



DYRKNING AF SUKKERTANG SOM MARINT VIRKEMIDDEL I DANMARK

Vidensyntese 2008-2022

Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 575

2024



AARHUS
UNIVERSITET

DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

DYRKNING AF SUKKERTANG SOM MARINT VIRKEMIDDEL I DANMARK

Vidensyntese 2008-2022

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 575

2024

Annette Bruhn^{1,2}

Teis Bøderskov^{1,2}

Mette Møller Nielsen³

Peter Søndergaard Schmedes³

¹Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience

²Aarhus Universitet, Center for Cirkulær Bioøkonomi (CBIO)

³Danmarks Tekniske Universitet, Nationalt Institut for Marine Ressourcer, Dansk Skaldyrcenter



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 575
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Titel: Undertitel:	Dyrkning af sukkertang som marint virkemiddel i Danmark Vidensyntese 2008-2022
Forfatter(e):	Annette Bruhn ^{1,2} , Teis Boderskov ^{1,2} , Mette Møller Nielsen ³ & Peter Søndergaard Schmedes ³
Institution(er):	¹ Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience, ² Aarhus Universitet, Center for Cirkulær Bioøkonomi (CBIO), ³ Danmarks Tekniske Universitet, Nationalt Institut for Marine Ressourcer, Dansk Skaldyrcenter
Udgiver: URL:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi © https://dce.au.dk
Udgivelsesår: Redaktion afsluttet:	Marts 2024 16. april 2024
Faglig kommentering: Kvalitetssikring, DCE: Sproglig kvalitetssikring:	Michael Bo Rasmussen Anja Skjoldborg Hansen Else Vihlborg Staalsen
Ekstern kommentering:	Miljøstyrelsen. Kommentarerne findes her: https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Videnskabelige_rapporter_500-599/KommentarerSR/SR575_komm.pdf
Finansiel støtte:	Miljøstyrelsen
Bedes citeret:	Bruhn, A., Boderskov, T., Nielsen, M.M. & Schmedes, P.S. 2024. Dyrkning af sukkertang som marint virkemiddel i Danmark. Vidensyntese 2008-2022. En delrapport i projekt om udviklingsinitiativer for marine virkemidler. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 33 s. - Videnskabelig rapport nr. 575
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Dyrkning af sukkertang kan anvendes som marint virkemiddel til optag og fjernelse af næringsstoffer fra havmiljøet. I Danmark er sukkertang blevet dyrket i kystnære systemer siden 2008 af både kommercielle firmaer og forskningsinstitutioner. Der foreligger især publiceret viden og erfaringer fra Limfjorden, Horsens Fjord og Kattegat. Siden 2012 er rapporteret virkemiddelpotentialer fra 0,1 til 16 g kvælstof og 0,01 til 1,6 g fosfor/m line/år, hvilket er sammenligneligt med data fra Sverige og USA. Både den rapporterede arealmæssige effektivitet og effekter på det omgivende marine miljø er opskaleret fra mindre forsøg og anlæg, og beror på antagelse omkring aktuelle biomasse udbytter og tæthed af liner i et fremtidigt storskala anlæg. Der eksisterer således videnshuller både omkring potentialet for teknologiudvikling og konsekvenser heraf for både udbytter, virkemiddelpotentialer og økonomi, og omkring effekter af dyrkning i stor skala på det marine miljø – særligt med fokus på hydrologi, sedimentationsmønstre, kulstofkredsløbet og biodiversitet.
Emneord:	Marine virkemidler, sukkertang, akvakultur, Danmark, udbytte, virkemiddelpotentialer
Illustrationer:	Figur 1: Isa Calmar. Figur 2: Zhang m.fl., 2022. Figur 3, 5, 6: Tinna Christensen. Figur 4: Petersen m.fl. 2021. Figur 7: van Duinen m.fl. 2023.
Foto forside:	Teis Boderskov
ISBN: ISSN (elektronisk):	978-87-7156-818-9 2244-9981
Sideantal:	33

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
Summary	7
1 Sukkertang – livscyklus og vækst	8
2 Produktion af sukkertang i Europa og Danmark	13
3 Virkemiddelpotentiale ved dyrkning af sukkertang	18
4 Økosystem tjenester ved dyrkning af sukkertang	21
4.1 Klimæffekter	21
4.2 Tangdyrkning og biodiversitet	24
5 Videnshuller	26
6 Referencer	27
7 Appendix 1. Model for vækst af tang (L2.5)	33
Udviklingsinitiativ for Marine Virkemidler	Fejl! Bogmærke er ikke defineret.

Forord

Formålet med denne vidensyntese (2008-2022) er at opsummere eksisterende viden og erfaring forud for forsøg iværksat i forbindelse med forskningsprojektet vedrørende dyrkning af sukkertang i Danmark (metoder, vækstrater, biomasse-udbytte, virkemiddeleffekt mm) samt associerede økosystemtjenester ved dyrkning af sukkertang i danske farvande. I vidensyntesen er inddraget publiceret viden og erfaringer fra national og international dyrkning af sukkertang via litteraturgennemgang. Sammenfatning af publiceret kvantitativ viden om procesrater, som ligger til grund for modelleringen af vækst og virkemiddeleffekt indgår som appendix.

Denne vidensyntese opsummerer således den viden der forelå omkring dyrkning af sukkertang som marint virkemiddel forud for forskningsprojektet "Udviklingsinitiativer for marine virkemidler", der er besluttet og finansieret af Aftale om grøn omstilling af dansk landbrug fra 2021 og udmøntet via Miljøstyrelsen. Projektet skal danne grundlag for beslutning om, og i givet fald hvordan de marine virkemidler "reetablering af ålegræs" og "dyrkning af tang" kan anvendes i vandplanlægningen til at opsamle næringsstoffer og/eller opnå andre positive miljøeffekter, som kan bidrage til hurtigere opnåelse af god økologisk tilstand i danske kystvandområder i overensstemmelse med vandrammedirektivet.

Forskningsprojektet og nærværende vidensyntese er ledet af DTU Aqua og udført i samarbejde med Syddansk Universitet (SDU), Københavns Universitet (KU), Aarhus Universitet (AU) og DHI. Notatet er en del af rapportserien "Udviklingsinitiativer for marine virkemidler", som ialt omfatter:

- En kort synteserapport
- En dybdegående projektsynteserapport,
- Vidensyntese om ålegræstransplantering
- Vidensyntese om tangdyrkning (dette notat),
- Rapporten "Muligheder for at indregne marine virkemidler i den nationale drivhusgasopgørelse"
- Rapporten "Retlige rammer for marine virkemidler og marin natur"
- Arbejdspakkerapporter med videnskabelig dokumentation for resultaterne fra hver af projektets centrale faglige arbejdspakker.

Miljøstyrelsen har haft rapportudkast til kommentering undervejs i projektgruppens arbejde, men valg af metoder og konklusioner er alene projektgruppens ansvar

Sammenfatning

Dyrkning af sukkertang kan anvendes som marint virkemiddel til optag og fjernelse af næringsstoffer fra havmiljøet, idet sukkertang under væksten i havet optager næringsstoffer fra det omgivende havvand. Næringsstofferne fjernes fra havmiljøet, når tangen høstes. I Danmark er sukkertang blevet dyrket i kystnære systemer siden 2008 af både kommercielle firmaer og forskningsinstitutioner. Der foreligger især publiceret viden og erfaringer fra Limfjorden, Horsens Fjord og Kattegat. Siden 2012 er der rapporteret virkemiddelpotentialer fra 0,3 til 16 g kvælstof pr. m line pr. år og 0,001 til 1,6 g fosfor pr. m line pr. år, hvilket er sammenligneligt med data fra Sverige og USA, hvor sukkertangs evne til at optage næringsstoffer ligeledes er vurderet. Den rapporterede arealmæssige effektivitet er teoretisk opskaleret fra mindre forsøg og anlæg og beror på antagelse omkring aktuelle biomasseudbytter og tæthed af liner i et fremtidigt storskala-anlæg. Dyrkning af sukkertang er en teknologi i udvikling, og derfor må det forventes, at teknologi og udbytter vil optimeres inden for de kommende år med øget virkemiddelpotentiale til følge. Således mangler man viden om potentialet for teknologiudvikling og konsekvenser heraf for både udbytter, virkemiddelpotentialer og økonomi.

Effekten på det omgivende miljø af dyrkning af sukkertang i Danmark er hidtil vurderet ud fra forsøg i mindre skala, og kan derfor ikke forventes at afspejle den fulde effekt af en produktion i stor skala. Derfor eksisterer der videnskabelig viden omkring effekter af dyrkning i stor skala på det marine miljø – særligt med fokus på hydrologi, sedimentationsmønstre, biodiversitet og kulstofkredsløbet.

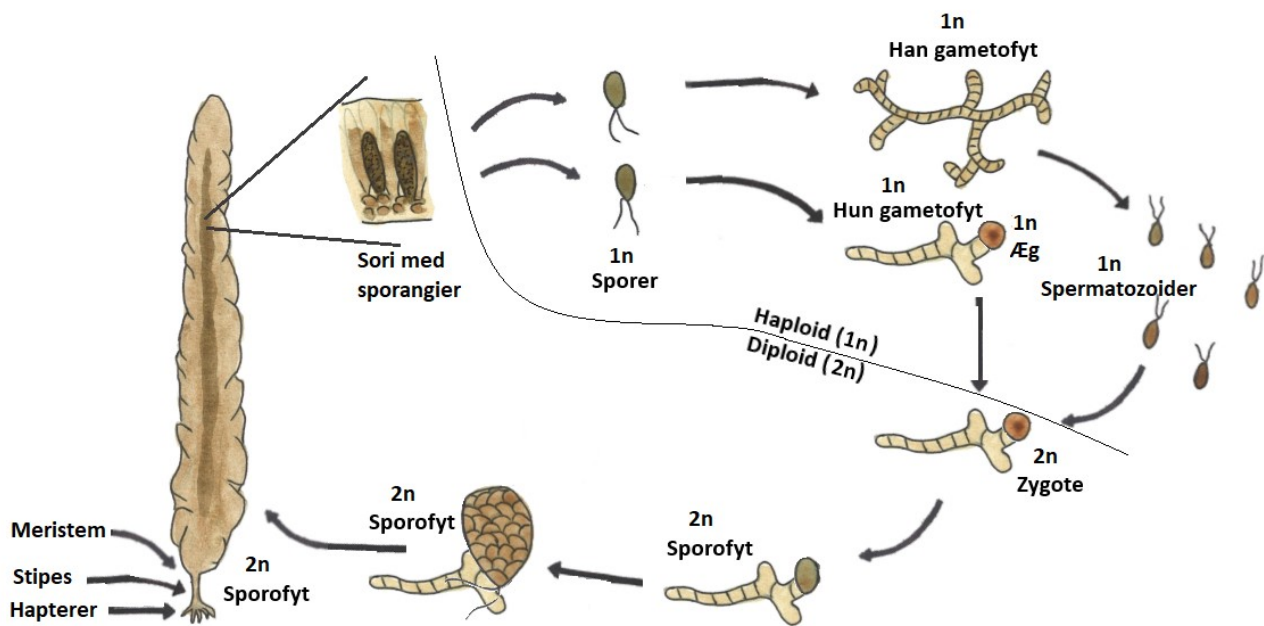
Summary

Cultivation of sugar kelp can be used as a marine tool for the absorption and removal of nutrients from the marine environment, as sugar kelp absorbs nutrients from the surrounding sea water during its growth in the sea water. The nutrients are removed from the marine environment when the kelp is harvested. In Denmark, sugar kelp has been cultivated in coastal systems since 2008, both by commercial companies and research institutions. In particular, publications on knowledge and experience from the Limfjord, Horsens Fjord and Kattegat have been published. Since 2012, effects from 0.1 to 16 g nitrogen and 0.01 to 1.6 g phosphorus per m of line per year have been reported, which is comparable to data published from Sweden and the USA. The reported spatial efficiencies are theoretically upscaled from small-scale experiments and seaweed farms and are thus based on assumptions about current biomass yields and the potential density of lines in a future large-scale cultivation facility. The cultivation of sugar kelp is an evolving technology, and it is therefore to be expected that the technology and yields will be optimised in the coming years with increased biomass and nutrient extraction potential as a result. At present, knowledge is lacking about the potential of technology development and its consequences for both biomass and nutrient extraction potentials and economy.

