

2023:00517 - Åpen

Rapport

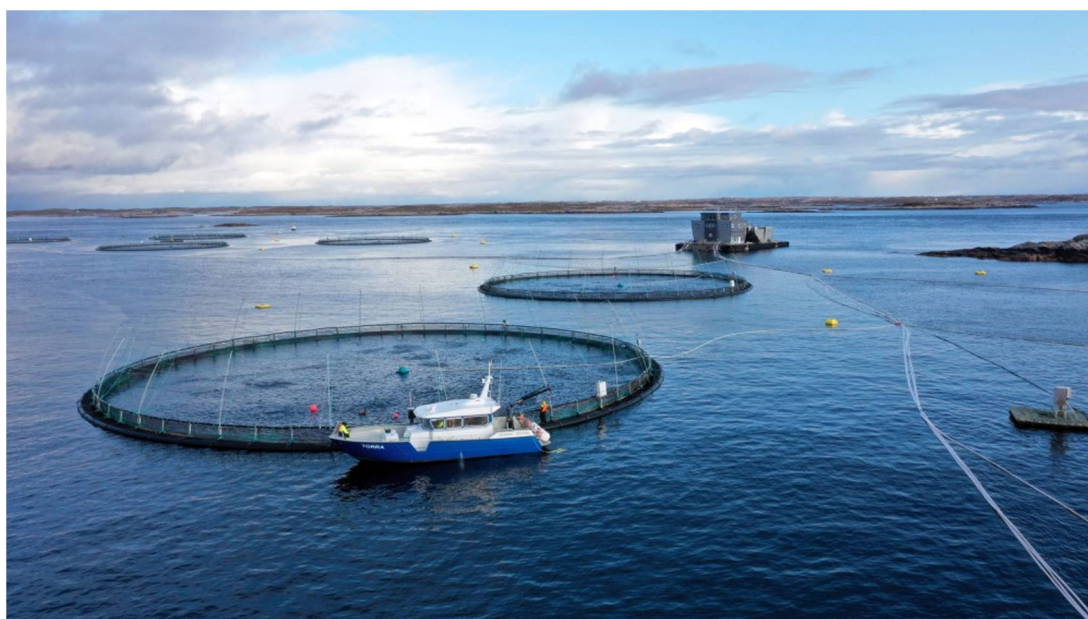
Veikart for industriell fremstilling av norske fôrråvarer (protein)

Et svar på det målrettede samfunnsoppdraget om fremstilling av bærekraftig norsk fôr til akvakultur og husdyrhold.

(Meld.St.5, Langtidsplan for forskning og høyere utdanning 2023-2032)

Forfattere

Karl A. Almås (red.), Kjell D. Josefsen, Shraddha Mehta, Andreas Hagemann, Arne Malzahn, Merete B. Schröder, Marianne Nymark, Ida G. Aursand



SINTEF Ocean AS

Postadresse:
Postboks 4762 Torgarden
7465 Trondheim

Sentralbord: 46415000

Foretaksregister:
NO 937 357 370 MVA

Rapport

Veikart for industriell fremstilling av norske fôrråvarer (protein)

| RAPPORTNR | PROSJEKTNR | VERSJON | DATO |
|------------|-------------|---------|------------|
| 2023:00517 | 302007491-2 | 1.0 | 2023-05-04 |

EMNEORD:Fôr
Bærekraft
Selvforsyningsgrad
Protein
Encelleprotein**FORFATTER(E)**

Karl A. Almås (red.), Kjell D. Josefsen, Shraddha Mehta, Andreas Hagemann, Arne Malzahn, Merete B. Schröder, Marianne Nymark, Ida G. Aursand

OPPDRAKSGIVER
SINTEF Ocean AS**OPPDRAKSGIVERS REF.**
SINTEF**ANTALL SIDER OG
VEDLEGG:**
60 + vedlegg**GRADERING**
Åpen**GRADERING DENNE SIDE**
Åpen**ISBN**
978-82-14-07808-4**SAMMENDRAG**

Norge har som ambisjon at norsk matproduksjon (husdyrhold og akvakultur) i 2030 skal være basert på bærekraftige norske fôrråvarer. Samtidig er det et mål å øke produksjonen av oppdrettsfisk fra ca. 1,4 millioner tonn per år i dag til 5 millioner tonn per år i 2050. Dette vil kreve om lag 2 millioner tonn fôrprotein per år i 2050. I dag går det om lag 350 tusen tonn fôrprotein i form av kraftfôr til varmblodige husdyr og om lag 700 tusen tonn fôrprotein til akvakultur. Av dette fôrproteinet er totalt omkring 180 tusen tonn norskprodusert, det meste, om lag 110 tusen tonn, i form av kornråvarer til kraftfôr for husdyr. Rapporten vurderer hvilke muligheter som foreligger for at Norge i 2030 (totalt behov ca. 1.5 mill. tonn fôrprotein) og i 2050 (totalt behov ca. 2.4 mill. tonn fôrprotein) skal være selvforsynt med bærekraftig fôrprotein. Konklusjonen er at med en sterk satsing på utvikling og industrialisering av norske ressurser på land og i hav kan vi klare å tilvirke 489 tusen tonn fôrprotein egnet for oppdrettsnæringen i 2030 og 700 tusen tonn i 2050. Ved realisering av vekstambisjonen for oppdrettsnæringen tilsvarer dette en selvforsyningsgrad på 35 % for denne næringen i 2050. En selvforsyningsgrad på 50 % kan være mulig dersom det i tillegg etableres en norsk fermenteringsindustri for produksjon av encelleprotein. Resten av fôrproteinet vil måtte skaffes gjennom import av bærekraftig produsert fôrprotein.

Denne analysen ble finansiert av SINTEFs konsernsatsing *Mat og Agri* og SINTEF Oceans prioriterte forskningsområde *Bærekraftig fôr*.

**UTARBEIDET AV**
Karl A. Almås m.fl.
Karl A. Almås (May 5, 2023 08:31 GMT+2)**KONTROLLERT AV**
Marit Aursand**GODKJENT AV**
Bård Wathne Tveiten
Bård Wathne Tveiten (May 4, 2023 11:56 GMT+2)

Historikk

| VERSJON | DATO | VERSJONSBEKRIVELSE |
|---------|------------|--------------------|
| 1.0 | 2023-05-04 | [Tekst] |

Innholdsfortegnelse

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Sammendrag med anbefalinger | 5 |
| 2 | Innledning | 12 |
| 2.1 | Nasjonale målsettinger for norsk matproduksjon | 12 |
| 2.2 | Bærekraftige norske fôrråvarer | 13 |
| 2.3 | Med fokus på protein i fôr til laks | 13 |
| 2.4 | Konkurransen om råvarene | 15 |
| 2.4.1 | Langreiste råvarer | 15 |
| 2.4.2 | Matvarekrise | 16 |
| 2.4.3 | Fôr til kjæledyr – pet-food | 16 |
| 3 | Norske råvarebidrag til fôrproduksjon | 17 |
| 3.1 | Oversikt | 17 |
| 3.2 | Marine råvarer som kan høstes | 17 |
| 3.3 | Landbaserte råvarer | 18 |
| 3.4 | Nye kultiverte planter og dyr | 19 |
| 3.5 | Mikrobiell produksjon av protein - encelleprotein | 21 |
| 3.5.1 | Noen begreper | 21 |
| 3.5.2 | Storskala produksjon av encelleprotein – potensial, nødvendige arealer og miljømessige aspekter | 23 |
| 3.5.3 | Dyrking av mikroorganismer for produksjon av encelleprotein - teknologien | 27 |
| 3.5.4 | Høsting av mikroorganismene – sentrifugering/mikrofiltrering og tørking | 29 |
| 3.5.5 | Egenskaper ved mikrobielt protein som fôr til fisk | 29 |
| 3.5.6 | Mikroalger – Finnfjord-prosessen | 30 |
| 3.5.7 | Heterotrof dyrking på sukker | 32 |
| 3.5.8 | Heterotrof dyrking av gjær på lignocellulose (trevirke, halm, etc.) | 33 |
| 3.5.9 | Heterotrof dyrking på metan | 34 |
| 3.5.10 | Heterotrof dyrking på metanol | 35 |
| 3.5.11 | Encelleprotein basert på H ₂ + CO ₂ | 36 |
| 3.5.12 | Andre prosesser for produksjon av encelleprotein | 37 |
| 3.6 | Oppsummerende oversikt | 38 |
| 4 | Alternative muligheter til økt produksjon av fôrråvarer | 40 |
| 4.1 | Produksjon av plantespisende (herbivore) fiskeslag | 40 |
| 4.2 | GMO | 41 |
| 4.3 | Kan vi forbedre fôrutnyttelsen | 41 |
| 4.3.1 | Metabolsk/ernæringsmessig programmering | 42 |
| 4.3.2 | Genetikk | 42 |
| 4.3.3 | Tarmmikrobiom (bakteriesammensetningen) | 43 |
| 4.3.4 | Funksjonelle ingredienser | 44 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3.5 | Økonomisk førfaktor..... | 45 |
| 4.4 | Fiskehelse og overlevelse..... | 46 |
| 4.5 | Prioritering mellom landbruksbasert og akvakulturbasert kjøttproduksjon | 47 |
| 5 | Bærekraftig produksjon..... | 48 |
| 5.1 | Flytting av ulemper (Burden-shifting)..... | 48 |
| 5.2 | Indikatorer for bærekraft..... | 50 |
| 5.3 | Høsting av marine råvarer | 51 |
| 5.4 | Landbaserte råvarer..... | 52 |
| 5.5 | Nye kultiverte planter og dyr | 52 |
| 5.6 | Mikrobielle prosesser – encelleprotein | 53 |
| 5.7 | Samlet vurdering av bærekraft | 55 |
| 6 | Alternativer for fremtidig førfproduksjon i Norge | 56 |
| 6.1 | Scenarier | 56 |
| 6.2 | Mikrobiell førfproduksjon i Norge?..... | 57 |
| 6.3 | Et lokalt scenario: Nærøysund kommune i Namdalen | 59 |

1 Sammendrag med anbefalinger

Nasjonale ambisjoner for bærekraftig matproduksjon

Norge har ambisiøse målsettinger for sin matproduksjon. Norsk jordbruk og matindustri skal produsere varer som norske forbrukere etterspør og et hovedmål er å sikre forbrukerne god, trygg og variert mat av god kvalitet basert på god plante og dyrehelse. Oppdrettsnæringen har et langsiktig mål om økning i arbeidsplasser, bærekraftig verdiskaping og økte eksportverdier til Norge, også etter at inntektene fra oljen avtar. Med ambisjon om vekst i oppdrettsproduksjonen til 5 millioner tonn i 2050 og et mål om at Norge *skal være selvforsynt med bærekraftig fôr til all matproduksjon i 2030*, blir det en betydelig nasjonal oppgave å realisere dette.

Med utgangspunkt i det målrettede samfunnsoppdraget¹ og de rapporter som foreligger, er målet med denne analysen å komme et skritt videre og bidra til en realitetsorientering av våre muligheter til å fremskaffe nok bærekraftig norsk fôr i årene fremover. Samfunnsoppdraget omfatter både fôr til husdyr på land og til fiskeoppdrett, men det er den forventede veksten og lave selvforsyningsgraden av fôr til oppdrett som vil skape de største utfordringene. Rapporten har derfor hovedfokus på dette. Hva skal til for å realisere disse gode, og svært ambisiøse målsettingene?

Nåsituasjon

I 2020 var kraftfôrbehovet til norsk husdyrbruk og akvakultur henholdsvis om lag 2,0 og 2,1 mill. tonn². Proteininnholdet i kraftfôr til husdyr er imidlertid langt lavere enn i fôr til akvakultur og totalt protein i kraftfôr til husdyr var kanskje omkring 350 tusen tonn versus om lag 700 tusen tonn i fôr til oppdrettsfisk. I kraftfôr til husdyr utgjorde norskprodusert fôrprotein om lag 30 %, mens det i fôr til akvakultur kun utgjorde omkring 11 %.

I dag utgjør fôrråvarene 75 % av klimafotavtrykket til norsk laks³. Kun 8 % av råvarene er norskproduserte og bare 0,4 % er såkalt nye råvarer som insektmel og "mikroalger" (thraustochytrider)⁴.

Har vi andre muligheter enn å skaffe nye fôrråvarer?

Hovedfokus i rapporten er rettet mot å analysere hvilke muligheter som foreligger for å øke tilgangen på fôrråvarer. Imidlertid er det også andre muligheter som må tas i betraktning når tilgangen på fôrråvarer blir begrensende. En mulighet er å innføre plantespisende (herbivore) fiskeslag for derigjennom å redusere proteinbehovet. Selv om noen arter er pekt på som kandidater ut fra at de har salttoleranse, f.eks. melkefisk (*Chanos chanos*) som produseres i Asia, er det ingen arter som i dag fremstår som gode alternativer til å produsere laks. Fordi det viktigste markedet for norsk laks i dag er EU, er det heller ikke noe alternativ å satse på genmodifiserte fôrråvarer eller å genmodifisere dagens laks. Imidlertid er det fortsatt mye å hente på tradisjonell avl.

Det er også mulig å forbedre laksens fôrutnyttelse, herunder metabolsk/ernæringsprogrammering, genetik, forstå og utnytte mikrobiomets rolle for fôrutnyttelsen, og ved å tilsette funksjonelle fôringredienser til dagens fôr. Her drives mye forskning, men det foreligger så langt ikke resultater

¹ Målrettet samfunnsoppdrag, Meld.St.5, Langtidsplan for forskning og høyere utdanning 2023-2032

² Eidem, B. og Ruud, T. 2022. Fôr- og husdyrbaserte verdikjeder i norsk matproduksjon – nåsituasjon og begreper. Rurals notat 6/22.

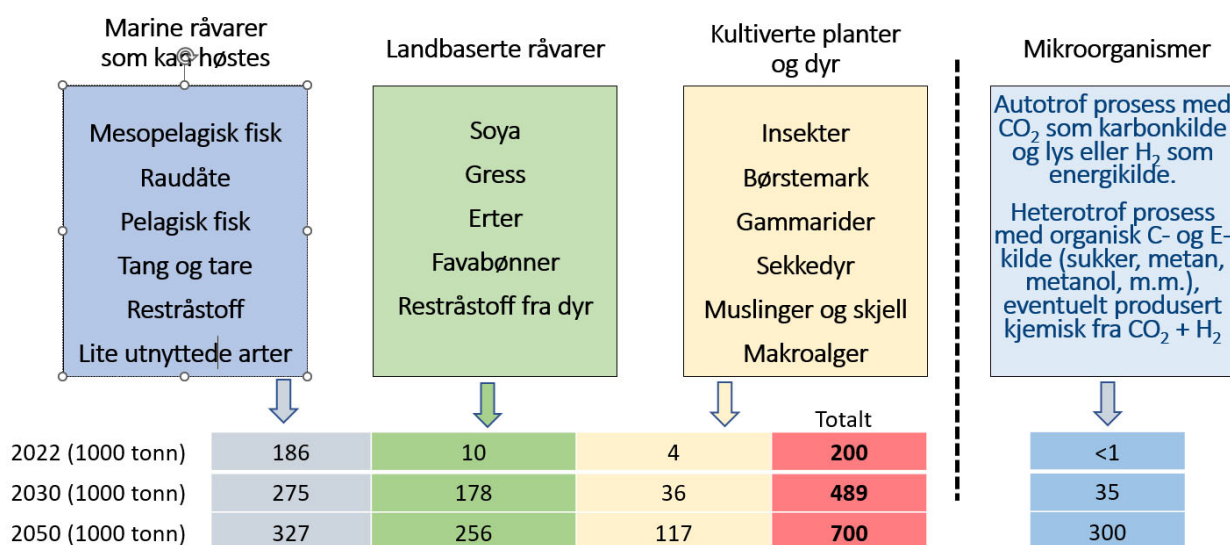
³ SINTEF rapport. 2022. Greenhouse gas emissions of Norwegian salmon products. <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/3044084>

⁴ Aas, T. S., Ytrestøyl T., Åsgård, T., Utnyttelse av fôressurser i norsk oppdrett av laks og regnbueørret i 2020. Faglig sluttrapport. April 2022

av stor betydning for å redusere fôrbehovet per kg fisk produsert. Derimot kan redusert dødelighet av laks i oppdrett være viktig. I 2022 var dødeligheten (i sjøfasen) 16,8 %, noe som ga et estimert fôrprotein tap på om lag 60 tusen tonn dette året. Med en ambisjon om 5 millioner tonn laks i 2050, må det da skaffes til veie vel 200 tusen tonn ekstra fôrprotein for å kompensere dersom dødeligheten ikke lar seg redusere.

Nye fôr råvarer

Rapportens utgangspunkt er at det til oppdrettsnæringene alene må skaffes til veie 2 millioner tonn fôrprotein per år i 2050. Strategier for nå målet beskrives. Først evalueres tre grupper av proteinkilder, og mulige produksjonskvanta i 2030 og 2050 er oppsummert i Figur 1.1. For å dekke det store gapet mellom behovet og det som kan skaffes fra de tre gruppene (Tabell 1.1), er muligheten for produksjon av encelleprotein vurdert.



Figur 1.1 Mulige løsninger for å produsere fôrprotein til oppdrettsnæringen i Norge. Proteinverdiene for marine råvarer, landbaserte råvarer og nye kultiverte planter og dyr er estimater for hva disse råvarene kan bidra med dersom en industriell produksjon realiseres. Estimaten for mulig produksjon av encelleprotein er på tilsvarende måte basert på at en industriell produksjon etableres. Dagens potensiale fra de ulike kildene er indikert.

Tabell 1.1. Proteinbalanse og udekket behov i 2030 og 2050 gitt vekstambisjonen for norsk oppdrett.

| Råvarekilde | 2030 (1000 tonn protein) | 2050 (1000 tonn protein) |
|--|-----------------------------|-----------------------------|
| Sum protein fra Figur 1.1 | 489 | 700 |
| Totalt behov for protein til laksefôr | 1 150 | 2 000 |
| Udekket proteinbehov som må fremskaffes gjennom andre kilder herunder: | 661 | 1 300 |
| <ul style="list-style-type: none"> Ny fermenteringsindustri (encelleprotein) Fortsatt import av bærekraftig produserte fôr-råvarer | | |

De samlede verdiene på 489 tusen tonn i 2030 og 700 tusen tonn i 2050 representerer *maksimalverdier* dersom vi lykkes fullt ut med oppskalering og industrialisering. De tre hovedgrupperingene består hver for seg av flere ulike råvarekilder der noen utnyttes nesten fullt ut i dag (f.eks. restråstoff)

mens andre fortsatt trenger forskning, utvikling og oppskalering før en industri kan sies å være etablert (f.eks. høsting av raudåte og mesopelagisk fisk).

Alternativer for fremtidig fôrproduksjon i Norge

Tre ulike scenarier er vurdert (Tabell 1.2) for framtidig fôrproduksjon i Norge for å dekke proteinbehovet til en voksende oppdrettsnæring. Disse er basert på følgende forutsetninger:

- (1) Produksjon av protein fra eksisterende og nye råvarekilder (Figur 1.1) utvikles og oppskaleres slik at potensialet for 2030 og 2050 blir realisert.
- (2) Det etableres produksjon av encelleprotein i Norge.
- (3) Bærekraftig fremstilt fôrprotein for import vil være tilgjengelig på globale markeder med åpen konkurranse.

Tabell 1.2 Scenarier for dekning av fremtidig behov for fôrråvarer i Norge ved produksjon av 5 millioner tonn laks i 2050.

| Scenario | Dekning av proteinbehov på 2 millioner tonn (1000 tonn protein) | | | Kommentar til scenario |
|--------------------------------------|---|----------------|--------|---|
| | Nye råvarer (Figur 1.1) | Encelleprotein | Import | |
| Scenario 1: 100 % selvforsyningsgrad | 700 | 1 300 | 0 | Svarer ut samfunnsutfordringen |
| Scenario 2: 50 % selvforsyningsgrad | 700 | 300 | 1 000 | Krever realisering av industri basert på eksisterende ressursgrunnlag og etablering av ny fermenteringsindustri |
| Scenario 3: 35 % selvforsyningsgrad | 700 | 0 | 1 300 | Realiserer industri basert på eksisterende ressursgrunnlag (Figur 1.1), men baserer øvrig vekst på import. |

Muligheten for å realisere scenariene vil avhenge av flere faktorer, inkludert kapital for investeringer, tilgjengelige arealer, energitilgang, kompetanse og arbeidskraft (Tabell 1.3).

Tabell 1.3 Evaluering av noen av de faktorene som må til for å gjennomføre de tre scenariene for å dekke fremtidig behov for fôrråvarer i Norge ved produksjon av 5 millioner tonn laks i 2050.

| Scenario | Investeringsbehov | Energibehov | Kompetanse / arbeidskraft | Beredskap |
|--------------------------------------|-------------------|-------------|---------------------------|--|
| Scenario 1: 100 % selvforsyningsgrad | Meget høyt | Meget høyt | Meget stort behov | Løser samfunnsutfordringen og ivaretar sikker tilgang på fôr |
| Scenario 2: 50 % selvforsyningsgrad | Høyt | Høyt | Meget stort behov | Løser samfunnsutfordringen delvis |
| Scenario 3: 35 % selvforsyningsgrad | Høyt | Moderat | Stort behov | Sterkt avhengig av import |

Ingen av scenariene peker seg ut som en tydelig løsning på det forventede økte behovet for bærekraftig fôrråstoff fram mot 2030 og 2050. Med utgangspunkt i energibehovet (se under) er det urealistisk å gjennomføre *Scenario 1* som innebærer en norsk encelle-basert produksjon på 1,3 millioner tonn protein i 2050. Målet om at norsk matproduksjon (husdyrhold og akvakultur) i 2030 og 2050 skal være basert på kun bærekraftige norske fôrråvarer (samfunnsoppdraget), der råvarebehovet til fôret skal kunne dekkes uten import, fremstår dermed som urealisert.

I *Scenario 3* er det ikke lagt inn noen ambisjon om etablering av norsk produksjon av encelleprotein. Scenariet skisserer en modell der vi klarer å skalere opp løsninger og realisere industri som øker uttaket av protein egnet for oppdrett fra marine råvarer, landbaserte råvarer og nye kultiverte planter og dyr (Kap. 3) til 489 tusen tonn i 2030 og 700 tusen tonn i 2050, mens resten dekkes ved import som i dag. Dette gir en selvforsyningsgrad på 43 % i 2030 og 35 % i 2050 for oppdrettsnæringen, men er på ingen måte et "business as usual"- alternativ da det forutsettes at vi lykkes med å oppskalere proteinproduksjonen fra mange ulike kilder.

Scenario 2 beskriver en fremtid der vi lykkes med oppskalering av proteinproduksjonen fra marine råvarer, landbaserte råvarer og nye kultiverte planter og dyr som i Scenario 3, og at vi samtidig klarer å bygge en fermenteringsindustri for produksjon av 35 tusen tonn protein i 2030 og 300 tusen tonn protein i 2050. Dette gir en selvforsyning på 46 % i 2030 og 50 % i 2050 for oppdrettsnæringen.

Etablering av nasjonal produksjon av encelleprotein

En nasjonal produksjon av encelleprotein kan være basert på fotoautotrof dyrking av mikroalger, kjemoautotrof fermentering av bakterier på hydrogen (H₂) og karbondioksid (CO₂), eller heterotrof dyrking av gjær og/eller bakterier på ulike organiske substrater, eller en kombinasjon. Norge har ikke tradisjon for storskala fermentering av mikroorganismer slik som f.eks. Danmark og Nederland, men det er ingen åpenbar grunn til at en slik industri ikke skal kunne etableres i Norge. Vi har rikelig med plass, og god tilgang på kaldt kjølevann. I heterotrofe fermenteringsprosesser utvikles varme og fermentorene må kjøles kontinuerlig for å hindre at temperaturen blir så høy at mikroorganismene inaktiveres. Behovet for fôrprotein til fiskefôr vil sørge for et stort hjemmemarked, og hvis produksjonen kan knyttes nært opp mot anlegg for produksjon av fiskefôr kan dette gi muligheter for besparelser, f.eks. ved at den våte celledmassen fra fermenteringen etter sentrifugering går direkte inn i fôrproduksjonen uten å gå veien om et tørt produkt.

Den teknisk enkleste løsningen er å etablere en fermenteringsindustri basert på importert sukker. Teoretisk produksjonsvolum er stort og 1-2 millioner tonn protein per år vil være mulig. El-kraftbehovet ved produksjon av encelleprotein ved fermentering av sukker er moderat, kanskje 2 TWh/år for 100 tusen tonn protein, og vil kun kreve 20-30 store (500-1000 m³) fermentorer. Sukrose og glukose (framstilt ved hydrolyse av hvete- eller maisstivelse) er imidlertid også mulig menneskeføde. Alternativt kan sukkere utvinnes fra trevirke, og basert på den informasjonen som foreligger til en kostnad på nivå med sukkerprisen på verdensmarkedet. Norske skoger kan teoretisk gi grunnlag for produksjon av 600 tusen tonn protein per år. Men miljøhensyn og annen bruk av trevirket tilsier at maksimalt praktisk produksjonsvolum vil være vesentlig lavere, kanskje omkring 100 tusen tonn protein per år. Ulempen er at med dagens proteinpriser kan sukkerbasert produksjon av encelleprotein i beste fall gi protein til en pris på linje med fiskemel og andre høyverdige proteinkilder. Plantebasert protein i form av soyamel er betydelig billigere. Dette har fram til nå vært den største utfordringen for produksjon av encelleprotein både i Norge og internasjonalt. Produksjonskostnadene blir for høye relativt til alternativene, og da spesielt soyaprotein.

Et alternativ til heterotrof fermentering av sukker er dyrking av mikroalger med CO₂ som karbonkilde (C-kilde) og lys som energikilde (E-kilde). CO₂ kan høstes fra store punktutslipp av CO₂ så som avgass fra forbrenningsprosesser og sementindustri. Sammenlignet med heterotrof produksjon av encelleprotein er fototrof produksjon noe mer plasskrevende med hensyn til anleggsareal, men i Norge bør ikke arealkravet til noen av produksjonsprosessene være en stor utfordring. På våre breddegrader vil imidlertid kunstig belysning (LED-lys) være nødvendig, i det minste deler av året,

og utbyttet av encelleprotein per kWh benyttet for produksjon av LED-lys er lavt. Et foreløpig overslag indikerer at LED-lys-basert fototrof produksjon av 100 tusen tonn protein vil kreve 30-60 TWh per år. Hvis så, kan en løsning være å utnytte sollys deler av året.

I de seneste årene har produksjon av encelleprotein med CO₂ som C-kilde og hydrogen (H₂) som energikilde fått økt oppmerksomhet. Dette kan skje ved kjemoautotrof fermentering av H₂ + CO₂ (knallgassfermentering) eller i en kombinasjonsprosess hvor CO₂ først kjemisk reduseres med H₂ til metanol, maursyre, metan, eller eddiksyre, før disse organiske substratene fermenteres heterotroft til encelleprotein. Utfordringen er at H₂ må framstilles på en bærekraftig måte og i praksis innebærer dette hydrolyse av vann med "grønn" elektrisk energi (vann, vind, sol eller bølger). CO₂ kan høstes fra store punktutslipp, men i så fall må fermenteringsanlegget plasseres nær punktutslippet. Alternativt kan CO₂ høstes direkte fra luften med såkalt DAC-teknologi, men fordi konsentrasjonen av CO₂ i luften er svært lav (0,04 %) blir dette både kostbart og energikrevende. Fordelen med direkte høsting av CO₂ fra luften er at produksjonen av encelleprotein da kan skje nær fiskefôrfabrikken. DAC-teknologien er i rask utvikling og vil trolig bli mer effektiv og billigere i kommende år. Samtidig kan økt oppmerksomhet på CO₂-utslipp føre til at tilgjengelige kvanta i mange av dagens punktutslipp avtar. Fossilt karbon som tar veien via fiskefôr og en oppdrettslaks er en betydelig bedre løsning enn direkte utslipp av CO₂ til luft, men til slutt vil det fossile karbonatomet likevel nå atmosfæren. Hvis CO₂ høstes direkte fra luften ved hjelp av "grønn" energi blir prosessen klimanøytral. Når karbonatomet til sist vender tilbake til atmosfæren gir ikke dette en netto økning i CO₂-innholdet i atmosfæren. Behovet for elektrisk kraft ved en kombinasjon av kjemisk reduksjon av CO₂ med H₂ til et organisk substrat og påfølgende fermentering av dette til encelleprotein (som tørt pulver av mikroorganismer) kan anslås til 8-10 TWh for 100 tusen tonn protein.

Dette betyr at produksjon av encelleprotein fra CO₂ vil være svært energikrevende hva enten det skjer fototroft med mikroalger og LED-lys som energikilde, eller heterotroft på et organisk substrat framstilt kjemisk fra CO₂ + H₂. Foreløpige overslag indikerer at produksjon av 100 tusen tonn protein på denne måten vil kreve 5-39 % av den norske el-kraftproduksjonen i dag.

Norge har en fossil C-kilde, metan i naturgass, som ved fermentering til encelleprotein kvantitativt lett kan dekke et behov for 1 million tonn fôrprotein. Teknologien er etablert og internasjonalt produseres i dag om lag 20 tusen tonn fôrprotein for fisk ved fermentering av metan fra naturgass. Men produksjon av fôrprotein fra naturgass kan neppe kalles bærekraftig i et langsiktig perspektiv. Selv om de fossile C-atomene i naturgass tar veien via encelleprotein, fiskefôr, laksekjøtt og en menneskeme, vil de til syvende og sist finne veien til atmosfæren.

Samlet betyr dette at det bør være mulig å produsere 1-2 millioner tonn protein i form av encelleprotein i Norge. Men tekniske og økonomiske aspekter tilsier at dette vil ta tid. Flere av de mulige produksjonsprosessene har også et stort behov for elektrisk kraft som må være "grønn" dersom produksjonen skal bli bærekraftig. Det er derfor nødvendig å bruke tid på å bygge opp produksjonen. Samtidig, hvis målet er at norsk matproduksjon skal være basert på norskproduserte råvarer, og gitt det enorme proteinbehovet den voksende oppdrettsnæringen representerer, er det vanskelig å se noe alternativ til encelleprotein som kan fylle gapet.

