



EFFEKTEN AF MUSLINGEOPDRÆT PÅ DANSKE FJORDOMRÅDER

UDARBEJDET AF BLUE RESEARCH APS
DECEMBER 2023



Den Europæiske Union
Den Europæiske Hav- og Fiskerifond



Rapporten er udarbejdet af
Per Dolmer
Blue Research ApS
Klintestien 30
4720 Præstø

CVR: 41900296
Tlf.: +45 21347781

Per Dolmer har omfattende forsknings- og rådgivningserfaring i forhold til bæredygtig etablering og drift af opdræt af muslinger og tang, udvikling af nye havbrugsprojekter, udvikling af projekter om landbaseret fiskeopdræt, udarbejdelse af miljødokumentation i forhold til fiskeri og akvakultur, og udarbejdelse af udviklingsstrategier. PD's forskning og rådgivning har understøttet en udvikling af forvaltning og produktionsmetoder i fiskeri og akvakultur. PD var med til at udvikle den første Muslingepolitik som rådgiver for Fiskeristyrelsen. PD har omfattende kendskab til kystnære økosystemer og har mere end 25 års erfaring med studier af skaldyrs bestandsdynamik, kortlægning af habitattyper, undersøgelser af effekter af muslingefiskeri og udvikling af blå bioøkonomi. Per Dolmer har været ansat 19 år som forsker og seniorrådgiver hos DTU Aqua samt 8 år som seniorrådgiver hos Orbicon og WSP. PD etablerede i starten af 2021 virksomheden Blue Research ApS, der rådgiver om udvikling af blå bioøkonomi.

Effekten af muslingeopdræt på danske fjordområder

Notatet har til formål at sammenfatte state-of-the-art viden om økosystemeffekter af muslingeopdræt. Sammenfatningen vil have fokus på effekter i forhold til kvalitetsparametrene i vandplanen for marine områder (fytoplankton, makroalger og angiospermer, og den bentiske bundfauna) samt andre parametre relevante herfor. Sammenfatningen vil desuden have fokus på de habitattyper, der er repræsentative for danske fjordtypologier.

Analysen er en del af projektet "Næringsstoffjernelse fra landbaseret fiskeopdræt ved hjælp af blåmuslinger – effektivitet, miljøpåvirkninger og forvaltning" (NIFIMU) finansieret af EHFF og Fiskeristyrelsen. Projektets formål er at udvikle nye metoder og forvaltningsmodeller til næringsstoffjernelse fra fiskeopdræt i landbaserede Recirkulerede Akvakultur Systemer (RAS) ved hjælp af blåmuslinger. Blåmuslinger anvendes som 1) landbaseret filteranlæg og 2) muslingeproduktionsanlæg i det omkringliggende vandområde til yderligere næringsstoffjernelse efter udledning af produktionsvandet fra det landbaserede muslingefilter. I forbindelse med muslingeopdræt, der bruges til fjernelse af næringsstoffer fra landbaseret fiskeopdræt, undersøges 1) effektiviteten af landbaseret filteranlæg og 2) for de vandbaserede undersøges anlæggenes miljøeffekter herunder effekten på havbundens dyreliv, for at kunne udvikle en bæredygtig forvaltning. Notatet bygger videre på et notat om udledninger af næringsstoffer fra en landbaseret akvakulturproduktion, udarbejdet af Blue Research i november 2022 for Københavns Universitet.

1. Forskellige platforme for muslingeopdræt

Der er i dag tre metoder til opdræt af muslinger; dyrkning på langliner, smartfarm og kulturbanker, hvoraf kulturbanker, hvor muslinger fra opdræt i vandsøjlen afhøstes og udlægges på bunden til viderevækst, ikke berøres i dette notat.

1.1 Dyrkning på langliner

Da muslingeopdræt oprindeligt blev etableret i Limfjorden for 15-20 år siden, blev der benyttet en metode, der har inspiration fra canadisk muslingeproduktion. Opdrætssystemet består af en langline, der er udsænt mellem 2 ankre boret ned i havbunden. Hovedlinen holdes i overfladen af bøjer. Substratet, som muslingerne skal sætte sig på, er fastgjort til hovedlinen. Substratet kan udgøres af en lang række forskellige typer. Der kan bruges opskåret trawl-net, reb med en flosset overflade, bændler osv. På hovedlinen er desuden monteret en række betonklodser til at holde net eller liner på plads. Disse gør det også muligt at undersøge opdrætsanlægget. På denne måde undgås påvirkning fra is i vinterperioden, ligesom den visuelle effekt af muslingeopdrættet reduceres. En produktionscyklus starter når muslingelarverne sætter sig på substratet i det sene forår. Når muslingerne vokser, og vægten af muslingebiomassen øges, monteres der flere bøjer, for at holde muslingerne fri for bunden og anlægget flydende. Muslingerne afhøstes i efterårsperioden, hvorefter muslingerne sorteres efter størrelse, og kommer i strømper med en bestemt mængde små muslinger per meter. Dette giver mulighed for en produktion af muslinger med høj kvalitet og stor ensartethed.

1.2 SmartFarm

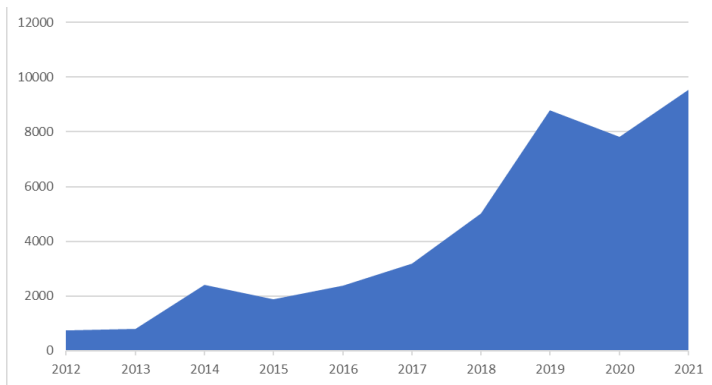
De senere år er der etableret produktion af konsummuslinger på et SmartFarm system. Systemet består af et 120 m langt PE rør, der er lukket i begge ender. På røret er der monteret et kraftigt net, der fastholdes med en lang række løkker. I enderne af nettet er der monteret forankringsreb, der går ned til et stort skrueanker i hver ende. Røret er således ikke fastlåst af forankringen og kan rotere i nettet. Røret er på denne måde selvrensende i det begynder fra rørets tid i vandfasen, forsvinder når røret er oven vande. Nettet fås med forskellige maskestørrelser, og f.eks. Blå Biomasse i Venø Sund bruger en maskestørrelse på 20 x 25 cm. Systemet kan afhøstes maskinelt med en maskine, hvor muslingerne tages af nettet med børster eller et system af plader og derefter pumpes op på et fartøj. Høstmaskinen kan bruges til at udtynde muslingerne i efteråret, ved afhøstning det efterfølgende år, og til rensning af net inden et nyt nedslag af muslinger. Ved udtynding af muslingekulturen i efteråret kan de afhøstede muslinger bruges til omstrømning til langliner, eller muslingerne kan lægges ud i bundkultur.

Wittrup Seafood har igangsat to projekter, hvor der udvikles et undersænket SmartFarm system. I et GUDP projekt udvikles og testes en prototype for et undersænket SmartFarm system, og der udvikles en høstmaskine, der autonomt kan høste det undersænkede muslingeopdræt. I et EU-investeringsprojekt etableres 120 undersænkede SmartFarm enheder, og driften af disse dokumenteres. Enhederne holdes undersænkede med et stort antal betonklodser. I forbindelse med projektet laves der test af muligheden for at udforme disse betonklodser, så de skaber levested for en række bundlevende organismer.

2. Forskellige former for muslingeopdræt

2.1 Muslinger til konsum

Den eneste kommercielle form for muslingeopdræt vi har i Danmark i dag, er produktion af muslinger til konsum dvs. muslinger som fødevarer for mennesker. Den danske produktion af muslinger til konsum er steget fra under 1000 tons i 2012 til 8-10.000 tons de sidste år fra 2019-2021 (Figur 1). Ved en produktion af muslinger til konsum, er det vigtigt at muslingerne opnår en høj kvalitet, og ikke er fødebegrænsede i produktionsperioden. Muslingeopdrætteren er således opmærksom på, at der ikke må opbygges for stor biomasse i de enkelte opdrætsområder. Derved kan fødetilgængeligheden af mikroalger holdes optimal. I et muslingeområde, der producerer muslinger til konsum, vil der derfor typisk kun blive afhøstet omkring 400-800 t muslinger, hvad enten det er langliner eller SmartFarm.



Figur 1. Produktion af muslinger i Danmark i perioden 2012-2021

2.2 Muslinger til omstrømpning eller kulturbanker

Ved en produktion af muslinger på langliner, har man typisk et antal liner (ca 25 % af linerne), der anvendes til at producere de muslinger, der i efteråret skal omstrømpes. Disse langliner kan bære en høj biomasse, men samlet set for opdrættet giver det ikke en væsentlig forøgelse af biomassen. Muslingeopdrætteren kan ligeledes vælge at købe yngel fra en anden kilde, f.eks. en muslingeproducent, der anvender SmartFarm, og dermed kun have produktionsliner i sit område.

Et SmartFarm anlæg er konstrueret til at kunne bære en biomasse på 20-25 t muslinger per enhed, hvilket vil være væsentligt mere end der afhøstes, når muslingerne afhøstes til konsum. I efteråret afhøstes typisk halvdelen af biomassen af muslinger, der anvendes til omstrømpning på langliner eller til kulturbanker. I begge tilfælde indgår muslingerne i en produktion, hvor muslingerne til slut afsættes som en fødevarer.

2.3 Muslinger som marint virkemiddel

Der har de senere år været meget fokus på muslingeopdræt som et marint virkemiddel. I forbindelse med implementeringen af vandområdeplanerne (2021-2027) er der således arbejdet med at bruge muslinger til at fjerne en del af de næringsstoffer, der er målsat at skulle fjernes fra de enkelte vandområder. Der er udarbejdet et marint virkemiddelkatalog, der vurderer forskellige virkemidler herunder virkemidler som muslingeopdræt, dyrkning af sukkertang, etablering af ålegræs mm. Ved sammenligning af de forskellige virkemidler, er muslingedyrkning mest effektiv både i forhold til pris og arealeffektivitet. Med udgangspunkt i det Marine Virkemiddelkatalog er det vist, at muslingeopdræt har en arealeffektivitet der er 77 gange større end arealeffektiviteten for sukkertang, og tilsvarende er 16 gange mere arealeffektiv end udplantning af ålegræs.

Udfordringerne knyttet til det danske vandmiljø, består primært af et overskud af næringsstoffer, hvilket medfører flere problemstillinger. Den ene del af problemet er tilførsel af kvælstof fra land, og her primært fra landbruget. Fra det tidspunkt kvælstoffet kommer ud på marken, kan der gå adskillige årtier før kvælstoffet ender i fjordene og skaber algevækst. En konsekvens af dette er, at selvom anvendelse af kvælstof på markerne reduceres, vil der gå en årrække før den positive effekt kan ses i fjordene i form af reduceret algevækst. Det er derfor relevant at vurdere, om muslingeopdræt kan forbedre vandmiljøet ved at fjerne mikroalger fra det marine miljø.

