

Klimaforandrings effekt på havmiljøet – tab af kystøkosystemer og øget iltsvind

Havstigninger på grund af højere temperaturer vil i løbet af dette århundrede oversvømme mange saltmarske og strandenge. Måltrettet uddigning kan redde mange af disse værdifulde kystnære økosystemer og deres store biodiversitet. Desuden vil et varmere hav give mere iltsvind i danske farvande trods store reduktioner i kvælstofudledningen de sidste 30 år. Årsagen er større vækst af alger og hurtigere bakteriel nedbrydning ved bunden. Tilgængeligt kvælstof genbruges derfor flere gange om året nu end tidligere. Dette kan kun afhjælpes ved endnu større reduktion af kvælstofudledningen.

ERIK KRISTENSEN & MOGENS FLINDT

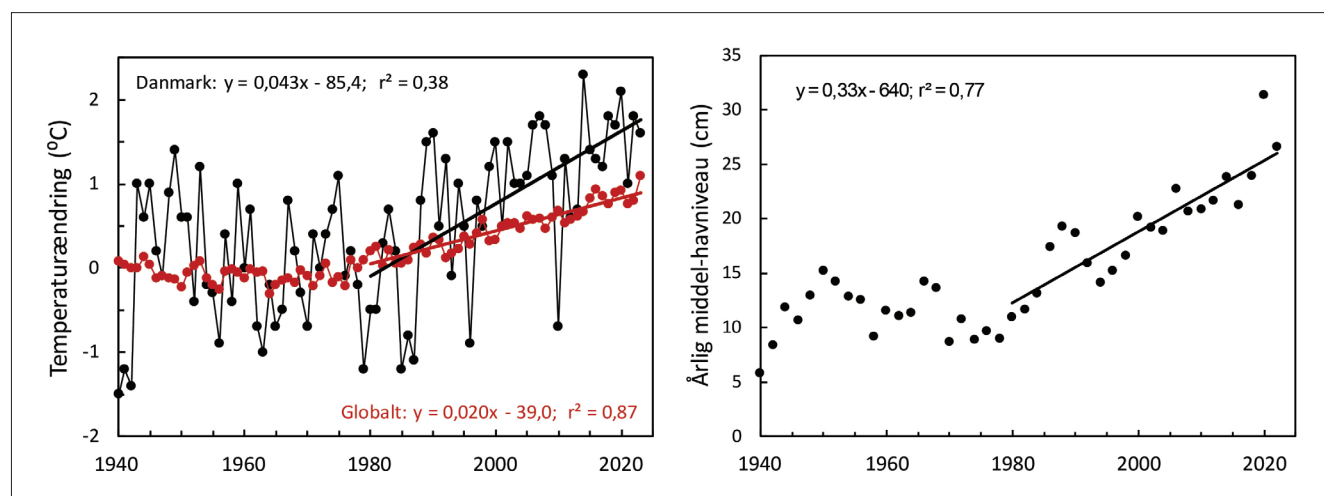
Indledning

Havmiljøet omkring Danmark er under pres fra en række stressfaktorer, som både direkte og indirekte er koblet til klimaændringer. Vi ved alle, at lufttemperaturen på globalt plan har været stigende i de senere årtier på grund af massive menneskelige udledninger af drivhusgasser. Temperaturstigningerne har især været målbare siden 1980. Således er luft-