Bærekraftige råvarer

En vurdering av bærekraft ved fremstilling av fôr fra ulike råstoffer er gitt i kapittel 5. Indikatorer som energibehov, arealpress, biologisk mangfold, utslipp, biosikkerhet, lokal verdiskaping, syssel-

setting og konflikter med andre verdikjeder er vurdert. Det er også vurdert hvilke konsekvenser det vil ha lokalt i andre land hvis vi reduserer importen av fôrråvarer til Norge. Det må presiseres at det er store kunnskapshull innen dette området, da det er vanskelig å skaffe tilveie data for gode beregninger av fremtidig teknologi og verdikjeder. Mye av informasjonen baserer seg på arbeid gjort i pilotskala og eksperters vurderinger.

Generelt kan det sies at produksjon av fôrråvarer i Norge ofte vil være energikrevende (f.eks. høsting av nye marine råvarer, produksjon av encelleprotein, etc.) og vil kreve en norsk energi-miks med lavest mulig klima- og miljøfotavtrykk. På den positive siden vil utnyttelse av restråstoff eller bruk av CO₂ som innsatsfaktor i dyrking av eksempelvis gammarider, børstemark og mikroorganismer, være positivt for miljøet. Rapporten drøfter de tre scenariene for fremtidig produksjon av fôrråvarer i Norge skissert over. Det er imidlertid ikke utført noen detaljert analyse som indikerer en klar preferanse for noen av scenariene fra et bærekraftperspektiv.

Veien videre

Norge har en lang rekke muligheter for å øke produksjonen av fôrprotein egnet for laks. Disse befinner seg på ulike tekniske utviklingsnivå fra tilnærmet etablert teknologi til prosesser som kun er studert i laboratorieskala. Som påpekt over, er mange også svært energikrevende per kg protein produsert, mens det for andre ikke foreligger gode data. Miljøhensyn og bærekraft er også viktige aspekter og her må de nye prosessene også måles opp mot dagens eksisterende prosesser. At "vi alltid har gjort det slik" er ikke et argument for at dette er den beste måten å gjøre det på. Utslipp av drivhusgasser er i så måte en mulig "game changer". Utslippene må ned og dette kan f.eks. gjøre encelleprotein mer attraktivt på bekostning av planteprotein produsert ved tradisjonelt jordbruk, selv om sistnevnte gir billigere protein så lenge utslippene av drivhusgasser ikke prises inn. Bærekraft er et annet stikkord. Vurdering av en "etablert" prosess er relativt overkommelig, men kan være svært krevende for en ny prosess på laboratoriestadiet. Bærekraften til den nye prosessen må også veies opp mot dagens eksisterende prosesser. Til syvende og sist er det likevel prisen på proteinet som vil være avgjørende for fôrprodusentene og oppdretterne. Teknisk-økonomiske analyser av alternativene er et stikkord. Dette er relativt overkommelig når produksjonsprosessen er klarlagt og utbyttet av protein kjent, i det minste innenfor grenser. For prosesser på tidlige utviklingsstadier er imidlertid slike beregninger mer krevende. Grove estimater er imidlertid bedre enn ingen estimater, og kan i det minste indikere om prosessen kan bli interessant i framtida, og eventuelt peke på særlig kostnadsdrivende trinn eller operasjoner som må forbedres dersom prosessen skal ha håp om å kunne bli industrialisert.

Konklusjon

Vår konklusjon basert på denne analysen er at med en sterk satsing på utvikling og industrialisering av norske ressurser på land og i havet kan vi kunne klare å tilvirke opp til 489 tusen tonn fôrprotein-råvarer egnet for oppdrettsnæringen i 2030 og 700 tusen tonn i 2050. Ved realisering av vekstambisjonen i oppdrettsnæringen vil dette gi en selvforsyningsgrad på 35 % i 2050. En selvforsyningsgrad på 50 % kan være mulig dersom det i tillegg etableres en fermenteringsindustri i Norge for produksjon av encelleprotein. Resten av fôrproteinet vil måtte skaffes gjennom import av bærekraftig produsert fôrprotein.

Anbefalinger

1. Det etableres et bredt anlagt program for å utvikle industrielle prosesser basert på dagens ressursgrunnlag herunder marine råvarer som kan høstes, landbaserte råvarer og kultiverte planter og dyr.
2. Det etableres et program for å avklare mulighetene for å etablere en ny fermenteringsindustri for produksjon av encelleprotein, og hvilke strategier som bør velges her. Mulighetene for en symbiose mellom fermenteringsprosessen og fiskefôrproduksjonen må også avklares.
3. Det gjennomføres teknisk-økonomiske analyser og bærekraftsanalyser for de ulike alternativene for å avklare hvilke som totalt sett er mest interessante.
4. Det gjennomføres et regionalt case-studium der alle de forhold den foreliggende rapporten beskriver settes i sammenheng.

2 Innledning

2.1 Nasjonale målsettinger for norsk matproduksjon

Verdens befolkning passerte 8 milliarder ved utgangen av 2022. Samtidig øker antallet personer som sulter videre fra 800 millioner. Globalt står landbasert matproduksjon for 98 % av den maten vi konsumerer i dag. Bidraget fra havet er bare 2 %. Dette til tross for at verdens totale biomasse er omtrent likt fordelt mellom land og hav. Imidlertid vil den landbaserte produksjonen i fremtiden få utfordringer på grunn av knapphet på arealer og vann. Andelen av matproduksjon fra havet forventes derfor å øke i årene fremover.

Samlet norsk kjøttproduksjon basert på føring av varmblodige husdyr og laks var i 2021 ca. 1.76 millioner tonn⁵, og besto av ca. 20 % landbasert kjøttproduksjon og 80 % sjøbasert laks. Nasjonalt er det ulike målsettinger for disse to delene av norsk kjøttproduksjon.

Den offisielle målsettingen for norsk mat- og landbrukspolitik er⁶:

Landbasert matproduksjon er rettet mot innenlandsmarkedet. Mat er folkehelse og nyting, nasjonal og internasjonal, trendy og tradisjonell. Mat er privatøkonomi og samfunnsøkonomi, distriktspolitikk og næringspolitikk, fiskeripolitikk og – ikke minst – landbrukspolitik.

Hovudmålet med mat- og landbrukspolitikken er å sikre forbrukarane nok, trygg og variert mat av god kvalitet og til ein fornuftig pris. Forbrukarane sine ønske og val er med og verkar inn på utforminga av politikken.

Havbruksstrategien "*Et hav av muligheter*"⁷ fremlagt av Solbergregjeringen i 2021, opprettholder målet om produksjon av 5 millioner tonn laks i 2050. Regjeringsplattformen ("*Hurdals-erklæringen*")⁸ skriver om behovet for fremstilling av bærekraftig fôr for å opprettholde fortsatt vekst i norsk lakseproduksjon:

"Regjeringen vil stimulere til økt bærekraft gjennom et eget program for produksjon av bærekraftig fôr basert på norske ressurser, sette mål om at alt fôr til havbruksnæringen skal være fra bærekraftige kilder innen 2030, og legge til rette for bruk av karbon (CCU) innen fôrproduksjon."

Den offisielle målsettingen for norsk oppdrettsproduksjon er derfor fortsatt⁹:

Bærekraftig produksjon av 5 millioner tonn laks i 2050.

Mens målsettingen for den subsidierte landbruksbaserte delen av matproduksjonen først og fremst er rettet mot sjøforsyning og distriktspolitikk, er den subsidiefrie fiskeri- og havbruksnæringen rettet mot eksportverdier og verdiskaping langs kysten. Disse to delene av den norske matproduksjonen fremstår dermed som svært forskjellige. Den norske landbruksproduksjonen må beskyttes mot billig import, mens fiskeri- og havbruksnæringen ønsker god markedsadgang i utlandet. Dette er to hensyn som i utgangspunktet ikke trenger å være kryssende, men som i forbindelse med inngåelse av handelsavtaler, f.eks. med EU, fremstår nettopp slik.

Dersom det var ubegrenset tilgang på fôrvarer, burde Norge i utgangspunktet hatt mulighet til å øke sin matproduksjon basert på både landbaserte og sjøbaserte produksjonskjeder. Når tilgangen

⁵ Tall fra SSB

⁶ [Mat - regjeringen.no](https://mat-regjeringen.no)

⁷ Regjeringens havbruksstrategi (2021) Et hav av muligheter.

⁸ Regjeringserklæring fremlagt av Støre-regjeringen. (Hurdalsplattformen) [Hurdalsplattformen \(cloudinary.com\)](https://cloudinary.com)

⁹ Fiskeriminister Bjørnar Skjæran, TEKMAR 6. desember 2022

spesielt på importerte råvarer derimot kan bli begrensende, må det kunne vurderes hvor det er mest å hente basert på de råvarene som er tilgjengelige. Dette er ikke en del av vurderingene som i dag legges til grunn for å oppnå økt kjøttproduksjon (husdyr og oppdrett) i Norge.

2.2 Bærekraftige norske fôrråvarer

Gjennom *Stortingsmelding 5, Langtidsplan for forskning og høyere utdanning 2023-2032*, kom regjeringen med et nytt virkemiddel inn i det norske forskningssystemet. For å bidra til en mer direkte og praktisk bruk av forskningsbasert kunnskap, ble såkalte *målrettede samfunnsoppdrag* lansert. Målrettede samfunnsoppdrag skal være nyskapende og ambisiøse prosjekter der forskning kobles med andre virkemidler for å løse konkrete problemer innen en gitt tidsfrist. Norge deltar allerede i EUs samfunnsoppdrag (*missions*), men regjeringen kom i tillegg med to nasjonalt prioriterte områder der det ene er:

*Norsk matproduksjon (husdyrhold og akvakultur) skal i 2030
være basert på bærekraftige norske fôrråvarer.*

Dette er en problemstilling som har opptatt norske oppdrettere, førselskaper og forsknings- og utviklingsmiljøer de senere årene, og som er blitt aktualisert av et mer urolig geopolitisk bilde der tilgangen på importerte råvarer kan stå i fare. Forskningsmiljøene har sett på utfordringer, men også muligheter med denne situasjonen. SINTEF kom i 2020¹⁰ med rapporten "*Bærekraftig fôr til norsk laks*" som var en gjennomgang av 23 ulike råvarer der 7 ble vurdert til å være realistiske bidragsytere. Senere har NCE Seafood Innovation (2022) kommet med rapporten "*Industry insights - Future Ingredients for Norwegian salmon feed*"¹¹ og Bellona har gjennom prosjektet "*Råvareløftet*"¹²(2022) bidratt med gode oversikter over en del muligheter og begrensninger i rapporten "*Hva skal laksen spise?*".

De fremlagte rapportene gir imidlertid ingen realistiske vurderinger av hva som må til hvis Regjeringens samfunnsoppdrag skal realiseres samtidig som produksjonsmålene for norsk matproduksjon (landbruksbaserte husdyr og akvakultur) opprettholdes. Med utgangspunkt i det målrettede samfunnsoppdraget og de rapporter som foreligger, er målet med denne analysen å komme et skritt videre og bidra til en realitetsorientering av våre muligheter til å fremskaffe nok bærekraftig norsk fôr i årene fremover. Hva skal til for å realisere disse gode, men svært ambisiøse målsettingene?

2.3 Med fokus på protein i fôr til laks

I 2020 var kraftfôrbehovet til norsk husdyrbruk og akvakultur henholdsvis om lag 2,0 og 2,1 mill. tonn¹³. Proteininnholdet i kraftfôr til husdyr er imidlertid langt lavere enn i fôr til akvakultur og totalt protein i kraftfôr til husdyr var kanskje omkring 350 tusen tonn versus om lag 700 tusen tonn i fôr til oppdrettsfisk. I kraftfôr til husdyr utgjorde norskprodusert fôrprotein om lag 30 %, mens det i fôr til akvakultur kun utgjorde omkring 11 %. En viktig årsak til dette er at i fôr til husdyr er karbohydratråvarer (korn, etc.) en viktig proteinkilde, og mye av dette er norskprodusert, mens i fôr til akvakultur er karbohydratråvarer en marginal kilde til fôrprotein.

¹⁰ SINTEF-rapport 2020-01128, "Bærekraftig fôr til norsk laks" Almås et.al. ISBN: 978-82-14-06436

¹¹ New report: Industry insights - Future Feed ingredients — NCE Seafood Innovation, 2022

¹² Råvareløftet: Hva skal laksen spise? - Bellona.no, 2022

¹³ Eidem, B. og Ruud, T. 2022. Fôr- og husdyrbaserte verdikjeder i norsk matproduksjon – nåsituasjon og begreper. Rurialis notat 6/22.

Laks (*Salmo salar*) lever naturlig på en diett som i hovedsak består av protein og fett. Laksens evne til å omsette og utnytte karbohydrater (sukker, stivelse, m.m.) er begrenset. Fôr til laks inneholder i dag 30-35 % protein og 35-40 % fett, inklusive de flerumettede omega-3 fettsyrene eicosapentaensyre (EPA) og docosahexaen-syre (DHA). Flere av karbohydratene slik som stivelse tilsettes i hovedsak for å gi fôrpelletten fasthet og ønsket struktur, ikke for sin ernæringsmessige verdi. Den gjennomsnittlige sammensetning av norsk laksefôr i 2021 hvor både protein, olje og karbohydrat er viktige ingredienser, er gitt i Tabell 2.1. Denne rapporten er avgrenset til å diskutere tilgangen til protein.

1 million tonn protein er et enormt stort volum

Det er ikke lett å begripe hvor mye 1 million tonn protein er. Men et normalvektig menneske på 80 kg inneholder om lag 14 kg protein (i hovedsak i muskelmassen). En million tonn protein tilsvarer dermed proteininnholdet i 71 millioner slike mennesker, som er om lag 13 ganger Norges befolkning.

Tabell 2.1. Gjennomsnittlig sammensetning av norsk laksefôr i 2021. Basert på fôrsammensetningen hos de fem største fôrproducentene i Norge¹⁴.

| Ingrediens som primært er kilde til | Ingrediens | Andel (%) |
|-------------------------------------|--|-----------|
| Protein | Soyaproteinkonsentrater | 16,7 |
| | Marine protein | 9,8 |
| | Marine protein fra restråstoff | 5,0 |
| | Hvetegluten | 9,5 |
| | Maisgluten | 0,2 |
| | Fababønner | 5,8 |
| | Guar protein | 5,0 |
| | Proteinkonsentrat fra erter | 1,6 |
| | Solsikkeprotein | 2,6 |
| Olje | Rapsolje | 19,5 |
| | Marine oljer | 8,1 |
| | Marine oljer fra restråstoff | 2,3 |
| | Linfrøolje | 0,6 |
| | Annet som camelina, lecithin, soya | 0,8 |
| Karbohydrater | Hvete | 5,7 |
| | Stivelse fra erter | 2,6 |
| Mikroingredienser | Pigment, vitamin, guar gum, aminosyrer | 3,6 |
| Annet | Algeolje, insekt, mm | 0,5 |

For å få et energirikt fôr som gir god tilvekst er det viktig med høyt proteininnhold i råvarene. De viktigste proteinkildene i dagens fôr, høykvalitet fiskemel og soyaproteinkonsentrater, inneholder omkring 70 % protein. Mange av de alternative proteindråvarene har et lavere, til dels mye lavere proteininnhold. Gjær og mikroalger inneholder ofte omkring 50 % protein, mens bakterier i noen tilfeller kan inneholde 65-70 % protein, men ofte er innholdet "bare" 50-60 % protein. Proteininnholdet i insektlarver, tanglopper og børstemark er omkring 50 %. Dette betyr at dersom mange av de nye proteindråvarene diskutert i denne rapporten skal kunne bli kvantitativt viktige

¹⁴ SINTEF rapport; Greenhouse gas emissions of Norwegian salmon products, 2022, <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/3044084>

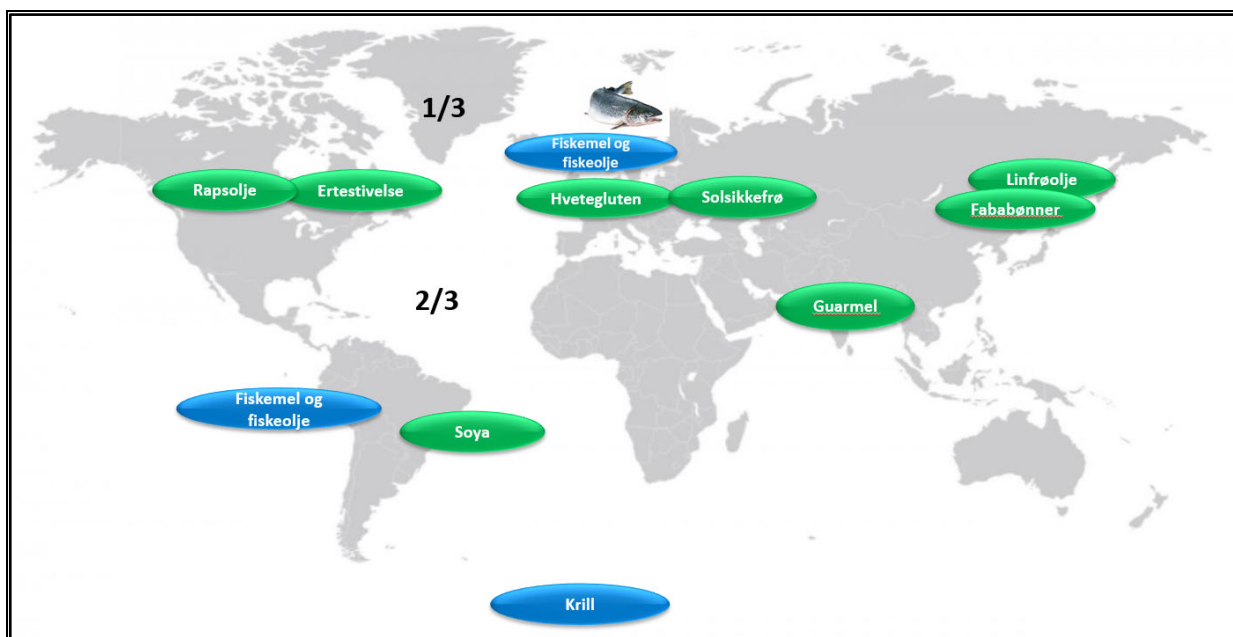
proteinkilder i fiskefôr, må biomassen prosesseres etter høsting til et konsentrat med høyere proteininnhold. Per i dag er det uklart hvordan denne prosesseringen best skjer, men det vil utvilsomt øke prisen per kg endelig proteinråvare.

2.4 Konkurransen om råvarene

Det vil være mange utfordringer knyttet til fremtidig forsyning av råvarer for fôrproduksjon. Under er noen av disse utfordringene beskrevet, men det som trekkes frem er ikke ment å fremstå som en uttømmende gjennomgang. Bildet vil endres over tid blant annet med den geopolitiske situasjonen og den generelle tilgangen til mat for en voksende verdensbefolkning.

2.4.1 Langreiste råvarer

Mer enn halvparten (opp mot 2/3) av de råvarene vi anvender i vår lakseproduksjon hentes sør for ekvator (Figur 2.1). Det meste av den pelagiske fisken, som bidrar vesentlig til omega-3 fettsyrer og marint protein i laksefôret, kommer fra Sør-Amerika. Fiskeolje og fiskemel fremstilt av den pelagiske fisken anchoveta (*Engraulis ringens*), som høstes utenfor Peru, står for brorparten av dette. I 2021 utgjorde produksjonen i Sør-Amerika over 70 % av verdensproduksjonen av fiskemel på ca. 3,5 millioner tonn.



Figur 2.1. Opprinnelse av fôrvarer brukt i laksefôr.

Den største enkeltkilden til protein i dagens laksefôr er soyaproteinkonsentrater som i første rekke importeres fra Brasil, men også fra Øst-Europa. I tillegg til at dette i hovedsak er en langreist råvare, er det også et viktig klimaspørsmål knyttet til behovet for å bevare regnskogen i Amazonas som omtales som verdens viktigste. Norsk matproduksjon må ikke under noen omstendighet kunne knyttes til en negativ utvikling når det gjelder avskoging av disse områdene. Det vil derfor alltid være ønskelig å finne fôrvarer som kan erstatte import av soya.

2.4.2 Matvarekrise

Ved utgangen av 2022 passerte vi 8 milliarder mennesker på denne planeten. Antall mennesker som sulter var ved utgangen av 2021 hele 826 millioner¹⁵, en økning på 46 millioner fra året før. Selv om dette ikke bare handler om knapphet på matvarer, men også er et fordelings- og distribusjonsspørsmål, vil det i årene fremover bli økt søkelys på at råvarer som kan anvendes direkte til konsum ikke først skal gå gjennom dyr (f.eks. varmblodige dyr og laks) og dermed bli dårligere utnyttet. Det vil f.eks. ikke være etisk forsvarlig å overby afrikanske land som vil kjøpe hvete for å fø en sultende befolkning, for i stedet å føre norsk laks.

Vi har i Norge gjennom de senere årene sett at f.eks. pelagisk fisk (sild og makrell) som tidligere gikk til sildolje- og sildemelproduksjon og så ble råvare i laksefôr, i dag selges direkte til konsum. Fileten blir eksportert som ferdig produkt mens restråstoffet går inn i produksjon av mel og olje og blir råvare i fôr.

2.4.3 Fôr til kjæledyr – pet-food

Råvarer som ikke kan anvendes til direkte konsum, men som går inn i en produksjonskjede for å fremskaffe menneskemat, bidrar fortsatt positivt til verdens matvaresituasjon. Eksempelvis kan lodde som prosesseres til fiskemel i teorien ha vært anvendt direkte som menneskeføde, men når fiskemelet senere inngår i fôr til oppdrettslaks som så ender opp som menneskeføde, gir lodda fortsatt et positivt bidrag til verdens matvaresituasjon. Imidlertid legger et voksende pet-food marked beslag på en stadig større andel råvarer som ellers kunne gått direkte til menneskemat. Det globale pet-food markedet utgjorde i 2019 ca. 900 MRDNOK, og er forventet å vokse 4-5 % i året frem mot 2030¹⁶.

Hvilke råvarekvanta produksjonen av pet-food legger beslag på er vanskelig å anslå da det produseres mer enn 3000 ulike produkter. Hvis en anslår gjennomsnittsprisen på tørrfôr til 100 kr/kg (ca. 5 ganger dagens pris på laksefôr), betyr dette at det selges 9 millioner tonn tørt fôr og at det går med like mange tonn råvare (tørrvekt) for å fremskaffe dette. Dette er 4-5 ganger det fôrkvantum som går inn i norsk lakseproduksjon i dag. Produsenter av fôr til kjæledyr har bedre betalingsevne enn de som produserer fôr til dyr som skal ende opp som mat til mennesker.

¹⁵ UN Report: Global hunger numbers rose to as many as 828 million in 2021 (who.int)

¹⁶ How pet food is made - making, used, processing, parts, components, product, industry, machine (madehow.com)

3 Norske råvarebidrag til fôrproduksjon

3.1 Oversikt

Figur 3.1 viser de råvaremulighetene som er vurdert i denne rapporten. Mulighetene er valgt med referanse til en tidligere rapport fra SINTEF¹⁷. Her ble 23 ulike råvarekilder vurdert ut råvarens mulige bidrag til å (1) dekke proteinbehovet i 2050, (2) dekke behovet for EPA+DHA i 2050, (3) mulig produktpris, (4) industrielt utviklingsnivå, (5) norske fortrinn og (6) bærekraft.



Figur 3.1. Oversikt over ulike fôrvarer.

3.2 Marine råvarer som kan høstes

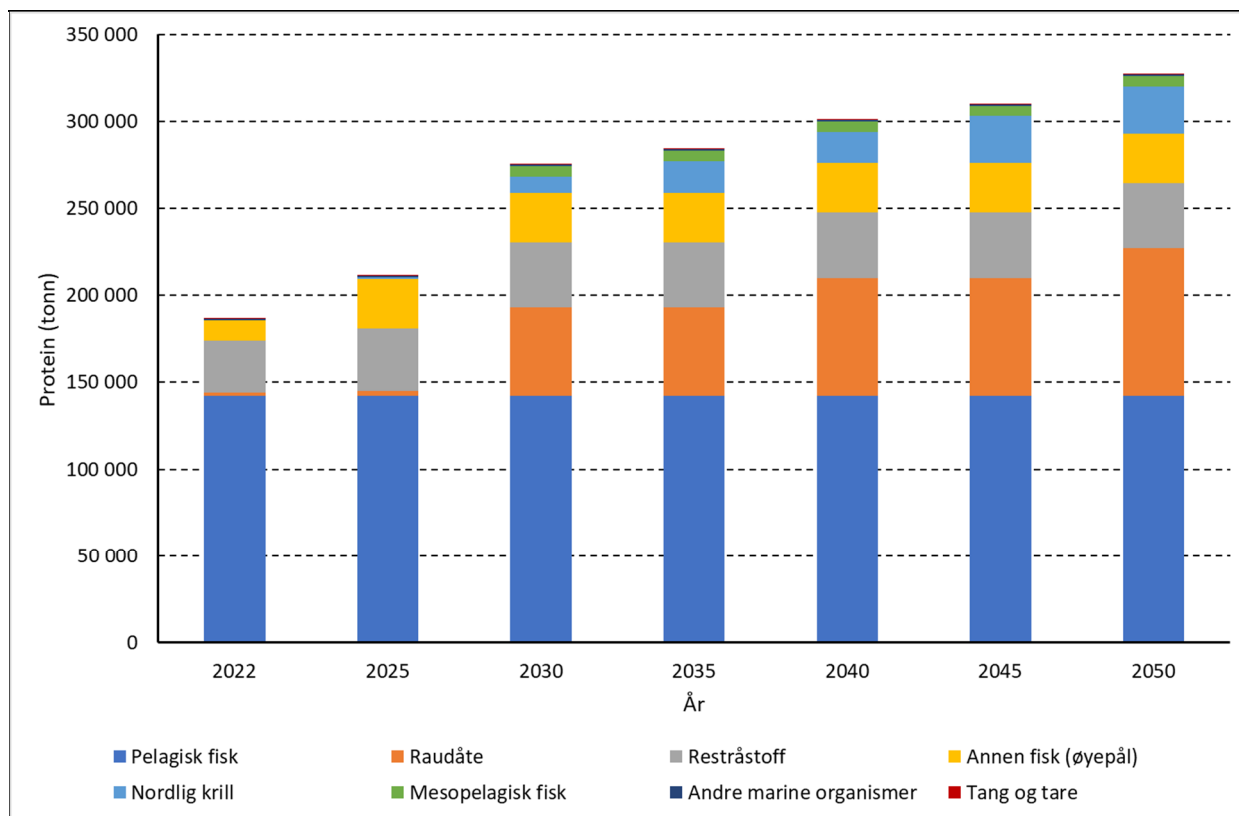
Tabell 3.1 viser potensialet for proteinproduksjon fra marine råvarer som kan høstes. Tallene for 2022 er basert på Fiskeridirektoratets fangststatistikk¹⁸. Utviklingsestimater for 2030 og 2050 er basert på bredt gjennomførte workshops ved SINTEF Ocean AS, Avdeling for fiskeri og ny biomarin industri, og basert på instituttets pågående prosjektportefølje. I Figur 3.2 (neste side) er en mulig utvikling fra i dag til 2050 illustrert.

Tabell 3.1. Potensial for proteinproduksjon fra marine råvarer som kan høstes.

| Råvare | Produksjon av protein (tonn protein) | | | Kommentarer, status |
|------------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|--|
| | Produksjon i 2022 | Potensial i 2030 | Potensial i 2050 | |
| Mesopelagisk fisk | 0 | 6 000 | 6 000 | Vanskelig å finne, høste og foredle |
| Raudåte | 1 690 | 50 700 | 84 500 | Stort potensiale, men må lykkes med fangst |
| Pelagisk fisk | 142 500 | 142 500 | 142 500 | Utnyttes godt i dag |
| Nordlig krill | 0 | 9 000 | 27 000 | Potensial som kan utvikles |
| Tang og tare | 135 | 135 | 135 | Lite protein og fett i tare |
| Restråstoff fra marin fangst | 30 000 | 37 500 | 37 500 | Godt utnyttet, men fortsatt litt uutnyttet restråstoff fra hvitfisk. Økt foredlingsgrad i Norge kan øke denne muligheten. Det er et politisk spørsmål. |
| Lite utnyttet fisk | 11 400 | 28 500 | 28 500 | Øyepål kan høstes |
| Andre marine organismer | 900 | 900 | 900 | Det er potensial for andre marine organismer f.eks. kråkeboller. |
| Sum | 186 625 | 275 235 | 327 035 | |

¹⁷ SINTEF-rapport 2020-01128, "Bærekraftig fôr til norsk laks" Almås *et al.* ISBN: 978-82-14-06436

¹⁸ Tall og analyse: yrkesfiske (fiskeridir.no)



Figur 3.2. Mulige norske marine proteinbidrag til fiskefôr frem mot 2050.

