



**CHALMERS**

# Näringsåtervinning ur avloppsvatten för livsmedelsproduktion

En jämförelse av cirkulära produktionsmetoder genom alg- och bakterieodling för produktion av råvara till fiskfoder

Kandidatarbete inom samhällsbyggnadsteknik

Emma Berg  
Molly Carlberg  
Tomislav Corluca  
Lina Lindvall  
Jonas Nilsson  
Elsa Ström

**INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2025  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



KANDIDATARBETE 2025

# Näringsåtervinning ur avloppsvatten för livsmedelsproduktion

En jämförelse av cirkulära produktionsmetoder genom alg- och bakterieodling för produktion av råvara till fiskfoder

EMMA BERG  
MOLLY CARLBERG  
TOMISLAV CORLUKA  
LINA LINDVALL  
JONAS NILSSON  
ELSA STRÖM



**CHALMERS**

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2025

Näringsåtervinning ur avloppsvatten för livsmedelsproduktion  
En jämförelse av cirkulära produktionsmetoder genom alg- och bakterieodling för  
produktion av råvara till fiskfoder

EMMA BERG  
MOLLY CARLBERG  
TOMISLAV CORLUKA  
LINA LINDVALL  
JONAS NILSSON  
ELSA STRÖM

© EMMA BERG, MOLLY CARLBERG, TOMISLAV CORLUKA, LINA LIND-  
VALL, JONAS NILSSON, ELSA STRÖM, 2025.

Handledare: Oskar Modin, Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Examinator: Britt-Marie Wilén, Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnad-  
steknik

Examensarbete 2025  
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Chalmers Tekniska Högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Telefon +46 31 772 1000

Skriven i L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Göteborg 2025

## Sammandrag

Denna teoretiska studie undersöker potentialen för näringsåtervinning ur avloppsvattenflöden, med särskilt fokus på kväve och fosfor – två grundläggande ämnen för livsmedelsproduktion. I dagens linjära sanitetssystem går dessa näringsämnen ofta förlorade, vilket bidrar till miljöförstöring och uteblivna resursmöjligheter. Studien utforskas möjligheten att omvandla näringsämnen i avloppsvatten till livsmedel genom att jämföra olika produktionsvägar för fiskfoder. De valda alternativen inkluderar mikroalger, makroalger, metanoxiderande bakterier (MOB) och väteoxiderande bakterier (HOB). Dessa jämförs huvudsakligen utifrån fiskproduktion och energieffektivitet, men även utifrån skalbarhet, för att ge en helhetsbild. Resultaten visar att makroalger är den värdekedja med högst potential för fiskproduktion och är mest energieffektiv per producerat kilogram fisk. Samtidigt uppvisar MOB den lägsta årliga totala energiförbrukningen samt ytbehovet för att återvinna allt kväve och fosfor, vilket tyder på den mest effektiva värdekedjan för att ta tillvara dessa resurser. Studien belyser potentialen i att kombinera cirkulära avloppssystem med innovativa metoder för hållbar livsmedelsproduktion och ger insikter för framtida utveckling av resurseffektiv akvakultur och avloppshantering.

## Abstract

This theoretical study investigates the potential for nutrient recovery from wastewater streams, with a focus on nitrogen and phosphorus, which are vital elements for food production. In current linear sanitation systems, these nutrients are often lost, contributing to environmental degradation and missed resource opportunities. The study explores the potential to upcycle these nutrients from wastewater into food, by evaluating various fish feed production pathways. The selected pathways include microalgae, macroalgae, methane-oxidizing bacteria (MOB), and hydrogen-oxidizing bacteria (HOB). These alternatives are compared mainly based on fish yield and energy efficiency, but also scalability to provide a comprehensive comparison. Results indicate that macroalgae have the highest potential to produce fish and are the most energy-efficient per kilogram of fish produced. However, MOB-based production requires the lowest total annual energy input and required surface area to recover all nitrogen and phosphorus, indicating the most efficient pathway for capturing these nutrients. This study highlights the potential of combining circular wastewater systems with innovative approaches to sustainable food production. It provides insights for future development of resource-efficient aquaculture and wastewater management strategies.

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrund . . . . .	1
1.2	Syfte . . . . .	4
1.3	Avgränsningar . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Biologisk bakgrund</b>	<b>6</b>
2.1	Alger . . . . .	6
2.1.1	Makroalger . . . . .	6
2.1.2	Mikroalger . . . . .	7
2.2	Bakterier . . . . .	7
2.2.1	MOB . . . . .	8
2.2.2	HOB . . . . .	8
2.3	Systemkarta . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Metod</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Teori &amp; teknisk dimensionering</b>	<b>14</b>
4.1	Ryaverket indata . . . . .	14
4.1.1	Ingående N-, P- och C . . . . .	14
4.1.2	Vattentemperatur . . . . .	14
4.1.3	Biogasproduktion och tillgängligt kol . . . . .	15
4.1.4	Biogasproduktion och tillgängligt kol utan dentrifikation . . . . .	15
4.2	Alger . . . . .	16
4.2.1	Makroalger . . . . .	18
4.2.2	Mikroalger . . . . .	19
4.3	Bakterier . . . . .	21
4.3.1	HOB/MOB . . . . .	21
4.3.2	Kväve- och fosforutvinning . . . . .	22
4.3.3	Elektrolys . . . . .	23
4.3.4	Ångreformerings . . . . .	24
4.3.5	Syrgasinfångning . . . . .	25
4.3.6	DAC . . . . .	25
4.3.7	Förbränning . . . . .	27
4.3.8	PCC . . . . .	27
4.3.9	Biogasuppgradering . . . . .	27
4.4	Fiskfoder och odling . . . . .	28
4.5	Inblandning av alger och bakteriellt protein i fiskfoder . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Resultat</b>	<b>31</b>
5.1	Scenario 1: Makroalger . . . . .	31
5.2	Scenario 2: Mikroalger . . . . .	32
5.3	Scenario 3: MOB . . . . .	33
5.4	Scenario 4-7: HOB och HOB/MOB . . . . .	34
5.5	Sammanställt resultat . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>41</b>
6.1	Jämförelse mellan mikro- och makroalger . . . . .	41

6.2	Makroalger . . . . .	41
6.3	Mikroalger . . . . .	42
6.4	Potentiella förbättringar för alger . . . . .	42
6.5	Jämförelse mellan MOB och HOB . . . . .	43
6.6	MOB . . . . .	43
6.7	HOB . . . . .	44
6.7.1	Vätgasförsörjning . . . . .	44
6.7.2	Koldioxidförsörjning . . . . .	45
6.7.3	Syrgasförsörjning . . . . .	45
6.8	Kombinerad produktion av MOB och HOB . . . . .	46
6.9	Jämförelse mellan alla produktionsvägar . . . . .	46
6.9.1	Energieffektivitet . . . . .	46
6.9.2	Produktion . . . . .	47
6.9.3	Ytbehov . . . . .	48
6.9.4	Verklig implementering . . . . .	48
<b>7</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>Referenser</b>	<b>50</b>
<b>9</b>	<b>Bilaga</b>	<b>55</b>

# 1 Inledning

För att klara av att försörja en växande befolkning med näringsrik mat, krävs genomgripande förändringar i hur livsmedel produceras (Linder, 2019). Dagens livsmedelssystem innefattar storskalig animalieproduktion och är starkt beroende av fossila resurser och av konstgödsel som idag huvudsakligen tillförs i linjära flöden. Detta orsakar både stora utsläpp och ett omfattande resursslöseri vilket i sin tur riskerar att driva på klimatförändringar med ännu större utmaningar för livsmedelsproduktionen som följd. Utveckling av långsiktigt hållbara och motståndskraftiga vägar för livsmedelsproduktion är därför nödvändig för att uppnå FN:s organ UNDP:s globala mål: *Ingen hunger och hållbar konsumtion och produktion* (UNDP, 2025).

Särskilt kritiskt är beroendet av kväve och fosfor, som visserligen är helt nödvändiga för att producera mat, men som i sin nuvarande hantering innebär ett ineffektivt användande av resurser som sätter stor press på ekosystem och leder till problem som övergödning och utarmandet av resurser (Linder, 2019; Matassa m. fl., 2016; Meng m. fl., 2024). Stora mängder av dessa näringsämnen förloras i olika delar av värdekedjan – bland annat via hanteringen av avloppsvatten i våra städer (Koskue m. fl., 2021). Livsmedelssystemet kan bli mer effektivt och långsiktigt hållbart om näringsämnen förs tillbaka till systemet i stället för att gå till spillo. Här spelar reningsverk en nyckelroll, eftersom de samlar upp stora mängder kväve och fosfor från hushåll och industri. Idag är dessa anläggningar i första hand utformade för att rena vatten – inte för att återvinna resurser. Inom både forskning och näringsliv pågår initiativ för att möjliggöra effektivare vattenrening och återvinning av näringsämnen, vilket skapar nya incitament och förutsättningar att tillvarata resurser som tidigare betraktats som avfall, såsom avloppsvatten och slam (XOMA, 2025; Meng m. fl., 2024).

Parallellt pågår forskning och utveckling av nya sätt att ta fram livsmedel på ett resurseffektivt sätt (Kiessling och Hansen, 2024; Fasolin m. fl., 2019). Samtidigt finns redan etablerade sätt att ta fram livsmedel med högt proteininnehåll och med ett lågt klimatavtryck som idag får allt större uppmärksamhet (Linder, 2019). Ett relevant exempel är organismer som mikroalger och bakterier. Genom olika integrerade, tekniska system kan dessa användas för att ta upp näring och andra potentiella föroreningar ur avfallsströmmar, som exempelvis avloppsvatten eller rejektvatten från anaerob rötning, och assimilera dessa i biomassa. (XOMA, 2025; Verbeeck m. fl., 2021). Om avfallsströmmarna är fria från hälsovådliga ämnen kan dessa processer innebära nya former av proteinproduktion, där restflöden skulle kunna omvandlas till råvara istället för avfall. Med striktare krav på reningsverken i kombination med nya tekniska lösningar och synsätt kan dessa olika komponenter – såväl nya som etablerade – bli framtida nav i en cirkulär, urban livsmedelsproduktion. Denna studie undersöker specifikt hur ett storskaligt reningsverk i en urban miljö – med Göteborgs Ryaverket som exempel – skulle kunna integreras i en hållbar, cirkulär värdekedja för livsmedelsproduktion med fokus på produktion av proteinrik biomassa.

## 1.1 Bakgrund

Högintensiv livsmedelsproduktion och samtida konsumtionsmönster utmanar gränserna för vad vår planet klarar av. Redan till år 2050 förväntas klimatpåverkan från livsmedelsproduktion att ha fördubblats jämfört med 2010 (Linder, 2019). Denna utveckling drivs

av befolkningstillväxt och ökade resurskrav som tillsammans med resulterande klimatförändringar riskerar att försätta det globala livsmedelssystemet i en negativ spiral av sjunkande avkastning och ökande miljöbelastningar.

Omkring 80 % av den totala jordbruksmarken globalt och 41 % av jordbrukets vattenförbrukning används för att hålla boskap och för att producera djurfoder, vilket innebär en resurskrävande mellanhand i livsmedelskedjan som leder till en ineffektiv användning av mark- och vattenresurser (Humpenöder m. fl., 2022; Linder, 2019). Samtidigt väntas konsumtionen av animaliska produkter att öka, vilket illustrerar det betydande ekologiska fotavtryck som är kopplat till livsmedelsproduktionen och den utmaning samhället står inför. Landbaserad odling av grödor – för såväl foder som livsmedelsproduktion – är i sin tur beroende av gödningsmedel, som huvudsakligen består av kväve och fosfor (Meng m. fl., 2024).

Kväve och fosfor är avgörande för allt liv på jorden. De förekommer i olika former och är centrala i biologiska processer, exempelvis som byggstenar i aminosyror, proteiner, DNA och RNA (NE, 2025b; NE, 2025a). Deras betydelse gör dem till nyckelkomponenter inom intensiv livsmedelsproduktion, där de används som gödningsmedel för att säkerställa hög avkastning inom jordbruket. Kväve för gödningsmedel produceras vanligtvis via den energikrävande Haber-Bosch-processen, som ensam står för cirka 2 % av världens totala energianvändning (Koskue m. fl., 2021). Fosfor är en ändlig resurs, och samtidigt som efterfrågan förväntas öka med 51–86 % till år 2050 riskerar de kända tillgångarna att vara uttömda inom 50–300 år (Meng m. fl., 2024). En effektivare produktion och användning av dessa ämnen är därmed avgörande – ur både energi- och resursperspektiv – vilket i sin tur är centralt för samhällets långsiktiga hållbarhet.

I avloppsvattenrening utgör kväve och fosfor också en central komponent, där de hanteras och avlägsnas ur avloppsvattnet för att minimera deras skadliga miljöpåverkan. Effektiv rening och avskiljning av dessa näringsämnen är viktigt eftersom ett överskott kan orsaka övergödning, ett miljöproblem där näringsberikat vatten leder till algbloomning och syrebrist i sjöar och vattendrag (Bo Thunholm m. fl., 2025). Användningen av dessa näringsämnen i det arealbaserade jordbruket bidrar också till övergödning som en följd av avrinning från jordbruksmarken av de näringsämnen grödorna inte kan ta upp. Det finns alltså två huvudsakliga problem kopplade till kväve och fosfor: dels hur de produceras, dels hur de används inom jordbruket.

Näringsämnen som kväve och fosfor finns alltså i höga koncentrationer i avloppsvatten – det vill säga där mycket av vårt organiska avfall från livsmedelskonsumtionen till sist hamnar. Ett exempel på dagens hantering är Ryaverket – ett stort reningsverk i Göteborgsregionen som tar emot och behandlar avloppsvatten från cirka 825 000 personer från flera kommuner i Storgöteborg (Gryaab, 2025). Reningsprocessen omfattar flera steg: mekanisk, biologisk och kemisk rening vilka beskrivs utförligt i Ryaverkets miljörapport från 2023 (Karl-Emil Videbris, 2023). I den mekaniska reningen renas vattnet från större, fasta partiklar med hjälp av olika galler och sedimenteringsbassänger. Ett av den biologiska reningens huvudsakliga syften är att avskilja kväve ur avloppsvattnet. Ryaverket har som mål att avskilja minst 70 % av kvävet, varav ca 15–20 % hamnar i slammet och resten (80–85 %) avleds till atmosfären i form av kvävgas. Kvävereningsprocessen utgörs av nitrifikation, denitrifikation och deammonifikation. Dessa bygger på aktivslam

– ett koncentrat av bakterier och mikroorganismer – som blandas in i avloppsvattnet. Därefter leds vattnet genom luftade och icke-luftade zoner, vilket möjliggör mikrobiell omvandling av ammonium till kvävgas. Vid denitrifikation används de kolkällor som finns tillgängliga i avloppsvattnet, medan man vid efterdenitrifikation tillsätter metanol, vilket köps in externt. Fosfor avlägsnas huvudsakligen genom två metoder: simultanfällning, där järnsulfat tillsätts i den biologiska processen och binder fosfor till flockar som följer med slammet, samt direktfällning, där kemikalier tillsätts i ett senare steg för att möjliggöra sedimentation.