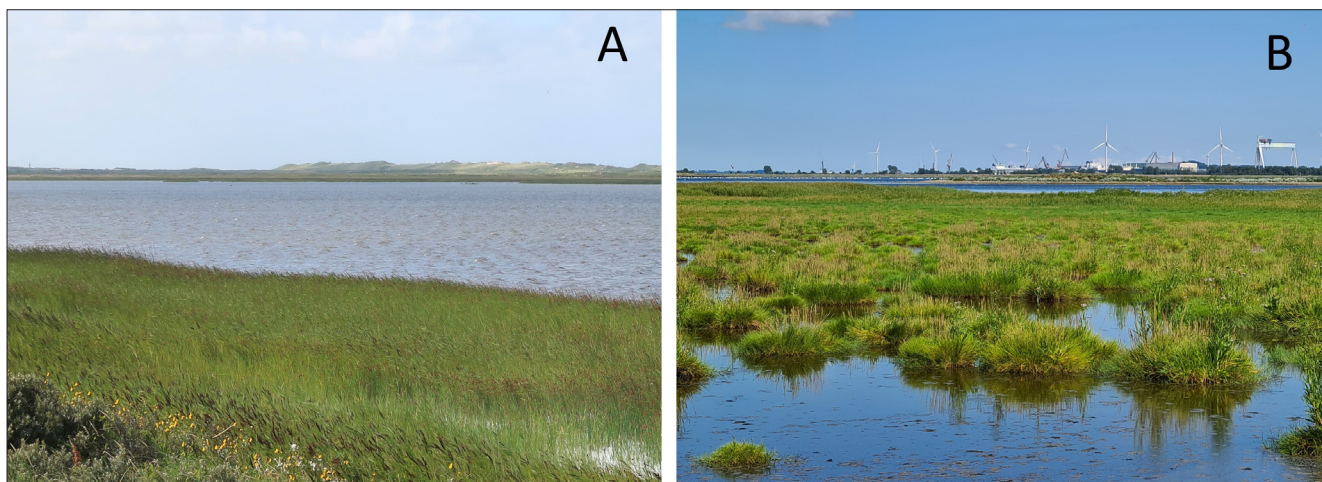
temperaturerne på globalt plan i gennemsnit steget med 0,9°C siden 1980, mens stigningen i Danmark faktisk har været på 1,8°C – altså dobbelt så meget (Figur 1) – og alt taler for, at denne tendens vil fortsætte i de kommende mange årtier. Faktisk har den globale middeltemperatur slået nye rekorder næsten dagligt i 2024. De højere lufttemperaturer bevirker en stor afsmeltning af is ved polerne og sammen med en termisk udvidelse af det varmere vand i oceanerne fører dette til et stigende havniveau. For eksempel er den årlige middelvandstand ved Esbjerg steget markant med 14

cm siden 1980 og er i dag omkring 25 cm over den historiske kote 0 (Figur 1). Og det stopper ikke her, for FNs Klimapanel forventer havstigninger på op mod 1 m frem til år 2100 hvis vi ikke effektivt bremser udledningen af drivhusgasser (IPCC 2023).

Vi hører ofte om konsekvenserne af havstigninger i forbindelse med de hyppigere stormfloder langs kysten – især hvor boliger og infrastruktur bliver oversvømmet og ødelagt. Der er stor diskussion om, hvordan vi forhindrer disse katastrofer for kystbefolkningen, men der tales mindre om hvordan vi kan



Figur 1. Venstre: Ændring i årlig middel-lufttemperaturer for perioden 1940 til 2023 relativt til gennemsnittet for perioden 1961 til 1990. Den røde kurve og ligning viser den globale ændring og den sorte kurve og ligning viser ændringer i Danmark (Datakilde: DMI). Højre: Årlig middel-havniveau for Esbjerg Havn for perioden 1940 til 2022. Den sorte kurve og ligning viser ændringen fra 1980 til 2022 (Datakilde: DMI).



Figur 2: A: Saltmarsk med vadegræs (*Spartina anglica*) og tagrør (*Phragmites australis*) ved Agger Tange og B: Strandeng i Odense Fjord med Odense Havn – Lindø i baggrunden.

hjælpe de nødlidende økosystemer langs kysterne, når havet stiger og vandet bliver varmere. De højere temperaturer i havvandet har også alvorlige konsekvenser for vores økosystemer under vandoverfladen og de planter, dyr og mikroorganismer, som lever der.