3.3 Landbaserte råvarer

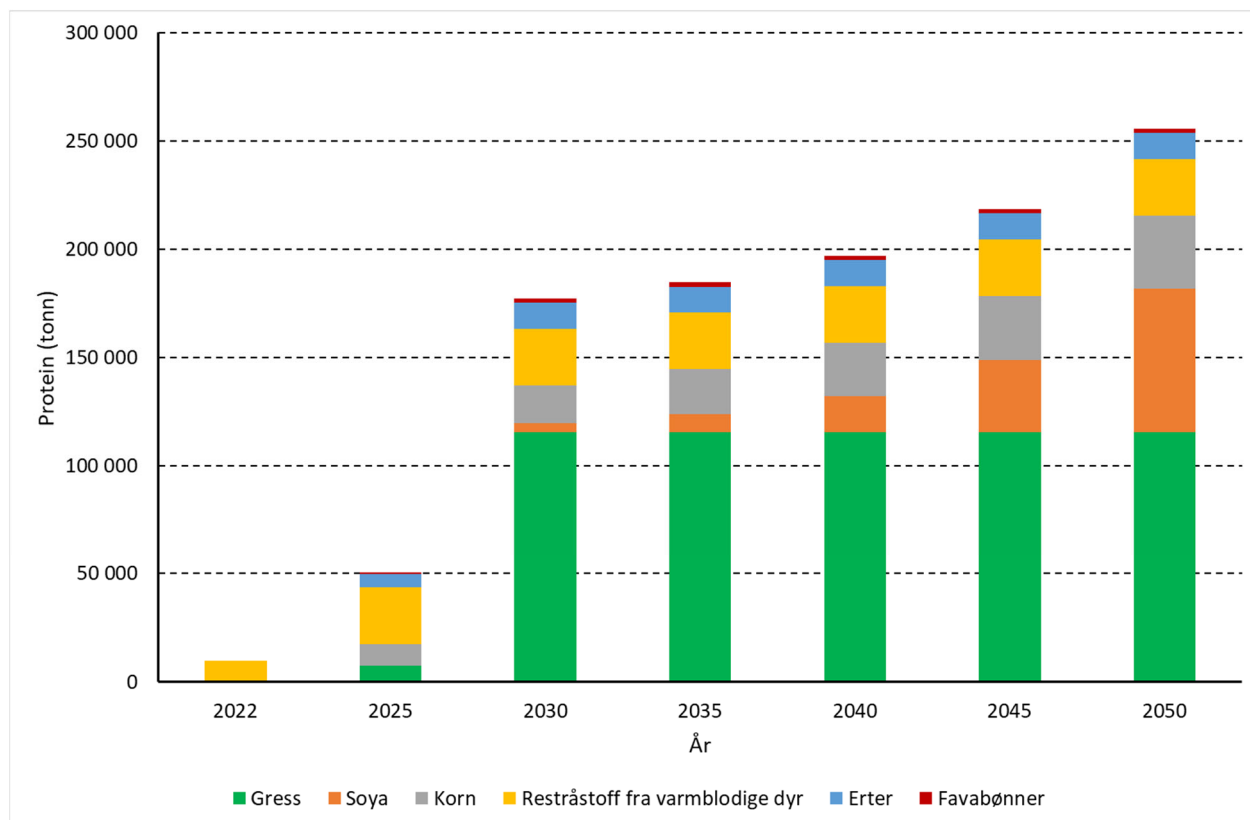
Tabell 3.2 viser potensialet for proteinproduksjon fra landbaserte råvarer som kan høstes. Tallene for 2022 er basert på data fra SSB^{19,20}. Estimaten for 2030 og 2050 er basert på bredt gjennomførte workshops ved SINTEF Ocean AS, Avdeling for fiskeri og ny biomarin industri. I Figur 3.3 (neste side) er en mulig utvikling fra i dag til 2050 illustrert.

Tabell 3.2 Potensial for proteinproduksjon fra landbaserte råvarer som kan høstes.

| Råvare | Produksjon (tonn protein) | | | Kommentarer, status |
|---------------------|---------------------------|------------------|------------------|---|
| | Produksjon i 2022 | Potensial i 2030 | Potensial i 2050 | |
| Soya | 0 | 4 150 | 66 400 | Klimatiske endringer kan gi norsk produksjon |
| Gress | 0 | 115 500 | 115 500 | Betydelig potensial, men krever utvikling av gode utvinningsmetoder. Politisk kontroversielt. |
| Korn | 0 | 17 600 | 33 800 | Mulig å øke kornproduksjon i Norge med 20 % |
| Erter | 0 | 12 000 | 12 000 | Dyrking av erterplanter i Norge. Litt vekst. |
| Fava | 0 | 2 100 | 2 100 | Dyrking av favabønner i Norge. Litt vekst. |
| Restråstoff fra dyr | 10 000 | 26 000 | 26 000 | Lite å hente ut |
| Sum | 10 000 | 177 350 | 255 800 | |

¹⁹ Korn og oljevekster, areal og avlinger. Statistikkbanken (ssb.no)

²⁰ Skogavvirkning for salg. Statistikkbanken (ssb.no)



Figur 3.3. Potensial for proteinproduksjon fra landbaserte råvarer som kan høstes.

3.4 Nye kultiverte planter og dyr

Tabell 3.3 viser potensialet for proteinproduksjon fra nye kultiverte planter og dyr. Tallene er basert på tall som foreligger og vurderinger ut fra dagens kunnskap i SINTEF Ocean AS, Avdeling for fiskeri og ny biomarin industri. I Figur 3.4 (neste side) er en mulig utvikling fra i dag til 2050 illustrert.

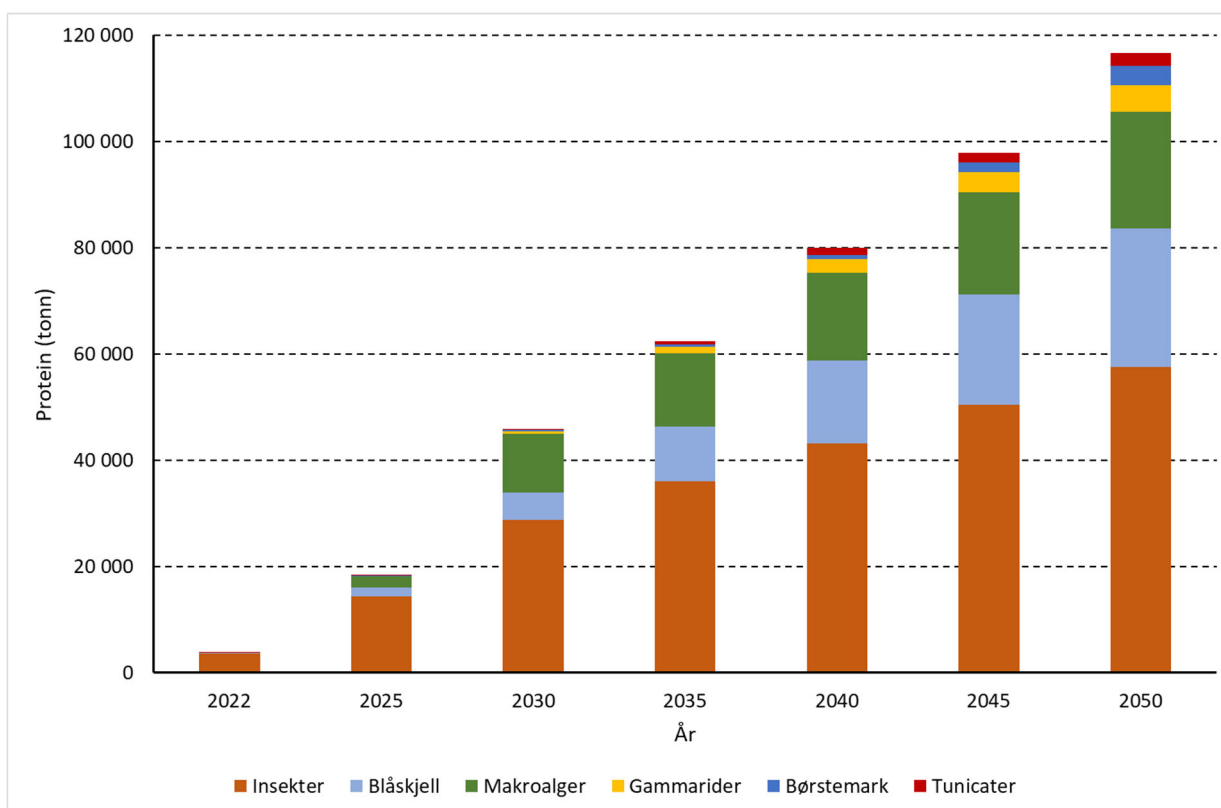
Tabell 3.3. Potensial for proteinproduksjon fra nye kultiverte planter og dyr.

| Råvare | Produksjon (tonn protein) | | | Kommentarer, status |
|-------------------------|---------------------------|------------------|------------------|--|
| | Produksjon i 2022 | Potensial i 2030 | Potensial i 2050 | |
| Insekter | 3 600 | 28 800 | 57 600 | Kan gi opp mot 3-4 %. Trenger lang utvikling |
| Børstemark | 0 | 224 | 3 600 | Marginale bidrag (< 1 % av totalt behov) |
| Gammarider ^A | 0 | 500 | 5 000 | Marginale bidrag (< 1 % av totalt behov) |
| Tunicater ^B | <1 | 250 | 2 500 | Marginale bidrag (< 1 % av totalt behov) |
| Blåskjell | 130 | 5 200 | 26 000 | Lett å produsere, men arealkrevende |
| Makroalger ^C | 11 | 13 800 | 22 000 | Lavt innhold av proteiner |
| Sum | 3 741 | 48 774 | 116 700 | |

A: Gruppen Gammarider inkluderer tanglopper. B: Tunicater er kjent under det norske navnet sjøpung. C: Makroalger er i hovedsak tang og tare.

Dyrking av lavtrofiske organismer vil være en viktig del av fremtidens fôrressurser. I dag dyrkes noen få arter, men i fremtiden kan langt flere arter bli aktuelle for kommersiell produksjon. Noen av artene kan dyrkes i sjøen (f.eks. blåskjell, tare og sjøpung), mens andre arter som tanglopper og børstemark kan dyrkes i anlegg på land. Dersom landbasert produksjon skal lykkes er det av-

gjørende med forutsigbar og kostnadseffektiv produksjon. Oppskalering er også nødvendig. Detaljert informasjon om disse artene finnes i en tidligere rapport²¹.



Figur 3.4. Potensial for proteinproduksjon fra nye kultiverte planter og dyr.

For de artene som skal dyrkes i store enheter på land (tanglopper og børstemark) er teknologitvilling i gang, men her gjenstår oppskalering til pilotskala og videre utvikling til industriell skala. Dette er både kompetanse- og kostnadskrevende, men råstoffet er verdifullt og organismene kan utnytte restråstoff fra andre industrier og slam fra oppdrettsnæringen. Det jobbes med å undersøke biosikkerheten ved å benytte ulike sidestrømmer til produksjon av lavtrofiske organismer. En fordel er at disse artene er en del av det naturlige kostholdet til fisk.

Landbasert produksjonen av tanglopper og børstemark er i dag fortsatt på forskningsstadiet. Produksjonen er kostbar, men kostnadene vil reduseres i takt med økt produksjon og teknologitvilling. Oppskalering må skje gradvis i takt med teknologitvillingen. Noen av fordelene med en slik produksjon er forutsigbar kvalitet, forutsigbar leveranse og lokal og sirkulær produksjon.

Tanglopper: En markedsanalyse fra Impello viste at dersom en pilotfabrikk ble bygget nå, kan det være mulig å produsere 25 tonn i 2029. Etter den tid kan fabrikker oppskaleres eller dupliseres til ønsket produksjon. Det er vanskelig å estimere vekstpotensialet i produksjonen siden det er en helt ny industri, men den har mange gode forutsetninger på plass: Produksjonen kan etableres lokalt, råstoffet kan produseres sirkulært av sidestrømmer fra annen industri, det etableres lokale arbeidsplasser, råstoffet har høyt proteininnhold, men også høyt innhold av omega-3-fettsyrer og astaxanthin.

²¹ SINTEF-rapport 2020-01128. "Bærekraftig fôr til norsk laks" Almås *et al.* ISBN 978-82-14-06436

Børstemark høstes i dag globalt i et kvantum på 120 000 tonn fra naturen til bruk som fôr i rekeoppdrett og agn for sportsfiske. I tillegg produseres 100 tonn i kommersielle anlegg. I Norge undersøker flere forskningsmiljøer om børstemark kan bli en fremtidig bærekraftig fôrkilde. For å utvikle en forutsigbar og biosikker produksjon er landbasert produksjon avgjørende. Det finnes mer enn 600 ulike arter av børstemark i Norge, og kun noen få utnyttes i denne produksjonen.

3.5 Mikrobiell produksjon av protein - encelleprotein

Mikroorganismer er en samlebetegnelse på små (mikroskopiske) organismer og inkluderer mikroalger, sopp, bakterier og arker. Diversiteten innenfor denne gruppen er enorm både med hensyn til levebetingelser og hvordan de skaffer seg energi og næring for vekst. Ved produksjon av encelleprotein dyrkes utvalgte mikroorganismer, normalt i renkultur, under kontrollerte betingelser i et vandig dyrkingsmedium i en lukket tank. Ofte tilsettes nødvendige komponenter enten kontinuerlig eller satsvis under dyrkingen, og luft (som kilde til oksygen) sterilfiltreres og blåses gjennom fermentoren kontinuerlig. Andre gasser som CO₂ og H₂ blåses også inn i fermentoren om nødvendig. Når konsentrasjonen av mikroorganismer i kulturen har nådd ønsket tetthet, høstes mikroorganismene ved sentrifugering og/eller filtrering og tørkes. Mulige substrater og teknologier for å produsere encelleprotein er mange (Figur 3.5, neste side) og disse vil bli diskutert i mer detalj under. For å forstå diskusjonen er det greit å ha klarhet i noen begreper.

3.5.1 Noen begreper

Energikilde (E-kilde)

For å vokse trenger mikroorganismene energi. Fototrofe mikroorganismer som mikroalger inkludert cyanobakterier skaffer seg denne energien fra (sol)lys på samme måte som planter. En del bakterier og arker kan skaffe seg energi ved å oksidere uorganiske forbindelser som hydrogen (H₂), sulfid (H₂S), jern (Fe²⁺) og ammonium (NH₄⁺). De fleste bakterier, arker, mugg- og gjærsopp skaffer seg imidlertid energi ved å bryte ned organiske forbindelser som glukose, cellulose, metan og metanol. I denne prosessen dannes CO₂ og/eller andre nedbrytningsprodukter. Mikroorganismer som vokser på organiske forbindelser kalles heterotrofe.

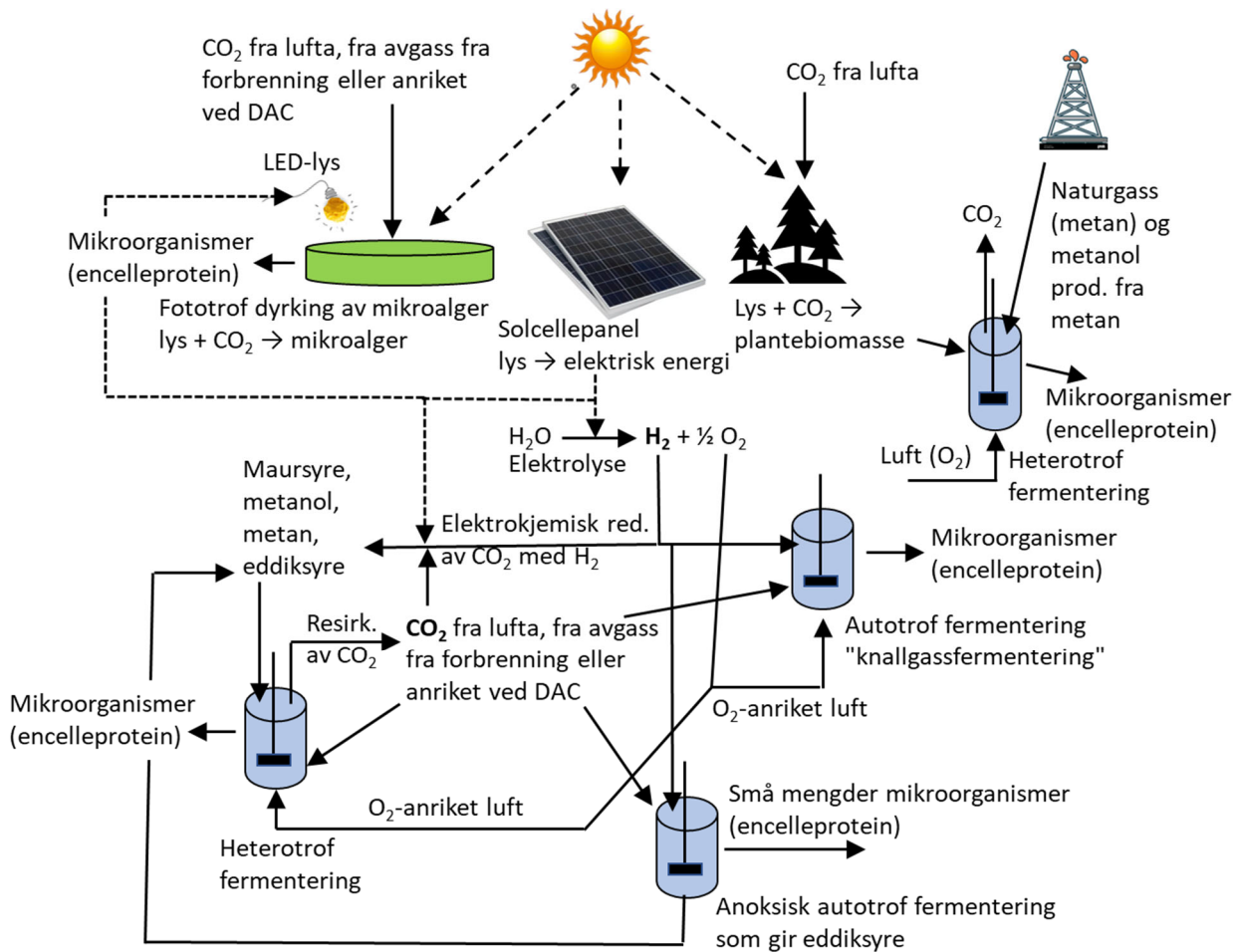
Karbonkilde (C-kilde)

På elementbasis utgjør karbon gjerne 40-55 % av tørrvekten av mikroorganismer, og for å kunne vokse og danne ny biomasse trenger mikroorganismene en karbonkilde (C-kilde). Heterotrofe mikroorganismer benytter organiske forbindelser som C-kilde, oftest den samme som de benytter som energikilde. Ved aerob vekst bygges om lag halvparten av C-atomene i den organiske forbindelsen inn i biomassen, mens den andre halvparten omdannes til CO₂ i nedbrytningsprosessen som skaffer energi til å bygge biomassen. Noen mikroorganismer kan, på samme måte som planter, ta opp CO₂ fra lufta og benytte denne til å bygge cellemasse. Mikroorganismer som benytter CO₂ som C-kilde kalles autotrofe. Energien for å bygge opp biomasse fra CO₂ henter de fra sollys eller oksidasjon av uorganiske forbindelser, bl.a. H₂.

Andre elementer (N, P, K, etc.)

Mikroorganismer trenger en lang rekke elementer i tillegg til karbon for å bygge ny biomasse. Nitrogen (N), som er et viktig element i protein, utgjør ofte 8-15 % av tørrvekten av mikroorganismer. I tillegg inneholder mikroorganismene gjerne 1-3 % fosfor (P), 1-3 % kalium (K), og mindre mengder av andre elementer som svovel (S), magnesium (Mg) og kalsium (Ca), foruten en

rekke spormineraler som jern (Fe), kobber (Cu) og sink (Zn). Kiselalger (diatoméer) som vil bli omtalt under, lever i et "glasshus" og for å bygge dette "glasshuset" trenger de silisium (Si). Når målet er å produsere flere hundre tusen tonn (tørrvekt) mikroorganismer per år blir behovet for andre elementer enn karbon betydelig. For å produsere 200 tusen tonn mikroorganismer (tørrvekt) med 12 % N, 3 % P og 3 % K kreves 24 tusen tonn N, 6 tusen tonn P og 6 tusen tonn K. Landbruket benytter mineralgjødning (NPK-gjødning). I 2020 ble mineralgjødning med totalt 106 tusen tonn N, 9 tusen tonn P, og 34 tusen tonn K benyttet i norsk landbruk²².



Figur 3.5. Produksjon av encelleprotein – mange muligheter. Tradisjonelt er encelleprotein blitt produsert ved fermentering av organiske forbindelser høstet fra plantemateriale (lignocellulose, sukker) eller utvunnet fra naturgass (metan, metanol), eller ved fotoautotrof dyrking av mikroalger med CO₂ som C-kilde. Det nye er fermenteringsprosesser hvor hydrogen (H₂) dannet ved hydrolyse av vann er energikilden, og CO₂ er C-kilden, enten direkte i en kjemoautotrof fermentering eller indirekte ved at CO₂ reduseres med H₂ til organiske forbindelser som så fermenteres heterotroft til encelleprotein. CO₂ + H₂ kan også fermenteres anaerobt til eddiksyre (+ små mengder mikroorganismer), som i neste omgang fermenteres aerobt og heterotroft til encelleprotein. Fordi konsentrasjonen av CO₂ i luft er lav, er det en fordel å benytte gass med høyere konsentrasjon av CO₂ fra f.eks. forbrennings- eller DAC-prosesser.

²² Statistisk sentralbyrå. Små endringer i mengde gjødning brukt i jordbruket (ssb.no)

Oksygen (O₂) – aerob og anaerob vekst

Mange mikroorganismer vokser godt i fravær av oksygen (anaerobt), og for noen er oksygen giftig, men fordi utbyttet av biomasse på substratbasis (C-kilde basis) er langt høyere ved aerob enn anaerob vekst er det i praksis dyrking i nærvær av oksygen (aerobt) som er aktuelt ved produksjon av encelleprotein. Et unntak skissert i Figur 3.5 er anoksisk (anaerob) fermentering av CO₂ + H₂ for å danne eddiksyre som deretter kan fermenteres aerobt til encelleprotein. I den anaerobe fermenteringer dannes også små mengder bakterier (encelleprotein), men hovedproduktet er eddiksyre og det er den påfølgende aerobe fermenteringen av eddiksyren som gir de store utbyttene av encelleprotein.

Veksthastighet

Veksthastigheten for ulike mikroorganismer varierer betydelig fra en doblingstid på under 20 minutter til flere døgn. I praktiske industrielle prosesser vil det imidlertid oftest være andre parametere som tilgang på oksygen eller lys som bestemmer veksthastigheten, og ikke mikroorganismenes vekstpotensial under ideelle betingelser. Sammenlignet med alternative dyrkede fôrkilder, er likevel produksjonspotensialet per tid per volum eller areal høyt for mikroorganismer.

Innhold av protein i mikroorganismer

Proteininnholdet i mikroorganismer er oftest fra 25 til 65-70 % av tørrvekten. Ved overslagsberegninger er 50 % protein et greit første estimat. I en del publisert litteratur opereres det med proteininnhold helt opp til 85-90 % av tørrvekten. Det som da oppgis er imidlertid såkalt råprotein, som er "protein"-innholdet beregnet ut fra innholdet av nitrogen (ofte N x 6.25). Raskt voksende mikroorganismer, og da spesielt bakterier, har et høyt innhold av nukleinsyrer (DNA, RNA) og disse inneholder også nitrogen. Dermed blir innholdet av råprotein langt høyere enn innholdet av "ekte" protein. I førsammenheng er det innholdet av "ekte" protein som teller, og i tillegg kan et for høyt innhold av nukleinsyrer i fôret ha negative effekter.

3.5.2 Storskala produksjon av encelleprotein – potensial, nødvendige arealer og miljømessige aspekter

Figur 3.5 (over) skisserer noen av de mange mulige produksjonsprosessene for encelleprotein, både autotrofe prosesser med CO₂ som C-kilde og lys eller H₂ som energikilde, og heterotrofe prosesser med ulike organiske substrater som karbon- og energikilde. Tabell 3.4 (neste side) gir estimert produksjonspotensial i 2030 og 2050 for en del mulige prosesser. Noen av prosessene er allerede oppskalert til industriell skala, mens andre kun er studert i laboratorie- eller pilotskala. Den store utfordringen i dag er ikke teknologien, men å utvikle prosesser som er økonomisk lønnsomme. Produksjon av encelleprotein har vært studert siden 1960-tallet, men andre alternativer, ikke minst soyaprotein, har vært rimeligere og de fleste industrielle anlegg som er blitt bygget er blitt nedlagt etter få år. Produksjon av encelleprotein har imidlertid, som diskutert under, miljø- og arealmessige fordeler som fram til nå har vært lite vektlagt. Økt fokus på disse aspektene kan gjøre produksjon av encelleprotein til fôr, både til fisk og dyr, og endog til mat for mennesker, mer aktuelt. Hvis miljømessige ulemper ved tradisjonell produksjon av mat og fôr, og da spesielt utslipp av klimagasser under produksjonen, i en ikke for fjern framtid avgiftsbelegges, kan dette styrke den økonomiske konkurransevnen til encelleprotein.

Tabell 3.4. Estimat for mulig produksjon av encelleprotein ved ulike prosesser.

| Metode | Produksjon (1000 tonn protein) | | | Kommentarer, status |
|---|-----------------------------------|---------------------|---------------------|---|
| | Produksjon i 2023 | Potensial i 2030 | Potensial i 2050 | |
| Heterotrof fermentering av glukose og/eller sukrose | 0 | 12 | 100 | Etablert teknologi, men synes ikke økonomisk lønnsomt i dag. Substratene (glukose fra hydrolysert stivelse) og sukrose (fra sukkerroer og sukkerrør) kan også anvendes som mat. Fermentering kan skje i Norge, men vil måtte baseres på importert råstoff. |
| Utvinning og heterotrof fermentering av sukker fra trevirke | 0 | 5 | 50 | Teknisk mulig, men synes ikke økonomisk lønnsomt i dag. Teoretisk kan norske skoger gi opp mot 600 tusen tonn protein per år. |
| Fototrof dyrking av mikroalger med CO ₂ som C-kilde | <1 | 5 | 20 | Teknisk mulig. Arbeid pågår for å oppskalere en prosess utviklet av UiT og Finnfjord AS. Protein er her et biprodukt ved produksjon av et fôrprodukt rikt på flerumettede fettsyrer. Behovet for elektrisk kraft dersom prosessen baseres utelukkende på kunstig belysning (LED-lys) er høyt, anslagsvis 13,5 TWh for 20 tusen tonn protein. |
| Heterotrof fermentering av råstoffer som metan, eddiksyre og metanol framstilt fra CO ₂ + H ₂ , alternativt autotrof fermentering av CO ₂ + H ₂ | 0 | 5 | 50 | Teknisk mulig, men økonomien er usikker. I kjemiske prosesser kan CO ₂ og H ₂ kombineres til produkter som i neste omgang fermenteres til encelleprotein. I autotrofe prosesser er ulempen at når O ₂ (fra lufta) og H ₂ blandes inne i fermentoren oppstår en eksplosjonsrisiko. Fordelen er at prosessen går i et trinn. Behovet for elektrisk kraft er høyt, anslagsvis 4,5 TWh for 50 tusen tonn protein. |
| Heterotrof fermentering av metan fra naturgass eller biogass | 0 | 8 | 80 | Skjer i begrenset produksjonsskala i dag. Nærmest ubegrenset potensial dersom fermenteringen baseres på naturgass. Norsk sokkel alene kan levere nok metan til å produsere flere titall millioner tonn protein. Men metan fra naturgass er fossilt karbon. Ikke-fossilt metan fra biogass kan fermenteres, men per i dag er råstofftilgangen for liten. |
| Sum | <1 | 35 | 300 | |

Mineralgjødning og drivhusgasser

Moderne, intensivt jordbruk benytter store mengder mineralgjødning (N-P-K) og en betydelig andel av denne mineralgjødning går tapt ved avrenning og for N-gjødning også ved denitrifisering til N₂ og drivhusgassen N₂O. Produksjonen av N-mineralgjødning skjer i dag ved Haber-Bosch prosessen hvor N₂ reduseres til NH₃ med H₂ utvunnet fra metan (naturgass). Dette medfører store utslipp av drivhusgassen CO₂. Produksjon og bruk av N-mineralgjødning er anslått å stå for 2,4 % av de globale

utslippene av drivhusgasser²³. Av dette skyldes 60 % utslipp etter at N-gjødsel er tilført jorda. I de senere år er det også blitt en viss frykt for fremtidig mangel på billig fosfor/fosfat til mineralgjødsel. Ved dyrking av planter i jordbruket er det bare en liten del av planten som til sist ender opp som mat. Resten kan eventuelt utnyttes som dyrefôr, men da vil bare en liten del av N og P i denne restmassen til slutt ende opp i mat (melk, kjøtt). Produksjon av encelleprotein skjer i et lukket system og utnyttelsen av tilsatt "mineralgjødsel" er i en riktig designet prosess nær 100 %, dvs. nesten all tilsatt N og P ender opp i mikroorganismene som høstes. Avrenning av fosfat- og nitrogengjødsel og denitrifisering av tilført nitrogengjødsel er ikke aktuelle problemstillinger. I tillegg er utnyttelsen av den produserte biomassen, mikroorganismene, som fôr eller mat høy (50-100 %). I den grad tilført N og P ikke inngår i det endelige produktet kan det resirkuleres. Dette innebærer at selv om tilsatt N til fermenteringen fortsatt produseres vha. Haber-Bosch prosessen med de utslipp av drivhusgasser dette medfører, er de totale utslippene av drivhusgasser per kg produsert og utnyttet protein betydelig lavere enn ved moderne, intensivt jordbruk, kanskje bare en tittel. Her trengs ytterligere analyser for å kvantifisere forskjellene.

Produksjon av encelleprotein medfører ikke store utslipp av drivhusgassen metan slik som produksjon av kjøtt og melk med drøvtyggere. Et mulig unntak er heterotrof fermentering av metan, hvor uhell og mindre lekkasjer av metan kan tenkes.

Arealbehov per kg protein produsert

Arealbehovet for et anlegg for å produsere encelleprotein er ikke ubetydelige fra et praktisk industri-anleggs-synspunkt, men sammenlignet med nødvendig areal for å produsere en tilsvarende mengde planteprotein er arealbehovet ved produksjon av encelleprotein neglisjerbart. Ved dyrking av soya, en av de mest effektive produksjonsprosessene for utnyttet planteprotein, er gjennomsnittlig utbytte av protein (i soyabønner) omkring $115 \text{ g/m}^2 \cdot \text{år}$ ²⁴. Utbyttet av protein (i mikroalger) i Finnjord-prosessen (se under) kan til sammenligning anslås til $10\text{-}50 \text{ kg protein/m}^2 \cdot \text{år}$. I heterotrofe fermenteringer for produksjon av encelleprotein kan utbyttet av protein per anleggsareal fort bli ti ganger større. Ved heterotrof fermentering må man imidlertid også inkludere nødvendig areal for å fram-skaffe C-kilden (se under). Nødvendig anleggsareal for produksjon av 100 tusen tonn encelleprotein fototroft kan anslås til $2\text{-}10 \text{ km}^2$, mens heterotrof produksjon kanskje krever $0.2\text{-}1 \text{ km}^2$. Et areal på 1 km^2 tilsvarer om lag 167 fotballbaner. I 2004 var det registrert 3442 fotballbaner i Norge²⁵.