Dagens processer är effektiva men de är i grunden utformade för att avlägsna, snarare än att återvinna näringsämnen. I en cirkulär hantering tas inte avfall bara bort, utan behålls inom produktionssystemet genom att omvandlas till nya råvaror och resurser, vilket leder till att mängden avfall minskar och resurseffektiviteten ökar (European Commission, 2025). EU menar att cirkularitet är centralt för att uppnå klimatmålen till 2050. De ställer dessutom allt högre krav på avloppsreningsverk, bland annat vad gäller avskiljning av mikroföroreningar. Nya krav införs redan 2035 för större anläggningar och 2040 för medelstora (European Commission, 2022). Dessa krav skapar incitament och ger möjligheter att se på näringsämnen i avloppsvatten som en värdefull resurs för livsmedelsproduktion.

En mer cirkulär produktion av gödningsmedel är ett viktigt steg, men inte tillräckligt eftersom historiska data visar att potentialen till ytterligare effektivisering av det konventionella jordbrukets avkastning är begränsad (Linder, 2019). Linder argumenterar i en studie att samhället därför bör överväga alternativa strategier för livsmedelsproduktion, med syftet att optimera användningen av resurser såsom vatten, mark, energi och näringsämnen, vilket bidrar till att minska den ekologiska belastningen i samband med att världens växande befolkning ska försörjas. Mikrobiellt protein lyfts fram som ett relevant alternativ eftersom det kan produceras i slutna bioreaktorer, utan behov av solljus. I studien görs en jämförelse mellan ett industriellt bioreaktorsystem i Billingham, England och konventionell sojabönsproduktion vilket tydliggör den extrema produktiviteten hos mikrobiell biomassa. Med en möjlig årsavkastning på upp till 4,9 miljoner ton torr biomassa per hektar, motsvarande 82 vertikala bioreaktorer, är avkastningen cirka sex storleksordningar högre än för sojaböner per hektar. Detta illustrerar potentialen i mikrobiell proteinproduktion som ett yteffektivt och resursbesparande alternativ till konventionellt jordbruk. Även produktion av alger är ett intressant alternativ till konventionell odling. I slutna akvakulturer utgör de ett energi- och vattneffektivt system som kan producera högkvalitativa algprodukter med stor skalbarhet och flexibilitet (XOMA, 2025). Eftersom både alger och bakterier behöver näringsämnen såsom fosfor och kväve kan de användas för återvinning och uppgradering av näringsämnen genom att ta upp dessa och omvandla dem till biomassa som, givet striktare reningskrav, skulle kunna användas för att producera foder eller livsmedel.

Mikrobiellt protein, eller *single cell protein* (SCP) som det kallas inom livsmedelsindustrin är inget nytt eller innovativt sätt att producera livsmedel. SCP som begrepp myntades redan på 60-talet och Quorn<sup>TM</sup>, ett annat mikrobiellt protein, har funnits kommersiellt tillgängligt i Storbritannien sedan 1985. Två typer av mikrobiellt protein som är relevanta för foder- och livsmedelsproduktion är metanoxiderande och väteoxiderande bakterier (MOB respektive HOB). MOB är idag en väletablerad foderkälla som ända sedan 1995 officiellt rekommenderas av EU för inblandning i djurfoder (Øverland m. fl., 2010). HOB

har också varit omtalat ända sedan 60-talet, då framförallt som ett potentiellt livsmedel vid rymdresor. På dagens marknad representerar HOB en mer nyetablerad metod som succesivt får ökad tillämpning på marknaden (Linder, 2019), till exempel genom det finska företaget Solar Foods som 2023 etablerade en proteinprodukt, med Singapore som första marknad (Shilei Zhang, 2023). Exempel på alger är mikroalgen *Chlorella* som finns naturligt i svenska vatten och som har en bred användning som både foder, kosttillskott samt inom industriella tillämpningar av olika slag (Ahmad m. fl., 2018; Ferro m. fl., 2018). Arten är alltså vanligt förekommande vilket dessutom medför tillgång till en omfattande mängd relevant forskning (Dolganyuk m. fl., 2020). Bland intressanta makroalger kan nämnas *Ulva*-alger som också de återfinns i svenska vatten och har förmågan att anpassa sig till tankodlingar (Toth och Liljenström, 2023).

## 1.2 Syfte

Syftet med denna studie är att undersöka möjligheterna för näringsåtervinning från ett storskaligt, urbant reningsverk genom fiskfoderproduktion via fyra olika biologiska produktionsvägar – mikroalger, makroalger, väteoxiderande bakterier (HOB) samt metanoxiderande bakterier (MOB). Dessa fyra produktionsvägar undersöks och jämförs systematiskt med syfte att identifiera vilka alternativ som genererar högst utbyte i termer av teoretiskt maximal mängd producerad fisk, till lägsta möjliga energiförbrukning. Vidare utreds även tillämpbarhet i verkligheten, framför allt med avseende på ytbehov. Genom att analysera de olika värdekedjornas energiförbrukning syftar arbetet till att bidra med kunskap som kan ligga till grund för framtida utveckling av energieffektiva och resursoptimerade cirkulära biproduktionssystem.

## 1.3 Avgränsningar

För att möjliggöra en fokuserad och jämförbar analys gjordes ett antal avgränsningar och definitioner fastställdes inom ramen för denna studie. Studien jämför produktion av bakteriell biomassa i form av HOB och MOB samt mikroalger och makroalger. Valet av MOB och HOB grundades på deras varierade marknadsstatus. MOB har sedan mitten av 90-talet används som tillsats i foder, medan HOB som produkt representerar en mer nyetablerad metod på marknaden. Detta i kombination med att de båda produceras kommersiellt möjliggör en intressant analys. Valet av mikro- och makroalger avgränsades till mikroalgen *Chlorella* samt makroalger i *Ulva*-släktet. Valet motiverades av att de båda återfinns i svenska vatten och att de båda passar i tankodlingar (Ferro m. fl., 2018; Toth och Liljenström, 2023). *Chlorella* och *Ulva*-alger är båda såväl studerade som producerade för olika ändamål och i stor omfattning vilket gör att det också finns en omfattande mängd relevant forskning och information att tillgå (Dolganyuk m. fl., 2020).

Biomassan användes för samtliga produktionsvägar till fiskfoderproduktion. Detta motiverades med att fisk är en relevant och jämförbar slutprodukt för de olika produktionsvägarna, vilket underlättar en rättvis jämförelse. I samband med ett seminarium med fisk- och algodlaren Ola Öberg redogjordes för odling av röding (Ola Öberg, personlig kommunikation, 25 februari 2025). Forskning påvisar att röding trivs i vatten med temperaturen 10-13 °C (Jason Bailey, 2018). Därmed begränsades fiskproduktionen till denna specifika art eftersom det innebar en energieffektivare fiskodling, då vattnet inte kräver uppvärmning.

Studien är avgränsad till avloppsreningsverket Ryaverket i Göteborg. Denna avgränsning motiverades av att Ryaverket är beläget lokalt där studien genomfördes samt att företaget regelbundet publicerar offentliga miljörapporter med information som är relevant för denna studie. Tidsmässigt avgränsades studien till ett års tid eftersom det möjliggör mer användbara resultat på grund av eventuella årstidsvariationer samt att den senast publicerade miljörapporten från reningsverket är baserat på detta tidsspann.

De näringsämnen i avloppsvattent som studien avgränsades till är kväve och fosfor. Även kolföreningar är relevanta för framställning av mikrobiellt protein via bakterier, men är inte ett begränsande ämne för studien. Kväve och fosfor är relevanta näringsämnen eftersom de idag inte tas tillvara på ett effektivt sätt. I studien antogs en fullständig och ideal rening av skadliga ämnen som normalt försvinner vid det kvartära steget i reningsprocessen. Detta skapar i sin tur idealiserade förutsättningar för användandet av näringsämnen och reningsverkets olika resurser.

För att begränsa studiens omfattning gjordes antagandet att mikroorganismer kunde tillgodogöra sig näringsämnena från det ingående avloppsvattnet till Ryaverket. Därför exkluderades energiberäkningar som berörde den nuvarande avloppsreningen. I verkliga tillämpningar behöver reningsprocesserna tas i beaktning eftersom vattnet kan innehålla hälsofarliga föreningar som förhindrar livsmedelsproduktion, men i dagens reningsprocesser avlägsnas även näringsämnen. I ett idealt perspektiv i detta sammanhang bör föroreningar renas bort utan att näringsämnena försvinner, men på grund av studiens omfattning utelämnades detta problem till fortsatta studier.

Produktionsmetoderna i denna studie avgränsades till tankbaserad odling för alger, vilket motiverades av den varierande mängden solljus under ett år i Göteborg. Utomhusodling skulle ha krävt ersättning av solenergi under vinterhalvåret vilket skulle innebära ytterligare tekniska och ekonomiska utmaningar. Vidare motiverades denna avgränsning av strävan att minimera påverkan på ekosystem samt att begränsa användandet av markresurser i städer. Dessutom kan en tankbaserad metod underlätta integreringen av odlingen i anslutning till ett reningsverk eftersom den inte är beroende av externa marina miljöer. Detta möjliggjorde en mer rättvis jämförelse mellan de olika produktionsmetoderna då samtliga produktionskedjor odlades under jämförbara förhållanden. Eftersom bakterier kräver reaktorer för sin odling utgjorde detta en gemensam grund vilket ledde till mer rättvisa och korrekta resultat samt förbättrade jämförelsemöjligheter i diskussionen.

Produktionskedjorna undersöktes enbart utifrån tillverkningskvantitet och energiåtgång i produktionen, vilket innebar att studien helt utelöst ekonomiska aspekter. Även om ekonomiska faktorer som investeringskostnader och livslängd var betydelsefulla för möjligheten att implementera produktionskedjorna i verkligheten, utelämnades det eftersom det möjliggjorde en praktisk förenkling som förtydligade studiens huvudsakliga syfte.

Jämförelsen av produktionernas ytbehov begränsades enbart till odlingsfasen, det vill säga bioreaktorerna och tankarna. Detta innebar att ytbehovet för samtliga tekniska processer inte inkluderades i beräkningarna. Ytbehovet för fiskodlingarna har även de exkluderats från studiens omfattning.

## 2 Biologisk bakgrund

I detta avsnitt presenteras en biologisk översikt för att ge en grundläggande förståelse för de olika organismer som utgör grunden för denna studie.

### 2.1 Alger

Alger är en mångsidig grupp organismer som främst återfinns inom de taxonomiska grupperna växter och bakterier (Nationalencyklopedin, 2025). De är fotosyntetiserande organismer som trivs i fuktiga miljöer och varierar i storlek från mikroskopiskt små till större makroalger. Odlingar av alger kan ha mycket positiva effekter på miljön tack vare deras förmåga att absorbera kväve, fosfor och koldioxid (Toth och Liljenström, 2023) En algodling på en hektar kan binda kväve motsvarande läckaget från en tre gånger större åkermark vilket visar på potentialen att minska övergödningseffekter.

När alger odlas för livsmedelsproduktion blir det därför samtidigt viktigt att förstå riskerna med denna absorberande förmåga. Alger kan ackumulera skadliga nivåer av tungmetaller och läkemedelsrester, vilket har en direkt påverkan på deras användbarhet och säkerhet som livsmedel (Hogstad m. fl., 2023). Vid intervju med Gunilla Toth beskrevs möjligheten att öka kontrollen, minska kontamineringsrisker och säkerställa trygga odlingsförhållanden genom att odla i slutna system, såsom rör och tankar (Gunilla Toth, personlig kommunikation, 11 mars 2025).

Norden har ett mildt klimat på grund av Golfströmmen som värmer upp vattnet och höjer dess temperatur (Cheregi m. fl., 2019). Vattentemperaturen är, tillsammans med ljus, avgörande faktorer för algers tillväxt och dess förmåga att absorbera näringsämnen. Det största problemet med algutveckling i Norden och Sverige är den stora variationen i antal soltimmar mellan vinter och sommarhalvåret.

#### 2.1.1 Makroalger

Makroalger är ett samlingsnamn för de större algarter som är synliga för blotta ögat och som i Sverige ofta kallas för tång (Wulff och Schagerström, 2021). De vanligaste makroalgerna hör till grupperna brunalger, rödalger och grönalger. Till skillnad från landlevande växter och sjögräs har dessa alger inga rötter eftersom de ofta växer på hårda ytor och tillgodosör sig sin näring genom hela plantans yta.

Makroalger är rika på proteiner, omega-3, vitaminer och mineraler och beroende på art och levnadsförhållanden kan de innehålla ca 10 - 30 % protein av sin torrsvikt (Toth och Liljenström, 2023). Både näringsinnehållet och hållbarhetsaspekter gör att makroalger har stor potential som livsmedel. I samband med att alger alltmer accepteras som livsmedel i västvärlden finns det samtidigt en växande efterfrågan på makroalgprodukter. För närvarande täcks efterfrågan främst genom import från Asien, men forskning pågår kring den svenska algodlingsindustrins utvecklingsmöjligheter.

### 2.1.2 Mikroalger

Mikroalger är encelliga organismer som inte kan ses med blotta ögat (Sveriges Radio, 2011). Mikroalger kan odlas i kontrollerade miljöer som tankar och dammar och trivs bra så länge deras grundläggande behov av vatten, ljus och näring uppfylls. Denna egenskap möjliggör att produktionen av mikroalger är flexibel och mycket anpassningsbar, beroende på omgivning.

Förhållandet mellan näringsämnen varierar kraftigt mellan olika arter av mikroalger, men de har ofta ett högt proteininnehåll jämfört med andra livsmedelsgrödor (Torres-Tiji m. fl., 2020). Ätbara mikroalger, som till exempel *Chlorella*, har i genomsnitt en proteinhalt runt 40 %, vilket kan ställas i relation till 38 % för sojabönor samt 13 % för ägg. De innehåller dessutom andra viktiga näringsämnen till exempel lipider, vitaminer och mineraler, vilka alla är viktiga för att tillgodose såväl människors som djurs näringsbehov.

Mikroalger har flera användningsområden inom olika industrier, inte bara inom livsmedelsindustrin, utan även inom energi- och bränsleindustrin, där de till exempel används för framställning av biodiesel (Lam och K. T. Lee, 2014). Tack vare sitt rika näringsinnehåll används *Chlorella* som ett renodlat livsmedel men även som kosttillskott (Chen m. fl., 2022). Dessutom kan deras höga halter av antioxidanter bidra till att förlänga hållbarheten hos livsmedel, och deras naturliga pigment kan användas för att framställa färgämnen i olika nyanser, såsom grönt, gult, rött och blått.

## 2.2 Bakterier

HOB och MOB kan användas för att producera mikrobiellt protein, även kallat encelligt protein, vilket kan användas både som foder för djur och som livsmedel för människor (Leger m. fl., 2021). Bakterierna kräver inget solljus och kan därför odlas i slutna bioreaktorer vilka i sin tur inte kräver tillgång till odlingsbar mark. Detta möjliggör en betydligt högre potentiell produktion per ytenhet jämfört med landbaserade grödor, eftersom biomassan odlas i volym (det vill säga även på höjden) snarare än att vara begränsat av markyta (Linder, 2019). Linder visar till exempel i en studie från 2019 att den potentiella proteinproduktionen per hektar för mikrobiellt protein kan vara omkring miljoner gånger högre än för sojabönor.

För att generera biomassa kräver bakterierna bland annat någon form av kolkälla, kväve och fosfor (Lubsch och Lansbergen, 2020). Dessutom behöver de tillgång till syre, eftersom proteininnehåll och biomassaproduktion annars blir lägre (Leger m. fl., 2021). Både HOB och MOB kan framställas med hjälp av förnybart producerade råmaterial såsom metan ( $\text{CH}_4$ ), vätgas ( $\text{H}_2$ ), koldioxid ( $\text{CO}_2$ ) och ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) från exempelvis biogasanläggningar eller genom elektrolys. De är båda effektiva i sin omsättning av resurser vilket visas i en studie från 2021 där Verbeeck m. fl. undersöker foderproduktion genom HOB och MOB via resurser från en anaerob röt-kammare (Verbeeck m. fl., 2021). Mikrobiellt protein har ett markant lägre vattenfotavtryck (20–140 gånger) och betydligt lägre markanvändning (>100 gånger) jämfört med konventionella proteinprodukter som soja- och fiskmjöl.

