



Vurdering af potentiale og miljøeffekter ved etablering af blåmuslingebanker og blåmuslingeproduktion i vandområde Thisted Bredning

RÅDGIVNINGSNOTAT FRA DTU AQUA

Til: Kystvandrådet for vandområde Thisted Bredning 236
v/ Rune Gade Therkildsen

Forfatter(e): DTU Aqua v/ Tobias Kuhlmann Andersen, Louise Catharina Flensburg, Kerstin Geitner og Jens Kjerulf Petersen
DHI v/ Andrea Galli og Flemming Thorbjørn Hansen

Kvalitetssikring: Anders Erichsen (DHI) og Pernille Nielsen (DTU Aqua)

Dato: 6. oktober 2026

J.nr.: 25/1024411

Resumé

Nærværende notat vurderer, i hvor høj grad etablering af blåmuslingebanker og muslingepdræt kan bidrage til målopfyldelse i Thisted Bredning (vandplanområde 236). Vurderingen er baseret på scenarieberegninger med et tredimensionelt hydrodynamisk-bio-geokemisk modelkompleks for Limfjorden, som indgik i det videnskabelige grundlag for vandområdeplanerne 2021-2027, suppleret med en mekanistisk model for muslingevækst i muslingeanlæg og muslingebanker. Der er analyseret fire scenarier: Produktion af muslingeyngel til etablering af seks muslingebanker, etablering af seks muslingebanker, en kombination af banke og produktion samt høj muslingeproduktion med 20 anlæg. Som udgangspunkt for modelleringen er der gennemført en analyse af mulige placeringer af muslingebanker baseret på principperne i Center for Marin Naturgenopretnings værktøj til placering af marin naturgenopretning (Decision Support Tool).

Modelresultaterne bekræfter, at Thisted Bredning er velegnet til muslingeproduktion. Seks standard langline-anlæg kan forventes at producere 1.600-1.800 tons muslinger pr. anlæg pr. år. Dette vil være tilstrækkeligt til at forsyne op mod 10 muslingebanker på 20 ha. Ved 20 anlæg faldt middel produktionen til ca. 1.250 tons pr. anlæg som følge af øget konkurrence om fødegrundlaget og grupperet placering af anlæggene, men forblev inden for den forventede produktionskapacitet for muslingeproduktion som marint virkemiddel.

På vandområdeniveau medførte scenarierne med seks anlæg og med seks muslingebanker et sammenligneligt fald i sommer-klorofyl-a på 1-3% og i lysdæmpningskoefficienten på ca. 1%, mens 20 anlæg gav et fald på 3-8% i klrofyl-a og 1-4% i lysdæmpningskoefficienten. Lokalt, i og omkring anlæg og banker, var effekten markant større. Kombinationen af anlæg og banker forstærkede den samlede effekt og indikerer en rumlig komplementaritet mellem de to virkemidler. Modelresultaterne er i god overensstemmelse med tidligere modelstudier i Skive Fjord og vurderes robuste for den aktuelle miljøtilstand i vandområdet.

Indledning

Thisted Bredning har en dårlig økologisk tilstand (jvf. Styrelsen for Grøn Arealomlægning og Vandmiljø, 2025). Derfor fastlægger vandområdeplanerne 2021–2027 også en indsats for at fjerne tillædninger af primært kvælstof fra oplandet. Der er således nedsat et Kystvandråd for Thisted Bredning, der overordnet set skal tilvejebringe lokal forankret viden af relevans for løsningen af opgaverne i den Lokale Trepert Limfjorden. En del af Kystvandrådets opgave er at pege på supplerende virkemidler, der kan fremskynde forbedring i fjordens tilstand.

Der er i den forbindelse foreslået et undersøgelses- og analyseprogram, hvoraf en af de foreslåede analyser omhandler brug af muslinger som virkemiddel til at forbedre miljø- og naturtilstanden. Nærværende notat er udarbejdet som led i dette arbejde og besvarer følgende spørgsmål på baggrund af modelberegninger og eksisterende data:

- Kan produktion af muslinger bidrage til opnåelse af miljømålene?
- Hvad er den maksimale produktion i Thisted Bredning?
- Hvilken betydning har den specifikke placering af anlæg indenfor vandområdet?

- Hvad er potentialet for og effekt af etablering af udlagte muslingebanker, som ikke udnyttes kommercielt?

Princippet bag blåmuslingeopdræt som marint virkemiddel er, at muslinger optager næringsstoffer gennem at filtrere planteplankton og andre partikler, og næringsstofferne optaget af muslingerne fjernes, når muslingerne høstes. Muslinger dyrkes på flydende strukturer med yngelfang. Blåmuslingelarverne sætter sig på yngelfanget i slut maj til starten af sommeren og vokser indtil høst. Da kun en meget lille andel af muslingelarverne under normale omstændigheder vil bidrage til den naturlige bestand, skaber denne opdrætsmetode ny produktion, der ved høst derfor repræsenterer en netto fjernelse af næringsstoffer fra vandområdet.

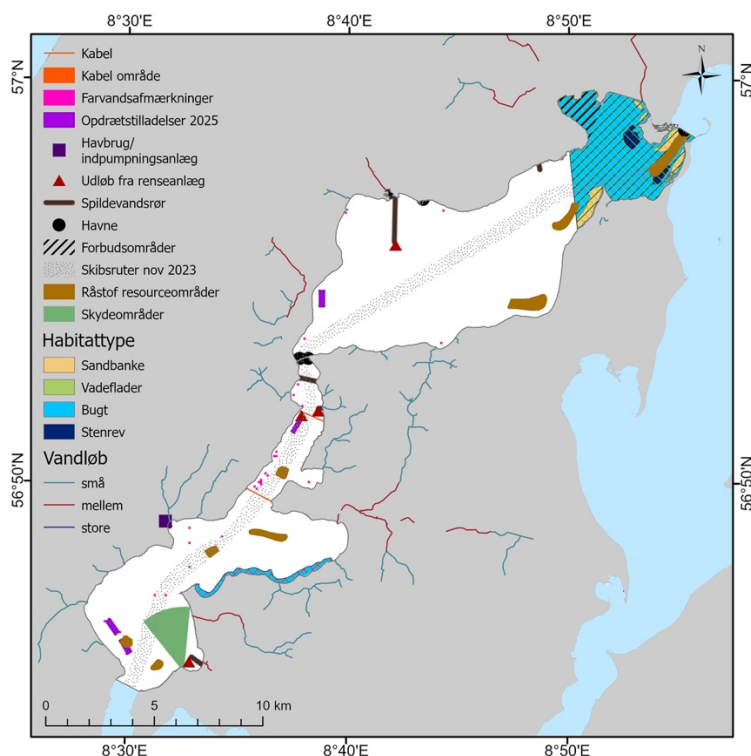
Muslingeopdræt er ikke rettet specifikt mod næringsstofkilder, men fjerner næringsstoffer fra den omkringliggende vandmasse. For at optimere næringsstoffjernelsen kan der med fordel anvendes produktionsmetoder målrettet næringsstoffjernelse, hvor muslingebiomassen pr. areal bliver størst mulig, mens arbejdsindsatsen er minimeret mest muligt (Bruhn m.fl., 2020).

Etablering af nye eller genetablering af tabte muslingebanker bidrager til at forbedre naturtilstanden i Thisted Bredning ved at genskabe naturligt forekommende levesteder med øget biodiversitet. Muslingebankerne filtrerer desuden vandet, hvilket øger vandets klarhed, som er en vigtig indikator for miljøtilstanden.

Nærværende notat har til formål at belyse i hvor høj grad etablering af muslingebanker og muslingeopdræt kan bidrage til målopfyldelse i Thisted Bredning (vandområde 236). Effekten af muslingebanker og muslingeopdræt på klorofyl-a koncentrationer og lysdæmpningskoefficienten er undersøgt ved at implementere en mekanistisk model for muslingevækst i et anlæg i den 3-dimensionel (3D) hydrodynamisk-biogeokemisk model for Limfjorden, som indgik i det videnskabelige grundlag for vandområdeplaner 2021-2027. Notatet beskriver desuden mulighederne for etablering af muslingebanker i Thisted Bredning.