Ved heterotrof fermentering av encelleprotein må C-kilden enten hentes fra fossile lagre (natur-gass), framstilles ved reduksjon av CO_2 med H_2 (se under), eller høstes i form av plantemateriale som lignocellulose eller sukker. Høsting av plantemateriale innebærer en betydelig allokering av areal til produksjon av C-kilden og anleggsarealet for produksjonsanlegget blir i denne sammenheng neglisjerbart. Ved produksjon av gjær ved fermentering av lignocellulose trengs omkring 18 m^3 trevirke for å produsere 1 tonn protein (se under), eller 1.8 millioner m^3 for å produsere 100 tusen tonn protein. Gitt en gjennomsnittlig årlig tilvekst i norske skoger på om lag 0.3 m^3 under bark per dekar²⁶ tilsvarer dette den årlige tilveksten i om lag 6000 km^2 skogareal. Til sammenligning kreves om lag 870 km^2 for å produsere 100 tusen tonn protein i form av soyabønner. Sukkerroer gir

²³ Huber, B. 2021. https://thefern.org/ag_insider/report-fertilizer-responsible-for-more-than-20-percent-of-total-agricultural-emissions/ og referanser der

²⁴ Leger *et al.* 2021. Photovoltaic-driven microbial protein production can use land and sunlight more efficiently than conventional crops. PNAS, 118 (26) e2015025118

²⁵ Fotballbane. Wikipedia. <https://no.wikipedia.org/wiki/Fotballbane>

²⁶ Statistisk sentralbyrå. Skogtaksering. <https://www.ssb.no/321770/skogtaksering.staende-volum-og-arlig-tilvekst-sa-358>

i Europa i gjennomsnitt om lag 1.2 kg sukker/m² år²⁷. Gitt et utbytte av protein på 25 % på sukkerbasis i fermenteringen, gir dette ca. 300 g protein/m² år og et arealbehov på 333 km² dyrket land med sukkerroer for å produsere 100 tusen tonn protein. Dette arealet blir gjødslet (se diskusjon om N-gjødsel og drivhusgasser over), men det er verd å merke seg at utbyttet av protein per areal totalt sett ved dyrking av sukkerroer for å produsere sukker som så fermenteres til encelleprotein, bare er 38 % av arealbehovet for å produsere samme mengde protein i form av soyabønner. Soyafeltene blir også tilført mineralgjødsel.

Hydrogen (H₂) kan fungere som energikilde for autotrof vekst av bakterier på CO₂ og som reaktant for kjemisk reduksjon av CO₂ til komponenter som maursyre, metan, metanol og eddiksyre som deretter kan fermenteres heterotroft til encelleprotein. H₂ kan produseres ved elektrolyse av vann, men energibehovet er betydelig (se under). Som diskutert over krever produksjon av plantebasert råstoff for heterotrof fermentering til encelleprotein betydelige arealer. Et alternativ er å dekke store arealer med solcellepanel for å framskaffe elektrisk energi til hydrolyse av vann for å danne H₂, samt til drift av et DAC-anlegg for å fange og oppkonsentrere CO₂ fra lufta. Deretter benyttes H₂ + CO₂ til produksjon av encelleprotein, enten direkte ("knallgassfermentering") eller indirekte ved at H₂ + CO₂ kjemisk omdannes til organiske forbindelser som så fermenteres heterotroft til encelleprotein. Det aller meste av arealbehovet ved en slik strategi vil være knyttet til solcellene.

I en teoretisk analyse fant Leger *et al.* (2021)²⁸ at mens soyabønner i gjennomsnitt ga 115 g protein/m² år, kunne kombinasjonen av solceller for produksjon av energi til hydrolyse av vann, drift av et DAC-anlegg for å trekke CO₂ ut av lufta, og drift av en mikrobiell fermentering, samlet gi hele 400-800 g protein/m² år ved en årlig solinnstråling på 800 kWh/m² år (tilsvarende solinnstrålingen i Skottland) og 900-1600 g protein/m² år ved en solinnstråling på 2000 kWh/m² år (tilsvarende California-dalen). En viktig grunn til at encelleprotein kommer så godt ut sammenlignet med planteprotein er at i mikroorganismer utgjør protein ofte 40-65 % av biomassen og 50-100 % av biomassen utnyttes som fôr, mens i planter er det nyttbare proteininnholdet langt lavere. Ved produksjon av gras på Østlandet i Norge er utbyttet av protein om lag 80 g/m² år²⁹. I Norge er solinnstrålingen 700-1000 kWh/m² år, høyest på Sør- og Østlandet³⁰. Basert på solinnstrålingen i Skottland som er på samme nivå som på Østlandet, kan det dermed produseres 5-10 ganger mer protein per areal hvis enga i stedet fylles opp med solceller og det bygges et fermenteringsanlegg for encelleprotein. Solcellepanelene plasseres i nærheten av dyrket mark eller beiteområder, og energiproduksjon kan på denne måten kombineres med gårdrift.

Kombinasjonen av solceller for produksjon av energi for hydrolyse av vann til H₂, DAC-teknologi for å utvinne CO₂ fra lufta og fermentering for å bygge biomasse kan, lett filosofisk, betraktes som en menneskeskapt fotosyntese. Denne nye fotosyntesen er imidlertid ennå ikke like effektiv som naturens tradisjonelle fotosyntese hvis vi sammenligner produksjonsprosesser med om lag like høyt utbytte av nyttbart protein. Ved dyrking av mikroalger i åpne dammer i varme, solrike strøk er utbyttet av biomasse 25-40 g tørrvekt/m² døgn³¹, eller 9.1-14.6 kg biomasse/m² år. Hvis vi antar 33

²⁷ 365FarmNet. <https://www.365farmnet.com/en/newsroom/parameters-for-sowing-sugar-beet-in-europe/>

²⁸ Leger et al. 2021. Photovoltaic-driven microbial protein production can use land and sunlight more efficiently than conventional crops. PNAS, 118 (26) e2015025118

²⁹ Enger, E.G. og Ingvaldstad, A. 2018. Kan grasprotein bli nytt grisefør? <https://svineportalen.no/kan-grasprotein-bli-nytt-grisefor/>

³⁰ Solenergiklyngen. Mer om solenergi – Solenergiklyngen The Norwegian Solar Energy Cluster {:}

³¹ Subramanian, S. og Sayre, R.T. 2022. The right stuff; realizing the potential for enhanced biomass production in microalgae. *Front. Energy Res.* 10:979747. doi: 10.3389/fenrg.2022.979747

% protein i biomassen gir dette 3.0-4.8 kg protein/m² år. Dette er om lag 3 ganger høyere enn det estimerte utbyttet ved kombinasjonen av solceller, DAC og fermentering i de samme strøk; 0.9-1.6 kg protein/m² år.

Ferskvannsbehovet ved mikrobiell produksjon av encelleprotein er mye mindre enn ved intensivt jordbruk

En fordel ved produksjon av encelleprotein, og da spesielt kombinasjonen solceller/H₂, DAC og fermentering, som kanskje ikke er så viktig i Norge, men desto viktigere i mange andre land, er et betydelig redusert behov for ferskvann relativt tradisjonelt jordbruk. Selve fermenteringsprosessen kan trenge litt ferskvann, men per kg protein produsert vil dette behovet være lavt. Det store behovet for vann ved fermentering er knyttet til behovet for kjølevann for å kontrollere temperaturen i fermentorene. Men her kan sjøvann og vann fra saltsjøer brukes. Av korrosjonshensyn sirkuleres helst ferskvann gjennom fermentorens kjølesystemer, men dette kjølevannet kan deretter kjøles ned igjen i et eksternt saltvannsbasert kjølesystem. I varme strøk kan tilgjengelig kjølevann være relativt varmt, 25-35 °C, men dette kan kompenseres ved å utvikle prosesser hvor encelleprotein produseres av termofile (varmeelskende) mikroorganismer som vokser ved 50-60 °C. I varme, tørre strøk kan store arealer av ørken/halvørken være tilgjengelige for å plassere ut solceller for å produsere elektrisk kraft. Produksjonen av H₂ og fermenteringen kan skje i et annet geografisk område, f.eks. på kysten, og hvis CO₂ høstes fra luften med DAC-teknologi kan dette skje hvor som helst. Teoretisk kan en slik strategi øke produksjonen av protein og/eller lipid dramatisk per areal i tørre strøk som i dag er lite egnet eller uegnet for jordbruk. I en verden med en voksende befolkning kan dette bli viktig. De miljømessige fordelene relativt intensivt jordbruk bør heller ikke ignoreres, inkludert en (trolig) kraftig redusert jorderosjon.

3.5.3 Dyrking av mikroorganismer for produksjon av encelleprotein - teknologien

Encelleprotein fremstilles ved å dyrke utvalgte mikroorganismer i et vandig dyrkingsmedium i en lukket tank. Inn i tanken blåses som oftest luft, iblant luft anrikt på oksygen (O₂) og eventuelt en CO₂-anrikt gassfase, f.eks. røykgass. Oksygen er svært lite løselig i vann og ved heterotrof dyrking (organisk C-kilde) blir hastigheten for overføring av oksygen fra luften og inn i væskefasen som løst O₂, raskt begrensende for veksten i bioreaktoren. Kraftig røring for å skape små luftbobler og dermed stor gass-væske overflate, er nødvendig for å oppnå rask oksygenoverføring og høy volumetrisk produktivitet (gram celler produsert per liter og time). Overtrykk inne i tanken kan også benyttes for å fremme rask overføring av oksygen fra luften til væska.

CO₂ er langt mer løselig i vann enn O₂ og overføringshastigheten for CO₂ fra gass til væskefase er sjeldent et problem. H₂ er derimot enda mindre løselig enn O₂ i vann og derfor en enda større utfordring å få overført fra gass- til vannfasen i tilstrekkelig høy hastighet.

Ved fototrof dyrking av mikroalger må man sikre effektiv tilførsel av CO₂ og lys i tillegg til nødvendige næringsstoffer for å oppnå høy produktivitet. Ved høye celletettheter er det tilgang på lys som begrenser veksten. Når kulturen blir tett, skygger cellene for hverandre og dette begrenser hvor tett en algekultur i praksis kan bli før veksten mer eller mindre stanser opp. Når det er lite lys tilgjengelig vil algene reagere med å danne store mengder pigment for å øke evnen til lysabsorpsjon. Dette forverrer problemet med selvskygging, og gjør at algene som til enhver tid oppholder seg lengst borte fra lyskilden ikke har tilgang til nok lys til å kunne drive fotosyntese, mens algene som befinner seg nært lyskilden absorberer mer lys enn de klarer å utnytte, og avgir absorbert lysenergi

som varme. Den mest vanlige måten å løse denne utfordringen på i dag er å benytte fotobioreaktorer som består av gjennomsiktig materiale og har kort lys-vei gjennom kulturen (flatpanel- eller tubulære reaktorer) for å unngå at tilgang på lys blir begrensende for vekst. Slike fotobioreaktorer kan gi >2 g tørrvekt/L døgn³². Ulempen med flatpanel og tubulære fotobioreaktorer er at de er dyre og arealkrevende. I tillegg kan begroing på veggene i reaktoren være en utfordring. I varme, solrike land kan man senke kostnadene ved å dyrke mikroalgene i åpne, grunne dammer, men her kan kontaminering av andre organismer være en stor utfordring. Dyrking av mikroalger i nordiske land vil være avhengig av kunstig belysning, i det minste deler av året. En mulig kostnads- og arealbesparende måte for fototrof dyrking av mikroalger er å dyrke dem i store tanker utstyrt med et stort antall lysrør (LED-lys) for å tilføre kulturen tilstrekkelig med lys (se Kap. 3.5.6). Avstanden mellom lysrørene vil være en nøkkelfaktor, og man må finne en balansegang mellom å ha nok lys til å sikre akseptabel produktivitet og kostnadene forbundet med lyssetting. Et pågående forskningsprosjekt fokuserer på å utvikle denne type fotobioreaktorer for industriell produksjon av mikroalger ved Finnfjord AS. Igjen, som nevnt over, er volumetrisk produktivitet viktig, og en tett men langsomt voksende kultur av mikroalger kan gi lavere volumetrisk produktivitet enn en noe tynnere kultur av langt raskere voksende mikroalger.

Ved fremstilling av encelleprotein til fôr er det viktig å ha kontroll med hvilken eller hvilke mikroorganismer som dyrkes i tanken. Hvis en fremmed, såkalt kontaminerende mikroorganisme, kommer inn i tanken kan den utkonkurrere den eller de ønskede mikroorganismene i tanken. Alle mikroorganismer inneholder protein så slik sett er ikke dette en katastrofe, men kontaminanten kan i uheldigste fall produsere giftstoffer eller annet som gjør det senere fôret uspiselig for fisken. En annen mulighet er at det kommer inn bakteriofager (virus som angriper bakterier) i kulturen som dermed kollapser. Bakterier som angriper og "spiser" andre bakterier (*Bdellovibrio*) er heller ikke ønskede gjester. For å unngå uønskede "gjester" må dyrkingsmediet, dyrkingstanken, og nødvendige rør og fødetanker steriliseres før bruk. Dyrkingsmediet steriliseres normalt med oppvarming under trykk til 120-150 °C, mens utstyr steriliseres med damp og høyt trykk slik at de temperatur-behandles ved 120-150 °C. Lufta som blåses inn i tanken steril-filtreres på vei inn. Kostnadene til sterilisering av medium og utstyr, samt hygienisk design av tanker og utstyr kan være betydelige.

Høyest volumetrisk produktivitet oppnår man i en såkalt kontinuerlig kultur hvor nytt dyrkingsmedium kontinuerlig føres inn i tanken samtidig som et tilsvarende volum med kultur tappes ut. Slike systemer er imidlertid også mest utsatt for kontaminering, og kontinuerlige systemer er derfor mest aktuelt når mikroorganismene dyrkes på et substrat, f.eks. metan eller metanol, som relativt få mikroorganismer kan vokse på. Dermed reduseres risikoen for at en kontaminant som kan skape problemer skal dukke opp. En kontaminant som ikke kan vokse på substratet (C-kilden) har ikke mulighet for oppformering og vil bare passere gjennom prosessen. Ved fototrof dyrking av mikroalger er mulige kontaminanter begrenset til andre fototrofe mikroorganismer og dette reduserer risikoen ved en kontinuerlig prosess. Imidlertid, mikroalger skiller ofte ut litt karbonkilde i form av eksudater som kan gi grunnlag for en bakgrunns-vekst av heterotrofe bakterier i en kultur som ellers mhp. biomasse er dominert av mikroalger (>99 %). Så lenge dette ikke er patogene (sykdomsframkallende) eller toksinproduserende bakterier er bakgrunnsveksten ikke noe problem.

³² Eilertsen *et al.* 2022. Mass cultivation of microalgae: I Experiences with vertical column airlift photobioreactors, diatoms and CO₂ sequestration. *Appl. Sci.* **12**: 3082

Men ved produksjon av mikroalger som fôr er det likevel verd å ha oppmerksomhet på disse bakteriene.

Ved produksjon av bakterielt encelleprotein er batch eller fødet batch-produksjon vanligst. Da vil bioreaktoren med jevne mellomrom tømmes, vaskes og resteriliseres før ny oppstart. Men "død-tiden" ved tømning, vasking, sterilisering, oppfylling og oppstart innebærer at den gjennomsnittlige volumetriske produktiviteten per reaktorvolum blir lavere enn ved kontinuerlig produksjon hvor anlegget produserer med maksimal hastighet hele tiden.

Iblant har man forsøkt hygienisk, men ikke steril prosess for å spare merutgiftene ved å bygge og drive et anlegg for aseptisk produksjon av mikroorganismer. Dette er særlig aktuelt i situasjoner hvor man har et stabilt konsortium av mikroorganismer som seg imellom utnytter substratet og vekstbetingelsene så godt at sjansen for at en tilfeldig kontaminant skal kunne utkonkurrere dem er svært liten, selv om den i og for seg kan vokse på det substratet som organismene dyrkes på. Imidlertid, før eller siden vil det dukke opp enten et bakteriofag som er spesialisert på en av mikroorganismene som dyrkes i tanken, eller en bakteriespisende bakterie som angriper en eller flere av produksjonsorganismene. Hvis anlegget da ikke kan steriliseres er det nærmest umulig å bli kvitt inntrengerne, og disse vil uansett være spredt i området omkring anlegget og det vil ikke ta lang tid før de dukker opp igjen dersom man forsøker seg på fortsatt hygienisk produksjon.

3.5.4 Høsting av mikroorganismene – sentrifugering/mikrofiltrering og tørking

De produserte mikroorganismene i kulturen høstes i regelen ved sentrifugering eller mikrofiltrering. Kostnadene til dette trinnet per kg protein avhenger av konsentrasjonen av celler i kulturen som høstes. I heterotrofe prosesser er 50-100 kg (tørrvekt) per m³ ikke uvanlig, men i fototrofe prosesser kan konsentrasjonen være bare 0.5-1 kg per m³. Etter den første oppkonsentreringen tørkes mikroorganismene. Dette er energikrevende. I en evaluering av storskala fermentering for produksjon av encelleprotein basert på metan, anslo Garcia Martínez *et al.* (2022)³³ energibehovet for fermenteringen til 1.6 kWh/kg encelleprotein og energibehovet ved sentrifugering for å oppkonsentrere cellene til 0.8 kWh/kg encelleprotein, mens energibehovet ved den påfølgende spraytørkingen var hele 5.8 kWh/kg encelleprotein. Dersom et prosessanlegg for produksjon av encelleprotein lokaliseres nær en fiskefôrfabrikk er det mulig "grøten" av mikroorganismer etter sentrifugering kan gå direkte inn i fôrproduksjonen uten å gå via et tørt produkt. Dette vil imidlertid kreve god logistikk. Uten tørking vil "grøten" av mikroorganismer være svært lite holdbar. Et alternativ til å plassere produksjonsanlegget nær en fiskefôrfabrikk er å plassere fiskefôrfabrikken nær fermenteringsanlegget. Dette er særlig aktuelt i situasjoner hvor produksjonen av mikroorganismer er basert på et punktutslipp av CO₂.

3.5.5 Egenskaper ved mikrobielt protein som fôr til fisk

Aminosyresammensetningen av mikrobielt protein er normalt godt sammenlignbar med fiskemel. En utfordring kan derimot være fordøyeligheten av proteinet, en nøkkelfaktor i førsammenheng. Her kan celleveggen i mikroorganismene, spesielt i gjær, være en utfordring. Teknologi for å svekke

³³ Garcia Martínez, J.B. *et al.* 2022. Methane single cell protein: Potential to secure a global protein supply against catastrophic food shocks. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 10:906704. doi: 10.3389/fbioe.2022.906704

celleveggen er utviklet³⁴ og i tillegg kan cellevegg-komponenter i noen gjær³⁵ og bakterier³⁶ ha positive effekter på fiskens helse. I dag er det likevel vanligst å erstatte kun en del av proteinet i fôret med encelleprotein. Ofte er det en del av fiskemelet som erstattes med encelleprotein.

Mikroorganismer, og spesielt bakterier, har et høyt innhold av nukleinsyrer (RNA og DNA). Disse inneholder puriner som kan omdannes til urinsyre og gi helseplager for mennesker og andre pattedyr dersom inntaket blir for høyt. Et for høyt inntak av nukleinsyrer kan også skape problemer for fisk, men salmonider og "sea bass" har en meget aktiv lever-uricase og tolererer høyere nivåer av nukleinsyrer enn pattedyr, minst 5 % og kanskje opp mot 10 % av dietten³⁷. Mikroorganismer inneholder ofte 5-15 % av tørrvekt nukleinsyrer. Så lenge tilsatsen av encelleprotein i fôret begrenses noe, bør ikke innholdet av nukleinsyrer bli et problem. Gitt 50 % av tørrvekt protein og 10 % av tørrvekt nukleinsyrer i biomassen, kan halvparten av proteinet i fiskefôret trolig greit erstattes med protein fra mikroorganismer uten at nukleinsyrer blir et problem. Det er mulig å redusere innholdet av nukleinsyrer i den mikrobielle biomassen, men dette innebærer selvfølgelig ekstra produksjonskostnader.

I foringsforsøk fram til nå har tilsatsen av encelleprotein vært begrenset, i høyden opp til rundt halvparten av fiskemelet på proteinbasis. Fiskemel er normalt den beste, men også mest kostbare proteinkilden i fiskefôr og det er naturlig å søke å erstatte en del av denne med encelleprotein. Men hvis vi ser framover kan stadig økende produksjonsvolum av oppdrettslaks gjøre det ønskelig og kanskje nødvendig å erstatte mer en halvparten av proteinet i fiskemel med encelleprotein. Per i dag synes det uklart om dette vil være mulig uten videreforedling av encelleprotein, f.eks. for å redusere innholdet av nukleinsyrer. Kombinasjon av encelleprotein fra ulike produksjonsorganismer (gjær, bakterier, mikroalger) kan også være aktuelt, blant annet for å balansere aminosyresammensetningen. Her synes ytterligere studier nødvendig.

3.5.6 Mikroalger – Finnfjord-prosessen

Smelteverket Finnfjord AS utenfor Finnsnes har siden 2015 samarbeidet med UiT - Norges arktiske universitet om å utvikle en prosess for massekultivering av store kiselalger tilpasset lave temperaturer og lysintensiteter, og som tåler lav pH. Kiselalgene dyrkes i vertikal kolonne fotobio-reaktorer med CO₂ fra røykgassen fra smelteverket som C-kilde og LED-lys som energikilde. Et fremtidig mål er å kunne fange halvparten av det CO₂ som smelteverket slipper ut årlig ved bruk av mikroalger. NO_x i røykgassen har også vist seg å fungere som uorganisk N-kilde, noe som senker behovet for å tilsette dette næringsstoffet. Konseptet for dyrking av mikroalger ved Finnfjord AS er å dyrke store kaldtvannstilpassede kiselalger i store tanker. Store tanker er kostnads- og arealbesparende. Store kiselalger absorberer mindre lys per volum (eller biomasse) enn små, og man oppnår derfor økt lysgjennomtrenging i kulturen. Algene må kunne vokse ved lave temperaturer siden de dyrkes utendørs nord for polarsirkelen i sjøvann fra den lokale fjorden. Kiselalgen man har hatt mest suksess med til nå (*Porosia glacialis*), vokser godt ved lav temperatur (<12 °C) og

³⁴ Øverland, M. & Skrede, A. 2017. Yeast derived from lignocellulosic biomass as a sustainable feed resource for use in aquaculture. *J. Food Sci. Agric.* **97**: 733-742

³⁵ Grammes *et al.* 2013. *Candida utilis* and *Chlorella vulgaris* counteract intestinal inflammation in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *PLoS ONE*, 8 (12): e83213. doi: 10.1371/journal.pone.0083213

³⁶ Romarheim *et al.* 2013. Cell wall fractions from *Methylococcus capsulatus* prevent soybean meal-induced enteritis in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture* **402-403**: 13-18

³⁷ Li, P. & Gatlin III, D.M. 2006. Nucleotide nutrition in fish: Current knowledge and future applications. *Aquaculture* **251**: 141-152

inneholder lipid med et høyt innhold av den flerumettede omega-3 fettsyren eikosapentaensyre (EPA) [20:5(n-3)] (ca. 33 % av fettsyrene). EPA er en viktig komponent i det "sunne" laksefettet, og laksen må få tilført denne fettsyren gjennom føret. Algen inneholder om lag 25 % av tørrvekt protein og 15 % lipid.

I et pågående forskningsprosjekt er målet å oppskalere produksjonen fra nåværende tankvolum på 300 m³ til 3000 m³. Det fremtidige målet er et totalt produksjonsvolum på 10 000 m³. Optimal størrelse, antall og form på tankene for å nå dette målet er fortsatt ukjent. Målet er 20-32 tusen tonn (tørrvekt) mikroalger med 5-8 tusen tonn protein og 3-5 tusen tonn lipid. I denne prosessen vil trolig lipid være primærproduktet og protein et verdifullt biprodukt. I dagens prosess er produktiviteten om lag 0.22 (0.18-0.42) kg mikroalger (tørrvekt)/m³ døgn³⁸. Dette tilsvarer omkring 0.05 kg protein/m³ døgn eller 20 kg protein/m³ år. Målet med det pågående forskningsprosjektet er å minst doble produktiviteten.

Tilgjengelig CO₂ i røykgassen fra Finnfjord AS er 300 tusen tonn per år. Dersom man en gang i framtiden klarer å fange opp og utnytte halvparten av CO₂ i røykgassen som slippes ut, kan dette teoretisk gi omkring 110 tusen tonn mikroalger (tørrvekt) (antar 40 % av tørrvekt C i algene) med 27 tusen tonn protein og 16 tusen tonn lipid. Prosessen kan også kanskje eksporteres til andre prosessanlegg i Norge med store punktutslipp av CO₂. Fotobioreaktorene vil imidlertid kreve litt areal. Det er ikke gitt at alle anlegg med store punktutslipp av CO₂ har den nødvendige plassen tilgjengelig. Tilgang på sjøvann kan også være en begrensende faktor. Energiforbruket knyttet til LED-lysene for å forsyne algene med nødvendig lys er ikke offentlig kjent, men basert på Blanken *et al.*³⁹ er det kanskje 130-150 kWh/kg tørrvekt mikroalger, som tilsvarer 520-600 MWh/tonn protein. I tillegg kommer kraftbehovet knyttet til pumper, sentrifugering og tørking av cellemassen. Ifølge Blanken *et al.* kan videre utvikling av LED-teknologien på sikt kanskje redusere behovet for energi til lys til omkring 100 kWh/kg tørrvekt mikroalger.

Finnfjord-prosessen er interessant fordi den er under utvikling i Norge og har fokus på et produkt for fiskefôr. Men den volumetriske produktiviteten er moderat. I kunstig belyste flatpanel- eller tubulære reaktorer kan man oppnå 5-10 ganger høyere volumetrisk produktivitet, men reaktor- og produksjonskostnadene er også vesentlig høyere og så langt synes ikke økonomisk interessante prosesser for produksjon av encelleprotein basert på slike reaktorer å ha blitt utviklet. Ulike høykostprodukter blir produsert i slike prosesser. I varmere og mer solrike land enn Norge dyrkes mikroalger også i åpne dammer med sola som lyskilde. Produksjonskostnadene kan bli lave, men fordi det ikke er mulig å sikre seg mot fremmede mikroalger og andre mikroorganismer i slike systemer, er de mindre aktuelle for produksjon av encelleprotein.

Det estimerte behovet for elektrisk energi for å produsere lys som energikilde i den fototrofe Finnfjord-prosessen (520-600 kWh/kg protein) er vesentlig høyere enn det estimerte behovet for el-kraft for å produseres H₂ ved hydrolyse av vann og påfølgende reduksjon av CO₂ til et organisk substrat for heterotrof fermentering til encelleprotein (55-189 kWh/kg protein) (se under). Mikroalgen i Finnfjord-prosessen har imidlertid et relativt lavt proteininnhold (ca. 25 % av tørrvekt), men til gjengjeld et høyt innhold (ca. 15 % av tørrvekt) av verdifullt fett. Bakteriene i heterotrofe encelleprotein-prosesser har et høyt proteininnhold (50-60 % av tørrvekt), men ikke fett

³⁸ Eilertsen *et al.* 2022. Mass cultivation of microalgae: I Experiences with vertical column airlift photobioreactors, diatoms and CO₂ sequestration. *Appl. Sci.* **12**: 3082 <https://doi.org/10.3390/appl12063082>

³⁹ Blanken *et al.* 2013. Cultivation of microalgae on artificial light comes at a cost. *Algal Res.* **2**: 333-340

av betydning. Det er også mulig man ved kløktig design av prosessen kan klare å utnytte sollys i den fototrofe prosessen i deler av året. Hvis ikke synes det estimerte behovet for elektrisk kraft å sette begrensninger for hvor stor Finnfjord-prosessen kan bli i nasjonal målestokk. Produksjon av 100 tusen tonn protein per år med Finnfjord-prosessen kan, basert på tallene over, kreve 52-60 TWh/år. Den norske normalårsproduksjonen av elektrisk kraft (i all hovedsak vannkraft) var ved inngangen til 2022 beregnet til 154.8 TWh⁴⁰. Skal fototrof dyrking av mikroalger bli en vesentlig kilde til fôrprotein må prosessen fortrinnsvis baseres på en mikroalge med et høyere proteininnhold (~50 % av tørrvekt) og et prosessdesign hvor man i betydelig grad kan utnytte sola som lyskilde.

3.5.7 Heterotrof dyrking på sukker

Heterotrof dyrking av mikroorganismer på sukker, i første rekke glukose eller sukrose, for å produsere encelleprotein er etablert teknologi. Fordelen med sukker som C-kilde er at høye konsentrasjoner av sukker ikke er toksisk for mikroorganismene, slik som f.eks. metanol, og det er derfor lett å tilsette høye konsentrasjoner av C-kilden i fermentoren. Dette gjør det enkelt å oppnå en høy sluttkonsentrasjon av mikroorganismer i fermentoren, 50-80 kg tørrvekt per m³ er forventet, og mer enn 100 kg tørrvekt per m³ er ikke umulig. De fleste mikroorganismer vokser godt på ulike sukkere og utvalget av mulige produksjonsorganismer er derfor stort. Et av de få encelle-produktene som har oppnådd kommersiell suksess, "quorn", er basert soppen *Fusarium venenatum* som dyrkes på glukose. Soppen gir et fibrillært protein som kan omformes til et produkt med en konsistens som minner om kjøttdeig og selges til vegetarianere og andre. Proteinet blir ekstrahert fra soppen etter høsting og deretter behandlet for å fjerne overskuddet av nukleinsyrer (RNA og DNA). Disse inneholder puriner som kan omdannes til urinsyre og gi helseplager dersom inntaket blir for høyt.

I førsammenheng har kostnadene ved produksjon av encelleprotein fra sukker vært for høye til å konkurrere med alternativer som soyaprotein. Tidlig i 2023 var glukoseprisen i USA 0.56-0.58 USD/kg⁴¹ og prisen på sukrose 0.47-0.56 USD/kg⁴². Gitt 50 % celleutbytte på sukkerbasis og 50 % protein i cellene, gir dette 1.87-2.32 USD/kg protein, som med 10.67 NOK/USD gir en sukkerkostnad på 20-25 NOK/kg protein. Grovt regnet utgjør C-kilden 50 % av kostnadene ved fermentering av encelleprotein. Dette gir et grovt estimat for total produksjonskostnad på 40-50 NOK/kg protein. Dette er vesentlig høyere enn protein i form av soyamel (13-14 NOK/kg protein⁴³) og også høyere enn prisen på protein i fiskemel (26-29 NOK/kg protein juli-22 til feb-23⁴⁴).