The effect of cultivation of sugar kelp in Denmark on the surrounding marine environment has also so far been assessed on the basis of small-scale experiments and can therefore not be expected to reflect the full effect of a large-scale production. Thus, knowledge gaps exist concerning the effects of large-scale cultivation on the marine environment – in particular regarding hydrology, sedimentation patterns, biodiversity and the carbon cycle.

1 Sukkertang – livscyklus og vækst

Sukkertang (*Saccharina latissima*) er en hjemmehørende flerårig brunalge, der tilhører familien af bladtang eller havskræpper (*Laminariaceae*). Sukkertang vokser i samtlige danske marine vandområder (Nielsen m.fl, 2022), men trives bedst i farvande, hvor vandets saltholdighed (salinitet) er over eller omkring 20 psu. Et sukkertang-individ består af en bladplade, der kan blive op til 3 m lang, en "stilk" (stipes) og en "hæftklo" (hapter), som holder tangplanten fast på underlaget, som udgøres af sten i naturlige tangskove, og liner eller net i akvakultur (figur 1.1).



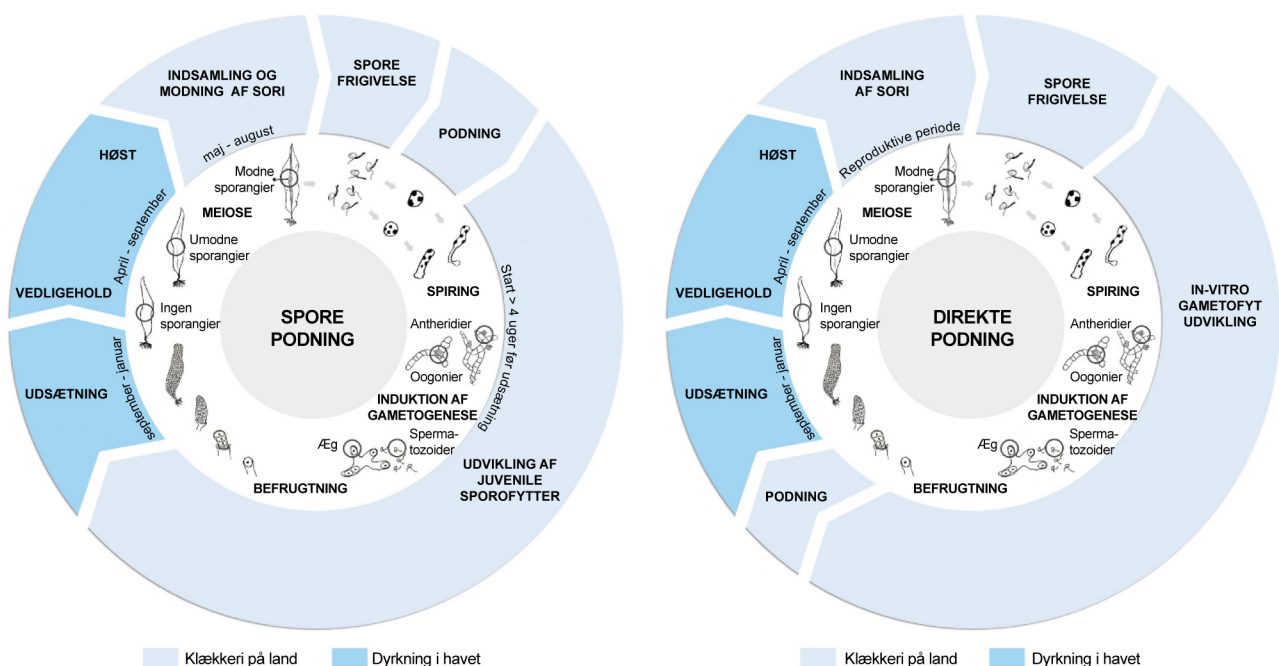
Figur 1.2. Sukkertang med bladplade, vækstpunkt (meristem), stilk (stipes) og hæftklo (hapterer). På bladpladen ses sori, hvor sporerne udvikles i sporangier (Tegning af Isa Calmar).

Sukkertang vokser fra et vækstpunkt (meristemet), som findes basalt på bladpladen umiddelbart over stipes. Den naturlige vækstdynamik for sukkertang er, at tangens bladplade og biomasse vokser fra meristemet gennem hele året, men mest i vinter- og forårsperioden. Den over sommeren stagnerer længdevæksten fra meristemet, og der sker et tiltagende tab af materiale distalt fra bladpladen, idet bladet slides i spidsen (Nielsen m.fl. 2014; Fieler m.fl. 2021). I perioden med stagneret længdevækst lagres sukkerstoffer i bladets væv, og disse bruges så til at opretholde vækst og optage næringsstoffer i efterårs- og vintermånedene, hvilket herefter understøtter den primære vækst, der foregår forår/tidlig sommer (Parke 1948).

Sukkertang har en heteromorf haplodiplont livsstrategi. Det betyder, at tangen har to forskellige livsstadier: Den sukkertang, som vi ser, er sporofyten, som er diploid (har to kromosomsæt). I bladet på sporofyten dannes "sori", som er mørke plamager i vævet, hvori haploide (ét kromosomsæt) sporer dannes og modnes i sporangier (figur 1.3). Sporerne frigives til det omgivende vand, hæfter sig til fast substrat og spirer til mikroskopiske tråde, som er enten hanner eller hunner. Dette er gametofyten. Fra gametofytterne produceres enten ægceller eller spermatozoider. Den befrugtede ægcelle spirer og udvikles til en ny sporofyt. Sukkertang er primært fertil med sori fra

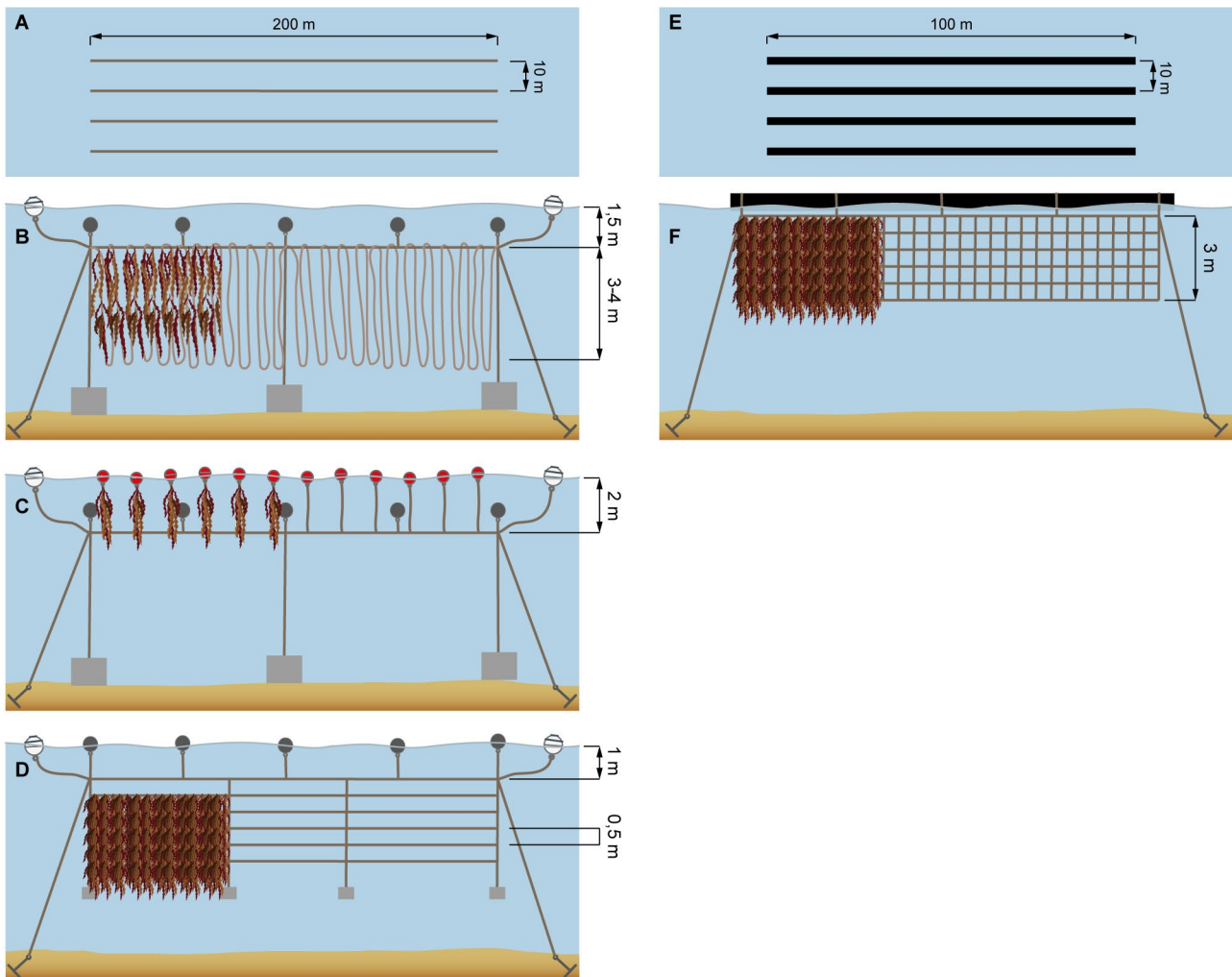
oktober til marts, men kan induceres til dannelse af sori under bestemte vækstbetingelser (Boderskov m.fl. 2021b).

Ved dyrkning af sukkertang udnytter man enten sukkertangens sporer eller en kultur af gametofytter, som begge kan podes på dyrkningsstrukturer (liner eller net) (Boderskov m.fl. 2021a; Boderskov m.fl. 2021b). På linerne fortsætter sporer eller gametofytter deres livscyklus, og udvikler sig i sidste ende til sporofytter, som vokser sig store og høstes. De podede liner kan enten "forspires" på land under kontrollerede forhold eller udsættes direkte i havet. I figur 1.2 er vist to varianter: i panelet til venstre ses en produktionscyklus for sporepodning kombineret med forspiring på land, men i panelet til højre er vist en produktionscyklus for podning med gametofytkultur kombineret med direkte udsætning i havet efter podning.



Figur 1.2. To eksempler på sukkertangs livscyklus og produktionscyklus ved såning med sporer og forspiring i klækkeri ("Spore podning" til venstre) og som såning med gametofytter og direkte udsætning i havet ("direkte podning" til højre) (Zhang m.fl. 2022).

I danske farvande har brug af forspirede liner poded med sporer hidtil givet de bedste resultater (Boderskov m.fl. 2021a). I Danmark er testet flere forskellige metoder til at udsætte og øge tætheden af spireliner på hovedliner – enten vandret i ét eller flere lag, eller i "loops", hvor både loops og vandrette liner i flere lag giver en øget tæthed af spireliner i et område, og herved et potentielt højere arealudbytte (figur 1.3).



Figur 1.3. Forskellige design af dyrkningssystemer til sukkertang på langliner. A) et langline-system set oppefra, B) liner monteret i "loops", C) liner monteret vertikalt som "poppers", når linerne går fra hovedline mod overfladen (som vist her) eller "drop-pers", når linerne går fra overfladen mod bunden (ikke vist), D) liner monteret horisontalt, her i 5 lag, E) et netsystem (SMART farm system) set oppefra, F) net-system med tang set fra siden (Bruhn m.fl. 2020. Boderskov m.fl. 2023).

