

## Notat

Til Kystvandrådet for vandområde 157 and 158  
v/ Jørgen Jørgensen (Limfjordsrådet)

Vedr. Potentiale og forventede miljøeffekter af udvalgte marine virkemidler i vandområde 157 og 158

Fra DTU Aqua v/ Tobias Kuhlmann Andersen, Karen Timmermann, Jens Kjerrulf Petersen og DHI v/ Alexandra Murray og Trine Cecilie Larsen.  
Kvalitetssikring af Anders Erichsen (DHI) og Pernille Nielsen (DTU Aqua)

## Resumé

21-12-2023  
Journal nr. 23/1010341  
tkan

Vandområdet Bjørnholms Bugt, Risgårde Bredning, Skive Fjord og Lovns Bredning (vandområde 157), og i særlig grad Skive Fjord, er velegnet til dyrkning af muslinger i vandsøjlen under de nuværende miljøforhold og fødegrundlag, og området har allerede en høj koncentration af eksisterende opdrætsanlæg. Dette modelstudie har påvist mulighed for flere muslinge anlæg (op til 14 anlæg i modelscenarierne) med produktionsniveauer sammenlignelig med produktion som marint virkemiddel under brug af langliner, men ikke som net+rør produktion. I betragtning af modelresultaterne præsenteret i dette notat forventer vi et fald i sommermiddel klorofyl-a koncentration og forbedret lysforhold med en stigende muslinge produktion i vandområde 157. Ved en muslinge produktion på ca. 10.000 ton muslinger (fra 14 anlæg) forventer vi en reduktion af sommermiddel klorofyl-a koncentration og lysdæmpningskoefficienten på henholdsvis 2-4% og 2%. Med et sammenligneligt produktionsniveau for helårs produktion (juni til juni) forventes en effekt på henholdsvis ca. 5% og ca. 3%. Der er ikke potentiale for muslingedyrkning i vandområdet Hjarbæk Fjord (vandområde 158) pga. lav salinitet og vanddybde.

Da potentialet for ålegræstransplantering i område 157 og 158 er stærkt begrænset og kun på <1% af vandområdearealet, vurderes det, at ålegræstransplantering med de nuværende miljøforhold ikke kan bidrage til opnåelse af god økologisk tilstand.

Samlet set forventes tangdyrkning at have ingen til minimal betydning for opnåelse af god økologisk tilstand i vandområde 157 og 158. Selvom potentialet for tangdyrkning i vandområde 157 er betydeligt, vil den minimale arealspecifikke effekt medføre, at der ikke kan forventes en betydelig miljøeffekt på indikatorerne "klorofyl" og "lys" på bassinskala. I vandområde 158 er der ikke potentiale for tangdyrkning, og derfor forventes ingen miljøeffekt.

## Indledning

Blåmuslingeopdræt, dyrkning af sukkertang og ålegræstransplantering er tidligere beskrevet som mulige marine virkemidler der, sammen med landbaserede virkemidler, kan bidrage til målopfyldelse med god økologisk tilstand i danske kystområder (Bruhn et al., 2020). Ideen bag blåmuslingeopdræt er, at muslinger optager næringsstoffer gennem græsning på suspenderet organisk materiale, og næringsstofferne optaget af muslinger fjernes, når muslinger høstes. Muslinger dyrkes på flydende strukturer med yngelfang. Blåmuslingelarverne sætter sig på yngelfanget i slut maj til starten af sommeren og vokser indtil høst, ofte enten tidlig vinter eller forår. Da kun en meget lille andel af muslingelarverne under normale omstændigheder ville bidrage til den naturlige bestand, skaber denne opdrætsmetode ny produktion, der ved høst derfor repræsenterer en netto fjernelse af næringsstoffer fra vandområdet.

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

Dyrkning af makroalger følger samme princip som muslingedyrkning, idet makroalgerne under væksten optager og binder næringssalte fra vandet, så de er utilgængelige for planteplankton. Ved høst af algerne, fjernes de bundne næringssalte fra det marine miljø.

Transplantering af ålegræs, muliggør en øget binding af næringssalte i den stående biomasse og i den løbende bladproduktion. Den fysiske struktur af ålegræs kan derfor lokalt medvirke til at forbedre lysforhold og reducere klorofyl blandt andet pga. øget sedimentation i bedene, og reduceret resuspension. Derudover er ålegræs i sig selv et biologisk kvalitetselement i henhold til Vandrammedirektivet og transplantering kan således bidrage til hurtigere opnåelse af god økologisk tilstand, hvor naturlig spredning er begrænset af mangel på moderbede.

Nærværende notat har til formål at belyse i hvor høj grad muslingeopdræt kan bidrage til målopfyldelse i Skive Fjord, Lovns Bredning, Risgårde Bredning og Bjørnsholm Bugt (vandområde 157). Effekten af 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.

Derudover beskrives potentialerne for at anvende de marine virkemidler "ålegræs-transplantering" og "dyrkning af makroalger" i vandområde 157 og 158. Et udkast at dette notat har været til kommentering hos Limfjordsrådet.