I en overordnet betraktning er det også et ankepunkt at de mest aktuelle sukkerne, sukrose fra sukkerrør og sukkerroer, og glukose fra hydrolyse av mais- og hvetestivelse, også kan anvendes som menneskeføde. En alternativ sukkerkilde er cellulose og hemicellulose fra tremasse (se under). Myse, et biprodukt ved produksjon av ost inneholder laktose og er en mulig sukkerkilde for framstilling av encelleprotein. Imidlertid er konsentrasjonen av laktose i myse relativt lav (ca. 49 g/L) og dette begrenser hvor høy konsentrasjon av mikroorganismer som kan oppnås i fermentoren (25-30 g tørrvekt/L), og dermed den volumetriske produktiviteten. Laktosen i myse kan oppkonsentreres, f.eks. ved inndamping, men da blir prisen raskt for høy.

⁴⁰ Energifakta Norge. <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftforsyningen/>

⁴¹ <https://www.selinawamucii.com/insights/prices/united-states-of-america/glucose/>

⁴² Daily Sugar Prices | International Sugar Organization (isosugar.org)

⁴³ <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=soybean-meal>

⁴⁴ https://www.theglobeconomy.com/world/fish_meal_prices/

Utvinning av sukrose fra sukkerrør og sukkerroer gir et restprodukt, melasse, som er en velegnet sukkerkilde i fermenteringsprosesser. Produksjon av encelleprotein fra melasse er mest aktuelt i sukkerproduserende områder.

3.5.8 Heterotrof dyrking av gjær på lignocellulose (trevirke, halm, etc.)

Trevirke og halm består i hovedsak av lignocellulose som er en blanding av cellulose (35-50 %), hemicellulose (20-30 %) og lignin (20-30 %). Cellulose består av lange kjeder av glukosemolekyler mens hemicellulose er bygget opp av flere ulike heksoser og pentoser. Lignin er et makromolekyl bygget opp av aromatiske forbindelser. Lignin er tungt nedbrytbart for mikroorganismer, mens cellulose og hemicellulose er relativt lett nedbrytbare. En viktig funksjon til lignin i lignocellulose er å beskytte cellulose og hemicellulose mot mikrobiell nedbryting. I tillegg beskytter oppbyggingen og strukturen av trevirke og halm mot mikrobiell nedbryting.

Gjennom mekanisk og enzymatisk forbehandling kan sukkerne i lignocellulose gjøres lettere tilgjengelige for mikroorganismer. Lignin separeres gjerne i fra under forbehandlingen. Deretter benyttes sukkerne som C-kilde for å produsere encelleprotein, ofte i form av gjær som *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida utilis* og *Kluyveromyces marxianus*⁴⁵. Forsøk har vist at encelleprotein i form av gjær kan erstatte 40 % av proteinet i fiskemel i fôr til atlantisk laks⁴⁶.

Den totale norske tilveksten av skog i Norge er anslått til omkring 25 millioner m³ per år, men kun 11-13 millioner m³ høstes i dag⁶⁸. Fordelen med trevirke som sukkerkilde er at produksjon av skog normalt ikke konkurrerer med matproduksjon. For å produsere 1 tonn gjær eller omkring 500 kg gjærprotein kreves om lag 9 m³ trevirke (under bark)⁴⁷. Basert på tilveksten i norske skoger og anvendt trevirke i dag kan opptil 12-14 millioner m³ trevirke være tilgjengelig for produksjon av encelleprotein, tilsvarende 667-778 tusen tonn encelleprotein. Imidlertid vil miljø- og kostnadsmessige faktorer begrense hvor mye skog som i praksis kan høstes utover dagens nivå. Bark inneholder komponenter som virker negativt på fermenteringsprosessen⁶⁸ slik at "overskuddsvirke" som grener, topper og stubber har begrenset verdi. Sagflis og tre-pellets er mest aktuelt, men dette er råstoff som de siste årene har fått økt etterspørsel som klimanøytral energikilde, enten direkte eller via omforming til biokull. Avhengig av bruk og lagring kan biokull produsert fra trevirke også føre til netto fjerning av CO₂ fra atmosfæren.

Solberg *et al*⁶⁸ antok i en analyse av prosessøkonomien at 2,5-10 millioner m³ trevirke var tilgjengelig for produksjon av encelleprotein, tilsvarende 139-556 tusen tonn protein per år. Ved produksjon av encelleprotein utgjør kostnadene til C-kilden ofte omkring halvparten av de totale produksjonskostnadene. Solberg *et al.* anslø prisen for trevirke tilgjengelig for produksjon av encelleprotein til fiskefôr til 50-70 euro/m³ i ulike scenarier fram mot 2050, tilsvarende 450-630 euro/tonn gjær eller 0,90-1,26 euro/kg protein. Gitt 11,29 NOK/euro gir dette 10-14 NOK/kg protein. Men før trevirket kan fermenteres må det behandles mekaniske og enzymatisk. Enzymkostnadene ble av Solberg *et al.* anslått til 28 Euro/tonn gjær eller 0.6 NOK/kg protein, mens kostnadene til den mekaniske delen av forbehandlingen av trevirket ikke ble anslått. Grovt regnet

⁴⁵ Øverland, M. og Skrede, A. 2017. Yeast derived from lignocellulosic biomass as a sustainable feed resource for use in aquaculture. *J Sci Food Agric.* **97**: 733-742

⁴⁶ Øverland *et al.* 2013. Evaluation of *Candida utilis*, *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces cerevisiae* yeasts as protein sources in diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture* **402-403**: 1-7

⁴⁷ Solberg *et al.* 2021. Wood for food: Economic impacts of sustainable use of forest biomass for salmon feed production in Norway. *Forest Policy and Economics*, **122**: 102337

blir dermed kostnadene for sukker utvunnet fra trevirke 11-16 NOK/kg protein, som er lavere enn for en prosess basert på sukrose eller glukose, 20-25 NOK/kg protein (se Kap. 3.5.7). I en produksjonsprosess for encelleprotein hvor C-kilden utgjør en så stor del av totale produksjonskostnader, er dette ikke ubetydelig. Hvis vi benytter samme grove estimat for encelleprotein basert på trevirke som for encelleprotein basert på glukose eller sukrose, dvs. C-kilden utgjør 50 % av totale produksjonskostnader, gir dette en total produksjonskostnad i området 22-32 NOK/kg protein, som er på nivå med protein i fiskemel (26-29 NOK/kg protein juli-22 til feb-23⁴⁸).

Prisen på trevirke er ikke uavhengig av lokaliteten det høstes på ettersom transport kan bli en betydelig kostnad. Det er lettere å transportere tørket cellemasse framstilt ved fermentering av sukker fra tremasse enn å transportere tømmerstokker. Basert på tallene over gir 9 m³ trevirke (3-4 tonn) om lag 1 tonn tørkede gjærceller (ca. 2 m³). Land som Sverige, Finland og Russland har store skoger og kan ha lokaliteter hvor prisen på tømmer og energi lokalt kan gjøre produksjon av encelleprotein mer interessant, men da er ikke produksjonen lenger norsk. I tillegg kan produksjon av biokull også være aktuelt på slike lokaliteter.

3.5.9 Heterotrof dyrking på metan

Norge har stor tilgang på metan i form av naturgass. Tradisjonelt har metan vært en lav-kost C-kilde i fermenteringsprosesser, men utvalget av mikroorganismer som kan utnytte metan som C-kilde er begrenset. I dag (våren 2023) er prisen på karbon i form av glukose (glukose-C) ca. 15 NOK/kg, versus kanskje 6-9 NOK/kg CH₄-C (under "normale" forhold, per i dag er gassprisen høyere). Metan er imidlertid en meget redusert C-kilde og aerob mikrobiell vekst på metan krever om lag dobbelt så mye oksygen per C omsatt som vekst på glukose. Fermentering med metan som C-kilde krever derfor større tilførsel av oksygen per kg bakterier produsert og dette er også en kostnad. Eventuelt kan man benytte seg av prosesser som øker andelen oksygen i lufta. Som nevnt over, er tilførselen av oksygen ofte begrensende for produktiviteten i heterotrofe prosesser. En billigere C-kilde i form av metan, men noe redusert volumetrisk produktivitet og høyere utgifter til O₂-tilførsel, må veies opp mot en noe dyrere C-kilde som glukose og høyere volumetrisk produktivitet. Samtidig er risikoen for kontaminering av en metan-basert prosess for produksjon av encelleprotein langt lavere enn risikoen for kontaminering av en glukose-basert prosess. Utbyttet av cellemasse på metan er omkring 0.9 kg celler/kg metan versus omkring 0.5 kg celler/kg glukose. Men per kg CH₄-C og glukose-C er utbyttet om lag det samme.

I intensive fermenteringer utvikles et overskudd av varme som må fjernes for å hindre at mikroorganismene i bioreaktoren overopphetes og inaktiveres. Utviklingen av varme i en fermentering er korrelert med oksygenforbruket, og behovet for kjøling av bioreaktoren i en metanbasert prosess er langt høyere per kg celler produsert enn i en glukosebasert prosess. I Norge er imidlertid tilgang på tilstrekkelige mengder godt kjølevann sjeldent et problem.

Den norske produksjonen av naturgass i 2022 var $122 \cdot 10^9 \text{ Sm}^3$,^{49,50} som tilsvarer ca. 74 millioner tonn metan pluss litt etan (6-7 millioner tonn) og propan (ca. 9 millioner tonn). I noen fermenteringer

⁴⁸ https://www.theglobaleconomy.com/world/fish_meal_prices/

⁴⁹ Sm³ = standard kubikkmeter og definert som mengde gass i 1 m³ ved 1 atm (1013.25 hPa) og 15 °C. Norsk naturgass inneholder ofte 88-91 % metan, noe etan (4,7-5,7 %), propan (1,0-1,5 %), butan (ca. 0,5 %), CO₂ (0,8-1,6 %), og N₂ (1,5-2,9 %), samt små mengder tyngre hydrokarboner. Antatt 90% CH₄ i naturgassen tilsvarer 1 Sm³ 609 g CH₄. Ved beregning av energiinnhold benyttes 40 MJ eller 11,111 kWh per Sm³ naturgass.

⁵⁰ <https://e24.no/energi-og-klima/i/rlz0qK/ferske-anslag-fra-oljedirektoratet-venter-oekt-produksjon-frem-til-2025>

teringer utnyttes også etan og propan, men dette krever et stabilt konsortium av flere ulike bakterier. Gitt et utbytte på 0.9 kg bakterier (tørrvekt) med 50 % protein per kg alkan, gir dette et teoretisk produksjonspotensial på vel 33 millioner tonn protein basert på metan alene og vel 40 millioner tonn protein hvis også etan og propan utnyttes. Med naturgass fra norsk sokkel som C-kilde er det mulige norske produksjonsvolumet av encelleprotein derfor meget høyt. Ulempen er at denne karbonkilden har fossilt opphav.

En alternativ metankilde er biogass dannet ved gjæring av organisk avfall. Norsk produksjon av biogass var i 2021 ca. 700 GWh⁵¹ fra 50 anlegg. Gitt 11.111 kWh/Sm³ metan tilsvarer dette ca. 43 tusen tonn metan, som med et utbytte på 0.9 kg tørrvekt bakterier per kg metan og 50 % av tørrvekt protein i bakteriene, gir 19 tusen tonn protein. Fordelen med biogass er at karbonet i metan ikke har fossilt opphav og dermed kan gi klimanøytralt encelleprotein. Mange biogassanlegg er imidlertid små og lite aktuelle å koble til et anlegg for produksjon av encelle-protein. Per i dag er derfor det norske potensialet for encelle-protein basert på biogass neppe mer enn noen få tusen tonn protein. Den norske biogassbransjen har en ambisjon om å øke produksjonen fra 0.7 TWh i dag til over 10 TWh⁵². Hvis man lykkes med denne satsingen, som teoretisk vil øke mulig proteinutbytte fra 19 tusen tonn til mer enn 270 tusen tonn, kan det åpne seg muligheter for anlegg hvor metan fra biogass fermenteres til encelleprotein, som da kanskje kan øke til noen titall tusen tonn protein.

I årene framover er den norske produksjonen av gass og olje forventet å synke. I Oljedirektoratets basisscenario for 2050 er samlet produksjon bare omkring 1/3 av dagens produksjon. Med tanke på en eventuell produksjon av encelle-protein basert på naturgass er imidlertid tilgangen på naturgass fortsatt rikelig relativt behovet for fôrprotein. Selv i et lav-scenario hvor samlet produksjon i 2050 bare er omkring 3 % av dagens produksjon vil det være mulig å produsere omkring 1 million tonn protein dersom dette prioriteres. I tillegg kan metan/naturgass importeres dersom produksjonsanleggene er bygget og nedbetalt.

Den største utfordringen i dag ved produksjon av encelle-protein basert på metan/naturgass er å oppnå en økonomisk lønnsom prosess. Men det amerikanske selskapet Calysta produserer og selger et mikrobielt protein (FeedKind)⁵³ for fiskefôr basert på den metanotrofe bakterien *Methylococcus capsulatus*. Produksjonen skjer i en spesiell rør-reaktor og er en videreføring av den prosessen som gikk i noen år på Tjeldbergodden. FeedKind markedsføres som en delvis erstatning for fiskemel i fiskefôr. Dagens produksjon (2023) er om lag 20 tusen tonn protein per år, og det er planer om økt produksjon⁵⁴.

3.5.10 Heterotrof dyrking på metanol

Dette er en av de første encelle-prosesser som ble utviklet til industriell skala av ICI (Imperial Chemical Industries) i form av produktet Pruteen basert på bakterien *Methylophilus methylophilus*. Store industrielle fermentorer ble bygget for prosessen på 1970-tallet, men anleggene ble nedlagt etter få år. Metanol for prosessen ble framstilt ved oksidering av metan fra naturgass, som

⁵¹ Biogass Norge. Biogasstatistikk 2021. <https://biogassnorge.no/wp-content/uploads/2022/03/Biogass-statistikken-2021-rapport-1.pdf>

⁵² Lyng, K.A. og Berntsen, I.C. 2023. Mulighetsrommet for produksjon av biogass i Norge. NORSUS rap. OR 06.23

⁵³ FeedKind - Sustainable feed for a sustainable world <https://feedkind.com/>

⁵⁴ Calysta's dried fermented protein, FeedKind, earns FDA GRAS status for aquafeeds. 20.2.2023.

<https://www.globalseafood.org/advocate/calystas-dried-fermented-protein-feedkind-earns-fda-gras-status-for-aquafeeds/>

på den tiden var meget billig og ga en C-kilde (metanol) som var langt billigere enn sukker per karbon. Etter oljekrisa på 1970-tallet var metan ikke lenger billig.

På 1970-tallet utviklet Phillips Petroleum en prosess basert på gjærsoppen *Komagataella phaffii* (tidligere kjent som *Pichia pastoris*), men prosessen ble avvirket da prisen på metanol fra metan etter oljekrisa økte kraftig. I fermenteringsprosessen ble det oppnådd 125-150 g tørrvekt celler/L⁵⁵ og i kontinuerlig kultur var produktiviteten opptil 11 g tørrvekt celler/L time⁵⁶.

På bakgrunn av de industrielle prosessene som ble utviklet på 1970-tallet må produksjon av encelleprotein fra metanol ansees som etablert teknologi. Metanol kan også framstilles fra CO₂ + H₂ (se under). I dag er dette mer aktuelt enn framstilling fra metan, og kan gi en klimanøytral C-kilde.

En fordel med metanol framfor metan er at metanol er en væske som er godt blandbar i vann og lett å transportere og handtere. En ulempe er at metanol forgifter produksjonsorganismen hvis konsentrasjonen blir for høy. Konsentrasjonen av metanol under fermenteringen må derfor kontrolleres nøye. I små reaktorer (opp til noen m³) er dette enkelt, men i store fermentorer (~1000 m³) er ikke dette like enkelt ettersom metanol også må tilføres og fordeles i kulturen kontinuerlig og gradienter kan oppstå. Tekniske løsninger ble imidlertid utviklet på 1970-tallet.

3.5.11 Encelleprotein basert på H₂ + CO₂

Tradisjonelt er encelleprotein blitt produsert i heterotrofe fermenteringsprosesser med en organisk karbon- og energikilde, og i fototrof prosesser med CO₂ som karbonkilde og lys som energikilde. I de siste årene har en ny strategi fått økt oppmerksomhet; hydrogen (H₂) som energikilde og CO₂ direkte eller indirekte som karbonkilde. Delvis henger dette sammen med økt fokus på utslipp av klimagasser, men den rivende utviklingen innen solcelleteknologi er også viktig. Når H₂ produseres ved hydrolyse av vann med grønn energi (sol-, vind- eller vannkraft) og CO₂ høstes fra avgass fra forbrenningsprosesser eller direkte fra luften med DAC-teknologi⁵⁷ kan encelleproteinet bli nær klimanøytralt og produksjonsanlegget kan plasseres uavhengig av tilgang på lys og egnede organiske karbonkilder.

Autotrof dyrking på CO₂ med H₂ som energikilde

I den såkalte "knallgass-prosessen" vokser kjemoautotrofe bakterier på CO₂ og benytter H₂ som energikilde. Prosessen er teknisk mulig, og flere store selskaper arbeider med den. Men i fermentoren blandes H₂ og O₂ (tilført via luften som tilføres denne aerobe prosessen) og eksplosjonsfaren er høy. Fordelen er at omdanningen av CO₂ + H₂ til cellemasse med protein skjer i et trinn.

Kjemisk omforming av CO₂ til ulike substrater med etterfølgende heterotrof dyrking på disse

CO₂ kan reduseres kjemisk med hydrogen (H₂) til eddiksyre, maursyre, metanol eller metan, som så i neste trinn fermenteres heterotroft til encelleprotein. Fordelen med denne strategien er at man unngår den relativt risikofylte operasjonen som en knallgass-fermentering innebærer.

CO₂ kan hentes fra mange kilder. Direkte oppkonsentrering fra luften er mulig (DAC-teknologi) men fordi konsentrasjonen av CO₂ i luft er meget lav (0.04 %) er dette relativt kostbart og energikrevende. Mer CO₂-rike gasser som avgassen fra forbrenningsprosesser (5-15 % CO₂) og biogass (40-60 % CO₂) er derfor mer attraktive. Fra sistnevnte må trolig metan først fjernes. Om lag

⁵⁵ Wegner, G.H. 1990. Emerging applications of the methylotrophic yeasts. *FEMS Microbiol. Rev.* **87**: 279-284

⁵⁶ Wegner, E.H. 1983. Biochemical conversions by yeast fermentation at high cell densities. US Pat. 4,414,329

⁵⁷ DAC = "direct air capture" av CO₂

halvparten av organisk C tilført aerobe fermenteringer ender opp som CO₂ og kan resirkuleres inn i syntesen av organiske substrat ved hjelp av H₂ (se Figur 3.5 side 22).

Elektrolyse av vann (H₂O) for å produsere hydrogen (H₂) er meget energikrevende, langt mer energikrevende enn å utvinne H₂ fra metan (CH₄) slik det gjøres i Haber-Bosch prosessen. I elektrolysen av vann dannes oksygen (O₂) som biprodukt. Dette kan utnyttes i den påfølgende aerobe heterotrofe fermenteringen. I intensive aerobe fermenteringer er god tilførsel av oksygen alltid en utfordring og anrikning av lufta med O₂ fremmer tilførselen av oksygen.

Elektrokjemiske reduksjon av CO₂ med H₂ til maursyre (HCOOH), metan (CH₄), metanol (CH₃OH) eller eddiksyre (H₃CCOOH) er også energikrevende prosesser. Alternativt kan CO₂ + H₂ fermenteres anaerobt til eddiksyre. I prosessen dannes også små mengder encelleprotein, men hovedproduktet er eddiksyre, som deretter kan fermenteres aerobt til encelleprotein.

Mishra *et al.* (2020)⁵⁸ estimerte det teoretiske celleutbyttet på energibasis ved de ulike alternativene. Utbyttet varierte fra 9,5-32,8 mg tørrvekt celler/KJ eller 2,6-9,1 g tørrvekt celler/kWh. Gitt 50 % protein i biomassen tilsvarer dette 55-189 MWh per tonn protein. De mest energieffektive prosessene var elektrokjemisk reduksjon av CO₂ til eddiksyre og metanol med påfølgende fermentering av disse.

Gitt den mest energieffektive framstillingen av biomasse kreves teoretisk 5.5 TWh for å produsere 100 tusen tonn protein. I en praktisk prosess vil utbyttet være lavere, kanskje 6.5-8 TWh. I dette regnestykket er ikke energibehovet ved fermentering, oppkonsentrering og tørking av biomassen inkludert. Dette behovet kan estimeres til vel 8 kWh/kg biomasse eller om lag 1,7 TWh for 100 tusen tonn protein. Samlet behov for elektrisk kraft for å produsere 100 tusen tonn protein kan dermed estimeres til 8-10 TWh. Den norske normalårsproduksjonen av elektrisk kraft (i all hovedsak vannkraft) var ved inngangen til 2022 beregnet til 154,8 TWh⁵⁹. Produksjon av 100 tusen tonn fôrprotein vha. CO₂ + H₂ vil dermed kreve 5.2-6.5 % av den norske normalårsproduksjonen av elektrisk kraft. Dette er likevel betydelig mindre enn det som kreves for å produsere 100 tusen tonn protein vha. fototrofe mikroalger og utelukkende kunstig belysning (LED-lys), anslått til minst 20-30 TWh.

3.5.12 Andre prosesser for produksjon av encelleprotein

I denne rapporten er det malt med "bred pensel". I tillegg til de mulige substratene diskutert over er det miljø som arbeider med andre mulige C-kilder som karbonmonoksid (CO) og syngass. Mikroorganismer kan også benyttes til å resirkulere organisk avfall fra ulike prosesser. En ulempe med avfall som råstoff for produksjon av encelleprotein er at dette betinger god kontroll over prosessen som skaper avfallet for å sikre at uønskede forbindelser ikke resirkuleres tilbake i nytt fôr. I tillegg er en viss størrelse på produksjonsanlegget og stabil tilgang på råstoff gjennom året viktig for å oppnå en lønnsom prosess. Hvis ikke disse betingelsene er oppfylt hjelper det ikke nødvendigvis at råstoffet er gratis eller tilnærmet gratis. Imidlertid, hvis det først er etablert bruk av encelleprotein i produksjonen av fiskefôr vil det også være enklere for prosesser basert på kvantitativt små C-kilder å få innpass. Det er ikke uten videre enkelt eller ønskelig for store fiskefôrprodusenter å tilpasse produksjonsprosessen og fôret til en varierende tilgang til mindre proteinkilder, men er først

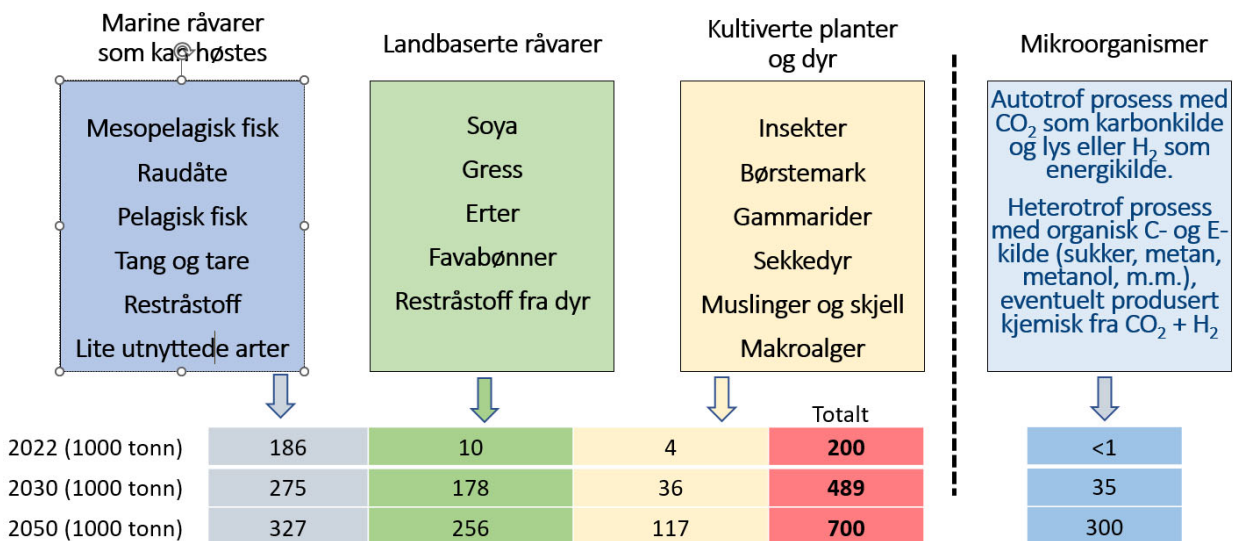
⁵⁸ Mishra, A., Ntihuga, J.N., Molitor, B. og Angenent, L.T. 2020. Power-to-protein: Carbon fixation with renewable electric power to feed the world. *Joule*, 4: 1142-1152

⁵⁹ Energifakta Norge. <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftforsyningen/>

encelleprotein blitt en etablert del av fôret vil det være enklere å ta inn små og sporadiske leveranser av annet encelleprotein.

3.6 Oppsummerende oversikt

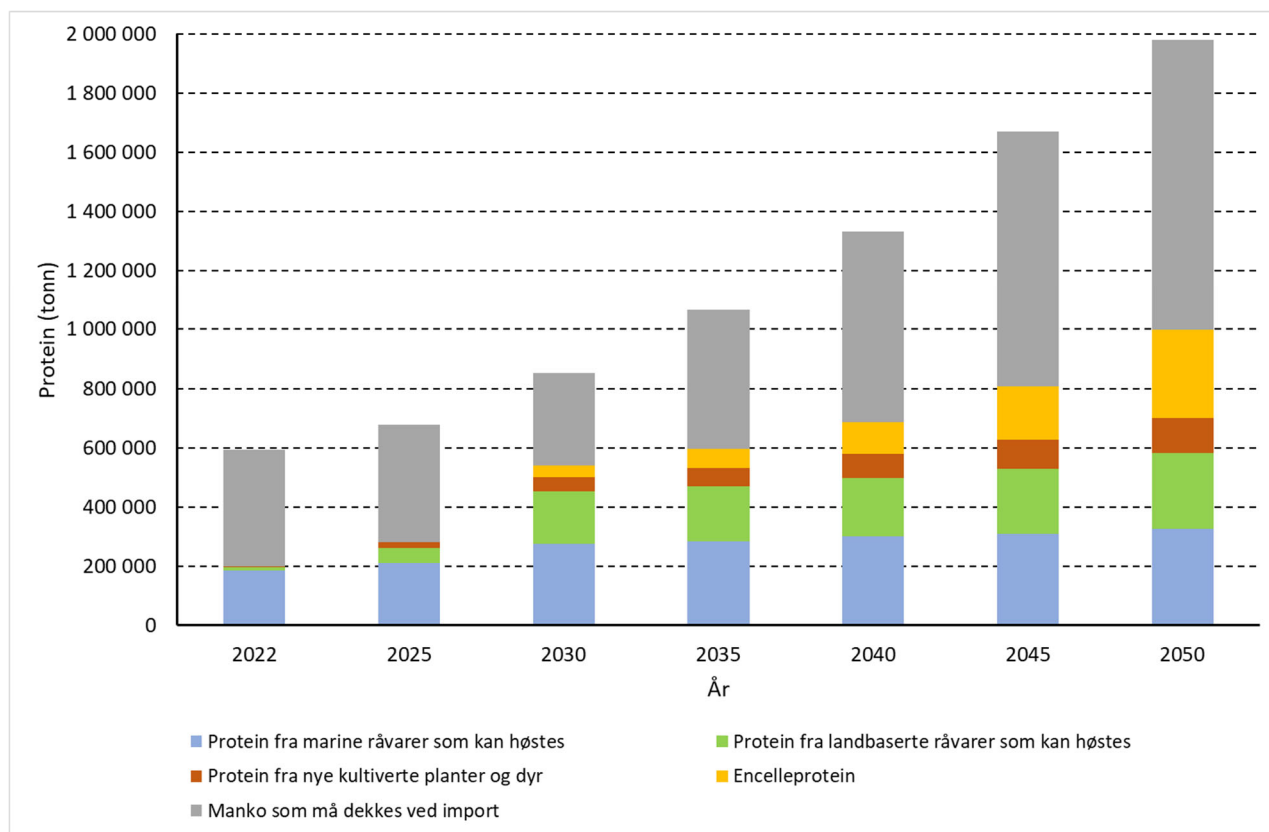
Figur 3.6 oppsummerer gjennomgangen av mulige strategier for å øke den nasjonale produksjonen av fôrprotein fram mot 2030 og 2050. Sammenholdt med et forventet behov på 1.15 millioner tonn protein i 2030 og 2 millioner tonn protein i 2050 blir det, selv ved en vellykket økning av fôrproteinproduksjonen på alle felter, en betydelig manko som vil måtte dekkes ved fortsatt import av bærekraftig produsert fôrprotein. Det er også viktig å være oppmerksom på at tallene i Figur 3.6 betinger en sterk og aktiv satsing for å øke proteinproduksjonen innenfor de ulike områdene. Av protein-kildene listet i Figur 3.6 er det kun pelagisk fisk, 143 tusen tonn protein per år, og restråstoff fra marin fangst, 33 tusen tonn per år, som i dag er kvantitativt viktige. Dette viser hvilken formidabel innsats som kreves dersom produksjonen av fôrprotein skal økes til 489 tusen tonn i 2030 og 700 tusen tonn i 2050. I denne rapporten har vi primært vurdert de tekniske mulighetene for produksjon. Selv om man skulle lykkes med oppskalering av en prosess må proteinet kunne leveres til en pris som gjør det interessant for oppdrettsindustrien. Det er ikke gitt at det alltid vil være tilfelle.



Figur 3.6. Oversikt over mulige kilder til produksjon av fôrprotein og grove overslag over hva de enkelte gruppene kan bidra med i 2030 og 2050 gitt en sterk satsing på området i de neste år. Dagens potensiale fra kildene er indikert.