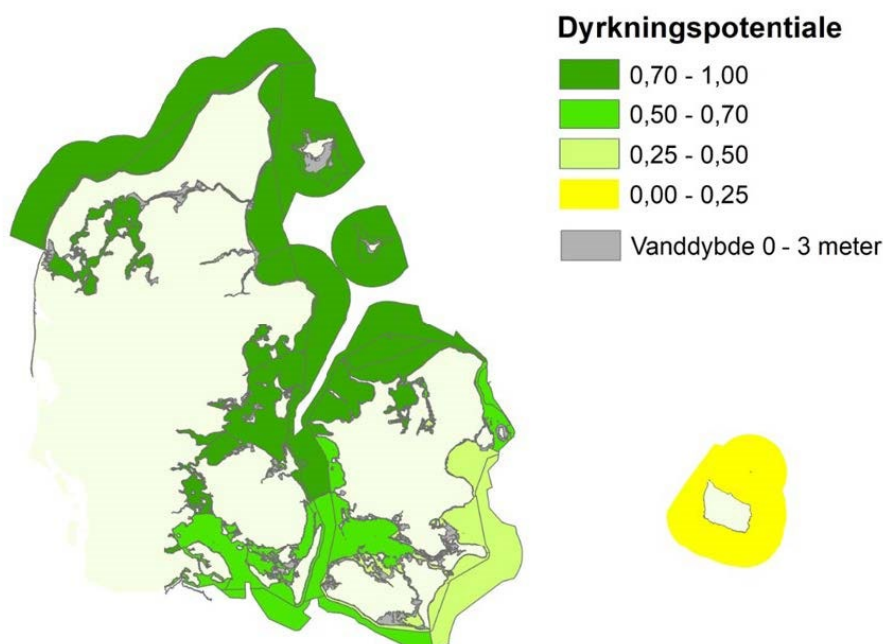
De podede liner udsættes i efteråret, hvor risikoen for høje temperaturer og begroning (biofouling) med andre organismer er mindst. Biofouling omfatter særligt fritsvømmende larvestadier af filtrerende organismer, bl.a. muslinger, søpunge, rurer og mosdyr, men også andre tangarter, som fx fedtemøg. Sukkertangen høstes typisk det efterfølgende forår, og også her er det biofouling, der sætter grænsen for, hvornår tangen skal høstes. Venter man for længe, vil tangen ikke længere være fri for begroning og vil derfor ikke kunne anvendes til foder eller fødevarer. Idet man således høster tangen, før den potentielt maksimale biomasse er opnået, opstår et trade-off mellem maksimal biomasse og kvaliteten af den høstede biomasse (Boderskov m.fl. 2021a; Boderskov m.fl. 2023; Marinho m.fl. 2015; Bruhn m.fl. 2016). Det er dokumenteret, at virkemiddeleffekten kan øges, ved senere høst af tang med biofouling (Marinho m.fl, 2015). Men dels kan biofoulingen blive så tung, at den trækker tangen af linerne med helt eller delvist tab af biomasse (og virkemiddeleffekt) til følge, dels vil en begroet tangbiomasse ikke kunne sælges til foder eller fødevarer, og økonomien (omkostningseffektiviteten) vil blive negativt påvirket.

Vækst og udbytte af sukkertang afhænger af flere fysiske, kemiske og biologiske parametre som beskrevet i Petersen m.fl. (2021b). Lys, som er nødvendig for fotosyntese, er den primære kontrollerende faktor for vækst af sukkertang. Tilgængeligheden af lys for den enkelte plante reduceres både med dybde og

tæthed af sukkertangen, som afhænger både af såningen på substratet, substrattype og substraters indbyrdes placering i anlægget. Væksten for sukkertang er mættet omkring $60\text{-}70 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$, og lyskompensationspunktet er mellem $2\text{-}20 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Bartsch m.fl. 2008; Fortes and Luning 1980). Derfor er sukkertangs vækst begrænset af lys under $60\text{-}70 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$, og ved lys under $20 \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$, vil væksten af sukkertang være kraftigt reduceret/ophøre. Sukkertang vokser fastsiddende på sten på lavt vand, men findes på dybder fra 0-21 m i danske farvande (Nielsen m.fl. 2022). Generelt forventes sukkertang at kunne dyrkes med optimalt udbytte i alle vandområder med tilstrækkelig saltholdighed ned til ca. 3 m dybde, hvor lys begynder at blive en begrænsende faktor, og i åbne vandområder med høj sigtbarhed ned til ca. 5 m dybde (Schmedes and Boderskov 2013). I Limfjorden og andre fjordområder, hvor sigten er forringet, kan optimalt udbytte kun forventes i det øverste vandlag ned til 1-2 m dybde (Bruhn m.fl. 2016).

Salinitet er også en væsentlig styrende faktor for vækst. Sukkertang vokser optimalt ved saltholdigheder over 25 PSU. Væksten reduceres gradvist ved lavere saltholdigheder, og ved saltholdigheder under 16 PSU antages væksten at være reduceret til under 50 % af den optimale vækst (Broch m.fl. 2019). Det betyder, at danske farvande med lav salinitet er mindre velegnede til dyrkning af sukkertang (figur 1.4).

Figur 1.4. Danske vandområder med angivelse af produktionspotentialet for sukkertang på en skala fra 0-1, svarende til 0-100 % af det maksimale potentiale. Vanddybder fra 0-3 m er ikke inkluderet (grå), da de skønnes at være for lavvandede til produktion i større skala. Produktionspotentialet er beregnet på baggrund af de enkelte vandområders salinitet. En mere omfattende modellering af fjernelsespotentialet for kvælstof og fosfor er under udarbejdelse (Petersen m.fl. 2021).



Der er udviklet modeller for vækst og produktivitet af sukkertang (Broch m.fl. 2019; Broch and Slagstad 2012; Venolia m.fl. 2020) og en specifik model for danske farvande til fremskrivning af vækst og produktivitet af sukkertang er under færdiggørelse (Boderskov m.fl. 2022), bl.a. med henblik på implementering i rumlige modelleringsværktøjer som fx FLEXSEM og MIKE, som kan anvendes til at estimere potentialer for vækst og virkemiddeleffekt i forskellige vandområder (Larsen m.fl. 2020).

Vækst og biofouling er afgørende for kvantitet og kvalitet af høstudbyttet af sukkertang (Boderskov m.fl. 2021a; Bruhn m.fl. 2016; Forbord m.fl. 2020).

Foruden lys er tilgængeligheden af makronæringsstoffer, kvælstof (N) og fosfor (P), i vækstperioden er typisk begrænsende for produktionens størrelse i de enkelte vandområder og påvirker derfor de modelberegnedes dyrkningspotentialer væsentligt. Typiske næringsstofkoncentrationer i danske farvande er ikke begrænsende for selve muligheden for tangdyrkning, idet sukkertang kan vokse i både eutrofe og oligotrofe miljøer (Marinho m.fl. 2015; Boderskov m.fl. 2021a; Boderskov m.fl. 2023; Bruhn m.fl. 2016). Dog har områder med relativt høje næringsstofkoncentrationer højere forekomst af filtrerende organismer og andre opportunistiske tangarter (epifytter), der kan slå sig ned på tangen og give begroning (biofouling). Begyndende begroning med epifytter og filtrerende organismer, kan nødvendiggøre høst af biomassen flere måneder før den maksimale potentielle biomasse er opnået (Bruhn m.fl., 2016. Boderskov m.fl., 2021). Begroning kan øge virkemiddeleffektiviteten fordi selve biofoulingen også indeholder kvælstof og fosfor (Marinho m.fl. 2015), men som tidligere nævnt kan begroning reducere kvaliteten og dermed markedsværdien af biomassen til fx. fødevarer og foder. I værste fald kan begroningen blive så tung, at den trækker tangen af linerne med helt eller delvist tab af biomasse (og virkemiddelpotentiale) til følge.

2 Produktion af sukkertang i Europa og Danmark

Den globale akvakulturproduktion af tang er steget siden 1950'erne og lå i 2019 på ca. 36 millioner tons frisk tang (våd vægt (VV)) pr. år (Cai and Galli 2021). Asien, med Kina i spidsen, står for langt størstedelen af produktionen, mens tangproduktionen i Europa udgør under 1 % af den samlede globale produktion af tang. I modsætning til resten af verden produceres størstedelen af den europæiske tang ved høst af vilde tangskove, og ser man på produktionen af store brunalger (*Laminaria/Saccharina* arter) produceres kun 0,25 % af den samlede europæiske produktion ved dyrkning (Cai and Galli 2021). Sukkertang (*Saccharina latissima*) er den tang-art, der dyrkes mest i Europa, hvor produktionen i 2019 er opgivet til mellem 229 og 376 ton VV/år (Cai and Galli 2021; Araújo m.fl. 2021). Norge og Færøerne er de største producenter af sukkertang i Europa med henholdsvis 248 og 75 ton VV/år i 2020 (FAO, fish stat, 2022).

I Danmark er sukkertang også den mest dyrkede art. Der findes pt. tre kommercielle producenter (Dansk Tang, Aurelis og Kerteminde Seafarm), flere forsøgsanlæg tilknyttet vidensinstitutioner og projektsamarbejder (Danmarks Tekniske Universitet, Aarhus Universitet og Blå Biomasse A/S) (Petersen m.fl. 2021a) og et netværk af maritime haver spredt over hele landet organiseret under Havhøst (<https://www.havhøst.dk/>). Det hidtil største danske kommercielle anlæg til økologisk dyrkning af sukkertang blev lukket i 2021. Anlægget blev ejet og drevet af Hjarnø Havbrug i Horsens Fjord siden 2012. Forskningsprojekter udført på dette anlæg ligger til grund for en stor del af den eksisterende viden om potentialet for produktion og virkemiddeleffekt af sukkertang i Danmark (Marinho m.fl. 2015; Boderskov m.fl. 2021a; Boderskov m.fl. 2023; Zhang m.fl. 2022). Herudover bidrager resultater fra dyrkning på forskningsanlæg i Limfjorden (DTU Aqua, Dansk Skaldyrcenter) og i Kattegat (Aarhus Universitet, AlgeCenter Danmark) til den samlede viden om dyrkning af sukkertang i Danmark (Nielsen m.fl. 2015. Boderskov m.fl. 2021a) (figur 2.1. Tabel 2.1, Tabel 2.2).

Table 2.1. Oversigt over publicerede data for produktion og virkemiddelpotentiale for sukkertang i Danmark indtil 2022. Oversigten adskiller sig fra tidligere oversigter ved at antage en tæthed af liner i dyrkningsområdet på 1000 m line pr. hektar.