## Blåmuslingeproduktion

### Historik og potentiale for muslingeopdræt i vandområde 157 og 158

På grund af vanddybde og saltindhold er det ikke muligt at dyrke muslinger i Hjarbæk Fjord, hvorfor dette vandområde ikke er medtaget i analysen. Vandområde 157 er derimod et meget velegnet område til dyrkning af muslinger i vandsøjlen (Bruhn et al., 2020). Derfor har Skive Fjord i dag en høj koncentration af eksisterende opdrætsanlæg og var et af de første områder, hvor der blev ansøgt om tilladelser. Der har været foretaget flere undersøgelser af muslingeopdræt i vandområde 157 og studierne har demonstreret nogle af de højeste produktionspotentialer i Limfjorden og i Danmark (Nielsen et al., 2016; Taylor et al., 2019).

### Metode for modelstudie

Til at vurdere i hvor høj grad muslingeopdræt kan bidrage til målopfyldelse i vandområde 157, blev der foretaget et modelstudie med fokus på muslingeopdræts effekt på fjernelse af planteplankton (klorofyl-a) og ændring i lysforhold (lysdæmpningskoefficient) omkring anlæggene og for hele vandområdet. Modelstudiet anvendte et 3D hydrodynamisk-biogeokemisk modelkompleks for Limfjorden, også anvendt i de nuværende vandområdeplaner 2021-2027, med implementeret model for muslingevækst.

### Model for blåmuslingevækst

Til at beskrive vækst af blåmuslinger på liner i vandsøjlen og blåmuslingernes interaktion med fjordens kvælstof- og fosfordynamikker tilpassede vi en model udarbejdet af Maar et al (2023). Modellen har tidligere været anvendt til at beskrive produktion af blåmuslinger og dets effekter på økosystemet i Limfjorden (Maar et al., 2023) og Østersøen (Buer et al., 2020). Modellen tager udgangspunkt i en beskrivelse af en individuel organisms vækst og energifordeling (Kooijman, 2000). I denne model reguleres muslingevækst af vandtemperatur, salinitet, fødekonzentration og muslingestørrelse. Føden består af planteplankton og detritus (dødt partikulært organisk materiale), der indtages af blåmuslingen gennem filtration af vandmassen. Indtaget føde optages med varierende effektivitet, som er afhængig af fødekonzentration, fødeemne og næringsstof-fraktion i føden. Alt optaget energi anvendes først til at opbygge strukturelt væv, og senere når muslingen har tilstrækkelig størrelse fordeles energien mellem strukturelt og reproduktivt væv igennem en fast fraktion. Ufordøjet føde udskilles som hurtigt synkende fækalier. Under respirationen udskilles opløst fosfat og ammonium. Ved tilstrækkelig opbygning af

reproduktivt væv og vandtemperatur, vil muslingen gyde og udskille muslingelarver. Alle parameterværdier i modellen tager udgangspunkt i Maar et al. (2023) og Buer et al. (2020). Enkelte parametre blev ændret under kalibrering af modellen. Den modellerede blåmusling består af et fast næringsstofforhold mellem kulstof, kvælstof og fosfor.

Modellen for individuel blåmuslingevækst opskales til en bestand af blåmuslinger i et muslinge anlæg gennem en eksponentielt faldende funktion, der beskriver udtyndingen af muslinger på substrat i muslinge anlæg ved stigende muslingestørrelse. Funktionen er kalibreret til observerede antal blåmuslinger per længde opdrætsmedie udhængt på line i et muslinge anlæg i Skive Fjord. Prædation på muslinger i anlæg af fx fugle og søstjerner er meget begrænset i Limfjorden (Petersen et al., 2021) og derfor ikke inkluderet i denne model.

### **Hydrodynamisk-biogeokemisk modelkompleks for Limfjorden**

Et modelkompleks bestående af en 3D hydrodynamisk model (DHI 2019) koblet til en biogeokemisk model (DHI 2020) er tidligere blevet udviklet og tilpasset Limfjorden med det overordnede mål at understøtte det videnskabelige grundlag for Vandområdeplaner 2021-2017 ved at beskrive biogeokemien specifik for Limfjorden med et fokus på parametre, der er relevante for Vandrammedirektivet, herunder dynamik i næringsstoffer, planteplankton, primær produktion, opløst ilt, organisk stof og bundvegetation. Modelområdet omfatter hele Limfjorden (dvs. vandområde 157, 158, 232, 233, 234, 235, 236 og 238), men i nærværende notat vil der alene blive fokuseret på vandområde 157. Initialbetingelser for tilstandsvariable i modellen er baseret på observationer fra Limfjorden i 2002. Herefter er modellen kørt i ligevægt ved at simulere år 2002 fire gange således, at modellen er stabiliseret inden modelperioden (med kalibrering og validering) påbegyndes.

Den hydrodynamisk-biogeokemiske model for Limfjorden er kombineret, kalibreret og valideret for modelperioden 2002-2016 mod observationer fra det danske miljøovervågningsprogram NOVANA (DHI 2019 og 2020). Baseret på, at model performance opfylder mere end 75% af alle kalibrerede og validerede tilstandsvariable og stationer (sammenlagt) 'fremragende', 'meget godt' eller 'godt', kan det konkluderes, at den hydrodynamisk-biogeokemiske model for Limfjorden er velegnet til modellering af scenarier i relation til vandområdeplanerne (DHI 2019 og 2020).