Selv om vi skulle lykkes fullt ut med å oppskalere produksjonen av fôrprotein vil vi ikke være i nærheten av målet om fullt ut norsk produksjon av fôrprotein egnet for fiskeoppdrett (se Figur 3.7, neste side). Den eneste muligheten som da framstår, er å etablere en fermenteringsindustri for produksjon av encelleprotein. En slik produksjon kan, som vist på de foregående sider, skje på flere ulike måter. Fra et langsiktig bærekraftperspektiv er trolig prosesser hvor biomassen bygges opp fra CO₂ høstet fra atmosfæren å foretrekke, men disse prosessene er meget energikrevende og vil kreve store mengder grønn el-kraft (vind, vann, sol, bølger). På mellomlang sikt fram mot 2050 er det neppe realistisk at tilstrekkelige mengder el-kraft vil være tilgjengelig til en pris som gjør encelleprotein interessant som protein i fiskefôr. På kort sikt er derfor encelleprotein produsert ved fermentering av importert sukker og/eller metan fra naturgass de mest realistiske løsningene.

Noe av sukkeret kan eventuelt erstattes av sukkere utvunnet fra trevirke, men sukkere fra trevirke kan neppe dekke hele sukker-behovet ved storskala produksjon av encelleprotein i Norge. Metan fra naturgass har vi rikelig av i Norge, men ulempen er at dette er fossilt karbon. Teknologien for produksjon av encelleprotein fra sukker og metan er etablert, men i per i dag sliter disse prosessene med å produsere protein til en pris som kan konkurrere med protein fra høyverdige proteinkilder som fiskemel. Plantebasert protein som soyaprotein er langt rimeligere enn protein fra fiskemel.



Figur 3.7 En mulig utvikling i produksjon og import av fôrprotein fra i dag og fram til 2050. I figuren er det antatt at vi lykkes fullt ut med utviklingen av alle marine proteinkilder som høstes (Tabell 3.1), alle landbruksbaserte kilder som høstes (Tabell 3.2) og alle nye kultivering av dyr og planter (Tabell 3.3). I tillegg er det lagt inn et anslag for utviklingen av en ny fermenteringsindustri for produksjon av encelleprotein som gir 300 tusen tonn protein per år i 2050 (Tabell 3.4).

4 Alternative muligheter til økt produksjon av fôrråvarer

Under er det diskutert noen mulige tiltak for å møte en strammere tilgang på fôrråvarer i fremtiden. Kan vi gjøre noe med hvilke arter vi produserer? Hvordan anvender vi det fôret som er tilgjengelig? Kan vi øke utbyttet av fisk per kg fôr? Kort sagt, hvilke mulige strategier og tiltak finnes?

4.1 Produksjon av plantespisende (herbivore) fiskeslag

Fiskeoppdrett i EU domineres av laks, ørret, havabbor (*Dicentrarchus labrax*) og gilthead seabream (*Sparus aurata*), som alle hører hjemme høyt oppe i næringskjeden. Europakommisjonen har fremhevet diversifisering av akvakulturporteføljen til å inkludere både ikke-fôrede og lavtrofiske arter, samt dreining av produksjonen mot integrerte systemer (IMTA, integrated multitrophic aquaculture), som tiltak for å styrke og gjøre EU's akvakulturnæring mer konkurransedyktig⁶⁰. Her kan produksjon av herbivore og omnivore fiskearter være viktige bidrag, som påpekt i forskningsprosjekter som DIVERSIFY (<http://www.diversifyfish.eu/>) og FISHFORWARD (<https://www.fishforward.eu/>).

Kaninfisker (*Siganidae*) er en gruppe planteetende fisk som er utbredt fra det Indopasifiske havområdet til Middelhavet⁶¹. De finnes normalt i marint miljø og har bred toleranse for salinitet og oksygennivåer. Kaninfisker er populære i matretter i Asia, og er kjent for å ha gode ernærings- og organoleptiske egenskaper. Historisk har det vært viden akseptert at marine teleoster (beinfisk), i motsetning til ferskvannsfisk og laksefisker (anadrome), har begrenset til ingen kapasitet til å biosyntetisere langkjedede, flerumettede omega-3 fettsyrer (*n*-3 LC-PUFA) fra C₁₈ flerumettede fettsyrer (PUFA) som α -linolensyre (18:3n-3) og linolsyre (18:2n-6)⁶². Arten *Siganus canaliculatus* er vist å ha hele det enzymatiske apparatet som trengs for selv å syntetisere *n*-3 LC-PUFA fra kortere forløpere som finnes i vegetabiliske oljer⁶³, og denne prosessen kan påvirkes både av diett og salinitet. Til tross for å ha blitt identifisert som en lovende art for akvakultur, er den så langt ikke etablert i kommersiell produksjon, med unntak av kortvarig på-vekst av individer under markedsstørrelse tatt inn som bifangst ved kommersielt fiske. Arten gresser normalt på bentiske makroalger og kan fôres på fôr med høyt innslag av mikro- og makroalger og andre plantebaserte råmaterialer.

Den diadrome⁶⁴ melkefisker (*Chanos chanos*) anses som en ideell kandidat for akvakultur på grunn av sin brede toleranse for salinitet som gjør den egnet til både fersk- og brakkvannsproduksjon⁶⁵, raske vekst og evne til å vokse godt på rene plantebaserte dietter^{66 67}. Arten produseres i dag i 18 forskjellige land og utgjorde i 2017 3,6 % av verdens samlede akvakultur (ekskl. Kina)⁶⁸. Den

⁶⁰ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0236&from=EN>

⁶¹ Amor, K. O.-B., et al. (2016). "Westernmost occurrence of the dusky spinefoot *Siganus luridus* (Osteichthyes, Siganidae) along North African coasts." *Arxius de Miscel: ània Zoològica* **14**: 99-107.

⁶² Xie, D., et al. (2015). "Characteristics of LC-PUFA biosynthesis in marine herbivorous teleost *Siganus canaliculatus* under different ambient salinities." *Aquaculture Nutrition* **21**(5): 541-551.

⁶³ Xie, D., et al. (2021). "Regulation of long-chain polyunsaturated fatty acid biosynthesis in teleost fish." *Progress in Lipid Research* **82**: 101095.

⁶⁴ En diadrom fisk er en fisk som lever vekselvis i ferskvann og sjøvann. En samlebetegnelse som omfatter både anadrome, katadrome og amfidrome fisker.

⁶⁵ Dissanayake, D. (2019). "Milkfish Aquaculture in Sri Lanka: Progress, Challenges and Opportunities." *Aquaculture of Commercially Important Finfishes in South Asia*: 159.

⁶⁶ Jana, S., et al. (2006). "Effect of inland water salinity on growth performance and nutritional physiology in growing milkfish, *Chanos chanos* (Forsskal): field and laboratory studies." *Journal of Applied Ichthyology* **22**(1): 25-34.

⁶⁷ Hussain, M., et al. (2021). "Effect of varying dietary protein levels on growth performance and survival of milkfish *Chanos chanos* fingerlings reared in brackish water pond ecosystem." *The Egyptian Journal of Aquatic Research* **47**(3): 329-334

⁶⁸ Cai, J., et al. (2019). "Top 10 species groups in global aquaculture 2017." Rome: Fisheries and Aquaculture Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

største utfordringen for denne arten er tilgang til nok yngel, som i dag må høstes fra naturlige populasjoner hvor tilgangen er stadig synkende. Behovet for stamfisk og kunstig befruktning er derfor presserende⁶⁹.

En annen omnivor art som er ansett som en god kandidat for lavtrofisk oppdrett er ekte multe (*Mugil cephalus*). Arten sies å ha samme organoleptiske egenskaper som havabbor (*D. labrax*) og i tillegg ansees rogna som en delikatesse («bottarga»)⁷⁰. Oppdrett av ekte multe er i likhet med melkefisk, begrenset av tilgang til yngel som må høstes fra ville bestander⁷¹.

4.2 GMO

Bruk av genetisk modifiserte råvarer i fôr så vel som oppdrett av en genetisk modifisert laks har ikke oppnådd markedsaksept i Europa som er dagens hovedmarked for denne fisken. Det er ikke godtatt av konsumentene at det for eksempel anvendes genmodifisert soya i fôret, selv om studier har vist at dette ikke har noen negative effekter⁷². Det er derfor grunn til å tro at selv om dagens laksefôr holdes fritt for genetiske råvarer, er det ikke sikkert dette vil være tilfelle i fremtiden når det blir ytterligere knapphet på mat. Flerumettet fett produsert av genmodifiserte mikroalger kan i dag benyttes som fôringrediens så lenge det hverken inneholder protein eller nukleinsyrer.

Selv om dagens oppdrettslaks representerer generasjon 11 der det hele veien har blitt drevet systematisk avlsarbeid, er det ikke akseptabelt at det blir tatt i bruk moderne genteknologiske metoder for eksempelvis å utvikle en "*superlaks*". En gjennomgang av de mulighetene som fortsatt ligger i videre avlsarbeid/bruk av genetik er gitt i en artikkel publisert i 2022 under overskriften "*The power of genetics*"⁷³. Den beskriver et betydelig potensial for produksjonsvekst, og estimerer at produksjonstiden kan reduseres med over 50 %, og produksjonen pr. konsesjon dermed kan økes med 121 % i 2050. Genetisk seleksjon kan stå for 77 % av det nye volumet som må fremskaffes for å nå 5 millioner tonn. Dette er et betydelig potensial som må tas i betraktning når ambisjonen om 5 millioner tonn laks i 2050 skal realiseres.

4.3 Kan vi forbedre fôrutnyttelsen

Økt fôrutnyttelse i akvakultur kan tilnærmes fra to retninger: Fôret og fisken. Dette omhandler følgende tema:

- (1) Metabolsk/ernæringsprogrammering
- (2) Genetikk
- (3) Rollen til mikrobiomet i fôrutnyttelse
- (4) Funksjonelle fôringrediensers rolle i fôrutnyttelsen
- (5) Økonomisk fôrfaktor: Mengden fôr brukt delt på mengden laks produsert

⁶⁹ Shadrack, R. S., et al. (2021). "Seasonality, abundance and spawning season of milkfish *Chanos chanos* (Forsskål, 1775) at Teouma Bay, Vanuatu." *Marine Policy* **130**: 104587.

⁷⁰ <https://www.divinetastes.eu/product/grey-mullet-bottarga-2/>.

⁷¹ Rajaprabhu, G., et al. (2021). "Short term culture of wild caught juvenile rabbit fishes (*Siganus javus*) in open sea cages at Palk Bay." *Indian Journal of Science and Technology* **14**(12): 990-998.

⁷² European Commission (2010) *A decade of EU-funded GMO research (2001-2010)*. ISBN 978-02-79-16344-9

⁷³ Ingun Næve, Sven Arild Korsvoll, Nina Santi, Matias Medina og Arnfinn Aunsmo (2022) *The power of genetics. Past and future contribution of balanced genetic selection to sustainable growth and productivity of the Norwegian Atlantic salmon (*Salmo salar*) industry*. *Aquaculture*, vol. 553, May 2022.

4.3.1 Metabolsk/ernæringsmessig programmering

Konseptet med ernæringsmessig eller metabolsk programmering gikk inn i medisinsk forskning for mer enn 40 år siden⁷⁴ og har ført til bemerkelsesverdig innsikt i forholdet mellom underernæring og voksenhelse hos mennesker⁷⁵. Ernæringsprogrammering kobler mors ernæring eller ernæring og metabolisme i tidlig liv med senere helse og velvære. Hos pattedyr har funksjonsfeil i vekst, kroppsmasseindeks, nevralt utvikling og metabolisme blitt knyttet til underernæring i kritiske faser, som for eksempel ammefasen⁷⁶. Dette konseptet ble nylig tilpasset innen akvatiske vitenskaper og viser seg allerede veldig lovende. I forhold til førutnyttelseeffektivitet har Imsland *et al.* (2006)⁷⁷ vist sterke overføringseffekter fra tidlig liv til voksen alder. Torskelarver som ble føret med naturlig dyreplankton i løpet av de første tre ukene av livet, viste betydelig høyere veksthastigheter og lavere førkonverterings-hastigheter enn torskelarver som ble føret med anrikede hjuldyr. Dette var fortsatt tydelig da fisk ble oppdrettet i merder på vanlig diett ved 21 måneders alder. Førkonverterings-effektiviteten var henholdsvis 1,31 og 1,64 for larver som ble føret med hjuldyr og med dyreplankton i larvefasen.

Puvanendran *et al.* (2022)⁷⁸ fant også overførte effekter fra tidlig ernæring til senere livsstadier. Forfatterne skriver at tilstrekkelig med levende fôr er nødvendig for larver av atlantisk torsk (*Gadus morhua* L.), og at avvenning til tørr diett i for ung alder førte til 20 % lavere slaktevekt. Malzahn *et al.* (2022)⁷⁹ viste drastiske forskjeller i genuttrykk for leppefisklarve (*Labrus bergylta*) matet på forskjellige dietter. De larvene som ble matet på naturlig diett de første tre ukene av livet, viste høyere vekstrater og høyere overlevelse enn larver som ble matet med beriket diett i samme periode. Mer interessant var de observerte forskjellene i genuttrykk uker etter at all fisk ble avvent til samme formulerte dietter. Forskjeller i f.eks. fettsyremetabolske veier og glyserolipid-metabolisme var fortsatt tydelige, selv om all fisk hadde fått samme diett i mer enn to uker. Dette resultatet peker igjen mot metabolsk programmering. Det ser ut til at mange metabolske veier og evner er klargjort i løpet av tidlig livshistorie, og at disse bestemmer vekst og utvikling, noe som til slutt resulterer i en mer effektiv ressursutnyttelse.

Det som her beskrives viser at hvordan fisk føres i tidligere stadier, har betydning for hvordan veksten (FCR, *feed conversion rate*) blir videre i livssyklusen.

4.3.2 Genetikk

Avl for økt konverteringseffektivitet av fôr (FCR) er en suksesshistorie i husdyrhold. FCR som avlsmål sto for en stor del av den 20-30 % økte FCR som ble oppnådd hos kylling og gris på 1960-

⁷⁴ Michońska, I., Łuszczki, E., Zielińska, M., Oleksy, Ł., Stolarczyk, A., Dereń, K., 2022. Nutritional programming: history, hypotheses, and the role of prenatal factors in the prevention of metabolic diseases—A narrative review. *Nutrients*. 14, 4422.

⁷⁵ Barker, D.J.P., Osmond, C., Winter, P.D., Margetts, B., Simmonds, S.J., 1989. Weight in infancy and death from ischaemic heart disease. *The Lancet*. 334, 577-580.

⁷⁶ Fall, C.H.D., Kumaran, K., 2019. Metabolic programming in early life in humans. *Philos. Trans. R Soc. Lond. B Biol. Sci.* 374, 20180123-20180123.

⁷⁷ Imsland, A.K., Foss, A., Koedijk, R., Folkvord, A., Stefansson, S.O., Jonassen, T.M., 2006. Short- and long-term differences in growth, feed conversion efficiency and deformities in juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) startfed on rotifers or zooplankton. *Aquacult. Res.* 37, 1015-1027.

⁷⁸ Puvanendran, V., Mortensen, A., Johansen, L.-H., Kettunen, A., Hansen, Ø.J., Henriksen, E., Heide, M., 2022. Development of cod farming in Norway: Past and current biological and market status and future prospects and directions. *Rev. Aquacult.* 14, 308-342.

⁷⁹ Malzahn, A.M., Ribicic, D., Hansen, B.H., Sarno, A., Kjørsvik, E., Aase, A.S., Musialak, L., Garcia-Calvo, L., Hagemann, A., 2022. First feed matters: The first diet of larval fish programmes growth, survival and metabolism of larval ballan wrasse (*Labrus bergylta*) Aquaculture.

tallet. Kun en liten del var relatert til bedre fôrformulering. I akvakultur har imidlertid mest innsats vært rettet mot fôrformulering, sannsynligvis fordi det har vært vanskelig å måle individuelt fôr-opptak i fisk, noe som er nøkkelen til å vurdere FCR på individuell basis. Problemet med analyse av FCR for individuelle fisk er imidlertid løst gjennom bruk av nye metoder og teknologier og FCR bør derfor fortsatt kunne anvendes som avlsmål⁸⁰. Dette gjelder også fra et økonomisk og miljømessig synspunkt som vist av Besson *et al.* (2020)⁸¹. Gjennom å forbedre fôrkonverteringsforholdet øker produktiviteten samtidig som økt bærekraft oppnås. FCR er derfor en viktig egenskap å velge etter i fiskeoppdrett.

Dvergedal *et al.* (2019)⁸² har vist en ugunstig genetisk korrelasjon mellom veksthastighet og fordøyelighet av karbon og nitrogen. Dette er forklart ut fra det forhold at høye vekstrater ofte er relatert til høyere fôr-opptak. Dette fører til økt tarmpassasjehastighet, noe som reduserer diettens kontakttid med tarmepitelet, og kun lettfordøyelige forbindelser tas opp av fisken. Tidligere studier har ikke påvist negativ genetisk sammenheng mellom FCR og veksthastighet for laks (*Salmo salar*)⁸³. Dette innebærer at begge egenskaper kan selekteres for samtidig. Ingen slik mangel på negative korrelasjon er så langt funnet for ørret (*Salmo trutta*)⁸⁴. Her trengs videre forskning. Kanskje enda mer nyttig fra et avlssynspunkt, er en negativ sammenheng mellom FCR og lipidavsetning både hos landbaserte produksjonsdyr som gris⁸⁵, og hos fisk⁸⁶. Dyr som utnyttet fôret sitt godt hadde tendens til å være slankere, noe som indikerer at de kanaliserte energien mot proteinsyntese og ikke mot energilagring.

4.3.3 Tarmmikrobiom (bakteriesammensetningen)

Å studere tarmmikrobiomets rolle i forhold til FCR er et relativt nytt forskningsfelt. Tarmbakteriesamfunnet i fisk deltar i assimilering av næringsstoffer som påvirker ernæring, vekst og helsestatus til verten⁸⁷. Det ser ut til at det ikke er noen sammenheng mellom vertsgenetikk og tarmmikrobiom⁸⁸, men operasjonelle taksonomiske enheter (OTU) i tarmmikrobiomet kan knyttes til fiskemetabolismefenotyper som karbonmetabolisme i fettvev og fôreffektivitet, og vektøkning. Forbedret FCR på grunn av justeringer av tarmmikrobiom er rapportert ikke bare for laks, men også

⁸⁰ de Verdalen, H., Komen, H., Quillet, E., Chatain, B., Allal, F., Benzie, J.A.H., Vandeputte, M., 2018. Improving feed efficiency in fish using selective breeding: a review. *Rev. Aquacult.* 10, 833-851.

⁸¹ Besson, M., Komen, H., Rose, G., Vandeputte, M., 2020. The genetic correlation between feed conversion ratio and growth rate affects the design of a breeding program for more sustainable fish production. *Genet. Sel. Evol.* 52, 10.

⁸² Dvergedal, H., Odegard, J., Overland, M., Mydland, L.T., Klemetsdal, G., 2019. Indications of a negative genetic association between growth and digestibility in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*. 510, 66-72.

⁸³ Thodesen, J., Grisdale-Helland, B., Helland, S.J., Gjerde, B., 1999. Feed intake, growth and feed utilization of offspring from wild and selected Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*. 180, 237-246.

⁸⁴ Sanchez, M.-P., Chevassus, B., Labbé, L., Quillet, E., Mambrini, M., 2001. Selection for growth of brown trout (*Salmo trutta*) affects feed intake but not feed efficiency. *Aquat. Living Resour.* 14, 41-48.

⁸⁵ Faure, J., Lefaucheur, L., Bonhomme, N., Ecolan, P., Météau, K., Coustard, S.M., Kouba, M., Gilbert, H., Lebret, B., 2013. Consequences of divergent selection for residual feed intake in pigs on muscle energy metabolism and meat quality. *Meat Sci.* 93, 37-45.

⁸⁶ Quillet, E., Le Guillou, S., Aubin, J., Fauconneau, B., 2005. Two-way selection for muscle lipid content in pan-size rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*. 245, 49-61.

⁸⁷ Bereded, N.K., Abebe, G.B., Fanta, S.W., Curto, M., Waidbacher, H., Meimberg, H., Domig, K.J., 2021. The Impact of sampling season and catching site (wild and aquaculture) on gut microbiota composition and diversity of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Biology*. 10, 180.

⁸⁸ Dvergedal, H., Sandve, S.R., Angell, I.L., Klemetsdal, G., Rudi, K., 2020. Association of gut microbiota with metabolism in juvenile Atlantic salmon. *Microbiome*. 8, 8.

for fiskearter som mandarinfisk (*Siniperca chuatsi*)⁸⁹, stør (*Acipenser ruthenus*)⁹⁰ og karpe (*Cyprinus carpio*)⁹¹. Dette betyr at tarmmikrobiom kan bli manipulert mot ønskede metabolske funksjoner. For eksempel ser det ut til å være en sammenheng mellom tarmmikrobiom og lipidavsetning. Sammenhengen mellom OTU'er og lipidkarbonmetabolismen i *S. salar* demonstrert av Dvergedal *et al.* (2020)⁸⁸ betyr at fisk med høyere forekomst av visse mikrober omdanner førprotein til lipid i høy hastighet.

Fisketarmmikrobiomets sammensetning er avhengig av flere parametere, blant annet dietten til verten^{92,93}, noe som muliggjør manipulering av diettsammensetningen (f.eks. pro- eller prebiotika) og interessant funksjonelt førtilsetningsstoff med økt FCR i tankene. Å isolere tarmmikrobiota, dyrke dem og mate dem tilbake til verten kan være et alternativ til å manipulere tarmmikrobiota. Imidlertid er det vist at direkte tilbake-føring av isolerte mikrober til deres vert (f.eks. reker) i noen tilfeller kan gi uheldige effekter når konsentrasjonen av mikrober som ble matet til rekene var høy, sannsynligvis fordi de skapte ubalanser i tarmmikrobiom⁹⁴.

4.3.4 Funksjonelle ingredienser

Funksjonelle føringredienser er vanligvis ikke-næringsrike ingredienser som fytogene forbindelser, mykotoksinbindere, organiske syrer, immunstimulerende midler, gjærprodukter, probiotika, prebiotika og ulike enzymer som tilsettes i dietter for å tjene en gitt funksjon som fysiske pellets-egenskaper, fiskehelse eller førkonverteringseffektivitet (FCR). For å øke FCR har proteaser, blitt tilsatt for å øke fordøyeligheten av planteprotein i atlantisk laks og regnbueørret^{95,96}. Nylig har tilsetning av makro- og mikroalger i laksefôr fått økt oppmerksomhet, hovedsakelig på grunn av mangel på fiskemel, men også på grunn av økt rapportering om miljø- og fiskehelse relaterte problemer som følge av bruken av landbasert plantemateriale som soya i laksefôr. Muligheten for å produsere store mengder makroalger på en bærekraftig måte har skapt økt interesse for makroalger som ny føringrediens. Kvaliteten på atlantisk laksefilet styrkes ved inkludering av tang i kosten, siden konsentrasjonen av langkjedede omega-3 fettsyrer blir høyere i disse filetene enn i fisk matet

⁸⁹ Chen, X., Sun, C.F., Dong, J.J., Li, W.H., Tian, Y.Y., Hu, J., Ye, X., 2022. Comparative analysis of the gut microbiota of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) feeding on compound diets and live baits. *Front. Genet.* 13, 10.

⁹⁰ Zuenko, V.A., Laktionov, K.S., Pravdin, I.V., Kravtsova, L.Z., Ushakova, N.A., 2017. Effect of *Bacillus subtilis* in feed probiotic on the digestion of fish cultured in cages. *Journal of Ichthyology.* 57, 152-157.

⁹¹ Zhang, C., Zhang, J., Fan, W., Huang, M., Liu, M., 2019. Effects of dietary *Lactobacillus delbrueckii* on growth performance, body composition, digestive and absorptive capacity, and gene expression of common carp (*Cyprinus carpio* Huanghe var). *Aquacult. Nutr.* 25, 166-175.

⁹² Thépot, V., Campbell, A.H., Rimmer, M.A., Jelocnik, M., Johnston, C., Evans, B., Paul, N.A., 2022. Dietary inclusion of the red seaweed *Asparagopsis taxiformis* boosts production, stimulates immune response and modulates gut microbiota in Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Aquaculture.* 546, 737286.

⁹³ Waagbø, R., Remø, S.C., 2020. 7 - Functional diets in fish health management. in: Kibenge, F.S.B., Powell, M.D. (Eds.), *Aquaculture Health Management*. Academic Press, pp. 187-234.

⁹⁴ Ringø, E., Van Doan, H., Lee, S.H., Soltani, M., Hoseinifar, S.H., Harikrishnan, R., Song, S.K., 2020. Probiotics, lactic acid bacteria and bacilli: interesting supplementation for aquaculture. *J. Appl. Microbiol.* 129, 116-136.

⁹⁵ Carter, C.G., Houlihan, D.F., Buchanan, B., Mitchell, A.I., 1994. Growth and feed utilization efficiencies of seawater Atlantic salmon, *Salmo salar* L., fed a diet containing supplementary enzymes. *Aquacult. Res.* 25, 37-46.

⁹⁶ Drew, M.D., Racz, V.J., Gauthier, R., Thiessen, D.L., 2005. Effect of adding protease to coextruded flax:pea or canola:pea products on nutrient digestibility and growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Anim. Feed Sci. Technol.* 119, 117-128.

med standard pellets⁹⁷. Videre viste laks fôret med pellets tilsatt 3 og 10 % tare (*Laminaria* sp)⁹⁸ bedre FCR og økt proteineffektivitet. Mikroalgen *Scenedesmus* sp. er akseptabelt å bruke ved innhold på under 10 % i laksefôr⁹⁹, mens mikroalgen *Phaeodactylum tricornerutum* kan erstatte opp til 6 % av fiskemelet uten negative effekter på fordøyelighet, FCR eller vekst av laksen¹⁰⁰. I tillegg har inkludering av den kulde-tilpassede kiselalgen *Porosira glacialis* som ingrediens i laksefôr vist seg å ha en lakselusereduserende effekt¹⁰¹.

Det er imidlertid ikke bare plantematerialer som vekker oppmerksomhet som ingrediens i fiskefôr. Alternative kilder til lipider fra marine fisk er også et aktuelt forskningstema innen akvakultur. Kandidater er f.eks. gammarider (tanglopper) og polychaete (børstemark). Upubliserte resultater fra et nylig avsluttet NRC-prosjekt (POLYCHATE¹⁰²) viste at erstatning av 7,5 eller 15 % av fiskemelet med spraytørkede børstemark ikke førte til endringer i veksthastighet, men reduksjon i fôropptaket hos atlantisk laks, noe som resulterte i en signifikant reduksjon i FCR fra 0,73 i kontrolldietten via 0,70 i 7,5 % polychaete dietten, til 0,68 i 15 % polychaete dietten. Blodkjemi og histologisk evaluering av mellomtarm- og proteom-analyse av midttarm hos atlantisk laks fôret med polychaetemel-anrikt fôr avslørte ingen negative effekter av å inkludere polychaetemel i fôret.

4.3.5 Økonomisk fôrfaktor

Utbyttet av laks per kg anvendt fôr er en viktig parameter for oppdrettere og kan beregnes på flere ulike måter. Økonomisk fôrfaktor er mengden fôr brukt delt på mengden produsert laks. I 2020 var den 1,25 beregnet fra ingredienser på tørrstoffbasis og 1,28 beregnet fra omsatt fôr¹⁰³. Det er store forskjeller mellom anlegg. Den teoretiske fôrfaktoren for laks er omtrent 0,9¹⁰⁴. Fôrfaktoren påvirkes av mange faktorer, deriblant miljø og driftsmønster. Det er ikke realistisk å nærme seg sann biologisk fôrfaktor under industrielle betingelser, men en liten reduksjon vil likevel ha stor innvirkning på det totale fôrbehovet. Eksempelvis ville en forbedring på 0,1 redusert det totale behovet for fôrprotein i 2020 med 50 tusen tonn. Noen faktorer som påvirker den økonomiske fôrfaktoren er fiskeart, type diett, fôringsstrategi, størrelse, sjøtemperatur og andre miljøfaktorer, lakselus, stress og håndtering, samt annen menneskelig aktivitet på og rundt anlegget. En av de viktigste faktorene er fiskens helsetilstand og dødelighet som drøftes i neste kapittel.

⁹⁷ Wilke, T., Faulkner, S., Murphy, L., Kealy, L., Kraan, S., Brouns, F., 2015. Seaweed enrichment of feed supplied to farm-raised Atlantic salmon (*Salmo salar*) is associated with higher total fatty acid and LC n-3 PUFA concentrations in fish flesh. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 117, 767-772.

⁹⁸ Kamunde, C., Sappal, R., Melegy, T.M., 2019. Brown seaweed (AquaArom) supplementation increases food intake and improves growth, antioxidant status and resistance to temperature stress in Atlantic salmon, *Salmo salar*. *PLOS ONE*, 14, e0219792.

⁹⁹ Gong, Y., Bandara, T., Huntley, M., Johnson, Z.I., Dias, J., Dahle, D., Sørensen, M., Kiron, V., 2019. Microalgae *Scenedesmus* sp. as a potential ingredient in low fishmeal diets for Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquaculture*. 501, 455-464.