Kriterier for etablering af blåmuslingebanker

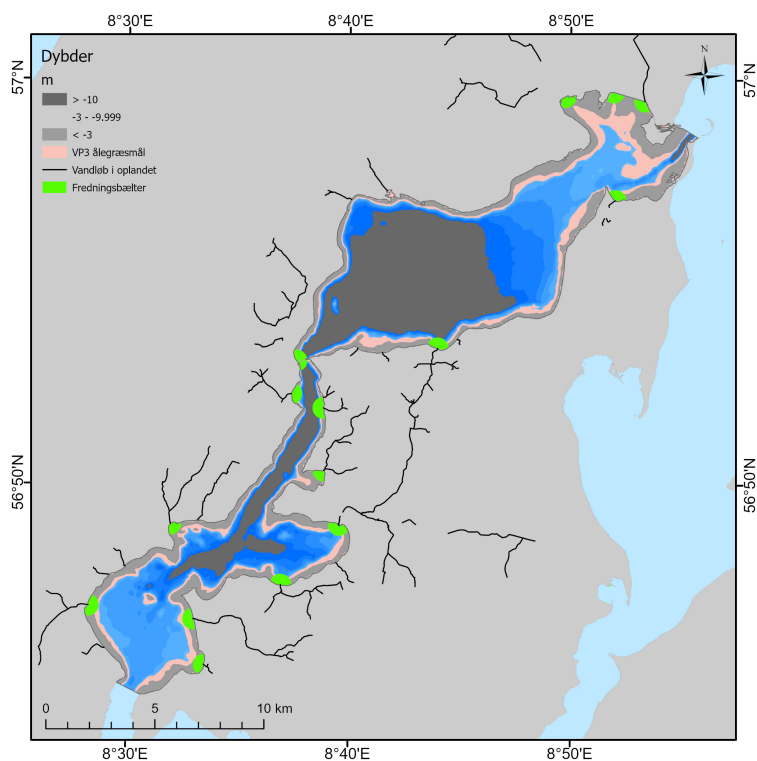
Etablering af muslingebanker er ikke ukendt i Limfjorden. Muslingeerhvervet har i en længere årrække omplantet muslinger fra f.eks. Skive Fjord og Lovns Bredning, der hyppigt rammes af iltsvind, til områder i Limfjorden, som i mindre grad er sårbare over for iltsvind f.eks. Kaas Bredning. Formålet med erhvervets omplantningsaktiviteter har været at sikre bestande, der kan fiskes på. En anden type etablering af muslingebanker er naturgenopretning, hvor muslingebanker, der er af den ene eller anden grund er tabt genetaberes som led i aktiv naturgenopretning. Aktuelt foregår der to projekter i Limfjorden i henholdsvis Løgstør og Gjør bredning. De metoder og lokalitetsvalg, der er forbundet med erhvervets omplantning, er ikke umiddelbar identisk med de metoder, der bruges i naturgenopretningsprojekter. For naturgenopretningsprojekter, som det der er relevant i relation til Kystvandrådets ønsker, er der udarbejdet nogle retningslinjer for, hvilke forhold, der skal tages højde for ved genetablering/etablering af skaldyrsbanker, der forventes at blive i området og ikke skal bruges som udgangspunkt for fiskeri (Nielsen m.fl., 2023a; Nielsen m.fl., 2024).



Figur 1. Arealmæssige reservationer i Thisted Bredning.

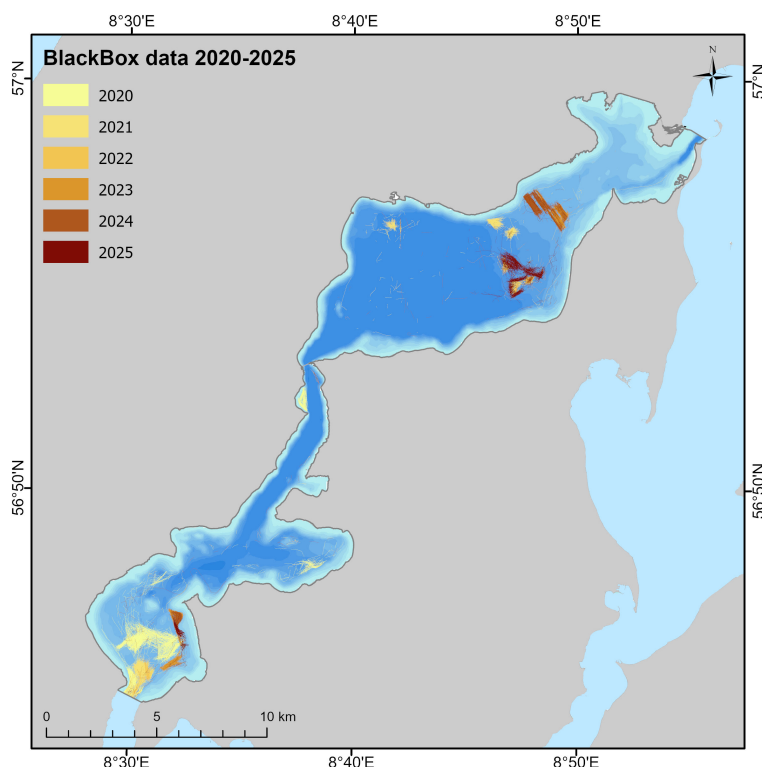
Logistiske og andre typer brug af områder i Thisted Bredning

En række aktiviteter og reservation af områder sætter en begrænsning for, hvor der kan placeres muslingebanker (se figur 1). Skibsruter, råstofindvinding, kabelføringer mm. er eksempler på sådanne arealreservationer. Dertil kommer udpegning af Natura 2000-områder, som ikke definitivt udelukker genetablering af muslingebanker, men som vil besværliggøre den administrative proces. Der er ligeledes en række fredningszoner omkring å-udløb og så må der ikke skabes forhindringer for ålegræssets udbredelse jf. vandområdeplanerne (figur 2) og NOVANA-transektter til monitorering af ålegræssets udbredelse må heller ikke påvirkes af udlægning af muslingebanker. De natur- og miljømæssige arealanvendelser kan der undtages for, men det kræver normalt en godkendelse af placering. Placering af muslingebanker vil kræve en placeringstilladelse som skal ansøges hos Styrelsen for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri, som tager højde for bl.a. disse forhold.



Figur 2. Fredningsbælter omkring å-udløb og ålegræssets dybdegrænse jf. vandområdeplanerne.

Endelig vil det give mening, at placering af muslingebanker, der skal forblive i området, bliver skånet mod fiskeri. Fiskeritrykket på muslingebestanden i vandområdet Thisted Bredning har varieret betydeligt over de seneste 13 år. De højeste fangster blev registreret i 2016 og 2017 med henholdsvis ca. 5.100 og 5.400 tons muslinger. Derimod var fangsterne i 2020 og 2022 markant lavere med henholdsvis 400 og 300 tons. I de seneste tre år har fangsterne fra muslingefiskeriet i vandområdet været relativt stabile på omkring 1.900 tons muslinger årligt. I de seneste fem år har fiskeriet primært været koncentreret i den sydlige del af Visby Bredning samt i den østlige del af Thisted Bredning. Herudover forekommer der skrab spredt over resten af vandområdet i de enkelte år (figur 3).



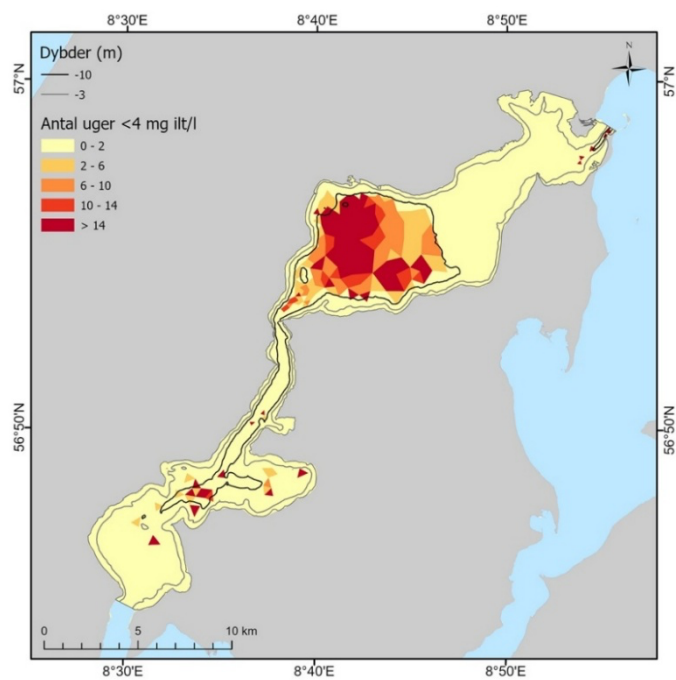
Figur 3. Udbredelse af fiskeri efter muslinger i perioden 2020-2025 kortlagt ved hjælp af black box data, der præcist angiver, hvor der fiskes.