### **Implementering og kalibrering af muslingemodel i modelkompleks for Limfjorden**

Modellen for vækst af blåmuslinger i anlæg blev implementeret i det hydrodynamiske-biogeokemiske modelkompleks for Limfjorden. Blåmuslinger, der tabes fra anlægget grundet udtynding på anlæggets liner, antages at dø med en konstant rate, og indgår derefter i sedimentets organiske pulje. Modellen for individuelle

muslinger blev implementeret på anlægsskala ved brug af en eksponentiel funktion mellem skallængde og antal muslinger per meter line. Funktionen, som også er blevet brugt til at beskrive "muslinge udtynding" og bestandsformindskelse, er kalibreret med data fra Nielsen et al., (2016) og Taylor et al., (2019).

Det var nødvendigt at tilpasse enkelte parameterverdier for at sikre højst mulig sammenlignelighed (dvs. modelkalibrering) med aktuelle muslingevækstdata for muslingeopdræt på langliner i Skive Fjord. Modellen og initialbetingelser for muslinger (dvs. muslingestørrelse og vægt) blev kalibreret i modelperioden 2010 med muslingevækst-data for 2010-2011 og 2016-2018 (Nielsen et al., 2016; Taylor et al., 2019). Modellen viste en fin sammenhæng med vækstdata for enkelte muslinger, men det var ikke muligt at simulere maksimal produktion på anlægsniveau, som faktisk målt på et opdrætsanlæg både med langlinesystemer og især ift. opdræt med net+rør (Bruhn et al., 2020; Taylor et al., 2019). Der er i nærværende notat alene modelleret produktion med langline-systemer.

### **Scenariebeskrivelse og beregninger**

For at belyse i hvor høj grad muslingeopdræt kan bidrage til målopfyldelse, vurderet på ændring i sommergennemsnit for klorofyl-a koncentration og lysdæmpningskoefficienten i vandområde 157, blev der designet tre scenarier med input fra Kystvandrådets teknikkergruppe. Baseline og alle scenarier blev evalueret over en fem-årig periode (fra 2011 til 2016 med 2010 som spin-up år). Vi antog, at alle modellerede anlæg har en standard størrelse på ca. 18.8 ha og med liner til 3 meters dybde, hvilket følger anbefalet standard konfiguration for muslingeproduktion, som marint virkemiddel ved brug af langline-systemer (Bruhn et al., 2020).

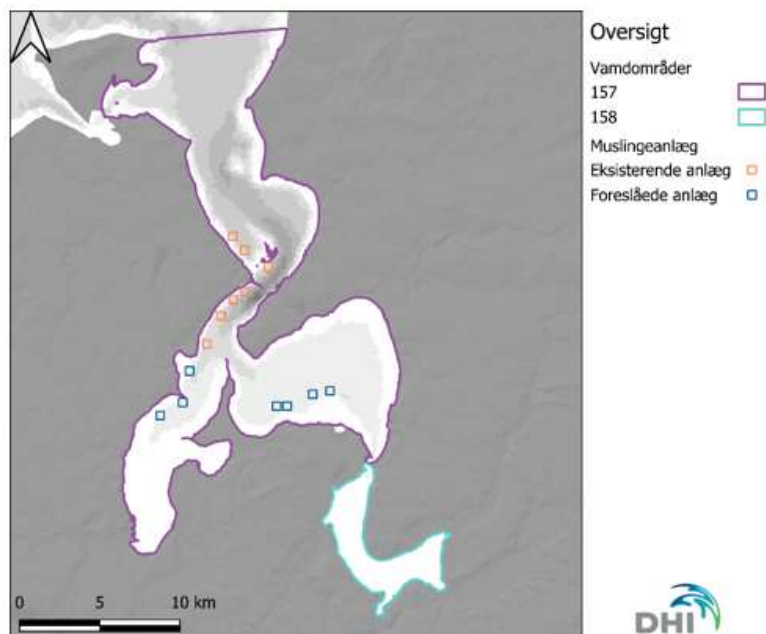
#### *Baseline*

Muslingeproduktionen i scenarieperioden 2010-2016 for vandområde 157 var jf. data fra Fiskeristyrelsen under 500 ton produceret bruttovægt per år med 0-5 aktive opdrætslicenser i samme periode. Derfor antager vi, at der ikke var aktive muslingeopdræt i vandområde 157, når vi modellerer baseline perioden, som svarer til sidste halvdel af perioden, der bruges i vandplanmodelleringen. For beskrivelse af øvrig modelleret miljøtilstand og næringsstof-dynamikker for vandområde 157 refererer vi til DHI (2020).

#### *Syv anlæg med nuværende produktion*

I 2022 var der 8 aktive muslingeopdræt i vandområde 157 med en samlet indrapporteret bruttoproduktion til Fiskeristyrelsen på ca. 3600 tons. Ét anlægs produktion var lav (under 6 tons) og blev ikke inkluderet i scenariet. Derfor implementerede vi 7 muslingeopdræt i vandområdet, og skalerede produktionen til at reproducere den samlede indrapporteret produktion på tværs af de 7 anlæg. I modellen blev vækst af muslinger igangsat midt juni og blev høstet det følgende år i midten

af maj svarende til normale produktionsår, hvor der høstes fra april-juni. Modelscenariet tager ikke forbehold for sortering efter størrelse eller strømpning af muslinger som hyppigt anvendes i muslingeproduktion til konsum.



**Figur 1.** Kort over modeldomæne for vandområde 157 med placering af 7 eksisterende anlæg (orange firkanter) og 7 foreslåede anlæg (blå firkanter) med dybdekort (grå skalering).

