har temperaturen på 5-15 meters dybde også altid været under den kritiske grænse. Der er således grund til bekymring for sukkertangs fremtid som en produktiv og habitatskabende makroalge på stenrev i fjordområder, da stigende temperature vil øge sandsynlighed for kritisk høje temperature i lavvande stenrevsområder.

Figur 5.9. Dækningsgraden af sukkertang på hårdt substart på tre dybder i Flensborg Fjord præsenteret sammen med vandtemperaturen målt på vandkemi-stationen I fjorden. Den for sukkertang kritiske øvre temperatur er angivet. Figur fra Dahl et al. 2013.

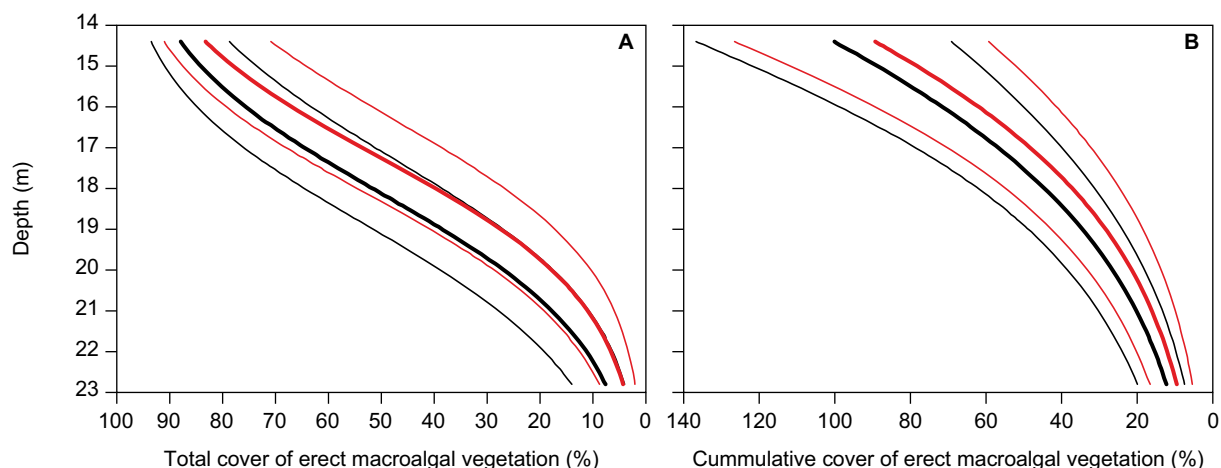


Effekter af øget nedbør og næringssalte på algesamfunds diversitet og produktivitet

De fremtidige klimaforandringer forventes at føre til en yderligere stigning i nedbøren over Østersøregionen, og i så fald vil saltholdigheden i Østersøen falde ret markant (Meier et al. 2011, se også kapitlet om hydrografi og iltforhold). Der forventes især mere vinternedbør samt hyppigere skybrudshændelser om sommeren sammenlignet med i dag. Øget nedbør vil bevirke en stigning i ferskvandsafstrømningen fra land og dermed en større udvaskning af næringssalte fra landbrugsarealer især om vinteren. Dette vil desuden kunne mindske saliniteten især i de mere lukkede fjordsystemer, lige som en større udstrømning af mere ferskt Østersøvand gennem de danske farvande vil sænke saliniteten i vandoverfladen i de indre danske farvande. Tilførslen af mere ferskt overfladevand vil desuden styrke lagdelingen i de danske farvande, hvilket dog evt. kan kompenseres af tiltagende vind, som vil øge opblandingen og muligvis vandudskiftningen. Samlet set antages klimaforandringerne at føre til et tab af marine arter, da især forventningen om faldende salinitet i Østersøen betragtes som rimelig sikker.

På baggrund af studier af effekten af næringssalte på udbredelsen af makroalger i danske farvande er der udviklet statistisk velfunderede empiriske modeller for stenrevslokaliteter i Natura-2000 områder i de åbne dele af Kattegat (Dahl & Carstensen 2008) og for kystnære hårdbundslokaliteter (Carstensen et al. 2008). Modellerne for stenrev i åbne farvande beskriver det samlede vegetationsdække af oprette makroalger og den kumulative vegetationsdække af alle oprette individuelle arter som funktion af lokalitet, solindstråling, dybde, græsningstryk af søpindsvin og den samlede tilførsel af kvælstof til de indre danske farvande fra Danmark og Sverige. Begge algeindikatorer responderer tydeligt på år til år variationer på tilførslerne af kvælstof i forårshalvåret (januar til juni) forud for algeovervågningen i august.

I forbindelse med INTERREG-projektet BaltAdapt blev der gennemført et klimascenarium med den ovenfor omtalte model, hvor kvælstoftilførslen blev øget. 19 % inden for 100 år (Dahl et al., 2013, Jeppesen et al. 2011). Stenrevet Kim's Top i det centrale Kattegat viste den mest signifikante respons på den øgede kvælstoftilførsel, og den samlede algedækning blev reduceret med ca. 10 % og den kumulative algedækning med ca. 5 % (figur 5.10). Scenarierne blev lavet baseret på viden om eksisterende udledninger, vel vidende at tilførslerne generelt er aftagende i disse år pga. vandmiljøplanerne.



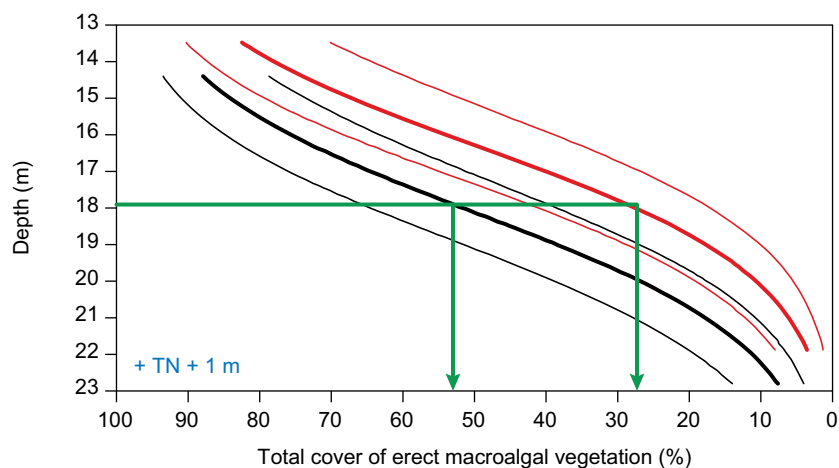
Figur 5.10. Samlet opret algedækning (tv) og kummulativ dækning af oprette individuelle alger (th) på forskellige vanddybder på stenrevet Kim's Top i det centrale Kattegat. De sorte linjer repræsenterer de modellerede dækninger af de to indikatorer ved et tilførselsscenario på ca. 78.000 tons kvælstof i forårshalvåret og de røde linjer et muligt klimascenarium med en tilførsel på 92.000 tons. De tykke og tynde linjer repræsenterer henholdsvis de modellerede middelværdier og 95 % konfidensintervaller for de estimerede algedækninger. Figur fra Dahl et al. 2013.

Vandstandsstigninger

DMI's klimascenarier forudsiger vandstandsstigninger i Danmark på 0,1 - 0,5 m frem mod 2050 og 0,2 - 1,4 m frem mod 2100 (www.klimatilpasning.dk). Den biologiske diversitet og produktivitet på stenrev vil blive påvirket af sådanne havstigninger. Stigende vandstand vil påvirke det lysniveau, der når ned til rev på bunden, og som er tilgængelig for tangskovene. Modsat hårdbundsområder forbundet med klippekyster, hvor arter over generationer kan tilpasse sig ændrede lysbetingelser ved at ændre placering, er flora og fauna på stenrev i danske farvande anderledes bundet uden tilsvarende mulighed for at kompensere. Det vil betyde lavere produktivitet og ændret samfundsstruktur. Udviskning af nye sten pga. øget erosion, som følge af stigende vandstand, vil formodentlig over meget lang tid øge hårdbundsarealerne, men det vil hovedsageligt ske meget kystnært og i et fysisk hårdt miljø, der kun er egnet levested for få arter.

På baggrund af data indsamlet under det Nationale Overvågningsprogram NOVANA siden 1989 er den gennemsnitlige sigtdybde i danske fjorde og kystnære områder estimeret til ca. 4 meter, mens den i de åbne dele af Kattegat og Bælthavet er ca. 7 m. Forudsat at lyssvækkelsen er den samme per meter vandsøjle i et fremtidigt havmiljø med stigende vandstand, så vil lysnedtrængningen til stenrev falde betydeligt ved vandstandsstigninger på fx 1 meter. Med en sigtdybde på 4 m vil lysreduktionen gennemsnitligt være på 20 % i de mere lukkede områder og på ca. 13 % i de åbne områder.

Effekten af vandstandsstigninger på makroalger på stenrev i Kattegat kan illustreres på baggrund af vegetationsmodellerne beskrevet i Dahl og Carstensen (2008). En relativ simpel måde at estimere effekten på makroalgerne er ved en simpel dybdeforskydning af de modellerede algedækninger med f.eks. 1 m. Figur 5.11 viser den kombinerede effekt af en vandstandsstigning på 1 m og en øget kvælstoftilførsel på 19 % på stenrevet Kim's Top i det centrale Kattegat ved forholdene i en gennemsnitssituation for perioden 1994-2006. På 18 meters dybde forudser modellen et tab af den samlede oprette algedækning på ca. 25 %, hvoraf de 10 % som tidligere omtalt skyldes den øgede kvælstoftilførsel. Da algedækningen opgøres i procent dækning af det hårde substrat, vil tabet opgjort i biomasse være betydelig større, da biomasse udfolder sig 3-dimensionelt og ikke 2-dimensionelt som dækningsprocenten.



Figur 5.11. Samlet opret algedækning på forskellige dybder på stenrevet Kim's Top i det centrale Kattegat modelleret for en kvælstoftilførsel svarende til gennemsnittet for perioden 1994-2006 (fed sort linje med tilhørende 95 % konfidensgrænser angivet ved tynde sorte linjer). Desuden er illustreret en mulig fremtidig samlet algedækning ved en vandstandsstigning på 1 m og en 19 % øget kvælstoftilførsel (fed rød linje og tilhørende 95 % konfidensgrænser angivet ved tynde røde linjer). Intervallet mellem de grønne pile illustrerer tabet på ca. 25 % i dækningsprocent på 18 m dybde.

5.5 Blomsterplanter (havgræsser)

5.5.1 Blomsterplanternes sammensætning, kvalitetselementer og overvågning

En del af de danske marine områder har et rigt og varieret planteliv på dybder, der modtager tilstrækkeligt lys til, at planterne kan vokse. Havbundens blomsterplanter omfatter i Danmark op mod 23 arter, som vokser i den bløde bund i vores fjorde og kystnære områder. Ud af disse er de fleste ferskvandsplanter, som blot tåler en vis saltpåvirkning. Hovedparten af observationerne i det marine overvågningsprogram i Danmark omfatter fire slægter: *Zostera*, *Ruppia*, *Zannichellia* og *Potamogeton*, med *Zostera* som langt den mest almindelige. *Zostera*-slægten omfatter mere end halvdelen (56 %) af alle observationer af blomsterplanter. Af de få blomsterplanter, der fuldt ud har tilpasset sig levevilkårene i havet, er langt den mest udbredte ålegræs (*Zostera marina*), som i beskyttede og klarvandede områder kan danne store sammenhængende enge. Ålegræs spiller således en vigtig rolle i de fleste danske kystnære økosystemer og er samtidig en god indikator for miljøtilstanden. Overvågningen af den marine blødbundsvegetation i det nationale overvågningsprogram har derfor fokus på ålegræs. Den følgende gennemgang vil

derfor primært beskrive klimaforandringerens betydning for ålegræs, der desuden er den mest undersøgte af vores marine blomsterplanter. I relation til vandrammedirektivet og havstrategidirektivet er det relevant at vurdere effekter af klimaforandringer på blomsterplanternes artssammensætning, dybdegrænse og bestandstæthed, hvilket også er de parametre, der registreres i forbindelse med overvågningen.