Formålet med denne artikel er derfor at beskrive hvorledes klimaændringer har påvirket og fremover vil påvirke kystnære økosystemer og havmiljøet. Da dette emne er temmelig omfattende, vil der især være fokus på: 1. havstigningers effekter på kystnære økosystemer og deres funktion, samt hvilke løsninger der kan forhindre tab af disse økosystemers biodiversitet, og 2. sammenhængen mellem temperaturstigningerne i havets bundvand og det voldsomme omfang af iltsvind vi i de senere år har oplevet i de indre danske farvande.

Spørgsmålet er, om ikke temperaturstigningernes effekt bør inddrages i fremtidige løsningsmodeller for at forhindre iltsvind i de danske farvande?

Havstigningers effekt på kystområder

Danmark har en imponerende kyststrækning på 8.750 km, som de fleste steder grænser op til et fladt og lavtliggende bagland. Denne kystzone har oprindeligt været domineret af en række unikke økosystemer med salttolerante plantesamfund. Det drejer sig blandt andet om saltmarske og strandenge, som har en stor diversitet af planter, hvirvelløse dyr, padder, fugle og pattedyr (Figur 2). Havstigningen sætter disse økosystemer under pres ved at de bliver mere eller mindre permanent oversvømmede. Under naturlige forhold ville

de dog kunne brede sig mod land i samme takt, som havet stiger. Desværre har langt de fleste saltmarske og strandenge i dag ikke mulighed for denne naturlige landværts migration ved stigende havvandsstand. Det skyldes dels tilstedeværelse af oprindelige kystskrænter, men især at de fleste kyster i dag er stærkt regulerede med menneskeskabte barrierer som diger til beskyttelse af landbrugsområder, byer, havne og anden infrastruktur. Desuden forekommer der mange inddigninger, som blev udført i slutningen af 1800-tallet og starten af 1900-tallet for at øge landbrugsarealet.

Når den naturlige landværts vandring af saltmarske og strandenge forhindres langs kyster med diger eller andre hårde konstruktioner opstår fænomenet, som på engelsk hedder "coastal squeeze", hvor udbredelsen af økosystemerne svinder ind i takt med havstigningen. Det er estimeret, at dette permanente tab af saltmarske og strandenge i Danmark vil være henholdsvis 69% og 52% i år 2120, hvis havstigningen fortsætter som nu, og der ikke gøres noget for at regulere kysterne til gavn for naturen (Ebbensgaard et al. 2022). Den bedste løsning på dette problem er selvfølgelig at forhindre havstigningen, men det er nok umuligt. Derfor vil det næstbedste være at udføre uddigninger, hvor digerene til beskyttelse af lavtliggende (inddigede) landbrugsarealer fjernes og havet får adgang til helt eller delvist at oversvømme området.

Det bedste eksempel på uddigning i Danmark er fra Gyldensteen Strand på Nordfyn (Figur 3), hvor 214 ha landbrugsjord i 2014 blev helt eller delvist oversvømmet og i dag er en kystlagune med tilstødende strandenge (Kristensen et al. 2016). For at en uddigning skal være succesfuld til at genskabe tabte kystnære økosystemer, skal fokus være på at, 1. Intensiv landbrugsdrift ophører før uddigningen for at udpine jorden; 2. Den naturlige hy-



Figur 3. Gyldensteen Kystlagune på Nordfyn. A: 2010 – Før uddigning. B: 2018 – Efter uddigning (Foto: Viggo Lind).

drologi genoprettes ved at fjerne dræn, grøfter og diger; 3. Sikre ekstensiv græsning med robuste dyreracer eller høstslet, som forhindrer tilgroning før saltmarske og strandenge er fuldt etablerede; 4. Udføre supplerende naturgenoprettende tiltag ved f.eks. at fjerne næringsrig topjord (Ebbensgaard et al. 2022). Hvis uddigning ifølge disse retningslinjer udføres i tilstrækkeligt omfang rundt om i landet, vil mange vegetationsdækkede økosystemer langs kysten og deres høje biodiversitet kunne reddes for eftertiden – selv i en verden med et havspejl langt over det nuværende.