Lokalitet	Høst (måned, år)	Vækst- periode (måned)	Skala	Datakilde	Udbytte	Udbytte	Udbytte ved	TS	N	P	C	N effekt	N effekt	P effekt	P effekt	Reference
					(kg VV/m line)	(g TS/m line)	(ton VV/ha 1000 m line/ha)	(% af VV)	(% af TS)	(% af TS)	(% af TS)	(g N/m)	(kg N/ha)	(g P/m)	(kg P/ha)	
Limfjorden	April 2012	4	Få liner	De lokale dyder	0,51	56,10	0,51	11,00	3,40	0,10	28,00	1,91	1,91	0,06	0,06	Bruhn m. fl., 2016
Limfjorden	Maj 2013	8	2 km spireline	MAB3	1,20	136,80	1,20	11,40	3,31	0,16		4,53	4,53	0,22	0,22	Nielsen 2015
Limfjorden	Maj 2014	7	Få liner	MAB3	0,60	81,60	0,60	13,60	5,11	0,34		4,17	4,17	0,28	0,28	Nielsen 2015
Limfjorden	April 2015	7	Få liner	MAB3	1,90	176,70	1,90	9,30	5,94	0,10		10,50	10,50	0,18	0,18	Nielsen 2015
Limfjorden	Maj 2018	8	Få liner	Macrofuels/MAB4/tang.nu	1,60	184,00	1,60	11,50	4,65	0,07	28,80	8,56	8,56	0,13	0,13	Boderskov m.fl., 2021
Limfjorden	Maj 2018	7	Få liner	Macrofuels/MAB4/tang.nu	0,70	73,68	0,70	10,53	4,58	0,10		3,37	3,37	0,07	0,07	Boderskov m.fl., 2021
Limfjorden	Maj 2018	6	Få liner	Macrofuels/MAB4/tang.nu	0,21	23,51	0,21	11,20	4,56	0,11		1,07	1,07	0,03	0,03	Boderskov m.fl., 2021
Limfjorden	Juni 2018	7	Få liner	Macrofuels/MAB4/tang.nu				14,10	2,60	0,13	27,90					Boderskov m.fl., 2021
Horsens Fjord	September 2013	8	Medium	KOMBI	1,30	287,30	1,30	22,10	2,30	0,10		6,61	6,61	0,29	0,29	Marinho m.fl. 2015 a og b
Horsens Fjord	Maj 2014	16	Medium	KOMBI	3,00		3,00	ND	1,20	0,25		5,80				Marinho m.fl. 2015
Horsens Fjord	Juli 2016	18	Medium	Hjarnø Havbrug	2,55	344,25	2,55	13,50	2,00	0,31	28,80	6,89	6,89	1,07	1,07	Zhang m. fl. 2022
Horsens Fjord	Juni 2018	9	Stor skala	Økotang/Hjarnø Havbrug	1,00	189,00	1,00	18,90	0,73	0,13	35,10	1,38	1,38	0,24	0,24	Boderskov m.fl., 2021
Horsens Fjord	April 2020	6	Stor skala	Økotang/Hjarnø Havbrug	3,67	297,27	3,67	8,10	2,10	0,18	32,20	6,24	6,24	0,54	0,54	Zhang m. fl. 2022
Kattegat, Grenå	Juni 2018	7	Få liner	Macrofuels/MAB4/tang.nu	1,00	250,21	1,00	25,02	0,55	0,11	35,50	1,37	1,37	0,27	0,27	Boderskov m.fl., 2021
Kattegat, Grenå	Juni 2019	7	Få liner	Macrofuels/MAB4/tang.nu	2,36	682,04	2,36	28,90	0,70	0,11	40,40	4,77	4,77	0,75	0,75	Zhang m. fl. 2022
Horsens Fjord	May 2019	5	Stor skala	Økotang/Hjarnø Havbrug	1,47	256,07	1,47	17,42	0,53		37,10	1,36	1,36	0,00	0,00	Boderskov m. fl. 2023
Horsens Fjord	May 2019	3	Stor skala	Økotang/Hjarnø Havbrug	0,38	59,01	0,38	15,53	0,49		34,90	0,29	0,29	0,00	0,00	Boderskov m. fl. 2023
Horsens Fjord	October 2019	8	Stor skala	Økotang/Hjarnø Havbrug	0,58	82,01	0,58	14,14	2,55		27,90	2,09	2,09	0,00	0,00	Boderskov m. fl. 2023
Horsens Fjord	June 2020	20	Stor skala	Økotang/Hjarnø Havbrug	7,36	1076,77	7,36	14,63	1,52	0,15	36,50	16,37	16,37	1,62	1,62	Boderskov m. fl. 2023
Horsens Fjord	June 2020	16	Stor skala	Økotang/Hjarnø Havbrug	6,17	964,37	6,17	15,63	1,53	0,14	34,70	14,75	14,75	1,35	1,35	Boderskov m. fl. 2023
Horsens Fjord	June 2020	8	Stor skala	Økotang/Hjarnø Havbrug	5,00	751,50	5,00	15,03	1,22	0,12	37,50	9,17	9,17	0,90	0,90	Boderskov m. fl. 2023
	Gennemsnit				2,13	314,33	2,13	15,08	2,46	0,15	33,24	5,56	5,27	0,40	0,40	
	Standardafvigelse (SD)				2,00	316,69	2,00	5,27	1,69	0,08	4,24	4,50	4,67	0,48	0,48	

Tabel 2.2. Oversigt over projekter, der har bidraget til viden om produktion og virkemiddelpotentiale af sukkertang i Danmark indtil 2022 med angivelse af projektnavn, projektperiode, bevillingsgiver (fond), bevillingshaver og havområder og anlæg med dyrkning af sukkertang i det specifikke projekt (AU= Aarhus Universitet. DTU = Danmarks Tekniske Universitet).

Projekt	Periode	Fond	Bevillingshaver	Områder
De lokale dyder	2011-2012	Fornyelsesfonden og Vækstforum Region Nordjylland	DTU Aqua	Limfjorden Enkelte liner på muslinge anlæg i Oddesund, Lysen Bredning, Færker Vig, Riisgaarde Bredning og Fur Sund.
MAB3, The Macroalgae Biorefinery	2012-2016	Det strategiske forskningsråd	Teknologisk Institut	Limfjorden, Færker Vig DTU-test anlæg)
KOMBI-opdræt. Kombinationsopdræt af havbrugsfisk, tang og muslinger til foder og konsum	2013-2016	Grønt Udviklings og Demonstrations Program (GUDP)	Hjarnø Havbrug	Horsens Fjord
MAB4, Makroalge bioraffinering til højværdiprodukter	2016-2020	Innovationsfonden	Teknologisk Institut	Limfjorden Færker Vig DTU-test anlæg) Kattegat (Karlby Klint. AU-test anlæg)
Macrofuels	2016-2019	EU Horizon 2020	Teknologisk Institut	Limfjorden Færker Vig DTU-test anlæg) Kattegat (Karlby Klint. AU-test anlæg)
Tang.nu	2017-2020	VILLUM FONDEN OG VELUX FONDEN	Aarhus Universitet	Kattegat (Karlby Klint. AU test anlæg), Limfjorden Færker Vig DTU test anlæg) Horsens Fjord (Hjarnø Havbrug)
Økotang/Hjarnø Havbrug	2017-2020	Innovationsfonden	Aarhus Universitet	Horsens Fjord (Hjarnø Havbrug)

Figur 2.1. Dyrkning af sukkertang i Danmark er primært dokumenteret i Horsens Fjord, Limfjorden og Kattegat.



Udbyttet af sukkertang rapporteres på flere måder: Som "lineært" udbytte i kg frisk vægt (VV) tang pr. løbende meter dyrkningsline (kg VV/m), eller som arealspecifikt udbytte - enten oplyst i VV eller tørstof (TS) - pr. hektar dyrkningsområde: ton VV/ha eller ton TS/ha. Det arealspecifikke udbyttetal er oftest ekstrapoleret ud fra det lineære udbytte under forudsætning af en given tæthed af dyrkningslinier indenfor et dyrkningsområde. I en europæisk kontekst dyrkes sukkertang udelukkende i stor skala i Norge og på Færøerne, hvor der, for hvert land, samlet produceres mellem 300 og 500 ton frisk tang årligt fra over 150 km spireline fordelt på flere anlæg af hver op til 30 hektar (Ocean Rainforest. Fernand m.fl, 2017). Derfor er de fleste europæiske arealspecifikke udbytter ekstrapoleret fra mindre arealer eller enkelte linier. I denne rapport defineres skala af dyrkningsaktiviteter som følgende: lille skala: < 100 m spireline. Medium skala: 100-1000 m spireline. Stor skala: > 1000 m spireline. Dette er anderledes end definitioner anvendt i fx Skotland, hvor lille-medium skala er defineret som 0-50 langliner á 200 m, mens stor-skala er defineret som et andet system end anvendt til muslingeopdræt og svarende til mere end 50 langliner á 200 m (Campbell m.fl. 2019).

I danske farvande er rapporteret lineære udbytter af ren, ubegroet sukkertang fra 0,01 til 7,30 kg VV/m (Boderskov m.fl. 2023; Nielsen 2015; Bruhn m.fl. 2016; Boderskov m.fl. 2021a; Marinho m.fl. 2015), hvor det højeste udbytte er opnået på liner, der har været udsat på havanlægget i 18 måneder - og således dyrket over to vækstsæsoner, hvor spirelinier med sukkertang normalt udsættes i efteråret og høstes 7-8 måneder senere i det efterfølgende forår (tabel 2.1).

Den hidtidige dyrkning af sukkertang i Danmark er opsummeret af Zhang m.fl. (2022), hvor de forskellige forsøg og kommercielle dyrkningsmetoder er samlet i 9 scenarier, som danner grundlag for en livscyklus analyse (LCA). Det konkluderes her, at fire af de 9 scenarier er Carbon-negative, økonomisk rentable og bidrager til at modvirke eutrofiering med optag af 1,2-81,6 kg N/ha og 0,2-5,3 kg P/ha (Zhang m.fl. 2022). Det højeste arealspecifikke udbytte af sukkertang i danske farvande er ekstrapoleret op til 21,4 ton VV/ha/år (ved dyrkning på liner over 6 måneder med en antaget linetæthed på 5.000 m/ha) og 91,3 ton VV/ha/år (ved dyrkning på net over 20 måneder med en antaget tæthed på 3.000 m² net/ha) (Boderskov m.fl. 2023). De underliggende antagelser om arealtæthed af liner og net er ikke testet i praksis i stor skala. Det hidtil højest indrapporterede årlige danske høstudbytte af sukkertang er 22 ton VV i 2020 (FAO, fish stat, 2022). Tallet er indrapporteret bl.a. fra Hjarnø Havbrug, hvor ca. 16 ton VV blev høstet fra i alt 11 langliner á 220 m, svarende til 2,4 ha.

De indre danske farvande er kendetegnet ved særlige oceanografiske forhold, idet salinitet varierer i tid og rum som konsekvens af udstrømning af ferskvand fra Østersøen (Maar m.fl. 2011; Lund-Hansen 1994), og overfladetemperaturen kan variere fra under frysepunktet om vinteren til i sommerperioden at overstige 20 °C (Nepper-Davidsen m.fl. 2019). Idet sukkertang trives bedst ved stabile forhold med relativt lav temperatur og relativt høj salinitet, betyder det, at vækst og udbytte af sukkertang i Danmark varierer og generelt er lavere i Danmark end i andre Nordatlantiske lande, hvor fx reelle udbytter på 14 ton VV/ha/år er rapporteret fra Færøerne (Bak m.fl. 2018), eller udbyttepotentialet er estimeret ved ekstrapolering af best case scenario til op til 40 ton VV/ha/år, som rapporteret fra Nordspanien (Peteiro and Freire 2013).

3 Virkemiddelpotentiale ved dyrkning af sukkertang

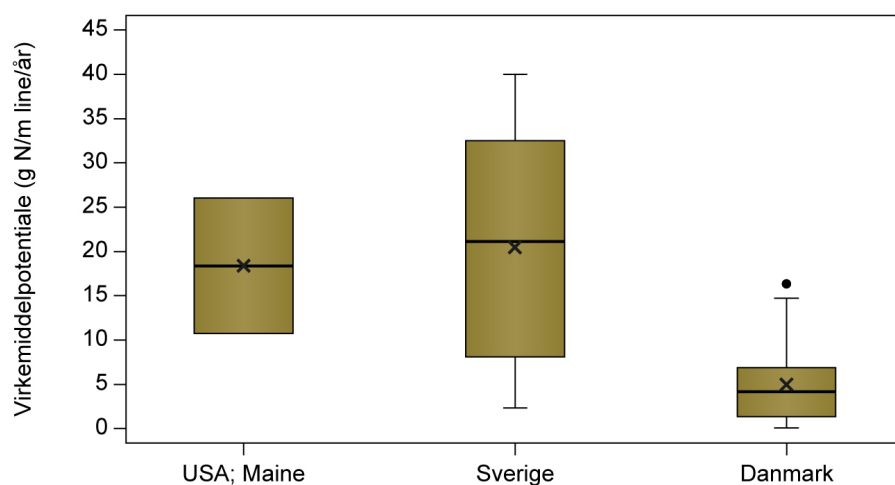
“Virkemiddelpotentialet” er her defineret som et virkemiddels potentiale til at fjerne kvælstof (N) og/eller fosfor (P) fra havmiljøet. Virkemiddelpotentialet ved dyrkning af sukkertang kan, som for biomasse udbyttet, defineres som udbyttet af N (eller P) pr. meter spireline (g N/m line/år), eller som det arealspecifikke udbytte af kvælstof (kg N/ha/år). Virkemiddelpotentialet bestemmes således både af biomasseudbyttet, vævsindholdet af N og P, og for det arealspecifikke potentiale også af tætheden af spireliner pr. arealenhed. Det betyder, at et øget arealspecifikt udbytte kan bidrage til at øge virkemiddelpotentialet af dyrkning af sukkertang, men også, at kvælstofindholdet i biomassen er afgørende for effekten. Vævsindholdet af N og P i sukkertang varierer med en faktor 10, svarende til 0,49-5,94 % N af tørstof-indholdet, og 0,07-0,34 % P af tørstof, afhængig af lokale miljøforhold og høsttidspunkt (tabel 2.1). Generelt ses en årstidsvariation over sukkertangs vækstsæson, hvor N og P indholdet er højest i vinterperioden og lavest sidst på foråret/om sommeren, svarende til den typiske høstsæson for sukkertang (Bruhn m.fl. 2016; Nielsen m.fl. 2014). Således er der typisk et sæsonmæssigt trade-off mellem højt biomasseudbytte og højt kvælstofindhold i vævet - når der er højest biomasse potentiale er kvælstofindholdet lavt. Det betyder, at man i princippet kan få det samme kvælstofudbytte ved høst tidligt eller sent i foråret, mens biomasseudbyttet er højest sent i foråret (Boderskov m.fl. 2023).

