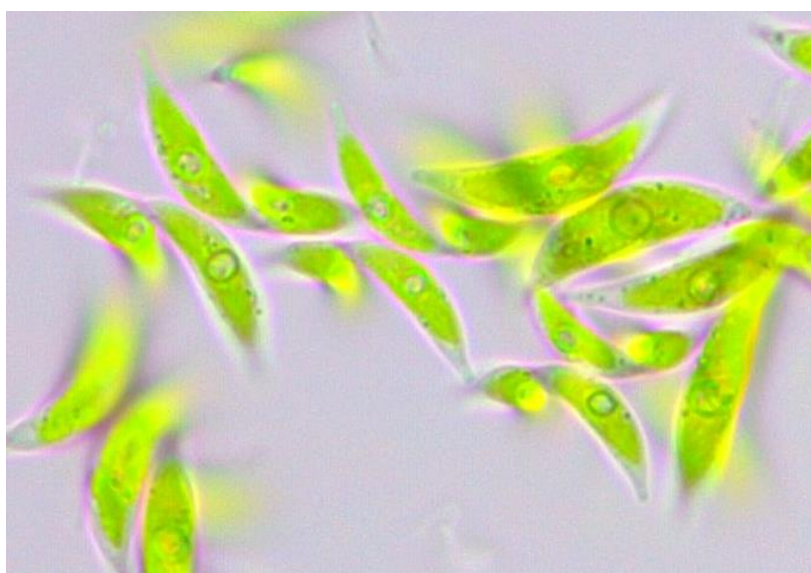


Status og perspektiver for mikroalgeproduktion i Danmark



Rapport udarbejdet af Teknologisk Institut for Food & Bio Cluster Denmark

af Lars Jørgensen og Malene Olsen

Gregersensvej 7, 2630 Tåstrup, Center for Bioressourcer

December 2021

Denne rapport er udarbejdet for Food & Bio Cluster Denmark i forbindelse med Innovationskraft-samarbejdsaftalen.

Rapporten har til formål at give et indblik i, hvor langt vi er i Danmark med teknologier til mikroalgeproduktion, anvendelsesmulighederne for mikroalgerne, hvilke produkter skal de bruges til samt perspektiver for udvikling af mikroalgeproduktionen i Danmark.

Rapporten indledes med en kort introduktion til mikroalger efterfulgt af en beskrivelse af de potentialer og udfordringer, der er forbundet med mikroalgeproduktion. Det igangværende, danske mikroalgeprojekt "ReMAPP" (2018-2022) gennemgås som en case, der giver et mere detaljeret billede af potentialet for dansk cirkulær produktion af mikroalger som en fremtidig proteinafgrøde. Under udarbejdelsen af denne rapport har danske algeproducenter besvaret et spørgeskema, der giver en opdateret status på den kommercielle mikroalgeproduktion i Danmark. Rapporten rundes af med en kort beskrivelse af noget af det kommende danske forskningsarbejde på mikroalgeområdet.

Indholdsfortegnelse

Generelt om mikroalger.....	4
Dyrkning med og uden lys.....	5
Algedyrkningsystemer	6
Potentialer	8
Cirkulært princip med miljø og klimamæssige gevinster	8
En alternativ, bæredygtig afgrøde med værdifulde indholdsstoffer	9
Protein	10
Omega 3 fedtsyrer	13
Vitaminer	13
Pigmenter og antioxidanter	13
Forædling af mikroalger	14
Udfordringer	16
Vandgenbrug.....	16
Algehøst/afvanding	16
Fordøjelighed	17
Lovgivning og sikkerhed.....	18
Case: ReMAPP – et dansk pilotprojekt.....	19
Status på dansk mikroalgeproduktion.....	21
Kommende dansk forskning på mikroalgeområdet i 2022 og frem	22
ProLocAL.....	22
MASSPROVIT.....	22
Two-in-one: Valorising dairy wastewater to produce food ingredients using microalgae	23
Bilag 1 – Oplysninger fra danske mikroalgeproducenter	24

Generelt om mikroalger

Interessen for mikroalger er ikke ny da der har i årtier været interesse for at udnytte deres høje vækstrater og olieindhold til at fx at producere biodiesel. Det har dog vist sig at være en stor udfordring, da produktet har en lav værdi i forhold til omkostningerne til dyrkning og processering. De senere år har fokus være på mikroalgeproduktion af produkter med en højere værdi. Forskningen har understøttet dette gennem især forædling af mikroalger, effektivisering af dyrkningssystemer og produktionsomkostninger.

Mikroalger er en stor og alsidig gruppe af encellede organismer, hvoriblandt man finder forfædrene til landplanterne. Mikroalger inkluderer eukaryoter som f.eks. grønalger, furealger og kiselalger og prokaryoter i form af cyanobakterier - også kaldet blågrønalger. Fælles for disse organismer er, at de er i stand til at udføre fotosyntese ligesom planter og er dermed primærproducenter, der udgør fundamentet for fødekæden i akvatiske miljøer.

Der er en kolossal diversitet inden for denne gruppe, som menes at omfatte op mod 800.000 arter, hvoraf kun omkring 35.000 er identificerede¹. De fleste mikroalger kan opnå høje vækstrater og et højt proteinindhold og betragtes derfor som fremtidige, alternative proteinafgrøder, der under optimale dyrkningsforhold, kan give uhørt høje biomasseudbytter med op til 100 ton biomasse pr. hektar pr. år (tørstof). Disse produktiviteter er dog svære at opnå i stor skala, hvor produktiviteter på 40 ton tørstof/ha/år er mere realistiske på nuværende tidspunkt².

Ud over at indeholde protein er mikroalger også i stand til at syntetisere essentielle fedtsyrer, forskellige pigmenter og vitaminer. Alle disse stoffer er potentielt interessante i industriel sammenhæng. Denne rapport fokuserer især på mikroalger som en fremtidig proteinkilde. Dette skyldes behovet for at opnå et mere klimaneutralt landbrug, med lokalt producerede proteinafgrøder og flere plantebaserede fødevarer af god ernæringsmæssig kvalitet. I denne sammenhæng har mikroalger et stort potentiale da de 1) kan dyrkes ud fra industrielle sidestrømme, 2) har et lavt arealforbrug, 3) har en god proteinkvalitet og 4) kan dyrkes over det meste af verden også på danske breddegrader.

Mikroalger bruges i dag primært som kost- og fodertilskud, enten som hel, tørret biomasse, såsom *Spirulina* eller *Chlorella*, eller som ekstraherede højværdikomponenter til kosttillskud eller farve, fx β -caroten eller omega-3. Det globale marked for disse mikroalgebaserede produkter er veludviklet, men dets vækstpotentiale anses som yderst lovende^{3,4}.

¹ Ebenezer, V., Medlin, L.K. and Ki, J.-S. 2012. Molecular detection, quantification, and diversity evaluation of microalgae. *Marine Biotechnology* 14(2), pp. 129–142.

² Fernández, F.G.A., Reis, A., Wijffels, R.H., Barbosa, M., Verdelho, V. and Llamas, B. 2021. The role of microalgae in the bioeconomy. *New biotechnology* 61, pp. 99–107.

³ Joint Research centre, 2014, Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/final_version_online_ipts_jrc_85709.pdf

⁴ <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2020/09/18/2095854/28124/en/4-6-Billion-Worldwide-Microalgae-Industry-to-2027-Impact-of-COVID-19-on-the-Market.html>

Selvom de samlede produktionsmængder og markedsstørrelsen for mikroalgebaserede produkter stadig er relativt små i forhold til alternative kilder, er de femdoblet siden begyndelsen af århundredet. Derimod er kommerciel produktion af mikroalger som en kilde til protein/kulhydrater til fødevarerindustrien stadig at betragte som i sin helt tidlige fase¹.

I øjeblikket udgør EU's marked for mikroalgebiomasse sig allerede for 3,4 milliarder euro i 2020 og forventes at vokse med 4,3 % årligt og nå 4,6 milliarder dollars i 2027⁴.

En dansk produktion af mikroalger vil bidrage til Danmark og EU's nuværende og forventede politikker for ressourceeffektivitet, bæredygtig udnyttelse af naturressourcer. I EU's Farm-to Fork strategi⁵ fremhæves mikroalger bl.a. som en vigtig alternativ proteinkilde i fremtidens bæredygtige fødevarerproduktion. Mange virksomheder og andre organisationer har allerede engageret sig i den europæiske algesektor og investeret i mikroalgebaseret produktfremstilling og deltaget i flere F&U-initiativer.

I Maj 2021 er mikroalgeproduktion fremhævet i en rapport fra erhvervsministeriet⁶, som et eksempel på en biosolution med et stort uudnyttet potentiale i den grønne omstilling. Desuden har Det nationale bioøkonomipanel inkluderet mikroalger i panelets 40 anbefalinger til Fremtidens proteiner⁷, som en potentiel lovende teknologi, der bør udforskes nærmere.

Dyrkning med og uden lys

Mikroalger kan generelt dyrkes under mange forskellige forhold og geografiske områder og kræver ikke dyrkbare arealer². Fotosyntesebaseret produktion af mikroalger kræver lys, CO₂ og næringsstoffer som nitrogen, fosfor og kalium samt en række forskellige mikronæringsstoffer. Ud over at kunne vokse fotoautotroft, altså ved hjælp af fotosyntese, findes der mikroalger som også kan vokse heterotroft, dvs. uden lys og CO₂ men ved udnyttelse af organisk kulstof som energi og kulstofkilde. Det kan være simple og lettilgængelige kulhydrater som glucose, men der findes også arter af mikroalger som kan udnytte organiske kulstofkilder som eksempelvis acetat, glycerol, sucrose og ethanol som findes i forskellige typer industrielt procesvand, der potentielt kan anvendes som algedyrkningsmedium⁸

Ved fotoheterotrof vækst vokser algerne ved skiftevis at slå over til fotoautotrof vækst når de udsættes for lys og heterotrof vækst når de dyrkes i mørke (figur 1). Endelig er der mikroalger som kan vokse mixotroft, hvor de udnytter lys, CO₂ og organisk kulstof på samme tid. Når alger dyrkes heterotroft er lys ikke en begrænsende faktor og derfor kan man ved denne type dyrkning opnå en større celletæthed end når algerne vokser vha. fotosyntese.