Anbefalinger til egnede områder for naturgenopretning af muslingebanker

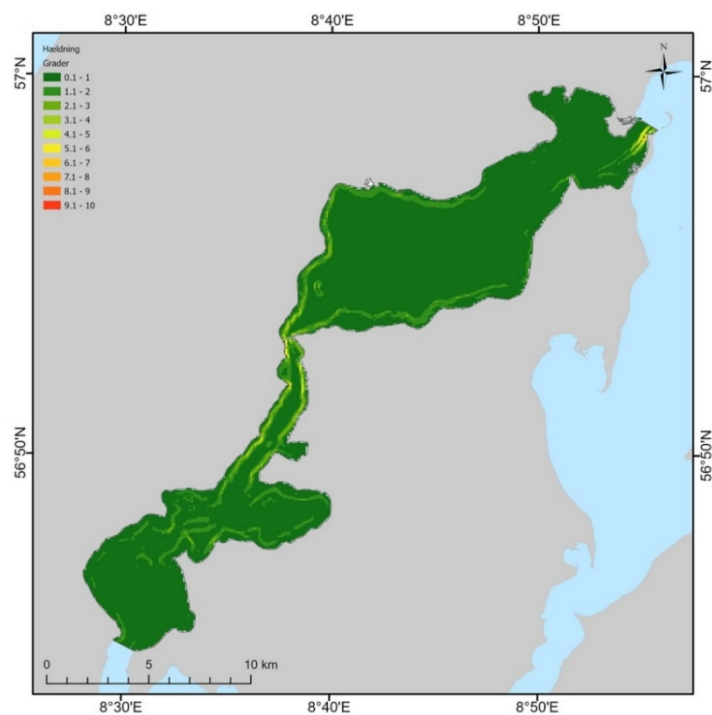
Center for Marin Naturgenopretning har lavet en række anbefalinger til udvælgelse af områder egnet til naturgenopretning af muslingebanker (Nielsen m.fl., 2023a) samt metoder til, hvordan genopretningen skal foregå (Nielsen m.fl., 2024).

Sammenfattende er der en række betingelser, som helst skal være opfyldt for, at genetableringen af muslingebanker er succesfuld i Thisted Bredning:

- Vanddybden i udlægningsområdet skal være mellem 3-7 m (figur 4).
- Der må ikke forekomme iltsvind, dvs., at iltkoncentrationen i vandet skal være større end 4 mg O₂ pr liter (figur 4). Muslingebanker er derfor i modellen ikke placeret i Thisted Bredning og Vilsund på vanddybder over 10 m, hvor der er dokumenteret iltsvind (Hansen og Rytter, 2024, 2026).
- Der skal være tilstrækkelig føde i vandet til, at muslingerne kan vokse, i praksis med koncentrationer af klorofyl-a på mere end 0,0005-0,001 mg pr liter (dette krav er i praksis altid overholdt i Thisted Bredning).
- For havbunden gælder, at sedimentet ikke må være for blødt (så muslinger synker ned i mudder), og at hældningen på havbunden ikke må være for stejl (så muslingerne efter udlægning skrider ned på dybere vand, figur 5).
- Vandet må ikke være for fersk, hvorfor der ikke skal ske placering nær å-udløb (figur 2).



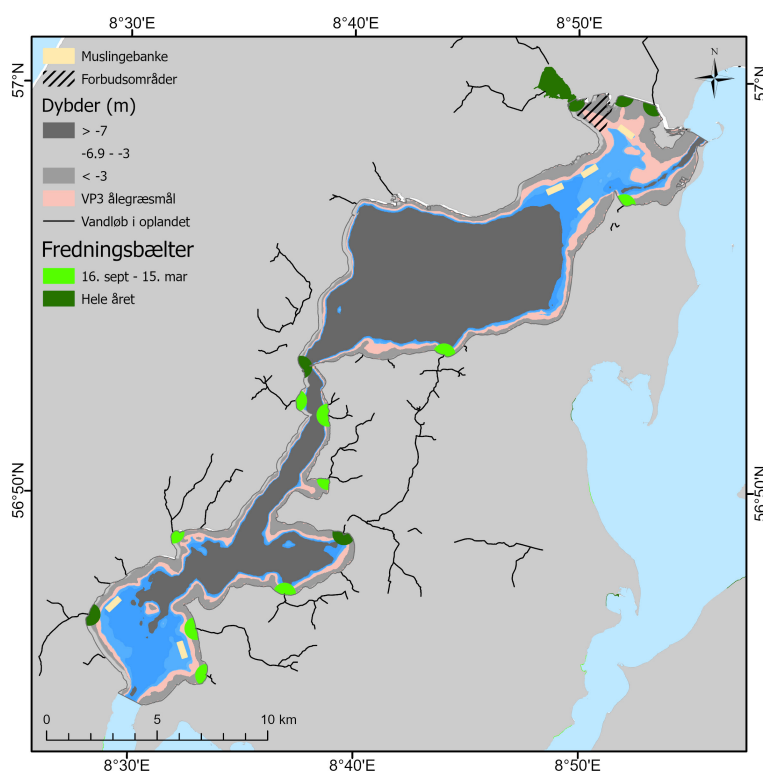
Figur 4. Modelleret risiko for perioder med iltsvind angivet i antal uger om året med ilt koncentrationer under 4 mg/L fra 2010 til 2017 (DHI VOP2017 model).



Figur 5. Havbundens hældning (i grader) i Thisted Bredning.

Placering af muslingebanker som input til modellen

På baggrund af de samlede kriterier omfattende eksisterende arealanvendelse og forudsætninger for succesfuld naturgenopretning blev der udpeget seks områder til placering af muslingebanker. Nogle af områderne ligger indenfor Natura 2000-området i den nordlige del af bredningen og der er i et enkelt tilfælde ikke taget højde for ålegræssets dybdegrænse. Ålegræssets aktuelle maksimale dybdeudbredelse i Thisted Bredning afviger en del fra den ønskede udbredelse, og der er tidligere dokumenteret såvel sameksistens mellem ålegræs og muslinger og gavnlige effekter af muslinger på ålegræssets udbredelse (Bohr m.fl., 2026). Den endelige placering i de modellerede scenarier af muslingebanker er vist i figur 6.

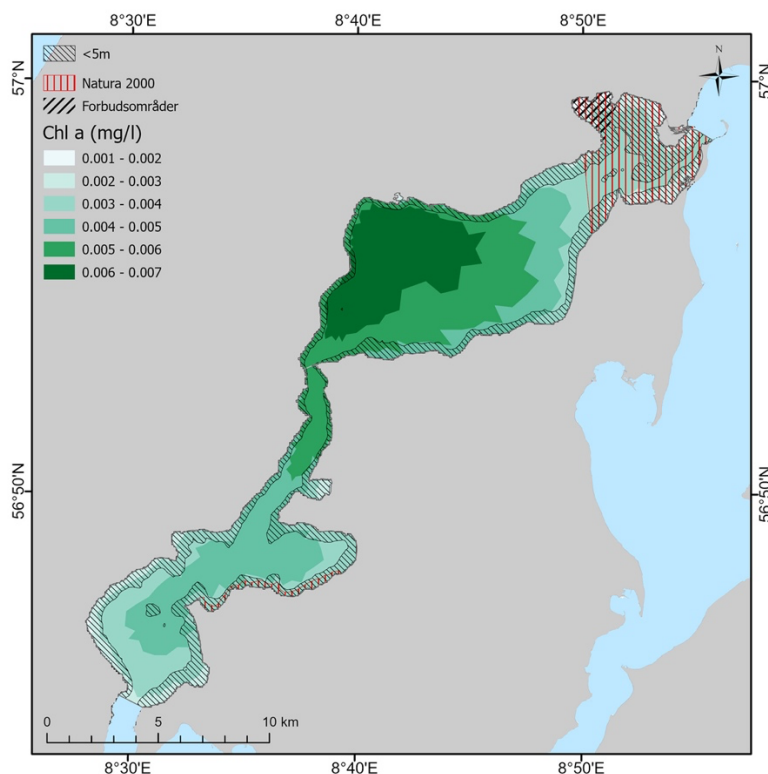


Figur 6. Placering af muslingebanker (beige kasser) i modelscenarierne.

Potentiale for blåmuslingeproduktion i Thisted

I henhold til det marine virkemiddelkatalog (Bruhn m.fl., 2020) er Thisted Bredning særdeles velegnet til implementering af muslingeopdræt som et marint virkemiddel til opfyldelse af Vandrammedirektivets målsætninger om god økologisk tilstand med primær betydning for indikatoren sommer klorofyl-a og støtteparameteren vandets sigtdebyde samt med afledt effekt på indikatoren ålegræssets dybdeudbredelse.

Opdræt af muslinger fjerner kvælstof, der er tilgængeligt i vandsøjlen, via filtration af organisk suspenderet materiale. Muslingers kvælstofoptagelse (såkaldte N-effekt) kan derfor ikke sammenlignes direkte med kvælstofreduktioner på land. Det skyldes, at den kvælstofmængde, der optages af muslingerne, også kan stamme fra intern belastning (sediment), tilstødende vandområder eller atmosfærisk deposition. Da tilstrømning fra tilstødende vandområder i Thisted Bredning er lav, vil det primært være den interne belastning, som udgør andre kilder end afstrømning fra land. Af den grund bliver der primært estimeret på muslingernes effekt på indikatorerne koncentration af klorofyl-a om sommeren og vandets lysdæmpning, men N-effekt vil også blive modelleret.