5.5.2 Udvikling og status i udbredelsen af ålegræs

Undersøgelser i perioden 1880-1930 viste, at ålegræs var vidt udbredt i danske fjorde og kystvande med maksimale dybdeudbredelser mellem 5 og 14 m (Krause-Jensen & Rasmussen 2009). I begyndelsen af 1930-erne reducerede den såkaldte 'ålegræssyge' bestandene i både Nordamerika og Europa, og i Danmark overlevede bestandene kun i de mest brakvandede dele (< 15 psu salt) af de indre fjorde og farvande. Efter ålegræssygen skete der en delvis reetablering af ålegræsset, men bestandene har formentligt på intet tidspunkt nået den store udbredelse, der var for hundrede år siden. I dag dækker bestandene ca. en fjerdedel af det tidligere areal, og dybdegrænserne er stort set kun det halve af niveauet for et århundrede siden (Krause-Jensen et al. 2004).

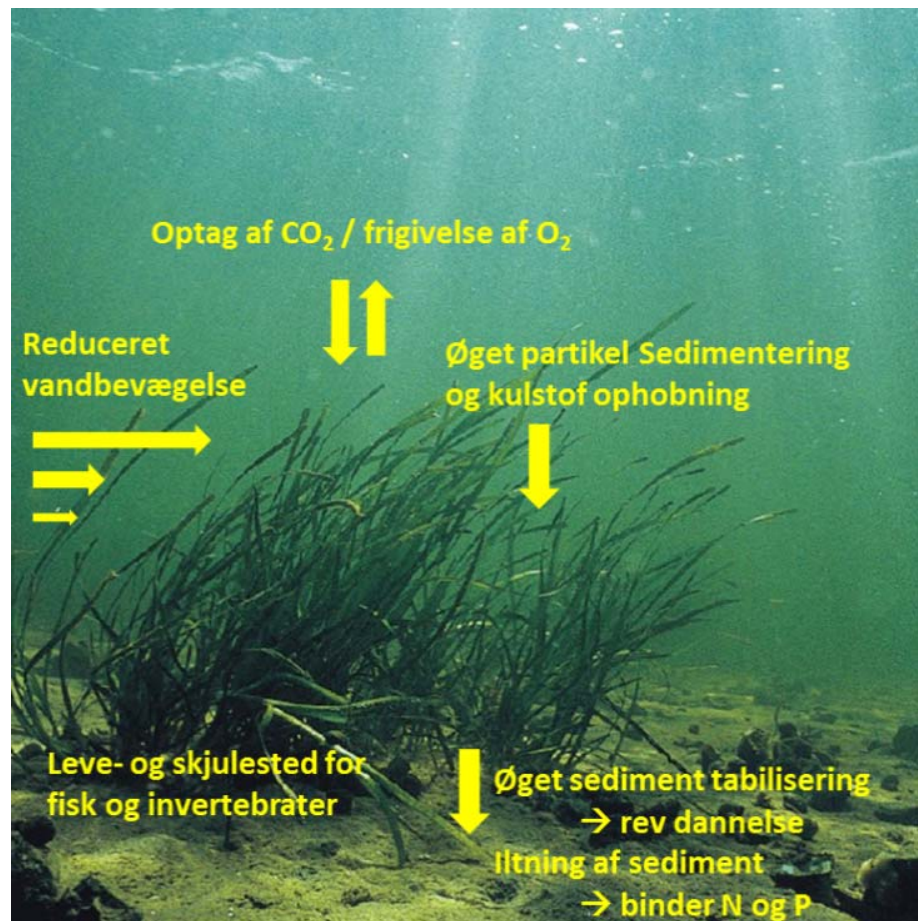
Det er velkendt, at ålegræssets dybdeudbredelse er markant større i åbne mere klarvandede områder end i det mere uklare vand i fjorde og mere lukkede kystnære områder. Ålegræssets maksimale dybdeudbredelse var således størst i områderne tilknyttet Nordsøen (5,0-5,4 m), lidt mindre i Østersøen (4,1-4,8 m) og mindst i Kattegat (3,1-4,2 m) i perioden 1989-2010. For alle områder gælder, at både hovedudbredelsen (10 % dækning) og den maksimale udbredelse (sidste strå) er markant mindre i de mere lukkede fjordsystemer. Den mindste dybdeudbredelse findes i Limfjorden, hvor både den maksimale udbredelse og hovedudbredelsen ligger mellem 2,0 – 3,3 m, hvilket er signifikant lavere end for alle øvrige områder. Med få undtagelser er der ikke sket nogen markant ændring i hverken ålegræssets hovedudbredelse eller maksimale dybdegrænse siden 1989. Dog er der de senere år indikationer på, at dybdeudbredelsen stiger i flere områder, hvilket tilskrives en forsinket respons på forbedrede lysforhold (Hansen 2013).

5.5.3 Havgræsers økologiske betydning

Havgræsenge er vigtige opdræts- og levesteder for en række fisk og bundlevende dyr og udgør dermed vigtige habitater, som sikrer opretholdelse af en høj marin biodiversitet og produktion (figur 5.12). Planternes rodnet forankrer bløde sedimentter, og de tætte bestande svækker vandbevægelsen, hvormed partikelophobningen øges, og vandet bliver klarere (Gutiérrez et al. 2013). Disse egenskaber beskytter og sikrer kystlinjen i mange eksponerede områder. Havgræsenge er meget produktive og ilter vandsøjlen og sedimentet, hvilket øger optaget og bindingen af næringssalte. Deres høje produktion, lange levetid og filtrerende egenskab resulterer desuden i et stort optag og en effektiv lagring af kulstof (Duarte et al. 2013).

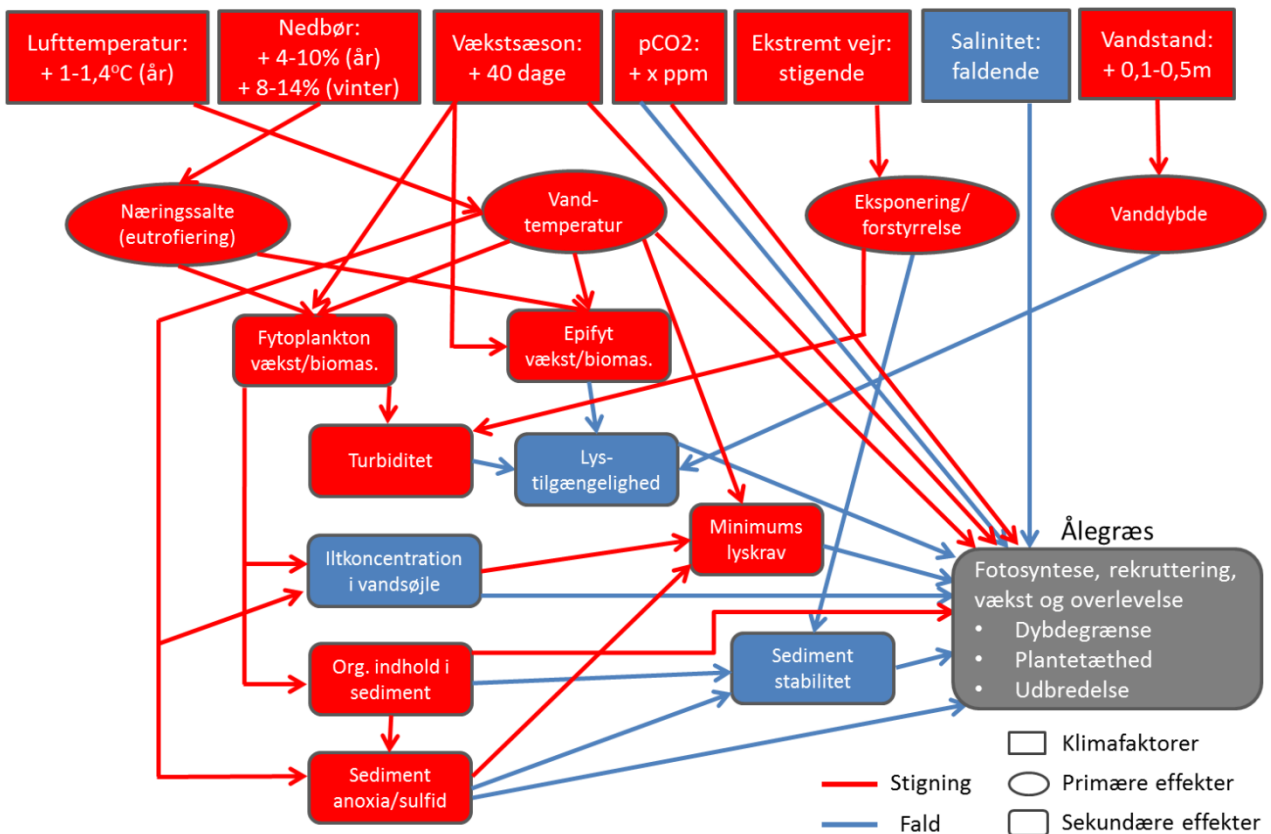
Havgræsenge er af stor økologisk og økonomisk værdi og rangeres globalt set som et af de mest værdifulde biologiske systemer på jorden (Gutiérrez et al. 2013). Desuden beskrives havgræs som "ecological engineers" på grund af deres signifikante indflydelse på deres fysiske, kemiske og biologiske omgivelser (Orth et al. 2006, Waycott et al. 2009, Fourqurean et al. 2012).

Figur 5.12. Havgræsenge fungerer som vigtige strukturerende enheder i lavvandede kystnære marine miljøer. Foto af Peter B. Christensen.



De kritiske faktorer for vækst og overlevelse af havgræsser er, ligesom for andre planter, tilgængelighed af lys, temperatur, uorganisk kulstof, næringssalte, egnet substrat til røddernes forankring og fysisk eksponering (Green and Short 2003). Hertil kommer, at havgræsser er følsomme over for lavt iltindhold i vandsøjlen (Greve et al. 2003), da de som andre karplanter kræver en kontinuerlig tilførsel af ilt for at kunne opretholde respirationen i de overjordiske blade og det underjordiske rodnet. Selv om lystilgængeligheden er afgørende for udbredelse og tæthed af havgræsser (Nielsen et al. 2002), så har andre vækstbetingelser også stor betydning (eg. Greve and Krause-Jensen 2005). Eftersom klimaforandringer påvirker stort set alle de nævnte fysiske, kemiske og klimatiske forhold mere eller mindre direkte (figur 5.13), vil det være forventeligt at kombinationen af de klimarelaterede forandringer vil have stor indflydelse på den fremtidige artssammensætning, dybdeudbredelse og bestandstæthed af havgræsser (Waycott et al. 2007).