⁵ Europa-Kommissionen (2020) [Farm to Fork Strategy \(europa.eu\)](https://ec.europa.eu/farm-to-fork/)

⁶ [Analyser af potentialer for og fodaftryk af biosolutionssektoren i Danmark \(em.dk\)](#)

⁷ [Anbefalinger om proteiner fra Det Nationale Bioøkonomipanel.pdf \(mfvm.dk\)](#)

⁸ Perez-Garcia, O. and Bashan, Y. 2015. Microalgal Heterotrophic and Mixotrophic Culturing for Bio-refining: From Metabolic Routes to Techno-economics. In: Prokop, A., Bajpai, R. K., and Zappi, M. E. eds. *Algal Biorefineries*. Cham: Springer International Publishing, pp. 61–131

Growth mode	Energy source	Carbon source	Light availability requirements	Metabolism variability
Photo-autotrophic	Light	Inorganic	Obligatory	No switch between sources
Heterotrophic	Organic	Organic	No requirements	Switch between sources
Photoheterotrophic	Light	Organic	Obligatory	Switch between sources
Mixotrophic	Light and organic	Inorganic and organic	No obligatory	Simultaneous utilization

Figur 1: Ud over at kunne vokse vha. fotosyntese (fotoautotroft) findes der også alger, som kan vokse heterotroft eller ved en kombination af fotosyntese og heterotrof vækst enten skiftevis (fotoheterotroft) eller på samme tid (mixotroft)⁸

Algedyrkningssystemer

Nogle mikroalger er i stand til at tilpasse sig store variationer i lysforhold, temperatur og saltkoncentrationer⁹. Dette øger sandsynligheden for at finde og isolere algestammer fra de lokale omgivelser og på den måde finde frem til algekulturer, der kan dyrkes udendørs størstedelen af året, også her i Danmark.

Udendørs dyrkning af mikroalger foregår oftest i enten åbne kar ("open ponds" eller "raceway ponds") eller i lukkede fotobioreaktorer. Lukkede fotobioreaktorer kan konstrueres som horisontale eller vertikale, stablede rørsystemer eller som flade paneler i forskellige typer plastik eller glas (figur 2 og 3). Begge typer dyrkningssystemer har både deres fordele og ulemper.

De åbne systemer er relativt lette at etablere og drifte, men algernes produktivitet er lavere sammenlignet med lukkede fotobioreaktorer, hvor dyrkningsparametre som pH og gasudveksling er lettere at styre^{10,11}. I de åbne systemer opstår der let kontaminering med bakterier og zooplankton, hvilket kan have stor negativ indflydelse på algernes produktivitet og produktkvaliteten. Derfor er det oftest alger (cyanobakterier), der tåler ekstreme pH-værdier og saltkoncentrationer, som f.eks. *Spirulina* (*Arthrospira*), der produceres i åbne systemer.

I de lukkede reaktorer kæmper man med biofilmdannelse på rørene, hvilket med tiden forringer lysforholdene inde i reaktoren og reducerer algernes tilvækst¹².

I algedyrkningssystemer skelnes mellem volumetriske og arealmæssige produktiviteter. Den arealmæssige produktivitet (gram algetørstof pr. m² pr. dag) for udendørsreaktorer er omtrent 3 gange større for horisontale rørreaktorer, sammenlignet med åbne dyrkningssystemer. Endvidere kan den

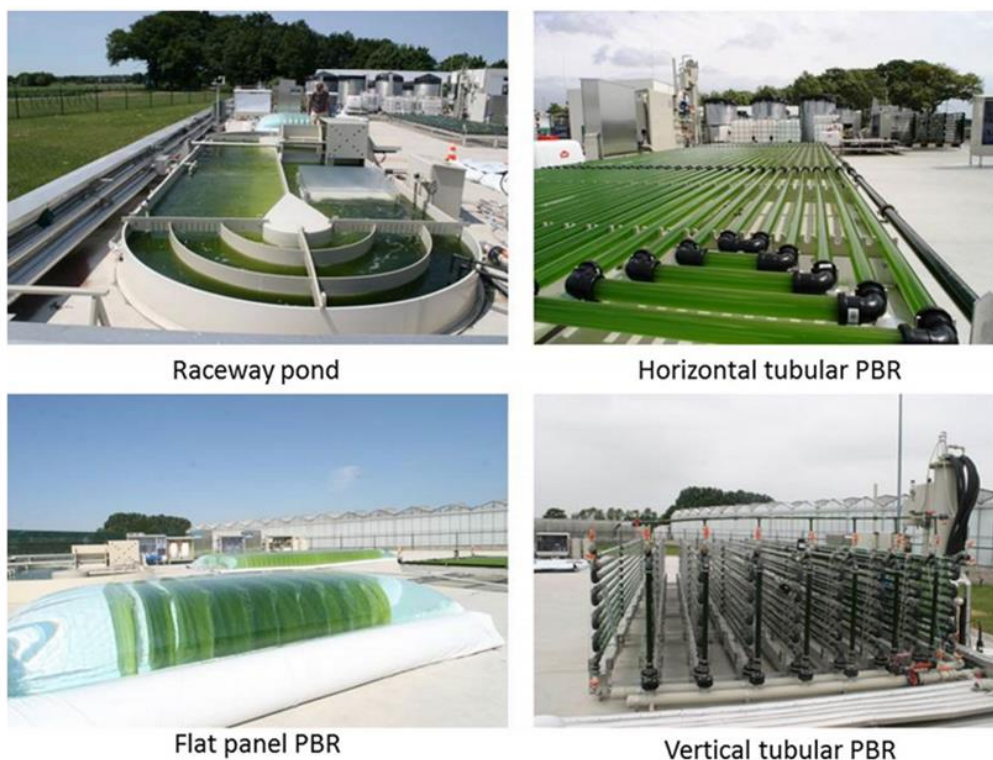
⁹ Ras, M., Steyer, J.-P. and Bernard, O. 2013. Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 12(2), pp. 153–164.

¹⁰ Draaisma, R.B., Wijffels, R.H., Slegers, P.M.E., Brentner, L.B., Roy, A. and Barbosa, M.J. 2013. Food commodities from microalgae. *Current Opinion in Biotechnology* 24(2), pp. 169–177.

¹¹ Ruiz, J., Olivieri, G., de Vree, J., et al. 2016. Towards industrial products from microalgae. *Energy & Environmental Science* 9(10), pp. 3036–3043.

¹² Kumar, V. and Jain, S. 2014. Plants and algae species: Promising renewable energy production source. *Emirates journal of food and agriculture* 26(8), p. 679.

volumetriske algeproduktivitet (gram tørstof pr. liter pr. dag) være op mod 8 gange højere i de lukkede systemer^{11,13,14}.



Figur 2: forskellige typer af algefotobioreaktorer, alle fra AlgaePARC i Wageningen Holland¹¹.



Figur 3: I det danske ReMAPP-projekt udvikles et udendørs, horisontalt algedyrkningsystem bestående af 100 meter lange plastikrør placeret på jorden.

¹³ Arbib, Z., Ruiz, J., Alvarez-Díaz, P., Garrido-Pérez, C., Barragan, J. and Perales, J.A. 2013. Photobiotreatment: influence of nitrogen and phosphorus ratio in wastewater on growth kinetics of *Scenedesmus obliquus*. *International journal of phytoremediation* 15(8), pp. 774–788.

¹⁴ Mata, T.M., Martins, A.A. and Caetano, N.S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(1), pp. 217–232.

Når alger dyrkes heterotroft ud fra organiske kulstofkilder er der en stor risiko for, at algekulturen kontamineres med bakterier og svampe. Derfor kræver denne type dyrkning helt sterile forhold og foretages i lukkede ståltanke også kaldet fermentorer. Derfor kaldes heterotrof algedyrkning også ofte for "fermentering" (boks 1). Der er dog ikke tale om klassisk fermentering, der foregår under iltfrie forhold da algerne ligesom under fotoautotrof dyrkning respirerer når de dyrkes heterotroft og en af de største udfordringer i denne type dyrkning er at få fordelt tilstrækkelige mængder oxygen i den tætte kultur¹⁵.

Boks 1. Fordele og ulemper ved heterotrof algedyrkning

- ✓ Ikke lysafhængig
- ✓ Høj biomassetæthed (op til 100g tørstof/L)
- ✓ Hurtigere vækst
- ✓ Velegnet til GMO produktion
- ✓ Dyrkning af farveløse mutanter
- ✓ Der kan anvendes uklare medier



- Ofte lavere proteinindhold
- Øget risiko for kontaminering
- Ingen CO₂ fiksering (primærproduktion), men organiske kulstofkilder fra fødevarerindustrien kan udnyttes
- Er svært at opskalere da dyrkningen kræver meget ilt, der kan være problematisk at få fordelt i en tæt kultur

Potentialer

Cirkulært princip med miljø og klimamæssige gevinster

Størstedelen af det nitrogen, der findes i protein i foder og fødevarer kommer fra den såkaldte Haber-Bosch proces, hvor nitrogen fra atmosfæren fikseres industrielt og gøres biologisk tilgængeligt. Dette sker under et massivt energiforbrug og efterfølgende CO₂ udledning. Nitrogen der udskilles fra industri, dyr og mennesker ender enten på jorden, eksempelvis i form af gylle, hvor store mængder ikke udnyttes af planterne og derfor kan føre til eutrofiering af søer, vandløb og kystnære farvande, eller det fjernes på rensningsanlæg vha. denitrifikation, hvor det sendes tilbage til atmosfæren. Paradoksal, kræver fjernelsen af biologisk tilgængeligt nitrogen, ligesom fikseringen, enorme mængder energi. Nitrogen er på den måde skiftevis et belastende spildprodukt eller en uundværlig og knap ressource. Dyrkning af mikroalger ud fra en cirkulær bioøkonomisk tilgang, hvor næringsrige sidestrømme fra industrien

¹⁵ Barros, A., Pereira, H., Campos, J., Marques, A., Varela, J. and Silva, J. 2019. Heterotrophy as a tool to overcome the long and costly autotrophic scale-up process for large scale production of microalgae. *Scientific Reports* 9(1), p. 13935.

udnyttes som gødning kan kortslutte denne uholdbare cyklus og i stedet bidrage til en mere bæredygtig proteinproduktion¹⁶.