Figur 7. Modellerede sommer middel klorofyl-a koncentrationer (DHI VOP2017 model).

De gunstige forhold i Thisted Bredning jf. det marine virkemiddelkatalog kan tilskrives en saltholdighed, der er egnet til muslingeopdræt, som i det meste af Limfjorden, samt høje koncentrationer af planteplankton (klorofyl-a, se figur 7). Der er aktuelt fire eksisterende anlæg til opdræt af blåmuslinger i Thisted Bredning om end med en relativ begrænset og variabel årlig produktion (samlet produktion under 125 ton bruttovægt per år i perioden 2010–2022).

Miljøeffekter af muslingebanker og -produktion

Metode for modelstudie

Til at vurdere i hvor høj grad muslinger kan bidrage til målopfyldelse i vandplanområde 236, blev der fortaget et modelstudie med fokus på muslingeopdræt og etablerede muslingebankers effekt på fjernelse af planteplankton (klorofyl-a) og ændring i lysforhold (lysdæmpningskoefficient) omkring anlæg og banker og for hele vandområdet. De følgende afsnit beskriver modelkompleksets opbygning samt de modeller, der er anvendt til at beskrive henholdsvis muslingeopdræt på liner og naturlige muslingebanker.

Hydrodynamisk-biogeokemisk modelkompleks for Limfjorden

Et modelkompleks bestående af en 3D hydrodynamisk model koblet til en biogeokemisk model er tidligere udviklet og kalibreret for Limfjorden med det overordnede formål at understøtte det videnskabelige grundlag for Vandområdeplaner 2021–2027 (DHI, 2019; DHI, 2020). Modellen beskriver Limfjordens biogeokemi med fokus på parametre relevante for Vandrammedirektivet, herunder næringsstoffdynamik (både kvælstof og fosfor), planteplankton, primærproduktion, opløst ilt, organisk stof og bundvegetation. Modelområdet omfatter hele Limfjorden (vandplanområde 157, 158, 232, 233, 234, 235, 236 og 238), men i nærværende notat er fokus afgrænset til vandplanområde 236 (Thisted Bredning). Initialbetingelserne for modellens tilstandsvariable er baseret på observationer fra Limfjorden i 2002, og modellen er efterfølgende kørt til ligevægt ved at simulere år 2002 fire gange inden den egentlige modelperiode påbegyndes.

Modelkomplekset er kalibreret og valideret for perioden 2002-2016 mod observationer fra det nationale miljøovervågningsprogram NOVANA (DHI, 2019; DHI, 2020). Modellen opfylder performancekriterierne 'fremragende', 'meget godt' eller 'godt' for mere end 75% af samtlige kalibrerede og validerede tilstandsvariable og stationer tilsammen i Limfjorden, hvilket vurderes som tilstrækkeligt grundlag for anvendelse af modellen til scenarieberegninger i relation til vandområdeplanerne (DHI, 2020). I dette modelkompleks er der implementeret separate modeller for muslingeopdræt på liner og for naturlige muslingebanker, som beskrives i de følgende afsnit.

Model for blåmuslingeproduktion

Blåmuslingernes vækst på liner i vandsøjlen samt deres interaktion med fjordens kvælstof- og fosfordynamikker beskrives ved hjælp af en muslingemodel, der tidligere er anvendt til at vurdere miljøeffekterne af muslingeopdræt i Skive Fjord. Modellen bygger på Maar m.fl. (2023), som har beskrevet produktion af blåmuslinger og de tilhørende økosystemeffekter i Limfjorden (Maar m.fl., 2023) samt i Østersøen (Buer m.fl., 2020a). Det teoretiske grundlag er en dynamisk energibudgetmodel (DEB) for individuel organismes vækst og energifordeling (Kooijman, 2000).

I modellen reguleres muslingevæksten af vandtemperatur, saltholdighed, fødekonzentration og muslingestørrelse. Føden består af planteplankton og detritus (dødt partikulært organisk materiale), som muslinger optager ved at filtrere vandmassen. Optagelses effektiviteten varierer afhængigt af fødekonzentration, fødeemne og næringsstofindholdet i føden. Den optagne energi anvendes primært til opbygning af strukturelt væv. Når muslinger har nået en tilstrækkelig størrelse, fordeles energien herefter mellem strukturelt og reproduktivt væv i en fast proportion. Ufordøjet materiale udskilles som hurtigt synkende fækalier, mens opløst fosfat og ammonium frigives under respiration.

Når reproduktivt væv er tilstrækkeligt opbygget og vandtemperaturen er passende, vil muslinger gyde og frigive larver. Alle parameterværdier er baseret på Maar m.fl. (2023) og Buer m.fl. (2020), og enkelte parametre er justeret under kalibrering. I modellen antages et fast C:N:P-forhold i muslingevævet baseret på målinger fra muslingeproduktion i Limfjorden (Buer m.fl., 2020b).

Den individbaserede vækstmodel opskaleres til bestanden i et muslingeanlæg ved hjælp af en eksponentielt aftagende funktion, der beskriver den faldende tæthed af muslinger per opdrætsenhed ved stigende muslingestørrelse (Nielsen m.fl., 2016; Taylor m.fl., 2019). Funktionen er kalibreret mod feltobserverede tætheder (antal muslinger per længdeenhed opdrætsmedie) fra et lineopdrætsanlæg i Skive Fjord. Da prædation på opdrætsmuslinger af f.eks. fugle og søstjerner er meget begrænset i Limfjorden (Petersen m.fl., 2021), er dette ikke inkluderet i modellen.

Modellens initialbetingelser for muslingestørrelse og -vægt svarer til dem der er anvendt i den tidligere modellering af muslingeproduktion i Skive Fjord (Andersen m.fl., 2023), hvor modellen er kalibreret mod vækstdata fra opdrætsanlæg i perioden 2010–2011 og 2016–2018 (Nielsen m.fl., 2016; Taylor m.fl., 2019). Kalibreringen viste god overensstemmelse med observerede vækstrater for individuelle muslinger for produktion med langline-system (Bruhn m.fl., 2020; Taylor m.fl., 2019).

Model for naturlige blåmuslingebanker

Muslingebankernes interaktion med økosystemet er beskrevet og modelleret med udgangspunkt i beskrivelsen af blåmuslingers filtration fra den dynamisk energibudgetmodel (DEB) for individuelle blåmuslinger, samt fra tidligere studier af blåmuslingers fødeindtag og vækst i Limfjorden og andre danske farvande (Dolmer, 2000; Maar m.fl., 2023). Da vi er interesserede i muslingernes påvirkning af vandkvalitet og lysforhold i løbet af ålegræssets vækstperiode, antager vi, at biomassetætheden i de etablerede muslingebanker forbliver konstante gennem modelleringsperioden. Denne antagelse er understøttet af langtidsstudier af muslingebanker i Limfjorden, hvor øget biomassetæthed er forbundet med markant øget stabilitet, og hvor en etableret bankes forventede levetid, strækker sig over flere år (Johansson m.fl., 2024). Som følge heraf modelleres muslingernes individuelle vækst, reproduktion og dødelighed derfor ikke eksplicit.

Muslingebankens filtration er beskrevet ligesom i blåmuslingeanlæggene, hvor føden består af planteplankton og detritus (dødt partikulært organisk materiale), som muslinger optager ved at filtrere vandmassen. Filtrationshastigheden beskrives som en funktion af den samlede fødekonzentration i vandet og muslingens gælleareal, og reguleres af vandtemperatur og iltindhold. Det samlede gælleareal for muslingebanken beregnes fra vægten af udlagte blåmuslinger i banken og vægt-til-gælleareal forhold baseret på vægt-til-længde forhold fra Lovns Bredning målt under DTU Aquas årlige bestandsundersøgelser (se Nielsen m.fl., 2023b for beskrivelse af bestandsundersøgelser), og forbliver konstant gennem modelleringsperioden. Ved stigende fødekonzentration mættes muslingernes gællepumpe og sorteringskapacitet, og en stigende andel af det filtrerede materiale udskilles som pseudofæces uden at blive assimileret. Dette beskrives ved en eksponentielt faldende assimilationseffektivitet, der sætter ind når fødekonzentrationen overstiger en tærskelværdi (Buer m.fl., 2020a; Riisgård m.fl., 2013). Respirationen er direkte koblet til den samlede assimilationsrate, hvor halvdelen af det assimilerede kvælstof og fosfor udskilles til vandsøjlen som ammonium og fosfat, i

overensstemmelse med målte ekskretionsrater for blåmuslinger (Holmer m.fl., 2015). Det resterende assimilerede organiske materiale deponeres til sedimentet som fækallier.