Klimaforandringers effekt på eutrofiering og iltsvind

Vi hører i disse år meget i medierne om havmiljøets katastrofalt dårlige tilstand. Det skyldes eutrofiering med masseforekomst af planktonalger i de åbne farvande og især fedtemøg (en finløvet brunalge) langs kysterne om foråret og sommeren. Der er stor enighed om, at eutrofieringen hænger sammen med en for stor udledning af især kvælstof fra land, hvoraf 2/3 skyldes udsivning af nitrat fra landbrugsområder. Når de massive algemængder bundfældes og nedbrydes af bakterier på havbunden om sommeren og efteråret, forbruges ilten og bunddyr (orme, muslinger og krebsdyr) kvæles og dør, mens fisk og andre bevægelige dyr flygter. Lige før katastrofen opstår der et liglag af hvide svovlbakterier på bunden (Figur 4). Havbunden fremstår herefter mudret og uden makroskopisk liv, og kan ikke længere udgøre et fødegrundlag for fisk, når ilten vender tilbage sidst på efteråret og vinteren. Resultatet er permanent forarmede fiskebestande og ødelagte fødekæder. Denne tilstand forværres desværre af det udbredte og intensive fiskeri med bundtrawl i de danske farvande – det er en anden historie, som ikke vil blive omtalt yderligere her.

Iltsvind i de danske farvande er ikke noget nyt fænomen. De første store iltsvindhændelser blev registreret i midten af 1980'erne på grund af en massiv udledning af kvælstofnæringsstoffer på omkring 110.000 tons årligt til vores vandmiljø fra landbrug og renseanlæg. For at forhindre disse iltsvindhændelser, blev der i 1987 indført en handleplan for havmiljøet (Vandmiljøplan I), som skulle mindske kvælstofudslippet med 50 % og fosforudslippet med 80 %. Det lykkedes fint for renseanlæggene, men reduktionen af kvælstof fra landbruget gik langsomt – for langsomt. Derfor blev Vandmiljøplan II vedtaget af Folketinget i 1998 og senere blev Vandmiljøplan III vedtaget i 2004, hvilket i 2005 gav en reduktion af kvælstofudslippet på ca. 45 % i forhold



Figur 4: Havbund med liglagen af hvide svovlbakterier som følge af iltsvind (Foto: Peter Bondo Christensen)

til 1980'ers niveauet.