Spildevandsrensning står for omkring 2 % af verdens energiforbrug og er associeret med massive GHG-emissioner. Med den rette tilgang kan mikroalger dyrkes ud fra forskellige typer industrielt næringsrigt procesvand, hvorved behovet for spildevandsrensning reduceres samtidig med, at algeproduktionen bliver mere bæredygtig.

Produktion af store mængder proteinrig algebiomasse kræver tilførsel af store mængder næringsstoffer. Dette kan være en økonomisk tung post, hvis man anvender handelsgødning. Derfor er der stort fokus på at udnytte næringsrige, industrielle sidestrømme som næringsmedium til mikroalger. Blandt andet har biogasindustrien vist sig at have et stort potentiale til at kunne forsyne mikroalgeproduktion med både CO₂ fra den opgraderede biogas og næringsstoffer i vådfractionen fra den separerede, afgassede biomasse^{17,18}. Herudover kan algerne også udnytte en lang række sidestrømme fra bryggerier, og andre typer fødevarerproduktioner^{2,19}.

En alternativ, bæredygtig afgrøde med værdifulde indholdsstoffer

Som nævnt tidligere, udgør kosttilskud den største del af markedet, da over 75 % af mikroalge produktionsvolumenet bliver brugt til dette¹. De primære produkter omfatter:

- Astaxanthin (kosttilskud og fødevaringrediens) fremstillet af *Haematococcus Pluvialis*.
- *Spirulina* (som kosttilskud).
- *Chlorella* (som kosttilskud og fødevaringrediens)
- EPA/DHA (omega-3) (som kosttilskud og fødevaringrediens) fremstillet af *Nannochloropsis*, *Schizochrytium*, *Chrythecodinium*, *Odontella* og *Ulkenia*.
- β -caroten (som additiv/vitamin/ farvestof) fra *Dunaliella Salina*, *Schizochrytium* og *Nannochloropsis*.
- Phycocyanin (farvestof) fra *Spirulina*.

En række af disse mikroalger, sammen med andre arter som *Isochrysis*, *Pavlova*, *Phaeodactylum*, *Chaetoceros*, *Skeletonema*, *Thalassiosira*, og *Tetraselmis* bliver også anvendt som foder, særligt til akvakultur. Arter som *Spirulina*, *Chlorella*, *Skeletonema costatum*, *Arthrospira (Spirulina)*,

¹⁶ Matassa, S., Batstone, D.J., Hülsen, T., Schnoor, J. and Verstraete, W. 2015. Can direct conversion of used nitrogen to new feed and protein help feed the world? *Environmental Science & Technology* 49(9), pp. 5247–5254.

¹⁷ Fuentes-Grünwald, C., Ignacio Gayo-Peláez, J., Ndovela, V., Wood, E., Vijay Kapoore, R. and Anne Llewellyn, C. 2021. Towards a circular economy: A novel microalgal two-step growth approach to treat excess nutrients from digestate and to produce biomass for animal feed. *Bioresource Technology* 320(Pt A), p. 124349.

¹⁸ Stiles, W.A.V., Styles, D., Chapman, S.P., et al. 2018. Using microalgae in the circular economy to valorise anaerobic digestate: challenges and opportunities. *Bioresource Technology* 267, pp. 732–742.

¹⁹ Pleissner, D., Lam, W.C., Sun, Z. and Lin, C.S.K. 2013. Food waste as nutrient source in heterotrophic microalgae cultivation. *Bioresource Technology* 137, pp. 139–146.

Nannochloropsis, *Dunaliella Salina*, *Porphyridium cruentum*, *Phaeodactylum tricornutum* og *Dysmorphococcus globosus* bliver i mindre omfang produceret til kosmetikindustrien.

Protein

For at få et overblik over konventionelle vegetabiliske proteinkilder og inkludere både proteinkvalitet og klimapåvirkning må man tage udgangspunkt i sojabønner, der er den mest udbredte vegetabiliske proteinkilde²⁰. I Europa importerer vi omkring 70% af vores totale proteinforbrug, hvoraf størstedelen kommer fra soja.

Medregnes både det direkte og indirekte indtag af sojabønner kommer den gennemsnitlige europæer op på et indtag på omkring 60 kg om året²¹.

En rapport udarbejdet af Københavns Universitet oplyser, at Danmark importerede ca. 1,7 mio. tons sojaskrå i 2018, hvilket placerer os på en 6. plads over de største importører af sojaskrå i Europa²². Sojabønner er forbundet med både fordele og ulemper. En af de store fordele er det høje proteinindhold, der ligger mellem 30-40% af tørstofindholdet, til sammenligning er proteinindholdet i andre almindelige planteafgrøder: hvede 11%, majs 9%, ris 7%, kartofler 3% og grønne bønner 10% (tørstofbasis).

Andelen af essentielle aminosyrer i sojabønneprotein ligger omkring 37- 45 %. Sojabønner er, i modsætning til mange andre planteafgrøder, en komplet proteinkilde dvs. at aminosyresammensætningen lever op til det anbefalede daglige indtag af essentielle aminosyrer for voksne mennesker som det foreskrives af WHO²³.

Desværre er sojaproduktion og import forbundet med afskovning og massiv CO₂-udledning.

Som tidligere nævnt er mikroalger i stand til at opnå et højt proteinindhold sammenlignet med konventionelle afgrøder. Analyser af den danske, proteinrige mikroalge, der dyrkes i ReMAPP projektet har vist sig at have et ernæringsmæssigt stort potentiale. Algen har et proteinindhold på omkring 50% og er relevant til både foder og på sigt også fødevarerbrug.

Algens høje proteinindhold illustreres på figur 4, hvor *Scenedesmus* celler ses ved 1000 gange forstørrelse i hhv. lysmikroskop (A) og konfokalmikroskop (B), hvor cellens protein, er farvet specifikt med lilla.

Figur 5 sammenligner aminosyreprofilen for hhv. det danske *Scenedesmus* isolat med gennemsnittet af 14 kommercielle sojabønner²⁴. Her ses det hvor proteinrig algen er også sammenlignet med sojabønner.

²⁰ Tessari, P., Lante, A. and Mosca, G. 2016. Essential amino acids: master regulators of nutrition and environmental footprint? *Scientific Reports* 6, p. 26074.

²¹ Kroes, H. 2015. KROES, Hassel; KUEPPER, Barbara. Mapping the soy supply chain in Europe. Forschungspaper für den niederländischen WWF (WNF), URL: http://assets.wnf.nl/downloads/mapping_the_soy_supply_chain_in_europe_wnf_12_may_2015_final_1.pdf, 2015. WWF.

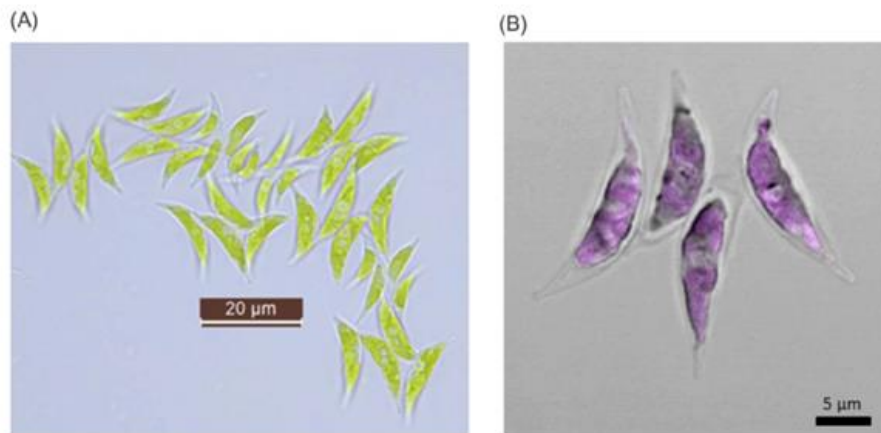
²² Bosselmann Skovmand, A. 2020. Dansk import af afskovningsfri soja fra Sydamerika. Institut for Fødevarer og Ressourceøkonomi Københavns Universite.

²³ Joint WHO/FAO/UNU Expert Consultation 2007. Protein and amino acid requirements in human nutrition. World Health Organization technical report series (935), pp. 1–265, back cover.