¹⁰⁰ Sørensen, M., Berge, G.M., Reitan, K.I. og Ruyter, B. 2016. Microalga *Phaeodactylum tricornerutum* in feed for Atlantic salmon (*Salmo salar*) —Effect on nutrient digestibility, growth and utilization of feed. *Aquaculture*, 460, 116-123

¹⁰¹ Eilertsen *et al.*, 2021. Inclusion of photoautotrophic cultivated diatom biomass in salmon feed can det er lice. *PLoS ONE*, 16, e0255370

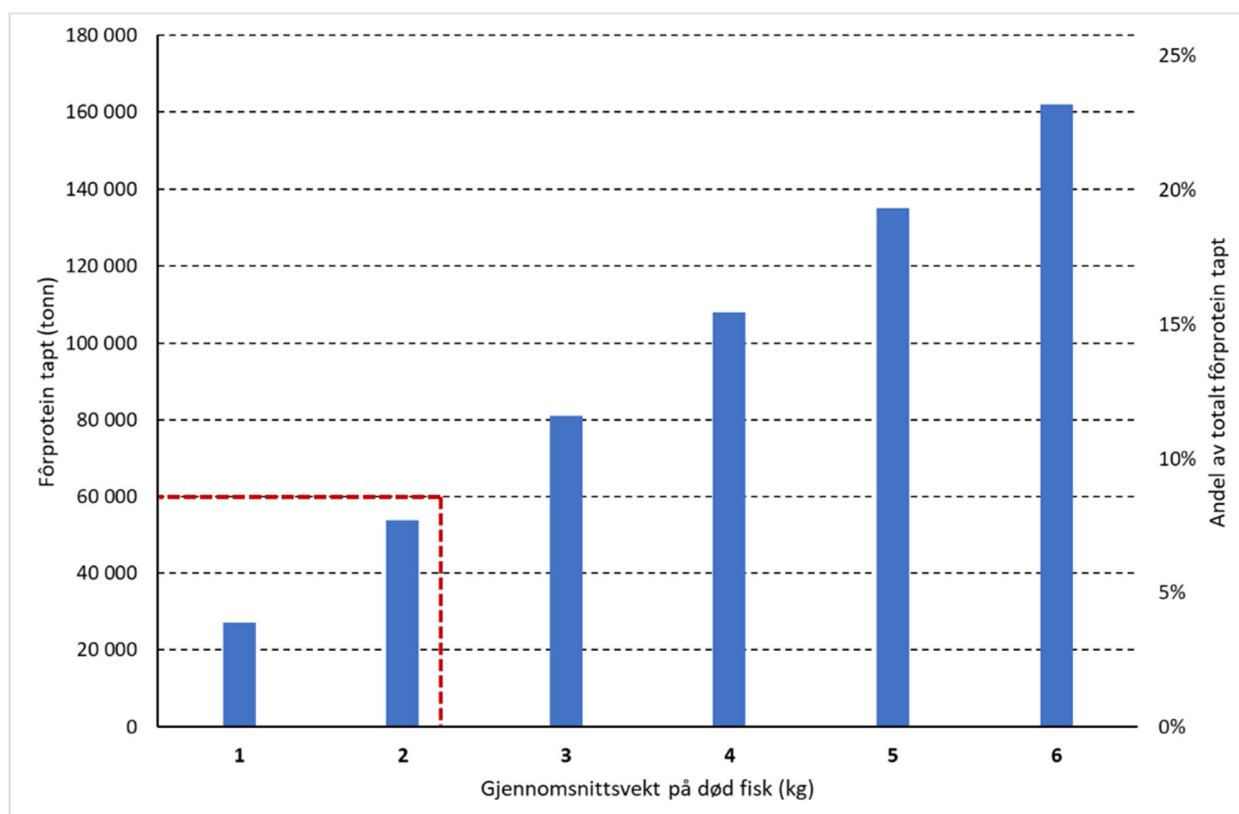
¹⁰² RCN #280836, <https://prosjektbanken.forskningsradet.no/en/project/FORISS/280836>)

¹⁰³ Aas, T.S., Ytrestøyl T., Åsgård, T., Utnyttelse av fôrressurser i norsk oppdrett av laks og regnbueørret i 2020. Faglig sluttrapport. April 2022

¹⁰⁴ Sveier, H. & Lied, E. (1998). The effect of feeding regime on growth, feed utilization and weight dispersion in large Atlantic salmon (*Salmo salar*) reared in seawater. *Aquaculture* 165: 333–345.

4.4 Fiskehelse og overlevelse

Den totale dødeligheten av fisk etter utsett i merd i 2022 var 67,5 millioner individer, tilsvarende 16,8 % av all fisk (laks + ørret)¹⁰⁵. Med en gjennomsnittlig stående biomasse gjennom året på ca. 880 000 tonn og totalt ca. 400 millioner individer, blir gjennomsnittlig vekt pr. fisk 2,2 kg. Dersom det antas at den døde fisken hadde denne gjennomsnittsvekten og at det gikk med 0.4 kg fôrprotein for å produsere 1 kg fisk, gir dette et totalt "fôrproteintap" i Norge på 60 tusen tonn i 2022. Figur 4.1 viser hvordan tapet avhenger av gjennomsnittsvekten på fisken som dør og hvor stor andel av det totale fôrproteinet dette representerer.



Figur 4.1. Fôrproteintap (tonn og prosent) i 2022 som funksjon av gjennomsnittsvekten av død fisk. I beregningen er det antatt at det gikk med 0.4 kg fôrprotein per kg laks (våttvekt) produsert, samt at det i 2022 ble tilsatt totalt 700 tusen tonn fôrprotein til oppdrettsfisken. Totalt 67,5 millioner laks døde i løpet av sjøfasen.

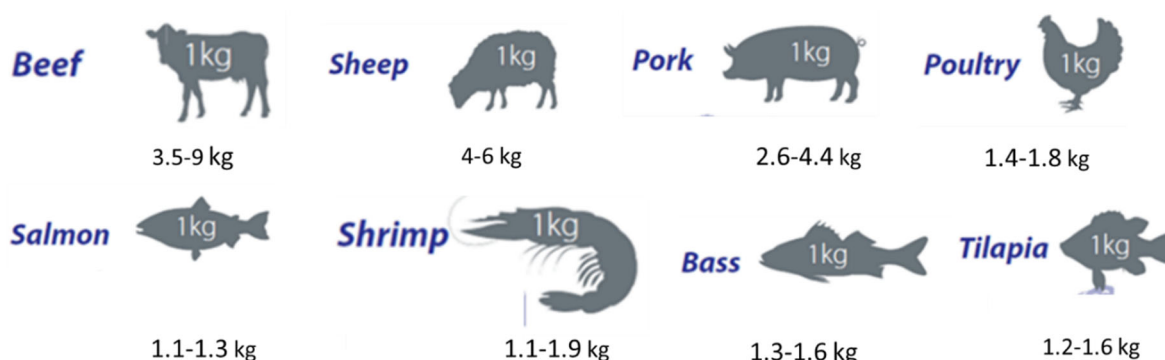
Det antas at den viktigste årsaken til den høye dødeligheten er avlusning av laksen gjennom sesongen. Selv om avlusningsmetodene som anvendes er blitt mer skånsomme, gjør en stadig hyppigere frekvens at fisken likevel totalt utsettes for mer uheldig påvirkning enn tidligere¹⁰⁶. Trenden har dessuten vært at dødeligheten er blitt høyere nærmere slutten av produksjonsfasen. Hvis denne utviklingen består frem mot 2050, og en produksjon på 5 millioner tonn laks, som da vil kreve 2 millioner tonn protein, må det da skaffes til veie 210-250 tusen tonn ekstra fôrprotein for å kompensere for den høye dødeligheten. God fiskehelse er derfor viktig for å nå målet om tilgang til bærekraftig fôr til all norsk matproduksjon i årene fremover.

¹⁰⁵ Fiskeridirektoratets statistikk for 2022

¹⁰⁶ Foredrag av Barbro Klakegg, Åkerblå ved Årssamling for NCE Aquatech og Sjømat Norge 31.1.2023

4.5 Prioritering mellom landbruksbasert og akvakulturbasert kjøttproduksjon

I dag bidrar landbruket totalt med ca. 380 tusen tonn og lakseindustrien med ca. 1,4 millioner tonn til den norske kjøttproduksjonen. Dersom målet med norsk dyreproduksjon er å produsere mest mulig kjøtt, og gitt en knapphet på fôrprotein til norsk kjøttproduksjon, er det relevant å se på hvordan vi utnytter de fôrressursene som er tilgjengelig i dag. Imidlertid vil dette spørsmålet kunne representere et politisk dilemma der også andre forhold (bosetting, beredskap, bærekraft, etc.) må vurderes. I tillegg er en sammenligning av fôrutnyttelsen til ulike husdyr ikke nødvendigvis rett fram. En enkel måte å vurdere fôrutnyttelse på er å se på hvor mye dyr eller fisk vi får per kg fôr (Figur 4.2). Varmblodige dyr må bruke mye energi på å holde en kroppstemperatur på 37-39 °C, godt over normal lufttemperatur, og dermed blir forutnyttelsen ofte dårligere enn for fisk og reker hvor kroppstemperaturen er nær vanntemperaturen. Men er det riktig å sammenligne 1 kg tørt høy, som bare i teorien kjemisk/mekanisk kan omformes til menneskeføde, med 1 kg fôr-pellets til laks, hvor flere av ingrediensene, med begrenset prosessering, alternativt kunne blitt menneskeføde? Et alternativ til en enkel fôr-faktor-betraktning er å vurdere hvor mye protein i fôret som til slutt ender opp på tallerkenen¹⁰⁷. I snitt ender omkring 27 % av proteinet i fôret til laks opp som protein i laksefileten på mattallerkenen. Dette er likevel dårligere proteinretensjon enn i kylling, hvor omkring 34 % av proteinet i fôret ender opp på tallerkenen. Sammenlignet med storfe, 10 %, og svin, 15 %, er likevel laks et godt alternativ for en begrenset tilgang på fôrprotein. For reker er proteinretensjonen 14-22 % avhengig av arten, mens den for tilapia er 18 % og for regnbueørret 22 %.



Figur 4.2. Fôrutnyttelse (kg tørrvekt fôr pr. kg kjøtt) for ulike arter¹⁰⁸.

Totalt sett innebærer dette at 1 kg fôrprotein anvendt til fiskefôr framfor svinefôr, vil gi om lag dobbelt så mye laksefilet som svinefilet på tallerkenen. Men i betraktning av at den norske produksjonen av kjøtt fra varmblodige husdyr i dag er i underkant av 0.4 millioner tonn per år og neppe vil øke dramatisk i de kommende tiårene, mens produksjonen av oppdrettslaks i dag er 1,4 millioner tonn per år og ambisjonen er å øke den til 5 millioner tonn i 2050, vil et eventuelt bidrag til å dekke et behov for 2 millioner tonn fôrprotein til oppdrettsnæringen i 2050 ved å redusere bruken av fôrprotein i fôr til varmblodige husdyr ha svært liten kvantitativ betydning som grep for å løse "fôrknipa".

¹⁰⁷ Fry et al. 2018. Feed conversion efficiency in aquaculture: do we measure it correctly? *Environ. Res. Lett.* **13(2)**, p.024017 + Corrigendum fra juli samme år.

¹⁰⁸ Rabobank 2018. <https://research.rabobank.com/far/en/sectors/animal-protein/riding-new-waves-of-change-in-aquaculture.html>

5 Bærekraftig produksjon

Bærekraftig produksjon av fôrråvarer innebærer at de produseres på en måte som gir minst mulig skader på natur og miljø, samtidig som de bidrar til økonomisk vekst og positive sosiale forhold. Det er viktig å diskutere hva vi legger i bærekraftig produksjon av fôr. I denne rapporten vurderes bærekraft ut fra mange ulike indikatorer som dekker både miljø- og samfunnsmessig bærekraft. I tillegg til å vurdere påvirkningen lokalt på miljø og samfunn, må også konsekvensene det får for det globale sør hvis produksjonen flyttes til Norge vurderes.

En av de største utfordringene knyttet til miljømessig bærekraft ved dagens fôrproduksjon er avskoging i Sør-Amerika grunnet dyrking av soya. I tillegg kommer aspekter som intensiv dyrking, monokultur, energi- og vannforbruk som bidrar til negative klima- og miljøpåvirkninger.

All fremtidig produksjon av fôr i Norge vil kreve en eller annen form for energi. Til slutt vil energikilden være avgjørende for hvor stort miljøfotavtrykk som fremtidens norske fôrproduksjon vil ha. Tilgang til fornybare energikilder med lavere klimafotavtrykk for å dekke energibehovet vil være nødvendig å oppnå en relativt bærekraftig produksjon. I tillegg vil både hav- og landareal være en begrensende faktor for å utvide produksjonen og mange sektorer vil måtte sameksistere. Andre problemer som f.eks. forstyrrelser av det marine og terrestriske miljøet, økologisk ubalanse, forurensning til land og hav må evalueres grundig for å unngå burden shifting ("overføring av ulemper"). På den annen side vil økt fôrproduksjon i Norge også bidra positivt til verdiskaping og sysselsetting og øke Norges selvforsyning av fôr.

5.1 Flytting av ulemper (Burden-shifting)






Flytting av produksjon av fôrråvarer har utfordringer knyttet til miljø- og samfunnsmessig bærekraft. Dagens import av råvarer har til dels store utfordringer knyttet arealendring og avskoging i utviklingsland. Men norsk import av fôrråvarer bidrar også til økt verdiskaping og arbeidsplasser i disse landene. Strengt krav fra norske fôrselskaper om arbeidsforhold, sikkerhet, dokumentasjon, og likestilling kan også bidra positivt til arbeidsmiljøet hos underleverandørene. Dersom importen av fôrråvarer reduseres, kan dette ha negative sosioøkonomiske effekter i andre land. En kartlegging av hvor mange av FN bærekraftsmål som er relevant for fôrverdikjeden er blitt utført av SINTEF og viser at det norske forbruket av fôrråvarer påvirker mange av bærekraftsmålene, både positivt og negativt. Disse målene er identifisert som svært relevante, se Figur 5.1.

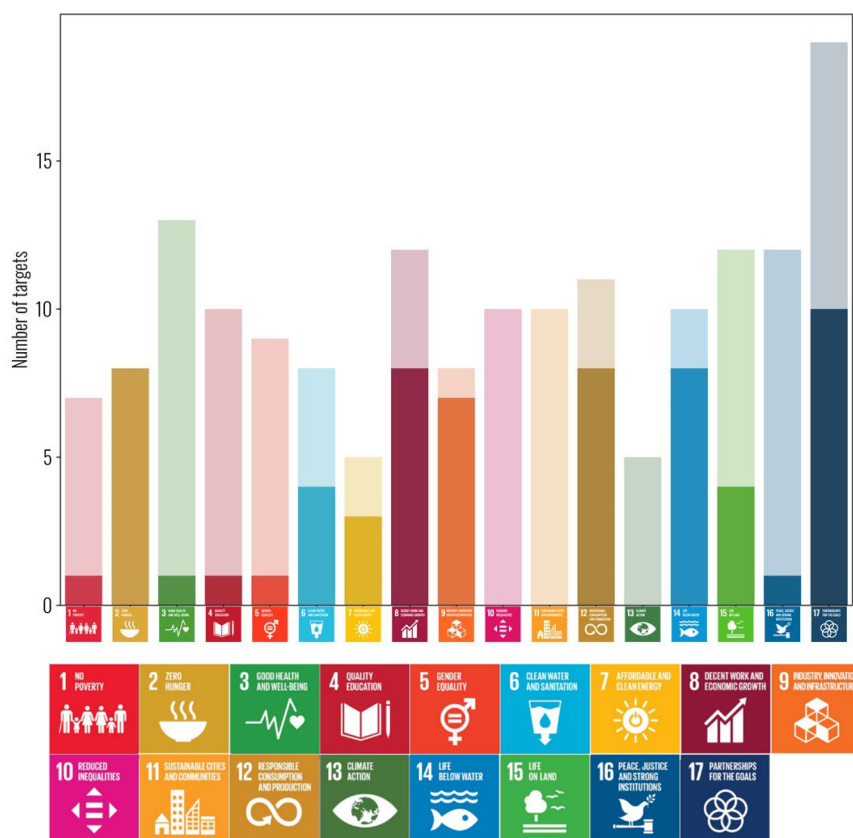


Figur 5.1. Mest relevante FNs bærekraftsmål for å måle norske fôrverdikjeders bidrag til global bærekraft.

FNs bærekraftsmål har 169 delmål og flere kvantitative indikatorer under hver delmål som måler ytelse mot måloppnåelse. Noen utvalgte delmål som er relevante for å vurdere bidraget fra norsk førkonsum og førverdikjeder innen bærekraftig utvikling i andre land, er gitt i Tabell 5.1.

Tabell 5.1. Utvalgte delmål fra FNs bærekraftsmål som er velegnet for å måle den norske førverdikjedens bidrag til global bærekraft.

| | | |
|---|--|---|
|  | <p>Delmål 2.3: Innen 2030 doble produktiviteten og inntektene til småskala matprodusenter, særlig kvinner, urfolk, familiebruk, husdyrnøder og fiskere, blant annet gjennom sikker og lik tilgang til jord, andre produksjonsressurser og innsatsmidler, kunnskap, finansielle tjenester, markeder og muligheter for verdiøkning og for sysselsetting utenfor landbruket.</p> | <p>Norsk førkonsum bidrar til økt produktivitet og inntektsmuligheter i andre land i sektorer utenfor landbruket som fiskeri, transporttjenester, osv.</p> |
|  | <p>Delmål 8.5: Innen 2030 oppnå full og produktiv sysselsetting og anstendig arbeid for alle kvinner og menn, inkludert ungdom og personer med nedsatt funksjonsevne, og oppnå lik lønn for likt arbeid.</p> | <p>Norske selskaper stiller krav til anstendige arbeidsforhold i utviklingsland og bidrar til økt sysselsetting i andre land.</p> |
|  | <p>Delmål 9.4: Innen 2030 oppgradere infrastruktur og omstille næringslivet til å bli mer bærekraftig, med mer effektiv bruk av ressurser og mer utstrakt bruk av rene og miljøvennlige teknologiformer og industriprosesser, der alle land gjør en innsats etter egen evne og kapasitet.</p> | <p>Norsk import av førråvarer vil utfordre leverandørene til å implementere nye teknologier og bidra til innovasjon og mer effektiv produksjon for å kunne konkurrere i det internasjonale markedet.</p> |
|  | <p>Delmål 14.4: Innen 2020 innføre effektive tiltak for å regulere høsting og få slutt på overfiske, ulovlig, urapportert og uregulert fiske samt ødeleggende fiskemetoder. Iverksette vitenskapelig baserte forvaltningsplaner slik at fiskebestandene snarest mulig gjenopprettes til et nivå som gir best mulig bærekraftig avkastning ut fra bestandenes biologiske særtrekk.</p> | <p>Krav fra sertifiseringsordninger som "Aquaculture Stewardship Council" og "Marine Stewardship Council" bidrar til bærekraftig forvaltning av marine ressurser og god dokumentasjon av miljøtilstand.</p> |
|  | <p>Delmål 17.3: Mobilisere ytterligere finansielle ressurser til utviklingslandene fra flere kilder.</p> | <p>Norsk førinnkjøp og partnerskap med leverandørene bidrar til økonomisk vekst i utviklingslandene og økte investeringer i utviklingsland.</p> |



Figur 5.2. Antall mål under FNs bærekraftsmål som påvirkes av norske fôrverdikjeder. Søylene i mørke farger viser antall targets som er relevant og søylene i lysere farger viser antall targets som er delvis relevant¹⁰⁹.

5.2 Indikatorer for bærekraft

Det finnes mange ulike kriterier for å måle bærekraft, både kvalitative og kvantitative. Miljømessig bærekraft har vært mer i fokus enn samfunnsmessig bærekraft. I denne rapporten vurderes bærekraft med ulike indikatorer, både kvantitative og kvalitative, og disse er benyttet på de ulike råvarene i hovedgruppene høsting av marine råvarer, landbaserte råvarer, nye kultiverte planter og dyr, og mikrobiell produksjon. I vurdering av bærekraft og mulige negative og positive påvirkninger på miljø og samfunn tas det hensyn til hele verdikjeden inkludert prosessering til et ferdig proteinprodukt og alle kjente innsatsfaktorer, bl.a. energi, utstyr, infrastruktur, og materiell.

I dag skjer ikke storskala produksjon eller kommersielle høsting/dyrking av mange av disse råvarene, og derfor mangler mye informasjon nødvendig for å kunne måle bærekraft. Mange av produksjonsteknologiene og verdikjedene er i en utviklingsfase og vi har ikke ennå nødvendig tallgrunnlag for en kvantitativ bærekraftsanalyse. I denne rapporten har vi derfor benyttet en kvalitativ tilnærming som gir en pekepinn om hvor mulige utfordringer kan oppstå i framtiden. Denne vurdering er en ekspertvurdering basert på generell kunnskap om verdikjedene til råvarene og lignende verdikjeder, og er ikke basert på spesifikke studier eller rapporter. I tillegg er vurderingen basert på forutsetninger om hvordan fremtidige verdikjeder vil se ut og representerer ingen spesifikk teknologi eller anlegg som finnes i dag.

¹⁰⁹ Kilde: Lara Veylit, Dorothy Dankel, Anne Gaspers, SINTEF Ocean

De indikatorer som er valgt er:

1. **Energibehov** – Forbruk av energi for høsting/dyrking, drift av anlegg, og prosessering
2. **Arealpress** – Press knyttet til tilgang til land- eller sjøareal der tilgjengelig areal er begrenset
3. **Biologisk mangfold/økosystem** – Direkte eller indirekte påvirkning av næringskjeden og dermed økosystemer på land og i havet.
4. **Forurensing/utslipp/plast-forurensing** – Direkte utslipp av forurensende stoffer til luft, land eller vann
5. **Biosikkerhet** – Introduksjon eller spredning av uønskede arter, stoffer via råvarene eller fra produksjonen eller under dyrking
6. **Lokal verdiskaping** – Skape økonomiske verdier og inntektsmuligheter fra lokale ressurser
7. **Sysselsetting** – skape arbeidsplasser og lønnet arbeid
8. **Konflikt med andre verdikjeder** – Sosial eller politisk konflikt med andre verdikjeder samt konkurranse eller kamp for samme ressurser med andre verdikjeder eller for andre formål som mat til direkte humant konsum, fôr til andre dyr, bioenergi, osv.

Hvordan de ulike råvarene presterer mot disse indikatorene er beskrevet basert på hvor stor - og hva slags effekt (positiv eller negativ) de kan ha på miljø og samfunn. Antall prikker indikerer lav, middel eller stor effekt mens grønn eller rød farge indikerer positiv eller negativ effekt.

"●" Lav effekt

"●●" Middels effekt

"●●●" Stor effekt

"●" Negativ effekt

"●" Positiv effekt

"-" Betyr at det enten ikke har noen effekt eller så finnes ikke informasjon per i dag.

5.3 Høsting av marine råvarer

Høsting av marine råvarer sammenlignes med den påvirkningen som dagen fiskerinæringen har på det marine miljø og lokalsamfunnet. Det forventes at høsting av de fleste artene vil ha relativt stort behov for energi i form av drivstoff eller annen energi. Negativ påvirkning på økosystem og biologisk mangfold anses som liten gitt at forvaltningsplanene følges. Men det er behov for mer kunnskap og forskning å kunne vurdere om det kan være større negative effekter enn det vi ser i dag. Bruk av fiskeredskap laget av plast vil øke risikoen for tap av redskap og eventuelt utslipp av plast i havet. Det forventes en positiv effekt på verdiskaping og sysselsetting. Det kan oppstå en interessekonflikt med fiskerinæringen når det gjelder høsting av raudåte og tare siden dette kan ha negativ effekt på bestander eller habitat for kommersielle fiskearter. Restråstoff og krill er etterspurt til produksjon av humant kosttilskudd og kan bli en konkurrent til produksjon av fiskefôr. Tabell 5.2 (neste side) oppsummerer positive og negative påvirkninger relativt ulike indikatorene.

Tabell 5.2. Kvalitativ vurdering av bærekraft for marine råvarer.

| | Miljømessig | | | | | Samfunnmessig | | |
|-------------------------|-------------|------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------|--------------------------------|
| | Energibehov | Arealpress | Biologisk mangfold/-økosystem | Forurensing/utslipp/plastforurensing | Biosikkerhet | Lokal verdiskaping | Sysselsetting | Konflikt med andre verdikjeder |
| Mesopelagisk fisk | ●● | - | ● | ● | - | ●● | ●● | - |
| Raudåte | ●● | - | ● | ● | - | ●● | ●● | ●● Fiskeri |
| Pelagisk fisk | ●● | - | ● | ● | - | ●● | ●● | - |
| Nordlig krill | ●● | - | ● | ● | - | ●● | ●● | ● Kosttilskudd |
| Tang og tare | ● | - | ● | - | - | ●● | ●● | ●● Fiskeri, Mat |
| Restråstoff | ●● | - | ● | ● | ● Uønskede stoffer | ●● | ●● | ● Kosttilskudd, kjøledyrfor |
| Lite ut-nyttet fisk | ●● | - | ● | - | - | ● | ● | - |
| Andre marine organismer | ● | - | ● | - | - | ● | ● | - |

● lav effekt, ●● middels effekt, ●●● stor effekt ● negativ effekt ● positiv effekt

5.4 Landbaserte råvarer

Energibehovet for dyrking av plantearter forventes å være relativt lavt, men energi til prosessering vil være noe større, særlig for gress. Dyrking av korn og belgfrukter vil kreve store arealer jordbruksland og dermed skape et relativt stor arealpress for dyrkingsareal. Effekten på lokale økosystemer og biologisk mangfold forventes å være begrenset og vil i hovedsak være knyttet til mulig arealendring og avskoging. Ved intensivt jordbruk er avrenning av gjødsel til ferskvannskilder og utslipp av klimagasser til luft negative faktorer. Ved bruk av restråstoff fra dyr kan det oppstå smittespredning og dette er et problem knyttet til biosikkerhet. Det forventes en positiv effekt på verdiskaping og sysselsetting ved økt produksjon og etablering av nye verdikjeder. Landbaserte råvarer har en sterk konflikt med matforsyningskjeder og landbruk både knyttet til areal og ferdige råvarer som kan gå direkte til humant konsum. Bruk av ressurser fra skog har en konflikt med produksjon av biokull og bioenergi, og vil redusere tilgang til fornybar energi. Tabell 5.3 (neste side) oppsummerer positive og negative påvirkninger relativt de ulike indikatorene.

5.5 Nye kultiverte planter og dyr

Det forventes at ved dyrking av marine dyr på land vil det være et relativt høyt energibehov for oppvarming, pumping og kjøling av vann, og prosessering til sluttprodukt, gitt at anleggene er lukkede systemer som ligner dagens settefiskanlegg. Marine arter som sekkedyr, blåskjell og makroalger som skal dyrkes i sjø vil ha mindre behov for energi for selve dyrkingen, men vil ha energibehov for transport og prosessering. Arealpress knyttet til insekter og marine dyr på land vil være knyttet til dyrking av substrat eller biomasse og ikke selve anlegget. Det forventes at arealpresset vil være større for sekkedyr, blåskjell og makroalger som kan konkurrere med andre

aktiviteter som offshore vind, fiskeri og maritim transport. Negativ påvirkning på lokale økosystemer er liten for insektproduksjon, men kan være større for blåskjell og makroalger da disse konkurrerer med andre marine arter om sollys og næringssalter, og medføre risiko for spredning av fremmede arter. Forurensing av sjø kan reduseres dersom slam fra oppdrettslokalteter samles opp og brukes som substrat til børstemark og gammarider. Bruk av plastmaterieell for dyrking av planter og dyr i sjø kan føre til utslipp av plast til det marine miljø. Det er miljørisiko knyttet til rømming av insekter og spredning av parasitter eller sykdom fra storskala dyrking av blåskjell og makroalger. Det forventes at alle kultiverte planter og dyr vil bidra positivt til lokal verdiskapning og sysselsetting ved at det etableres nye verdikjeder og skapes verdi fra sidestrømmer og restråstoff. Restråstoff som kan brukes som substrat for insekter, gammarider og børstemark kan også brukes til produksjon av bioenergi og dette kan føre til konflikt. Blåskjell og makroalger kan også gå direkte til humant konsum. Fôrproduksjonen kan dermed komme i konflikt med matforsyningen. Tabell 5.4 (neste side) oppsummerer positive og negative påvirkninger relativt de ulike indikatorene.

Tabell 5.3. Kvalitativ vurdering av bærekraft for landbaserte råvarer

| | Miljømessig | | | | | Samfunnsmessig | | |
|---------------------|-------------|------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------|--------------------------------|
| | Energibehov | Arealpress | Biologisk mangfold/-økosystem | Forurensing/utslipp/plastforurensing | Biosikkerhet | Lokal verdiskapning | Sysselsetting | Konflikt med andre verdikjeder |
| Soya | ● | ●● | ● | ● | - | ● | ● | ● Mat |
| Gress | ●● | ●●● | ● | ● | - | ●● | ●● | ●● Landbruk |
| Korn | ● | ●●● | ● | ● | - | ●● | ● | ●● Mat |
| Skog | ●● | ●● | ●● | - | - | ●●● | ● | ●● Biokull, Bioenergi |
| Erter | ● | ●● | ● | ● | - | ●● | ● | ●● Mat |
| Fava | ● | ●● | ● | ● | - | ● | ● | ● Mat |
| Restråstoff fra dyr | ●● | ● | - | - | ● Smittefare, uønskede stoffer | ● | ● | ● Pet-food |

● lav effekt, ●● middels effekt, ●●● stor effekt ● negativ effekt ● positiv effekt

5.6 Mikrobielle prosesser – encelleprotein

Det forventes at mikrobiell produksjon skal ha høyt energibehov både til dyrking og prosessering. Det vil være et arealpress spesielt knyttet til produksjon av sukker, men også i noen grad til sukkere utvunnet fra trevirke. Produksjon av spesielt sukkerrør bidrar negativt til biologisk mangfold. Hvis metan i naturgass, som har fossilt opphav, benyttes til produksjon av encelleprotein vil til slutt det meste av karbonet i den anvendte metanen slippes ut i atmosfæren som CO₂ og bidra til global oppvarming. Alle prosesser har risiko for kontaminering med fremmede organismer som kan påvirke kvaliteten av fôret negativt og i uheldigste fall produsere giftstoffer.

Det forventes at mikrobiell proteinproduksjon i noen grad vil bidra positivt til lokal verdiskapning og gi økte jobbmuligheter i Norge. Sukker fra sukkerrør/roer til mikrobiell produksjon kan komme i konflikt med forsyningskjeden for sukker i matproduksjon. Hydrolyse av mais- og/eller hvetestivelse til glukose er i direkte konflikt med bruk av disse kornslagene til mat. Tabell 5.5 (neste side) oppsummerer positive og negative påvirkninger relativt de ulike indikatorene.