En ytterligare fördel med mikrobiell proteinproduktion är att produktion av råmaterial och energi kan separeras geografiskt från själva bioreaktorn vilket ökar värdekedjans

resiliens och flexibilitet (Linder, 2019). Både HOB och MOB bidrar till att öka värdet på de gaser ( $\text{CO}_2$  och  $\text{CH}_4$ ) och näringsämnen (framför allt  $\text{NH}_3$ ) som genereras och hanteras i en anaerob rötningsanläggning (Verbeeck m. fl., 2021), exempelvis vid ett vattenreningsverk. Försäljningsvärdet på återvunnet kväve kan bli över 16 gånger högre om det omvandlas till mikrobiellt protein i stället för till exempel ammoniumsulfat – en vanlig form av konstgödsel.

### 2.2.1 MOB

MOB använder  $\text{CH}_4$  som både kolkälla och energikälla, vilket innebär att de inte kräver en separat elektrondonator såsom  $\text{H}_2$  – till skillnad från HOB (Verbeeck m. fl., 2021). Detta förenklar processen och minskar behovet av externa energikrävande insatsvaror.  $\text{CH}_4$  finns bland annat i biogas, som vanligtvis används som bränsle, men har ett förhållandevis lågt energivärde jämfört med andra alternativ. Genom att omvandla det till mikrobiellt protein kan biogas i stället bli del av en mer värdefull och hållbar värdekedja. Utöver  $\text{CH}_4$  krävs även  $\text{O}_2$ ,  $\text{NH}_3$  som kvävekälla samt spårämnen och mineraler för att producera ett högvärdigt protein.

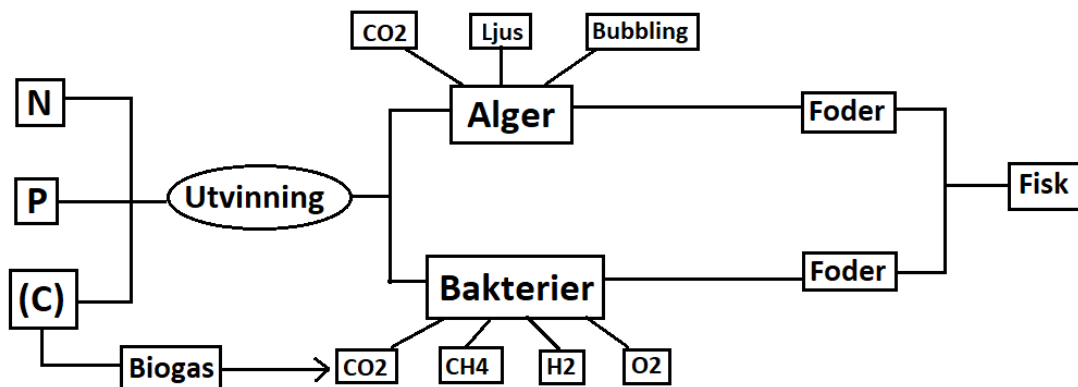
Biomassa av MOB innehåller omkring 60 % råprotein, och proteinkvaliteten är jämförbar med fiskmjöl och generellt högre än hos sojamjöl (Verbeeck m. fl., 2021). Tekniken är väletablerad och redan 1995 godkände EU användning av bakteriellt enkelcellsprotein baserat på biometan som djurfoder. Då angavs en maximal inblandning på 8 % för däggdjur och 33 % för lax, men andelar upp till 50 % har senare visat sig ge hälsofördelar hos djur, särskilt inom akvakultur. Två exempel på etablerade företag som producerar mikrobiellt protein från metan är Calysta och UniBio A/S.

### 2.2.2 HOB

HOB är så kallade kemoautotrofa bakterier vilket innebär att de använder kemisk energi för att assimilera  $\text{CO}_2$  (Linder, 2019). HOB får sin kemiska energi genom att använda  $\text{H}_2$  som elektrondonator samt  $\text{O}_2$  som elektronacceptor (Verbeeck m. fl., 2021). Till skillnad från MOB kräver HOB därmed en separat, extern energibärare i form av  $\text{H}_2$  för att driva sin metabolism.  $\text{CO}_2$  kan infångas från punktkällor, exempelvis vid uppgradering av biogas till biometan, vid förbränning av biogas eller genom så kallad Direct Air Capture (DAC), koldioxidinfångning ur luft.  $\text{H}_2$  och  $\text{O}_2$  kan produceras via elektrolys av vatten, men även genom reformering av biogas. Vid reformering krävs dock en separat källa till  $\text{O}_2$ . Produktionen av HOB är i högre grad beroende av tillgång till billig, förnybar energi eftersom insatsvarorna – särskilt  $\text{H}_2$  – är energikrävande att framställa. Detta innebär att lönsamheten jämfört med MOB är mer känslig för energipriser och tekniska förutsättningar. HOB är, jämfört med MOB, i mindre utsträckning etablerat som foder- och livsmedelstillsats på marknaden. Den har tidigare omnämnts som en möjlig, cirkulär livsmedelsproduktionsväg för rymdresor, men 2021 annonserade det finska företaget Solar foods att en HOB-produkt skulle lanseras på marknaden (Linder, 2019). I maj 2023 blev Singapore världens första marknad att acceptera Solar Foods HOB-produkt Solein<sup>®</sup> och i september 2024 bör noterades Solar Foods (Henrik Öhlin, 2024; Shilei Zhang, 2023).

## 2.3 Systemkarta

Figur 1 visar en sammanfattande översikt för vilka resurser som behövs för alger respektive bakterier enligt avsnitt 2.1 och 2.2. Som bilden visar är det kväve (N), fosfor (P) och kol (C) som är de näringsämnen som tillförs genom och utvinns ur avloppsvattnet. Kolet, i form av slam, kan omvandlas till biogas genom anaerob rötning. Biogasen består av koldioxid ( $\text{CO}_2$ ) och metan ( $\text{CH}_4$ ) (Karl-Emil Videbris, 2023), vilka i sin tur kan användas som råvara vid produktion av mikrobiellt protein. Alger behöver utöver N och P en kolkälla, vilken tas upp i form av  $\text{CO}_2$  ur vattnet. De behöver också tillgång till ljus, antingen i form av naturligt solljus eller tillförs genom lampor. Bubbling är avgörande för en gynnsam odling (You m. fl., 2024). Bakterier behöver generellt sett extra  $\text{O}_2$  och, beroende på bakterietyp, även  $\text{CO}_2$  och  $\text{H}_2$  eller  $\text{CH}_4$ . Alger och bakterier kan slutligen användas för att producera foder till fisk.



Figur 1: En översiktlig bild över de vägar som studerats för att producera fisk, samt vilka resurser alger respektive bakterier behöver.

## 3 Metod

Studien inleddes med sammanställning av relevant data och information inom ramen för projektets avgränsningar. Denna process gav värden för beräkningar samt en övergripande förståelse för de biologiska, kemiska och tekniska processer, som ligger till grund för studien. Datainsamlingen innefattade även intervjuer med experter och forskare för att få en djupare och mer aktuell förståelse av fältet.

När relevanta processer och tekniker valts ut inleddes en dimensioneringsprocess för att utveckla olika processkedjor där avloppsvatten används för att producera fisk. Under dimensioneringen valdes de tekniker som ansågs mest passande utifrån avloppsvattnets specifika egenskaper och de fyra huvudsakliga biologiska produktionsvägarna: makroalger, mikroalger, MOB samt HOB. För att kunna göra realistiska antaganden vidareutvecklades därefter de olika processkedjorna genom en iterativ process i samråd med handledare och utifrån den insamlade datan.

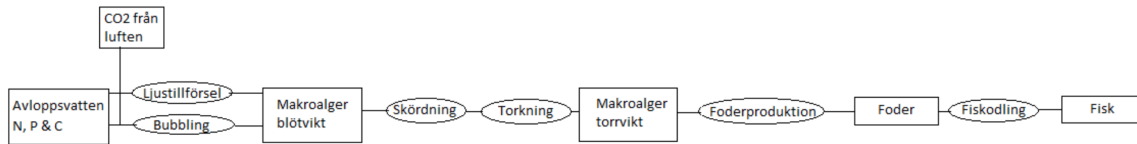
Den teoretiska mängden fisk (i kg) som skulle kunna produceras genom de olika produktionsvägarna beräknades och energiförbrukningen för varje delprocess uppskattades. För att ge en mer rättvisande uppskattning av hur mycket fisk som faktiskt har producerats med hjälp av makroalger, mikroalger, MOB respektive HOB har den totala fiskproduktionen justerats proportionellt. Efter att beräkningar genomfördes för de fyra produktionskedjorna jämfördes och analyserades deras energieffektivitet i förhållande till den producerade fiskmängden. Slutligen sammanställdes resultatet i tabeller och diagram för att identifiera de minst energikrävande delprocesserna och möjliggöra jämförelse mellan alternativen. Markanvändning för respektive produktionsväg inkluderades också som en aspekt i denna studie.

Programvaran Excel har använts som verktyg och hjälpmedel för beräkningar och datahantering. Hjälpmedlet openAI har använts som ett verktyg begränsat till språklig förbättring och korrekturläsning.

För de fyra produktionsvägarna makroalger, mikroalger, MOB och HOB analyserades flera tillvägagångssätt för användning av HOB men även en möjlighet att kombinera MOB och HOB. Nedan presenteras samtliga scenarion som undersökts i studien medan redovisning i resultat begränsats till de mest energieffektiva produktionsvägarna. Tydligare förklaring av förkortningar och innebörd av processer återfinns i avsnitt 4. För att följa produktionsvägarna i detalj, se bilaga 1.

### **Scenario 1, makroalger**

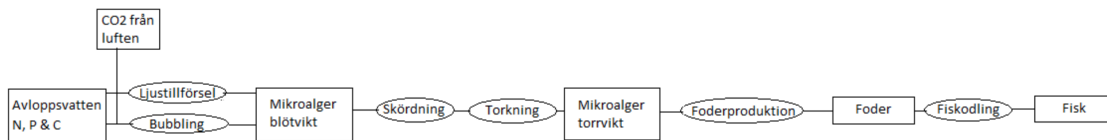
I scenario 1, i figur 2 nedan undersöks fiskfoderproduktion genom makroalger, vilka odlas i tankar direkt i det renade avloppsvattnet. Tankarna bubblas och ljus tillförs genom lampor. Algerna torkas därefter innan de används som tillsats i fiskfoder.



Figur 2: Scenario 1 - Visar stegen som genomförs från makroalger till fisk.

### Scenario 2, mikroalger

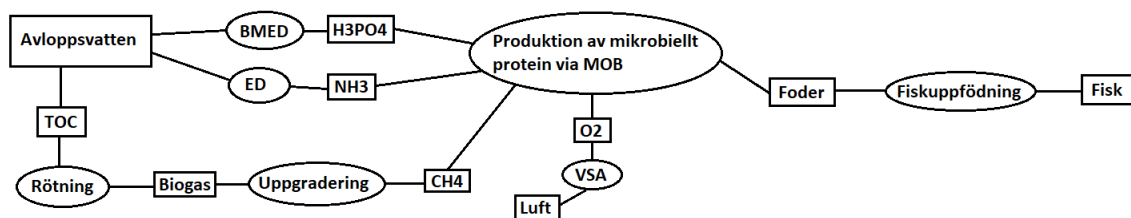
Scenario 2 i figur 3 visar produktion av mikroalger. De odlas i allt väsentligt på samma sätt som makroalger, i tankar direkt i det reade avloppsvattnet innan de torkas och bearbetas för inblandning i fiskfoder.



Figur 3: Scenario 2 - Visar stegen som genomförs från mikroalger till fisk.

### Scenario 3, MOB

Figur 4 (scenario 3) visar produktionsväg för fiskfoder genom MOB-produktion. Näringsämnen utvinns ur avloppsvattnet och metan från biogas används som både kol- och energikälla för bakterierna. Tanken bubblas med syrgas. Biomassan centrifugeras och torkas innan den används som tillsats i fiskfoder.

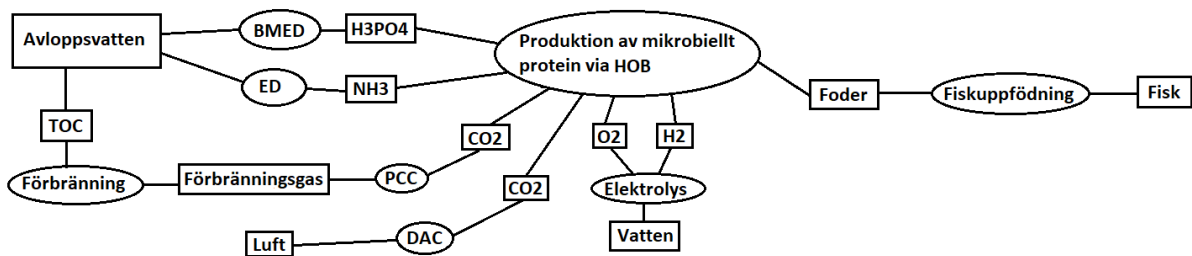


Figur 4: Scenario 3 - Visar stegen som genomförs från MOB till fisk där bakterierna förses med metan från uppgraderad biogas och syrgas via VSA-teknik.

### Scenario 4, HOB

Scenario 4 i figur 5 nedan (scenario 3) visas processen för fiskfoderproduktion genom

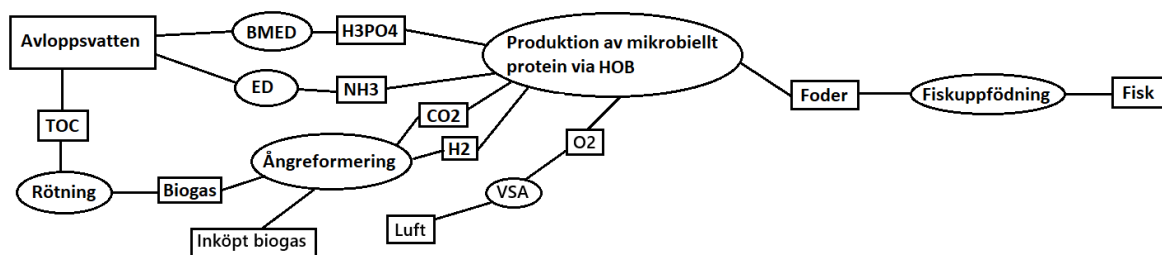
HOB-bakterier. Näringsämnen utvinns ur avloppsvattnet och koldioxid tillförs bakterierna genom förbränning av allt organiskt material från reningsverket. Resterande koldioxid tillförs genom infångning från luft genom DAC (Direct Air Capture). Vätgas tillförs genom elektrolys, vilket även genererar det syre som tanken bubblas med. Biomassan centrifugeras och torkas innan den används som tillsats i fiskfoder.



Figur 5: Scenario 4 - Visar stegen som genomförs från HOB till fisk där bakterierna förses med koldioxid från förbränt kol via PCC-teknik och från luft via DAC-teknik, samt syrgas och vätgas via elektrolys.