Havgræssers udbredelse i lavvandede kystnære marine områder gør, at havgræsenge generelt er meget følsomme over for ændringer i det kystnære miljø, herunder udvidelse af kystnær bebyggelse, intensivning af landbrugsdrift, fiskeri og anden menneskelig aktivitet. Det er veldokumenteret, at forringelser af lysforhold relateret til udledning af næringssalte (eutrofiering) har en negativ effekt på havgræsengene. Men nyere undersøgelser viser, at der på globalt plan også er sket markante tilbagegange i havgræssernes udbredelse som følge af de andre antropogene presfaktorer i de kystnære områder. Samlet set nedsætter den antropogene påvirkning havgræssernes modstandsevne ('resilience') over for klimarelaterede forandringer i vækstforholdene.



Figur 5.13. Klimarelaterede ændringer (Senarie A1B: 1961-90->2050) i de fysiske og kemiske vækstbetingelser og de afledte mulige effekter på dybdegrænse, plantetæthed og udbredelse af ålegræs.

5.5.4 Dokumenterede og forventede effekter af klimaforandringer

Som tidligere beskrevet (kap. 5.1.1) refererer klimaforandringer til en lang række ændringer i det fysiske og kemiske miljø afledt af en stigning i atmosfærens indhold af drivhusgasser primært kuldioxid (CO₂). De konkrete ændringer af det marine miljø er mangeartede og komplekse (se figur 5.13). I det omfang det er muligt gennemgås i det følgende de dokumenterede og forventede effekter af disse forandringer på vækst, overlevelse og udbredelse af havgræsser, med fokus på erfaringer fra ålegræs.

Øget tilførsel af CO₂

Koncentrationen af kuldioxid (CO₂) i vandsøjlen på et givent tidspunkt er et produkt af udveksling af CO₂ med atmosfæren, kemiske ligevægte, optag af CO₂ fra primær producenter og tilførsel af CO₂ ved organismernes omsætning af organisk materiale (mineralisering). CO₂-koncentrationen i havet er således et resultat af en dynamisk udveksling styret af koncentrationsgradienter, fysisk opblanding samt biologiske og kemiske processer. I en forsimplet model vil en stigning i den atmosfæriske CO₂-koncentration medføre at CO₂-tilgængeligheden til primærproducenter i havet stiger. Laboratoriestudier viser, at ålegræssets fotosyntese og vækst generelt responderer positivt på en øget CO₂-tilgængelighed (Thom 1996). Under naturlige vækstforhold afhænger CO₂-stimuleringen dog af kombinationen af de øvrige potentielt begrænsende faktorer, og i et længerevarende studie kunne man ikke påvise, at øget CO₂-tilgængelighed stimulerede væksten hos ålegræs (Palacios & Zimmerman 2007). Det skyldes formodentlig, at et højere CO₂-niveau også stimulerer produktivitet og biomasse af epifytiske alger, som vokser på ålegræsbladene, og fytoplankton, hvilket påvirker ålegræs negativt ved ud-

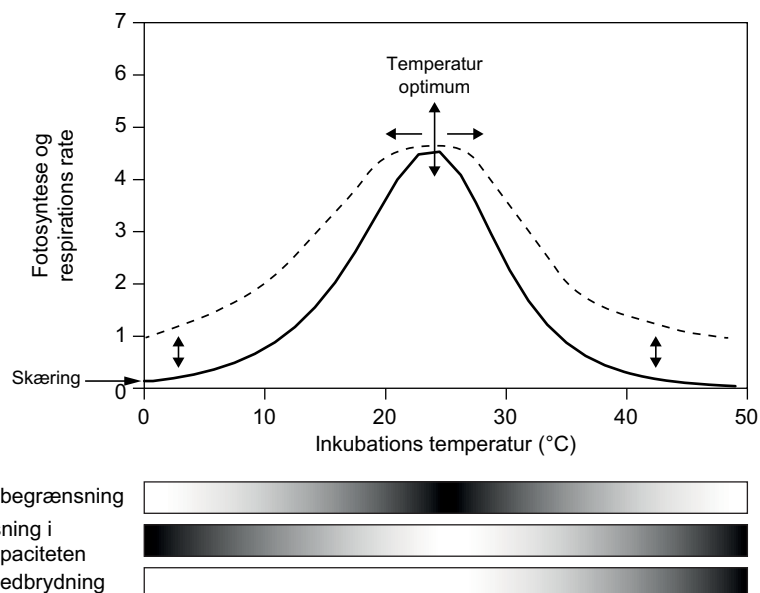
skygning og yderligere ved nedsat udveksling af næringssalte og gasser i epifytbevokset ålegræs grundet tykkere grænselag omkring plantens blade. Det er endvidere forventeligt at CO₂-responset varierer mellem havgræsarter med forskellig morfologi og CO₂-optagelse. Det er derfor forventeligt, at øget CO₂-tilgængelighed under nogle miljøforhold vil medføre en forandring i konkurrencen mellem havgræsarter, og under andre miljøforhold vil medføre en forandring i konkurrencen mellem havgræsser og alger (Beer & Koch 1996).

Lavere pH

Som en følge af en stigning i CO₂-tilførslen fra atmosfæren vil der ske en øgning af havvandets koncentration af CO₂ og en forskydning i den uorganiske kulstoflige vægt. Det vil medføre et fald i havets pH-værdi og et fald i koncentrationen af de øvrige uorganiske kulstofformer (CO₃²⁻, HCO₃⁻, H₂CO₃), hvoraf havgræsser kan optage HCO₃⁻. Men havgræssers affinitet for CO₂ er højere end for HCO₃⁻, så derfor forventes det ikke, at et fald i pH vil begrænse eller påvirke havgræssernes fotosyntese (Beer et al. 2006a). Fotosyntesen i et produktivt havgræsbed kan i sig selv få pH-værdien i vandsøjlen op på pH 9 (Beer et al. 2006b). Ved så høje pH-værdier opererer havgræsserne tæt på deres øvre grænse for optag af uorganisk kulstof, hvilket kan begrænse planternes fotosyntese. I et fremtidigt hav med forhøjede CO₂-koncentrationer kan forsuren derfor forventes at øge planternes fotosyntese og vækst under forhold, som ellers ville have været begrænset af muligheden for optag af CO₂ og HCO₃⁻.

Temperatur

Temperaturen har stor betydning for en lang række fysiske og kemiske forhold og processer, som tilsammen regulerer havgræssernes stofskifte (fotosyntese og respiration), vækst, reproduktion og dødelighed. Temperaturen regulerer alle enzymatiske processer, som er koblet til planternes stofskifte, herunder blomstring og frøspiring (de Cock 1981, Phillips et al. 1983). Tilsammen gør disse forhold, at temperaturen ikke blot påvirker den enkelte plantes trivsel (performance) men også er afgørende for produktivitet, biomasse og udbredelse på stor skala. I den sammenhæng er det bemærkelsesværdigt, at ålegræs er den mest almindelige havgræsart i hele det nordlige tempererede marine område, med en geografisk udbredelse fra det kolde Arktisk (Duarte et al. 2002) til varme områder i Middelhavet (Marba et al. 1996) og langs den amerikanske vest- og østkyst (Thayer et al. 1984). Langs dette omfattende udbredelsesområde varierer temperaturen fra < 0 °C under vinterisdække til op mod 35 °C om sommeren i Baja California (Meling-Lopez & Lbarra-Obando, 1999). Dette enorme udbredelsesområde vidner om, at ålegræs har en stor temperaturtolerance samt en udtalt evne til at tilpasse sit 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). Tilpasninger over et meget langt tidsforløb (evolutionen) til bl.a. temperatur er formodentlig en del af forklaringen på den store geografiske udbredelse. Men selv inden for lokale populationer har man dokumenteret en stor tilpasningsevne (akklimatisering) til sæsonbetegnede temperaturvariationer (figur 5.14).

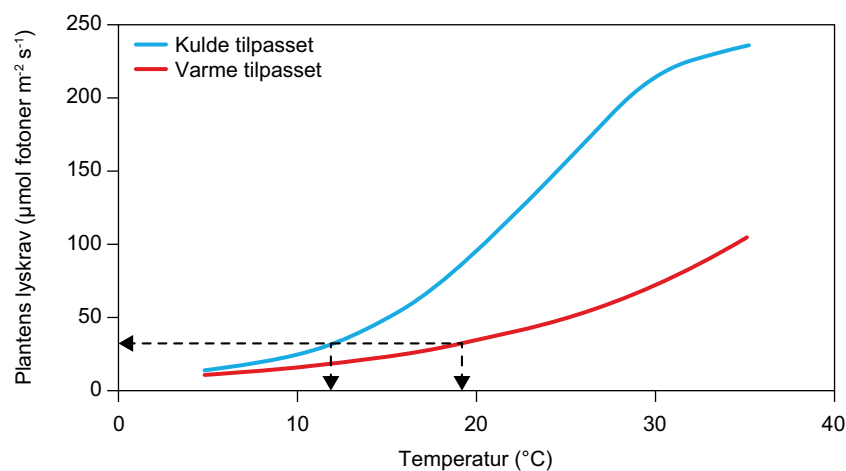


Figur 5.14. Havgræsser har i lighed med andre planter udviklet forskellige fysiologiske tilpasninger, som gør dem i stand til at leve ved meget forskellige temperaturer. Selvom havgræssernes kulstoffiksering (fotosyntese) primært reguleres af lystilgængeligheden, har man i mange år vidst, at den i lighed med biosyntesen (respirationen) udviser en stærk afhængighed af temperaturen. Sammenhængen mellem temperatur, fotosyntese og respiration følger en klokkeformet udvikling. Ved lave temperaturer nedsættes enzymaktiviteten, membranbevægeligheden og elektronoverførslen i fotosynteseapparatet. Disse forhold begrænser planternes fotosyntese, respiration og optag af næringssalte og derved planternes vækst. Med stigende temperaturer løses disse begrænsninger og kulstoffiksering, biosyntese og plantevækst stimuleres kraftigt. De øgede metaboliske rater medfører samtidigt en kraftig stigning i næringssaltbehovet og derved en stigning i muligheden for næringssaltbegrænsning af de cellulære processer. Kulstoffiksering og biosyntese topes ved en optimum temperatur, efter hvilken der sker et kraftigt fald i processerne, da fotosyntesens produktion af sukkerstoffer og tilgængeligheden af uorganiske næringssalte ikke kan imødekomme den stadigt stigende efterspørgsel til syntese af proteiner, strukturstoffer mm. Ved yderligere temperaturstigninger inaktiveres og nedbrydes cellens proteiner, hvilket yderligere nedsætter de metaboliske rater. Farveintensiteten i de horisontale søjler summerer betydningen af de forskellige regulerende processer (mørkere farve angiver større begrænsning/nedbrydning). Den blå kurve angiver temperaturafhængigheden hos en vintertilpasset plante, mens den røde repræsenterer en sommertilpasset plante.