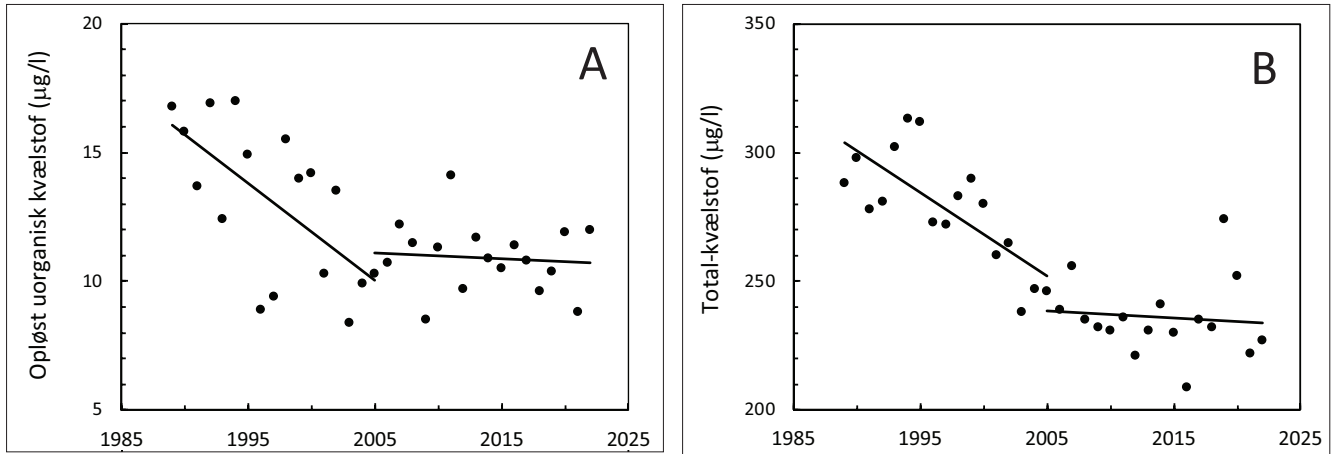
De store planer og indsatser for at mindske især kvælstofudledningen havde tilsyneladende båret frugt. Således faldt indholdet af opløst uorganisk kvælstof (især nitrat) i havvandet med ca. 40 % fra 1990 til 2005 og totalkvælstof faldt med ca. 20 % i samme tidsperiode (Figur 5). Denne positive tendens afspejlede sig også i et stort fald i iltsvindsarealet ($< 4 \text{ mg/l}$) i de indre danske farvande fra ca. 6.000 til 1.000 km^2 over perioden 2005 til 2010 (Figur 6). Fra 2005 til 2020 er kvælstofudledningen desværre kun faldet yderligere med kun 8.000 tons og er i dag på ca. 55.000 tons, hvilket har resulteret i konstante eller kun svagt faldende koncentrationer af kvælstof i havvandet siden 2005 (Figur 5). Ikke desto mindre burde faldet i udledningerne på omkring 50% siden 1980'erne faktisk sikre, at iltsvind i vores kystvande forblev på 2010 niveau eller derunder. Desværre fortsætter iltsvindene stadigvæk med at opstå – og siden 2010 i stærkt stigende omfang med en udbredelse på ca. 4.000-8.000 km^2 i 2020-2023 (Figur 6).

En del af forklaringen på denne uheldige udvikling kan være temperaturstigninger. Bundvandets temperatur i de indre danske farvande varierer en del fra år til år, men der er en tydelig tendens til konstant stigende årlige middelterperatur i perioden fra 1980 til 2023 (Figur 7), hvilket stemmer fint overens med den stigning klimaændringerne har forårsaget i luftens temperatur og havniveauet (Figur 1). Faktisk er bundvandets temperatur i de indre danske farvande steget med $2,2 \text{ }^\circ\text{C}$ siden 1980 – altså lidt mere end opvarmningen af luften i Danmark over samme periode.

Når bundvandets temperatur stiger, vil alle

bundlevende organismers stofskifte selvfølgelig blive påvirket. Som det fremgår af Tekstboks 1 vil bakteriers stofskifte og dermed deres nedbrydning af organisk materiale 3-dobles når temperaturen stiger med $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Ved den temperaturstigning i bundvandet på $2,2 \text{ }^\circ\text{C}$, som er sket siden 1980, kan det beregnes, at havbundens iltkrav er steget med 25 %. Når samtidigt ilt vil være 4 % mindre opløseligt ved den højere temperatur, har de indre danske farvande i dag behov for at få tilført 25-30 % mere ilt ved havbunden end i 1980 for at undgå iltsvind. Det gradvist større iltkrav ved bunden har tilsyneladende været overskygget af de positive effekter fra den store reduktion i kvælstofudledningen fra 1990 til 2005, og resulterede i mindre iltsvind og en forbedring af havets miljøtilstand indtil 2010. Da reduktionen i kvælstofudledningen stagnerede efter 2005, må den markante stigning i iltsvind siden 2010 være forårsaget af den fortsatte temperaturstigning i bundvandet (Figur 7). Der er således en klar sammenhæng mellem iltsvind og temperatur fra 2010 til 2023, som forudsiger et øget iltsvindsareale på ca. 1.600 km^2 for hver grad temperaturen stiger (Figur 8).