### Scenario 5, HOB

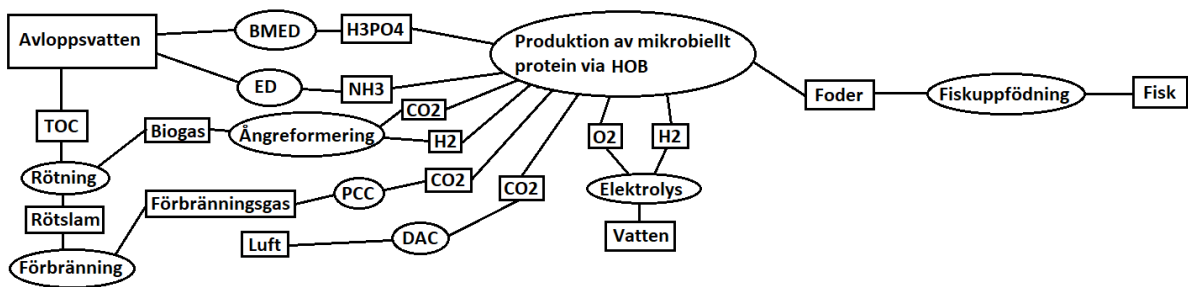
Figur 6 (scenario 5) visar en alternativ processkedja för framställning av fiskoder från HOB. Biogasen kompletteras här med inköpt biogas och används istället för att framställa vätgas och koldioxid. I övrigt är processen likadan som i scenario 4 (figur 5).



Figur 6: Scenario 5 - Visar stegen som genomförs från HOB till fisk där bakterierna förses med koldioxid och vätgas från ångreformerad biogas (både från Ryaverket och inköpt) samt syrgas via VSA-teknik.

### Scenario 6, HOB

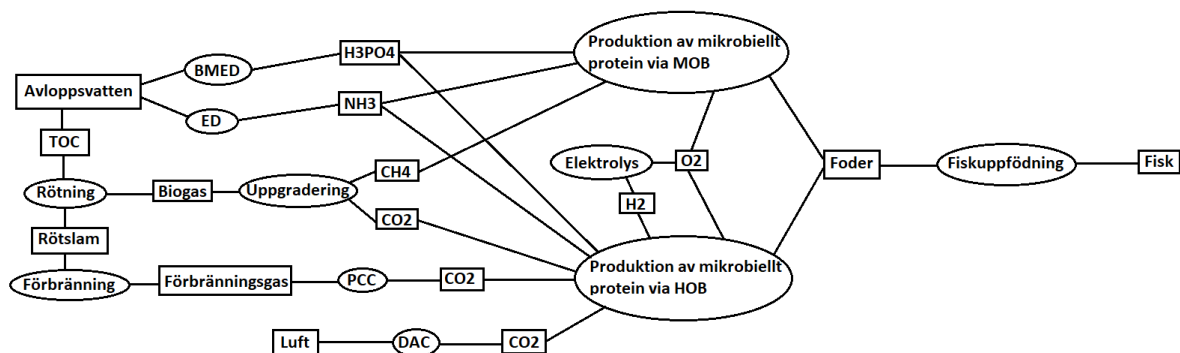
I scenario 6 (figur 7) kombineras processlösningarna i scenario 4 och 5.



Figur 7: Scenario 6 - Visar stegen som genomförs från HOB till fisk där bakterierna förses med koldioxid från ångreformerad biogas, förbränt röt slam via PCC-teknik och från omgivande luft via DAC-teknik. Syrgas- och vätgasförsörjningen sker via elektrolys, men vätgas kommer också från ångreforming.

### Scenario 7, MOB och HOB

I scenario 7 (figur 8) kombineras processlösningarna i scenario 3, 4 och 5.



Figur 8: Scenario 7 - Visar stegen som genomförs från MOB och HOB till fisk. Försörjningen av vätgas och syrgas sker via elektrolys. Uppgraderad biogas förses MOB med metan och HOB med koldioxid. Koldioxid produceras även från förbränt röt slam via PCC-teknik och omgivande luft via DAC-teknik.

## 4 Teori & teknisk dimensionering

I detta avsnitt presenteras teorin som ligger till grund för denna studie. I slutet av varje delavsnitt redovisas antaganden och information som utgör den tekniska dimensioneringen.

### 4.1 Ryaverket indata

Ryaverket är ett stort avloppsreningsverk med tillstånd att ta emot 1 850 000 personekvivalenter. (Karl-Emil Videbris, 2023). Vid årsskiftet 2023 var 825 000 personer anslutna till reningsverket.

#### 4.1.1 Ingående N-, P- och C

TOC, N-tot och P-tot är den totala massan kol-, kväve- och fosforatomer i avloppsvattnet, oberoende av vilken kemisk förening de är i (Karl-Emil Videbris, 2023). De värden som används utgår från årsmedelvärden rapporterade i Gryaabs miljörapport från 2023. Följande data i tabell 1 ligger till grund för dimensionering och teknisk uppskattning i de olika produktionsvägarna:

*Tabell 1: Värden på ingående TOC, kväve och fosfor från Ryaverket 2023. TOC, N-tot och P-tot är den totala massan kol-, kväve- respektive fosforatomer i avloppsvattnet, oberoende vilken kemisk förening de ingår i.*

TOC	14 896 ton/år
N-tot	3852 ton/år
P-tot	487 ton/år

Detta innebär att det ingående avloppsvattnet till Ryaverket har ett ungefärligt molförhållande mellan kol, kväve och fosfor på 79:17:1 (Karl-Emil Videbris, 2023).

#### 4.1.2 Vattentemperatur

Vattentemperaturen för det ingående avloppsvattnet uppskattas vara mellan 13–17 °C vilket innebär ett medelvärde på 14,8 °C (Ann Lyngå, 1989). Denna temperatur har använts som medelvärde för ingående vattentemperatur för både algodling och fiskproduktion. Vattnets temperatur är av särskild relevans vid beräkning av energiåtgång för produktion av såväl alger som fisk.

#### Teknisk dimensionering

En genomsnittlig vattentemperatur på 14,8 °C för det ingående avloppsvattnet antas för att minimera energiförbrukning. I delavsnitten nedan motiveras varför temperaturen passar både makro- och mikroalgers tillväxt.

*Tabell 2: Antagen vattentemperatur.*

Vattentemperatur	14.8 °C
------------------	---------

### 4.1.3 Biogasproduktion och tillgängligt kol

Ryaverkets biogasanläggning består av tre rötkammare med en total volym på 15 660  $m^3$  (Karl-Emil Videbris, 2023). Under 2023 producerades 11 681 233  $Nm^3$  biogas, vilket motsvarar 13 465 ton. Idag säljs biogasen till Göteborg Energi där den uppgraderas till fordons-gaskvalitet. Gasen kan även eldas för direkt energiutvinning vid kapacitets- eller driftproblem på Ryaverket eller Göteborg Energis anläggning. Gasen består av cirka 65 %  $CH_4$  och 35 %  $CO_2$ . Enligt Dag Lorick från Ryaverket utgörs energiåtgången för rötkammarna av elektricitet och fjärrvärme där fjärrvärmens utgjorde 8,49 GWh och elektriciteten 1,47 GWh år 2023 (Lorick, personlig kommunikation, 2 april 2025), vilket resulterade i en total energiförbrukning på 9,96 GWh.

#### Teknisk dimensionering

Med en årlig energiåtgång av rötkammarna på 9,96 GWh och en produktion av biogas på 13 465 ton blir energiåtgången 2,66 MJ/kg biogas. Utifrån uppskattningen att biogasen består av 35 %  $CO_2$  och 65 %  $CH_4$  utgör mängden biogas cirka 40 % av inkommande TOC till Ryaverket. Detta resulterar i ett referensvärde på 6248 ton TOC. I samråd med Oskar Modin, professor inom vatten- och miljöteknik på Chalmers, har ett antagande om 50 % TOC i form av rötslam gjorts, det vill säga 7448 ton (Modin, personlig kommunikation, 27 mars 2025).

*Tabell 3: Energiåtgång för rötning på Ryaverket och mängd TOC som förekommer i form av biogas respektive rötslam.*

Energiförbrukning rötning	2.66 MJ/kg biogas
Total mängd biogas	13 465 ton
Mängd TOC i form av biogas	6258 ton
Mängd TOC i form av rötslam	7448 ton

### 4.1.4 Biogasproduktion och tillgängligt kol utan denitrifikation

Om denitrifikationsprocessen för omvandling av ingående kväve till kvävgas helt uteblir, skulle den mängd organiskt kol som ursprungligen förbrukas vid denitrifikationsprocessen potentiellt kunna tillföras rötningsprocessen istället och därmed bidra till ökad biogasproduktion. I mailkorrespondens med Dag Lorick, utvecklingsingenjör på Ryaverket, framgår det att denitrifikation både sker i Aktiv Slam-anläggningen och i den så kallade efterdenitrifikationsanläggningen. I Aktiv Slam-anläggningen utnyttjas det organiska materialet som finns i det inkommande avloppsvattnet. Efterdenitrifikationen kräver däremot tillsats av metanol som extern kolkälla, på grund av den låga halten organiskt material efter föregående reningssteg (Ryaverket, personlig kommunikation, 2 april 2025). De exakta mängderna kol som används i aktiv slam-anläggningen för denitrifikation, respektive vad som försvinner i andra processer är svårt att veta enligt Lorick, men en god uppskattning är att det går åt ungefär lika mycket kol i aktiv slam-anläggningen som vid efterdenitrifikationen. Under de senaste fem åren har i genomsnitt 2 278 ton metanol, motsvarande 3 442 ton COD (chemical oxygen demand), tillsatts årligen för att denitrifiera omkring 2 039 ton kväve, vilket innebär en genomsnittlig förbrukning på 1,7 ton COD per ton denitrifierat kväve.

Mängden kväve som denitrifierats i Aktiv Slam-delen under samma tidsperiod uppgår till i genomsnitt 1 261 ton per år. Baserat på antagandet att samma mängd COD förbrukas per ton denitrifierat kväve i Aktiv Slam som i efterdenitrifikationen, kan kolförbrukningen för denna process uppskattas till cirka 2 143 ton COD per år. Den totala kolförbrukningen för denitrifikation på Ryaverket uppgår därmed till cirka 5 585 ton COD per år, vilket motsvarar ungefär 1 470 ton TOC per år vid ett medelvärde för COD/TOC på 3,8 i inkommande vatten.

Det bör noteras att endast 564 av totalt 1 470 ton extra TOC faktiskt finns i det ingående avloppsvattnet. Resterande 906 ton tillförs idag som metanol och finns alltså inte i form av tillgängligt TOC. 1 470 ton extra TOC/år anses dock vara en rimlig uppskattning för den potentiellt tillgängliga extra mängden kol för ett generellt reningsverk (Lorick, personlig kommunikation, 2 april 2025).

### **Teknisk dimensionering:**

Med ett antagande om 1 470 ton TOC som inte skulle gå åt till denitrifikation, kan denna mängd i stället utgöra substrat för biogasproduktion. Detta innebär detta ett potentiellt tillskott på cirka 23,5 % jämfört med det tidigare antagna värdet på 13 465 ton biogas.

*Tabell 4: Biogasproduktion och tillgängligt kol utan denitrifikation.*

Extra TOC, exklusive denitrifikation	1 470 ton
Total mängd TOC, exklusive denitrifikation	16 366 ton
Total mängd biogas, exklusive denitrifikation	16 626 ton
Mängd TOC i form av biogas	7 726 ton

## **4.2 Alger**

Att odla alger i tankar innebär möjlighet att skapa stabila odlingsförhållanden (Toth, 2025). Vid utomhusodling kan algers tillväxtcykel störas av till exempel för långa fotoperioder och höga temperaturer. Dessutom är vattnets renhet i havsmiljöer svårare att kontrollera. Att odla alger på land kräver å andra sidan en ytkrävande infrastruktur, vilken behöver utvecklas och optimeras för att möjliggöra storskalig produktion.

En förutsättning för inomhusodling av alger är att ljus tillförs med hjälp av artificiella ljuskällor (Toth, 2025). Vid val av ljuskälla är det ofta energieffektivitet i förhållande till pris som avgör, men ett fullt spektrum av våglängder som är justerbart vad gäller rött och blått ljus är fördelaktigt. Enligt en studie gav en 18 W TL5 lysrörslampa den högsta tillväxthastigheten vid jämförelse av olika ljusintensiteter (Yeh m. fl., 2010). Detta resultat gäller specifikt för inomhusodling av mikroalger, där denna typ av belysning visat sig vara särskilt effektiv. I en intervju med biologen Jonathan Roques, tydliggjordes det att ett lysrör mycket väl räcker för att belysa 1 m<sup>2</sup> tank (Jonathan Roques, personlig kommunikation, 3 april 2025).

Vid odling av alger i slutna miljöer pumpas vanligtvis bubblor av koldioxid in i tankarna (You m. fl., 2024). Storleken på bubblorna påverkar algerna på olika sätt och bör

därmed väljas utefter vad algerna ska användas till. Forskning visar att mikro- och nanobubblor på grund av dess storlek stannar kvar längre i vattnet än större bubblor, vilket leder till att algerna får längre tid till att ta upp koldioxiden. Tillgången till koldioxiden kommer att effektivisera fotosyntesen och förbättra deras tillväxt. Bubblorna leder även till en omrörning i tanken vilket hindrar alger från att sitta fast på samma ställe och fastna i varandra. Det leder även till en bättre fördelning av näringsämnen. Bubbling bidrar även till omrörning, vilket gör att algerna exponeras jämnare för ljuskällan. I en studie där en membranbaserad bubbelgenerator undersöktes för att hitta den högsta energieffektiviteten för syreupplösning i vattnen var den effektivaste luftflödes hastigheten 4,87 L/min (Mohd Rasdi m. fl., 2022).

För att öka hållbarheten hos skördade alger behövs vattenhalten reduceras genom torkning (Uribe m. fl., 2019). Forskning har visat att den effektivaste metoden för att torka gröna makroalger är konvektionstorkning eftersom den bevarar algernas fysikalisk-kemiska egenskaper. Torkning vid 70 °C under 120 minuter har visat sig ge optimala resultat.

Den ursprungliga fukthalten i våta alger varierar vanligtvis mellan 70 – 90 % av deras vikt (Aziz m. fl., 2013). Genom torkning koncentreras biomassan, vilket resulterar i ett högre kalorivärde. Att torka alger nära odlingsplatsen samt minska deras volym bidrar dessutom till lägre transportkostnader. Mikroalger har en medelfukthalt på 80 % av dess totala vikt (Hosseinizand m. fl., 2018). Eftersom båda algsorterna har en hög fukthalt blir torkningen en mycket energikrävande process.

Vid torkning av makroalger med termiska metoder uppgår energiförbrukningen till cirka 3556 kJ/kg borttaget vatten. (Sander och Murthy, 2010).

### **Teknisk dimensionering**

Fukthalten antas vara 80 % för både mikro- och makroalger. Mikro- och makroalger antas torkas med samma metod och får därmed samma energiförbrukning i detta steg. Energiförbrukningen för att torka båda typer av alger antas också vara samma och sätts till 3556 kJ/kg, vilket är ett uppmätt värde för makroalger. Vanligtvis bubblas alger med koldioxid men för denna studie antas bubbling med luft eftersom alger ej behöver tillskott av koldioxid då de antas kunna binda tillräckligt från luften. Värdet 4,87 L/min används för luftflödes hastighet på bubbling då det antas vara relevant på grund av energieffektiviteten, även om syftet snarare är att cirkulera alger än att effektivt lösa syre. För att vidare se hur detta värde använts för att beräkna energiåtgång för bubbling, se bilaga 1. Ett 18 W TL5 lysrör antas vara effektivt för både mikro och makroalger och väljs som ljuskälla. Det antas räcka med ett lysrör per tank på 1 m<sup>2</sup>.