Den anden del af problemet består af den interne belastning af næringsstoffer fra muslingedyrkningen. Det er næringsstoffer, der bliver aflejret i havbunden, og som ved f.eks. iltsvind frigives og skaber øget produktion af mikroalger. Denne interne belastning kan ikke fjernes med landbaserede virkemidler, og det er derfor relevant at undersøge, om muslinger kan anvendes til at reducere den interne belastning uden i øvrigt at have negativ påvirkning på vandmiljøet.

Opdræt af muslinger anvendes i dag ikke som et marint virkemiddel i forbindelse med implementeringen af vandområdeplanen for 2021-2027. Der er således ikke muslingeopdræt, der producerer muslinger med henblik på at fjerne kvælstof eller på andre måder forbedre det marine miljø. Muslingeopdræt har stadig en effekt i form af næringsstoffjernelse, når muslingerne høstes, samt en målbar positiv effekt på vandets klarhed, men disse effekter indgår ikke som virkemiddel i vandområdeplanerne og muslingeopdrætterne modtager ikke betaling herfor.

I Vejle Fjord er der i forbindelse med Sund Vejle Fjord projektet opdrættet muslinger på langliner. Muslingerne er høstet og udlagt som muslingebanker, der skal skabe biodiversitet og forbedre vandkvaliteten. Det er i projektet vist, at de udlagte muslinger forbedrer vandets klarhed, og dermed forbedrer leveforhold for udplantet ålegræs. Dette eksempel understreger, at anvendelsen af flere virkemidler kan være relevant, og at muslinger f.eks. kan fremme effekten af andre virkemidler som makroalger og ålegræs.

2.4 Muslinger som forarbejdes til ingrediens

Muslinger har et højt indhold af proteiner. Der er i de sidste 5-7 år blevet arbejdet på at udvikle en proces, hvor proteinet ekstraheres fra muslingerne for at indgå som ingrediens i eksempelvis foder til fisk eller fjerkræ. Specielt på markedet for foder til akvakultur, er der en betalingsvillighed for proteinet, der ligger på niveau eller lige over prisen for fiskemel. Med de metoder der er afprøvet, herunder skruepresning, kogning, hydrolysering, er der enten for lav udnyttelse af muslingeproteinet eller for høj processeringsomkostning. Der er ikke en kommerciel produktion af muslinger til foder i dag.

Der er stigende fokus på anvendelse af muslingekød som ingrediens i fødevareproduktion. En ekstrahering af kødet og anvendelse af dette i nye fødevarer, vil gøre det muligt at producere sunde fødevarer med animalsk protein med en meget lav klimaeffekt og med et indhold af sunde fedtsyrer.

3. Typologier for danske fjorde

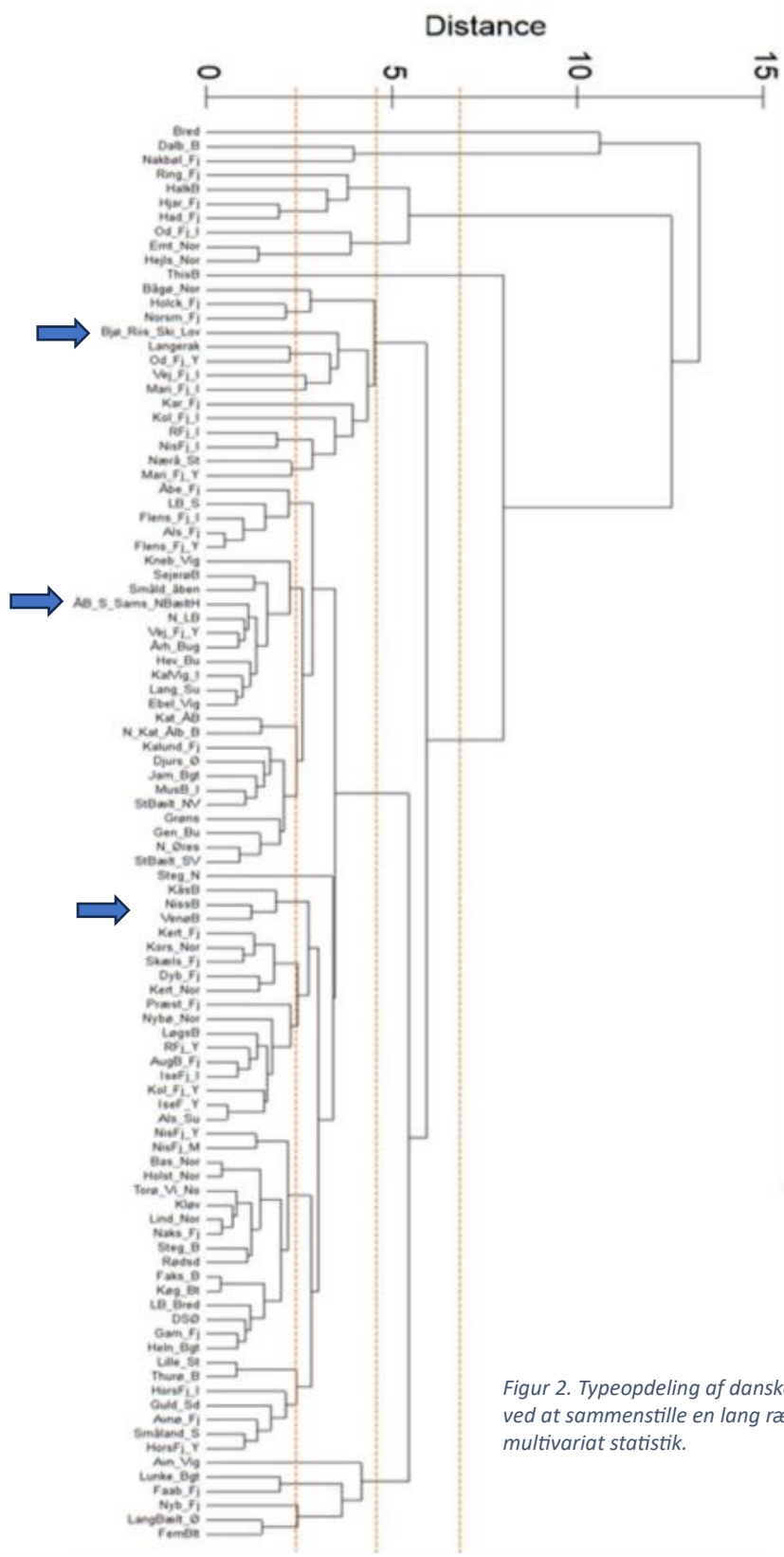
I forhold til at vurdere effekten af muslingeopdræt på et kystområde, er det vigtigt at have kendskab til områdets karakter. Dansk Hydraulisk Institut og Aarhus Universitet (2019) har ud fra en Multifaktor analyse identificeret 15 forskellige fjordtyper for danske farvande. Resultater for påvirkning af muslingeopdræt målt eller modelleret på en lokalitet, og dermed en specifik fjordtype, vil med stor sikkerhed kunne overføres til andre lokaliteter med samme fjordtype eller en nærliggende fjordtype. Klassifikationen af fjordtyper kan således anvendes til at udbrede resultaterne fra en undersøgelse til et meget større geografisk område. I dette notat inddrages der data fra Skive Fjord, Venø Sund og fra As Vig ud for Horsens Fjord.

I forhold til at lave en typeopdeling af de enkelte områder, er der sammenstillet en lang række forskellige data (Figur 2). Disse data er analyseret med multivariat statistik, herunder MDS-plots og dendrogrammer. viser et dendrogram, hvor de Euklidiske afstande (ED) angiver ligheder mellem de forskellige vandområder. Er ED lav, er der stor lighed mellem to områder. Hvis afstanden mellem to vandområder er mindre end 2,3 (nederste stiplede grænse) tilhører de to områder samme typologi (Fig. 2). Fra figuren ses endvidere, at:

- ❖ for Vandområdet Bjørnsholm, Risgårde, **Skive Fjord**, Lovns Bredning er der en lighed med Odense, Yderfjord, Vejle Inderfjord og Mariager Inderfjord med en ED på ca 4. Undersøgelser fra Skive Fjord kan således med en vis usikkerhed overføres til de andre områder.
- ❖ Vandområde Århus Bugt, Samsø N Bælt Hav (**As Vig**) har en ED på under 2,3 i forhold til Kneb Vig, Sejerø Bugten, Nordlige Lillebælt, Vejle Yderfjord, Århus Bugten, Kalø Vig, Lang Su, Ebeltoft Vig. Undersøgelser fra Vandområdet kan derfor med stor sikkerhed overføres til de andre nævnte vandområder.
- ❖ Venø Bugt (**Venø Sund**) og Kaas Bugt har en EB på under 4 til en række områder herunder Kerteminde Fjord, Nyborg Fjord, Løgstør Bredning, Isefjorden, Kolding Fjord, Als Sund mv.

I kapitel 4-6 vurderes effekten af muslingeopdræt på en række faktorer, herunder sedimentation, iltforbrug, effekt på forekomst af mikroalger, vandets klarhed, biodiversitet på bund og på system mv. Vurderingerne foretages både af effekterne under og lige omkring et eller flere muslingeopdræt, og over et større havområde på bassinniveau. Vurderingerne er baseret på modelanalyser og måleprogrammer. Der anvendes data, der både er publiceret i videnskabelige tidsskrifter og data fra rapporter. Det antages, at vurderingerne af de tre områder Skive Fjord, As Vig og Venø Sund kan overføres til de områder, der jvf. den Euklidiske distance, har en stor lighed med de undersøgte områder. Der gøres opmærksom på, at denne metodik indebærer en risiko for fejlvurderinger, men at det som udgangspunkt, er en operationel metode til at opbygge viden om effekten af muslingeopdræt for et større vandområde i Danmark.

Rapporten omfatter ikke en vurdering af anvendelse af muslingeopdræt til at opsamle næringsstoffer fra vandmiljøet. Dette forhold er ganske velbeskrevet allerede, både i forhold til den biologiske og økonomiske vinkel (se f.eks Bruhn 2020, Filippeli et al 2020). Fjernelse af næringsstoffer med muslingeopdræt kan betragtes som en indirekte effekt af muslingeopdræt, hvor den direkte effekt er muslingernes optagelse af mikroalger og andre partikler, deres udskillelse af ufordøjet materiale, der sedimenterer, og udskillelsen af opløste stoffer fra deres metabolisme. Rapporten omfatter således kun de direkte effekter af muslingeopdræt.



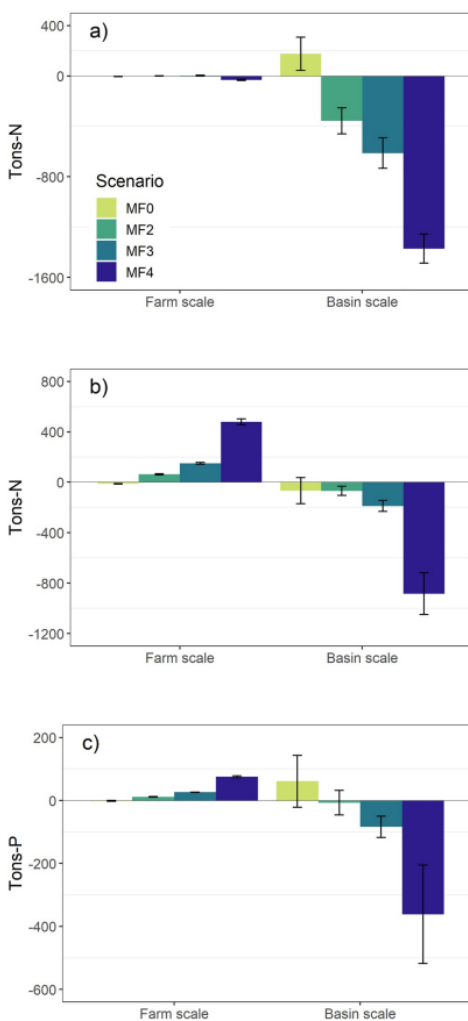
Figur 2. Typeopdeling af danske kyst og fjord områder. Dendrogrammet er dannet ved at sammenstille en lang række forskellige data. Disse data er analyseret med multivariat statistik.