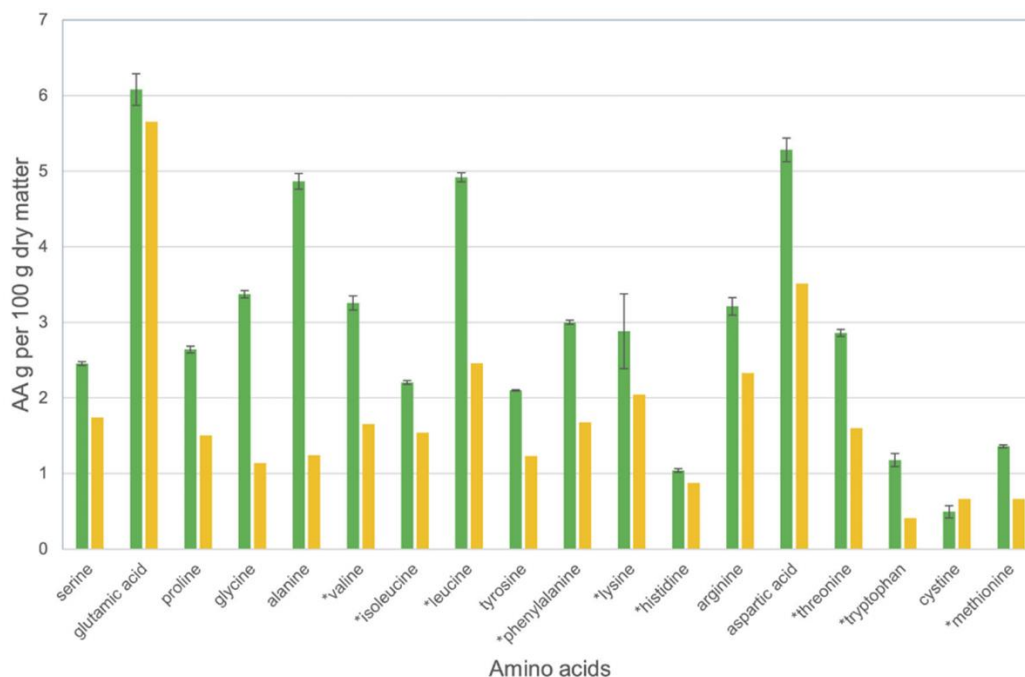
²⁴ Zarkadas, C.G., Gagnon, C., Gleddie, S., Khanizadeh, S., Cober, E.R. and Guillemette, R.J.D. 2007. Assessment of the protein quality of fourteen soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] cultivars using amino acid analysis and two-dimensional electrophoresis. *Food Research International* 40(1), pp. 129–146.

Et højt proteinindhold siger i sig selv ikke noget om en fødevarers eller foders proteinkvalitet, hvor det er indholdet af de essentielle aminosyrer der er afgørende.

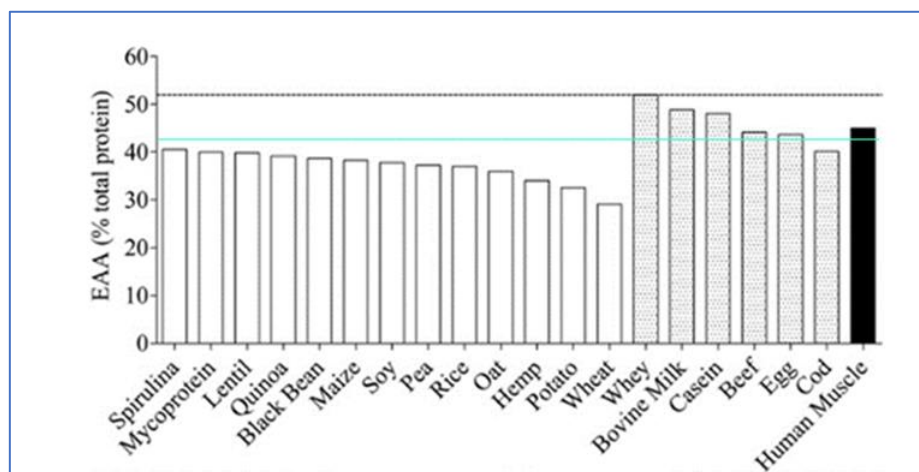
Andelen af de 9 essentielle aminosyrer i proteinet ligger på 42% for algeisolatet, hvilket er højere end langt de fleste planteproteiner (figur 6).



Figur 4: A) *Scenedesmus sp.* set i lysmikroskop ved 1000 gange forstørrelse. B) algecellernes høje proteinindhold er illustreret ved at farve proteinet specifikt med lilla farvestof (Olsen et al. 2021)



Figur 5: Aminosyreprofilen for et dansk isolat af grønalgen *Scenedesmus sp.* (grøn) sammenlignet med gennemsnittet af 14 sorter af sojabønner (gul), de essentielle aminosyrer er markeret med en stjerne²⁵.



Figur 6: Indhold af essentielle aminosyrer (EAA) i forskellige proteinkilder af hhv. vegetabilsk og animalsk oprindelse. Den stiplede linje viser indholdet af EAA i valleprotein med det højeste indhold af EAA. Den lyseblå linje viser indholdet af EAA i et dansk isolat af *Scenedesmus sp.* Modificeret fra van Vliet et al. 2015²⁶.

²⁵ Olsen, M.F.L., Pedersen, J.S., Thomsen, S.T., Martens, H.J., Petersen, A. and Jensen, P.E. 2021. Outdoor cultivation of a novel isolate of the microalgae *Scenedesmus sp.* and the evaluation of its potential as a novel protein crop. *Physiologia Plantarum* 173(2), pp. 483–494.

²⁶ van Vliet, S., Burd, N.A. and van Loon, L.J.C. 2015. The Skeletal Muscle Anabolic Response to Plant- versus Animal-Based Protein Consumption. *The Journal of Nutrition* 145(9), pp. 1981–1991.

Omega 3 fedtsyrer

Mikroalger og i særdeleshed en del marine arter er i stand til at syntetisere værdifulde flerumættede fedtsyrer (PUFAs). Nogle alger, som *Nannochloropsis sp.*, kan have et PUFA-indhold på op mod 40% af den totale mængde fedtsyrer.

Blandt de flerumættede fede syrer er der tre essentielle omega-3 fedtsyrer, som mennesker ikke selv kan syntetisere: EPA (eikosapentaensyre), DHA (dokosaheksaensyre) samt ALA (alfalinolensyre). Indtag af omega-3 fedtsyrer er vigtig for vores sundhed og er påvist at kunne reducere risikoen for bl.a. hjertekar- og nervesystemssygdomme²⁷. Traditionelt er hovedkilden til omega-3 fedtsyrer i kosten marine, fede fisk men fiskene indeholder omega-3 fedtsyrer fordi mikroalger, som er primærkilde til essentielle fedtsyrer, udgør fundamentet i deres fødekæde. Desværre er marine fisk hverken en tilstrækkelig eller bæredygtig PUFA-kilde og opdrættede fisk indeholder ikke fedtsyrerne, medmindre de tilføres marint foder som fiskemel. Produktion af PUFA-rige mikroalger til fiskefoder kan være en bæredygtig løsning på dette problem. På DTU arbejder man på at finde frem til mikroalger, som er rige på omega-3 fedtsyrer, så de kan anvendes som erstatning til fiskemel som foder til akvaintustrien. I GUDP-projektet FIMAFY (2013-2018) dyrkede man en række forskellige mikroalger i en vertikal fotobioreaktor placeret i et væksthuse i Danmark. Projektet tog udgangspunkt i et cirkulært princip, hvor industrielt procesvand blev anvendt som dyrkningsmedium. Blandt de testede isolater fandt man frem til, at den marine mikroalge *Nannochloropsis salina* egnede sig bedst til fiskefoder da den havde gode vækstrater samt et højt indhold af omega-3 fedtsyrer²⁸.

Vitaminer

På DTU har man fornyelig påvist, hvordan UVB-lys kan påvirke mikroalger til at producere høje koncentrationer af D-vitamin, mere specifikt D₃ – vitamin, (cholecalciferol) som mennesker ofte er i underskud af. Alger, der før UVB-behandling havde et indhold af D₃ vitamin under 1 ng/g (tørstof), fik efter UVB-påvirkningen D₃ koncentrationer helt op mod 2700 ng/g (tørstof)²⁹. Dette er sammenligneligt med D₃ koncentrationen i torskelever og fiskeolie, der er de bedste traditionelle kilder til vitaminet. Forventningen er, at mikroalger kan blive en fremtidig kilde til en mere bæredygtig produktion af D₃ vitamin.

Pigmenter og antioxidanter

Mikroalgers evne til at udføre fotosyntese og til at leve under ekstreme forhold skyldes blandt andet, at de er i stand til at syntetisere en lang række forskellige pigmenter som klorofyl, carotenoider og

²⁷ Adarme-Vega, T.C., Lim, D.K.Y., Timmins, M., Vernen, F., Li, Y. and Schenk, P.M. 2012. Microalgal biofactories: a promising approach towards sustainable omega-3 fatty acid production. *Microbial Cell Factories* 11, p. 96.

²⁸ Safafar, H., Hass, M.Z., Møller, P., Holdt, S.L. and Jacobsen, C. 2016. High-EPA Biomass from *Nannochloropsis salina* Cultivated in a Flat-Panel Photo-Bioreactor on a Process Water-Enriched Growth Medium. *Marine Drugs* 14(8).

²⁹ Ljubic, A., Jacobsen, C., Holdt, S.L. and Jakobsen, J. 2020. Microalgae *Nannochloropsis oceanica* as a future new natural source of vitamin D₃. *Food chemistry* 320, p. 126627.

phycobiliproteiner³⁰. Mange af disse pigmenter har en gavnlig effekt på menneskers sundhed og indtages i form af kosttilskud. Algernes pigmenter er også en værdifuld kilde til naturligt farvestof til fødevarer. Mikroalger af slægten *Scenedesmus*, som den der dyrkes i ReMAPP-projektet, er kendt for at tåle meget høje lysintensiteter, hvilket bl.a. skyldes deres produktion af pigmentet lutein, der er en carotenoid som har en kraftig gul-orange farve. Normalt udvindes lutein som naturligt farvestof fra tagetesblomster, der har et luteinindhold på ca. 0.03 % af tørstoffet, hvorimod *Scenedesmus* alger kan indeholde op til 20 gange mere³¹.