Scenariebeskrivelse og beregninger

For at belyse i hvor høj grad etablering af muslingebanker, muslingeopdræt og kombinationer heraf kan bidrage til målopfyldelse i vandområde 236, blev der i samarbejde med Kystvandrådet designet fire scenarier. Målopfyldelse vurderes på baggrund af ændringer i gennemsnitlig sommer klorofyl-a koncentration og lysdæmpningskoefficienten i ålegræssets vækstperiode i vandområdet. Baseline og alle scenarier blev evalueret over en fireårig periode fra 2010 til 2013, med 2010 som start år. Vi antog, at alle modellerede opdrætsanlæg, har en standardstørrelse på ca. 19 ha med liner i tre meters dybde, i overensstemmelse med den anbefalede standardkonfiguration for muslingeproduktion som marint virkemiddel ved brug af langline-systemer (Bruhn m.fl., 2020).

Baseline

Muslingeproduktionen i vandområde Thisted Bredning var ifølge data fra Fiskeristyrelsen under 125 ton bruttovægt per år i perioden 2010-2022, med fire aktive opdrætslicenser. Produktionen var dog meget begrænset: ét anlæg havde sporadisk produktion på 0-15 tons, mens to andre anlæg først havde produktion i 2021 og 2022 med en samlet produktion på henholdsvis 12 og 199 tons. På denne baggrund antages det, at der ikke var aktiv muslingeproduktion i vandområdet i baseline-perioden, der svarer til sidste halvdel af den periode, der anvendes i vandplansmodelleringen. For at kunne isolere og kvantificere miljøeffekterne af de modellerede scenarier er der heller ingen bentisk filtration i baseline. For en beskrivelse af den modellerede miljøtilstand og næringsstofdynamikker i Thisted Bredning i vandplansarbejdet refereres til DHI (2020).

Scenarie 1: Muslingeproduktion til muslingebanker

I det første scenarie simuleres muslingeproduktion med henblik på tilvejebringelse af yngel til etablering af seks blåmuslingebanker. Et standardanlæg på 18,8 ha kan med langline-systemer forventes at producere 770-1.700 tons muslinger, mens net-og-rør-systemer (Smartfarm) kan producere 2.100-2.600 tons per anlæg (Taylor m.fl., 2019). Da etablering af én banke på 20 ha kræver 600-1.000 tons muslinger, er modelopsætningen konfigureret som langline-produktion med liner til tre meters dybde (Bruhn m.fl., 2020). I modellen sættes væksten i gang medio juni, og høst finder sted medio april det efterfølgende år. De fire eksisterende opdrætslicenser antages at indgå i produktionen, suppleret med to yderligere anlæg i Thisted Bredning.

Scenarie 2: Etablering af 6 blåmuslingebanker

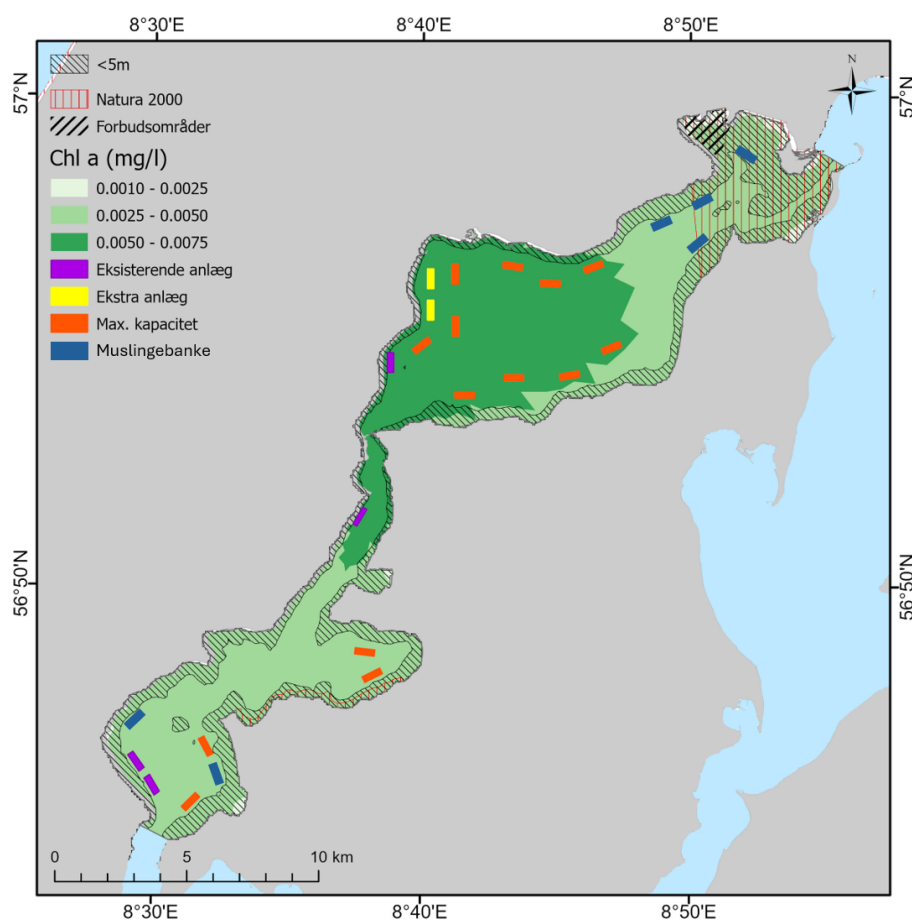
I det andet scenarie modelleres effekterne af seks etablerede blåmuslingebanker på 18-20 ha. Det anbefales at udlægge muslinger med tætheder på 3–5 kg m⁻², idet en vis dødelighed må forventes som følge af bl.a. håndtering ved udlægning (Nielsen m.fl. 2024). Vi anvender en muslingetæthed på 4 kg m⁻², hvilket giver en samlet mængde på 720-800 tons muslinger per banke, som også er inden for kapaciteten af et standardanlæg med langline-produktion (Bruhn m.fl., 2020). Muslinger høstet og udlagt i marts/april forventes at have en skallængde på ca. 4 cm, og denne størrelse samt den antagne udlægningstæthed anvendes til beregning af bankernes filtrationspotentiale som fastholdes over modelperioden.

Scenarie 3: Blåmuslingebanker og muslingeproduktion

I det tredje scenarie kombineres muslingeproduktion på anlæg med etablerede blåmuslingebanker for at undersøge de samlede og potentielt forstærkede miljøeffekter af de to virkemidler. Da vi antager konstant biomassetætheden i de etablerede muslingebanker vil der i dette scenarie stadig være en immobilisering af kvælstof og fosfor fra muslingeproduktionen.

Scenarie 4: Høj muslingeproduktion

For at undersøge det samlede muslingeproduktionspotentiale i Thisted Bredning simuleres et fjerde scenarie med 20 standard langline-anlæg. Der er ikke udlagt muslingebanker i dette scenarie, men anlæggene er placeret under hensyntagen til de potentielle bankelokaliteter fra scenarie 2.



Figur 8. Placering af opdrætsanlæg i modelscenarierne: scenarie 1 og 3 med eksisterende anlæg (lilla kasser) og ekstra anlæg (gule kasser), scenarie 2 med etablerede muslingebanker (blå kasser) samt scenarie 4 med maximal kapacitet (orange kasser). Modelleret sommer middel klorofyl-a koncentration er vist i grønne nuancer og Natura 2000 områder (rød skraveret områder) og lavvandsområder under 5 meter (sort, tynd skraveret) er også indtegnet.

Evaluering af scenarierne

Effekten af hvert scenarie vurderes ved at sammenligne modelresultaterne med baseline for overflade klorofyl-a koncentration om sommeren og lysdæmpningskoefficienten i ålegræssets vækstperiode. Sommer klorofyl-a beregnes som gennemsnittet for de øverste 5 meter af vandsøjlen i perioden maj til september, mens lysdæmpningskoefficienten evalueres for den samlede vækstperiode marts til september. Ændringerne kvantificeres både relativt (scenarie/baseline, udtrykt som fraktionsvise reduktion) og absolut (scenarie minus baseline) for hver modelcelle samt som arealvægtet gennemsnit for hele vandområdet.