4. Effekten af muslingeopdræt- Generel vurdering

I rapport over de Marine virkemidler (Bruhn 2020) udarbejdet af en række danske universiteter, sammenstilles den viden, der er om effekten af muslingeopdræt. Muslingeopdrætters kapacitet til at fjerne næringsstoffer ved høst af muslinger er angivet (maksimal fjernelse for Smart Farm produktion angives til 3,0 t/ha og 1,4 t/ha for lineopdræt). Derudover sammenstilles muslingeopdræts samlede effekt på økosystemet.

Maar et al (2023a) har modelleret effekten af muslingeopdræt på Limfjorden både i forhold til effekten på muslingefarm-niveau og på bassin-niveau. 5 forskellige scenarier blev modelleret, herunder et scenarie (MF0), hvor der ikke blev produceret muslinger, et scenarie (MF1) med den nuværende produktion (14 opdræt med en høst per opdræt på 272 t), et scenarie (MF2) hvor alle licenser udnyttes med en optimal fødevarerproduktion (43 opdræt med en høst per opdræt på 459 t) to licenser, hvor antallet af muslingeopdræt øges med ni licenser og produktionen planlægges som kompensationsopdræt. I scenarie MF3 produceres på 52 opdræt med en høst per opdræt på 702 t muslinger, og i scenarie MF4 produceres på 52 opdræt med en høst per opdræt på 2.003 t muslinger. Modelområdet omfatter delområderne **Skive Fjord-Lovns Bredning** og **Risgaarde Bredning** og **Venø Bugt** og **Sund- Kaas Bredning** og **Sallingsund**.

4.1 Sedimentation, iltforbrug og denitrifikation



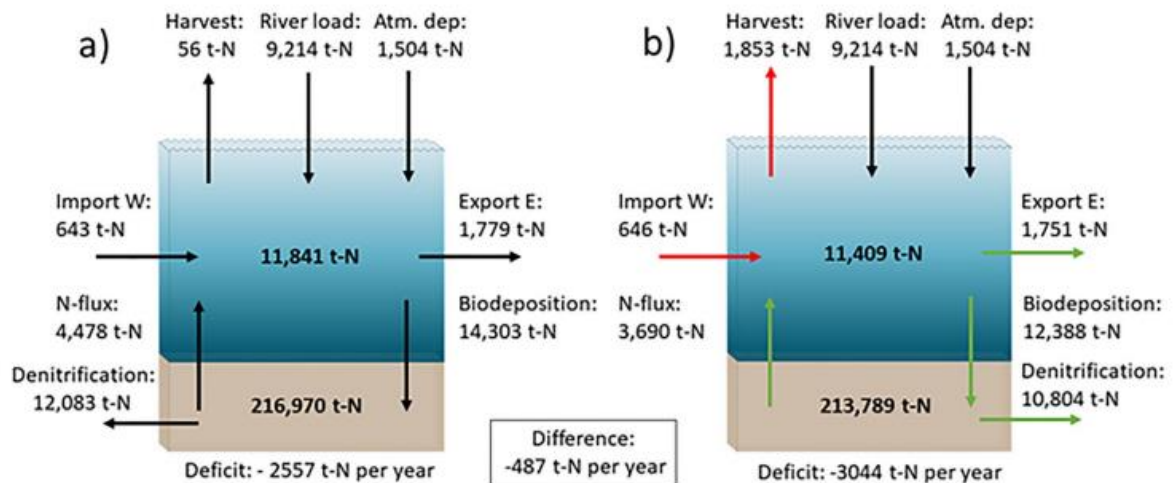
En rapport om marine virkemidler (Bruhn et al 2020) angiver, at en øget sedimentation af organisk materiale under opdrætsanlæggene kan medføre en lokal forøget næringsstoffrigivelse (Carlsson et al. 2009, Holmer et al. 2015). Et studie fra Skive Fjord beregnede, at muslingernes frigivelse af næringsstoffer udgjorde 82%, og sedimentflux fra sedimentet udgjorde 18% af N-udskillelsen fra et opdrætsanlæg (Holmer et al. 2015). Modelleringer af effekt af muslingeopdræt i Limfjorden (Maar et al. 2023a) viser, at der i forhold til denitrifikation er en lille eller ingen effekt under muslingeopdrættet af en øget muslingeproduktion, og for sedimentflux sker en øgning af N og P under muslingeopdrættet (Figur). På bassin niveau sker en reduktion af sedimentationen af næringsstoffer, både for N og P, men denitrifikationen reduceres ligeledes pga. reduceret sedimentation af organisk materiale.

Bruhn et al. 2020 sammenstiller effekten af muslingeopdræt på denitrifikation. Under muslingebrug er der målt forøgede denitrifikationsrater på 25-260% i forhold til uden forbruget i bl.a. Limfjorden og Horsens Fjord (Carlsson et al. 2012, Petersen et al. 2018, Hylén et al. 2020) som følge af biodeposition. Det angives desuden, at der ved høje sedimentationsrater og lave

Figur 3. Den årlige ændring i a) denitrifikation, b) DIN Flux i sediment og c) PO₄ flux i sediment ved de forskellige scenarier. Raterne er modellerede i muslingeopdræt og på bassin niveau (Fra Maar et al 2023)

iltkoncentrationer kan ske en reduktion eller ophør af denitrifikation, hvorved ammonium tilbageholdes i systemet (Holmer et al. 2015, Petersen et al. 2018).

Laves der et samlet N-budget ved at gå fra scenarie MF1-nuværende muslingeproduktion- til MF4- 52 opdræt med en samlet produktion på 104.156 t muslinger- ses, at der samlet set fjernes 487 t N årligt (Fig. 4). Fjernelse af N fra høstede muslinger øges fra 56 til 1853 t N, men dette modsvares bl.a. af et fald i denitrifikationen fra 12.083 t N til 10.804 t N (Maar et al 2023). Fjernelsen af kvælstof ved en øget muslingeproduktion kompenseres således ved en faldende denitrifikation på bassinniveau.



Figur 4. Påvirkning af kvælstofpuljer ved den nuværende dyrkningsintensitet (MF1) (venstre figur) og ved en dyrkning på 104.156 t muslinger (MF4) (højre figur). Det bemærkes, at fjernelse af kvælstof ved høst af muslinger delvis modregnes i et fald af frigivelse af kvælstof ved faldende denitrifikation.

Modellen viser, at for hele Limfjorden så øges iltkoncentrationen i bundvandet med 4 % når muslingeproduktionen øges (Maar et al 2023). Således reduceres bundens iltoptag med 11 % når muslingeproduktionen øges pga. et fald i nedfaldne alger på 18 % når produktionen øges fra 0 til 104.156 t årligt.

4.2 Forekomst af mikroalger og vandets klarhed

I rapport om marine virkemidler (Bruhn et al. 2020) angives, at muslingeopdræt forbedrer sigtedybde og reducerer koncentrationen af klorofyl. Der henvises til reduktioner i klorofylkoncentration helt op til 60-70% i opdrætsanlægget, med et gennemsnit på 14-50% afhængig af muslingernes filtrationskapacitet og miljøforhold såsom strømforhold, salinitet, temperatur og klorofylkoncentration (Nielsen et al. 2016, Petersen et al. 2019, Timmermann et al. 2019, Maar et al. 2020). Målinger af sigtedybden i muslinge anlæg viser en forbedring på 0,8-1,1 m, og helt op til 2,3 m (Maar et al. 2020). Modellering (Maar et al. 2023a) af forekomst af mikroalger og vandets klarhed viser samlet for Limfjorden, at klarheden (Secchi depth) øges med 4 %, og mængden af mikroalger- målt som Chl a- falder med 4% når muslingeproduktionen øges fra 0 til 104.156 t årligt.

4.3 Effekter på bundfauna

I rapport om marine virkemidler (Bruhn et al. 2020) angives, at selve muslingeopdrættet kan virke som et flydende biogent rev og dermed øge biodiversiteten i området. Muslingernes filtration kan ændre sammensætningen af fytoplankton og tiltrække prædatorer. Muslingeopdrættet kan således have en påvirkning af den trofiske struktur. Modellering (Maar et al. 2023a) viser, at mængden af bundlevende muslinger i systemet, f.eks. de muslingebanker, der forekommer naturligt, falder med 2 %, hvilket skyldes et faldende fødegrundlag pga. fødekonkurrence. Omvendt vil bedre iltforhold sikre en bedre overlevelse af muslinger og andre marine organismer.

5. Effekten af muslingeopdræt- Skive Fjord

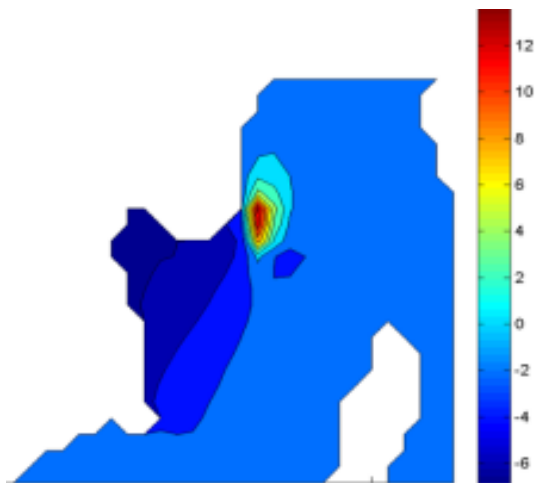
For Skive Fjord er der udarbejdet 3 forskellige modeller, der beskriver økosystemeffekten af muslingeopdræt. Disse modeller anvendes i denne analyse af effekt af muslingeopdræt.

Timmermann et al. (2019) omfatter en avanceret modellering af en enkelt muslingefarm i den centrale del af Skive Fjord, og beskriver effekten af denne på Skive Fjord og Lovns Bredning. Modellen er baseret på indsamling af data hver 14. dag fra juni 2010 til maj 2011, der beskriver fysiske/kemiske/biologiske forhold i vandsøjlen. Biomasse på opdrættet blev bestemt 7 gange. Med modellen beregnes effekten af muslingeopdrættet på sedimentation, på farm, og bassin niveau. Derudover beregnes også effekt på fordeling af klorofyl A og lysforhold.

Maar et al. (2023a) har lavet en tilsvarende økosystemmodel, som dog omfatter hele Limfjorden, og med en modellering af effekten af muslingeopdræt på en række andre parametre. Modellen er beskrevet under Kap 4.