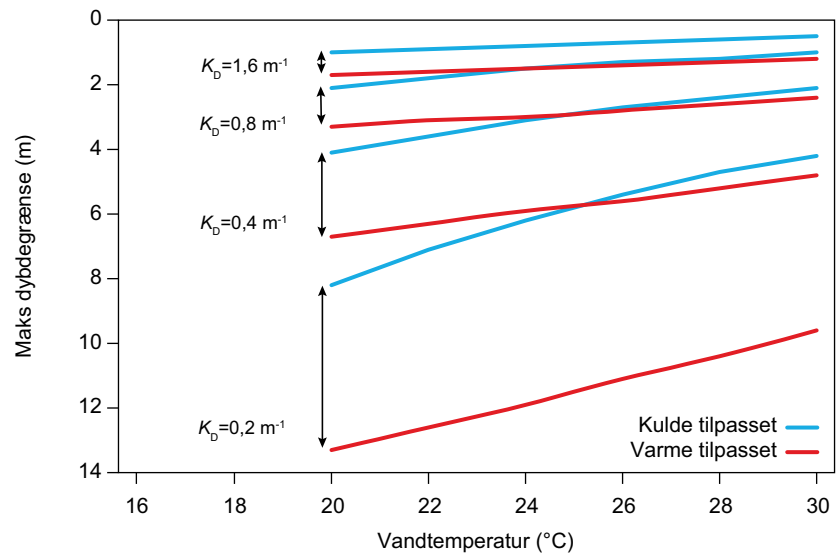
Ved længerevarende påvirkning (1 – 4 uger afhængig af art og temperatur) har havgræsserne dog en række muligheder for at tilpasse og optimere stofskiftet til ændrede temperatur forhold. Tilpasning til lave temperaturer sker eksempelvis ved en stigning i membranernes lipidindhold, som forøger membranernes bevægelighed, en stigning i enzymernes specifikke aktivitetsniveau og ændringer i algecellernes pigmentindhold, som forøger fotosynteseapparatets evne til at fange og udnytte lyset. Sådanne tilpasninger til en ændret væksttemperatur kan medføre en række markante ændringer i temperaturresponsen (Staehr & Borum 2011): ved 1) en forskydning i optimumtemperaturen mod den omgivende temperatur; 2) ændringer i raterne ved optimumtemperaturen; 3) ændringer i følsomheden ved under-optimale temperaturer, som påvirker raterne ved lave temperaturer og/eller kurvens stigningstakt; 4) ændringer i følsomheden ved over-optimale temperaturer. Kombinationer af de forskellige typer akklimatisering kan også foregå. Idet respirationsraten reagerer kraftigere på en temperaturstigning end fotosyntesen, vil der med stigende temperaturer opstå en ubalance i plantens stofskifte, som medfører, at planten har et stigende lysbehov. Men på grund af de førnævnte fysiologiske

tilpasningsevner er temperatureffekten på lyskravet betydeligt mindre for en varmetilpasset end en kuldetilpasset plante (figur 5.15).

På trods af ålegræssets store evne til temperaturltilpasning har studier vist, at længerevarende perioder med temperaturer over optimum stresser planten og fører til nedsat vækst, øget dødelighed og reduceret frødannelse og spiring (Nejrup & Pedersen 2008). Tilsvarende respons samt markant reduceret tæthed af ålegræsskud er ligeledes blevet påvist i andre studier, af hvilke det også fremgår, at ålegræsenge med høj genetisk diversitet har en større chance for at komme sig (Reusch et al. 2005, Ehlers et al. 2008). Samtidigt har nyere studier vist, at ålegræs som vokser under høje temperaturer er mere udsatte og følsomme over for suboptimale lys-, ilt- og salinitetsforhold (Nejrup & Pedersen 2008, Pulido & Borum 2010, Salo & Pedersen 2014). Samlet set forventes en stigning i vandtemperaturen på 2-3 °C under normale (ikke ekstreme) forhold at ville stimulere væksten, tætheden og dermed biomassen af ålegræs i de danske farvande. Men samtidigt kan man på lavt vand i de indre farvande forvente en stigning i hyppigheden af ekstreme vandtemperaturer, som overskrider plantens fysiologiske optimum på 15-25 °C. Så høje temperaturer kan påføre stor skade på lokale ålegræsbestande i form af reducerede dybdegrænser, udtyndede enge og endda massedød (Rask 2001, Moore et al. 2014). I det omfang forhøjede vandtemperaturer falder sammen med forringede iltforhold (Raun & Borum 2013) og nedsat lystilgængelighed (Moore et al. 2012), vil planterne være mere sårbare. Modelstudier indikerer dog, at den direkte temperatureffekt på ålegræssets maksimale dybdegrænse er betydeligt mindre end effekten af nedsat lystilgængelighed (figur 5.16).



Figur 5.15. Lyskravet hos ålegræsplanter. Lyskravet repræsenterer det minimum lysniveau, der på døgnbasis skal til for, at kulstoffikseringen i fotosyntesen kan følge med syntesen af kulhydrater i f. m. mørkeprocesserne i plantens respiration. Fysiologiske cellulære tilpasninger gør, at planter indsamlet om sommeren (varmetilpasset) har et betydeligt lavere lyskrav end kuldetilpassede planter indsamlet om vinteren. En sommerplante som vokser ved 20 °C vil således have samme lyskrav som en vinterplante, der vokser ved 12 °C, som indikeret ved de stiplede linjer (Stæhr & Borum 2011).



Figur 5.16. Beregnede maksimale dybdegrænser for ålegræsplanter tilpasset kulde (februar) og varme (august) akklimatiseret til nuværende og fremtidige (+5 °C) temperaturer. Modellen viser, at eksisterende variationer i vandets klarhed (lyssvækkelsen K_D) betyder mere for dybdeudbredelsen end vandtemperaturen, og at planterne i stort omfang kan kompensere for den stigende temperatur ved fysiologiske tilpasninger (Stæhr & Borum 2011). Bemærk at y-værdien (dybdegrænsen) aftager op af akse.

Ved ålegræssets sydligste udbredelse, hvor planterne vokser nær deres fysiologiske og fænologiske grænser, forventer man markante ændringer i udbredelsen og tæthed af ålegræs, samt ændringer i havgræssernes artssammensætning som følge af klimaforandringerne (Short et al. 2007). I Chesapeake Bay har et nyt 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 temperaturløstolerant (Moore et al. 2014). Efter som 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 negativ effekt på udbredelse, tæthed og artssammensætning af havgræsser i danske farvande.

Øget nedbør

Ifølge klimascenarierne kan der forventes en stigning i den årlige nedbør, hvilket især vil være tilfældet om vinteren, hvor nedbøren vil kunne stige med op til 34 % i forhold til normalen (1961–1990). Mængden af nedbør, især i vinter og det tidlige forår, har stor betydning for tilførsel af næringssalte, partikler og opløst stof i de indre danske farvande (Hansen 2013). År med særlig stor nedbør i vinterhalvåret er generelt kendetegnet ved en større tilførsel af organisk bundne og uorganiske næringssalte, hvilket stimulerer væksten af hurtigt voksende mikroalger og epifytter og kan medføre en kraftigere forårsopblomstring af fytoplankton samt nedsat sigtdybde. Ydermere medfører en øget vækst af fytoplankton en større tilførsel af organisk materiale til havbunden, som forøger iltforbruget og sandsynligheden for iltvind under varme stillestående perioder senere på sommeren (Conley et al. 2007). Kombinationen af øget algevækst (→ nedsat sigtdybde) og organisk berigelse af sedimentet (→ øget iltforbrug → lavere iltkoncentration) (se figur 5.13) menes at være en giftig cocktail, som kraftigt forringer tæthed, dybdeudbredelse og overlevelse hos ålegræs. Som tidligere beskrevet kan ålegræsplanter via en række fysiologiske tilpasninger delvist kompensere for det stress, som en øget vandtemperatur medfører for plantens stofskifte. På trods af denne tilpasning vil højere temperaturer dog medføre, at lysbehovet stiger, (figur 5.15), hvilket

specielt er problematisk, hvis vandets iltindhold samtidig er lavt pga. en forøget iltforbrug til nedbrydning af let nedbrydelig organisk materiale på overfladen af sedimentet. Selvom ålegræssets plantevæv sikrer en effektiv intern ilttransport til at opretholde den interne respiration med ilt, har planten svært ved at klare lave ilt-niveauer i vandsøjlen, særligt under høje temperaturer. Således har eksperimenter vist nedsat vækst og øget dødelighed ved temperaturer over 25 °C, når iltkoncentrationen samtidig er lav (Pulido & Borum 2010). Desuden forventes den øgede nedbør at sænke vandets salinitet, og ålegræs vokser ikke og producerer ikke frø ved en salinitet under ca. 10 psu (Nejrup & Pedersen 2008). Nye studier har vist, at kombinationen af høje temperaturer og lav salinitet er meget negativ for vækst, overlevelse og reproduktion hos ålegræs (Salo & Pedersen 2014).

Storm og oversvømmelse

Stigende hyppigheden af voldsomme vejrhændelser vil medføre flere episoder med kraftig blæst, som i ekstreme tilfælde kan resultere i vandstandsstigning og oversvømmelse af kystnære områder. Et eksempel på dette var stormen Bodil, som i december 2013 medførte lokale vandstandsstigninger på 2 m i Roskilde Fjord og dele af Øresund. Kombinationen af stormvejr og oversvømmelse eroderer kystzonen, hvilket øger sedimenttransport og -aflejring og dermed vandets turbiditet, hvilket fører til en lavere lysnedtrængning på især lavt vand, hvor havgræsserne gror. Feltstudier fra Chesapeake Bay viser, at kombinationen af øget fysisk forstyrrelse, forringelse af lysmiljøet og aflejring af sedimenter stresser havgræsserne markant og nedsætter deres tolerance over for høje temperaturer (Moore et al. 2012). Således har ekstreme oversvømmelser langs Østafrika's kyst medført tab i storskala af havgræshabitater (Bandeira & Gell 2003). Tilsvarende hændelser er sket i Queensland, Australien hvor det tog tre år for havgræsengene at reetablere sig (Campbell & McKenzie 2004). Ekstreme vejrhændelser i form af kraftig nedbør kan endvidere påvirke havgræsserne ved at fortynde havvandet og sænke saliniteten. Dette har haft en negativ effekt på havgræsken *Thalassia testudinum* i Venezuela (Chollett et al. 2007) og forventes, som nævnt ovenfor, at kunne forringe vækst, overlevelse og dermed udbredelse af ålegræs i danske farvande (Salo & Pedersen 2014).

Vandstandsstigning

En general stigning af havets vandstand vil forøge vanddybden for eksisterende havgræssamfund, som derfor må forventes at blive markant påvirkede. Den øgede vanddybde vil nedsætte lystilgængeligheden og øge erosionen af kystzonen (litoral). I nogle områder vil de negative effekter på de nuværende havgræsenge kunne kompenseres ved etablering af plantesamfund i kystretningen i områder, som under de eksisterende forhold er for eksponerede til, at blomsterplanternes rodsystem kan modstå den fysiske forstyrrelse fra bølger og strøm (Short et al. 2001). Tilsvarende vil øget strøm kunne erodere eller skabe nye områder for kolonisering af havgræsenge, og i nogle tilfælde stimulere vækst og dermed tæthed og biomasse, idet den øgede vandbevægelse nedsætter grænselaget omkring bladene og dermed stimulerer optaget af næringssalte og CO₂ (Borum et al. 2004). Grundet lokale forskelle i topografi, sedimentforhold, kystsikring, fysisk eksponering og bebyggelse vil effekten af havstandsstigning for udbredelse og tæthed af blomsterplanter i danske farvande formodentlig variere meget, selv over korte afstande. Men da danske farvande er karakteriseret ved udbredte lavvandede områder, vil det samlede berørte areal sandsynligvis udgøre en anseelig andel af det eksisterende udbredelsesareal. På globalt plan forventes, kombinationen af hyppigere og kraftigere storme og stigende vandstand at reducere udbredelsen af havgræshabitater (Connolly 2012).