I Danmark er der beskrevet et virkemiddelpotentiale på op til 110 kg N/ha/år ved dyrkning og høst af sukkertang på net, og op til 34,8 kg N/ha/år ved dyrkning på liner. Her antages en tæthed af liner på 5.000 m/ha og en tæthed af net på 3.000 m²/ha (Zhang m.fl. 2022; Boderskov m.fl. 2023). Dette er mere end en fordobling i forhold til tidligere dokumenterede virkemiddelpotentialet (Bruhn m.fl. 2020) og skyldes mulighed for øget biomasseudbytte pga. udvikling af dyrkningsteknologi med liner i flere dybder (som giver en højere tæthed af liner/areal), dyrkning på net og gentagen høst af de samme liner gennem 1,5 år (Boderskov m.fl. 2023; Zhang m.fl. 2022). Det er umiddelbart positivt, men det er vigtigt at pointere at:

- virkemiddelpotentialet er i samtlige tilfælde ekstrapoleret fra enkelte liner til hektar, og at den dyrkningsteknologi, der ligger til grund for ekstrapoleringen, i de fleste tilfælde, ikke er gennemprøvet i praksis i stor skala
- virkemiddelpotentialet afhænger af flere faktorer i komplekse interaktioner, og et højt virkemiddelpotentiale ikke vil kunne indfries i alle vandområder, da forudsætningerne for produktion af sukkertang ikke vil være til stede
- ofte vil et højt virkemiddelpotentiale, baseret på et højt N-indhold i biomassen, være betinget af eutrofiering, der kan medføre høj grad af (eller risiko for nogen grad af) begroning (biofouling). Biofouling reducerer/-ødelægger biomassens kvalitet og derigennem markedsværdien, hvilket påvirker omkostningseffektiviteten negativt
- dyrkningsdesign anvendt til dyrkning af sukkertang er ikke effektivt arealoptimeret, og derfor må det nuværende teknologiske udviklingstrin ses som en væsentlig begrænsning for det nuværende virkemiddelpotentiale (Boderskov m.fl. 2023). Se senere.

Virkemiddelpotentialet af sukkertang undersøges også i andre lande, bl.a. i USA i delstaten Maine (Grebe m.fl. 2021) og i Sverige (Visch m.fl. 2020), hvor det arealspecifikke virkemiddelpotentiale ekstrapoleres til henholdsvis 11-46 kg N/ha/år og 6-104 kg N/ha/år. I USA antages tætheden af liner at være 1.767 m/ha, mens tætheden i de svenske beregninger antages at være 2.600 m/ha, hvor de danske beregninger i tabel 2.1 antager 1.000 m/ha. Hvis beregningerne harmoniseres til g N/m/år, ligger virkemiddelpotentialet på: 11-26 g N/m/år for USA (Maine), 2-40 g N/m/år for Sverige, sammenlignet med op til 0,29-16 g N/m/år i Danmark (figur 3.1). De potentielt højere virkemiddelpotentialet i Maine og Sverige skyldes primært højere biomasse udbytter. Den store variation i virkemiddelpotentiale i Danmark skyldes, at data fra alle forsøg er inddraget, og derfor både omfatter data fra forskellige farvande med forskellig egnethed til dyrkning af sukkertang, og tidlige data, hvor produktionen af sukkertang i Danmark ikke var afprøvet eller optimeret i forhold til materialer, systemer og timing af udsætning og høst i forhold til f.eks. begroning.

Figur 3.1. Eksempler på virkemiddelpotentiale beskrevet for USA (Maine) (n=2), Sverige (n=5) og Danmark (n=23) standardiseret til g N/m line/år.



I Kina, som er verdens største producent af tang, er anslået et virkemiddelpotentiale på 600-1.200 kg N/ha/år for japansk sukkertang, *Saccharina japonica* (Zheng m.fl. 2019; Xiao m.fl. 2017). Disse høje estimater kan ikke direkte sammenlignes med danske eller europæiske estimater, dels fordi dyrkningsteknologien i Kina er anderledes og bl.a. har en høj arealtæthed af liner, dels fordi japansk sukkertang (*S. japonica*) har et højere biomasseudbytte end sukkertang (*S. latissima*). Japansk sukkertang er nært beslægtet med sukkertang, men kan ikke dyrkes i Danmark, da det ikke er en hjemmehørende art. Dog giver værdierne en idé om udviklingspotentialet for at bruge tang som virkemiddel ved udvikling af dyrkningsteknologi mod højere linetæthed.

Dyrkning af sukkertang i Danmark (og Europa) foregår primært på forskellige typer af line-systemer. I Danmark og Norge bruges primært langliner (Forbord m.fl. 2020; Matsson m.fl. 2021; Boderskov m.fl. 2021a; Boderskov m.fl. 2023), mens firmaet Ocean Rainforest på Færøerne har udviklet et alternativt koncept (MACR), der kan modstå en højere grad af bølgeeksponering (Bak m.fl. 2018). Fælles for de anvendte systemer er, at de har en markant lavere linetæthed end den, der anvendes i Asien, til dyrkning af lignende arter. I et beskrevet system fra Asien anvendes en linetæthed på ca. 12.500 m line/ha i ét horisontalt lag, sammenlignet med en linetæthed på ca. 5.000 m line/ha for de mest intensivt dyrkede langlinesystemer herhjemme (Marinho m.fl. 2015; Boderskov m.fl. 2023; Zhang m.fl. 2017). Tilmed er langlinesystemerne anvendt herhjemme opsat således, at dyrkningssubstratet (linerne) er fordelt

i dybden, dermed med nedsat vækst til følge. Det må forventes, at linedyrkningsystemer svarende til dem anvendt i Asien, kan udvikles og benyttes i danske farvande med en markant forøget biomasseproduktion til følge. Dog er det ikke ligetil, idet hele opsætningen af båd, forankring og linehåndtering skal tilpasses det system, der anvendes, og være økonomisk rentabelt. I bl.a. Norge arbejder man med at udvikle designs med højere tæthed af liner og fartøjer, der kan operere i anlæg med høj tæthed af liner.

Forsøg i mindre skala har vist, at dyrkning af tang på net i stedet for liner kan øge det arealspecifikke udbytte (Boderskov m.fl. 2023) og potentielt reducere produktionsomkostningerne ved brug af eksisterende udstyr udviklet til produktion af blåmuslinger. Både i Holland og Danmark arbejdes på at udvikle metoder til dyrkning af sukkertang på samme type af net, som anvendes til produktion af blåmuslinger (bl.a. SMART farm og Easy farm). I Holland blev et podet net på 200 m udsat 7 km fra kysten og høstet vha. en modificeret Easy farm høstmaskine (Vier und Wind projektet:

<https://www.northseafarmers.org/sector/wier-en-wind>), mens et dansk projekt (SMART tang) med støtte fra GUDP arbejder på dyrkning af tang på net hos Blå Biomasse i Limfjorden. Det er vanskeligt at omregne udbytte og virkemiddelpotentialer fra areal af net til meter dyrkningssubstrat. Udfordringerne ved dyrkning på net er primært håndtering af store net under såning og høst.

Gentagen høst af sukkertang på de samme liner flere gange ved "tilbageskæring" af tangen over vækstpunktet (engelsk: coppicing) muliggør både øget høstudbytte og bedre økonomi og anvendes på Færøerne (Bak m.fl. 2018). I Danmark er det dokumenteret muligt i enkelte mere åbne vandområder, og systemet forsøges hos flere kommercielle producenter, men biofouling kan begrænse anvendelsen af biomassen efter høst, og påvirker derigennem forretningsplanen negativt (Corrigan m.fl. 2023a; Boderskov m.fl. 2023). Fordele ved coppicing er, at man ikke behøver at pode og udsætte nye spireliner hvert år, og at de enkelte tangplanter bliver kraftigere med årene og derfor giver højere udbytte. Coppicing kan derfor potentielt give en lavere produktionsomkostning og en højere omkostningseffektivitet.

4 Økosystemtjenester ved dyrkning af sukkertang

Dyrkning af sukkertang leverer forskellige økosystemtjenester. Binding og fjernelse af kvælstof fra havmiljøet kan betragtes som økosystemtjeneste. I dette afsnit beskrives økosystemtjenester relateret til klimaeffekter og biodiversitet.

4.1 Klimaeffekter

Tangdyrkning og kulstofkredsløbet

Dyrkning af tang kan have forskellige klimaeffekter. Hvordan man kvantificerer og opsummerer klimaeffekter af tangskove og tangdyrkning er omdrejningspunkt for intense videnskabelige diskussioner, og interessen er stor fra både virksomheder og myndigheder, især for potentialet for permanent lagring af kulstof (C sekvstrering) og deraf afledte C-credits. For at kunne redegøre for klimaeffekten af tangdyrkning kræver det en grundlæggende forståelse for hele kulstofkredsløbet i tangdyrkning både lokalt og globalt, og at kvantificere klimaeffekten vil kræve, at man opgør samtlige flows af kulstof – og andre klimagasser - mellem hav og atmosfære (Pessarrodona m.fl. 2023).

Når klimaeffekter af tangdyrkning skal opgøres i relation til tangdyrknings effekt på kulstofkredsløbet, er det kulstof-aftrykket, Carbon footprint, af tangdyrkingen, der skal opgøres. Det er et omfattende regnestykke, fordi det i princippet omfatter samtlige elementer af både selve dyrkingen af tangen og den efterfølgende anvendelse af tangbiomassen.