#### *Syv anlæg med langline produktion (som marint virkemiddel)*

Samme 7 anlæg, som anvendt til scenariet for nuværende produktion, blev efterfølgende skaleret til langline produktion med fokus på øget produktion for optag af næringsstoffer. I modellen blev vækst af muslinger igangsæt midt juni og der blev høstet midt december samme år.

#### *Fjorten anlæg med langlinje produktion (som marint virkemiddel)*

Udover de 7 nuværende aktive anlæg blev 7 yderligere anlæg inkluderet i dette scenarie for at undersøge eventuel øget bidrag til målopfyldelse. Tre anlæg blev placeret i modellen i Skive Fjord og fire anlæg blev placeret i Lovns Bredning efter input fra medlemmer af Kystvandrådets teknikkergruppe (Figur 1). To scenarier blev undersøgt: 1) vækst af muslinger igangsæt i midt juni og høstet midt december samme år, og efter input fra Kystvandrådets teknikkergruppe 2) helårs produktion igangsæt midt juni og høstet midt juni det efterfølgende år. Det skal bemærkes, at der for nuværende er et moratorium på licenser til nye muslingeopdræt i hele Danmark og Lovns Bredning er udpeget som Natura 2000 område, hvilket vil

kræve en konsekvensvurdering af opdræt før sådan en aktivitet kan tillades i dette område.

Til at vurdere effekten af muslingeopdræt blev modelresultaterne fra hvert scenarie sammenlignet med baseline resultatet for overflade sommer klorofyl-a koncentration og lysdæmpningskoefficienten i vækstperioden i forhold til scenariets modellede totale muslingeproduktion. Sommer klorofyl-a koncentration blev beregnet for de øverste 5 meter af vandsøjlen i modellen fra maj til september, mens lysdæmpningskoefficienten blev evalueret for vækstperioden marts til september. Ændring i sommer klorofyl-a og lysdæmpningskoefficient blev kvantificeret relativt (scenarie/baseline) som procent reduktion og absolut (baseline – scenarie) som koncentration klorofyl-a for hver modelcelle eller areal-vægtet gennemsnit for hele vandområdet.

### **Sammenligning med tidligere modelstudie**

To andre modelstudier har også undersøgt effekten af muslingeopdræt på den økologiske tilstand i Limfjorden med hver sit 3D hydrodynamiske-biogeokemiske modelkompleks for Limfjorden: GETM-DANECO (Timmerman et al., 2019) og FlexSem (Maar et al., 2023). Begge modelresultater er sammenlignelige med vækstdata på opdrættede blåmuslinger i et anlæg i Skive Fjord. I FlexSem-studiet var fokus på effekt af muslingeopdræt i hele Limfjorden, og det har derfor ikke været muligt at sammenligne disse modelresultater direkte med modelresultater fra dette studie. I GETM-DANECO-studiet er effekten af muslingeopdræt undersøgt for Skive Fjord med anlæg alene placeret i Skive Fjord. Det har derfor været muligt at sammenligne GETM-DANECO model resultater med dette studie ved at skalere ændringen i sommer klorofyl-a koncentration og lysdæmpningskoefficient i Skive Fjord. Det antages i skaleringen, at GETM-DANECO modelkomplekset ikke påviste ændringer i sommer klorofyl-a eller lysdæmpningskoefficient udenfor Skive Fjord, hvilket modelresultaterne bekræfter.

### **Modelresultater**

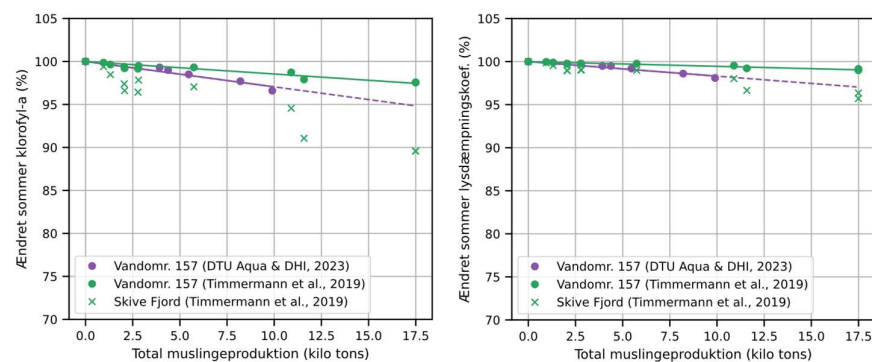
Det hydrodynamiske-biogeokemiske modelkompleks for Limfjorden med implementeret muslinge anlæg simulerede gennemsnitlig total muslingeproduktion  $\pm$  standardafvigelse på  $3926 \pm 335$ ,  $5469 \pm 858$  og  $9895 \pm 1546$  tons for henholdsvis scenarie for eksisterende produktion (7 anlæg 40 liner), 7 eksisterende anlæg med langline produktion og 14 langline anlæg i årene 2010-2016 i vandområde 157 (Tabel 1). Alle tre scenarier har høst i december samme år. Modelresultaterne for muslinge produktionen på 14 anlæg med høst i juni året efter var  $9247 \pm 1232$  tons, hvilket er lavere end resultatet for produktion frem til december. Gydning i foråret er kan bl.a. forklare den lavere biomasse ved høst i juni, ligesom yderligere udtynning af biomassen i takt med at muslingerne vokser individuelt kan have haft betydning.