DTU Aqua og DHI har lavet en modellering af sedimentspredning fra nye muslingeopdræt i Limfjorden for Fiskeristyrelsen, herunder for ansøgte muslingeopdræt i Skive Fjord (DTU og DHI 2022). Modellen omfatter kun sedimentation, hvor spredningen vurderes ud fra en spredningsmodel baseret på sedimentets synkehastighed og de hydrauliske forhold.

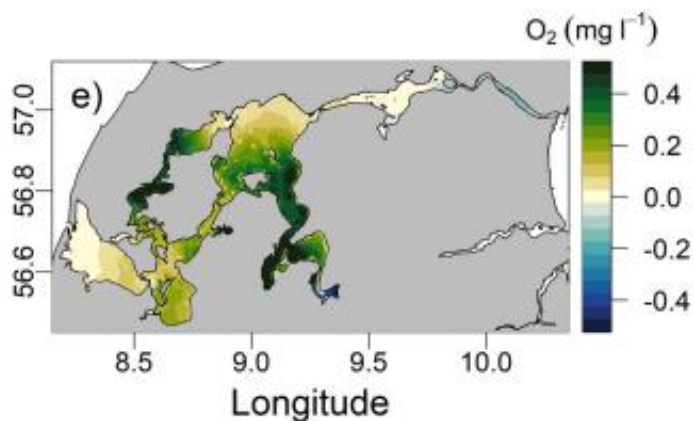
5.1 Sedimentation og iltforbrug



Figur 5 Modellering af sedimentation under muslingeopdræt i forhold til situation, hvor der ikke er muslingeopdræt. Fra Timmermann et al. (2019).

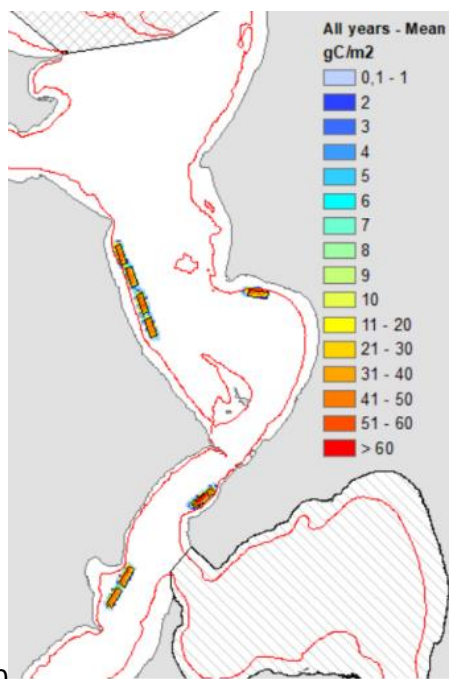
Timmermann et al. (2019) viser med deres model for muslingeopdræt i Skive Fjord, at der sker en øget sedimentation i selve opdrætsområdet på op til 14 %, men at der på bassinniveau var en reduktion i sedimentationen på op til 6% (Figur 5)

Maar et al. (2023a) har lavet en modellering af effekten af 52 muslingeopdræt, svarende til 104.156 t muslinger fordelt i hele Limfjorden. Til sammenligning er nuværende produktion på 3.808 t muslinger. Modelresultater for scenarie med 52 muslingeopdræt viser, at koncentrationen af ilt i bundvandet i sommerperioden stiger med op til 0,5 mg O₂ l⁻¹ i Skive Fjord, med en forbedring på ca. 5 % for hele delområdet (Maar et al. 2023a) (Figur 6).

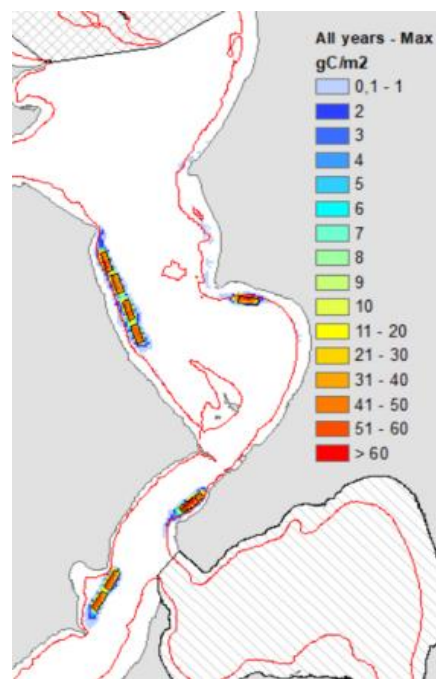


Figur 6. Modelleret ændring af koncentration af ilt i bundvandet når muslingeproduktion øges fra 3.808 t til 104.156 t i Limfjorden i sommerperioden (Fra Maar et al. 2023a).

I sedimentspredningsmodel fra DTU/DHI (2022) beregnes, at sedimentationen pga. svage strømforhold forekommer umiddelbart under og omkring muslingeopdrættene, dvs. inden for 100 m, der er den modeltekniske begrænsning i forhold til gridstørrelse. Sedimentationen er i Figur 7 og 8 beregnet henholdsvis uden og med resuspension, som er en mekanisk forstyrrelse, der hvirvler sedimentet op i vandsøjlen.. Det bemærkes at for Skive Fjord sker der kun i meget begrænset omfang en resuspension af det sedimenterede materiale, og dermed en omfordeling af det organiske materiale.



Figur 7. Akkumuleret organisk kulstof fra muslingefækalier i g C/m² som gennemsnit af gennemsnit for maj og oktober for alle år 2014, 2015 og 2016 i Skive Fjord og Løgstør Bredning. Beregningerne er uden resuspension (Fra DTU/DHI 2022)

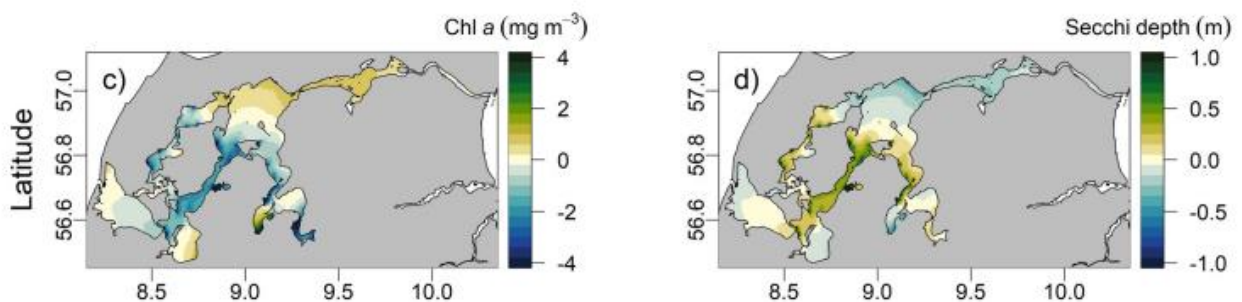


Figur 8. Akkumuleret organisk kulstof fra muslingefækalier i g C/m² som gennemsnit af maksimum for maj og oktober for alle år 2014, 2015 og 2016 i Skive Fjord og Løgstør Bredning. Modelberegning er med resuspension (Fra DTU/DHI 2022)

5.2 Forekomst af mikroalger og vandets klarhed

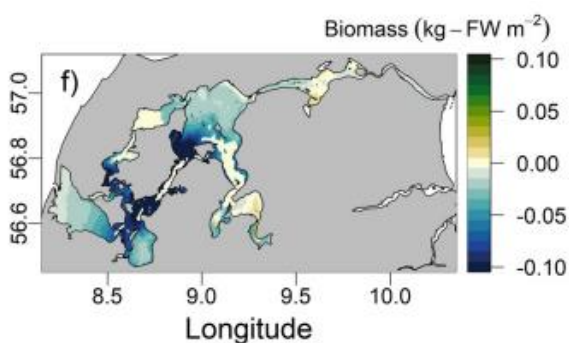
Timmermann et al. (2019) viste med deres model af et enkelt muslingeopdræt, at muslingeopdrættet resulterede i et fald af mikroplankton både i og omkring muslingeopdrættet, men også på bassinniveau. I muslingeopdrættet blev mængden af klorofyl A reduceret med op til 30 %, og mængden af lys til bunden øget med 14%.

Modellering af effekten af 104.156 t muslinger på 52 opdræt fordelt i hele Limfjorden i forhold til nuværende produktion på 3.808 t muslinger viser, at koncentrationen af mikroplankton (klorofyl A) stiger i den sydligste del af Skive Fjord, og er neutral i den centrale del af Skive Fjord, og falder 2-4 mg klorofyl A m^{-3} i den nordlige del af Skive Fjord (Figur). I alt falder den ca 10 % for hele delområdet. Tilsvarende stiger vandets klarhed (Secchi-dybde) i den sydligste del med op til 50 cm i den nordligste del. For delområdet øges Secchi-dybden med ca. 9 % (Figur) (Maar et al. 2023a).



Figur 9. Modelleret ændringer af mængden af mikroplankton, målt som Chl a, og vandets klarhed, målt som Secchi dybde når muslingeproduktion øges fra 3.808 t til 104.156 t i Limfjorden i sommerperioden (Fra Maar et al. 2023).

5.3 Effekter på bundfauna

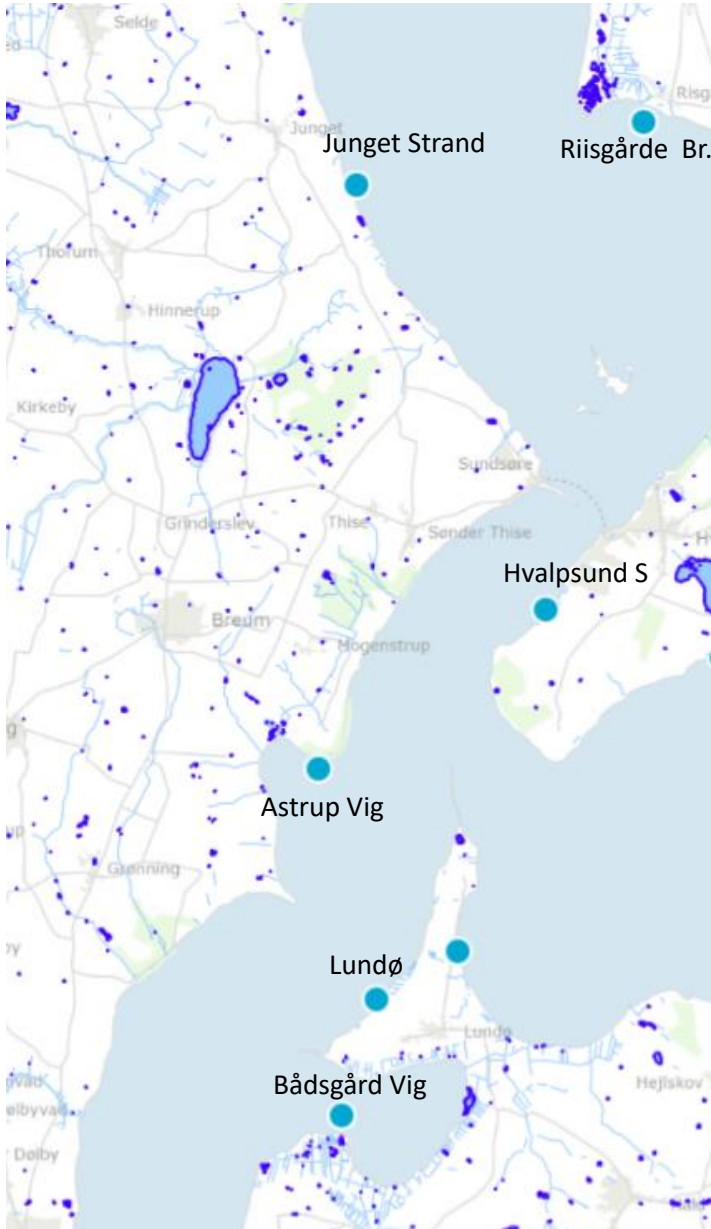


Figur 10. Modelleret ændringer i mængden af bundlevende muslinger når muslingeproduktion øges fra 3.808 t til 104.156 t i Limfjorden (Fra Maar et al. 2023a).