Det er faktisk ikke kun bakteriers stofskifte, som siger med temperaturen. Deres fødekilder, algerne, har også en forøget fotosyntese ved højere temperaturer (Tekstboks 1). Dermed vokser de hurtigere og producerer mere organisk stof tidligere på året end før klimaændringerne blev mærkbare. Algerne forbruger derfor det tilgængelige kvælstof hurtigt om foråret, når sollyset bliver stærkere. Når de dør og synker til bunds, nedbrydes de hurtigt af bakterier under forbrug af ilt og kvælstof frigøres igen som næringsstoffer. Disse kvæl-



Figur 5: Årlig middel-koncentrationer i de indre danske farvande for perioden 1989 til 2022 af A: Opløst uorganisk kvælstof, som især består af nitrat og B: Total-kvælstof, som består af både partikulært og opløst kvælstof. Tendensen over tid er markeret ved lineære regressionslinjer for tiden før og efter 2005 (Modificeret fra Hansen & Høglund 2024).

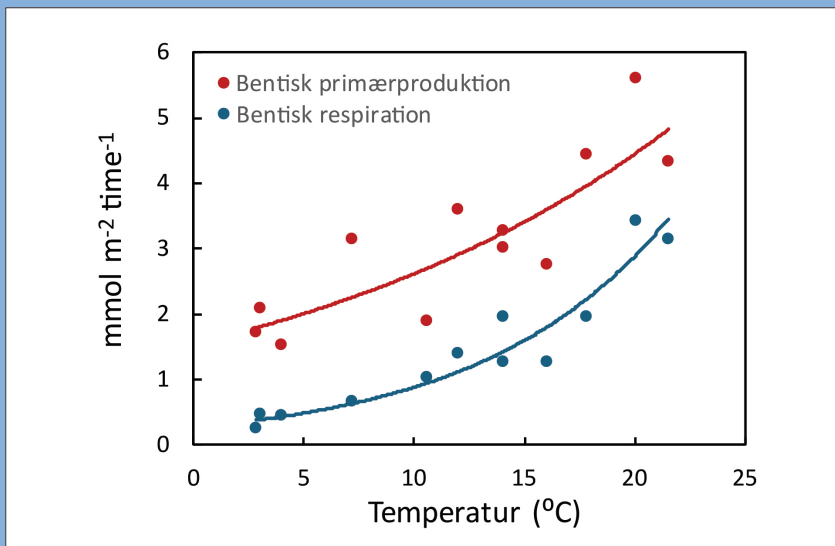
Tekstboks 1: Bakteriers temperaturafhængighed

Alle levende organismer påvirkes af temperaturændringer. Stofskiftet hos især vekselvarme dyr, planter og bakterier stiger således med temperaturen indtil et niveau hvor de kolliderer og dør af "hedeslag". Hastigheden hvormed stofskiftet stiger med temperaturen før kollapset varierer lidt mellem organismetyper. Det er oftest en eksponentiel stigning, som kan beskrives med følgende ligning:

$$R_2 = R_1 Q_{10}^{(T_2 - T_1)/10}$$

Hvor R_2 og R_1 er stofskiftet ved temperaturen T_2 og T_1 . Q_{10} beskriver den faktor en biologisk proces stiger med ved en temperaturstigning på 10°C .

Marine sedimenters stofskifte er styret af algers primærproduktion og bakteriers respiration eller nedbrydning af organisk materiale. Begge disse to stofskiftetyper følger fint det eksponentielle forløb (Figur T1).



Figur T1. Et kystnært sediments bentiske primærproduktion (ved konstant lys) og respiration som en funktion af temperaturen. Q_{10} er 3,3 for respiration og 1,7 for primærproduktion. Data er fra kystlagunen Fællesstrand ved Fynshoved på Fyn (Kristensen 1993)

Generelt antages det at algers primærproduktion har en Q_{10} på omkring 2 – altså en fordobling når temperaturen stiger 10°C . Bakteriers respiration i sedimenter, når de nedbryder organisk materiale, er mere temperaturfølsom og har typisk en Q_{10} på omkring 3 – det vil sige en 3-dobling for hver 10°C (Hancke & Glud 2004).