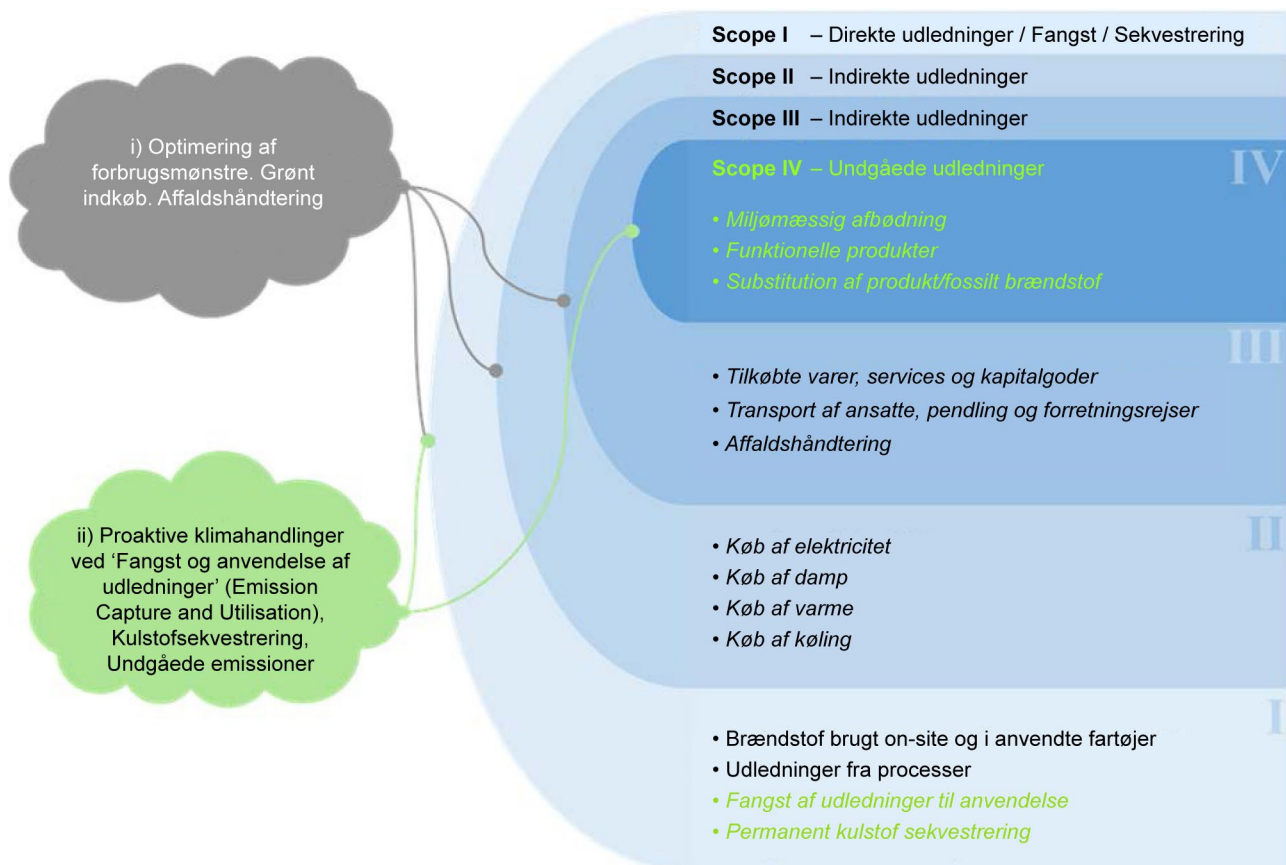
Opgørelser af forskellige produkters kulstofaftryk kan overordnet inddeles i fire kategorier eller scopes, som er defineret af IPCC. Denne metode er anvendt til at skitsere kulstofaftrykket for tang (van Duinen m.fl. 2023) (figur 4.1):

Scope 1: Direkte emissioner. Her indgår tangens optag af CO₂, sekvstrering af C ved begravelse i jord (fx biochar), havbund eller transport til dybhavet, udledning af andre klimagasser i forbindelse med produktion af tang fx forskellige former for volatile organiske C-forbindelser (VOC), der kan have både positive og negative effekter på klimaet.

Scope 2: Indirekte emissioner. Her indgår C-aftryk fra fremstilling af materialer anvendt i forbindelse med produktionen af tang både i den landbaserede klækkerifase, i vækstfasen i havet, og i forarbejdning af biomassen til produkter, samt transport og rejser, herunder brug af brændstof til sejlads og kørsel.

Scope 3: Øvrige indirekte emissioner. Her indgår C-aftryk fra energiforbrug i produktionen – strømforbrug til fx lys, pumper og køling i klækkeriet, strømforbrug til tørring og forarbejdning af tangen til produkter.

Scope 4: Undgåede emissioner. Her indgår C-aftryk ved, at tangbiomassen fx erstatter fossile produkter (fx til bioplastik eller bioenergi), anvendes som erstatning for importeret soja til fødevarerprodukter eller som foderadditiv, eller anvendes i foder, der reducerer metanudledning fra kvægproduktion.



Figur 4.1. De fire scopes, der udgør det samlede kulstofaftryk af tangproduktion (oversat fra van Duinen m.fl. 2023).

Direkte emissioner (Scope 1)

C-optag, C-tab og sekvstrering

Tang er autotrofe organismer, der optager uorganisk C som CO_2 eller HCO_3^- fra det omgivende miljø, og via fotosyntese omdanner det til organisk materiale. En del af den indbyggede C tabes igen under væksten – enten som CO_2 under respiration, som opløst organisk C (dissolved organic carbon (DOC)), som partikulært organisk C (POC) eller som volatilt organisk C (VOC). Både DOC og POC består af både hurtigt nedbrydelige (labile) og langsomt nedbrydelig (refraktære) C-forbindelser, og i det omgivende miljø er det omsætnings hastigheden af DOC og POC, der afgør, om C lagres permanent (sekvstreres). En del af det refraktære DOC kan være i form af det sulfaterede polysakkarid, fucoidan, der findes i brunalgers cellevægge (Buck-Wiese m.fl. 2023). Sekvstrering defineres som værende lagret i mere end 100 år (Hurd m.fl. 2022).

Det er tidligere anslået, at ca. 11 % af det C, som makroalger naturligt afgiver, sekvstreres som DOC eller POC (Krause-Jensen and Duarte 2016). Dette estimat er baseret på to forudsætninger: 1) at C-kredsløbet fungerer, som det kendes i naturlige tangskove, og 2) at det tabte refraktære C lagres i dybe sedimentationsbassiner, hvor omsætnings tiden reduceres og C ikke vender tilbage til overfladevandet (Ross m.fl. 2022). Disse to forudsætninger opfyldes ikke umiddelbart ved dyrkning af tang da:

- biomassen vokser i foråret i naturlige tangskove af sukkertang, mens en stor del af biomassen tabes igen om sommeren/efteråret (Nielsen m.fl.

2014; Fieler m.fl. 2021). I en produktion af sukkertang er målet at maksimere høst af biomasse, og derfor vil tangen typisk høstes i det sene forår, før det naturlige sæsonbestemte tab af biomasse toppe

- danske farvande ikke er tilstrækkeligt dybe til at udgøre sedimentationsbassiner, hvor refraktært DOC og POC lagres, og naturlig transport af tangmateriale fra danske farvande til dybe sedimentationsbassiner udenfor kontinentalsoklen i fx Nordatlanten er ikke sandsynlig.

Sedimentation af tang POC til havbunden kan bidrage til en øget omsætning. Om det har ubetydelig, positiv eller negativ effekt, vil afhænge af den specifikke lokalitet. Enkelte studier har vist, at POC fra sukkertang omsættes relativt hurtigt i sedimentet, at omsætningen øges ved bioturbation (Thomson m.fl. 2020) under ilttrige forhold frem for iltfrie forhold (Boldreel m.fl. 2023), og at omsætning af tang POC kan stimulere omsætning af refraktært C i sedimentet (Boldreel m.fl. 2023).

Der mangler viden om, hvor meget DOC og POC, der afgives fra sukkertang under danske dyrkningsbetingelser, hvor stor en fraktion af både DOC og POC, der er refraktær, og hvordan både afgivelse og nedbrydning af DOC og POC påvirkes af miljøfaktorer, der er relevante for danske dyrkningsforhold.

Emissioner af klimagasser fra sukkertang

Lige så vel som det gælder for planter på landjorden, så udskiller sukkertang og andre tangarter, forskellige klimaaktive gasser, både VOC, som bl.a. inkluderer halocarbons (iod-, brom- og klorforbindelser), og dimethylsulfoniopropionat (DMSP), og lattergas, som alle har forskellige – og potentielt modsatte – effekter på klimaet, bl.a. i form af øget drivhuseffekt, reduktion af ozonlaget i atmosfæren og skydannelse (Carpenter m.fl. 2000; Keng m.fl. 2020). Sukkertang afgiver, i forhold til andre tangarter, relativt høje koncentrationer af både halogenerede iod- og bromforbindelser (Laternus 1996).

Der mangler viden om både hvilke klimagasser, der produceres ved dyrkning af sukkertang, hvor meget der produceres, samt hvilke miljømæssige faktorer, der styrer produktion og udledning af de forskellige klimaaktive flygtige forbindelser.

Indirekte emissioner (Scope 2 og 3)

I forbindelse med en tangproduktion anvendes materialer til dyrkningsstrukturerne bl.a. liner, ankre, betonklodser, fartøjer, og der anvendes brændstof til sejlads til drift og vedligehold af anlæg. I klækkerifasen bruges strøm til bl.a. kølerum, lys og pumper, og efter høst af biomassen bruges strøm til tørning/forarbejdning til produkter. For at opgøre balancen i hele dette komplicerede regnskab bruges Livs Cyklus Analyser (LCA) (Hasselström and Thomas 2022; Thomsen and Zhang 2020). En LCA af de seneste 10 års dyrkning af sukkertang i Danmark indikerer, at produktionen kan opnå C-neutralitet – og C-negativitet – bl.a. under forudsætning af, at aktører deler den nødvendige infrastruktur, som fx klækkeri og fartøjer (Zhang m.fl. 2022). Det skal her understreges, at C-negativitet betyder, at systemerne optager mere C end de afgiver, og derfor er C-negativitet positivt i et klimaregnskab.

Undgåede emissioner (Scope 4)

Tangbiomasse kan bidrage til undgåede emissioner på flere måder: 1) hvis fx biomassen anvendes til substitution af fossile ressourcer som i produktion af bioenergi og bioplastik, 2) hvis tangbiomassen erstatter en anden biomasse med et højere C-aftryk i fx fødevarer eller foder; 3) hvis tangen kan anvendes som fodertilsætning, der reducerer udledning af metan i landbrugets kvægproduktion, eller 4) fjernelse af kvælstof fra havmiljøet kan bidrage til at reducere produktion af lattergas i havet.

- Sukkertang er relevant som biomasse til produktion af både bioenergi og bioplastik, men både økonomisk og klimamæssigt giver det på nuværende tidspunkt kun mening, hvis tangbiomassen udnyttes i et bioraffinaderi, hvor flere højværdikomponenter udnyttes, og resten kan omsættes til bioenergi og/eller plastik (Thomsen and Zhang 2020).
- Sukkertang kan potentielt erstatte animalsk protein, sojaprotein eller andre former for protein i både foder og fødevarer (Thorsteinsson m.fl. 2023b; van der Heide m.fl. 2021). Dog sætter det relativt lave proteinindhold og det relativt høje indhold af mineraler og anti-nutritionelle stoffer som polyfenoler en begrænsning for, hvor stor en andel sukkertang kan udgøre af dyrefoder (van Duinen m.fl. 2023).
- Især rødalgerne *Asparagopsis* og *Bonnemaisonia* har dokumenteret effekt på metanproduktionen i vommen på kvæg, hvor en tilsætning af *Asparagopsis* på 0,2 % af fodertørstof kan reducere metanudledningen med mellem 70 og 98 % (Kinley m.fl. 2020; Muizelaar m.fl. 2021; Mihaila m.fl. 2022). Sukkertang har pt. ingen dokumenteret effekt som metanreducerende komponent i kvægfoder (Thorsteinsson m.fl. 2023a; Thorsteinsson m.fl. 2023b), men mulighederne undersøges i flere danske projekter (ClimateFeed, MABICOW).
- Når sukkertang optager kvælstof fra havmiljøet, kan det potentielt bidrage til at reducere den naturlige bakterielle produktion af lattergas i havet, idet produktion af lattergas øges med graden af eutrofiering (Bange 2006).

Indirekte klimaeffekt - Tangdyrknings effekt på forsurening af havet

Tang vokser ved fotosyntese, og tangens fotosyntese øger pH i det omgivende vand (Middelboe and Hansen 2007). Omkring naturlige tangskove og tangdyrkningsanlæg er der således observeret pH-stigning i de lyse timer, som potentielt i et vist omfang kan modvirke forsurening af havet og skabe bedre vækstvilkår for kalkdannende organismer umiddelbart i og omkring tangen (Krause-Jensen m.fl. 2016; Xiao m.fl. 2021; Young m.fl. 2022).

Samlet set er mere viden nødvendig før de samlede klimaeffekter af dyrkning af sukkertang kan opgøres og konklusioner kan drages omkring C-aftryk og Carbon Credits. Der mangler især viden om tab af tangbiomasse som DOC og POC under en produktionssæson, omsætning af DOC og POC i vandsøjlen og sedimentet, transport af DOC og POC i vandsøjlen vertikalt og horisontalt, emission af VOC og øvrige klimagasser fra produktion af sukkertang.