Biotiske interaktioner (konkurrence og invasive arter)

Organismer kan over længere tidsforløb tilpasse sig klimaændringer ved at ændre deres biogeografiske udbredelsesområde og derved opretholde deres temperaturregime (Parmesan & Yohe 2003). Man kan derfor forvente, at varmeelskende arter vil flytte deres udbredelse nordpå og derved potentielt udkonkurrere hjemmehørende arter, især hvis disse er dårligere tilpasset en kommende højere temperatur (Jorda et al. 2012). I løbet af det sidste århundrede har danske farvande modtaget henved 50 nye marine arter fra fjernt liggende områder, en udvikling som er primært drevet af tilførsel af ballastvand og udsætning af organismer til opdræt (Stæhr & Thomsen 2012). Nogle få af disse er karakteriseret ved at være invasive og forstyrre de modtagne habitater. For størstedelens vedkommende har vi meget lidt viden om deres nuværende effekt på den oprindelige flora og fauna, og vi ved endnu mindre om deres indflydelse i et fremtidigt varmere klima. Mens de mulige effekter af temperaturreven konkurrence fra mere temperaturtolerante havgræsser og andre invasive arter (makroalger og makroinvertebrater) ikke er undersøgt for danske farvande, så beskrives begge forhold som værende et stort problem for udbredelse af havgræsser *Posedonia oceanica* i Middelhavet (Jorda et al. 2012).

5.6 Bundfauna

Sedimentbunden i de indre danske farvande rummer et rigt samfund af hvirvelløse bunddyr, som monitoreres som en del af det nationale overvågningsprogram. De mange forskellige dyr har vidt forskellige tilpasninger og vil derfor reagere forskelligt på miljøændringer betinget af klimaforandringer. Men som helhed, er bundfaunasamfundet følsomt over for forandringer i det omgivende miljø, og bundfaunaen indgår som beskrivende parameter for miljøtilstande i både vandrammedirektivet og havstrategidirektivet. Når der sker ændringer i det omgivende miljø, vil det manifestere sig som ændringer i bundfaunaens sammensætning, som ikke umiddelbart kan bruges til at kvantificere, om miljøændringerne er positive eller negative. Det er kun, når der er tale om mere markante hændelser som f.eks. iltsvind, at biomassen og tætheden falder målbart. For at kunne relatere ændringer i faunasamfundet kvalitativt i forhold til miljøændringer, er der udviklet et multimetrisk indeks, Dansk Kvalitets Indeks (DKI), som ud fra faunaens sammensætning beskriver miljøtilstanden på en skala fra 0 til 1, jo højere DKI desto bedre er miljøforholdene (Josefson et al. 2009). DKI-beregningen er baseret dels på bundfaunaens diversitet (Shannon-diversitet) og dels på en artsspecifik vurdering af tolerancen over for miljøforringelser (AMBI-indeks) (Borja et al. 2003). AMBI-værdien og Shannon-diversiteten vægtes lige højt i udregningen af DKI-værdien. Diversiteten er normaliseret i forhold til en referenceværdi, der gælder for et uforstyrret bundfaunasamfund. Da referenceværdien for bundfaunaens diversitet afhænger af saliniteten, tages der i den seneste version af DKI-beregningen højde for dette (Josefson 2013). De tidlige variationer, der er observeret for DKI i de indre danske farvande skyldes hovedsageligt ændringer i diversiteten og i mindre grad ændringer i AMBI (Hansen & Josefson 2011). Effekten af klimaforandringer vil derfor blive vurderet i forhold til den mulige påvirkning af bundfaunaens diversitet i de indre danske farvande generelt.

5.7 Effekter af klimaforandringer på bundfaunasamfund i danske farvande

5.7.1 Temperatur

Det er forventeligt, at bundfaunaen vil blive påvirket af klimaforandringer. Dog er det ikke muligt at forudsige hvordan. Det skyldes, at bundfaunaen hovedsageligt påvirkes af de indirekte effekter, der opstår, når klimaet forandrer sig; f.eks. ændringer i hydrografi og vandkemi med de dertilhørende usikkerheder. Der er ikke lavet nogen eksplicite undersøgelser af temperaturens betydning for bundfaunaens udbredelsesmønstre i de indre danske farvande, men der er ikke noget, der tyder på, at en øget temperatur vil have en tydelig effekt - muligvis fordi andre meget vigtigere hydrografiske faktorer overskygger en evt. effekt af temperaturen i sig selv. Det er dog velbeskrevet, at fordeling af biodiversiteten på havbunden ikke følger samme fordeling i forhold til temperatur som biodiversiteten på landjorden, hvor man ser et fald med stigende breddegrad. På havbunden ser man derimod, at biodiversiteten er mindst lige så høj i Arktis som i de tempererede områder.

5.7.2 Salinitet

Det har længe været kendt, at saliniteten er helt afgørende for bundfaunaens sammensætning og diversitet, eftersom artsrigdommen stiger med saliniteten (f.eks. Remane 1934, Zettler et al. 2007, Josefson 2009). Det kommer til udtryk som en diversitetsgradient i de indre danske farvande med faldende diversitet i retning mod Østersøen. Der er også en faldende diversitet, når man går fra de åbne farvande og ind mod fjordene. Hvis klimaforandringerne ændrer saliniteten, vil diversiteten og sammensætningen af faunaen også ændre sig i overensstemmelse med de kendte fordelingsmønstre i forhold til salinitet. Helt overordnet vil diversiteten blive større, såfremt saliniteten stiger. Hvis et stigende saltindhold primært skyldes vandstandsstigninger, og dermed et løft af salt-springlaget (haloklinen), vil man ydermere forvente, at det især er i det dybdeinterval, hvor springlaget ligger i dag samt i den sydlige del af de indre danske farvande, at diversiteten øges mest, fordi disse bundområder i særlig grad vil opleve stigende salinitet. Tilsvarende vil et fald i saliniteten som følge af øget nedbør og dermed større ferskvands afstrømning medføre et fald i diversiteten. Denne ændring vil være mest tydelig i fjorde og de kystnære farvande, hvor en forøget ferskvandsafstrømning mest markant vil bevirke et fald i saliniteten i bundvandet.

5.7.3 Iltforhold

Blandt andre klimapåvirkelige forhold, der er vigtige for bundfaunaens fordeling, er først og fremmest vandets iltindhold. Sekundært kommer vandets og bundens produktivitet og de hydrografiske blandings- og strømforhold. Lave iltkoncentrationer er begrænsende for bundfaunaen. Ved en kritisk lav grænse begynder faunaen at dø, og ved længerevarende kraftigt iltsvind kan hele faunasamfund forsvinde. Lave, men ikke fysiologisk kritiske, iltkoncentrationer, kan også påvirke faunaens diversitet negativt, fordi sedimentets redox-forhold bliver påvirket. Når iltkoncentrationen bliver lav, bliver sedimentet mere reduceret, og svovlbrinte kan trænge højere op mod sedimentets overflade og evt. helt op i bundvandet. Svovlbrinte er meget giftig og begrænser faunaens mulighed for at etablere sig i de dybere sedimentlag. Den mest forudsigelige effekt af klimaforandringerne på bundfaunaen er derfor negativ pga. det forventede lavere iltindhold i et fremtidigt varmere klima. De områder, der i dag er ramt af tilbagevendende iltsvind, og hvor den flerårige fauna er fraværende (f.eks. det sydlige Lillebælt), vil derfor brede sig, og nye områder vil blive ramt (Bendtsen & Hansen 2013). Ligele-

des vil de områder, som kun lejlighedsvis oplever iltsvind, også brede sig, blive flere og blive ramt oftere. Det er også muligt, at bundfaunasamfundet som helhed bliver mere følsomt over for iltsvind og vil blive påvirket efter kortere tids eksponering for iltsvind. Dette fordi sedimentets bufferkapacitet, der medvirker til, at den giftige svovlbrinte bliver oxideret, mindskes, hvis redoxforholdene i sedimentet forringes pga. længerevarende lave iltkoncentrationer (Hansen et al. 2004). Konsekvensen af de forventede klimaforandringer for iltforholdene anses som den væsentligste negative effekt på det marine økosystem (Hansen & Bendtsen 2013).

5.7.4 Primærproduktion

Vandets og bundens produktion af plantemateriale (primærproduktion) har indflydelse på, hvor meget føde, der tilføres til bundfaunasamfundet. Jo højere produktionen er, desto større biomasse og tæthed kan der være af bundfaunaen, men kun så længe at produktionen af organisk materiale ikke påvirker iltforholdene negativt. Som udgangspunkt vil forventningen om en øget primærproduktion som følge af en større tilførsel af næringssalte grundet øget nedbør/afstrømning derfor have en positiv effekt på bundfaunaen. Men effekten af en faldende primærproduktion kan også være positiv for bundfaunaen, hvis det medfører mindre iltforbrug og dermed kan kompensere for den lavere opløselighed af ilt i et fremtidigt varmere hav. Beregninger har vist, at den del af primærproduktionen, som synker ned til bundvandslaget, skal reduceres med ca. 30 %, for at kompensere for den negative effekt på iltindholdet af en temperaturstigning på tre grader (Bendtsen & Hansen 2013). Men lavere primærproduktion kan også betyde lavere biomasse og tæthed og medføre en reduktion i diversiteten (Rosenberg 1985, Josefson et al. 2014). I den seneste havrapport fra DCE viser analyser, at der er tendens til faldende tæthed af bundfauna i fjordene og de kystnære områder, og denne reduktion er sket og er sammenfaldende med den periode, hvor tilførslerne af næringssalt er mindsket. Hvis primærproduktionen falder, og temperaturen samtidig stiger, vil det have stor effekt på bundfaunaens fødegrundlag. Det skyldes, at ved en øget temperatur vil en større andel af primærproduktionen nedbrydes, mens det synker gennem vandsøjlen, hvorved bidraget til bunden reduceres yderligere (Hansen & Bendtsen 2006, Maar & Hansen 2011).

5.7.5 Hydrografi

De hydrografiske blandings- og strømforhold er vigtige for bundfaunaens fordeling (Josefson & Hansen 2004; Josefson 2009; Josefson & Göke 2013, Bendtsen & Hansen 2013). Det skyldes formodentligt, at der eksisterer populationer af bundfauna, som kun kan opretholdes ved, at der rekrutteres bundfauna fra tilstødende områder via spredning af planktoniske larver. Dynamiske populationsmodeller har vist, at bundfaunaen kan have svært ved at etablere sig i den sydlige del af de indre danske farvande pga. det fremherskende strømningsmønster med en gennemsnitlig set nordgående overfladestrøm (Bendtsen & Hansen 2013). Som beskrevet i kapitlet om de hydrografiske forhold, så er der stor usikkerhed om, hvordan klimaforandringerne vil påvirke de mere detaljerede strømningsmønstre og blandingsforhold. Det må formodes, at mere vind i et fremtidigt klima generelt vil øge blandingen og dermed vandudvekslingen mellem fjorde/kystnære områder og de åbne områder. Det vil øge diversiteten i de kystnære områder og dermed diversiteten generelt i de danske farvande.