Modelresultater

Modelleret muslingeproduktion

Det hydrodynamiske-biogeokemiske modelkompleks for Limfjorden med implementeret muslingemodel simulerede en gennemsnitlig total muslingeproduktion ($\pm$ standardafvigelse) til høst medio april på 10.306 ± 1.594 , 10.565 ± 1.657 og 25.032 ± 4.475 tons for henholdsvis scenarie 1 (6 anlæg), scenarie 3 (6 anlæg og 6 muslingebanker) og scenarie 4 (20 muslingeanlæg) i høstårene 2011-2013 (Tabel 1). Per anlæg svarer dette til en middelproduktion på 1.718 ± 288 , 1.761 ± 303 og 1.252 ± 348 tons per anlæg for de tre scenarier, hvilket bekræfter forventningen om gode forhold for muslingeproduktion i Thisted Bredning. I begge scenarier med seks muslingeanlæg vil der kunne produceres muslinger til at etablere op mod ti muslingebanker på 20 ha med muslingetæthed på 5 kg m^{-2} . Seks muslingeanlæg i Thisted Bredning vil derfor med stor sandsynlighed kunne producere tilstrækkeligt med muslinger til at etablere de seks muslingebanker simuleret i scenarie 2.

Med stigende tæthed af muslingeanlæg i et vandområde kan der forventes en vis begrænsning i produktionen som følge af øget konkurrence om fødegrundlaget. Dette ses i scenarie 4 med høj tæthed af anlæggene, hvor middelproduktionen per anlæg faldt fra ca. 1.700 til 1.250 tons. Anlæggene i det nordvestlige del af Thisted Bredning havde fx en produktion 40-60% lavere end det anlæg med højest produktion i scenariet. De simulerede produktioner i scenariet er dog stadig inden for den forventede produktionskapacitet for muslingeanlæg som marine virkemidler.

Tabel 1. Total årlig muslingeproduktion (muslingevæv, skal og byssustråd) fra alle muslingeanlæg per scenarie som gennemsnit ($\pm$ standardafvigelse) over hele scenarieperioden (2010-2013) for hvert scenarie. For beskrivelse af scenarierne, se ovenfor.

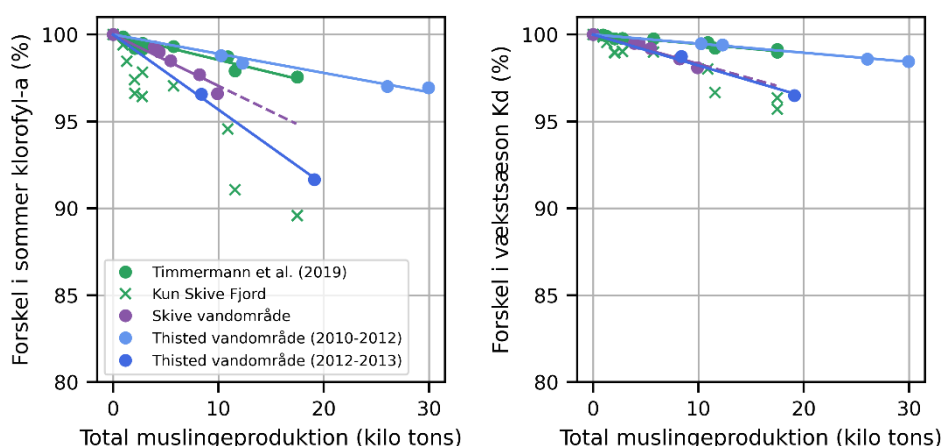
Scenarier	høstet	Muslingeproduktion			
		(tons per vandområde)		(tons per anlæg)	
6 anlæg	Midt april	10.306	± 1.594	1.718	± 288
6 anlæg og muslingebanker	Midt april	10.565	± 1.657	1.761	± 303
20 anlæg	Midt april	25.032	± 4.475	1.252	± 348

For scenarierne med henholdsvis 6 og 20 anlæg simulerede modellen en kvælstofbinding i muslingerne på 26-33 og 21-27 tons kvælstof per anlæg ved høst i medio april. Kvælstofbindingen er en smule højere end forventet fra forsøg med lineopdræt (Taylor m.fl., 2019), men bekræfter størrelsesordenen af den kvælstoffjernelseeffekt, der

tidligere er dokumenteret for muslingeproduktion som marint virkemiddel, forudsat at muslingerne høstes og fjernes fra vandområdet.

Modellerede effekter på målopfyldelse på vandområdeniveau

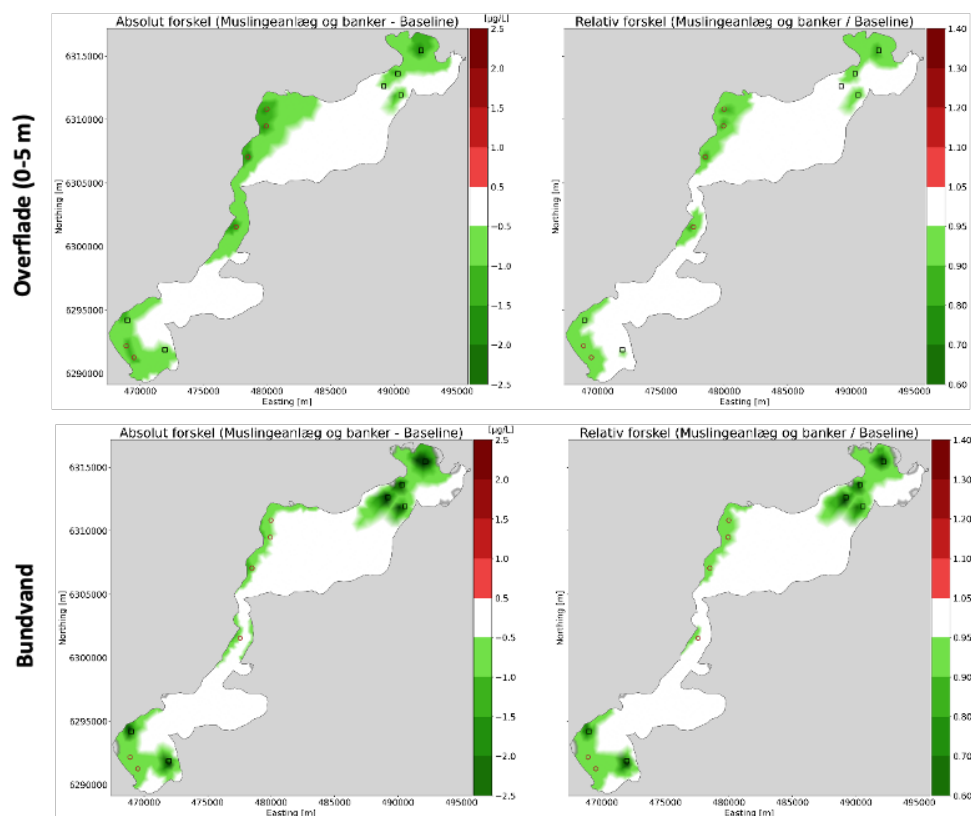
Modelresultaterne viser en tydelig sammenhæng mellem mængden af muslinger og deres geografiske udbredelse og reduktionen i sommer klorofyl-a og vækstsæsonens lysdæmpningskoefficient for hele vandplanområde 236. Generelt var effekten på planteplankton (klorofyl-a) større end på lysforholdene (lysdæmpningskoefficienten), hvilket afspejler, at lyssvækkelse i vandsøjlen ikke udelukkende drives af planteplankton, men også af bl.a. farvet opløst organisk materiale og uorganiske partikler (Figur 9).



Figur 9. Sammenligning af modelleret effekt af muslingeproduktion på areal-vægtet sommer klorofyl-a koncentration (venstre) og lysdæmpningskoefficient Kd (højre) med modelkomplekserne MIKE ECO Lab (dette studie) og GETM-DANECO (Timmermann et al., 2019) for Thisted (236) og Skive (157) vandområde. Effekterne af muslingeproduktion for Thisted er opdelt mellem årene 2010-2012 (lyseblå) og 2012-2013 (mørkeblå). Modelresultater fra GETM-DANECO er skaleret til vandområde 157 (så sammenlignelig med dette studie; grønne cirkler) samt modelleret effekt kun for Skive Fjord (grønne krydser) som præsenteret i Timmermann et al. (2019).

I scenarierne med muslingeanlæggene faldt den arealvægtede sommer klorofyl-a koncentration med 1-3% og 3-8% for henholdsvis seks og 20 langline-anlæg med høst i medio april, mens lysdæmpningskoefficienten faldt med henholdsvis 1% og 1-4%. For scenarierne med muslingebanker alene og kombinationen af muslingebanker og anlæg faldt den arealvægtede sommer klorofyl-a med henholdsvis 1-2% og 2-3%, mens lysdæmpningskoefficienten faldt med henholdsvis 1% og 1-3%.