Alger antas kunna ta upp kväve och fosfor direkt från renat avloppsvatten, då de lever i vattenmiljöer. Därför inkluderas ingen energiförbrukning för utvinning av dessa näringsämnen i energiberäkningar för alger. Det förmodas dessutom att maximal mängd av kvävet och fosfor tas upp av algerna, vilket innebär att inga förluster sker i detta steg eftersom vattnet antas kunna recirkulera. Sammanställning av den tekniska dimensioneringen som gäller både mikro- och makroalger visas i tabell 5 nedan.

Tabell 5: Antaganden som gäller både mikro- och makroalger.

Fukthalt Alger	80 %
Energiförbrukning torkning av samtliga alger	3556 kJ/kg
Bubbling	4.87 L/min
Upptag av N och P	100 %
Lampa	TL5 18W lysrör

#### 4.2.1 Makroalger

Makroalgers egenskaper och användningsområden varierar beroende på art. En art som lämpar sig väl för tankodling är havssallat, *Ulva fenestrata* (Toth och Liljenström, 2023). När den odlas i näringsrikt processvatten kan proteinhalten öka uppemot 30 %. Havssallat är en grönalga som växer antingen fastsittande på stenar eller fritt flytande i lugna vatten (Naturhistoriska riksmuseet, 2025). Den kännetecknas av sina relativt stora, salladsliknande gröna blad och trivs på ett djup av cirka 1 - 2 meter under vattenytan i både salt och bräckt vatten. Tack vare sitt innehåll av värdefulla biokemiska föreningar som proteiner och fettsyror anses arten vara en lovande resurs som livsmedel för både människor och djur (Steinhagen, 2021).

Storskalig tankodling av makroalger kräver ett flertal separata tankenheter (Toth, 2025). En volym omkring 1 m<sup>3</sup> per tankenhet anses vara fördelaktig. Även om större tankar kan användas är det generellt mer effektivt att arbeta med flera mindre enheter. Detta möjliggör bättre kontroll över odlingsförhållanden och minskar risken för att sjukdomar sprids och påverkar hela odlingen.

Vid studier av ljusets inverkan på makroalgers tillväxt visade det sig att tillväxthastigheten hos *Ulva lactuca* mätades vid en fotoperiod på mer än 16 timmars ljus per dygn (Fortes och Lfning, 1980). Grönalger har generellt ett högt ljusbehov och förekommer därför ofta i grunda vatten (Toth, 2025). Den optimala fotoperioden för att maximera dygnstillväxten ligger vanligtvis runt 16 timmar ljus följt av 8 timmar mörker.

När *Ulva lactuca* studerades tillsammans med andra vanliga algararter i Nordsjön identifierades ett optimalt temperaturintervall på 10 - 15 °C (Fortes och Lfning, 1980).

För att bevara odlingens produktivitet och en optimal täthet är det viktigt att algerna skördas regelbundet (Dinesh Kumar m. fl., 2024). Underhåll kräver kvalificerad arbetskraft som ansvarar för skötsel av utrustning, skörd av alger samt byte av vattnet. Enligt Jonathan Roques är det vanligt att skörda havssallat med håv när den odlas i tankar (Jonathan Roques, personlig kommunikation, 3 april 2025). Hur ofta algerna behöver skördas beror på tillväxthastigheten.

Maximal tillväxthastighet för *Ulva lactuca* i kväverika vatten varierar mellan 16,4 ± 0,18 % per dag och 9,4 ± 0,72 % per dag beroende på kvävekällan (Ale m. fl., 2011). I en studie av Prashant Savvashe m. fl. har olika odlingstillstånd för makroalger analyserats för en ökad produktion (Savvashe m. fl., 2021). Enligt studien kan makroalgen *Ulva* odlas upp emot 77,9 - 90,7 g torrsvikt /m<sup>2</sup>/dag i en 1000 L tank med bubbling utan koldioxid,

beroende på säsong.

Innehållet av kol, kväve och fosfor varierar mellan olika makroalgsarter, men näringsbehovet följer generellt storleksordningen kol > kväve > fosfor (Lubsch och Lansbergen, 2020). Däremot är det oftare kväve eller fosfor som begränsar tillväxten eftersom kol är mer lättillgängligt. I en studie där 92 makroalgsarter analyserades för att fastställa det genomsnittliga atomförhållandet mellan dessa näringsämnen identifierades det till 550C:30N:1P. Kolhalten som gav högst bioenergipotential vid en studie av grönalgen *Oedogonium* fastställdes vara 35 % (Lawton m. fl., 2013). En annan studie av *Ulva lactuca* visade ett medelvärde för kolhalten på 29,4 % (Bruhn m. fl., 2011).

### Teknisk dimensionering

Dimensionerande tankvolym sätts till 2 m<sup>3</sup> baserat på algernas växt djup och för att minimera ytbehovet. Fotoperioden blir enligt källan ovan 16 timmar ljus följt av 8 timmar mörker. Makroalgerna antas växa 14 % per dag vilket betyder att de behöver skördas ungefär var sjunde dag. För massväxthastigheten antas det högre värdet på 90,7 g torr vikt/m<sup>2</sup>/dag. Eftersom skördningen sker mekaniskt är det svårt att uppskatta energiåtgången. Ett antagande har därför gjorts att det är samma energiåtgång som för skördning av mikroalger, se tabell 7. Atomförhållandet sätts till 550C:30N:1P och kolhalten väljs till 35 %. Sammanställning av den tekniska dimensioneringen för makroalger visas i tabell 6 nedan.

Tabell 6: Antaganden för makroalger.

Tankvolym	1x1x2 m <sup>3</sup>
Fotoperiod	16 h ljus följt av 8 h mörker
Skördning	Var 7:e dag, mekanisk, Energibehov: svåruppskattat
Massväxthastighet	90,7 g/m <sup>2</sup> /dag torr vikt
Atomförhållande C:N:P	550:30:1
Kolhalt	35 %

### 4.2.2 Mikroalger

*Chlorella*-släktet tillhör de gröna mikroalgerna och har förmåga att producera biomassa med stora mängder lipider och höga proteinhalter (Noori och Vahdat, 2023). På grund av dess näringsammansättning har *Chlorella* potential som ingrediens i fiskfoder. Släktet uppvisar en hög tillväxthastighet och kan under optimala förhållanden fördubblas på några timmar (Ahmad m. fl., 2018). Denna egenskap är särskilt fördelaktig vid produktionssyfte eftersom en stor mängd kan produceras på kort tid.

Mikroalgerna inom *Chlorella*-släktet är robusta och har förmåga att växa under varierande miljöförhållanden (Aly m. fl., 2023). Dessa alger räknas som sötvattensalger men på grund av dess tålighet kan de även odlas i saltvatten.

Lorenza Ferro och hennes forskningsgrupp har tillsammans tagit fram resultat som visar att *Chlorella vulgaris*, en av arterna inom släktet, uppnår högre växthastighet vid

längre ljusexponering (Ferro m. fl., 2018). Vattentemperaturen påverkar också tillväxthastigheten. Under samma ljusförhållanden kommer mikroalgerna växa snabbare i varmare vatten än i kallt. *Chlorella* visar på optimal tillväxttakt om den exponeras för ljus dygnet runt (Fakhri m. fl., 2021). Kontinuerligt ljus leder, förutom till ökad celltillväxt och därmed ökad biomassa, även till ett förbättrat upptag av näringsämnen som kväve och fosfor.

För *Chlorella*-släktet ger temperaturer mellan 25–35 °C en optimal tillväxt (Aly m. fl., 2023). Vid temperaturer utanför detta intervall, både högre och lägre, minskar produktiviteten och tillväxthastigheten, vilket innebär att ljusexponeringen blir den avgörande faktorn för odling av *Chlorella*-alger. Ferro förtydligar i rapporten att en sänkning med 10 °C från optimala förhållanden leder till en försämrad celledelning hos algerna med 50 %.

Enligt Choi används Redfield ratio ofta av biologer som en god genomsnittlig uppskattning av mikroalgernas sammansättning (Choi och S. M. Lee, 2014). Redfield ration innebär ett förhållande mellan C:N:P på 106:16:1. Torrvikten av mikroalger består till 50 % av kol (Souza m. fl., 2024). Detta massförhållande har använts som utgångspunkt för dimensioneringen av massförhållanden mellan kol, kväve och fosfor i mikroalgernas sammansättning.

För att behålla en jämn och konsekvent odling behöver mikroalger skördas regelbundet. Forskning av Man Kee Lam visar att tillväxten av *Chlorella vulgaris* når en stationär tillväxt efter 21 dagar för en inomhusodling i en 100 L tank (Lam och K. T. Lee, 2014). Valet av metod för skördning av alger beror på vilken slutprodukt som önskas (Barros m. fl., 2014). Skördningsmetoderna delas upp i två olika kategorier - en förtjockande och en avvattande. De förtjockade metoderna är koagulation och flockulering (både biologiska och kemiska) samt sedimentering. De avvattande metoderna som används är filtrering och centrifugering. Centrifugering har bevisats vara skalbara till industriellt bruk, men har en hög energiåtgång på 3-6 kWh/m<sup>3</sup> (Zhu m. fl., 2024).

Enligt Man Kee Lam och Keat Teong Lee har mikroalger en låg masstillväxthastighet i jämförelse med makroalger (Lam och K. T. Lee, 2014). I deras studie ligger tillväxten för mikroalgen *Chlorella* mellan 0,10 - 0,25 mg/L/dag och det beskrivs att odlingar inomhus oftast ligger närmare 0,25 mg/L/dag. I en annan studie av Juan Pablo Díaz bestämdes tillväxtförmågan hos *Chlorella* till 0,37 g/L/dag vilket är ett betydligt högre än ovan nämnda studie (Díaz m. fl., 2023). Skillnaden förklaras delvis av att pilotanläggningen studerades för utomhusproduktion i Chile, där tillgången till naturligt solljus är stor. Dessutom användes en ny, experimentell typ av odlingssystem – en så kallad Fibonaccireaktor – som skiljer sig från vanliga fotobioreaktorer och är särskilt utformad för storskalig produktion i solrika regioner.

### **Teknisk dimensionering**

Tankvolymen väljs till 2 m<sup>3</sup>, samma som tankarna för makroalger. Fotoperioden för mikroalgodlingen sätts till 24 timmar ljus. Den valda metoden för skördning av mikroalger är centrifugering eftersom inga kemikalier tillsätts i processen och därmed blir slutprodukten säker för livsmedel. Energiåtgången för processen valdes till ett medelvärde på 5 kWh/m<sup>3</sup>. Eftersom studien fokuserar på odling inomhus antas tillväxthastigheten till 0,25 mg/L/dag och skördning antas ske var tredje vecka. För mikroalgernas sammansättning antas ett förhållandet mellan kol, kväve och fosfor (C:N:P) till Redfield ratio 106:16:1. Kolhalten väljs till 50 %. Sammanställning av den tekniska dimensioneringen för mikroalger visas i tabell 7 nedan.

Tabell 7: Antaganden för mikroalger.

Tankvolym	1x1x2 m <sup>3</sup>
Fotoperiod	24 h ljus
Skördning	Var tredje vecka, centrifugering, Energibehov: 5 kWh/m <sup>3</sup>
Massväxthastighet	0.25 mg/L/dag
Atomförhållande	106C:16N:1P
Kolhalt	50 %

### 4.3 Bakterier

I detta avsnitt redogörs för vilka antaganden som har gjorts till grund för att beräkna energiåtgång för bakterier. Först presenteras mängden näringsämnen som krävs för att producera biomassa med metanoxiderande bakterier (MOB) och väteoxiderande bakterier (HOB) samt olika processer som kan användas för att producera eller utvinna de resurser som krävs.

#### 4.3.1 HOB/MOB

HOB kräver H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> och CO<sub>2</sub> för att leva medan MOB behöver CH<sub>4</sub> och O<sub>2</sub> (Verbeeck m. fl., 2021). Utöver dessa grundläggande byggstenar krävs dessutom kväve, fosfor och andra spårämnen för att en högvärdig proteinprodukt skall kunna produceras (Leger m. fl., 2021). Biomassans vikt kan beskrivas både genom dess våtvikt, celltorrvikt (CDW, eng. cell dry weight) och som massan mikrobiellt protein. Verbeeck m.fl och Leger m fl presenterar i två respektive studier relevanta värden för MOB och HOB. En generell uppskattning av sammansättningen av biomassans CDW antas av Leger m. fl. till CH<sub>1.77</sub>O<sub>0.49</sub>N<sub>0.24</sub> (Leger m. fl., 2021). Detta är en vanlig generell uppskattning för biomassors sammansättning för såväl HOB som e-coli och antas därför för både HOB och MOB.

Båda biomassors celltorrvikt innehåller omkring 12 % kväve, enligt Verbeeck m.fl (Verbeeck m. fl., 2021). Andelen fosfor anges sällan i sammanställningar av olika biomassors stökiometri. I mailkorrespondens med Dorian Leger, VD på Cx Bio anges att andelen fosfor uppskattningsvis är omkring 10-100 gånger lägre än molmängden kväve (personlig kommunikation, 17 maj 2025). För att producera 1 kg torrvikt bakterier krävs det 0,2-0,3 kg fosforsyra H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> och 0,112 kg ammoniak NH<sub>3</sub> (Leger m. fl., 2021). Detta resulterar i ett molförhållande på ungefär 17:1 mellan kväve och fosfor i bakterierna, vilket är den ratio mellan kväve och fosfor som återfinns i det ingående avloppsvattnet på Ryaverket. Givet att allt kväve tas upp i biomassan antas därmed även att all fosfor tas upp. För att ta vara på allt tillgängligt kväve krävs i fallet med MOB 11 kg CH<sub>4</sub> per kg N. I fallet med HOB där H<sub>2</sub> är elektrongivare är motsvarande värde omkring 5 kg H<sub>2</sub> per kg N.

HOB har något högre proteininnehåll per CDW på 75 % i jämförelse med omkring 60 % för MOB (Verbeeck m. fl., 2021). MOB har dock en högre tillväxttakt (4 kg CDW/m<sup>3</sup>h) än HOB (2.28 kg CDW/m<sup>3</sup>h) samtidigt som HOB effektivare omsätter sin elektrongivare (H<sub>2</sub>) än MOB (CH<sub>4</sub>). Utöver den lägre tillväxttakten hos HOB påtalar Verbeeck m.fl att vätgas har en lägre löslighet än metan. Denna lägre löslighet medför att HOB, för att upp-

nå en högintensiv proteinproduktion, kräver mer energi för att öka inblandning av vätgas vilket kan uppnås genom högre gastyck, intensivare omrörning och ”bubbling” (Leger m. fl., 2021). Leger m.fl redovisar i sin studie uppskattningar för energiåtgång för själva produktionen (omrörning och nedkylning) samt efterbearbetning (centrifugering och torkning) av slutprodukten av olika typer av bakteriellt protein. Det högsta värde som redovisas är 24,7 MJ/kg CDW vilket antas för HOB. Det lägsta uppskattade värdet anges till 16 MJ/kg CDW, vilket är en rimlig uppskattning för metanoxiderande bakterier. Eftersom metan är mindre lösligt än metanol, och samtidigt mer lösligt än vätgas antas därför ett medelvärde av dessa två för MOB. I tabell 8 presenteras dessa sammanställda värden.