En af de mest værdifulde pigmenter man kan få fra mikroalger, er astaxanthin, der er en kraftig antioxidant og rødt farvestof, der især udvindes fra sporerne af den grønne ferskvandsalge *Haematococcus pluvialis*.

Forædling af mikroalger

På nuværende tidspunkt er det især anvendelsen af mikroalger til produktion af fedtsyrer, protein og pigmenter, der har særligt fokus, men i fremtiden forventes en række nye anvendelsesmuligheder vha. målrettede genetiske værktøjer som CRISPR/Cas9 teknologi³². Her er både tale om en række forskellige biofarmaceutiske, sundhedsfremmende og miljøvenlige produkter. Blandt andet anses det som en mulighed, at mikroalger kan anvendes som "små encellede plantefabrikker", der bl.a. kan producere cannabinoider, antivirale substanser, biopesticider og biostimulanter, men også de førnævnte særlige flerumættede fedtsyrer, der styrker immunforsvaret og anvendes til behandling af en lang række sygdomme samt pigmenter til UV-beskyttelse,

Ligesom de planteafgrøder vi kender i dag, er resultatet af mange års forædling kan mikroalger forædles så de får forbedrede eller helt nye egenskaber. Dette kan ske enten ved at benytte traditionel forædling eller ved tilfældig eller målrettet mutagenese, hvor man anvender forskellige molekylærbiologiske teknikker kombineret med selektion af særlige "kvaliteter/træk". Sammenlignet med landplanter er der dog en del udfordringer forbundet med forædling af mikroalger. Blandt andet er det langt fra alle alger, der har seksuel reproduktion, hvilket gør det problematisk at udføre traditionel forædling. Herudover kan det, især ved tilfældig mutation, være en udfordring at finde frem til netop de - eller måske bare den ene algecelle, der besidder de kvaliteter man leder efter³³.

Uanset hvilken forædlingsteknik der anvendes, er det afgørende at tage udgangspunkt i en stærk vildtype da dette vil øge chancen for et succesfuldt resultat.

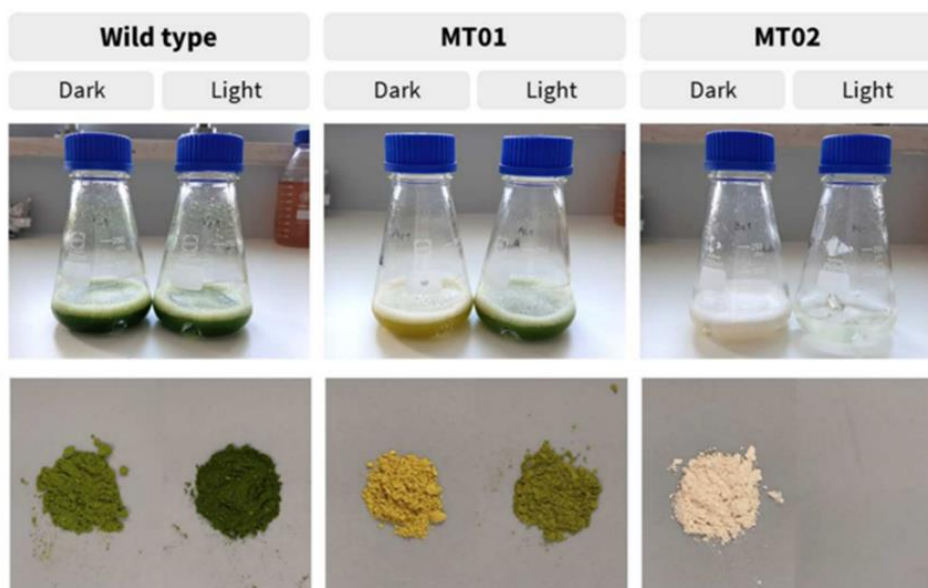
³⁰ Koyande, A.K., Chew, K.W., Rambabu, K., Tao, Y., Chu, D.-T. and Show, P.-L. 2019. Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans. *Food Science and Human Wellness* 8(1), pp. 16–24.

³¹ Sánchez, J.F., Fernández-Sevilla, J.M., Ación, F.G., Cerón, M.C., Pérez-Parra, J. and Molina-Grima, E. 2008. Biomass and lutein productivity of *Scenedesmus almeriensis*: influence of irradiance, dilution rate and temperature. *Applied Microbiology and Biotechnology* 79(5), pp. 719–729.

³² Abu-Ghosh, S., Dubinsky, Z., Verdelho, V. and Iluz, D. 2021. Unconventional high-value products from microalgae: A review. *Bioresource Technology* 329, p. 124895.

³³ Torres-Tijji, Y., Fields, F.J. and Mayfield, S.P. 2020. Microalgae as a future food source. *Biotechnology advances*, p. 107536.

På Københavns Universitet (KU-FOOD) arbejder man med forædling af mikroalger bl.a. vha. tilfældig mutation, hvor man ved brug af UV-bestråling har udviklet farveløse stammer af den fødevegogdkendte *Chlorella vulgaris*. De farveløse alger mangler deres fotosynteseapparat og skal derfor dyrkes heterotroft i fermentorer, som tidligere beskrevet (boks 1). Figur 7 viser hvordan grønne mikroalger kan forædles så de bliver delvist eller helt farveløse og dermed mister evnen til at vokse vha. fotosyntese. Manglen på farve giver mulighed for at anvende algebiomassen i flere sammenhænge end de grønne vildtyper, der vil farve de fødevarer som de anvendes i. På KU arbejdes der også med forædling vha. målrettet mutation. Her har man for første gang overført gener fra bakterier til mikroalger så de under fotosyntese kan producere forskellige aromatiske aminosyrer (AAA) som de udskiller i mediet. Aromatiske aminosyrer anvendes til produktion af alt fra smags- og sødestoffer til medicin mod Parkinsons sygdom. Normalt produceres AAA vha. kemisk syntese ud fra mere eller mindre giftige kemikalier og resulterer i stoffer, der er svære at oprense. Fremtidig produktion af AAA ud fra mikroalger vil medføre en mere miljøvenlig og bæredygtig proces³⁴.



Figur 7: Eksempel på hvordan mikroalger kan forædles så de bliver lysere (mutant MT01) eller helt farveløse (mutant MT02) ved heterotrof dyrkning, figur modificeret ud fra Schüler et al.³⁵.

³⁴ Brey LF, Włodarczyk AJ, Bang Thøfner JF, Burow M, Crocoll C, Nielsen I, et al. Metabolic engineering of *Synechocystis* sp. PCC 6803 for the production of aromatic amino acids and derived phenylpropanoids. *Metab Eng.* 2020 Jan;57:129–139.

³⁵ Schüler, L., Greque de Morais, E., Trovão, M., et al. 2020. Isolation and characterization of novel *Chlorella vulgaris* mutants with low chlorophyll and improved protein contents for food applications. *Frontiers in bioengineering and biotechnology* 8, p. 469.

Udfordringer

Produktionen og kommercialisering i fuld skala af mikroalgers højværdiprodukter er stadig forbundet med en del forhindringer og udfordringer. Disse spænder fra de lave nuværende produktionsmængder og høje produktionsomkostninger (op til € 29.000 pr. ton)³ til manglende udvikling af downstream-processeringen til at genindvinde og valorisere indholdsstofferne. Derudover er der stadig lovgivningsmæssige udfordringer med at opnå en kommerciel godkendelse af mikroalgeafledte produkter og ikke-harmoniserede love og regler i de forskellige EU-markedssektorer³⁶.

Vandgenbrug

Dyrkning af mikroalger kræver store vandmængder, så det er vigtigt at kunne genbruge vandet som algerne dyrkes i for at spare på vand, energi og næringsstoffer. Ikke alle mikroalger vokser godt når vandet genbruges, hvilket kan skyldes de metabolitter algen selv udskiller, men også opkoncentrering af tomme cellevægge, der kan få algerne til at klumpe sammen³⁷. Der findes dog også alger, der vokser bedre når vandet genbruges. Dette gælder blandt andet grønalger af *Scenedesmus* slægten. Denne alge dyrkes i ReMAPP projektet, hvor man ser en tendens til at algens vækst optimeres efterhånden som vandet genbruges, hvilket har afgørende betydning for dyrkningssystemets rentabilitet.

Algehøst/afvanding

En af de største udfordringer ved mikroalgeproduktion i industriel skala er høsten/afvandingen af de meget små algeceller, der for grønalger som *Chlorella* og *Scenedesmus* ligger i størrelsesordenen 10-20 µm. Faktisk udgør høsten omkring 20-30% af de totale omkostninger forbundet med produktion og processering af mikroalger³⁸.

Der findes en række forskellige måder at høste alger på, men til industriel produktion er der kun en håndfuld kvalificerede metoder, hvis det skal give mening økonomisk og praktisk.

Nogle af de vigtigste krav til høstmetoder er: Afvandingseffektivitet, pris, kapacitet, tid, miljøvenlighed, artspecificitet og genanvendeligheden af dyrkningsvandet.