4.2 Tangdyrkning og biodiversitet

Den positive effekt af naturlige tangskove på biodiversitet er veldokumenteret (Steneck m.fl. 2002). Anderledes forholder det sig for effekten af tangdyrkning på biodiversitet, hvor der ikke eksisterer entydig publiceret evidens for hverken positive eller negative effekter.

Tangdyrkningsanlæg kan være habitatskabende og lokalt øge både abundansen og artsdiversiteten af visse grupper af organismer, men det er ikke nødvendigvis de samme arter, som en naturlig tangskov ville skabe levested for (Forbes m.fl. 2022). Bl.a. øges abundansen af organismer, der sætter sig på biomassen (biofouling), og som derfor er uønskede i dyrkningsområdet (Corrigan m.fl. 2023a). Flere studier viser, at der på dyrket sukkertang er flere individer af bestemte organismer, men en lavere artsdiversitet end på tilsvarende naturlige tangskove af sukkertang (Bekkby m.fl. 2023; Corrigan m.fl. 2023b). Tangdyrkningsområder kan potentielt også have negative effekter på biodiversitet, bl.a. kan tangdyrkningsområder udgøre trædesten for invasive arter, sygdomme og parasitter, som herfra kan spredes til naturlige habitater og populationer. Samtidig er der en minimal og hidtil udelukkende teoretisk risiko for, at fugle og havpattedyr kan blive fanget i selve dyrkningsstrukturerne (Forbes m.fl. 2022; Campbell m.fl. 2019).

Samtidig kan selve målet med og forvaltningspraksis af et tangdyrkningsanlæg – høst og fjernelse af biomassen - være i direkte modstrid med den stabilitet, som et økosystem behøver for at understøtte biodiversitet (Forbes m.fl. 2022; Corrigan m.fl. 2023b).

De få konkrete tilgængelige studier har fokus på fastsiddende organismer, mens pelagiske organismer som fx fisk ikke er undersøgt. Det er nødvendigt at udvikle og standardisere yderligere metoder til at kortlægge biodiversitet i tangdyrkningsområder.

5 Videnshuller

Der eksisterer efterhånden en del viden omkring udbytter af sukkertang fra dyrkning især i mindre skala flere steder i Danmark, og omkring variationer i indhold af kvælstof og fosfor i den producerede biomasse, som konsekvens af lokalitet og sæson. Der mangler derimod viden om effekter af dyrkning i stor skala på det marine miljø – både på hydrologi, sedimentationsmønstre og biodiversitet, omkring kulstofkredsløbet i et anlæg: afgivelse og omsætning af DOC, POC og VOC. Samtidig mangler der viden om potentialet for teknologiudvikling for optimeret dyrkningspraksis og konsekvenser heraf for både udbytter, virkemiddelpotentialer og økonomi.

På klimaområdet er mere viden nødvendig før de samlede klimaeffekter af dyrkning af sukkertang kan opgøres, og konklusioner kan drages omkring C-aftryk og Carbon Credits. Der mangler især viden om tab af tangbiomasse som DOC og POC under en produktionssæson, omsætning af DOC og POC i vandsøjlen og sedimentet, transport af DOC og POC i vandsøjlen vertikalt og horisontalt, emission af VOC og øvrige klimagasser fra produktion af sukkertang.

For at vurdere effekten på biodiversitet af dyrkning af tang i stor skala er det nødvendigt at udvikle og standardisere metoder til at kortlægge biodiversitet i tangdyrkningsområder – både for fastsiddende og pelagiske organismer, som fx fisk og pattedyr.

En del af de eksisterende videnshuller omkring kulstofkredsløb og klimaeffekter kan lukkes ved forsæt dyrkning i mindre skala i forskellige vandområder suppleret med laboratorieforsøg, mens videnshuller omkring produktionsteknologi og biodiversitet kræver opskalering af produktionen over en årække på samme lokalitet, idet variationen i både produktion og effekter mellem enkelte år er betydelig.

6 Referencer

Araújo R, Vázquez Calderón F, Sánchez López J, Azevedo IC, Bruhn A, Fluch S, Garcia Tasende M, Ghaderiardakani F, Ilmjärv T, Laurans M, Mac Monagail M, Mangini S, Peteiro C, Rebours C, Stefansson T, Ullmann J (2021). Current Status of the Algae Production Industry in Europe: An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. *Frontiers in Marine Science* 7 (1247). doi:10.3389/fmars.2020.626389

Bak UG, Mols-Mortensen A, Gregersen O (2018). Production method and cost of commercial-scale offshore cultivation of kelp in the Faroe Islands using multiple partial harvesting. *Algal Research* 33:36-47. doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.05.001>

Bange HW (2006). Nitrous oxide and methane in European coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 70 (3):361-374.4 doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.05.042>

Bartsch I, Wiencke C, Bischof K, Buchholz CM, Buck BH, Eggert A, Feuerpfeil P, Hanelt D, Jacobsen S, Karez R, Karsten U, Molis M, Roleda MY, Schubert H, Schumann R, Valentin K, Weinberger F, Wiese J (2008). The genus *Laminaria* sensu lato: recent insights and developments. *European Journal of Phycology* 43 (1):1-86

Bekkby T, Torstensen RRG, Grünfeld LAH, Gundersen H, Fredriksen S, Rinde E, Christie H, Walday M, Andersen GS, Brkljacic MS, Neves L, Hancke K (2023). 'Hanging gardens'-comparing fauna communities in kelp farms and wild kelp forests. *Frontiers in Marine Science* 10. doi: 10.3389/fmars.2023.1066101

Borderskov T, Bruhn A, Holst N (2022). A supply/demand model of *Saccharina latissima* growth and biomass. In prep

Borderskov T, Nielsen MM, Rasmussen MB, Balsby TJS, Macleod A, Holdt SL, Sloth JJ, Bruhn A (2021a). Effects of seeding method, timing and site selection on the production and quality of sugar kelp, *Saccharina latissima*: A Danish case study. *Algal Research* 53:102160. doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102160>

Borderskov T, Rasmussen MB, Bruhn A (2021b). Obtaining spores for the production of *Saccharina latissima*: seasonal limitations in nature, and induction of sporogenesis in darkness. *J Appl Phycol* 33:1035-1046. doi:10.1007/s10811-020-02357-0

Borderskov T, Rasmussen MB, Bruhn A (2023). Upscaling cultivation of *Saccharina latissima* on net or line systems; comparing biomass yields and nutrient extraction potentials. *Frontiers in Marine Sciences* 10. doi: <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.992179>

Boldreel EH, Attard KM, Hancke K, Glud RN (2023). Microbial degradation dynamics of farmed kelp deposits from *Saccharina latissima* and *Alaria esculenta*. *Marine Ecology Progress Series* 709:1-15

Broch OJ, Alver MO, Bekkby T, Gundersen H, Forbord S, Handå A, Skjermo J, Hancke K (2019b). The Kelp Cultivation Potential in Coastal and Offshore Regions of Norway. *Frontiers in Marine Science* 5 (529). doi:10.3389/fmars.2018.00529

Broch OJ, Slagstad D (2012). Modelling seasonal growth and composition of the kelp *Saccharina latissima*. *J Appl Phycol* 24 (4):759-776. doi:10.1007/s10811-011-9695-y

Bruhn A, Flindt MR, Hasler B, Krause-Jensen D, Larsen MM, Maar M, Petersen JK, Timmermann K (2020). Marine virkemidler - Beskrivelse af virkemidlernes effekter og status for vidensgrundlag. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 122 - Videnskabelig rapport nr 368 <http://dce2audk/pub/SR368.pdf>

Bruhn A, Tørring DB, Thomsen M, Canal Vergés P, Nielsen MM, Rasmussen MB, Eybye KL, Larsen MM, Balsby TJS, Petersen JK (2016). Impact of environmental conditions on biomass yield, quality, and bio-mitigation of *Saccharina latissima*. *Aquaculture Environmental Interactions* 8:619-636

Buck-Wiese H, Andskog MA, Nguyen NP, Bligh M, Asmala E, Vidal-Melgosa S, Liebeke M, Gustafsson C, Hehemann J-H (2023). Fucoid brown algae inject fucoidan carbon into the ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 120 (1):e2210561119. doi: 10.1073/pnas.2210561119

Cai J, Galli G (2021). Global seaweeds and microalgae production, 1950–2019. WAPI factsheet to facilitate evidence-based policymaking and sector management in aquaculture. FAO

Campbell I, Macleod A, Sahlmann C, Neves L, Funderud J, Øverland M, Hughes AD, Stanley M (2019). The environmental risks associated with the development of seaweed farming in Europe - Prioritizing key knowledge gaps. *Frontiers in Marine Science* 6 (107). doi: 10.3389/fmars.2019.00107

Carpenter LJ, Malin G, Liss PS, Küpper FC (2000). Novel biogenic iodine-containing trihalomethanes and other short-lived halocarbons in the coastal east Atlantic. *Global Biogeochemical Cycles* 14 (4):1191-1204. doi: <https://doi.org/10.1029/2000GB001257>

Corrigan S, Brown AR, Tyler CR, Wilding C, Daniels C, Ashton IGC, Smale DA (2023a). Development and Diversity of Epibiont Assemblages on Cultivated Sugar Kelp (*Saccharina latissima*) in Relation to Farming Schedules and Harvesting Techniques. *Life-Basel* 13 (1). doi:10.3390/life13010209

Corrigan S, Brown AR, Tyler CR, Wilding C, Daniels C, Ashton IGC, Smale DA (2023b). Home sweet home: Comparison of epibiont assemblages associated with cultivated and wild sugar kelp (*Saccharina latissima*), co-cultivated blue mussels (*Mytilus edulis*) and farm infrastructure. *J Appl Phycol*. doi: 10.1007/s10811-023-03055-3

F. Fernand, A. Israel, J. Skjermo, T. Wichard, K. R. Timmermans and A. Golberg (2017). Offshore macroalgae biomass for bioenergy production: Environmental aspects, technological achievements and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75: 35-45. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.046>

Fieler R, Greenacre M, Matsson S, Neves L, Forbord S, Hancke K (2021). Erosion Dynamics of Cultivated Kelp, *Saccharina latissima*, and Implications for Environmental Management and Carbon Sequestration. *Frontiers in Marine Science* 8. doi: 10.3389/fmars.2021.632725

Forbes H, Shelamoff V, Visch W, Layton C (2022). Farms and forests: evaluating the biodiversity benefits of kelp aquaculture. *J Appl Phycol* 34 (6):3059-3067. doi: 10.1007/s10811-022-02822-y

Forbord S, Matsson S, Brodahl GE, Bluhm BA, Broch OJ, Handå A, Metaxas A, Skjermo J, Steinhovden KB, Olsen Y (2020). Latitudinal, seasonal and depth-dependent variation in growth, chemical composition and biofouling of cultivated *Saccharina latissima* (*Phaeophyceae*) along the Norwegian coast. *J Appl Phycol* 32 (4):2215-2232. doi: 10.1007/s10811-020-02038-y

Fortes MD, Luning K (1980). Growth-Rates of North-Sea Macroalgae in Relation to Temperature, Irradiance and Photoperiod. *Helgolander Meeresunters* 34 (1):15-29

Grebe GS, Byron CJ, Brady DC, Geisser AH, Brennan KD (2021). The nitrogen bioextraction potential of nearshore *Saccharina latissima* cultivation and harvest in the Western Gulf of Maine. *J Appl Phycol* 33 (3):1741-1757. doi: 10.1007/s10811-021-02367-6

Hasselström L, Thomas J-BE (2022). A critical review of the life cycle climate impact in seaweed value chains to support carbon accounting and blue carbon financing. *Cleaner Environmental Systems* 6:100093. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2022.100093>

Hurd CL, Law CS, Bach LT, Britton D, Hovenden M, Paine ER, Raven JA, Tamsitt V, Boyd PW (2022). Forensic carbon accounting: Assessing the role of seaweeds for carbon sequestration. *Journal of Phycology* 58 (3):347-363. doi: <https://doi.org/10.1111/jpy.13249>