*Tabell 8: Sammanställning för biomassans sammansättning samt energiåtgång för produktio, HOB och MOB.*

Biomassans sammansättning	$\text{CH}_{1.77}\text{O}_{0.49}\text{N}_{0.24}$
Andel kväve av CDW	12 %
Molförhållande N:P	17:1
Proteininnehåll, HOB	75%
Proteininnehåll, MOB	60 %
Volymetrisk produktionstakt, HOB	2,28 kg CDW/ $m^3 \cdot h$
Volymetrisk produktionstakt, MOB	4 kg CDW/ $m^3 \cdot h$
Energiåtgång, Bioreaktor & efterbearbetning, HOB	24,70 MJ/kg·CDW
Energiåtgång, Bioreaktor & efterbearbetning, MOB	20,35 MJ/kg·CDW

### 4.3.2 Kväve- och fosforutvinning

För att utvinna kväve och fosfor ur värdekedjan på ett reningsverk kan elektrodialys (ED) användas. I en nyligen genomförd studie sammanställer Meng m. fl. data för energiåtgång för de senaste teknikerna inom näringsåtervinning från vattenreningsverk genom ED (Meng m. fl., 2024). ED är en etablerad teknik inom avsättningsteknologi, men är mindre etablerad för näringsåtervinning från avloppsvatten. På grund av den stora energiåtgången för konventionell framställning av gödningsmedel samt risken för utarmning av fosforresurser är denna teknik ett viktigt steg mot en mer cirkulär användning av resurser, enligt Meng m. fl.

Rejektvatten är lämpligt för ED eftersom fasta partiklar i stor utsträckning har separerats ut. ED i kombination med bipolär membranelektrodialys (BMED) har använts för att återvinna mer än 90 % av kväve och fosfor från rötresternas olika komponenter (Meng m. fl., 2024). Kvävet extraheras från rejektvatten och fosfor från det överskottsslam som förs ut ur vattenreningssystemet. Energiåtgången enligt Meng m. fl. uppskattas vara 4,9 kWh/kg N för ED och 16,8 kWh/kg P för BMED. Båda dessa processer för återvinning förutsätter avsevärt striktare krav på kvartär rening. Uppskattningarna är inte särskilt konservativa, vilket motiveras av att tekniken antas ha effektiviserats och utvecklats i framtiden då denna teknik är aktuell med hänsyn till då tillämpade och striktare reningskrav.

### Teknisk dimensionering

Energiuppskattningarna för ED och BMED omvandlat till MJ presenteras i tabellen nedan. Upptaget av kväve och fosfor uppskattas vara 85,5 %, eftersom biomassa antas kunna ta upp 95 % av tillsatta mikronutrierter och att ED och BMED kan återvinna mer än 90 % av kvävet och fosfor från avloppsvatten. Se sammanställda värden i tabell 9.

Tabell 9: Energiåtgång för ED och BMED samt upptag och N och P efter utvinning, i biomassa och slutligt supptag.

Energiförbrukning, ED	17.64 MJ/kg N
Energiförbrukning, BMED	60.48 MJ/kg P
Upptag av N och P efter utvinning	90 %
Upptag av N och P i biomassa	95 %
Total mängd upptagna näringsämnen	85.5 %

### 4.3.3 Elektrolys

Elektrolys är ett av de huvudsakliga tillvägagångssätten för att producera grön vätgas. Vid elektrolys av vatten bildas  $O_2$  och  $H_2$ , där syrgasen i jämförelse med vätegaset produceras i rikliga mängder med hänsyn till massa (Verbeeck m. fl., 2021). De fyra mest välkända teknikerna är Alkalisk elektrolys (AWE), Polymerelektrolytmembran (PEM), Elektrolysör med fast oxid (SOEC) och Anjonbytesmembran (AEM). Av dessa används AWE och PEM idag i kommersiell skala, medan SOEC och AEM fortfarande befinner sig i laboratorieskala (Sebbahi m. fl., 2024). En kort redogörelse för dessa fyra tekniker följer nedan.

AWE är sedan tidigt 1900-tal den mest pålitliga, säkra, kostnadseffektiva och därmed även den mest använda elektrolysmetoden än idag (Sebbahi m. fl., 2024). Tekniken bygger på att två elektroder leder ström genom en elektrolytisk lösning, vilket via ett separationsmembran möjliggör kemisk reaktion där vattenmolekyler spjälkas till  $H_2$  och  $O_2$  utan att de blandas. Teknologin har vissa problem med korrosiva egenskaper, låg verkningsgrad och låg strömtäthet. PEM utvecklades istället under 1960-talet som ett svar på AWE-teknologins begränsningar. Istället för en elektrolytisk lösning används ett membran bestående av polymerer med någon form av syra. Detta resulterade i att den producerade vätegaset hade större renhet. Idag hanterar den även vidare lastförändringar bra och har en kort uppstartstid vilket gör den lämplig med förnybara energikällor, däremot utgör dyra komponenter en central utmaning. SOEC utvecklades under 80-talet och möjliggör jämförelsevis mycket kostnadseffektiv vätegasset genom elektrolys vid höga temperaturer, mellan 500-1000 °C. Detta gör den lämpad för industriella miljöer med tillgänglig spillvärme. AEM-teknologin är den idag minst mogna tekniken och började utvecklas under tidigt 2000-tal som ett svar på de höga materialkostnaderna för PEM.

Elektrolys har en energieffektivitet på omkring 70 % (Leger m. fl., 2021). Den energi som finns lagrad i vätgas kan i sin tur definieras utifrån ett lägre och ett högre värmevärde där det högre värdet även inkluderar den latent värme som frigörs då vattnet som

bildas under reaktionen kondenserar (Energy Transitions Commission, 2023). Enligt det internationella energiorganet (IEA) är en rimlig uppskattning på det lägre värdet 33.3 kWh/kg  $H_2$  vid 100 % verkningsgrad. Det maximala anges enligt Sebbahi m. fl. som 65 kWh/kg  $H_2$  och 61 kWh/kg  $H_2$  för AWE- PEM-elektrolys respektive (Sebbahi m. fl., 2024). Medelvärde för dessa två tekniker är 54.9 kWh/kg  $H_2$  vilket överensstämmer med det värde för "standard-elektrolys" som anges till 55 kWh/kg  $H_2$  av Facchini m. fl. (Facchini m. fl., 2023).

### Teknisk dimensionering

Med hänsyn till en verkningsgrad på 70 % blir det teoretiskt lägsta värdet för elektrolys 47,6 kWh/kg  $H_2$ , vilket stämmer väl överens med det lägsta värdet som presenteras av Sebbahi m. fl. Medelvärde av AWE- och PEM-elektrolys enligt Sebbahi m. fl. stämmer dessutom väl överens med det värde för standardelektrolys på 55 kWh/kg  $H_2$  enligt Facchini m. fl. Att studierna stämmer väl överens motiverar att använda standardvärdet på 55 kWh/kg  $H_2$  som referensvärde i denna studie. Nedan i tabell 10 presenteras detta värde omvandlat till MJ.

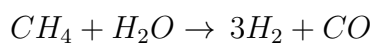
Tabell 10: Energiåtgång för elektrolys.

Energiförbrukning, elektrolys	198 MJ/kg $H_2$
-------------------------------	-----------------

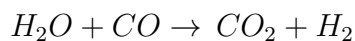
### 4.3.4 Ångreforming

Ångreforming och vatten-gasskift är processer som framförallt används för att producera vätgas, men som även genererar koldioxid som biprodukt (Madeira m. fl., 2021). Genom att vatten reagerar med metan bildas vätgas och kolmonoxid, en reaktion som kallas ångreforming. Kolmonoxiden kan i sin tur reagera vidare med vatten för att producera ytterligare vätgas och koldioxid, vilket är en process som kallas för vatten-gasskift.

#### Ångreforming



#### Vatten-gasskift



Metanen som behövs för ångreformingsreaktionen kan komma från exempelvis biogas, vilket bildas vid anaerob rötning (Madeira m. fl., 2021). Beroende på parametrar såsom biogassammansättning, ingående massflöden, temperatur samt tryck i processen och metod för att separera vätgas från resterande gaser kommer energiförbrukningen och mängden producerade produkter att variera. En vanlig och energieffektiv metod som används vid ångreforming och vatten-gasskift för att separera vätgas från andra ämnen är tryckväxlingsadsorption.

Helbio är ett företag som utvecklar system och produkter för vätgasproduktion (Helbio, u. å.). Deras ångreformingsanläggning kan producera upp till 200 Nm<sup>3</sup> vätgas per timme vid användning av 150 Nm<sup>3</sup> biogas med en metanhalt på under 65 %. Processen

kräver mindre än 25 kW och producerar vätgas med en renhet på minst 99,999 % genom tryckväxlingsadsorption. Eftersom 1 Nm<sup>3</sup> vätgas motsvarar 0,0899 kg (Runefors, u. å.), innebär detta att anläggningen maximalt förbrukar 1,39 kWh för att producera 1 kg vätgas, vilket motsvarar cirka 5 MJ.

### Teknisk dimensionering

Enligt Christian Hofmann erhålls för närvarande cirka 95 % av det vätgasbehov som finns inom EU från naturgas genom ångreforming (personlig kommunikation, 13 mars 2025). Eftersom energibehovet för denna process, med naturgas som metankälla, ligger på omkring 137 MJ per kg vätgas (Hu m. fl., 2023), samt det faktum att Helbios anläggningar är avsedda för småskalig produktion, används detta högre värde i beräkningar (se tabell 11). Värdet 5 MJ/kg bedöms alltså inte vara representativt för storskalig och väletablerad vätgasproduktion. Resonemanget att använda ett mycket högre värde för ångreforming med biogas stöds även av att biogas har en metanhalt på under 65 %, medan naturgas typiskt har en halt på 70–90 % (Anna Liljebäck, 2022), vilket innebär att ångreforming med naturgas i praktiken bör vara mindre energikrävande. Se sammanställt värde i 11.

Tabell 11: Energiåtgång för ångreforming

Energiförbrukning, Ångreforming	137 MJ/kg H <sub>2</sub>
---------------------------------	--------------------------

### 4.3.5 Syrgasinfångning

För att extrahera syrgas från luft och kunna använda den i en bioreaktor är någon form av teknik för syrgasinfångning viktigt. Potentiellt lämpliga tekniker för detta ändamål är trycksvängningsadsorption (PSA) och vakuumsvängningsadsorption (VSA) (Tolley och Estupinan, u. å.). Båda tekniker arbetar på olika sätt med tryckförändringar för att via en adsorbent separera syrgas från luft. Av dessa är VSA den mer energieffektiva tekniken som tack vare att den arbetar med lägre tryck än PSA kräver omkring 0.44kWh/kgO<sub>2</sub>. För PSA varierar det angivna motsvarande energibehovet från 0.68kWh/kgO<sub>2</sub> upp till 1.05kWh/kgO<sub>2</sub>, beroende på vilken teknisk specifikation som konsulteras. VSA rekommenderas även till onsite-produktion av syrgas för medelstora industrier (*ON-SITE OXYGEN SOLUTIONS Industrial* u. å.).

### Teknisk dimensionering

Med hänsyn till att VSA har lägre energiåtgång än PSA och att denna teknik, som ovan nämnt, är rekommenderad till onsite-produktion av syrgas för medelstora industrier väljs energispecifikationen för VSA som referensvärde för denna studie. I tabell 12 nedan anges energiåtgången omvandlat till MJ.

Tabell 12: Energiåtgång för VSA-teknik

Energiförbrukning, VSA	1.58 MJ/kg O <sub>2</sub>
------------------------	---------------------------

### 4.3.6 DAC

Direct air capture (DAC) är ett samlingsbegrepp för tekniker som extraherar koldioxid från omgivande luft (Bouaboula m. fl., 2024). Den gemensamma tekniska funktionen är

att de samlar in luft med hjälp av fläktar, varefter koldioxid separeras från luften med olika metoder beroende på vald teknik. Enligt Bouaboula m. fl. Identifieras de mest energieffektiva teknikerna som hydroxid-karbonat (HK), temperatur-vakuumsvängadsorption (TVSA), fuktighetssvängadsorption (FSA) och redox-aktiv (RA).

HK skiljer av koldioxid med hjälp av ett vattenhaltigt lösningsmedel och bildar kalciumkarbonatkristaller som hettas upp och bildar en koldioxidström (Bouaboula m. fl., 2024). TVSA består i stället av ett sorbentmaterial som fångar in koldioxid som därefter hettas upp för att frigöra gasen i en användbar form. FSA använder en torr jonbytesharts som adsorberar koldioxid och bildar bikarbonater. Vid efterföljande hydrering omvandlas dessa till karbonater samtidigt som koldioxid frigörs. Dessa tre tekniker är baserade på batch-system, vilket enligt Bouaboula m. fl. gör dem särskilt lämpade för system som drivs av intermittenta energikällor. RA –tekniken skiljer sig genom att den är baserad på ett kontinuerligt driftsystem. Koldioxidinfångning och frisättning samtidigt inuti en elektrokemisk cell genom att koldioxid-affiniteten ställs in via reduktions- och oxidationscykler. Bouaboula m. fl. betonar att denna metod lämpar sig väl för storskaliga tillämpningar.

Tabell 13 visar energiåtgången för de ovan beskrivna teknikerna enligt Bouaboula m. fl. (Bouaboula m. fl., 2024) samt ett genomsnittligt värde enligt en litteraturstudie av DAC-tekniker av Leger m. fl. (Leger m. fl., 2021).

*Tabell 13: Energiåtgång per kg producerad CO<sub>2</sub> för olika DAC-tekniker och slutligen ett genomsnittligt värde från en litteraturstudie av Leger m. fl.*

<b>Teknik</b>	<b>Energiåtgång [MJ/kgCO<sub>2</sub>]</b>
HK	6.0
TVSA	10.0
FSA	0.65
RA	1.5
Genomsnitt av olika tekniker enligt Leger m. fl.	7.5

### **Teknisk dimensionering**

Energiåtgången varierar avsevärt mellan de olika teknikerna, och vilken som är mest lämplig beror på den mängd CO<sub>2</sub> som behöver extraheras, vilket i sin tur kan skilja sig mellan olika processkedjor. RA-tekniken, som uppvisar den teoretiskt lägsta energiåtgången, är samtidigt den minst studerade metoden (Bouaboula m. fl., 2024). Enligt Bouaboula m. fl. är dessutom de tekniker med högre energiåtgång mer etablerade. För att inkludera både nyutvecklade och potentiellt energieffektiva tekniker samt väletablerade, väljs ett referensvärde på 5,5 MJ/kg CO<sub>2</sub>. Detta motiveras även av att studien av Leger m. fl. visar på ett medelvärde på 7,5 MJ av väletablerade tekniker (Leger m. fl., 2021), samtidigt som det valda värdet är något lägre, vilket avspeglar den framtida potentialen hos mer energieffektiva lösningar (se tabell 14).

Tabell 14: Energiåtgång för DAC-teknik

---

Energiförbrukning, DAC	5.5 MJ/kgCO <sub>2</sub>
------------------------	--------------------------

---

#### 4.3.7 Förbränning

Förbränning kan tillämpas i denna studie i syfte att ta till vara på rötslam som bildas vid rötningsprocessen. Vid full förbränning antas all TOC bilda koldioxid, och koldioxiden kan i sin tur användas till HOB.

#### Teknisk dimensionering

I samråd med Sara Stiernström, Product Manager på EasyMining, har antagandet att ingen energi går åt vid förbränning gjorts (se tabell 15). Stiernström uttrycker att “förbränningen är mer eller mindre försumbar då värmen återvinns för att torka slammet, driva anläggningen och forse städer med värme” (personlig kommunikation, 9 april 2025).