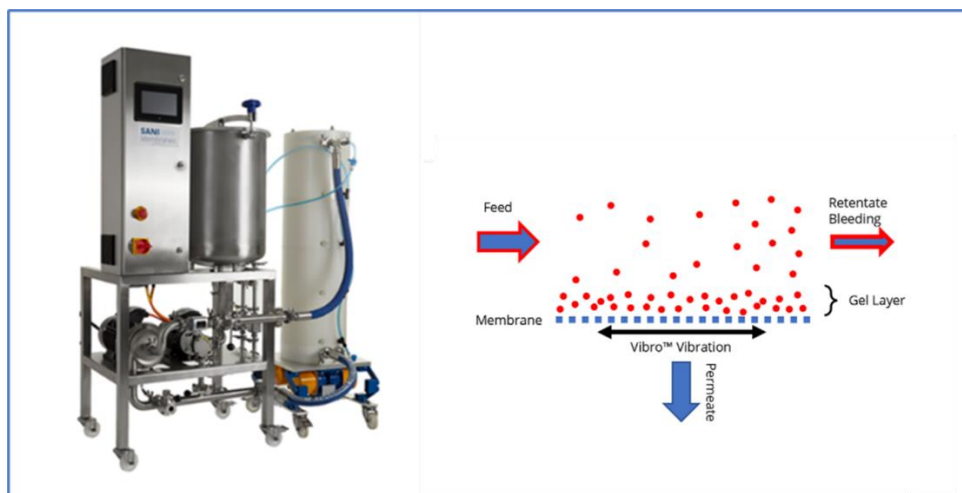
Blandt de bedste og mest udbredte algehøstmetoder er diskcentrifugering, cross flow filtrering, dekanter centrifugering samt flokkulering. Især høstprocesser, der kombinerer indledende flokkulering/sedimentation efterfulgt af enten centrifugering eller filtrering kan øge effektiviteten og reducere omkostningerne for algehøsten.

En særlig type filter kaldet Vibro filter, der produceres af det danske firma SANI Membranes ser ud til at være velegnet til høst af mikroalger (figur 8).

³⁶ Christien Enzing & Matthias Ploeg & Maria Barbosa & Lolke Sijtsma, 2014. "Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe," JRC Working Papers JRC85709, Joint Research Centre (Seville site).

³⁷ Farooq, W., Suh, W.I., Park, M.S. and Yang, J.-W. 2015. Water use and its recycling in microalgae cultivation for biofuel application. *Bioresource Technology* 184, pp. 73–81.

³⁸hattab, M.A. 2015. Microalgae harvesting methods for industrial production of biodiesel: critical review and comparative analysis. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications* 05(02).



Figur 8: Den danske membranproducent SANI membranes patenterede Vibro teknologi benytter sig af en unik, vibrerende membran, der gør det muligt at filtrere algecellerne fra mediet ved et langt lavere energiforbrug sammenlignet med eks. traditionel crossflow-filtrering.

Ud over at bidrage til en effektiv og skånsom høst af mikroalger resulterer membranen i et cellefrit filtrat, der gør det muligt at genanvende dyrkningsvandet (permeatet) i algedyrkningen, hvilket er afgørende for at bringe omkostningerne forbundet med mikroalgeproduktion ned (<https://www.sanimembranes.com/algae/>).

Fordøjelighed

Grønalgler som *Chlorella* og *Scenedemus* er omsluttet af en hård og kompleks cellevæg, som består af flere lag³⁹. Cellevæggen betyder at algenes fordøjelighed kun ligger på omkring 50-60% for de ubehandlede celler⁴⁰. Tilgængeligheden af proteinet kan øges ved at behandle algebiomassen mekanisk og/eller enzymatisk. Man ved endnu kun lidt om hvad mikroalgers cellevægge består af³⁹. Et mere indgående kendskab til cellevæggens bestanddele vil øge muligheden for at nedbryde den i en mild behandling med specifikke enzymer, hvilket kan gøre det muligt at oprense værdifulde, funktionelle proteiner.

På Københavns Universitet (KU-IGN) arbejder man med at finde nænsomme metoder til at nedbryde algecellevæggene så de forskellige indholdsstoffer bliver mere tilgængelige. Eksempelvis arbejdes der med at åbne grønalg *Scenedesmus*, for at gøre denne alges høje proteinindhold mere tilgængeligt. Dermed kan algen bruges til foder for enmavede dyr som fjerkræ, grise eller sågar som fødevarer for mennesker. Man kan dog ikke anvende for hårdhændede metoder da det vil gå ud over kvaliteten af proteinet, derfor bliver forskerne nødt til at opbygge en detaljeret viden om algenes cellevægge for at kunne designe en målrettet enzymatisk metode til at lukke cellerne op.

³⁹ Coelho, D., Lopes, P.A., Cardoso, V., et al. 2019. Novel combination of feed enzymes to improve the degradation of *Chlorella vulgaris* recalcitrant cell wall. *Scientific Reports* 9(1), p. 5382.

⁴⁰ Canelli, G., Tarnutzer, C., Carpine, R., et al. 2020. Biochemical and nutritional evaluation of *Chlorella* and *Auxenochlorella* biomasses relevant for food application. *Frontiers in nutrition* 7, p. 565996.

Ekstrudering er en anden metode, der kan øge fordøjeligheden af mikroalger⁴¹.

I projektet "mikroalger til fødevarer" (2020) støttet af Danish Food Innovation, arbejdede man bl.a. med ekstrudering af mikroalger (figur 9). Ekstrudering er en proces, der involverer kortvarigt tryk og høj temperatur og den anvendes bredt til behandling af både foder og fødevarer. Her så man vha. mikroskopi, hvordan algernes cellevæg blev slået i stykker under processeringen, hvilket sandsynligvis også øger fordøjeligheden. Herudover kan ekstrudering også forbedre teksturen og smagen af algerne samt øge produktets holdbarhed.



Figur 9: Ekstrudering af mikroalger på Teknologisk Institut i projektet "Mikroalger til Fødevarer" 2020, støttet af Danish Food Innovation. Biomasse af den danske Scenedesmus alge blev blandet med ærtemel. Det ekstruderede produkt blev tilberedt og smagstestet med et lovende resultat.

Lovgivning og sikkerhed

Anvendelsen af mikroalger i foder og fødevarer er meget ny og godkendelse af nye algearter og nye produkter kræver omfattende godkendelse. I Europa er det European Food Safety Authority (EFSA), der står for denne godkendelse. Vurderingen tager både højde for indholdet af kontaminanter, tungmetaller og andre toksiner i produktet, men selve dyrkningsmetoder og processeringen bliver også vurderet. Idet mikroalger er en meget ny og anderledes afgrøde, er det en udfordring at få godkendt nye produkter da er lovgivning på området stadig uklar⁴². På Teknologisk Institut er man i tæt kontakt med fødevarer- og Erhvervsstyrelsen og under Erhvervsstyrelsens afklarings- og testforløb er der, i forbindelse med ReMAPP-projektet, udarbejdet en vejledning fra FVST vedr. dyrkning af alger til nyt foder.

Der er ikke en godkendelsesprocedure for fodermidler. Her er kravet, at det skal være et "kendt" fodermiddel, dvs. at det skal være opført i enten fodermiddelfortegnelsen eller i fodermiddelregisteret. Visse algeprodukter fremgår allerede af fortegnelsen over "kendte" fodermidler. Opførelsen i registeret indebærer ikke en godkendelse af produktet. Der er således udelukkende tale om en registrering.

⁴¹ Wang, M., Cheng, H., Chen, S., et al. 2018. Microalgal cell disruption via extrusion for the production of intracellular valuables. *Energy* 142, pp. 339–345.

⁴² van der Spiegel, M., Noordam, M.Y. and van der Fels-Klerx, H.J. 2013. Safety of Novel Protein Sources (Insects, Microalgae, Seaweed, Duckweed, and Rapeseed) and Legislative Aspects for Their Application in Food and Feed Production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 12(6), pp. 662–678.

Den virksomhed, der bruger et fodermiddel i registeret, står selv inde for, at det er egnet og sikkert til dyrefoder, og man skal ved tilsyn fra Fødevarestyrelsen kunne dokumentere dette.

Case: ReMAPP – et dansk pilotprojekt

Udendørs dyrkning af en lokal mikroalge i Danmark

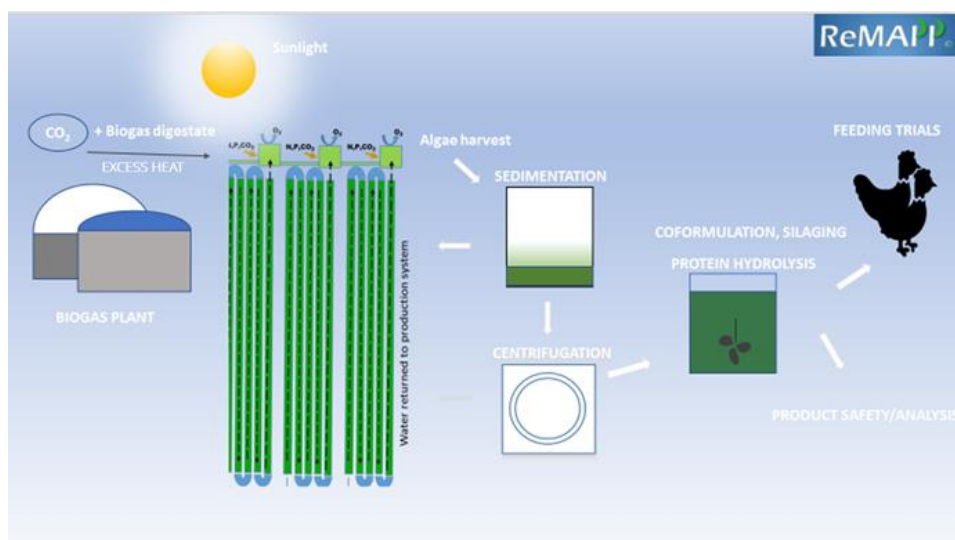
Projektet "Resource efficient Microalgae Protein Production" (ReMAPP) (2018-2022) er et Grand Solutionsprojekt støttet af Innovationsfonden: <https://www.teknologisk.dk/projekter/projekt-remapp-marker-med-mikroalger-skaber-fremtidens-baeredygtige-protein/40041>

Projektet har til formål at udvikle et rørformet, udendørs algedyrkningssystem, der kan integreres med biogasindustrien som skal forsyne algeproduktionen med CO₂, næringsstoffer og overskudsvarme (figur 10, boks 2). Der tages udgangspunkt i et lokalt *Scenedemus* isolat, der har et proteinindhold på over 50% af tørstoffet (figur 4, 5, 6 og forsiden). I den første del af projektet har man på Teknologisk Institut udviklet et udendørs, horisontalt dyrkningssystem, der er en reaktor på 500-2000 liter, bygget op af moduler af 100 meter lange plastikrør (figur 3). I forbindelse med dyrkningssystemet udvikles der et algehøstsystem, der anvender Vibromembraner fra SANI Membranes (figur 8).