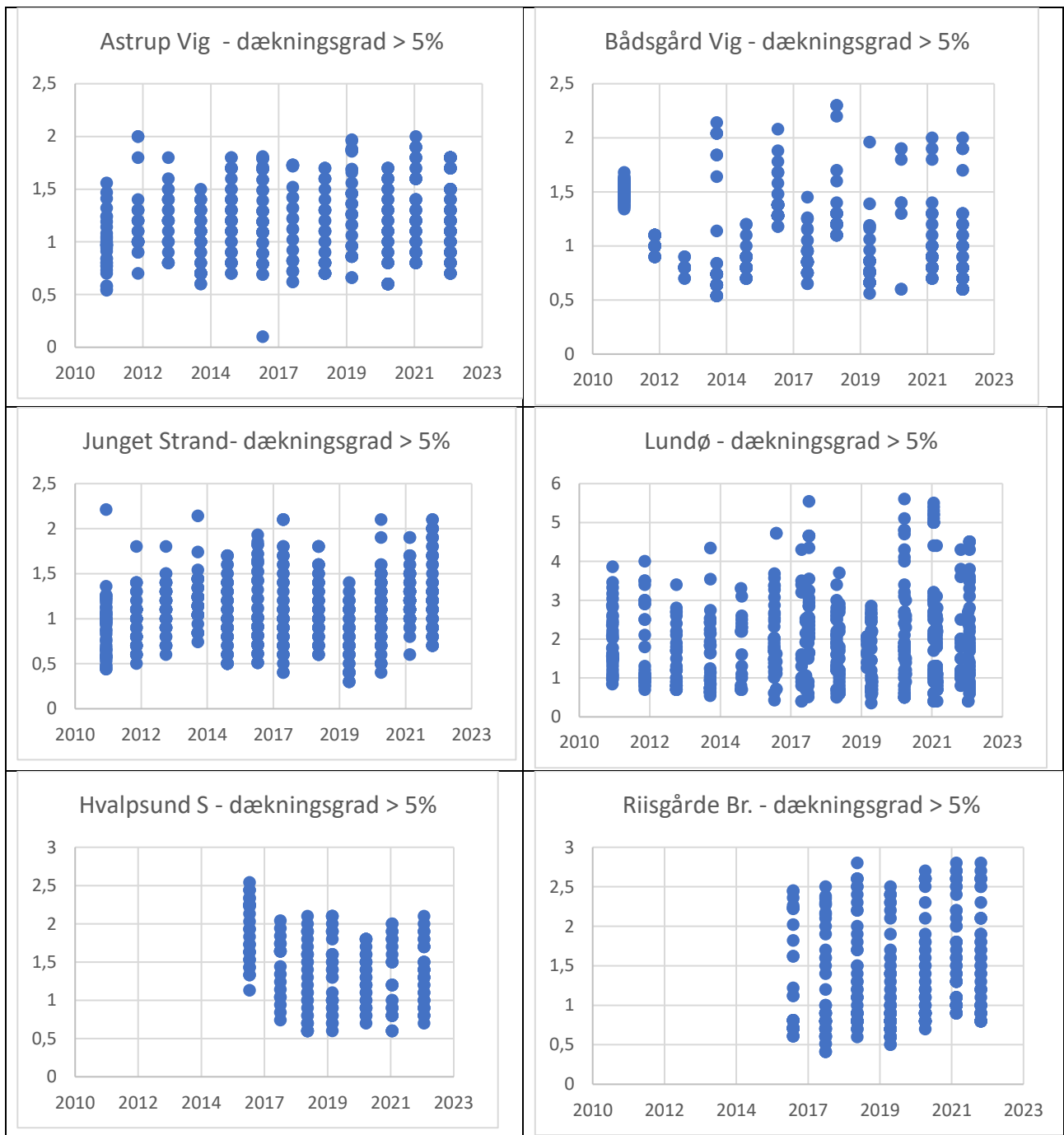
Modellering af effekten af 104.156 t muslinger på 52 opdræt fordelt i hele Limfjorden i forhold til nuværende produktion på 3.808 t muslinger viser, at biomassen af bundlevende muslinger stiger i den centrale del af Skive Fjord, men har et lille fald i den sydlige del af fjorden (Figur). For delområdet stiger biomassen med 2-3 %, hvilket kan kobles til de forbedrede iltforhold i sommerperioden (Maar et al. 2023a).

5.4 Effekten på ålegræs

Ved at trække data for dækningsgrad af ålegræs ud for statens monitoring af det marine miljø ([Miljødata \(miljoportal.dk\)](https://miljoedata.miljoportal.dk)), er det muligt at se på dybdeudbredelse af ålegræs i Skive Fjord. Der er seks stationer fordelt i området (Figur 11) og dybdeudbredelsen viser en uændret dybdeudbredelse i området (Figur 12).



Figur 11 Stationer, hvor der er indsamlet data for dybdeudbredelse i Skive Fjord

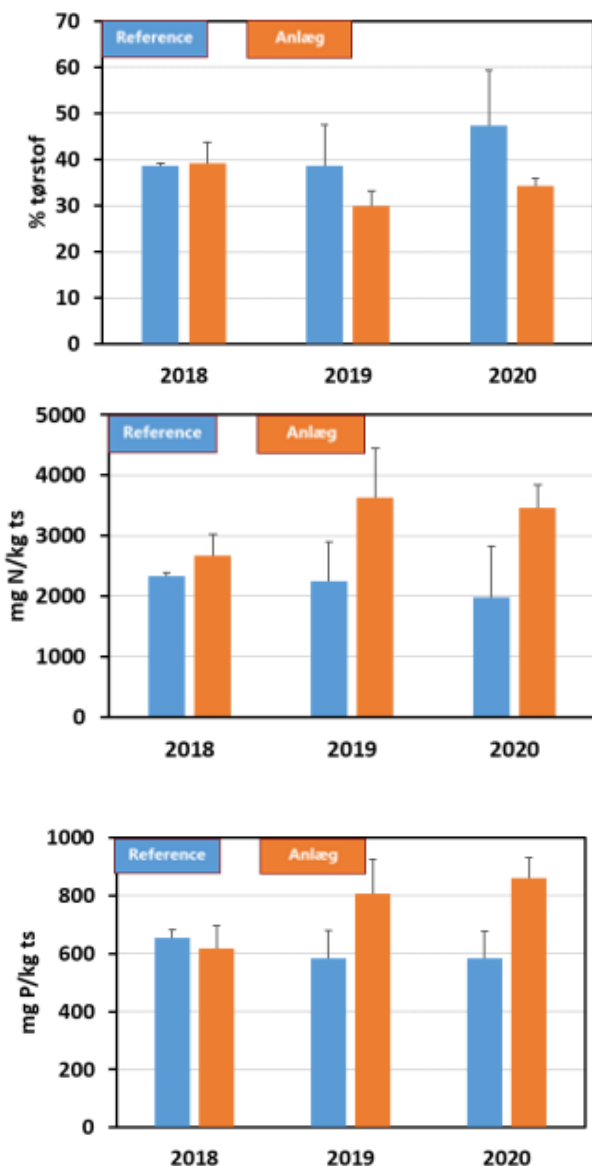


Figur 12 Udbredelsen af ålegræs på stationer i Skive Fjord. Data er fra NOVANA overvågningen fra 2010 til 2022

6. Effekten af muslingeopdræt- Venø Sund

6.1 Sedimentation og iltforbrug

I forbindelse med GUDP projektet INPROFEED, udarbejdede Københavns Universitet et notat om effekten af muslingeopdræt i Venø Sund. Sedimentprøver blev indsamlet i 2018, 2019 og 2020 i sommerperioden under et muslingeopdræt og i et sammenligneligt referenceområde, der ikke var påvirket af muslingeopdræt. Analyser viste, at der var statistisk forskelligt indhold af tørstof, kvælstof. For fosfor var der statistisk forskel mellem sedimentets indhold under muslingeopdræt og i reference område to ud af tre år. Tørstofindhold var i gennemsnit 16% højere end under muslingeopdrættet. For N og P var indholdet henholdsvis 50 % og 27 % højere under muslingeopdræt i forhold til referenceområde (Figur 132).

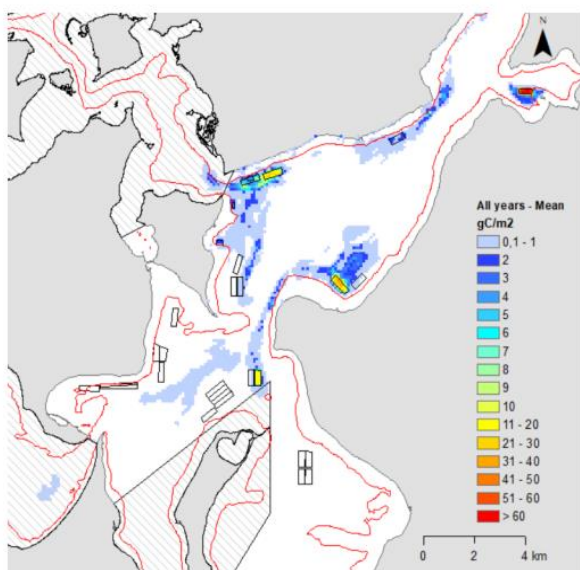


Figur 132. Sedimentets indhold af Tørstof (øverst), kvælstof (midten), og fosfor (nederst). De blå søjler er for målinger i referencestationer og de orange er for målinger under muslingeopdræt.

I INPROFEED projektet blev sedimentets iltforbrug ligeledes målt under muslingeopdræt og på referencestationer i 2020. I alt blev der lavet 22 målinger på sediment fra under muslingeopdræt og 13 referencemålinger. Der kunne ikke måles nogen statistisk forskel i målingerne på sediment fra under muslingeopdræt og på referencestationer. Iltforbruget var i området mellem 60 og 70 mg O₂ h⁻¹ m⁻², men med stor variation. Det er således usikkert, om undersøgelsen er statistisk robust nok til at vise en forskel mellem de påvirkede stationer og referencestationerne. Ifølge Carlson et al. 2009 er den naturlige sedimentation i Kaas Bredning mellem 1,5 og 2,9 g C m⁻² d⁻¹. Denne sedimentation kan ifølge DTU/DHI notat (2022) medføre et iltforbrug, under antagelse af ligevægt mellem tilførsel og forbrænding af organisk materiale, på 75-146 mg O₂ h⁻¹ m⁻², hvilket er i samme størrelsesorden eller højere set i forhold til det iltforbrug, der er målt under muslingeopdrættene 2020.

Modellering af effekten af 104.156 t muslinger på 52 opdræt fordelt i hele Limfjorden i forhold til nuværende produktion på 3.808 t muslinger viser, at koncentrationen af ilt i bundvandet i sommerperioden stiger med op til 0,2 mg O₂ l⁻¹ i Venø, og at der for hele delområdet sker en forbedring på ca 3 % (Maar et al. 2023).