**Tabel 1.** Total årlig muslingeproduktion (muslingevæv, skal og byssustråd) fra alle muslinge anlæg per scenarie som gennemsnit ( $\pm$  standardafvigelse) over hele scenarieperioden (2010-2016) for hvert scenarie. For beskrivelse af scenarierne 7 anlæg med nuværende produktion (40 liner per anlæg), 7 og 14 anlæg med langline som marint virkemiddel (90 liner per anlæg) og 14 anlæg med helårsproduktion (90 liner), se scenariebeskrivelserne ovenfor.

Scenarier		høstet	Total muslingeproduktion (tons)	
7 anlæg	40 liner	Midt maj	3926	$\pm$ 335
7 anlæg	90 liner	Midt december	5469	$\pm$ 858
14 anlæg	90 liner	Midt december	9895	$\pm$ 1546
14 anlæg	90 liner	Midt juni	9247	$\pm$ 1232

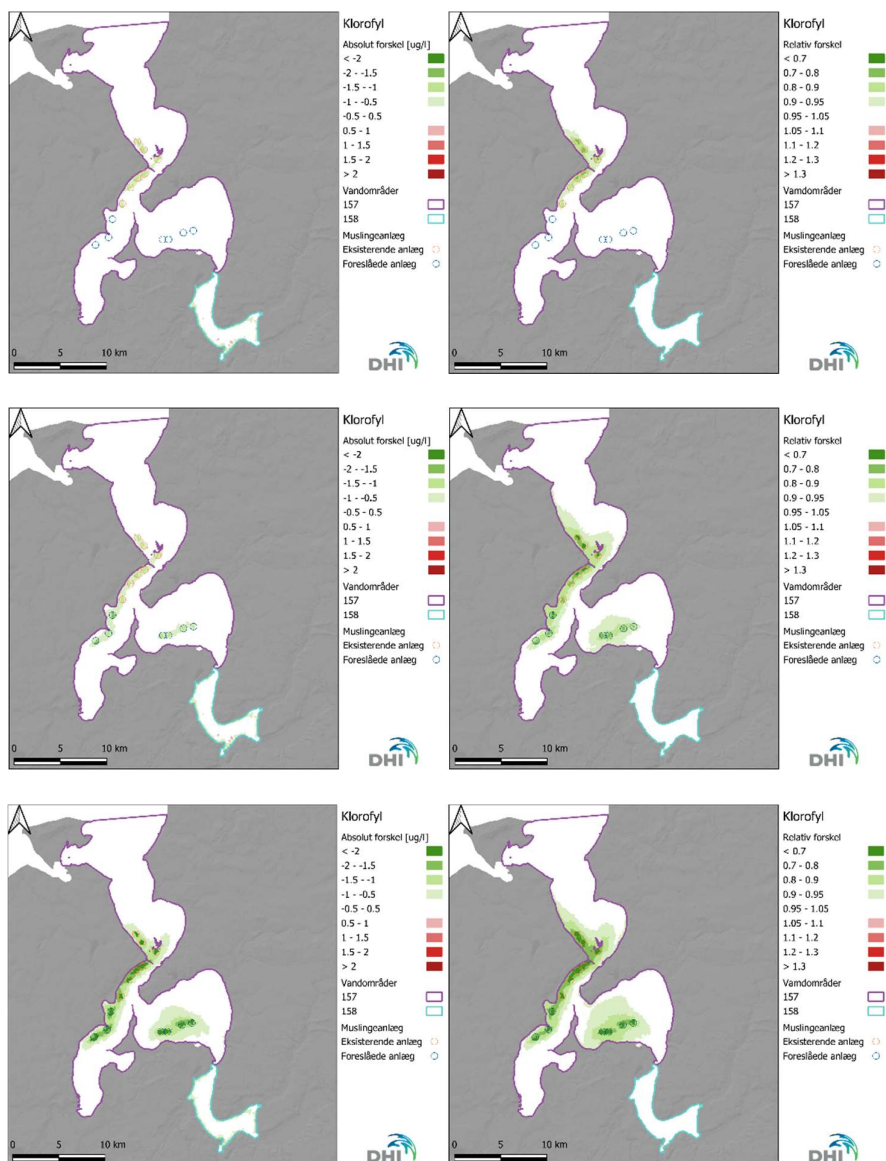
### Modellerede effekter på målopfyldelse på vandområdeniveau

Modelresultaterne viser en tydelig sammenhæng mellem total muslingeproduktion og fald i sommer klorofyl-a og lysdæmpningskoefficient sammenlignet med baseline scenariet for hele vandområde 157 (Figur 2). Modelleret effekt af 7 og 14 langlinje muslinge anlæg som marint virkemiddel med høst i december på hele vandområde 157 var et fald i sommer klorofyl-a koncentration på henholdsvis 1,0-1,8% og 2.4-4.3% og lysdæmpningskoefficient med henholdsvis 0.6-0.9% og 1,5-2,5%. Med høst i juni efterfølgende år på 14 anlæg var effekten på sommer klorofyl-a ca. 5% og lysdæmpningskoefficient ca. 3%. Denne model påviser en større reduktion i sommer klorofyl-a koncentration med stigende muslingeproduktion i hele vandområde 157 end det tidligere modelstudie med fokus på Skive Fjord, hvor et andet modelkompleks blev anvendt (Timmermann et al., 2019).