Keng FS-L, Phang S-M, Abd Rahman N, Leedham Elvidge EC, Malin G, Sturges WT (2020). The emission of volatile halocarbons by seaweeds and their response towards environmental changes. *J Appl Phycol* 32 (2):1377-1394. doi: 10.1007/s10811-019-02026-x

Kinley RD, Martinez-Fernandez G, Matthews MK, de Nys R, Magnusson M, Tomkins NW (2020). Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed. *Journal of Cleaner Production* 259:120836. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120836>

Krause-Jensen D, Duarte CM (2016). Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience* 9:737. doi:10.1038/ngeo2790 <https://www.nature.com/articles/ngeo2790#supplementary-information>

Krause-Jensen D, Marbà N, Sanz-Martin M, Hendriks IE, Thyrring J, Carstensen J, Sejr MK, Duarte CM (2016). Long photoperiods sustain high pH in Arctic kelp forests. *Science Advances* 2 (12): e1501938. doi:10.1126/sciadv.1501938

- Larsen J, Mohn C, Pastor A, Maar M (2020). A versatile marine modelling tool applied to arctic, temperate and tropical waters. *PLOS ONE* 15 (4):e0231193. doi:10.1371/journal.pone.0231193
- Laturnus F (1996). Volatile halocarbons released from Arctic macroalgae. *Marine Chemistry* 55 (3):359-366. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(97\)89401-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(97)89401-7)
- Lund-Hansen LC (1994). *Basisbog i fysisk-biologisk oceanografi*. GAD,
- Marinho G, Holdt S, Birkeland M, Angelidaki I (2015). Commercial cultivation and bioremediation potential of sugar kelp, *Saccharina latissima*, in Danish waters. *J Appl Phycol* 27 (5):1963-1973. doi:10.1007/s10811-014-0519-8
- Matsson S, Metaxas A, Forbord S, Kristiansen S, Handå A, Bluhm BA (2021). Effects of outplanting time on growth, shedding and quality of *Saccharina latissima* (*Phaeophyceae*) in its northern distribution range. *J Appl Phycol* 33 (4):2415-2431. doi:10.1007/s10811-021-02441-z
- Middelboe AL, Hansen PJ (2007). Direct effects of pH and inorganic carbon on macroalgal photosynthesis and growth. *Mar Biol Res* 3 (3):134-144
- Mihaila AA, Glasson CRK, Lawton R, Muetzel S, Molano G, Magnusson M (2022). New temperate seaweed targets for mitigation of ruminant methane emissions: an in vitro assessment. *Applied Phycology* 3 (1):274-284. doi:10.1080/26388081.2022.2059700
- Muizelaar W, Groot M, van Duinkerken G, Peters R, Dijkstra J (2021). Safety and Transfer Study: Transfer of Bromoform Present in *Asparagopsis taxiformis* to Milk and Urine of Lactating Dairy Cows. *Foods* 10 (3):584
- Maar M, Moller EF, Larsen J, Madsen KS, Wan ZW, She J, Jonasson L, Neumann T (2011). Ecosystem modelling across a salinity gradient from the North Sea to the Baltic Sea. *Ecological Modelling* 222 (10):1696-1711. doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.03.006
- Nepper-Davidsen J, Andersen DT, Pedersen MF (2019). Exposure to simulated heatwave scenarios causes long-term reductions in performance in *Saccharina latissima*. *Marine Ecology Progress Series* 630:25-39
- Nielsen M, Krause-Jensen D, Olesen B, Thinggaard R, Christensen P, Bruhn A (2014). Growth dynamics of *Saccharina latissima* (*Laminariales*, *Phaeophyceae*) in Aarhus Bay, Denmark, and along the species' distribution range. *Mar Biol*:1-12. doi:10.1007/s00227-014-2482-y
- Nielsen MM (2015). Cultivation of large brown algae for energy, fish feed and bioremediation. PhD thesis Aarhus University Department of Bioscience Denmark 170 pp.
- Nielsen R, Lundsteen S, Brodie J (2022). *Seaweeds of Denmark*. Volume 2. Brown Algae (*Phaeophyceae*). Green Algae (*Chlorophyta*). The Royal Danish Academy of Sciences and Letters, Denmark.

Parke M (1948). Studies on British *Laminariaceae*. I. Growth in *Laminaria Saccharina* (L.) Lamour. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom 27 (3):651-709. doi:10.1017/S0025315400056071

Pessarrodona A, Franco-Santos RM, Wright LS, Vanderklift MA, Howard J, Pidgeon E, Wernberg T, Filbee-Dexter K (2023). Carbon sequestration and climate change mitigation using macroalgae: a state of knowledge review. Biological Reviews 98 (6):1945-1971. doi: <https://doi.org/10.1111/brv.12990>

Peteiro C, Freire Ó (2013). Biomass yield and morphological features of the seaweed *Saccharina latissima* cultivated at two different sites in a coastal bay in the Atlantic coast of Spain. J Appl Phycol 25 (1):205-213. doi: 10.1007/s10811-012-9854-9

Petersen JK, Bruhn A, Behrens JW, Dalskov J, Larsen E, Thomsen M, Vinther M (2021a). Vidensyntese om blå biomasse - Potentialer for ny og bæredygtig anvendelse af havets biologiske ressourcer. DTU Aqua-rapport nr 387-2021

Petersen JK, Timmermann K, Bruhn A, Rasmussen MB, Boderskov T, Schou HJ, Erichsen A, Thomsen M, Holbach A, Tjørnløv RS, Canal-Vergés P, Flindt MR (2021b). Marine Virkemidler - Potentialer og Barrierer. DTU Aqua-rapport nr 385-2021 Institut for Akvatiske Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet 49 pp.

Ross F, Tarbuck P, Macreadie PI (2022). Seaweed afforestation at large-scales exclusively for carbon sequestration: Critical assessment of risks, viability and the state of knowledge. Frontiers in Marine Science 9. doi: 10.3389/fmars.2022.1015612

Schmedes PS, Boderskov T (2013). Cultivation of two kelp species, *Laminaria digitata* and *Saccharina latissima*, in Danish waters - geographic variation in growth and biochemical composition. Masters thesis, Århus University,

Steneck RS, Graham MH, Bourque BJ, Corbett D, Erlandson JM, Estes JA, Tegner MJ (2002). Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. Environmental Conservation 29 (4):436-459. doi: 10.1017/s0376892902000322

Thomsen M, Zhang X (2020). Life Cycle Assessment of Macroalgal Eco-industrial Systems. In: Torres MD, Kraan S, Dominguez H (eds) Sustainable seaweed technologies - Cultivation, Biorefinery and Applications. Elsevier, pp 633-708

Thomson ACG, Kristensen E, Valdemarsen T, Quintana CO (2020). Short-term fate of seagrass and macroalgal detritus in . bioturbated sediments. Marine Ecology Progress Series 639:21-35

Thorsteinsson M, Weisbjerg MR, Lund P, Battelli M, Chassé É, Bruhn A, Nielsen MO (2023a). Effects of seasonal and interspecies differences in macroalgae procured from temperate seas on the Northern hemisphere on in vitro methane mitigating properties and rumen degradability. Algal Research 73:103139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103139>

Thorsteinsson M, Weisbjerg MR, Lund P, Bruhn A, Hellwing ALF, Nielsen MO (2023b). Effects of dietary inclusion of 3 Nordic brown macroalgae on enteric methane emission and productivity of dairy cows. *Journal of Dairy Science* 106 (10):6921-6937. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23437>

van der Heide ME, Stødkilde L, Værum Nørgaard J, Studnitz M (2021). The Potential of Locally-Sourced European Protein Sources for Organic Monogastric Production: A Review of Forage Crop Extracts, Seaweed, Starfish, Mussel, and Insects. *Sustainability* 13 (4):2303

van Duinen R, Rivière C, Strosser P, Dijkstra JW, Rios S, Luzzi S, Bruhn A, Nielsen MO, Göke C, Samarasinghe MB, Chassé E, Nielsen CH, Thomsen M (2023). Algae and Climate. European Commission European Maritime and Fisheries Fund. doi:doi:10.2926/208135

Venolia CT, Lavaud R, Green-Gavrielidis LA, Thornber C, Humphries AT (2020). Modeling the Growth of Sugar Kelp (*Saccharina latissima*) in Aquaculture Systems using Dynamic Energy Budget Theory. *Ecological Modelling* 430:109151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109151>

Visch W, Bergström P, Nylund GM, Peterson M, Pavia H, Lindegarth M (2020). Spatial differences in growth rate and nutrient mitigation of two co-cultivated, extractive species: The blue mussel (*Mytilus edulis*) and the kelp (*Saccharina latissima*). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 246:107019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107019>

Xiao X, Agusti S, Lin F, Li K, Pan Y, Yu Y, Zheng Y, Wu J, Duarte CM (2017). Nutrient removal from Chinese coastal waters by large-scale seaweed aquaculture. *Scientific Reports* 7 (1):46613. doi:10.1038/srep46613

Xiao X, Agustí S, Yu Y, Huang Y, Chen W, Hu J, Li C, Li K, Wei F, Lu Y, Xu C, Chen Z, Liu S, Zeng J, Wu J, Duarte CM (2021). Seaweed farms provide refugia from ocean acidification. *Science of The Total Environment*:145192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145192>

Young CS, Sylvers LH, Tomasetti SJ, Lundstrom A, Schenone C, Doall MH, Gobbler CJ (2022). Kelp (*Saccharina latissima*) Mitigates Coastal Ocean Acidification and Increases the Growth of North Atlantic Bivalves in Lab Experiments and on an Oyster Farm. *Frontiers in Marine Science* 9. doi:10.3389/fmars.2022.881254

Zhang X, Boderskov T, Bruhn A, Thomsen M (2022). Blue growth and bioextraction potentials of Danish *Saccharina latissima* aquaculture – A model of eco-industrial production systems mitigating marine eutrophication and climate change. *Algal Research* 64:102686. doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102686>

Zhang Y, Chang Z, Zheng Z, Yang J (2017). Harvesting machine for kelp culture in floating raft. *Aquacultural Engineering* 78:173-179. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.07.005>

Zheng Y, Jin R, Zhang X, Wang Q, Wu J (2019). The considerable environmental benefits of seaweed aquaculture in China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 33 (4):1203-1221. doi:10.1007/s00477-019-01685-z

7 Appendix 1. Model for vækst af tang

A supply/demand model of *Saccharina latissima* growth and biomass

Teis Boderskov, Annette Bruhn & Niels Holst

Published as part of Boderskov, T. (2021). Organic sugar kelp – industrial production of a new Danish bioresource. PhD thesis. Aarhus University, Department of Bioscience and Center for Circular Bioeconomy, Denmark. 265 pp.

In preparation for peer-reviewed publication: https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Videnskabelige_rapporter_500-599/Bilag_SR/SR575Appendix1Boderskov_et_al_in_prep.pdf

DYRKNING AF SUKKERTANG SOM MARINT VIRKEMIDDEL I DANMARK

Vidensyntese 2008-2022

Dyrkning af sukkertang kan anvendes som marint virkemiddel til optag og fjernelse af næringsstoffer fra havmiljøet. I Danmark er sukkertang blevet dyrket i kystnære systemer siden 2008 af både kommercielle firmaer og forskningsinstitutioner. Der foreligger især publiceret viden og erfaringer fra Limfjorden, Horsens Fjord og Kattegat. Siden 2012 er rapporteret virkemiddelpotentialer fra 0,1 til 16 g kvælstof og 0,01 til 1,6 g fosfor/m line/år, hvilket er sammenligneligt med data fra Sverige og USA. Både den rapporterede arealmæssige effektivitet og effekter på det omgivende marine miljø er opskaleret fra mindre forsøg og anlæg, og beror på antagelse omkring aktuelle biomasse udbytter og tæthed af liner i et fremtidigt storskala anlæg. Der eksisterer således videnshuller både omkring potentialer for teknologiudvikling og konsekvenser heraf for både udbytter, virkemiddelpotentialer og økonomi, og omkring effekter af dyrkning i stor skala på det marine miljø – særligt med fokus på hydrologi, sedimentationsmønstre, kulstofkredsløbet og biodiversitet.