5.8 Sammenfatning: klimaeffekter og manglende viden

5.8.1 Plankton

Det er overvejende sandsynligt, at fremtidige klimaændringer vil medføre yderligere ændringer af fytoplanktons artsammensætning, biomasser og udbredelse. Desuden vil forskydningen mellem de enkelte arters forekomst formodentligt forrykke timingen i forhold til fødenettes øverste led, hvis disse ikke formår at tilpasse sig ændringerne tilstrækkelig hurtigt. Derved ændres flowet i gennem fødekæderne fra primærproducerende alger til fisk. Ligeledes kan en øget frekvens af storme i fytoplanktonets vækstsæson være en medvirkende årsag til algeopblomstringer. Øget lagdeling sammen med højere sommertemperaturer kan danne basis for algeopblomstringer, der i mange tilfælde kan bestå af toksiske og på anden måde skadelige alger herunder blågrønalger og furealger. Disse ændringer kan i kombination påvirke vurderingen af miljøtilstanden i henhold til vandrammedirektivet og havstrategidirektivet i negativ retning.

5.8.2 Makroalger

De forudsagte klimaændringer med øget vindenergi, varmere havvand, muligt lavere saltholdighed, øget vandstandsstigning og øget næringssalttilførsel er hver for sig faktorer, som vil presse makroalgevegetationen imod mindre produktivitet og lavere biodiversitet. Effekten forventes at få betydning ikke bare for habitatkvaliteten, men sandsynligvis også for det kommercielle og rekreative fiskeri, da en række fiskearter er afhængige af tangskove som føde eller opvækstområder.

De præsenterede eksempler viser, at klimaforandringer vil påvirke de makroalge-indikatorer, der anvendes eller forventes at blive anvendt i de marine direktiver.

Den allerede registrerede opvarmning af de danske farvande kan meget vel have påvirket diversiteten og samfundsstrukturene på revene. Studier af tidsserier af rev- og dybdespecifikke diversitets-indeks kan muligvis påvise, om de hidtidige temperaturstigninger har haft en effekt på disse indeks. Det er imidlertid et spørgsmål, om det er muligt at skelne effekten af den stigende vandtemperatur fra effekten af den igangværende forbedring af nærings-saltforholdene i de danske farvande.

5.8.3 Blomsterplanter (havgræsser)

I nedenstående tabel er sammenfattet forventningerne til klimarelaterede effekter på havgræsser og angivet en vurdering af det nuværende vidensniveau. Årsagssammenhængende er skitseret i figur 5.13.

Tabel 5.1. En generaliseret oversigt over primære og sekundære klimapåvirkningers effekter på tæthed, udbredelse og arts-sammensætning af havgræsser i danske marine områder, samt en vurdering af det eksisterende vidensniveau. Antallet af + og – angiver graden af påvirkning.

Klimapåvirkning Primær (P), sekundær (S)	Effekt på havgræsser Stofskifte, vækst, biomasse, reproduktion, dødelighed, udbredelse, artssammensætning	Effekt retning Positiv (+) Negativ (-)	Vidensniveau Højt, middel, lavt
Øget CO ₂ -koncentration i havvand (P)	Øget vækst og udbredelse af havgræsser (og andre primærproducenter). Effekt afhænger dog af lys, temperatur og næringsalte	+	Middel
Lavere pH (S)	Svag stimulering af vækst i den intensive vækstsæson	+	Lav
Højere vandtemperatur (P)	Øget vækst og biomasse af havgræsser og andre primærproducenter, hvis temperatur er inden for tolerancegrænser Tidligere frødannelse Øget stofskifte → større lyskrav Øget mortalitet ved høje temperaturer,	++ + - - - - - -	Høj Middel Høj Høj
Øget nedbør (P)	Øget udvaskning af næringsalte, uorg. og org. partikler → eutrofiering inkl. nedsat lys → reduceret dybdeudbredelse Nedsat salinitet → øget dødelighed og reduceret vækst	- - - - -	Høj Middel
Storm (P)	Øget fysisk eksponering → fysisk stress og forringede lysforhold (pga. resuspension) → fragmentering og reducere af havgræsenge Kortvarig vandstandsstigning (se nedenfor)	- - ?	Middel ?
Vandstandsstigning (S)	Tab af habitater på dybere vand pga. mindre lys Etablering af habitater ind mod kysten	- - - +	Høj Lav
Biotiske interaktioner (S)	Øget konkurrence fra mere varmetolerante arter og evt. invasive arter → nedsat udbredelse af ålegræs men muligvis erstatning med andre arter	-/+	Lav

Set i lyset af de ovenfor skitserede mulige klimaeffekter på udbredelse, tæthed og artssammensætning af havgræsser forventes klimaforandringer at stresse havgræsserne yderligere, hvilket kan betyde, at vurderingen af miljøtilstanden i de danske farvande med baggrund i ålegræs kan forrykke sig i en overvejende negativ retning.

Som det fremgår af teksten og især tabel 5.1, så mangler der viden om ålegræs i forhold til klimaforandringer især inden for tilstand/miljømål, økologiske sammenhænge, klima- og udviklingsscenarier. Øget viden om disse emner vil forbedre muligheden for at vurdere effekter af kommende og igangværende klimaforandringer og dermed grundlaget for at lave indsatsplaner for en forvaltning af kystzonens udsatte havgræshabitater. De områder som er dårligst belyst er:

- Betydning af ekstreme hændelser af temperatur, salt, ilt (hvor længe og hvor meget skal der til, før det går galt)
- Betydningen af bestandsstørrelse/tæthed for ålegræssets modstandsevne/resilience
- Genetisk og fysiologisk tilpasningsevne til især øget temperatur
- Effekter af herbicider og miljøfremmede stoffer i samspil med klimaforandringer

- Betydningen af biotiske interaktioner og kaskadeeffekter (fx effekter af invasive/nye arter - positive og negative)
- Naturlige variationer af de regulerende parametre i havgræsbestande, dvs. døgn- og årsvariationer i lys, temperatur, ilt, eksponering, salinitet mv.
- Tålegrænser/krav
- Synergi og kumulative effekter af lys, temperatur, salinitet, ilt og eutrofi-ering
- Udbredelse og tålegrænser for de andre dominerende marine blomsterplanter.

5.8.4 Bundfauna

De forskellige mulige effekter af klimaforandringer på bundfaunaens diversitet kan altså være både negative og positive. Det er forventeligt, at der vil forekomme flere forskellige og modsatrettede effekter samtidigt, og det samlede resultat vil være ukendt. Hvis f.eks. primærproduktionen stiger, er det som udgangspunkt positivt, men hvis iltkoncentrationen falder, er det negativt. I nogle tilfælde vil det dog være muligt at forudsige, hvilken effekt der vil være dominerende. Den kombinerede effekt formodes at være negativ, fordi data indikerer, at ilt er vigtigere for fordelingen af bundfaunaens diversitet end fødeudbuddet. Men disse vurderinger kan kun laves ud fra kendskabet til, hvordan faunaen er fordelt under det nuværende klima og ikke ud fra, hvordan den vil være sammensat i et fremtidigt klima. I tabel 5.2 er der angivet klimaeffekter og deres (mulige) kombinerede effekt for bundfaunaen i de danske farvande.

Tabel 5.2. Sammenstilling af hypoteser om effekten af forskellige klimarelaterede ændringer i hydrografi og vandkemi på bundfaunaens diversitet. Effekten af de hydrografiske ændringer er vurderet enkeltvis i tabellen nederste række (mørkegrå). Det mulige resultat af to forskellige effekter i kombination er angivet i tabellens øvrige felter. +) angiver at den samlede effekt er positiv, eller at den positive effekt formodes at være dominerende. -) angiver en samlet set negativ effekt. X) angiver at kombinationen er irrelevant. ?) angiver at den kombinerede effekt er ukendt.

X	Nordlig forskydning af lagdelingszone*	Sydlig forskydning af lagdelingszone	Styrket springlag	Højere primærproduktion	Lavere primærproduktion	Mere vind	Mindre ilt
Nordlig forskydning af lagdelingszone							
Sydlig forskydning af lagdelingszone	X						
Styrket springlag	-	?					
Højere primærproduktion	?	+	?				
Lavere primærproduktion	-	?	-	X			
Mere vind	?	+	+	+	?		
Mindre ilt	-	-	-	-	-	-	
Enkelt-vurdering	-	+	-	+	-	+	-

* Lagdelingszone beskriver det område i de indre danske farvande, hvor vandsøjlen er mere eller mindre permanent salt-lagdelt.

Da ændringer i DKI-indekset, som nævnt ovenfor, hovedsageligt er styret af ændringer i biodiversiteten, kan de forventede effekter af klimaforandringer i forhold til vurderingen af miljøtilstanden baseret på bundfauna i henhold til vandrammedirektivet og havstrategidirektivet aflæses af ovenstående tabel.

5.9 Referencer

BACC author team 2008. Assessment of climate change for the Baltic Sea Basin, BACC author team, Springer.

Bandeira, S.O. & Gell, F. 2003. The seagrasses of Mozambique and south-eastern Africa. In: (E.P. Green and F.T. short, eds.). World Atlas of Seagrasses. University of California Press, Los Angeles. pp. 93-100.

Beaugrand, G., Brander, K. M., Lindley, J. A., Souissi, S. & Reid, P. C. 2003. Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. *Nature* 426, 661-664.

Beer, S. & Koch, E. 1996. Photosynthesis of seagrasses vs. marine macroalgae in globally changing CO₂ environments. *Marine Ecology Progress Series* 141: 199-204.

Beer, S., Axelsson, L. & Björk, M. 2006a. Modes of photosynthetic bicarbonate utilisation in seagrasses, and their possible roles in adaptations to specific habitats. *Biologia Marina Mediterranea* 13: 3-7.

Beer, S., Mtolera, M., Lyimo, T. & Björk, M. 2006b. The photosynthetic performance of the tropical seagrass *Halophila ovalis* in the upper intertidal. *Aquatic Botany* 84: 367-371.

Berge, T., Daugbjerg, N., Andersen, B. B. & Hansen, P. J. 2010. Effect of lowered pH on marine phytoplankton growth rates. *Mar Ecol Prog Ser* 416, 79-91.

Bendtsen J., Gustafsson K.E., Söderkvist J. & Hansen J.L.S. 2009. Ventilation of bottom water in the North Sea – Baltic Sea transition zone. *J Mar Syst* 75: 138-149

Bendtsen J. & Hansen J.L.S. 2013a. Effect of global warming in the Baltic Sea – North Sea transition zone *Ecological Modelling* 264: 17-26

Bendtsen J. & Hansen J.L.S. 2013b. A model of life cycle, connectivity and population stability of benthic macro-invertebrates in the North Sea – Baltic Sea transition zone. *Ecological Modelling* 267: 54-65

Borja A., Muxika I. & Franco J. 2003. The application of a marine biotic index to different impact sources affectin soft-bottom benthic communities along European coasts. *Mar Poll Bull* 46: 835-845

Borum, J., Sand-Jensen, K., Binzer, T., Pedersen, O. & Greve, T. 2006. Oxygen movement in seagrasses. In: Larkum, A.W.D., Orth, R.J., Duarte, C.M. (Eds.), *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Springer, Dordrecht, pp. 255-270.