I rapport fra DTU/DHI (2022) beregnes, at sedimentationen i Kås Bredning, Sallingsund og Løgstør Bredning medfører en spredning i en afstand fra 100-500 m til de modellerede muslinge anlæg, meget afhængig af lokaliteten. Generelt vurderes det, at det sedimenterede materiale vil spredes fra afgrænsningen af ansøgningen til dybere vand (Figur 14).



Figur 14. Akkumuleret organisk kulstof fra muslingefækalier i g C/m² som gennemsnit af maksimum for maj og oktober for alle år 2014, 2015 og 2016 i Kaas Bredning og Sallingsund

6.2 Forekomst af mikroalger og vandets klarhed

I INPROFEED projektet (2020) blev der foretaget målinger af Chl. A koncentration og spredning ved hjælp af fluorescens. Målemetoden blev kalibreret med konkrete målinger af Chl. a. Desuden blev vandets klarhed målt med secci-målinger. Målingerne viste, at mængden af Chl. a er reduceret med en faktor 2-4 inden i muslingeopdrættet, sammenlignet med opstrøms for anlægget. Målingerne af vandets klarhed med Secci-metoden viste en gennemsnitlig secci-dybde på 3,5 m indenfor muslingeopdrættene og 2,8 m udenfor

muslingeopdrættet. Forskellen i vandets klarhed indenfor- og udenfor muslingeopdrættene var statistisk signifikant.

Modellering af effekten af 104.156 t på 52 opdræt fordelt i hele Limfjorden i forhold til nuværende produktion på 3.808 t muslinger viser, at koncentrationen af mikroplankton (Klorofyl A) falder i Venø Sund med 1-2 mg m⁻³. I alt falder den for området med ca. 14 %. Tilsvarende stiger vandets klarhed (Secchi-dybde) 20-30 cm i Venø Sund og ca. 7-8 % for hele området (Maar et al. 2023).

6.3 Effekter på bundfauna

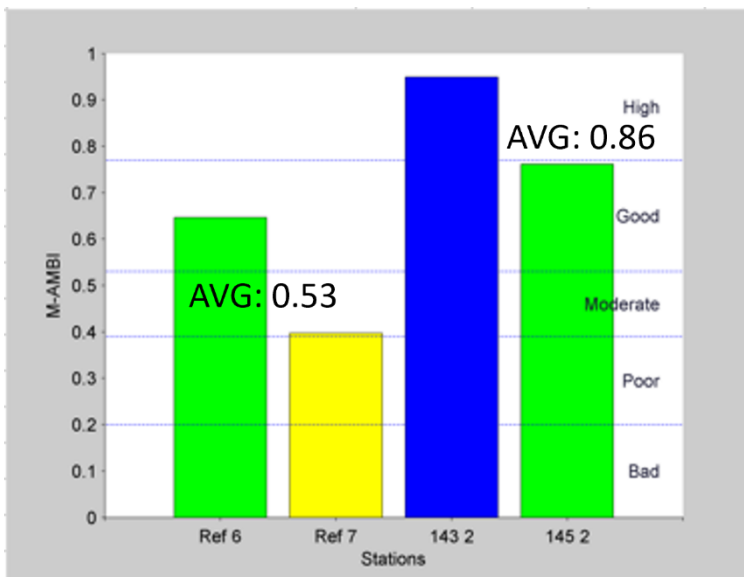
I INPROFEED projektet viste bundprøver og videooptagelser, at der under muslingeopdrættene etableredes biogene rev pga. nedfaldne blåmuslinger. Analyser af bundfaunaen med beregning af M-AMBI index viste, at den økologiske status var bedre i muslingeopdrættet i forhold til den økologiske status på referencestationerne. M-AMBI er et flerdimensionelt indeks til bestemmelse af bundfaunaens økologiske status i marine blødbunds-områder, der bl.a. vægter tilstedeværelse af arter med lidt eller stor tolerance overfor presfaktorer som fx eutrofiering. Indekset er i overensstemmelse med det europæiske vandrammedirektivs klassificering af økologiske status, og er således et vurderingsværktøj til et områdes økologiske tilstand. M-AMBI viser, at den økologiske status under anlægget på de to prøvestationer er henholdsvis god (grænsende til høj) og høj; mens den på de to referencestationer er henholdsvis god og moderat (grænsende til dårlig). Gennemsnittet for de to stationer under anlægget viser, at den økologiske status kan klassificeres som høj (0.86) og den økologiske status for referenceområdet kan klassificeres som moderat (0.53) (Figur). Figur 16 viser fordelingen af bunddyr, og det bemærkes, at der under muslingeopdrættet optræder en stor andel af arter, der har en meget lav stresstolerance, arter der vil karakterisere et område, der således i mindre omfang er påvirket af høj næringsstofpåvirkning og ringe iltforhold.

Modellering af effekten af 104.156 t muslinger på 52 opdræt fordelt i hele Limfjorden i forhold til nuværende produktion på 3.808 t muslinger viser, at biomassen af bundlevende muslinger falder i Venø Sund. For hele delområder falder biomassen med 7-8 % grundet mangel på føde her beskrevet som et fald i klorofyl A på 1-2 mg⁻² (Maar et al. 2023).

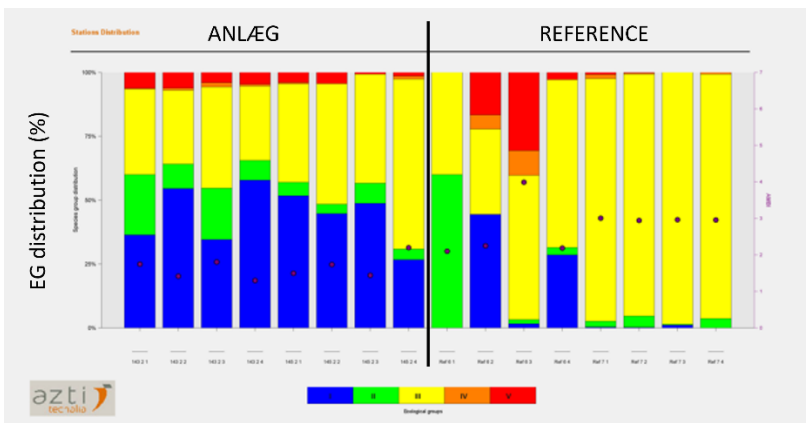
Det er et velkendt fænomen, at muslingeopdræt kan øge biodiversitet, både i forhold til at tilbyde levesteder til organismer på selve muslingekulturen, eller på de opdrætsstrukturer, der er en del af opdrætsanlægget f.eks. betonklodser. Desuden kan tab af muslinger til bunden skabe nye levesteder (McKindsey et al. 2011). En tilsvarende effekt er rapporteret i Storbritannien. I Lyme Bay, i det sydvestlige Storbritannien, blev der etableret en muslingefarm i 2013 med langliner. Muslingefarmen er beliggende i et område af havbunden, der var stærkt forringet på grund af historisk fiskeri med bundslæbende redskaber. Muslingeopdrættet øgede biodiversiteten på bunden både pga. tabte muslinger, og fordi etablering af anlægget lukkede området for fiskeri med bundslæbende redskaber. Efter 2 år kunne der ses spredte forekomster af muslinger og skaller. Dette øgede havbundens strukturelle kompleksitet. Efter 4 år var der en væsentlig større tæthed af mobiltaxa i forhold til de kontrolområder, der forblev åbne for trawlfiskeri. Kommerciel europæisk hummer og taskekrabber blev næsten udelukkende registreret inden for muslingeopdrættet (Bridger et al. 2022). En bundfaunaundersøgelse under et muslingeopdræt i Adriaterhavet viste tilsvarende, at muslingekultur i åbent hav har minimale skadelige virkninger på de

zoobentiske samfund i det vestlige Adriaterhav, som er påvirket af en række andre menneskeskabte pressfaktorer (Fabi et al. 2008).

Et systematisk globalt review af 65 publicerede kilder på opdræt af tang, østers og muslinger vurderer, at muslingeopdræt er mest effektivt til at øge volumen af marint liv med en faktor 3.6 end den volumen af marint liv fundet på referencestationerne. Opdræt af østers blev fundet mest effektiv med en øgning af biodiversitet med 30 % flere arter i østersfarme end på områderne omkring (Theuerkauf et al. 2021)



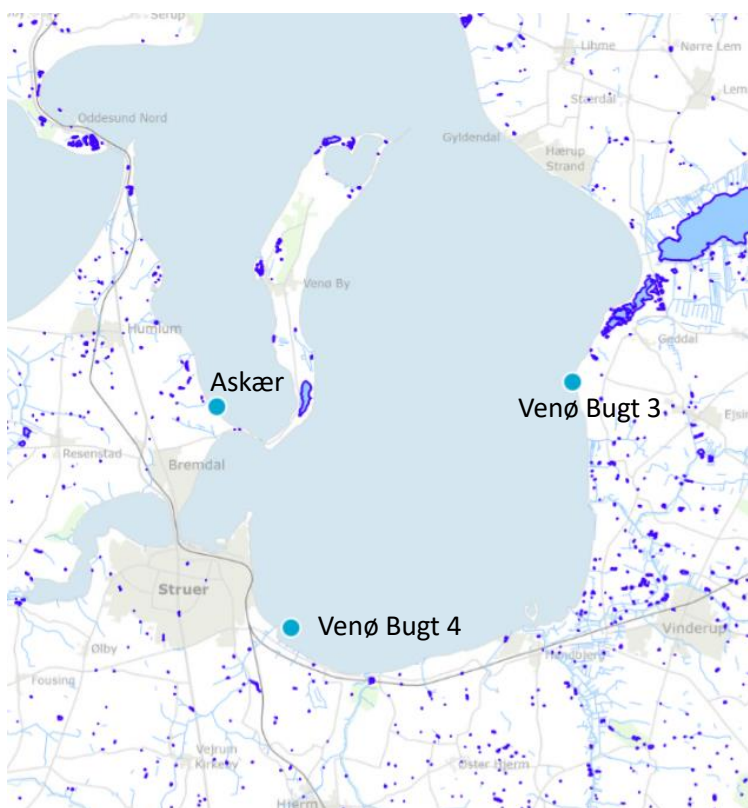
Figur 15. Økologisk status angivet med M-AMBI for bunddyr. M-AMBI er angivet for to reference stationer samt to stationer under muslingeopdrætsanlæg. Middelværdi er angivet for begge områder. Høj værdi angiver god tilstand og lav værdi angiver ringe tilstand.