Bemærkelsesværdigt viste scenarierne med muslingeproduktion på anlæg og muslingebanker en sammenlignelig samlet miljøeffekt på vandområdeniveau på trods af, at de to virkemidler opererer i forskellige dele af vandområdet: Anlæggene er placeret i områder med dybere vand, mens hvor muslingeproduktionen foregår i den øvre del af vandsøjlen og muslingebankerne er placeret på lavere vand og på bunden. I scenariet med både anlæg og banker forstærkedes miljøeffekten, hvilket indikerer, at de to virkemidler kan supplere hinanden rumligt.



Figur 10. Absolutte (venstre) og relativ (højre) forskel på sommer middel klorofyl-a koncentration for scenarie 3 med seks muslingeanlæg (orange cirkler) og seks muslingebanker (sorte firkanter) for 2011 i vandsøjlen (øverst) og bundvandet (nederst).

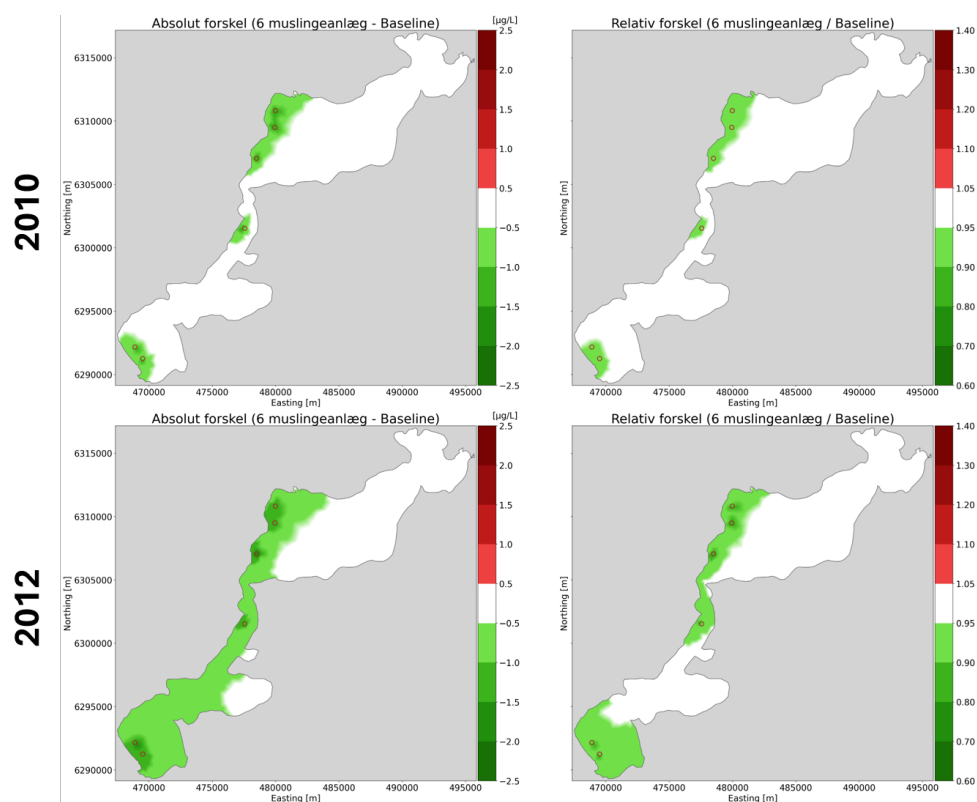
Modellerede lokale effekter på sommer klorofyl-a og vækstsæson lysdæmpningskoefficient

For muslingebankerne var effekten størst i bundvandet direkte over banken med et relativt fald i sommer klorofyl-a på 20-40%. I vandsøjlen over og i nærheden af bankerne var faldet mere begrænset til 0-10% (figur 10). Effekten på lysdæmpningskoefficienten i overfladen var beskeden og på 0,02-0,04 m^{-1} , svarende til under 5% i begge banke-scenarier.

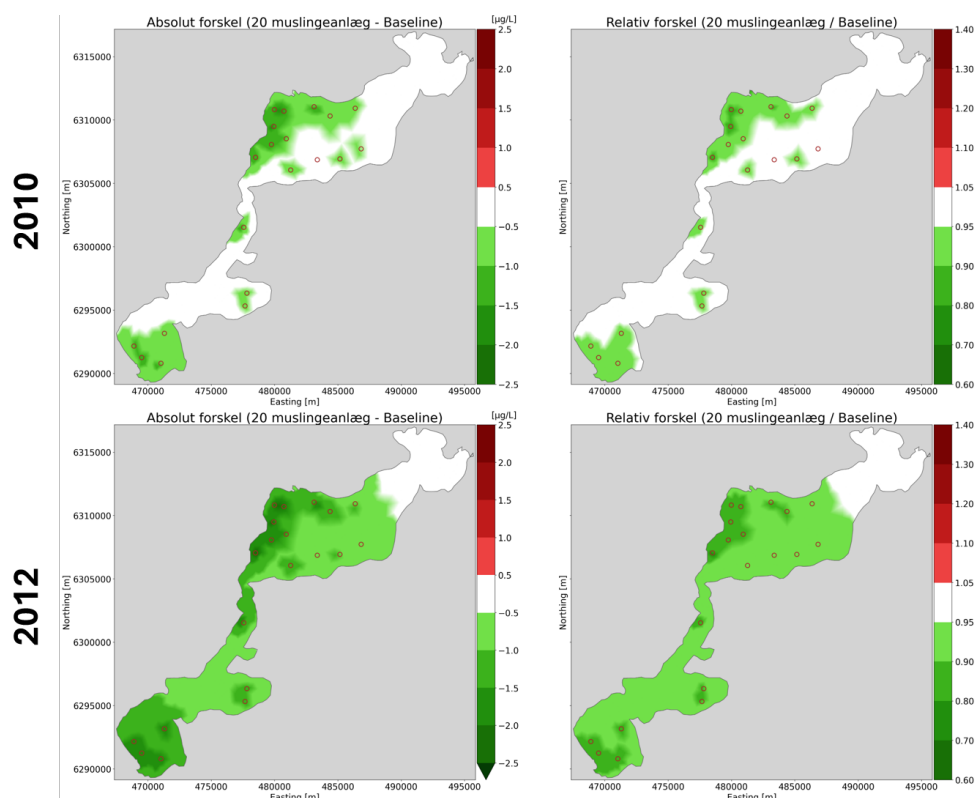
For muslingeanlæggene steg den rumlige miljøeffekt med antallet af anlæg. Med seks anlæg simuleredes et fald i sommer klorofyl-a på 5-10% og i lysdæmpningskoefficienten på 0,02-0,04 m^{-1} (under 5%, figur 11). Miljøeffekternes geografiske udbredelse varierede dog mellem årene: I ét år var effekten koncentreret i og umiddelbart omkring anlæggene, mens i et andet år var miljøeffekten spredt fra den vestlige del af Thisted Bredning til Visby Bredning. Dette afspejler den naturlige årlige variation i strøm- og miljøforhold i vandområdet.

Med 20 muslingeanlæg, fordelt langs kysterne i Thisted Bredning samt i Vilsund, Dragstrup Vig og Visby Bredning, voksede både effektstyrken og den rumlige udbredelse markant (figur 12). I det mest gunstige år simuleredes fald i sommer klorofyl-a på 5-15% og i lysdæmpningskoefficienten på 5-10%, dækkende størstedelen af vandområdet.

Den høje lokale tæthed af anlæg kan desuden forstærke den lokale miljøeffekt, hvilket bl.a. ses i den nordvestlige del af Thisted Bredning.



Figur 11. Absolutte (venstre) og relativ (højre) forskel på sommer middel klorofyl-a koncentration for scenarie 1 med seks muslingeanlæg i 2010 (øverst) og 2012 (nederst) i overfladen.



Figur 12. Absolutte (venstre) og relativ (højre) forskel på sommer middel klorofyl-a koncentration for scenarie 4 med 20 muslinge anlæg i 2010 (øverst) og 2012 (nederst) i overfladen.

Robusthed og begrænsninger af modelresultater

Nærværende modelstudie belyser, hvordan muslinge produktion på anlæg og etablering af muslingebanker i vandplanområde 236 reducerer sommerkoncentrationen af klorofyl-a og lysdæmpningskoefficienten i ålegræssets vækstsæson gennem filtrering af planteplankton og andet organisk partikulært materiale. Modelresultaterne viser den største reduktion i og nær muslinge anlæggene med en naturlig årlig variation, der afspejler varierende strøm- og miljøforhold. Tidligere modelstudier af muslinge produktion i Skive Fjord under tilsvarende økologiske forhold bekræfter, at den rumlige effekt primært er koncentreret i og omkring anlæggene. På time- og dagsbasis kan den lokale effekt være betydeligt større (Nielsen m.fl., 2016; Taylor m.fl., 2021), men den geografiske rækkevidde forbliver oftest begrænset til anlæggenes nærområde. De langsigtede effekter af muslinge produktion for den økologiske tilstand er ikke undersøgt i dette studie, der dækker en fireårig periode.