Borum, J., Duarte, C.M., Krause-Jensen, D. & Greve T.M. (eds.) 2004. European seagrasses: an introduction to monitoring and management. A publication by the EU project Monitoring and Managing of European Seagrasses (M&MS), EVK3-CT-2000-00044

Burthe, S., Daunt, F., Butler, A., Elston, D. A., Frederiksen, M., Johns, D., Newell, M., Thackeray, S. J. & Wanless, S. 2012. Phenological trends and trophic mismatch across multiple levels of a North Sea pelagic food web. *Mar Ecol Prog Ser* 454, 119-133.

Calbet, A., Sazhin, A. F., Nejstgaard, J. C., Berger, S. A., Tait, Z. S., Olmos, L., Sousoni, D., Isari, S., Almeda, R., Bouquet, J.-M., Thompson, E. M., Båmsted, U. & Jakobsen, H. H. 2014. Future climate scenarios for a coastal productive planktonic food web resulting in microplankton phenology changes and decreased trophic transfer efficiency. *PLoS ONE* 9(4).

Campbell, S.J. & McKenzie, L.J. 2004. Flood related loss and recovery of intertidal seagrass meadows in southern Queensland, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 60: 477-490.

Carstensen, J., Conley, D. J., Andersen, J. H. & Ærtebjerg, G. 2006. Coastal eutrophication and trend reversal: A Danish case study. *Limnol Oceanogr* 51(1), 398-408.

Carstensen, J., Krause-Jensen, D., Dahl, K. & Henriksen, P. 2008: Macroalgae and phytoplankton as indicators of ecological status of Danish coastal waters. National Environmental Research Institute, University of Aarhus. 90 pp. - NERI Technical Report No. 683. <http://www.dmu.dk/Pub/FR683.pdf>

Chollett, I., Bone, D. & Pérez, D. 2007. Effects of heavy rainfall on *Thalassia testudinum* beds. *Aquatic Botany* 87: 189-195.

Conley D.J., Carstensen J., Ærtebjerg G., Christensen P.B., Dalsgaard T., Hansen J.L.S. & Josefson A.B. 2007. Long-term changes and impact of hypoxia in Danish waters. *Ecol Appl* 17: 65-184

Conley, D. J., Kaas, H., Mohlenberg, F., Rasmussen, B. & Windolf, J. 2000. Characteristics of Danish estuaries. *Estuaries* 23(6), 820-837.

Connolly, R. 2012 Seagrass. In *A Marine Climate Change Impacts and Adaptation Report Card for Australia 2012* (Eds. E.S. Poloczanska, A.J. Hobday and A.J. Richardson). <<http://www.oceanclimatechange.org.au>>. ISBN: 978-0-643-10928-5

Dahl,K., Lundsteen,S. & Helmig,S. 2003 Stenrev, Havbundens oaser, Miljøbiblioteket no. 2 , Gads Forlag.
http://www2.dmu.dk/1_viden/2_publicationer/3_miljobib/rapporter/mb02.pdf

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. 2013: Climate Change Impacts on Marine Biodiversity and Habitats in the Baltic Sea – and Possible Human Adaptations. I Sectoral impact assessments for the Baltic Sea Region - Climate change impacts on biodiversity, fisheries, coastal infrastructure and tourism. / Krarup Leth, Ole (Redaktør); Dahl, Karsten (Redaktør); Peltonen, Heikki (Redaktør); Krämer, Inga (Redaktør); Kule, Laila (Redaktør). Germany : EUCC - Die Küsten Union Deutschland e.V., 2013. 132 s. (Coastline Reports, Vol. 21).

Dahl, K., Ærtebjerg, G., Nørrevang Jensen, J., Gissel Nielsen, T., Krause-Jensen, D. & Bondo-Christensen, P. 1995 Marine Områder - Fjorde, kyster og åbent hav. Vandmiljøplanens overvågningsprogram 1994. Danmarks Miljøundersøgelser. Faglig rapport fra DMU nr. 142.

Danielsson, A., Papush, L. & Rahm, L. 2008. Alterations in nutrient limitations - Scenarios of a changing Baltic Sea. *J Mar Syst* 73(3-4), 263-283.

De Cock, A.W.A.M. 1981. Influence of temperature and variations in temperature on flowering in *Zostera marina* L. under laboratory conditions. *Aquatic Botany*. 10, 125-131.

Duarte, C.M., Sintes, T. & Marba N. 2013. Assessing the CO₂ capture potential of seagrass restoration projects. *Journal of Applied Ecology* 2013, 50, 1341-1349

Duarte, C.M., Martinez, R. & Barron, C. 2002. Biomass, production and rhizome growth near the northern limit of seagrass (*Zostera marina*) distribution. *Aquatic Botany*. 72(2), 183-189.

Edwards, M. & Richardson, A. J. 2004. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature* 430(7002), 881-884.

Ehlers, A., Worm, B & Reutsch, B.H. 2008. Importance of genetic diversity in eelgrass *Zostera marina* for its resilience to global warming. *Marine Ecology Progress Series* 355: 1-7.

Eilola K., Hansen J.L.S., Meier H.E.M., Myrberg K., Ryabchenko & Skogen M. 2011. Eutrophication status report of the North Sea, Skagerrak, Kattegat and the Baltic Sea: A model study Years 2001-2005. Tech. Rept. Oceanografi 110. SMHI Norrköping Sweden (55 s.)

Eilola K., Hansen J.L.S., Meier H.E.M., Molchanov M.S., Ryabchenko V., Skogen M. 2013. Eutrophication status report of the North Sea, Skagerrak, Kattegat and the Baltic Sea: A model study of present and future climate. Tech. Rept. Oceanografi 115. SMHI Norrköping Sweden (55 s.).

Fourqurean, J.W., Duarte, C.M., Kennedy, H., Marbà, N., Holmer, M., Mateo, M.A., Apostolaki, E.T., Kendrick, G.A., Krause-Jensen, D., McGlathery, K.J. & Serrano, O. 2012. Seagrass ecosystems as a significant global carbon stock. *Nature Geoscience*, 5, 505-509.

Green E.P. & Short F.T. 2003. *World atlas of seagrasses*. University of California Press, Berkeley, CA

Greve T.M., Borum J. & Pedersen O. 2003 Meristematic oxygen variability in eelgrass (*Zostera marina*). *Limnol Oceanogr* 48:210-216

Greve T.M. & Krause-Jensen, D. 2005. Predictive modelling of eelgrass (*Zostera marina*) depth limits. *Marine Biology* (2005) 146: 849-858

Glibert, P. M., Burkholder, J. M. & Kana, T. M. 2012. Recent insights about relationships between nutrient availability, forms, and stoichiometry, and the distribution, ecophysiology, and food web effects of pelagic and benthic *Prorocentrum* species. *Harmful Algae* 14, 231-259.

Gutiérrez, J.L., Jones, C.G., Byers, J.E., Arkema, K.K., Berkenbusch, K., Commito, J.A., Duarte, C.M., Hacker, S.D., Hendriks, I.E., Hogarth, P.J., Lambrinos, J.G., Palomo, M.G. & Wild, C. 2011. Physical Ecosystem Engineers and the Functioning of Estuaries and Coasts. Chapter 5, in Volume 7: Functioning of Estuaries and Coastal Ecosystems, (eds., C. H. R. Heip, C. J. M., Philippart & J. J. Middelburg) in the *Treatise on Estuarine and Coastal Science* (Series eds., E. Wolanski & D. McLusky), Elsevier.

Hall, N. S., Litaker, R. W., Fensin, E., Adolf, J. E., Bowers, H. A., Place, A. R. & Paerl, H. W. 2008. Environmental factors contributing to the development and demise of a toxic dinoflagellate (*Karlodinium veneficum*) bloom in a shallow, eutrophic, lagoonal estuary. *Estuaries and Coasts* 31(2), 402-418.

Hansen J.L.S., Josefson A.B. & Pedersen T.P. 2004. Genindvandring af bundfauna efter iltsvindet i 2002 i de indre danske farvande. DMU rapport 506. 61p

Hansen J.L.S. & Bendtsen J. 2006. Klimabetingede effekter på marine økosystemer. Faglig rapport fra DMU nr 598

Hansen J.L.S. & Bendtsen J. (2009). Den globale opvarmnings indflydelse på fremtidens iltforhold i de indre danske farvande (Marine områder 2007)

Hansen J.L.S., Bendtsen J. 2013. Parameterisation of oxygen dynamics in the bottom water of the Baltic Sea- North Sea transition zone *Mar Ecol Prog Ser* 481: 25-39

Hansen J.L.S. & Bendtsen J. 2014. Seasonal bottom water respiration in the North Sea – Baltic Sea transition zone: rates temperature sensitivity and sources of organic material *Mar Ecol Prog Ser* 499: 19-34

Hansen, J.W. (red.) 2012. Marine områder 2011, NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 154 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 34.

Hansen, J.W. (red.) 2013: Marine områder 2012. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 162 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 77.

<http://dce2.au.dk/pub/SR77.pdf>

Hansen, J.W. (red.) 2015: Marine områder 2013. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi.

Henriksen, P. 2009. Long-term changes in phytoplankton in the Kattegat, the Belt Sea, the Sound and the western Baltic Sea. *J sea Res* 61, 114-123.

IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working Group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* 1-982.

IPCC, 2007. *Climate Change 2007. The physical science basis. Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L., [eds.], Cambridge University Press.

Isla, J. A., Lengfellner, K. & Sommer, U. 2008. Physiological response of the copepod *Pseudocalanus* sp in the Baltic Sea at different thermal scenarios. *Global Change Biology* 14(4), 895-906.

Jeppesen, E., Kronvang, B., Olesen, J.E., Audet, J., Søndergaard, M., Hoffmann, C.C., Andersen, H.E., Lauridsen, T.L., Liboriussen, L. & Larsen, S.E. 2011: Climate change effects on nitrogen loading from cultivated catchments in Europe: implications for nitrogen retention, ecological state of lakes and adaptation. - *Hydrobiologia* 663: 1-21.

Jonasson L., Hansen J.L.S., Wan Z. & She J. 2012. The impacts of physical processes on oxygen variations in the North Sea-Baltic Sea transition zone. *Ocean Science* 8: 37-48, doi:10.5194/os-8-37-2012

Jonasson L. & Hansen J.L.S. 2013. Has climate change counteracted the effects of reduced nutrient in Danish waters? In: Jonasson L (Ed.) *Variability and dynamics of dissolved oxygen in the transition zone of the North Sea – Baltic Sea*. PhD thesis University of Copenhagen

Jordà, G., Marbà, N. & Duarte C.M. 2012. Mediterranean seagrass vulnerable to regional climate warming. *Nature climate change*. DOI: 10.1038.

Josefson A., Blomqvist M., Hansen J.L.S., Rosenberg R. & Rygg B. 2009. assessment of marine benthic quality changes in gradients of disturbance: Comparison of different Scandinavian multi-metric indices. *Mar Poll Bull* 58: 1263 -1277

Josefson A.B. & Hansen J.L.S. 2004. Species richness of benthic macrofauna in Danish estuaries and coastal areas *Global Ecology and Biogeography* 13: 273-288

Josefson A.B. & Göke C. 2013. disentangling the effects of dispersal and salinity on beta diversity in estuarine benthic invertebrate assemblages. *Biogeogr* 40: 1000-1009

Kain, J.M. 1979: A view of the genus *Laminaria*. - *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 17: 101-161.