Tabell 15: Energiåtgång för förbränning

---

Energiförbrukning, förbränning	0 MJ/kg CO <sub>2</sub>
--------------------------------	-------------------------

---

#### 4.3.8 PCC

Post-combustion capture (PCC) är ett samlingsnamn för tekniker som kan fånga in koldioxid från punktkällor (Feron, 2010). I studien av Feron analyserades energiprestandan av en PCC-teknik som baserades på kemiska absorptionsprocesser för koldioxidinfångning vid ett kolkraftverk, eftersom denna metod bedömdes ha nära fullskalig fångstkapacitet. För ett kolkraftverk med en molfraktion CO<sub>2</sub> på 0,12 har energiberäkningarna av Feron resulterat i strax under 0,12 kWh/kg CO<sub>2</sub> vid både infångning och kompression från 0,1 MPa till 5 MPa vid 313 K. För endast avskiljning krävs i stället 0,05 kWh/kg CO<sub>2</sub>. Dessa siffror motsvarar 0,432 MJ respektive 0,18 MJ, och förutsätter även en koldioxidavskiljning på 100 %.

#### Teknisk dimensionering

Förbränning som ska generera koldioxid till HOB antas ske i nära anslutning till bioreaktorerna, och därför antas koldioxiden kunna användas direkt utan kompression. Förbränningsgas av rötslam och biogas antas även ha ungefär samma molfraktion av koldioxid som gasen från kolkraftverket i studien av Feron. Således uppskattas energiåtgången för koldioxidinfångning från förbränningsgas vara 0,18 MJ/kg CO<sub>2</sub>, se tabell 16 nedan.

Tabell 16: Energiåtgång för PCC

---

Energiförbrukning, PCC	0.18 MJ/kg CO <sub>2</sub>
------------------------	----------------------------

---

#### 4.3.9 Biogasuppgradering

Biogas består huvudsakligen av CH<sub>4</sub> och CO<sub>2</sub>, men för att CH<sub>4</sub> ska kunna användas effektivt behöver CO<sub>2</sub> avlägsnas (Bauer m. fl., 2013). Denna process kallas biogasuppgradering, och resultatet blir biometan med en metanhalt på omkring 97 %. Det finns flera

olika metoder för att uppgradera biogas, men de mest etablerade är amine scrubbing och water scrubbing. Water scrubbing bygger på att koldioxiden absorberas i vatten under högt tryck, medan amine scrubbing använder en aminlösning som kemiskt binder koldioxiden. Amine scrubbing är den metod med lägst elförbrukning, med ett elbehov på cirka 430 kJ/Nm<sup>3</sup> rå biogas. Däremot krävs även värmeenergi, vilket tillför ytterligare 1980 kJ/Nm<sup>3</sup>. Water scrubbing har ett totalt energibehov på cirka 720–1080 kJ/Nm<sup>3</sup>. Övriga uppgraderingstekniker har ett energibehov på omkring 900 kJ/Nm<sup>3</sup>.

### Teknisk dimensionering

Energibehovet för de övriga uppgraderingsteknikerna uppvisar ett värde i det högre intervallet för water scrubbing och mindre än halva energiåtgången för amine scrubbing. För att inkludera både väletablerade tekniker och nyutvecklade med lägre energiåtgång samt många tekniker används därför 900 kJ/ Nm<sup>3</sup> som en generell uppskattning för biogasuppgraderingens energibehov. I tabell 17 nedan presenteras detta referensvärde omvandlat till MJ.

Tabell 17: Energiåtgång för biogasuppgradering

Energiförbrukning, Biogasuppgradering	0,90 MJ/Nm <sup>3</sup> biogas
---------------------------------------	--------------------------------

## 4.4 Fiskfoder och odling

Fiskfoder kan vara uppbyggda med olika proportioner och ingredienser beroende på vilken art den är anpassad för. För laxfiskar, där röding ingår, är de centrala ingredienserna fiskmjöl och fiskolja (Svenskt vattenbruk, 2020). Mer än hälften av fodret består av vegetabiliska råvaror som vete och ärtor och kompletteras med vitaminer och mineraler för att skapa en näringsrik kost. För att exkludera fiskmjöl och fiskolja ur fodret har mycket forskning gjorts på både alger och bakterier.

Produktion av fiskfoder kräver bearbetning av det råmaterial som används. Alltech Fennoaqua är ett finskt företag som specialiserat sig på tillverkning av fiskfoder för regnbåge och vitfisk (Alltech Fennoaqua och SWECO, 2024). Företaget köper in råvaror som i deras produktion blandas, omvandlas till foder och packas. Enligt företagets miljöredovisning från 2024 har den genomsnittliga energiåtgången i produktionen legat på cirka 0,7 MWh per ton färdig produkt under de senaste fem åren.

Det finns ett växande intresse för odling av fisk i landbaserade miljöer för att säkerställa efterfrågan och minska risken för utfiskning av hotade arter (Lantbrukarnas riksförbund, 2025). När man odlar fisk på land kan man tack vare ökad kontroll begränsa utsläppen av näringsämnen i naturen. Landbaserad fiskodling främjar också lokal produktion och minskade koldioxidutsläpp kopplade till transporter. Dessutom möjliggör det en jämnare produktion som inte varierar över året. Däremot finns det utmaningar vad gäller energibehovet för att driva odlingen och anläggningarnas krav på infrastruktur och teknik.

Röding är en vanlig fiskart som återfinns i Sverige, Norge, norra Nordamerika och på Island (WWF, 2024). Den lever i arktiska söt- och kustvatten som sjöar samt bäckar. Arten kan odlas i slutna landbaserade cirkulerande system, så kallade RAS. Fjällröding är väldigt bra på att omvandla protein och i företaget Svensk Fjällrödings produktion kan

de odla 1 kg fisk med endast 1,12 kg foder (Jakob Hydén, 2019). Energiinnehållet i röding är cirka 634 kJ per 100 g rå fisk (Livsmedelsverket, u. å.)

I en studie där energibehov för att driva landbaserad odling av fiskarterna guldsparid och havsaborre konstaterades guldsparidens energiförbrukning till 188,642 MJ/ton och havsaborrens energiförbrukning till 168,535 MJ/ton (Zoli och Bacenetti, 2025).

### **Teknisk dimensionering**

Röding har valts som slutprodukt i detta arbete. Energiförbrukningen för att odla fisk antas vara gemensam för samtliga fyra produktionsvägar. För rödingens produktion används ett medelvärde för energiförbrukningen på 180 MJ per ton producerad röding. Detta redovisas i tabell 18 nedan.

*Tabell 18: Energiåtgång för produktion av fiskfoder och uppfödning.*

Energiförbrukning, Fiskfoderproduktion	0.7 MWh/ton slutprodukt
Energiförbrukning, Fiskuppfödning	180 MJ/ton fisk

## **4.5 Inblandning av alger och bakteriellt protein i fiskfoder**

Arter inom *Ulva*-släktet används i allt större utsträckning för att utveckla fiskfoder (Hofmann m. fl., 2024). Studier har undersökt dess effekt på flera fiskarter från olika trofiska nivåer som niltilapia, svart-, röd- och guldsparid, europeisk havsaborre, regnbåge och atlantlax. En sammanställning av flera studier visar att en inblandning av 15 - 20 % *Ulva*-alger i fiskfoder är säker och saknar negativ påverkan på fiskens tillväxt, fodereffektivitet eller proteinupptag. För vissa fiskarter har nivåer upp till 30 % bedömts som ofarliga.

Forskning visar att ett tillskott av mikroalger, upp till 12,5 % i fiskarnas foder ger positiva hälsoeffekter (Ahmad m. fl., 2018). De effekter som påvisats är förbättrad tillväxt och ökad resistans mot sjukdomar. Carl Safis forskningsgrupp har dessutom påvisat att tillskott av mikroalger ger fiskarna en längre livslängd (Safi m. fl., 2014) .

Gällande bakteriellt protein har olika studier utförts på bland annat atlantlax, regnbåge och hälleflundra där det har experimenterats med inblandningen av protein från metanotrofa bakterier i deras totala föda. I en studie från 2006 av Aas m. fl. undersöktes möjligheten att blanda in 4, 5, 9, 18 respektive 36 % för atlantlax i deras totala kost (Aas m. fl., 2006). Resultatet visade på högst tillväxthastighet och fodereffektivitetsförhållande vid en inblandning på 36 %, vilket enligt studien motsvarar 50 % av laxarnas proteinintag. I en annan studie av Øverland m. fl. drogs slutsatsen att bakteriellt protein kan utgöra 52 % av proteinintaget för atlantlax utan att tillväxthastigheten påverkades negativt, samt att regnbågsöring och hälleflundra i stället presterar bättre vid 38 respektive 13 % utbyte av protein (Øverland m. fl., 2010).

### **Teknisk dimensionering**

Den procentuella inblandningen varierar mellan de fyra utvalda produktionskedjorna. Värdet för makroalger och mikroalger uppgår till 20 % respektive 12,5 %. Med hänsyn till att röding är en laxfisk och att både Aas m. fl. och Øverland m. fl. är överens om att

ca 50 % utbyte av protein från bakterier är effektivt uppskattas att 36 % av rödingarnas totala foderintag baseras på bakteriellt protein. Denna andel antas fungera för både HOB och MOB. Dessa procenthalter används för att beräkna den andel fisk som uteslutande baseras på vardera kedja. Sammanställning av teknisk dimensionering för inblandning i foder visas i tabell 19 nedan.

*Tabell 19: Procentuell inblandning av alger och bakteriellt protein i fiskfodret.*

Andel bakteriellt protein i fiskfoder	36 %
Andel makroalger i fiskfoder	20 %
Andel mikroalger i fiskfoder	12.5 %

## 5 Resultat

Resultatet redovisar producerad mängd biomassa, den producerade mängden fisk uttryckt i både vikt och energiinnehåll samt energiförbrukningen per kilogram fisk för respektive produktionsväg. Därutöver presenteras en sammanställning av de olika produktionsvägarna för att möjliggöra jämförelse, samt en uppskattning av ytbehovet för odling. Den angivna mängden producerad fisk baseras på den maximala tillåtna inblandningen av respektive biomassatyp i fiskfodret.

### 5.1 Scenario 1: Makroalger

I tabell 20 nedan redovisas mängden makroalger, mängden fisk samt energin i den producerade fisken för scenario 1. Scenariot förutsätter en foderinblandning av makroalger på 20 %. En illustration av värdekedjan presenteras under avsnitt 3, metod.

Tabell 20: Scenario 1: Fiskproduktion med makroalger.

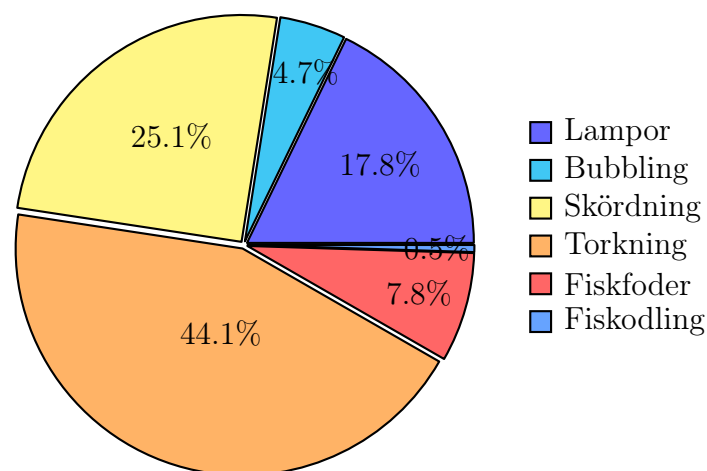
Kategori	Mängd	Enhet
Total mängd makroalger	172 735	ton
Total mängd fisk	154 228	ton
Total mängd energi i all producerad fisk	977 806	GJ

Tabell 21 visar energiförbrukningen i de olika stegen vid odling av makroalger för fiskfoder, samt den efterföljande användningen i fiskodling.

Tabell 21: Energiförbrukning Makroalger (Scenario 1)

Kategori	Mängd	Enhet
Lampor	990 434	GJ
Bubbling	262 876	GJ
Skördning	1 395 262	GJ
Torkning	2 456 989	GJ
Fiskfoder	435 293	GJ
Fiskodling	27 698	GJ
Totalt	5 568 551	GJ

För ytterligare översikt över vilka delar av processen som kräver mest energi presenteras ett cirkeldiagram, figur 9 , som visualiserar de olika delarnas relativa andel.



Figur 9: Energiförbrukning för makroalger i Scenario 1 (procentuell fördelning)

## 5.2 Scenario 2: Mikroalger

I tabell 22 nedan redovisas mängden mikroalger, mängden fisk samt energin i den producerade fisken med en foderinblandning av mikroalger på 12,5 %.

Tabell 22: Fiskproduktion med mikroalger.

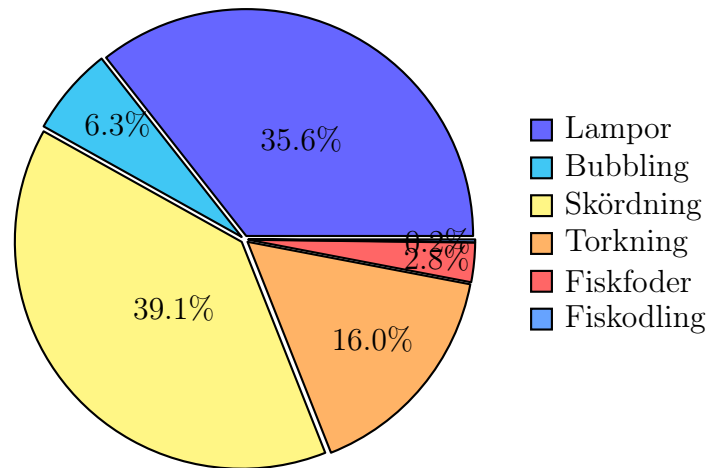
Kategori	Mängd	Enhet
Total mängd mikroalger	40 248	ton
Total mängd fisk	35 936	ton
Total mängd energi i all producerad fisk (Mikroalger)	227 832	GJ

Tabell 23 visar energibehovet för att producera mikroalger, omvandla dem till fiskfoder och använda detta i fiskproduktion.

Tabell 23: Energiförbrukning för olika delmoment i produktionskedjan för mikroalger (Scenario 2).

Delmoment	Energiförbrukning	Enhet
Lampor	1 269 259	GJ
Bubbling	224 587	GJ
Skördning	1 395 262	GJ
Torkning	572 487	GJ
Fiskfoder	101 425	GJ
Fiskodling	6 454	GJ
<b>Totalt</b>	<b>3 569 472</b>	<b>GJ</b>

Energifördelningen mellan processerna illustreras även i cirkeldiagrammet i figur 10 nedan.



Figur 10: Energiförbrukning för mikroalger i Scenario 2 (procentuell fördelning).

### 5.3 Scenario 3: MOB

Tekniska processer för framställning av MOB redovisas i figur 4 under avsnitt 3, metod. Tabell 24 visar producerad biomassa i celltorrvikt (CDW), motsvarande mängd fisk samt fiskens energiinnehåll. Antagen inblandning i fiskfoder är 36 %.