Tabell 5.4. Kvalitativ vurdering av bærekraft for nye kultiverte planter og dyr.

| | Miljømessig | | | | | Samfunnsmessig | | |
|---------------------|-------------|------------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------|---------------------|------------|--------------------------------|
| | Energibehov | Arealpress | Biologisk mangfold/-økosystem | Forurensing/utslipp/plastforurensing | Biosikkerhet | Lokal verdiskapning | Syssetting | Konflikt med andre verdikjeder |
| Insekter | ●● | ● | ● | - | ●● Rømming | ●●● | ● | ● Bioenergi |
| Børstemark | ●●● | ● | - | ● | - | ●● | ● | ● Bioenergi |
| Gammarider | ●●● | ● | - | ● | - | ●● | ● | ● Bioenergi |
| Tunicater/-Sekkedyr | ●● | ●● | - | - | - | ●● | ● | - |
| Blåskjell | ● | ●● | ●● | ● | ●● Smitte-spredning | ●● | ● | ● Mat |
| Makroalger | ●● | ●● | ●● | ● | ●● Smitte-spredning | ●●● | ●● | ●● Mat, vind, maritim, fiskeri |

● lav effekt, ●● middels effekt, ●●● stor effekt ● negativ effekt ● positiv effekt

Tabell 5.5. Kvalitativ vurdering av mikrobielle prosesser for encelleprotein.

| | Miljømessig | | | | | Samfunnsmessig | | |
|---|-------------|------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|---------------------|------------|--------------------------------|
| | Energibehov | Arealpress | Biologisk mangfold/-økosystem | Forurensing/utslipp/plastforurensing | Biosikkerhet | Lokal verdiskapning | Syssetting | Konflikt med andre verdikjeder |
| Fototrof prosess med CO ₂ og LED-lys | ●●● | - | - | - | ● Kontami-nering | ● | ● | - |
| Heterotrof fermentering av organiske komponenter framstilt kjemisk fra CO ₂ + H ₂ | ●●● | - | - | - | ● Kontami-nering | ● | ● | - |
| Heterotrof ferm. av glukose og sukrose | ●● | ●● | ● | ● | ● Kontami-nering | ● | ● | ● Mat |
| Heterotrof ferm. av sukkerer fra trevirke | ●● | ● | ● | ● | ● Kontami-nering | ● | ● | ● Annen bruk av trevirket |
| Heterotrof ferm. av metan fra naturgass | ●● | - | - | ●●● Fossilt C | ● Kontami-nering | ● | ● | ● Metan til andre formål |
| Heterotrof ferm. av metan fra biogass | ●● | - | - | - | ● Kontami-nering | ● | ● | ● Metan til andre formål |

● lav effekt, ●● middels effekt, ●●● stor effekt ● negativ effekt ● positiv effekt

5.7 Samlet vurdering av bærekraft

Produksjon av fôrprotein i de nødvendige kvanta i Norge vil være energikrevende, og en bærekraftig produksjon vil avhenge av en norsk energi-miks med lavest mulig klimafotavtrykk og minst mulig miljøfotavtrykk. Innenlands el-kraftbehov i Norge forventes å dobles fra 2021 til 2050, og framtidens energiscenarier viser at el-kraftproduksjonen i 2050 i hovedsak vil være basert på fornybare kilder som vind-, vann- og solkraft¹¹⁰. Fornybare energikilder har lavere klimagassutslipp enn fossile kilder, men hvilken effekt de har på lokalt miljø og biologiske mangfold er fremdeles lite utforsket.

Høsting av marine råvarer krever mye energi, men har relative lave negative konsekvenser på miljøet dersom forvaltningsplaner følges og oppdateres jevnlig basert på ny kunnskap. Lukkede systemer på land for gammarider og børstemark som kan bruke restråstoff har få negative konsekvenser for lokalmiljøet, men vil kreve store mengder energi. Landbaserte planteråvarer har mindre energibehov og ikke store negative miljøkonsekvenser, men kan føre til arealpress og konflikt med andre verdikjeder. Mikrobiell produksjon er også energikrevende, men skjer i lukkede systemer med begrensede negative konsekvenser for miljøet bortsett av arealpress for dyrking av sukker. Bruk av restråstoff som innsatsfaktor i dyrking av gammarider, børstemark og CO₂ fra røykgass til mikroorganismer er positivt for miljøet. Alle råvarer og deres verdikjeder vil i varierende grad bidra positivt til lokal verdiskapning og sysselsetting. Det kan oppstå konflikt eller ressurskonkurrans med eksisterende verdikjeder for bl.a. fiske, mat og bioenergi for noen råvarer som er negativt i et bærekraftperspektiv fordi det kan ha negative økonomiske eller miljømessige konsekvenser i disse verdikjedene.

En økt produksjon av proteinfôr i Norge kan ha negative konsekvenser i det globale sør når det gjelder sosioøkonomiske aspekter samt i noen grad ha negative konsekvenser på lokalt miljø.

¹¹⁰ [Energy Transition Norway 2022 DNV](#)

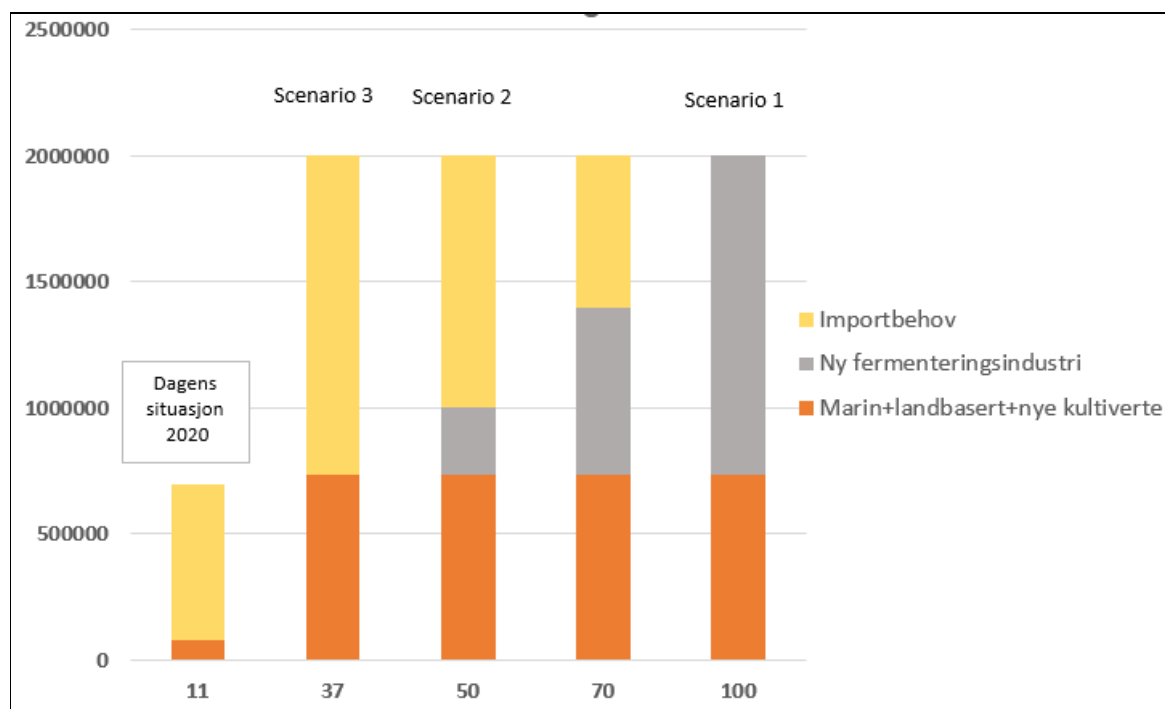
6 Alternativer for fremtidig fôrproduksjon i Norge

6.1 Scenarier

Muligheten for å bringe tilveie tilstrekkelig norsk bærekraftig fôrprotein til fremtidig produksjon av mat ved akvakultur gitt et fôrproteinbehov på 2 millioner tonn i Norge i 2050 kan beskrives ut fra tre elementer:

1. Høsting av marine og landbaserte råvarer samt nye kultiverte planter og dyr (Kap. 3.2-3.4)
2. Etablering av ny bærekraftig fermenteringsindustri (Kap. 3.5)
3. Bærekraftig import

Figur 6.1 og 6.2 under viser bidraget fra de tre hovedelementene avhengig av hvilken selvforsyningsgrad for fôrvarer som legges til grunn. Ytterpunktet til venstre i Figur 6.1, Scenario 3, antar en selvforsyningsgrad på 37 %. Her setter vi oss i stand til kun å ta ut potensialet basert på høsting av marine råvarer, landbaserte råvarer og nye kultiverte planter og dyr. Resten av behovet for fôrstoffer dekkes gjennom fortsatt import. Dette representerer likevel en betydelig fremgang i forhold til dagens situasjon der mindre enn 10 % er norskproduserte fôrvarer.

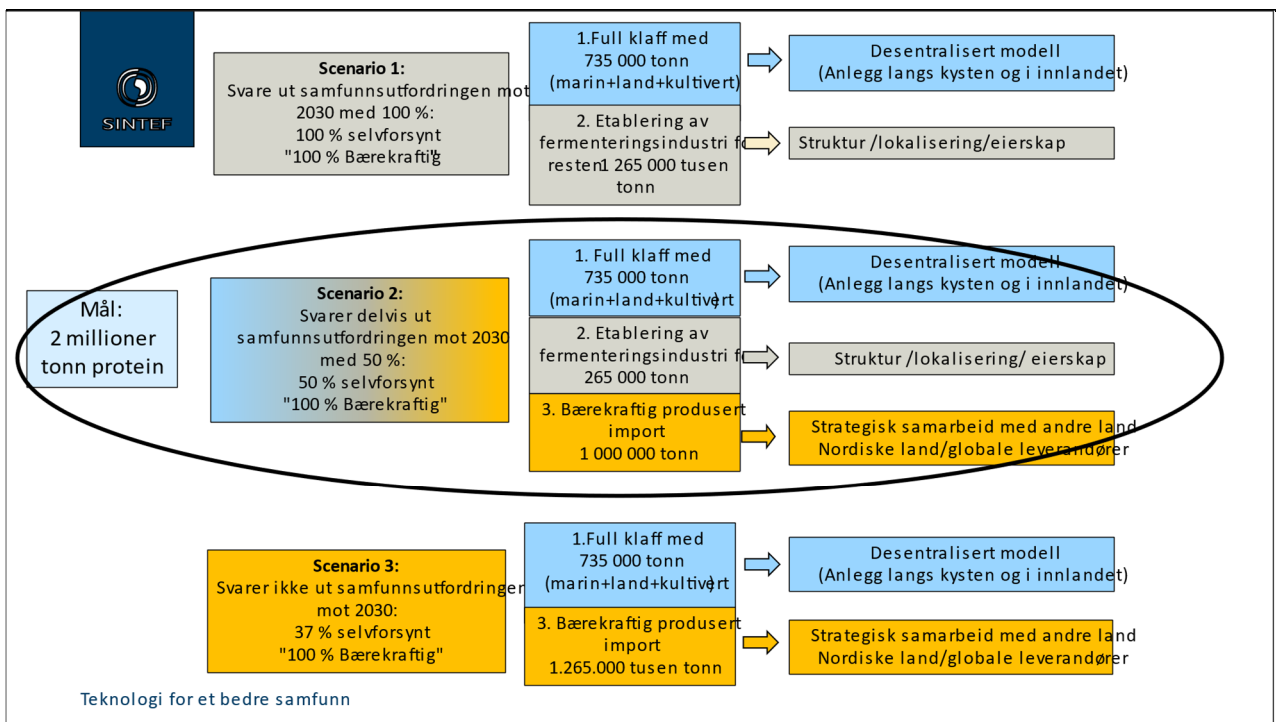


Figur 6.1. Ulike scenarier for å frembringe 2 millioner tonn protein avhengig av norsk selvforsyningsgrad på fôr. Dagens selvforsyningsgrad (2020) er ca. 11 %.

Det andre ytterpunktet, Scenario 1 til høyre i figuren, legger opp til en selvforsyning på 100 %. Protein utover de 35 % vi sikter på å fremskaffe i Scenario 3, må produseres som encelleprotein ved fermentering. Dette scenariet vil svare helt ut til samfunnsutfordringen slik den er beskrevet i Meld.St.5, Langtidsplan for forskning og høyere utdanning (2023-2032) der målet er å basere norsk matproduksjon på kun norske bærekraftige fôrvarer i 2030.

Med utgangspunkt i en selvforsyning på 50 % skisserer Scenario 2 en modell der det utvikles en produksjon av encelleprotein på 265 tusen tonn protein som dekker behovet for å gå fra 35 %

dekning (700 tusen tonn) til 50 % dekning (1 million tonn). Det resterende behovet på 1 million tonn protein for å nå 2 millioner tonn må fortsatt dekkes av bærekraftig import.



Figur 6.2. Kvantifiserte alternative scenarier for å bringe til veie 2 millioner tonn protein i 2050.

6.2 Mikrobiell fôrproduksjon i Norge?

Hvis den norske produksjonen av oppdrettslaks skal øke til 5 millioner tonn i 2050 vil dette kreve om lag 2 millioner tonn fôrprotein. Hvis dette proteinet skal produseres i Norge er det vanskelig å se hvordan dette skal kunne skje uten at det etableres en omfattende produksjon av encelleprotein i Norge. Denne produksjonen kan være basert på fotoautotrof dyrking av mikroalger, kjemoautotrof dyrking av bakterier på CO₂ + H₂, eller heterotrof dyrking av gjær og/eller bakterier, eller en kombinasjon. Norge har ikke tradisjon for storskala fermentering av mikroorganismer slik som f.eks. Danmark og Nederland, men det er ingen åpenbar grunn til at en slik industri ikke skal kunne etableres i Norge. Vi har rikelig med plass, og god tilgang på kaldt kjølevann. I heterotrofe fermenteringer utvikles varme og fermentorene må kjøles kontinuerlig for å hindre at temperaturen blir så høy at mikroorganismene inaktiveres. Behovet for fôrprotein til fiskefôr vil sørge for et stort hjemmemarked, og hvis produksjonen kan knyttes nært opp mot fiskefôrproduksjonen kan dette gi muligheter for besparelser, f.eks. ved at den våte cellemassen fra fermenteringen etter sentrifugering går direkte inn i fôrproduksjonen uten å gå veien om et tørt produkt.

Det teknisk enkleste vil være heterotrof fermentering av sukker (sukrose, glukose, sukkere utvunnet fra trevirke) med bakterier eller gjær. Dette er etablert teknologi. Norge har ingen sukkerproduksjon som skal beskyttes, og kan kjøpe sukker (sukrose, glukose) til verdensmarkedspris. Men dersom encelleprotein er produsert på importert sukker, er det da å anse som norskprodusert? Sukrose og glukose (framstilt ved hydrolyse av hvete- eller maisstivelse) er også mulig menneskeføde. Alternativt kan sukkere utvinnes fra trevirke, og basert på den informasjonen som foreligger til en

kostnad på nivå med sukkerprisen på verdensmarkedet. Men det hører med til historien at i dag kan encelleprotein produsert med glukose som C-kilde (en etablert teknologi) i beste fall produseres til en pris på nivå med protein i fiskemel og andre høyverdige proteinkilder. Plantebasert protein i form av soyamel er betydelig billigere.

I de seneste år har produksjon av encelleprotein med på CO₂ som C-kilde og hydrogen (H₂) som E-kilde fått økt oppmerksomhet. Utfordringen er at H₂ må framstilles på en bærekraftig måte og i praksis innebærer dette hydrolyse av vann med "grønn" elektrisk energi (vann-, vind-, eller solbasert kraft). CO₂ kan høstes fra store punktutslipp av avgass fra forbrenning eller sementproduksjon, men i så fall må dyrkingsanlegget plasseres nær punktutslippet, og skal man oppnå fordelene ved at encelleproteinet og fiskefôret produseres på samme lokalitet (se under) må også fôrproduksjonsanlegget plasseres her. Alternativt kan CO₂ høstes direkte fra luften med såkalt DAC-teknologi (DAC = direct air capture), men fordi konsentrasjonen av CO₂ i luften er svært lav (0.04 %) blir dette både kostbart og energikrevende. Fordelen med direkte høsting av CO₂ fra luften er at produksjonen av encelleprotein da kan skje nær fiskefôrfabrikken med de fordelene dette kan innebære (se under). DAC-teknologien er i rivende utvikling og det er sannsynlig at den vil bli både mer effektiv og billigere i kommende år. Samtidig kan økt oppmerksomhet på CO₂ føre til at de tilgjengelige kvanta i mange av dagens punktutslipp avtar. Fossilt karbon som tar veien via fiskefôr og en oppdrettslaks er en betydelig bedre løsning enn direkte utslipp til luften, men til slutt vil det fossile karbonatomet likevel nå atmosfæren. Hvis CO₂ høstes direkte fra luften vha. "grønn" energi blir prosessen klimanøytral og når karbonatomet til sist vender tilbake til atmosfæren gir ikke dette en netto økning i CO₂-innholdet i atmosfæren.

Et alternativ til H₂ som energikilde er lys, dvs. fototrof dyrking av mikroalger. Sammenlignet med heterotrof produksjon av encelleprotein er fototrof produksjon noe mer plasskrevende, men i Norge bør ikke arealkravet til noen av produksjonsprosessene være en stor utfordring. Men på våre breddegrader vil kunstig belysning (LED-lys) være nødvendig i det minste deler av året, og kunstig belysning innebærer et større energibehov per kg protein produsert enn en prosess basert på CO₂ + H₂. Foreløpige overslag indikerer at produksjon av 100 tusen tonn protein i form av mikroalger med LED-lys kan kreve 30-60 TWh, eller 19-39 % av den norske el-kraftproduksjonen i dag. En mulig strategi, men som kan bli krevende designmessig, kan være å utnytte sollys når dette er tilgjengelig. Tubulære og flatpanel fotobioreaktorer er kjent teknologi, og kan "enkelt" skifte mellom kunstig lys og sollys, men disse er normalt for kostbare for et lav-kostprodukt som encelleprotein. Produksjon av encelleprotein ved heterotrof fermentering av eddiksyre framstilt ved kjemisk reduksjon av CO₂ med H₂ er også energikrevende, kanskje 8-10 TWh, eller 5-6 % av den norske el-kraftproduksjonen i dag for 100 tusen tonn protein. Begge overslag er foreløpige og må følges opp av flere studier, men viser at produksjon av encelleprotein fra CO₂ kan bli svært energikrevende.

Norge har en fossil C-kilde, metan i naturgass, som ved fermentering til encelleprotein kvantitativt lett kan dekke et behov for 1 million tonn fôrprotein. Teknologien er etablert og internasjonalt produseres i dag om lag 20 tusen tonn fôrprotein for fisk ved fermentering av metan fra naturgass. Men produksjon av fôrprotein fra naturgass kan neppe kalles bærekraftig i et langsiktig perspektiv. Selv om de fossile C-atomene i naturgass tar veien via encelleprotein, fiskefôr, laksekjøtt og en menneskemade vil de til syvende og sist finne veien til atmosfæren.

6.3 Et lokalt scenario: Nærøysund kommune i Namdalen

I Nærøysund kommune på Namdalskysten produseres ca. 92 tusen tonn oppdrettslaks per år. Dette gir et fôrproteinbehov på ca. 37 tusen tonn. Med utgangspunkt i 10 kommuner i Namdalen foreligger en del ressurser som teoretisk kan anvendes til fôrproduksjon (Tabell 6.1). Av dette teoretiske proteinpotensialet er det sannsynligvis bare det som kan fremskaffes fra restråstoff fra villfiskeriene som kan utnyttes på kort sikt. Pressing og utfelling av protein fra gress vil være logistisk krevende og kostbart på grunn av et spredt landbruksareal, og omstridt grunnet andre anvendelser. Produksjon av protein ved fermentering av sukkere utvunnet fra trevirke vil være krevende og vil uansett ikke dekke mer enn en liten del av behovet. Behov for trevirke til annen bruk innebærer at bare en liten del av det teoretiske potensialet kan realiseres.

Tabell 6.1. Potensial for produksjon av protein fra bioressurser i 10 kommuner i Namdalen.

| Ressurs | Ressurser* | Protein/ressursenhet Proteinpotensial | Totalt teoretisk potensial for protein | Prosess |
|------------------------------------|--------------------------|--|--|--|
| Landbruksareal | 289 km ² | 80 kg/dekar | 23 tusen tonn | Pressing og utfelling fra gress |
| Avvirking fra skogen | 250 tusen m ³ | 0,06 tonn/m ³ | 14 tusen tonn | Prosessering av trevirket etterfulgt av fermentering |
| Restråstoff fra fangst av villfisk | 12 tusen tonn | 350 kg/tonn | 4 tusen tonn | Direkte tilførsel til fôrproduksjon |
| Sum | | | 41 tusen tonn | |

*Samlet tilgang fra kommunene Nærøysund, Namsos, Leka, Høylandet, Overhalla, Grong, Namsskogan, Snåsa, Lierne og Røyrvik

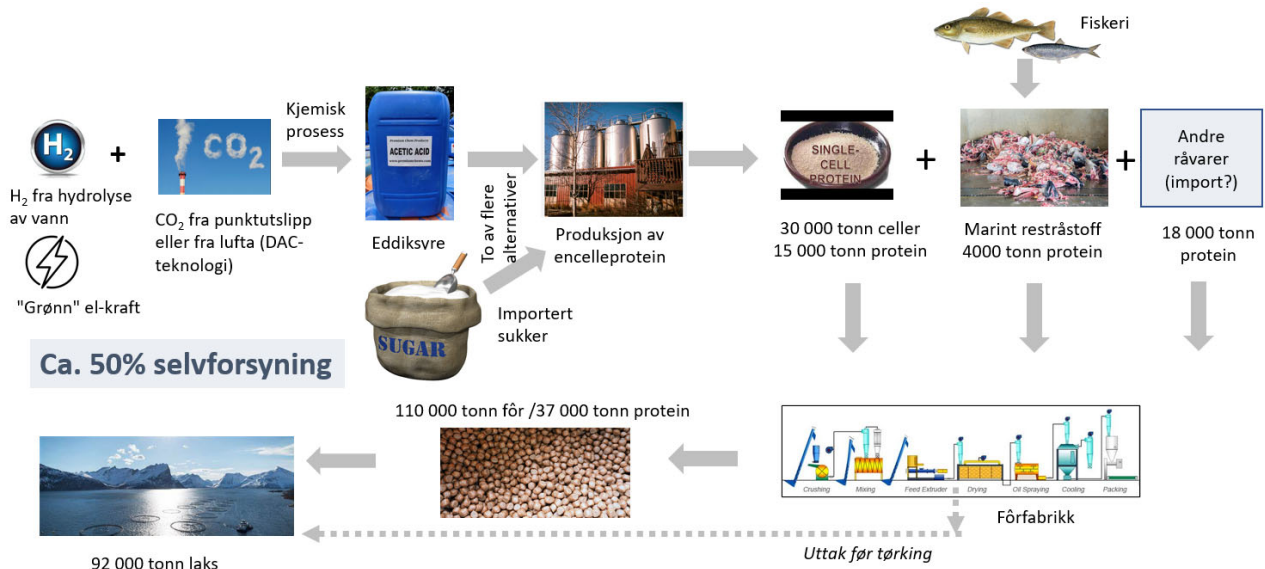
Et mulig alternativ for å oppnå 50 % selvforsyning på fôrråvarer til produksjon av 92 tusen tonn laks i Nærøysund kommune, er å bygge opp en fermenteringsindustri for produksjon av encelleprotein (Figur 6.3, neste side). Dette kan, som diskutert over, baseres på mange ulike strategier. Den teknisk enkleste løsningen for produksjon av encelleprotein i Nærøysund er fermentering basert på importert sukker (glukose, sukrose). Gitt 4 store fermentorer (1000 m³) med 800 m³ arbeidsvolum, en fermenteringstid på 3 døgn og en sluttkonsentrasjon på 100 kg celler per m³ med 50 % protein, vil et slikt anlegg greit produsere 15 tusen tonn protein (30 tusen tonn bakterier/gjær) per år. Dette vil kreve omkring 60 tusen tonn sukker per år, om lag 14 tusen tonn NH₄Cl og fra noen tusen til noen hundre tonn av andre mineralsalter.

En fermentor på 1000 m³ kan f.eks. ha en diameter på omkring 9.5 m og en høyde på 14-15 m. I tillegg kommer mindre inokulum-fermentorer for å bygge opp cellemassen før cellene overføres til produksjonsfermentorene, kanskje på 50-100 m³ og 2-10 m³. Etter endt fermentering vil cellemassen først separeres ifra mediet ved sentrifugering. I en ideell situasjon kunne denne cellemassen gå direkte inn i produksjonen av fiskefôr. Hvis ikke må den tørkes. Holdbarheten av våt cellemasse, selv ved kjølig lagring, vil være meget begrenset, i beste fall et døgn eller to.

Energiforbruket for en sukkerbasert produksjon av encelleprotein ved fermentering etterfulgt av avvanning ved sentrifugering, kan estimeres til 4.8 MWh/tonn protein, mens den påfølgende tørkingen krever ytterligere 11.6 MWh/tonn protein. Samlet gir dette et energibehov for den skisserte fermenteringsprosessen på om lag 0.25 TWh/år. I tillegg kommer energi til sterilisering av medium og utstyr og diverse andre prosesser slik at 0.3 TWh/år kan være et grovt estimat.

Teoretisk kan det også utvinnes sukkere fra lokalt trevirke, men da må det bygges et anlegg for utvinningsprosessen, kanskje helst i et område med mye skog (Namdalen?). Energiforbruket ved

denne prosessen er ikke kjent, men uansett vil det bare være snakk om sukkere nok til å produsere noen få tusen tonn protein i året. En fermentor designet for fermentering av importert sukker bør imidlertid greit kunne brukes til noen få fermenteringer av sukkere utvunnet fra trevirke på en dertil egnet produksjonsgjær.



Figur 6.3 Mulig case: Fremstilling av fôråvare for produksjon av 92 tusen tonn laks i Nærøysund kommune.

Alternativt kunne man bygge opp en fermenteringsindustri basert på $CO_2 + H_2$, men en storskala fermentor designet for produksjon av encelleprotein basert på sukker kan kreve ombygging for å egne seg for produksjon av encelleprotein fra eddiksyre eller metanol. Substrater som metanol og eddiksyre (produsert kjemisk eller biologisk fra $CO_2 + H_2$) er giftige for mikroorganismer i for høye konsentrasjoner og må doseres inn kontinuerlig i takt med at de forbrukes under fermenteringen. Dette er ikke noe problem i små fermentorer ($<1-5\ m^3$) hvor røringen gir god blanding til enhver tid, men i store fermentorer ($500-1000\ m^3$) kreves spesielle doseringsdesign (mange føde-innløp på ulike punkter i fermentoren) for å hindre at det oppstår konsentrasjonsgradienter som tidvis inhiberer mikroorganismene. Teknologien ble utviklet på 1960/70-tallet for produksjon av encelleprotein basert på metanol, men en storskala fermentor designet for produksjon av encelleprotein basert på sukkere kan kreve ombygging for å egne seg for produksjon av encelleprotein fra eddiksyre eller metanol.

Den store utfordringen ved en produksjon basert på $H_2 + CO_2$ er el-kraft behovet for (1) hydrolyse av vann til $H_2 + O_2$, og (2) påfølgende kjemiske produksjon av metanol eller eddiksyre ved reaksjon mellom H_2 og CO_2 . Dersom CO_2 skal høstes direkte fra luften med DAC-teknologi vil dette også kreve en del el-kraft. Et grovt overslag indikerer at produksjon av 30 tusen tonn protein (60 tusen tonn bakterier/gjær) i en slik prosess vil kreve 1.1-1.4 TWh. I tillegg kommer el-kraft til selve fermenteringen (røring, sterilisering av utstyr og medier) og av-vanning (sentrifugering og tørking), grovt anslått til 0.3 TWh per år. Samlet gir dette 1.4-1.7 TWh/år som tilsvarer 0.9-1.1 % av den norske normalårsproduksjonen av el-kraft i Norge ved inngangen til 2022. Dette overgår trolig den lokale tilgangen i Nærøysund/Namdalen. En betydelig utbygging av vindkraft synes mest nærliggende for en kystnær kommune som Nærøysund, men er neppe "comme il faut" for øyeblikket.

Rapport , Industriell fremstilling av norske fôrårvarer

Final Audit Report

2023-05-05

| | |
|-----------------|---|
| Created: | 2023-05-04 |
| By: | Ida Grong Aursand (ida.grong.aursand@sintef.no) |
| Status: | Signed |
| Transaction ID: | CBJCHBCAABAAOGUd7OhdqF3vyBIMx2HJ4g0I9gV5fMpy |

"Rapport , Industriell fremstilling av norske fôrårvarer" History

 Document created by Ida Grong Aursand (ida.grong.aursand@sintef.no)

2023-05-04 - 9:34:21 AM GMT- IP address: 178.164.42.20

 Document emailed to marit.aursand@sintef.no for signature


2023-05-04 - 9:35:36 AM GMT

 Email viewed by marit.aursand@sintef.no

2023-05-04 - 9:46:20 AM GMT- IP address: 104.47.51.190

 Signer marit.aursand@sintef.no entered name at signing as marit aursand

2023-05-04 - 9:46:47 AM GMT- IP address: 78.91.96.101

 Document e-signed by marit aursand (marit.aursand@sintef.no)

Signature Date: 2023-05-04 - 9:46:49 AM GMT - Time Source: server- IP address: 78.91.96.101

 Document emailed to bardwathne.tveiten@sintef.no for signature

2023-05-04 - 9:46:51 AM GMT

 Email viewed by bardwathne.tveiten@sintef.no

2023-05-04 - 9:56:01 AM GMT- IP address: 104.47.51.254

 Signer bardwathne.tveiten@sintef.no entered name at signing as Bård Wathne Tveiten


2023-05-04 - 9:56:18 AM GMT- IP address: 194.78.218.41

 Document e-signed by Bård Wathne Tveiten (bardwathne.tveiten@sintef.no)

Signature Date: 2023-05-04 - 9:56:20 AM GMT - Time Source: server- IP address: 194.78.218.41

 Document emailed to karl.almas@sintef.no for signature


2023-05-04 - 9:56:22 AM GMT

 Email viewed by karl.almas@sintef.no

2023-05-05 - 6:30:05 AM GMT- IP address: 104.47.30.126

 Signer karl.almas@sintef.no entered name at signing as Karl A. Almås

2023-05-05 - 6:31:31 AM GMT- IP address: 185.80.180.134

 Document e-signed by Karl A. Almås (karl.almas@sintef.no)

Signature Date: 2023-05-05 - 6:31:33 AM GMT - Time Source: server- IP address: 185.80.180.134

 Agreement completed.

2023-05-05 - 6:31:33 AM GMT