Kjellström, E. & Christensen, O. B. 2013: Simulated climate change in the Baltic Sea Region. Overview of existing projections. *Baltadapt Report # 2*. Danish Meteorological Institute, Copenhagen.

http://www.baltadapt.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=175&Itemid=287

Klavins, M., Kokorite, I., Ansonė, L., Eglite, L., Rodinov, V. & Springe, G. 2012. Spectrofluorimetric study of dissolved organic matter in River Salaca (Latvia) basin waters. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*(404).

Kokorite, I., Klavins, M., Rodinov, V. & Springe, G. 2012. Trends of natural organic matter concentrations in river waters of Latvia. *Environmental Monitoring and Assessment* 184(8), 4999-5008.

Krause-Jensen, D. & Rasmussen, M.B. 2009. Historisk udbredelse af ålegræs i danske kystområder. *Danmarks Miljøundersøgelser*, Aarhus Universitet. 38 s. – Faglig rapport fra DMU nr. 755. <http://www.dmu.dk/Pub/FR755.pdf>.

Krause-Jensen D., Almela E.D., Cunha A.H. & Greve T.M. 2004: Have seagrass distribution and abundance changed? In Borum J, CM Duarte, D Krause-Jensen and TM Greve eds. 2004. *European Seagrasses: An introduction to monitoring and management*. The M&MS project. ISBN: 87-89143-21-3. <http://www.seagrasses.org>

Lyngsgaard M.M., Markager, S. & Richardson, K. (submitted) Total annual primary production and the vertical distribution of production in the Baltic Sea Transition Zone are related to land-based nitrogen loading. *Limnol. Oceanogr.*

Maar M. & Hansen J.L.S. 2011. Increasing temperatures changes pelagic trophodynamics and the balance between pelagic and benthic secondary production in a water column model of the Kattegat. *J. Mar. Syst.* 85: 57-70

Mantikci M., Bentzon-Tilia M., Traving S.J., Knudsen-Leerbeck H., Riemann L., Hansen J.L.S. & Markager S. (submitted). Pelagic primary production, respiration and net community production 1 in two temperate estuaries of contrasting nutrient richness. *Limnol. Oceanogr.* (submitted)

Marba, N., Cebrian, J., Enriquez, S. & Duarte, C.M. 1996. Growth patterns of western Mediterranean seagrasses: Species-specific responses to seasonal forcing. *Marine Ecology-Progress Series* 133(1-3), 203-215

Matthäus W., Franck H. 1992. Characteristics of major Baltic inflows a statistical analysis. *Cont Shelf Res* 12: 1375-1400

Meier, H.E.M, Andersson, H., Dieterich, C., Eilola, E., Gustafsson, B., Höglund, A., Hordoir, R. & Schimanke, S. 2011: Transient scenario simulations for the Baltic Sea Region during the 21st century. SMHI. - Oceanografi Nr. 108.

Meier H.E.M., Broman B. & Kjellström E. 2004. Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea. *Climate Research* 27: 59-75

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.

Middelboe, A. L. & Hansen, P. J. 2007. High pH in shallow-water macroalgal habitats. *Mar Ecol Prog Ser* 338, 107-117.

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

Moore, K.A., Shields, E.C. & Parrish D.B. 2014. Impacts of Varying Estuarine Temperature and Light Conditions on *Zostera marina* (Eelgrass) and its Interactions With *Ruppia maritima* (Widgeongrass). *Estuaries and Coasts* (2014) 37 (Suppl 1):S20-S30

Moy, F., Christie, H.; Stålnacke, P., Aksnes, D., Alve, E.; Aure, J.; Bekkeby, T., Fredriksen, S., Gitmark, J., Hackett, B., Magnusson, J., Pengerud, A., Sjøtun, K., Sørensen, K., Tveiten, L., Øygarden, L. & Åsen, P. A. 2008. Sluttrapport fra sukkertareprosjektet. STF-rapport TA-2467/2008.

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.

- Nielsen, R., Kristiansen, Aa., Mathiesen, L. & Mathiesen, H. 1995: Distributional index of the benthic macroalgae of the Baltic Sea area. - Acta botanica fennica. Baltic Marine Biologists Publication 155 (18).
- Nielsen, S.L., Sand-Jensen, K., Borum, J. & Geertz-Hansen, O. 2002. Depth colonization of Eelgrass (*Zostera marina*) and macroalgae as determined by water transparency in Danish coastal waters. *Estuaries* 25(5), 1025-1032.
- Nielsen, L. T., Jakobsen, H. H. & Hansen, P. J. 2010. High resilience of two coastal plankton communities to twenty-first century seawater acidification: Evidence from microcosm studies. *Marine Biology Research* 6, 542-555.
- Olenina, I., Wasmund, N., Hajdu, S., Jurgensone, I., Gromisz, S., Kownacka, J., Toming, K., Vaiciute, D. & Olenin, S. 2010. Assessing impacts of invasive phytoplankton: The Baltic Sea case. *Marine Pollution Bulletin* 60(10), 1691-1700.
- Orth, R.J., Carruthers, T.j.b.; Dennison, W.C., Duarte, C.M., Fourqurean, J.W., Heck, K.H., Hughes, R.H., Kendrick, G.A., Kenworthy, W.J., Olyarnik, S., Short, F.T., Waucott, M. & Williams, S.L. 2006: A Global Crisis for Seagrass Ecosystems. *Bioscience* 56(12):987-996.
- Palacios, S.L. & Zimmerman, R.C. 2007. Response of eelgrass (*Zostera marina*) to CO₂ enrichment: possible impacts of climate change and potential for remediation of coastal habitats. *Marine Ecology Progress Series* 344: 1–13.
- Parmesan, C. & Yohe, G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421: 37-42.
- Pedersen, M. F. & Hansen, P. J. 2003. Effects of high pH on a natural marine planktonic community. *Mar Ecol Prog Ser* 260, 33-41.
- Peña M.A., Katsev S., Oguz T. & Gilbert D. 2010. Modelling dissolved oxygen dynamics and hypoxia *Biogeoscience* 7: 933-957
- Phillips, R.C., Grant, W.S. & McRoy, C.P. 1983. Reproductive Strategies of Eelgrass (*Zostera marina* L.). *Aquatic Botany* 16: 1-20.
- Pulido, C. & Borum, J. 2010. Eelgrass (*Zostera marina*) tolerance to anoxia. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 385(1-2), 8-13.
- Raun, A.L., & Borum, J. 2013. Combined impact of water column oxygen and temperature on internal oxygen status and growth of *Zostera marina* seedlings and adult plants. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 441: 16–22.
- Rask, N., Bondgaard, E.J., Rasmussen, M.B. & Laursen, J.S. 2000. Ålegræs—udbredelse før og nu. *Vand & Jord* 7: 51–54
- Rasmussen B., Gustafsson B.G., Ærtebjerg G. & Lundsgaard C. 2003. Oxygen concentration and consumption at the entrance to the Baltic Sea from 1975 to 2000. *J Mar Syst* 42: 13-30
- Remane, A . 1934. Die Brackwasserfauna (Mit besonderer Beruecksichtigung der Ostsee) *Zoologischer Anzeiger* 7 suppl 34-74

Reusch, T.B.H., A. Ehlers, A. Hämmerli, & Worm B. 2005. Ecosystem recovery after climatic extremes enhanced by genotypic diversity. *PNAS* 102(8): 2826–2831.

Rosenberg, R. 1985. Eutrophication - the future marine coastal nuisance? *Marine Pollution Bulletin* 16: 227-231

Salo, T. & Pedersen, M.F. 2014. Synergistic effects of altered salinity and temperature on estuarine eelgrass (*Zostera marina*) seedlings and clonal shoots. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 457 (2014) 143–150

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.

Skogen M.D., Eilola K., Hansen J.L.S., Meier H.E.M., Molchanov M.S. & Ryabchenco V. 2014. Eutrophication status of the North Sea, Skagerrak, Kattegat and the Baltic Sea in present and future climates: A model study. *J. Mar Syst* 132: 174 – 184

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

Stæhr, P.A. & Thomsen, M.S. 2012. Opgørelse over rumlig udbredelse, tidlig udvikling og tæthed af ikke-hjemmehørende arter i danske farvande: Fagligt notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. 14 sider. <http://dce.au.dk/udgivelser/notater/2012>

Thayer, G.W., Kenworthy, W.J. & Fonseca, M.S. 1984. The ecology of eelgrass meadows of the Atlantic coast: a community profile. U S Fish and Wildlife Service FWS/OBS-84/02

Thom, R.M. 1996. CO₂-Enrichment effects on eelgrass (*Zostera marina* L.) and bull kelp (*Nereocystis luetkeana* (mert.) P& R). *Water, Air & Soil Pollution* 88: 383-391. Waycott et al. 2007

Taylor, A. H., Geider, R. J. & Gilbert, F. J. H. 1997. Seasonal and latitudinal dependencies of phytoplankton carbon-to-chlorophyll a ratios: Results of a modelling study. *Mar Ecol Prog Ser* 152(1-3), 51-66.

Tittel, J., Wiehle, I., Wannicke, N., Kampe, H., Poerschmann, J., Meier, J. & Kamjunke, N. 2009. Utilisation of terrestrial carbon by osmotrophic algae. *Aquatic Sciences* 71(1), 46-54.

Valdes-Weaver, L. M., Piehler, M. F., Pinckney, J. L., Howe, K. E., Rossignol, K. & Paerl, H. W. 2006. Long-term temporal and spatial trends in phytoplankton biomass and class-level taxonomic composition in the hydrologically variable Neuse-Pamlico estuarine continuum, North Carolina, USA. *Limnol Oceanogr* 51(3), 1410-1420.

Wasmund, N., Nausch, G. & Matthaus, W. 1998. Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea - spatio-temporal development and long-term trends. *J Plankton Res* 20(6), 1099-1117.

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.

Yeager, C. L. J., Harding, L. W. & Mallonee, M. E. 2005. Phytoplankton production, biomass and community structure following a summer nutrient pulse in Chesapeake Bay. *Aquatic Ecology* 39(2), 135-149.

Zettler M., Schiedek D. & Bobertz R. 2007. Benthic biodiversity indices versus salinity gradients in the southern Baltic Sea. *Mar Poll Bull* 55: 258-270

Zimmerman, R.C., Smith, R.D., Alberte, R.S., 1989. Thermal acclimation and whole-plant carbon balance in *Zostera marina* L. (Eelgrass). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 130(2), 93-109.

"Det er vanskeligt at lave forudsigelser, især om fremtiden". Fra "Farvel og Tak – minder og meninger" (1948) KK Steinke

[Tom side]

KLIMAFORANDRINGERNES BETYDNING FOR VANDOMRÅDER - MED FOKUS PÅ DE BIOLOGISKE KVALITETSELEMENTER

Rapporten giver vurderinger af, hvilken indflydelse kommende klimæændringer kan få for de biologiske forhold i vandløb, søer og de kystnære dele af havet. Rapporten fokuserer på de biologiske elementer, som indgår i målsætningerne for vandområdeplanerne, hvilket overordnet set er alger, højere planter, smådyrsfauna og fisk.

De væsentlige klimæændringer, der indgår i analyserne, er øget temperatur og øget nedbør. Der vil dog i visse af vurderingerne også indgå andre klimaelementer som f.eks. vind.

Rapporten gennemgår klimaforandringernes effekt på de økologiske kvalitetslementer (fauna, fisk, planter). Overordnet set fastslår rapporten, at de allerede indtrufne klimaforandringer påvirker de økologiske kvalitetslementer, der anvendes til vurdering af den økologiske tilstand jf. vandrammedirektivet.