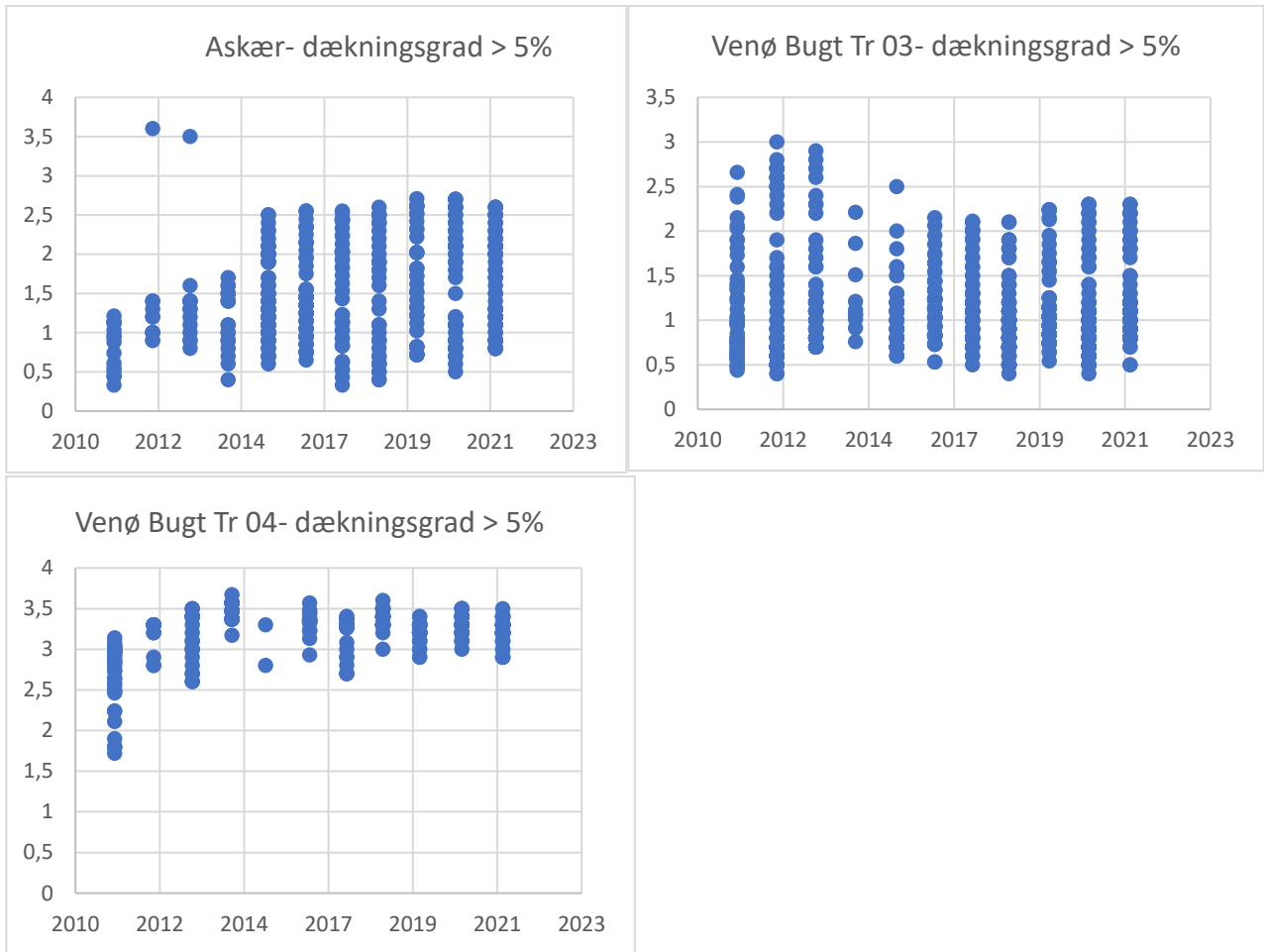
Figur 16. Fordeling af bunddyr på økologiske grupper under muslingeopdrætsanlæg og i referenceområde. Farveskala er angivet for de forskellige økologiske grupper fra 1-5, hvoraf gruppe 1 er mindst stresstolerant og gruppe 5 er mest tolerant overfor stress faktorer som fx næringsberigelse.

6.4 Effekt på Ålegræs

Ved at trække data for dækningsgrad af ålegræs ud for statens monitoring af det marine miljø ([Miljødata \(miljøportal.dk\)](https://miljoedata.miljoportal.dk)) er det muligt at se på dybdeudbredelse af ålegræs i Venø Sund og Venø Bugt. Der er tre stationer i området - en station i den sydlige del af Venø Sund (Askær), et stykke syd for muslingeopdrættene her, og to stationer i Venø Bugt, henholdsvis på vestsiden (Venø Bugt transekt 4) og på østsiden (Venø Bugt transekt 4) (Fig. 17). Udbredelsen af ålegræsset i 2010-2021 viser en markant forbedring i Venø Sund (Askær). I hele perioden er der en stigende dybdeudbredelse, og mellem 2014 og 2015 øges dybdeudbredelsen med ca. 75 cm. Det skal bemærkes, Blå Biomasse A/S muslingeopdræt i Venø Sund først blev etableret i 2016, og at stigningen i dybdeudbredelsen ikke kan forklares med en øget muslingeproduktion. På stationerne i Venø Bugt ses en svagt stigende dybdeudbredelse i perioden fra 2011 til 2014, hvorefter dybdeudbredelsen er konstant, og på østsiden ses et fald i dybdeudbredelsen i starten, hvorefter dybdeudbredelsen er konstant (Se figur 18).



Figur 17. Stationer i Limfjorden med kortlægning af ålegræs dybdeudbredelse.

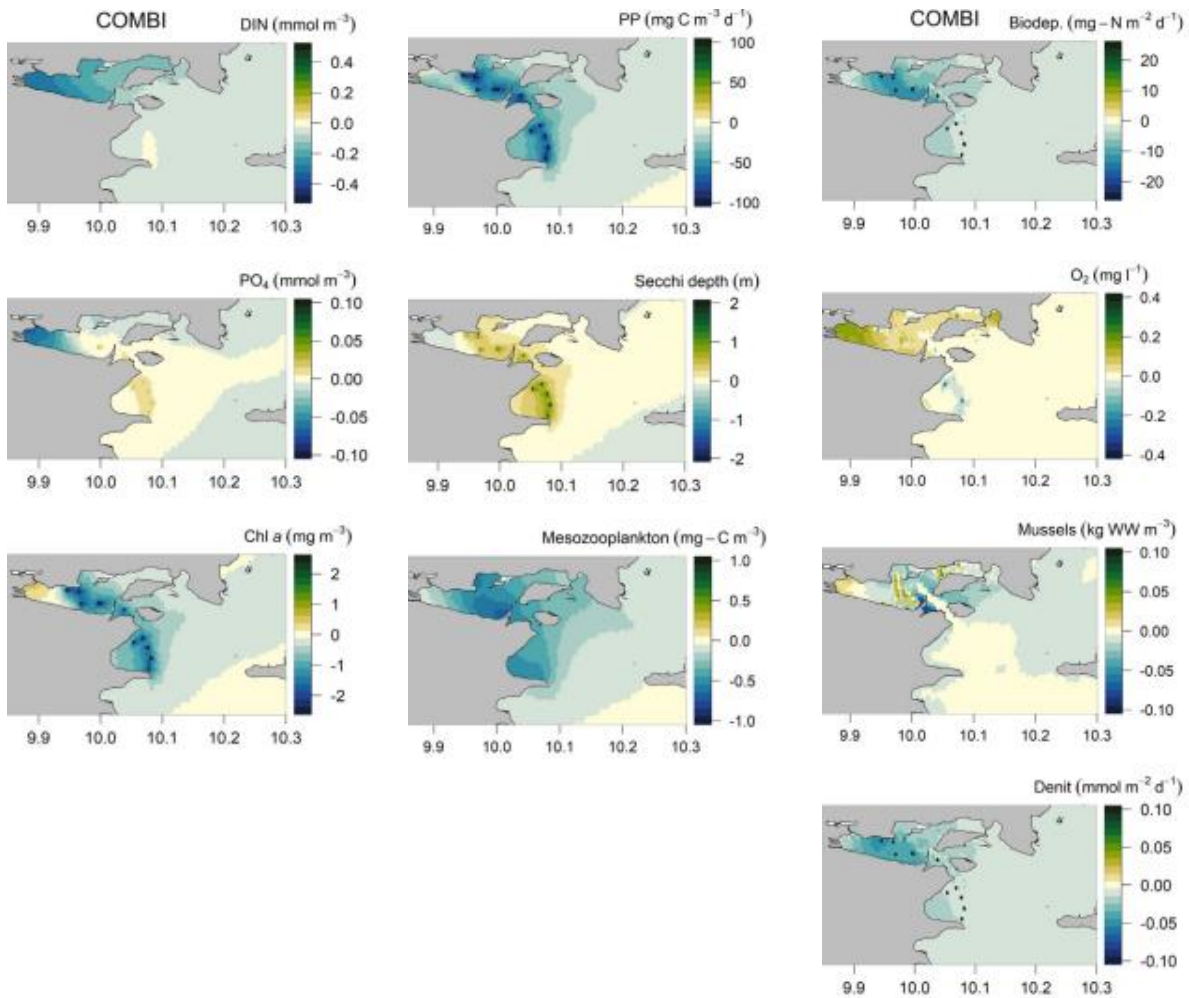


Figur 18 Udbredelsen af ålegræs i Venø Sund og Venø Bugt. Data er fra NOVANA overvågningen og hentet fra miljøportal.dk

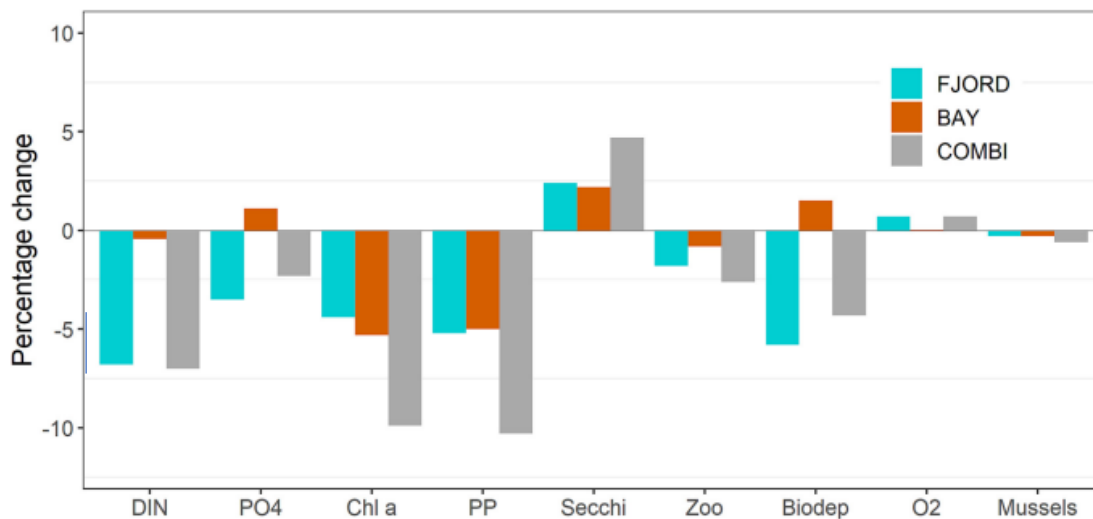
7. Effekten af muslingeopdræt - As Vig

Maar et al. (2023b) har modelleret effekten af muslingeopdræt, med 5 muslingeopdræt placeret inde i Horsens Fjord, og 5 muslingeopdræt placeret i As Vig uden for Horsens Fjord. Desuden er en kombination, med 5 muslingeopdræt i Horsens Fjord og 5 i As Vig, modelleret. Der er i modelleringen antaget en produktion på 560 t muslinger (vådvægt) per år. Denne antagelse er baseret på konkrete biomassemålinger. Ser man udelukkende på modelleringen af 10 muslingeopdræt i Horsens Fjord, og i As Vig, ses en række effekter, hvoraf disse, bortset fra seccidybden er mest tydelig i det mere lukkede system inden i fjorden, hvor vandudskiftningen er mindre (Figur 19). I forhold til forekomst af næringsstoffer (DIN og PO_4) ses der et fald for begge næringsstoffer inde i fjorden, og for PO_4 ses en mindre stigning ude i As Vig. For mængden og produktionen af planteplankton (Chl a og PP) ses en markant reduktion både ned i fjorden og i As Vig. Vandets klarhed stiger i hele området med op til en halv meter, og tæt på muslingeopdræt med op imod en meter. Der ses generelt et fald i mesozooplankton. Biodepositionen falder mest markant inde i fjorden, og her ses ligeledes en stigning i bundvandets iltkoncentration på op til 0,2 mg/l. Yderst i fjorden ses et mindre fald i den naturligt forekommende muslingebestand, og inderst i fjorden ses en øget biomasse af muslinger, som sikkert er koblet til bedre iltforhold. Endelig ses der et fald i denitrifikationen, dvs. havbundens evne til at neutralisere kvælstof som næringsstof. Den største reduktion ses inde i fjorden.