I 2022 opføres et større dyrkningssystem på omkring 11.000 liter på Nature Energys biogasanlæg hos Månssons i Brande.

I projektet udvikles samtidig konserverings- og enzymteknologi, der skal sikre, at algerne har en optimal lagringsstabilitet, og at fordøjeligheden af proteinerne har en kvalitet, der er egnet til foderprotein. Teknologien til dette udvikles i et samarbejde mellem Københavns Universitet og enzymvirksomheden Tailorzyme.

Produktsikkerheden evalueres undervejs af Danish Meat Research Institute, der hører under Teknologisk Institut. Foderkvaliteten testes endeligt i projektet af fodervirksomheden Hamlet Protein ved anvendelse af den processerede algebiomasse i fodringsforsøg med slagtekyllinger.



Figur 10: Et overblik over ReMAPP-projektet (2018-2022), hvor proteinrige mikroalger dyrkes ud fra biogasinindustriens sidestrømme.

Siden projektets start har det danske isolat af grønalgen *Scenedesmus*, været dyrket på pilotanlægget i Tåstrup med vækstrater, der svarer til en proteinproduktion på omkring 15 ton protein/hektar/år. Det er cirka 20 gange højere end proteinudbyttet for sojabønner dyrket i Brasilien, hvor det årlige proteinudbyttet ligger mellem 0.6 til 1.2 ton protein per hektar⁴³.

I første omgang skal algen testes som foder, men i fremtiden vil det være relevant at anvende den til fødevarer. Algens høje indhold af den svovlholdige aminosyre methionin gør den særligt velegnet som foder til kyllinger, idet fjerkræ har behov for denne aminosyre for at opretholde en sund fjerdragt. Af denne grund er det netop kyllinger man har valgt at udføre fodringsforsøg med i ReMAPP projektet.

Før algen kan dyrkes i industriel skala og anvendes som foder eller fødevarer er der en række udfordringer, der skal løses. Dette drejer sig i særdeleshed om at få hul på algens hårde cellevæg, der giver en lav fordøjelighed. Herudover er der behov for at reducere produktionsomkostningerne, hvor især algehøsten dvs. afvandingen skal gøres mere energieffektiv.

⁴³ van der Krimpen, M.M., Bikker, P., van der Meer, I.M., van der Peet-Schwering, C.M.C. and Vereijken, J.M. 2013. Cultivation, processing and nutritional aspects for pigs and poultry of European protein sources as alternatives for imported soybean products.



Status på dansk mikroalgeproduktion

På nuværende tidspunkt findes der kun en lille håndfuld danske algeproducenter, hvoraf størstedelen er startup-virksomheder. På dette område er Danmark altså en del efter flere andre lande i Europa, hvor mikroalgeproduktionen allerede er etableret. En udfordring er også at mikroalgeproducenter ikke er en specificeret branche i Danmark. Produktion af mikroalger skal registres som primærproduktion⁴⁴ og regnes generelt som en del af akvakulturbranchen, men der findes ingen brancheorganisation eller tilsvarende endnu. Vi har i forbindelse med udarbejdelse af denne rapport kontaktet de danske producenter for at få deres syn på markedet og de muligheder og udfordringer der er i det og for at give en markedsbaseret perspektivering. Tre af dem har responderet og deres input er gengivet som bilag bagerst i rapporten.

⁴⁴ Vejledning om autorisation og registrering af fødevarer virksomheder m.v. (Autorisationsvejledningen). <https://www.retsinformation.dk/eli/accn/C20190912660>

Kommende dansk forskning på mikroalgeområdet i 2022 og frem

I de kommende år arbejdes der i Danmark videre på de lovende resultater, der indtil nu er opnået på mikroalgeområdet. Det gælder både inden for forædling, cirkulær bioøkonomi og produktion samt oprensning af værdifulde indholdsstoffer. Det sker i et tæt samarbejde mellem forskere og industrien, hvor udveksling af viden skaber forudsætningen for at opnå de bedste resultater, der kan styrke den danske mikroalgeindustri.

ProLocAL

GUDP (2022 -2024)

Formålet med ProLocAL er at reducere klimaaftrykket fra økologisk kyllingekød ved at fodre kyllinger med mikroalger og lokalt dyrkede bælgplanter i stedet for importerede proteinkilder. Gennem forskning og demonstration løses udfordringen for det aktuelle produktionssystem, hvor økofjerkræ i dag overforsynes med protein for at kompensere for foderkildens lave indhold af svovlholdige aminosyrer, hvilket øger NH₃-fordampning fra stalden og forringer dyrevelfærden. Anvendelse af proteinkilder som mikroalger med et højt methioninindhold kan løse dette problem og ved at producere proteinkilderne lokalt, undgås foderimport. Dette vil fremme den økologiske tankegang og styrke produktets troværdighed samtidig med at klimaaftryk og miljøbelastning mindskes og dyrevelfærden forbedres. Nyhedsværdien og det forskningsmæssige arbejde i ProLocAL ligger i 1) at anvende protein fra lokalt producerede mikroalger til økofjerkræ 2) øge fordøjeligheden ved ikke-kemisk forbehandling af mikroalger via ekstrudering 3) forbedre foderets samlede næringsværdi ved at supplere med protein fra bælgplanter, der kan dyrkes lokalt af økologiske fjerkræproducenter, 4) demonstrere dyrkning af lokale bælgplanter og anvendelse af foder med mikroalger og bælgplanter i forsøg med økologiske slagtekyllinger 5) evaluere effekt på klimaaftryk, dyrevelfærd og kødkvalitet.

Projektet ledes af Århus Universitet og udføres i samarbejde med SEGES, KU-FOOD, Rokkedahl Landbrug, Vestjyllands Andel og Teknologisk Institut.

MASSPROVIT

Danmarks Frie Forskningsfond (2022-2025)

Nogle af de vigtigste udfordringer, der hæmmer en mere udbredt mikroalgeproduktion i Danmark, er algernes væksthastighed, udbytte og biotilgængeligheden af protein og vitaminer. MASSPROVIT vil benytte forædlingsteknikker, som er kendt fra planteverdenen, til at udvikle mikroalgestammer, der vokser hurtigt og kan give et øget udbytte og biotilgængelighed af proteiner og vitaminer. I projektet vil man også optimere dyrkningsbetingelserne med henblik på at opnå en optimal sammensætning af

mikroalgerne i forhold til deres indhold af essentielle aminosyrer, omega-3 fedtsyrer, vitamin D og K2. Det miljømæssige fodaftryk beregnes, herunder CO₂ aftrykket, ved den optimerede produktion af mikroalgerne og sammenlignes med CO₂ aftrykket fra soja- og animalske protein. Beregninger kan danne grundlaget for udvikling af en ny sundheds- og miljømæssig mere bæredygtig plantebaseret nordisk diæt. De nuværende proteinkilder kan ikke på en bæredygtig måde møde behovet for protein i vores kost i fremtiden men mikroalger har potentialet til at kunne blive en miljømæssig bæredygtig og sund kilde til protein.

MASSPROVIT ledes af Charlotte Jacobsen, DTU-FOOD og udføres i samarbejde med Poul Erik Jensen og Marianne Thomsen, KU-FOOD.

Two-in-one: Valorising dairy wastewater to produce food ingredients using microalgae støttet af Danmarks Frie Forskningsfond

De danske mejerier producerer flere millioner liter procesvand, der indeholder betydelige mængder af uønskede organiske og uorganiske stoffer såsom kulhydrater, aminosyrer, fosfater og nitrater. Two-in-one projektet vil bidrage til en grundlæggende forståelse af hvordan disse forurenende stoffer kan udnyttes som næringsstoffer til at dyrke mikroalger, der således vil producere store mængder flerumættede fedtsyrer (PUFA) og antioxidanter (carotenoider), som kan anvendes som sunde fødevareingredienser.

Projektet vil besvare en række grundlæggende videnskabelige spørgsmål, såsom 1) Hvilke mikroalger er i stand til effektivt at optage næringsstoffer fra mejerispildevand? 2) Kan vi forædle disse mikroalger til at optage kulhydrater fra spildevand? 3) Kan biosyntese af PUFA og antioxidanter i mikroalgerne styres via sammensætningen af spildevandet? og 4) Hvordan ekstraheres PUFA og antioxidanter fra algecellerne med højt udbytte og i stabil form ved brug af nye miljøvenlige metoder?

Resultaterne af projektet vil give nøgleviden til grønnere behandling af spildevand generelt og især fra danske mejerier og samtidig tilføre værdi til spildevandet.

Projektet ledes af Mahesha Poojary, KU-FOOD, og udføres i samarbejde med Poul Erik Jensen, KU-FOOD, and Brijesh K. Tiwari, Teagash, Ireland.

Bilag 1 – Oplysninger fra danske mikroalgeproducenter

ALGIECEL ApS

Etablerings år: 2021

Antal ansatte: 5

Lokalitet/region: Odense/København/Nordjylland

<https://www.ALGIECEL.com/>



Meget kort – hvad laver I?