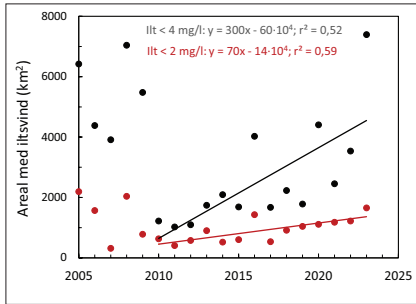
stof-næringsstoffer kan så sammen med den fortsatte udledning fra land genbruges og forårsage endnu større algevækst senere på året og føre til en ny massiv aflejring af organisk stof ved havbunden. Når dette bundfældede materiale igen nedbrydes fortsætter havmiljøets døds spiral, da der forbruges endnu mere ilt og kvælstof frigøres igen som næringsstoffer. Resultatet af klimaændringernes temperaturstigning er derfor, at hvert kvælstof-atom bliver genbrugt flere gange om året, og at iltsvind starter tidligere på sommeren og bliver mere omfattende end for nogle årtier siden. Alt dette sker faktisk i dag uden en stigning i kvælstoftilførslen fra land – altså tydeligvis endnu en negativ effekt af klimaændringer.

Perspektivering

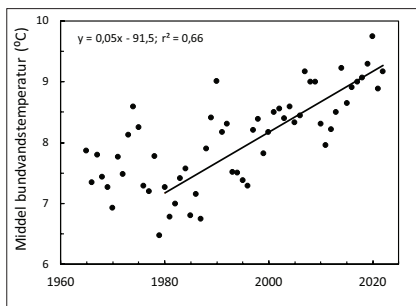
Klimaændringer med øgede temperaturer og stigende vandstand har store negative konsekvenser for havmiljøet. For at mindske sandsynligheden for kollaps af kystnære og marine økosystemers fødekæder og biodiversitet må vi afhjælpe krisen med en række kompenserende tiltag.

Tabet af kystnære økosystemer, som saltmarske og strandenge, kan delvist forhindres ved at opgive inddæmmede områder og udføre uddigning. Det vil give plads til at disse uvurderlige økosystemer kan brede sig ind i land i takt med havstigningerne, og sikre deres eksistens i Danmark. Hvis havstigningerne fortsætter og når det værste tænkelige niveau på over 1 m i næste århundrede, må vi overveje om ikke også andre lavtliggende områder nær kyster skal opgives ved uddigning.

Iltsvindproblematikken bliver sværere at håndtere, da forholdene og forudsætningerne for vandmiljøplanerne har ændret sig i takt med temperaturstigninger. De nye vandområdeplaner for perioden 2021-2027 (<https://mst>).