**Figur 2.** Sammenligning af modelleret effekt af muslingeproduktion på sommer klorofyl-a koncentration (venstre) og lysdæmpningskoefficient (højre) med modelkomplekserne MIKE ECO Lab (dette studie) og GETM-DANECO (Timmermann et al., 2019). 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). Ingen miljøeffekt er repræsenteret med baseline med 100%. Helårs muslingeproduktion er ikke inkluderet i denne sammenhæng.





**Figur 3.** Absolutte og relativ forskel på sommer middel klorofyl-a koncentration for scenarierne med 2022-produktionsniveau (*øverst*), 14 muslinge anlæg for høst i december (*midten*) og for høst i juni i det efterfølgende år (*nederst*).

### Modellerede lokale effekter på sommer klorofyl-a og lysdæmpningskoefficient

Modelkomplekset simulerede, at muslingeopdræt fjernede planteplankton (sommer klorofyl-a) og reducerede lysdæmpningskoefficient i og omkring muslinge anlæg (Figur 3). I korte perioder kunne fjernelse af planteplankton nærme sig 100% i

anlægget. Modellen simulerer større områder med lavere sommer klorofyl-a i bl.a. Lovns Bredning ved helårsproduktion end ved høst i december.

### **Robusthed og begrænsninger af modelresultater**

Nærværende modelstudie har fokus på effekten på sommer klorofyl-a koncentration og lysdæmpningskoefficient ved muslingeproduktion i vandområde 157 gennem muslingers græsning og dermed fjernelse af planteplankton og andet organisk partikulært materiale. Tidligere modelstudier har påvist sammenlignelige rumlig effekt af muslingeproduktion i Limfjorden ved nuværende økologisk tilstand: Ændring i sommer klorofyl-a koncentration og lysforhold er begrænset til i og omkring muslinge anlægget. På time- og dagsbasis kan effekten være betydelig højere, hvilket er bekræftet af både observations- og modelstudier (fx Nielsen et al., 2016 og Taylor et al., 2021), men stadig begrænset til i og omkring anlægget. Miljøeffekten har været vurderet over en 5-årig periode og mulige ændringer i den økologiske tilstand over længere tid har ikke været undersøgt.

Idet den påviste sammenhæng mellem den totale muslingeproduktion, sommer klorofyl-a og lysdæmpningskoefficient for hele vandområdet er sammenlignelig med tidligere modelstudie (Timmermann et al., 2019) vurderer vi, at effekten af muslingeopdræt på sommer klorofyl-a koncentration og lysdæmpningskoefficient, som præsenteret i Figur 2, er robuste. Dette forudsætter at fjernelsen af suspenderet organisk materiale vurderes for hele vandområdet og den økologiske tilstand er tilsvarende den anvendte baseline (periode fra 2010-2016). Ved øget antal af muslinge anlæg (forudsat tilstrækkelig med føde) vil den beregnede effekt af muslingeproduktion givetvis være større. Dette fremgår af den lineære sammenhæng mellem muslingeproduktion og effekt på fx sommer klorofyl-a. Ved lavere sommer klorofyl-a koncentrationer, fx følge af næringsstofreduktioner, vil muslingernes fødegrundlag mindskes og størrelsen af muslinge produktionen vil formodentlig blive lavere (Holbach et al., 2020). Dette forhold er dog ikke belyst i scenarierne. Om en anden placering af anlæggene indenfor vandområde 157 ville have ledt til større effekt på niveau af vandområde er ikke analyseret, men det bemærkes, at nogle af de eksisterende anlæg ligger tæt på hinanden og indenfor den zone, hvor der er en effekt på koncentrationen af sommer klorofyl-a koncentrationen.

Modelleringen i dette notat tager udgangspunkt i anbefalingerne i det marine virkemiddelkatalog (Bruhn et al 2021), hvor der anbefales produktion på net+rør. Muslingeproduktion på net+rør har resulteret i højere produktion (2100-2600 tons muslinger) og større kvælstof og fosfor fjernelse per anlæg end fx langline produktion (Taylor et al., 2019). Grundet modelopløsning var det ikke muligt at modellere muslingeproduktion med net+rør, ligesom det ikke har været muligt at simulere samme produktionspotentiale, som er målt i det seneste studie på et anlæg ca.