Sammenhængen mellem den samlede muslinge produktion og reduktionen i klorofyl-a og lysdæmpningskoefficient for hele vandområdet er i god overensstemmelse med tidligere modelstudier (Andersen m.fl., 2023; Timmermann m.fl., 2019), der ved en simuleret total muslinge produktion på 10.000-12.000 tons i Skive Fjord simulerede et fald i sommer klorofyl-a på 2-9 % og i lysdæmpningskoefficienten på 1-4 % afhængigt af høsttidspunkt. Vi vurderer derfor, at de præsenterede resultater for vandplanområde 236, er robuste forudsat, at effekterne vurderes for hele vandplanområdet samlet og under miljøforhold svarende til model-perioden (2010-2013).

Kombinationen af anlæg og banker forstærkede den samlede miljøeffekt sammenlignet med hvert af virkemidlerne alene, hvilket indikerer en rumlig komplementaritet mellem de to tilgange. Det skal dog bemærkes, at modellen ikke inkluderer andre bundlevende filtratorer, og en eventuel fødekoneurrence mellem muslinger i scenarierne og øvrige filtrerende organismer er derfor ikke undersøgt.

Effekten på sommerklorofyl og lys i vækstsæsonen begrænses desuden af produktionscyklussen. I scenarierne løb produktionsperioden fra larvenedslag i juni til høst og udlægning midt i april. Sommer klorofyl-a opgøres for maj til september, så i maj og juni er filtrationskapaciteten lav, fordi anlæggene enten er tomme eller kun rummer små muslinger (<1 cm) med lille biomasse. I scenarier for Skive vandområde blev der simuleret øget fald i sommer klorofyl-a koncentrationen ved at forlænge produktionsperioden for 14 anlæg fra midt december til midt juni fra 1-2% til ca. 5% (Andersen m.fl., 2023).

Ud over effekterne på klorofyl-a og lysforhold medfører muslingeproduktion en række andre miljøpåvirkninger, som er beskrevet i modelkomplekset, men ikke analyseret i detalje i nærværende studie. Muslinger producerer fækalier, der synker til bunds og kan øge sedimentationen af organisk materiale under og omkring anlæggene og bankerne, med mulige følgevirkninger for iltforhold og frigivelse af næringsstoffer fra sedimentet. Desuden optager muslinger kvælstof og fosfor i deres væv, hvilket påvirker næringsstofkredsløbet i vandområdet. Tidligere modellering viser, at den øgede sedimentation under anlæggene er lokal og begrænset til ca. 100 m fra anlægget (Hansen m.fl., 2022), og at en forøget sedimentation under anlægget modsvares af reduceret sedimentation fra primærproduktionen i det omgivende område, hvilket giver en netto reduceret sedimentation på bassinniveau (Timmermann m.fl., 2019). Endelig kan produktionen variere mellem individuelle anlæg inden for samme vandområde, og forbedringer i lysforhold og vandkvalitet bør derfor vurderes stedspecifikt under hensyntagen til lokale miljøforhold og anlægskonfiguration. For en mere detaljeret gennemgang af de samlede miljøeffekter af muslingeopdræt henvises til Bruhn m.fl. (2020).

Referencer

- Andersen TK, Timmermann K, Murray A, Larsen TC, Petersen JK (2023) *Notat vedrørende potentiale og forventede miljøeffekter af udvalgte marine virkemidler i vandområde 157 og 158*. Notat til Kystvandrådet for vandområde 157 and 158 v/ Jørgen Jørgensen (Limfjordsrådet). Journal nr. 23/1010341
- Bohr EH, Taylor D, Andersen TK, Thomasberger A, Brooks ME, Hermannsen L, Timmermann K (2026). *Blue Mussels (Mytilus edulis) Improve Light Conditions in a Downstream Eelgrass (Zostera marina) Meadow in the Limfjorden, Denmark*. Estuaries & Coasts 49: 118. <https://doi.org/10.1007/s12237-026-01728-z>
- Bruhn A, Flindt M, Hasler B, Krause-Jensen D, Larsen MM, Maar M, Petersen JK, Timmermann K (2020): *Marine Virkemidler: Beskrivelse af virkemidlernes effekter og status for vidensgrundlag*, 126 sider, Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 126. - Videnskabelig rapport nr. 368.
- Buer AL, Taylor D, Bergström P, Ritzenhofen L, Klemmstein A (2020a). *Nitrogen and Phosphorous Content in Blue Mussels (Mytilus spp.) Across the Baltic Sea*. Frontiers in Marine Science, 7, 705.

Buer AL, Maar M, Nepf M, Ritzenhofen L, Dahlke S, Friedland R, Krost P, Peine F, Schernewski G (2020b). *Potential and Feasibility of Mytilus spp. Farming Along a Salinity Gradient*. *Frontiers in Marine Science*, 7, 371.

DHI (2019). *Development of Mechanistic Models – Mechanistic Model for Limfjorden – Hydrodynamic model documentation*, DHI rapport, project nr. 11822245

DHI (2020). *Development of Mechanistic Models – Mechanistic Model for Limfjorden – Technical documentation on biogeochemical model*, DHI rapport, project nr. 11822245

Hansen FT, Taylor D, Petersen JK, Nielsen P, Uhrenholdt T (2022) *Notat vedrørende værktøj til miljøvurdering af muslingeopdræt*. Til Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri. Journal nr. 21/1039770. 48 sider.

Hansen, J.W. & Rytter, D. 2026. *Iltsvind i danske farvande 1. juli – 26. august 2026*. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 24 s. Rådgivningsnotat nr. 2026|48.

Hansen, J.W. & Rytter, D. 2024. *Iltsvind i danske farvande 29. august – 25. september 2024*. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 23 s. Rådgivningsnotat nr. 2024|53.

Holmer M, Thorsen SW, Carlsson MS, Kjerulf PJ (2015). *Pelagic and Benthic Nutrient Regeneration Processes in Mussel Cultures (Mytilus edulis) in a Eutrophic Coastal Area (Skive Fjord, Denmark)*. *Estuaries and Coasts*, 38(5), 1629–1641.

Kooijman S (2000). *Dynamic energy and mass budgets in biological systems*. Cambridge University Press.

Maar M, Larsen J, & Schourup-Kristensen V (2023). *Intensified Mussel Farming; Impacts on Nutrient Budgets and Ecology in a Eutrophic Semi-Enclosed Fjord System*. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 128(2), e2022JG007312.

Nielsen P, Taylor D, Banke TL, Saurel C, Holbach AM, & Petersen JK (2023a). *Vejledning for udpegning af områder egnet til etablering af blåmuslingebanker*. Nationalt Center for Marin Naturgenopretning

Nielsen P, Olsen J & Nielsen MM. (2023b). *Konsekvensvurdering af fiskeri af blåmuslinger og søstjerner i Lovns Bredning 2023/2024*. DTU Aqua-rapport nr. 433-2023. Institut for Akvatiske Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet. 56 pp.

Nielsen P, Taylor D, Petersen JK, Freitas P, Banke TL, Johansson I, & Saurel C (2024). *Vejledning til etablering af blåmuslingebanker og opfølgende monitorering*. Videnskabelig rapport fra Center for Marin Naturgenopretning.

Nielsen P, Cranford PJ, Maar M, Petersen JK (2016). *Magnitude, spatial scale and optimization of ecosystem services from a nutrient extraction mussel farm in the eutrophic Skive Fjord, Denmark*. *Aquaculture Environment Interactions*, 8, 311–329.

Petersen JK, Timmermann K, Bruhn A, Rasmussen MB, Boderskov T, Schou HJ, Erichsen AC, Thomsen M, Holbach A, Tjørnløv RS, Lange T, Canal-Vergés P, Flindt MR (2021). *Marine virkemidler: Potentialer og barrierer*. DTU Aqua. DTU Aqua-rapport Nr. 385-2021



Styrelsen for Grøn Arealomlægning og Vandmiljø (2025, revideret 2026) *Vandområdeplanerne 2021-2027 efter genbesøget*. 303 sider. ISBN: 97887-85311-83-2. <https://sgavmst.dk/media/etsko0yf/vandomraadeplanerne-2021-2027-efter-genbesoeget-justeret.pdf>

Taylor D, Larsen J, Buer AL, Friedland R, Holbach A, Petersen JK, Nielsen P, Ritzenhofen L, Saurel C, Maar M (2021). *Mechanisms influencing particle depletion in and around mussel farms in different environments*. *Ecological Indicators*, 122, 107304.

Taylor D, Saurel C, Nielsen P, Petersen JK (2019). *Production Characteristics and Optimization of Mitigation Mussel Culture*. *Frontiers in Marine Science*, 6, 497119.