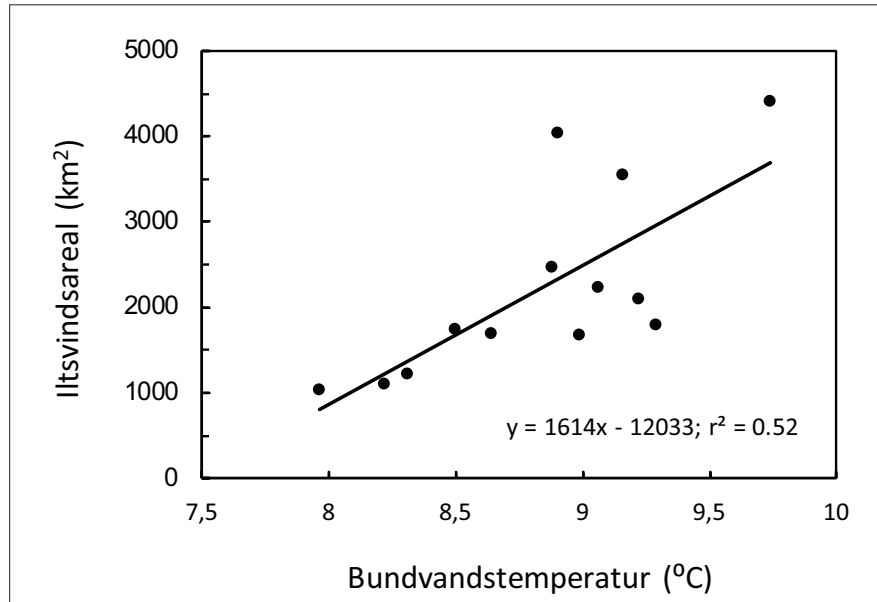


Figur 6: Arealudbredelse af moderat (<4 mg l⁻¹) og kraftigt (<2 mg l⁻¹) iltsvind midt i september i de indre danske farvande 2005-2023. Linjerne angiver en statistisk signifikant stigning siden 2010, som angivet i ligningerne (Modificeret fra Hansen et al. 2012; Hansen & Rytter 2023).



Figur 7: Årlig middeltemperatur for bundvand i de indre danske farvande fra 1965 til 2022. Stigningen siden 1980 er vist ved den rette linje og ligningen, som beskriver forløbet (Modificeret fra Hansen & Høgslund 2024).

dk/nyheder/2023/juni/nye-vandomraade-planer-skal-fjerne-10400-tons-kvaelstofindsatser) indeholder indsatser, der skal nedbringe udledningen af kvælstof til kystvande med 10.400 tons årligt. Dette kan ifølge planerne forhindre opblomstringer af alger, som kan føre til kraftigt iltsvind og fiskedød. Temperatureffekterne på algers og bakteriers stofskifte vil dog ændre forudsætningerne, hvis temperaturstigningerne i fremtiden fortsætter i samme takt som nu. Det er derfor sandsynligt,



Figur 8: Sammenhæng mellem årlig middelbundvandstemperatur i de indre danske farvande og arealudbredelsen af moderat (<4 mg l⁻¹) iltsvind midt i september. Linjen viser den lineære regression, som angivet i ligningen.

at kvælstof-udledningerne skal reduceret mere end anbefalet i de nye vandområdeplaner, da algerne ved højere temperaturer vokser hurtigere og årligt genbruger kvælstof flere gange, samtidigt med at bakterierne kræver mere ilt.

Referencer

- Ebbensgaard, T., Frederiksen, L., Laustsen, K., Flindt, M.R., Canal-Verges, P., 2022. Havvandsstigningernes betydning for kystnaturen. COWI og SDU, 161 sider.
- Hancke K., Glud R.N., 2004. Temperature effects on respiration and photosynthesis in three diatom-dominated benthic communities. *Aquatic Microbial Ecology* 37: 265-281.
- Hansen, J.W., Storm, L.M., Manscher, O., Balsby, T.J.S., 2012. Iltsvind i de danske farvande i september 2012. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 19 s.
- Hansen, J.W., Høgslund, S., 2024. Marine områder 2022. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center

for Miljø og Energi, 184 s. - Videnskabelig rapport fra DCE nr. 592.

- Hansen, J.W., Rytter, D., 2023. Iltsvind i danske farvande 24. august – 21. september 2023. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 23 s.
- IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Schweiz, side 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Kristensen, E., 1993. Seasonal variations in benthic community metabolism and nitrogen dynamics in a shallow, organic poor Danish lagoon. *Estuarine and Coastal Shelf Science* 36: 565-586.
- Kristensen, E., Flindt, M.R., Thorsen, S.W., Holmer, M., Valdemarsen, T., 2016. Gyldensteen Strand - fra agerland til kystlagune. *Vand & Jord* 23: 36-40