Carbon Capture as-a-service - ALGIECEL udvikler optimerede og standardiserede løsninger til bortskaffelsen af CO₂, i form af et kompakt og mobilt mikroalge-fotobioreaktor system (CC-reaktor). Med afsæt i den biologiske fotosynteseproces, omdanner ALGIECELS CC-reaktorer, alger og CO₂ til ilt og højværdiprodukter i form af Ω-3 olier og/eller proteinrig biomasse. CC-reaktorenes opsæt beror sig såvel på en balance mellem fire kontrollerbare faktorer 1) CO₂ kilden, 2) lyskilden, 3) temperaturen samt 4) tilførelsen af næringsstoffer. ALGIECELS CC-reaktorsystem har et plug-and-play setup og leveres i 40" containere on-site, som monitoreres fra centrale servicecentre og af on-site partnere

Hvorfor valgte I at arbejde med mikroalger?

Med eksponentielt stigende globale masseproduktioner (med dertilhørende transport-og installationer) stiger CO₂ forureningerne støt. Konsekvenserne er fatale for klimaet, derfor er CO₂-udledningerne kommet på den politiske dagsorden. For flere virksomheder betyder dette, både nu og i fremtiden, at der skal budgetteres med bortskaffelsen af CO₂ i forbindelse med produktion for at der kan opnås klimaneutralitet.

ALGIECEL er grundlagt af Henrik Busch-Larsen i 2021, tidligere CEO i Unibio A/S, og har som mål at skabe en biologisk baseret carbon-capture (CC) teknologi som skal være omkostningsneutral for køberen.

Hvad ser I som branchens – og jeres – største udfordring?

En generel ulempe ved stor skala algekultivering er at små partier af kulturer ofte har højere max udbytte pga. simple optimering. ALGIECEL vil også lave stor skala algeproduktion, men derimod i en modul baserede løsninger med mange enheder. Vi har planer om at integrere machine-learning løsninger til data management og kultiveringsoptimering. Siden hvert modul er bygget ud fra samme standard fotobioreaktor, med samme vækstbetingelser, kan hvert modul sammenlignes som replikater i et machine-learning perspektiv, dvs. den store udfordring omkring skalering og dermed også rentabilitet søges løst gennem reaktordesign og selve forretningsmodellen.

Hvor stort tror I potentialet er for mikroalgeprodukter?

De algebaserede produkter retter sig specifikt mod voksende protein- og fedtsyrefodermarkeder, hvor stigende priser og manglende bæredygtighed ved konventionelle produkter skaber en niche for masseproducerede, bæredygtige mikroalger. Af hensyn til skalerbarhed vil algebiomasse så i fremtiden blive anvendt på højvolumenmarkeder, der efterspørger biomasse til lavere priser, såsom kosttilskud eller dyrefoder.

Hvilken type produkter tror I vil være de mest betydende på markedet de kommende år?

Vores produktstrategi fokuserer først på dyrefoder og agter at tilføje flere fokusområder efter kommercialisering. Et potentielt produktområde er kosmetik, og vi har til hensigt at udvikle en køreplan for stammer, biomasse sammensætning og regulatoriske krav. Intentionen bag at starte med foder ligger i den enkle produktion, da det ikke er nødvendigt at fraktionere biomassen til olie og tørmasse. Herved tages der hensyn til enhedsøkonomi og driftsomkostninger, men med tiden forventer vi at blive bedre og vil dermed også begive os ud i mere komplekse produktsektorer.

PBR'en anvendes til forskellige algestammer og kvalitet, hvilket gør produktion til forskellige målmarkeder mulig. Vi vil fokusere på algestammer, der enten er fritaget for novel food regler eller allerede er under godkendelse

Aliga ApS

Etablerings år:

2016

Antal ansatte:

13

Lokalitet/region:

Vandværksvej 12, 9800 Hjørring - Nordjylland

<https://aliga.dk/>



Meget kort – hvad laver I?

Aliga producerer som den eneste kommercielle mikroalge producent af *Chlorella Sorokiniana* i Skandinavien. Produktionen foregår ved heterotropisk/fermenteringsteknologi og er til fiskefoder-, kosttilskuds- og fødevaringrediensmarkedet.

Hvorfor valgte I at arbejde med mikroalger?

Stifterne af virksomheden har arbejdet med mikroalger siden 2014 og interessen for at arbejde mikroalger kommer fra den store diversitet i anvendelse af biomassen til f.eks. Pharma, foder, plastik, fødevarer, kosttilskud og kosmetik

Hvad ser I som branchens – og jeres – største udfordring?

Vi ser at forbrugernes accept af algen som en bæredygtige plante baseret protein kilde stiger gradvist men at producenterne indenfor f.eks. fødevarer ikke har forstået at anvende potentialet helt ud endnu, grundet både duft- og farvekoncentrationen i algen og den derved er svær at tilsætte ingredienser uden at efterlade en kraftig farve og duft i produktet.

Hvor stort tror I potentialet er for mikroalgeprodukter?

Vi mener, også med vores patenteret proteinrige farve- og duftneutrale opfindelse, at have tilført fødevaringrediens sektoren et SUPERFOOD produkt som ikke farver eller har eftersmag af alger. Potentialet for netop dette produkt er gastronomisk.

Potentialet i mikroalger generelt er voldsomt stort, men der er dog udfordringer på såvel kultiverings teknologier og cost values af færdig udviklet produkter som der skal findes bedre skalerbare og økonomiske løsninger på.

Hvilken type produkter tror I vil være de mest betydende på markedet de kommende år?

Ingen tvivl, det er kosttilskud og fødevarer ingredienser, biofuel kommer aldrig i betragtning før der findes eksplosive vækst teknologier som ikke kræver meget energi.

De teknologier som typisk anvendes i dag på Photo syntese kræver ekstreme mængder af jordareal tilgængeligt, samt infrastruktur på især vand skal være voldsom stor. fordelene ved Photo syntese systemer er at de er meget klima bæredygtig men desværre langt fra økonomisk bæredygtig her i Europa.

Ved fermentering kan man derimod bruge industriel jord og gøre det i vertikale skaleringer, hvilket giver en lavere omkostning pr kg/biomasse der produceres. Fermentering er ca. 5-8000 gange mere effektivt end de kendte Photo syntese systemer som kan købes på markedet i dag. Ulempen ved fermentering kommer ved at det er færre alger der kan dyrkes på fermentering og det er en energikrævende proces.

NatuRem Bioscience ApS

Etablerings år: 2018

Antal ansatte: 2

Lokalitet/region: København

NATUREM BIOSCIENCE

Meget kort – hvad laver I?

NatuRem Bioscience ("NRB") udvikler fødevarer og godkendte mikroalger til anvendelse i fødevarer samt foder. Vores unikke algestammer har forbedrede sensoriske egenskaber, såsom neutral farve samt smag, der sikrer en bredere applikationsplatform. Derudover, arbejder vi på at optimere den ernæringsmæssige sammensætning med fokus på højt proteinindhold samt sunde fedtstoffer af Omega-3 typen.

Vi dyrker vores alger ved brug af en steril fermenteringsproces, der også kendes fra store danske medicinal - og samt ingrediensvirksomheder. Denne proces sikrer et højt udbytte samt en biomasse uden indhold af klorofyl, der normalt giver algen dens markante grønne farve.

Som virksomhed er vi nu på vej ind i opskaleringsfasen, og vores forventning er at have vores første produkter på markedet i 2023.

Hvorfor valgte I at arbejde med mikroalger?

Mikroalger dyrket heterotroft har potentialet til at erstatte en lang række fødevarer ingredienser der benyttes i meget stor skala i dag, og som ikke er bæredygtige. Her kan nævnes animalske proteinkilder, sojaprotein, fiskemel samt palmeolie og andre vegetabiliske olier. Algerne kan dyrkes meget intensivt og med markant lavere CO₂ aftryk end de nævnte fødevarer ingredienser. Det vil sige, at man kan få langt højere udbytte af næringsstoffer med det samme dyrkningsareal og dermed kan der blive plads til mere natur og biodiversitet. Ud over dette har mikroalger en næringsmæssigt optimal sammensætning, der er bedre for den almene folkesundhed end mange ingredienser der benyttes i vores fødevarer i dag.

Hvad ser I som branchens – og jeres – største udfordring?

Den største udfordring ligger i opnå tilstrækkeligt momentum til at gennemføre et paradigmeskifte i den måde vi producerer fødevarer på. Vores teknologi komplementerer i høj grad den traditionelle landbrugsproduktion, og hvis mikroalger skal blive en succes, er det nødvendigt, at der opnås support samt samarbejde med landbruget. Derudover skal de nye mikroalgebaserede fødevarer ingredienser applikationsvalideres og godkendes af fødevarerproducenterne. Dette er en stor udfordring, da funktionaliteten samt omkostningen skal matche de nuværende ingredienser, der benyttes i fødevarerindustrien.

Der ligger en økonomisk udfordring i at få etableret en tilstrækkelig produktionskapacitet til at udfylde behovet fra fødevarerindustrien. Dette kræver risikovillig kapital fra både privat og offentlig side.

Hvor stort tror I potentialet er for mikroalgeprodukter?

Forudsat at mikroalgerne kan dyrkes på stor skala til en lav enhedsomkostning og med de rette funktionelle - og næringsmæssige egenskaber, er potentialet meget stort. Alene markederne for soja – og valle protein, samt kød - og mejeri alternativer er tilsammen større end 200 milliarder dollars.

Hvilken type produkter tror I vil være de mest betydende på markedet de kommende år?

Kosttilskud har været det dominerende segment for mikroalger indtil nu. Men der sker nu en stigning i produkter til generelle fødevarer, dog fortsat i moderate mængder. Derudover benyttes alger også i stigende grad indenfor pet food og akvakultur på grund af det høje indhold af Omega-3 samt protein.