På figur 20 ses, at der sker en procentuel forbedring af økosystemet på bassinniveau på 5-10 % for parametrene næringsstoffer (DIN og PO_4), for forekomst og produktion af planteplankton, og for vandets klarhed. For forekomst af mesozooplankton, biodeposition, for biomassen af muslinger og for iltkoncentration ses en mindre effekt, der dog bidrager til en forbedret tilstand for økosystemet. Kun et mindre fald i biomassen af de vilde muslinger, bidrager ikke til en forbedret tilstand. Det er dog forventeligt, at når der fjernes næringsstoffer og fødepartikler fra et økosystem, så falder biomassen af filtratorer som muslinger.



Figur 19 Effekten af etableringen af 10 muslingeopdræt i Horsens Fjord og i As Vig i forhold til forekomst af næringsstoffer (DIN og PO₄), forekomst af planteplankton (Chl a og primærproduktion (PP)), vandets klarhed (Secchi dybde), forekomst af Mesozooplankton, biodeposition og iltkoncentration på bunden, biomasse ad muslinger på bunden og bundens kapacitet til at omdanne næringsstoffet nitrit til uskadeligt frit kvælstof denitrifikation - Denit) fra Maar et al. 2023b.



Figur 20 Ændring i koncentration af f næringsstoffer (DIN og PO₄), forekomst af planteplankton (Chl a og primærproduktion (PP), vandets klarhed (Secchi dybde), forekomst af Mesozooplankton, biodeposition og iltkoncentration på bunden, og biomasse af muslinger i Horsens Fjord og As Vig ved etablering af 5 muslingopdræt i Horsens Fjord (Blå), As Vig (Rød) eller 5 muslingeopdræt i hver af de to områder (Grå). Fra Maar et al. 2023b.

8. Sammenfatning

Generelt for alle tre fjordtyper, her repræsenteret af Skive Fjord, As Vig og Venø Sund finder ovenstående studier, at muslingeopdræt forbedrer vandets klarhed. Der henvises til reduktioner i klorofylkoncentration helt op til 60-70% i opdrætsanlægget, med et gennemsnit på 14-50 % afhængig af muslingernes filtrationskapacitet og miljøforhold såsom strømforhold, temperatur og klorofylkoncentration (Nielsen et al. 2016, Petersen et al. 2019, Timmermann et al. 2019, Maar et al. 2020). Målinger af sigtedybden i muslinge anlæg viser en forbedring på 0,8-1,1, og helt op til 2,3 m (Maar et al. 2020). Desuden er det også dokumenteret, at øget sedimentation af organisk materiale under opdrætsanlæggene kan medføre en lokal forøget næringsstoffrigivelse (Carlsson et al. 2009, Holmer et al. 2015). En del af N-frigivelse foregår via denitrifikation, hvor der under muslingeopdrætsanlæg er målt forøgede denitrifikationsrater på 25-260% i forhold til uden for opdrætsanlæg i bl.a. Limfjorden og Horsens Fjord (Carlsson et al. 2012, Petersen et al. 2018, Hylén et al. 2020) som følge af biodeposition. Det angives desuden, at der ved høje sedimentationsrater og lave iltkoncentrationer kan ske en reduktion eller ophør af denitrifikation, hvorved ammonium tilbageholdes i systemet (Holmer et al. 2015, Petersen et al. 2018).

Under hver fjordtype er følgende miljøeffekter af muslingeopdræt dokumenteret.

- Skive Fjord: Modelstudier viser, at der ved etablering af muslingeopdræt sker en øget sedimentation i selve opdrætsområdet på op til 14 %, samtidig med, at der på bassinniveau sker en reduktion i sedimentationen på op til 6% (Timmermann et al. 2019). Sediment spredes kun lokalt med op til 100 m. fra opdrætsanlægget (DTU/DHI 2022). Andet modelstudie viser, at der ved opskalering fra 3.808 - 104.156 t muslinger i hele Limfjorden øger iltkoncentrationen i bundvandet med op til 0,5 mg O₂ l⁻¹ i sommerperioden, og en forbedring med ca. 5 % for Skive Fjord (Maar et al. 2023). Samme studie viser, at opskalering af muslingeopdræt øger mængden af bunddyr grundet de bedre iltforhold.
- Venø Sund: Opskalering af muslingeopdræt bidrager til øget iltindhold i bundvandet med op til 0,2 mg O₂ l⁻¹, et fald i mikroalgekoncentration med 1-2 mg Chl. a m⁻³, og et fald i bundlevende muslinger med op til 0,1 kg vådvægt m⁻² grundet mangel på føde. Overordnet var der ved opskalering ingen ændring i koncentrationen af opløst kvælstof og en lille stigning i P-koncentration. Der er i øvrigt dokumenteret øget biodiversitet og mængde af marine organismer under muslingeopdrætsanlæg relativt til referenceområder. Muslingeopdrættet kan virke som et flydende biogent rev og dermed øge biodiversiteten i området. Muslingernes filtration kan ændre sammensætningen af fytoplankton (Taylor et al. 2023 - *submitted*) og tiltrække prædatorer.
- As Vig: Etablering af samlet 10 muslingeopdræt i Horsens Fjord og i As Vig viser en forbedring af økosystemet på bassinniveau på 5-10 % for parametrene næringsstoffer (DIN og PO₄) for forekomst og produktion af planteplankton, og for vandets klarhed. For forekomst af mesozooplankton, biodeposition, for biomassen af muslinger og for iltkoncentration ses en mindre effekt, der dog bidrager til en forbedret tilstand for økosystemet. Kun et mindre fald i biomassen af de vilde muslinger, bidrager ikke til en forbedret tilstand.

9. Referencer

- Bridger, D., Attrill, M.J., Davies, B.F.R., Holmes, L.A., Cartwright, A., Sheehan, E.V. et al. (2022) The restoration potential of offshore mussel farming on degraded seabed habitat. *Aquaculture, Fish and Fisheries*, 2, 437–449. <https://doi.org/10.1002/aff2.77>
- Bruhn A, Flindt MR, Hasler B, Krause-Jensen D, Larsen MM, Maar M, Petersen JK og Timmermann K. 2020. Marine virkemidler – beskrivelse af virkemidlernes effekter og status for vidensgrundlag. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 126. - Videnskabelig rapport nr. 368 <http://dce2.au.dk/pub/SR368.pdf>
- Carlsson MS, Holmer M, Petersen JK (2009). Seasonal and spatial variation of benthic impacts of mussel long-line farming in a eutrophicated Danish fjord, Limfjorden. *J. Shellfish Res.* 28 (4): 791-801. Carlsson MS, Engström P, Lindahl O, Ljungqvist L, Petersen JK, Svanberg L Holmer M (2012) Effects of mussel farms on the benthic nitrogen cycle in the Swedish west coast. *Aquacult. Envir. Interact.* 2: 177-191.
- Fabi, G, Manoukian S, Spagnolo A (2008). Impact of an open-sea suspended mussel culture on microbenthic community (Western Adriatic Sea) *Aquaculture* 289: 54-63
- Filippelli, R., Hasler, B., Termansen, M., Timmermann, K., & Petersen, J. K. (2020). Cost-effectiveness of mussel farming as a water quality improvement measure: Agricultural, environmental and market drivers. *Water Resources and Economics*, 32, [100168]. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2020.100168>
- Holmer M, Thorsen SW, Carlsson MS, Petersen JK (2015) Pelagic and benthic nutrient regeneration processes in mussel cultures (*Mytilus edulis*) in a eutrophic coastal area (Skive Fjord, Denmark). *Estuaries & Coasts* 38 (5): 1629-1641.
- Hylén, A., Taylor, D., Kononets, M., Lindegarth, M., Stedt, A., Bonaglia, S., & Bergström, P. (2021). In situ characterization of benthic fluxes and denitrification efficiency in a newly re-established mussel farm. *Science of the Total Environment*, 782, [146853]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146853>
- Maar M, Taylor D, Darecki M (2020a) D4.1 Maps of particle depletion around different mussel farms (in-situ, satellite, modelling) (M30)-with background and explanatory information. BONUS OPTIMUS report.
- Maar, M., Larsen, J., & Schourup-Kristensen, V. (2023a). Intensified mussel farming; impacts on nutrient budgets and ecology in a eutrophic semi-enclosed fjord system. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 128, e2022JG007312. <https://doi.org/10.1029/2022JG007312>
- Maar, M., Larsen, J., Schourup-Kristensen, V., Taylor, D. Nutrient extraction and ecosystem impact by suspended mussel mitigation cultures at two contrasting sites. *Science of The Total Environment*, 888:
- McKindsey, CW., Archambault, P., Callier MD., Olivier, F. (2011) Influence of suspended and off-bottom mussel culture on the sea bottom and benthic habitats: a review. *Can J Zoology* 89: 622-646
- 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. *Aquacult. Envir. Interact.* 8: 311-329.

Petersen JK, Holmer M, Termansen M, Hasler B (2018) Nutrient extraction through bivalves. In Small AC, Ferreira JG, Grant J, Petersen JK, Strand Ø (eds): Goods and services of marine bivalves. Springer ISBN 978-3-319-96776-9, pp 179-208.

Petersen JK, Loo LO, Taylor D (2019) Evaluating chlorophyll depletion in mitigation mussel cultivation at multiple scales. *Aquaculture Environment Interactions* 11:263-278

Theuerkauf, S. J., Barrett, L. T., Alleway, H. K., Costa-Pierce, B. A., Gelais, A. S., & Jones, R. C. (2021). Habitat value of bivalve shellfish and seaweed aquaculture for fish and invertebrates: Pathways, synthesis and next steps. *Reviews in Aquaculture*, s. 1-19.

Timmermann, K., Maar, M., Bolding, K., Larsen, J., Windolf, J, Nielsen, P., Petersen, J.K. (2019). Mussel Production as a nutrient mitigation tool for improving marine water quality. *Aquacult Environ Interact* 11: 191-204.

Zhong W, Lin J, Zou Q, Wen Y, Yang W and Yang G (2022) Hydrodynamic effects of largescale suspended mussel farms: Field observations and numerical simulations. *Front. Mar. Sci.* 9:973155. doi: 10.3389/fmars.2022.973155