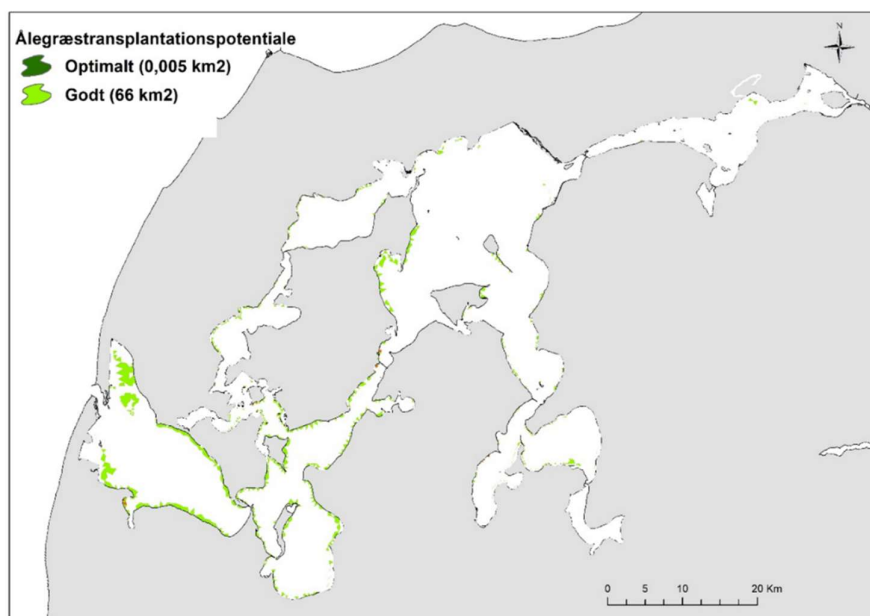
midt i vandområde 157 (Taylor et al., 2019). Så scenarier med højere produktion end ca. 1000 tons per anlæg med høst i december har ikke været undersøgt. Modelresultaterne viser samme størrelsesorden hvad angår produktionsvolumen ved høst i juni som i december. Dette skyldes gydning, hvor der tabes betydelig biomasse i foråret samt i et vist omfang også udtynding af muslinger i takt med, at muslingerne vokser individuelt. Observationer fra anlæg ca. midt i vandområde 157 (Nielsen et al., 2016) viser, at muslingebiomassen burde stige gennem foråret og derfor underestimerer modellen muligvis helårsproduktion ligesom den modellede produktion frem til december er mindre end målt af Nielsen et al (2016) i nogle årene i modelperioden 2010-2016. Det har ikke været muligt i nærværende projekt at nærmere analysere de mindre produktionsmængder sammenlignet med observerede.

Modelkomplekset for Limfjorden inkluderer også andre miljøeffekter ved muslingeopdræt som øget deposition af organisk materiale under og omkring muslinge-anlæg grundet fækalieproduktion og -spredning samt potentielle ændringer i biogeokemiske processer (fx iltforbrug i og næringsstof frigivelse fra sedimentet). Ligeledes indgår optagelse af kvælstof og fosfor i muslingerne. Specifikke ændringer i de biogeokemiske processer i og omkring de enkelte muslinge-anlæg er ikke her blevet analyseret detaljeret eller sammenlignet med observationsstudier. Et tidligere modelstudie har vist, at sedimentationen i vandområde 157 må forventes at være lokal og indenfor 100 m fra anlæggene (Hansen et al., 2022) samt være afhængig af de specifikke ilt- og sedimentforhold omkring anlæggene, samt at potentielt øget sedimentation under anlægget modsvarer af en reduceret sedimentation uden for anlægget, så der på bassinskala er en netto reduceret sedimentation (Timmermann et al., 2019). Effekten af muslingeproduktion på kvælstof- og fosforbalancen for vandområde 157 er således beregnet overordnet og ikke specifikt. Desuden har der indenfor vandområde 157 i modellen været forskelle i produktionen på de enkelte anlæg indenfor vandområdet. Derfor vil eventuelle forbedrede lysforhold i og omkring muslinge-anlæg skulle vurderes sted-specifikt og bl.a. tage lokale miljøforhold og konfiguration af muslingeproduktionen i betragtning. For en mere detaljeret diskussion af samlede effekter af muslingeopdræt refererer vi til Bruhn et al. (2020).

## Ålegræstransplantering

Succesfuld ålegræs transplantering kræver, at miljøforholdene er egnede til forankring og vækst af de transplanterede skud. Dette indebærer bl.a. at der skal være gode lysforhold, at sedimentet ikke er for organisk beriget eller "løst", at strøm og bølgepåvirkning ikke er for stærk og at ålegræsplanterne ikke dækkes af opportunistiske makroalger. I Limfjorden generelt, og i område 157 og 158 i særdeleshed, er

eutrofieringsniveauet så højt, at der kun er få områder, hvor ålegræstransplantering potentielt vil være muligt. Figur 4 viser områder (bruttoareal), som potentielt er egnede til ålegræstransplantering i Limfjorden modelleret ud fra viden om lysforhold, strømforhold, sediment, resuspension, ilt og opportunistiske makroalger (Petersen et al., 2022). De identificerede arealer vurderes at være et maksimumpotentiale, da der for mange af områderne vil være eksisterende ålegræs i dag og da *in situ* studier i nogle tilfælde vil vise, at arealerne ikke er egnede alligevel. I område 157 er der identificeret et mindre areal, potentielt egnet til ålegræstransplantering i den sydlige del af Lovns bredning og der er ikke identificeret egnede arealer i område 158.



**Figur 4.** Potentialer for ålegræstransplantering (bruttoareal) i udvalgte vandområder fastlagt med GIS model og modelgenererede datalag for lys, frekvens af resuspension, iltforhold, bundforhold, makroalger og DIN (opløst uorganisk kvælstof) koncentration. Datalag er genereret ud fra DHI's Vandplanssimuleringsresultater. Grøn markering angiver områder med potentiale for transplantering. Figur er modificeret fra Petersen et al., 2022.

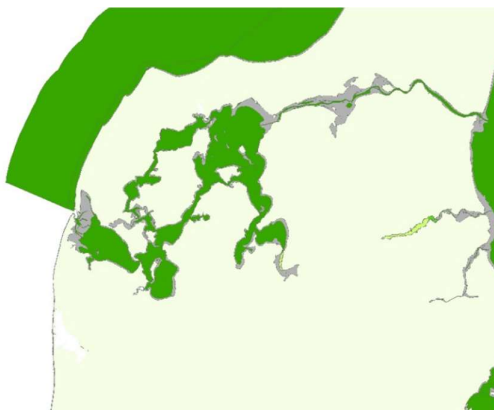
Ålegræsbede er associeret med en række økosystemtjenester, som kan bidrage til at forbedre den økologiske miljøtilstand (GØT). God tilvækst i det udplantede ålegræs immobiliserer næringssalte, som herved ikke bliver tilgængelige for lyssvæk-kende planteplankton eller hurtigt voksende makroalger. Desuden er tætte ålegræsbestande i stand til at dæmpe resuspension og øge sedimentationen, hvilket lokalt kan forbedre lysforholdene og reducere koncentrationen af klorofyl og andet partikulært materiale. Derudover er ålegræsbede essentiel til understøttelse af den kystnære biodiversitet og selv mindre områder med ålegræs har en dokumenterbar og stor effekt på mængden og artsammensætningen af organismer.

Generelt er det udbredelsen, tætheden og væksthastigheden af ålegræsset, som har betydning for realiseringen af økosystemtjenesterne. Der vil altid være en lokal og positiv miljøeffekt af selv en lille ålegræsudbredelse, men for at få betydende effekter på vandområdeniveau kræves at en relativt stor andel af vandområdets bundareal er dækket af ålegræs. Da potentialet for ålegræstransplantering i områderne 157 og 158 er stærkt begrænset og udgør <1% af vandområdearealet, vurderes det, at ålegræstransplantering med de nuværende miljøforhold ikke kan bidrage til opnåelse af god økologisk tilstand.

## Makroalgeproduktion

Potentiale for dyrkning af makroalger afhænger, udover produktionsformen, af de miljømæssige forhold. Høj saltholdighed, gode lysforhold og høje koncentrationer af næringssalte er de styrende parametre for gode vækstforhold for sukkertang, som er den anvendte tangart til dyrkning i danske farvande. I vandområde 157 er forholdene gode for dyrkning af sukkertang og her er hele arealet, bortset fra de mest lavvandede områder (< 3m) egnet til dyrkning (Figur 5). I vandområde 158 er særligt den lave saltholdighed begrænsende for væksthastigheden og vandområdet vurderes ikke at være egnet til tangdyrkning (Petersen et al., 2022)

**Figur 5.** Potentiale for dyrkning af sukkertang (bruttoareal) i udvalgte vandområder i Limfjorden. Grøn angiver arealer med produktionspotentialer > 70% af maxvæksten. Grå angiver områder som vurderes ikke egnede til tangdyrkning, pga. miljøforhold eller lav vanddybde (< 3 m). Figur er fra Petersen et al., 2022.



Miljøeffekten af tangdyrkning som marint virkemiddel er primært koblet til fjernelsen af næringsstoffer, særligt kvælstof. Tidligere studier baseret på resultater fra bl.a. Limfjorden har vist, at den arealspecifikke kvælstoffjernelse er på op til ca. 47 kg N ha<sup>-1</sup> år<sup>-1</sup> (Bruhn et al., 2020), men kan variere en del som følge af fx. miljøforhold og produktionsforhold. Makroalgerne optager næringsstoffer i vinterperioden og til de høstes omkring april/maj. I denne periode er der store mængder næringsstoffer i vandet og planteplankton er oftest primært lysbegrænset og ikke næringsstofbegrænset. Det forventes derfor ikke at makroalgerne har betydende effekt på klorofylkoncentrationen og lysforholdene i dyrkningsperioden. Da miljøindikatoren

”sommer klorofyl-a” beregnes fra maj til september, forventes ingen eller kun minimal effekt af tangdyrkning på denne indikator. Tilsvarende for lysindikatoren, som anvendes som proxy for ålegræssets dybdegrænse forventes ingen effekter af tangdyrkning, da lysindikatoren dækker perioden marts-september.

Samlet set forventes tangdyrkning at have ingen til minimal betydning for opnåelse af god økologisk tilstand i vandområde 157 og 158. Selvom potentialet for tangdyrkning i vandområde 157 er betydeligt, vil den minimale arealspecifikke effekt medføre, at der ikke kan forventes en betydende miljøeffekt på indikatorerne ”sommer klorofyl-” og ”lys” på bassin skala. I vandområde 158 er der ikke potentiale for tangdyrkning og derfor forventes ingen miljøeffekt.

## Referencer

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, A. L., Maar, M., Nepf, M., Ritzenhofen, L., Dahlke, S., Friedland, R., Krost, P., Peine, F., & Schernewski, G. (2020). *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, F.T., Taylor, D., Petersen, J.K., 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.

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., Cranford, P. J., Maar, M., & Petersen, J. K. (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, J. K., Timmermann, K., Bruhn, A., Rasmussen, M. B., Boderskov, T., Schou, H. J., Erichsen, A. C., Thomsen, M., Holbach, A., Tjørnløv, R. S., Lange, T., Canal-Vergés, P., & Flindt, M. R. (2021). *Marine virkemidler: Potentialer og barrierer*. DTU Aqua. DTU Aqua-rapport Nr. 385-2021

Taylor, D., Larsen, J., Buer, A. L., Friedland, R., Holbach, A., Petersen, J. K., 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, J. K. (2019). *Production Characteristics and Optimization of Mitigation Mussel Culture*. *Frontiers in Marine Science*, 6, 497119.