Tabell 24: Fiskproduktion med MOB

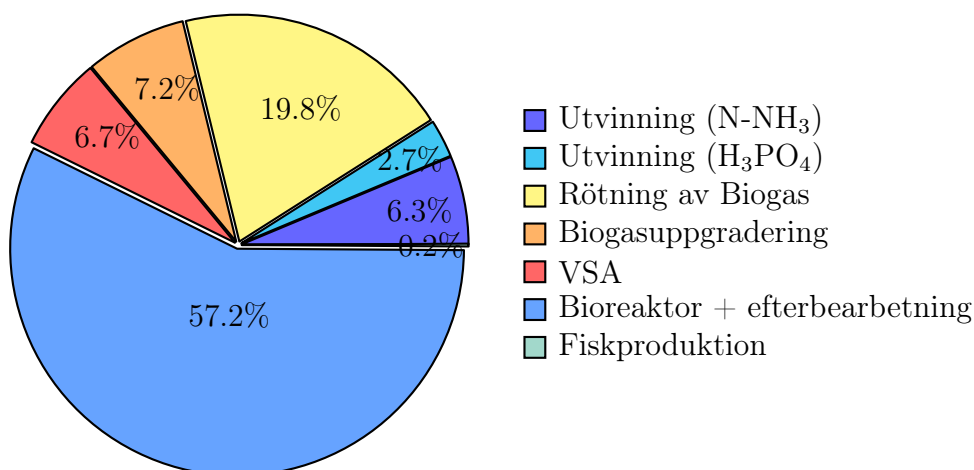
Kategori	Mängd	Enhet
Total mängd MOB (CDW)	27 446	ton
Total mängd fisk	11 066	ton
Total mängd energi	70 160	GJ

Energiförbrukningen för hela processen för att framställa fisk via MOB redovisas i tabell 25 nedan.

Tabell 25: Energiförbrukning för MOB i Scenario 3.

Kategori	Mängd	Enhet
Utvinning (N-NH <sub>3</sub> )	61 154	GJ
Utvinning (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	26 508	GJ
Rötning av Biogas	193 633	GJ
Biogasuppgradering	69 908	GJ
VSA	65 210	GJ
Bioreaktor + efterbearbetning	558 526	GJ
Fiskproduktion	1 987	GJ
Totalt	976 927	GJ

Energifördelningen mellan processerna illustreras i cirkeldiagrammet i figur 11 nedan.



Figur 11: Energiförbrukning för MOB i Scenario 3 (procentuell fördelning).

## 5.4 Scenario 4-7: HOB och HOB/MOB

Tre produktionsvägar för HOB samt en kombinerad HOB–MOB-väg undersöktes, samtliga med samma mängd producerad fisk men med varierande energiförbrukning. I tabell 26 nedan redovisas resultat för producerad biomassa i celltorrvikt (CDW), motsvarande mängd fisk samt fiskens energiinnehåll. Antagen inblandning i fiskfoder är, precis som för MOB, 36 %.

Tabell 26: Fiskproduktion med HOB för scenario 4-6 samt kombinerad HOB-MOB för scenario 7.

Kategori	Mängd	Enhet
Totalt mängd biomassa (CDW).	27 446	ton
Total mängd fisk	11 066	ton
Total mängd energi	70 160	GJ

Scenario 4 innefattar HOB-produktion genom elektrolys och koldioxidinfångning genom PCC och DAC (se avsnitt 3, metod för detaljerat processflödesschema). Energiförbrukningen redovisas i tabell 27 nedan.

Tabell 27: Visar energiförbrukningen för de olika processerna i scenario 4.

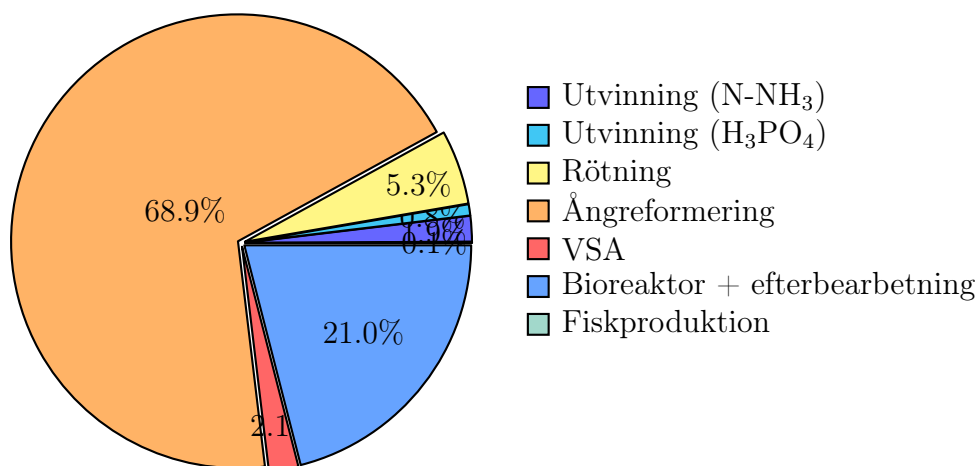
Kategori	Mängd	Enhet
Utvinning (N-NH <sub>3</sub> )	61 154	GJ
Utvinning (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	26 508	GJ
Förbränning	-	GJ
Elektrolys	3 219 678	GJ
DAC	74 331	GJ
PCC	9 831	GJ
Bioreaktor + efterbearbetning	677 916	GJ
Fiskproduktion	1 987	GJ
Totalt	4 071 407	GJ

Scenario 5 innefattar HOB-produktion genom ångreforming av biogas och syrgasproduktion genom VSA (se avsnitt 3, metod för detaljerat processflödesschema). Energiförbrukningen redovisas i tabell 28 nedan.

Tabell 28: Visar energiförbrukningen för de olika processerna för scenario 5 (Mest energieffektiv - scenario 5).

Kategori	Mängd	Enhet
Utvinning (N-NH <sub>3</sub> )	61 154	GJ
Utvinning (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	26 508	GJ
Rötning	172 450	GJ
Ångreforming	2 227 820	GJ
VSA	66 841	GJ
Bioreaktor + efterbearbetning	677 916	GJ
Fiskproduktion	1 987	GJ
Totalt	3 234 677	GJ

Eftersom detta scenario visade sig vara det mest energieffektiva HOB-scenariot redovisas även energiförbrukningen i ett cirkeldiagram, figur 12, för att ge en översiktlig bild av energifördelningen mellan processerna.



Figur 12: Energiförbrukning för HOB i Scenario 5 (procentuell fördelning).

Scenario 6 innefattar HOB-produktion genom en kombination av samtliga processer från scenario 4 och 5 (se avsnitt 3, metod för detaljerat processflödesschema). Energiförbrukningen redovisas i tabell 29 nedan.

Tabell 29: Visar energiförbrukning för scenario 6.

Kategori	Mängd	Enhet
Utvinning (N-NH <sub>3</sub> )	61 154	GJ
Utvinning (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	26 508	GJ
Rötning	35 856	GJ
Ångreforming	463 210	GJ
Förbränning	-	GJ
PCC	4 916	GJ
DAC	122 255	GJ
Elektrolys	2 550 222	GJ
Bioreaktor + efterbearbetning	677 916	GJ
Fiskproduktion	1 987	GJ
Totalt	3 944 024	GJ

Scenario 7 innefattar kombinerad HOB-MOB-produktion och utgör en kombination av scenario 3 och 6 (se avsnitt 3, metod för detaljerat processflödesschema). Energiförbrukningen redovisas i tabell 30 nedan.

Tabell 30: Visar energiförbrukningen för scenario 7 som innebär kombinerad produktion av MOB och HOB

Kategori	Mängd	Enhet
Utvinning (N-NH <sub>3</sub> )	61 154,35	GJ
Utvinning (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	26 508,38	GJ
Rötning	44 272,09	GJ
Biogasuppgradering	12 945,17	GJ
Förbränning	-	GJ
PCC	4 915,68	GJ
Elektrolys	2 626 266,71	GJ
DAC	155 457,70	GJ
Bioreaktor + efterbearbetning	677 903,85	GJ
Fiskproduktion	1 987,33	GJ
Totalt	3 611 411,27	GJ

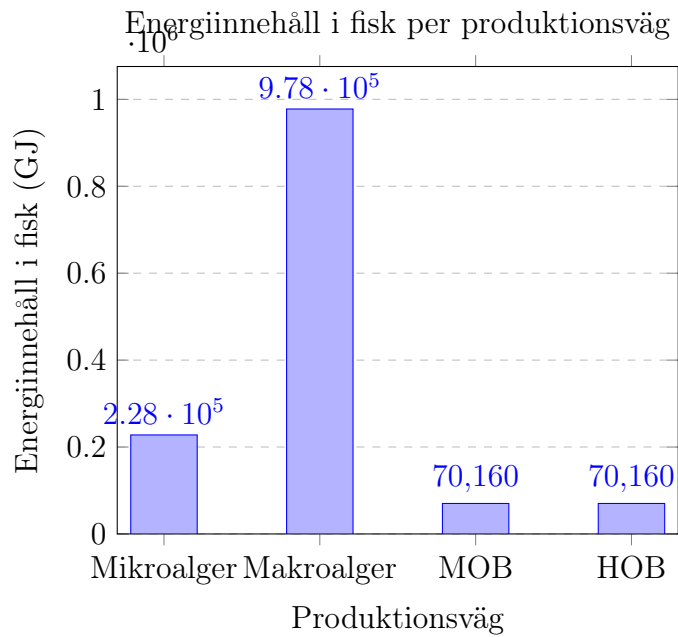
## 5.5 Sammanställt resultat

En överskådlig jämförelse mellan de olika produktionsvägarna ges genom en parallell analys av flera centrala parametrar. Syftet är att tydliggöra skillnader i effektivitet, resursutnyttjande och potential mellan alternativen. I tabell 31 nedan sammanställs nyckeltal som visar den mängd energi som tillförts respektive utvunnits i form av fisk genom de fyra produktionsvägarna. Här redovisas producerad fiskmängd, dess energiinnehåll, specifik energiförbrukning per kilogram fisk samt den totala energikvoten – det vill säga förhållandet mellan utvunnen och förbrukad energi.

Tabell 31: Samlad jämförelse mellan produktionsvägar – energiutbyte och effektivitet.

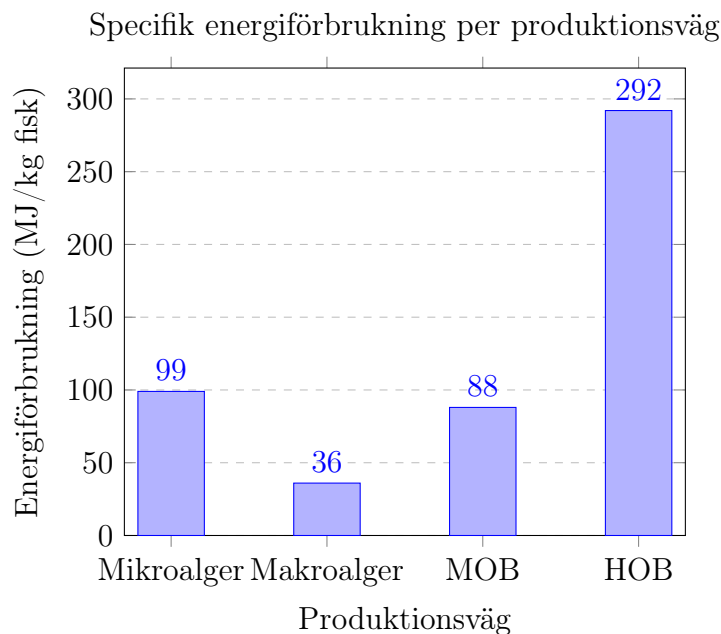
Kategori	Mikroalger	Makroalger	MOB	HOB	Enhet
Mängd producerad fisk	35 936	154 228	11 066	11 066	ton
Energiinnehåll i fisk	227 832	977 806	70 160	70 160	GJ
Årlig energiförbrukning	3 569 472	5 568 551	976 927	3 234 677	GJ
Energiförbrukning per kg fisk	99	36	88	292	MJ/kg fisk
Energikvot (energi ut/in)	6 %	18 %	7 %	2 %	[-]

I stapeldiagrammet nedan (figur 13) presenteras energiinnehållet i den totala mängden producerad fisk för respektive produktionsväg.



Figur 13: Stapeldiagram över energi i total mängd producerad fisk genom olika produktionsvägar.

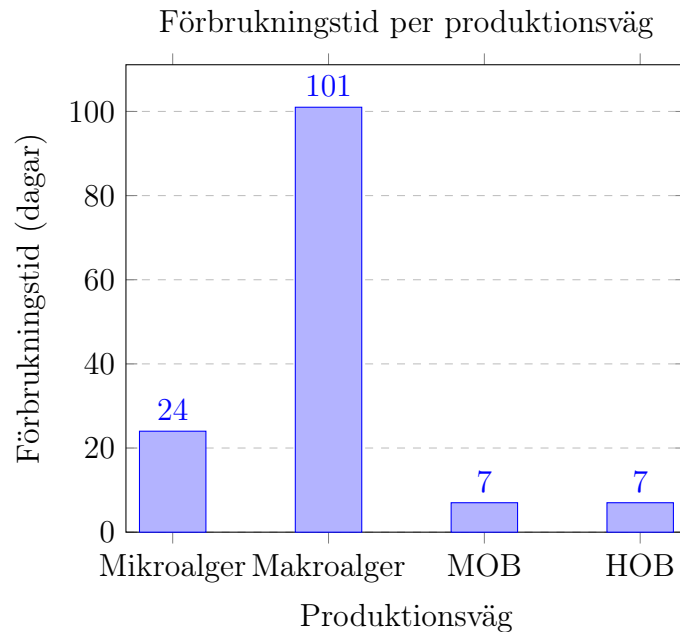
Diagrammet nedan (figur 14) redovisar den genomsnittliga energiförbrukningen per kilogram producerad fisk.



Figur 14: Stapeldiagram över energiförbrukning per kg fisk från olika produktionsväg.

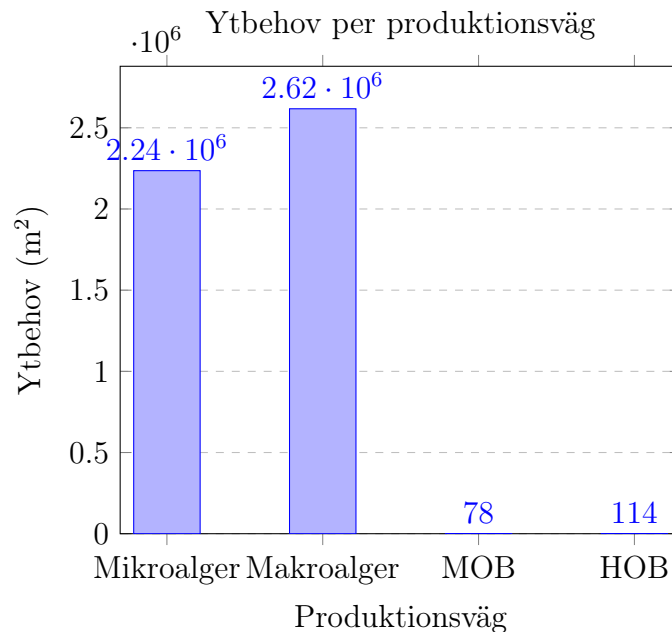
Näringsvärdet har omräknats till potentiell försörjningskapacitet i syfte att sätta fiskproduktionen i ett konkret och samhällsrelevant sammanhang. Analysen visar hur länge fisken från respektive system kan tillgodose energibehovet, i form av fisk, för en befolkning på 825 000 personer – motsvarande antalet anslutna till Ryaverket – baserat på dess

kaloriinnehåll. Resultatet presenteras i figur 15 och tydliggör den praktiska betydelsen av de olika produktionsvägarna.



Figur 15: Stapeldiagram över förbrukningstid (dagar) för olika produktionsväg.

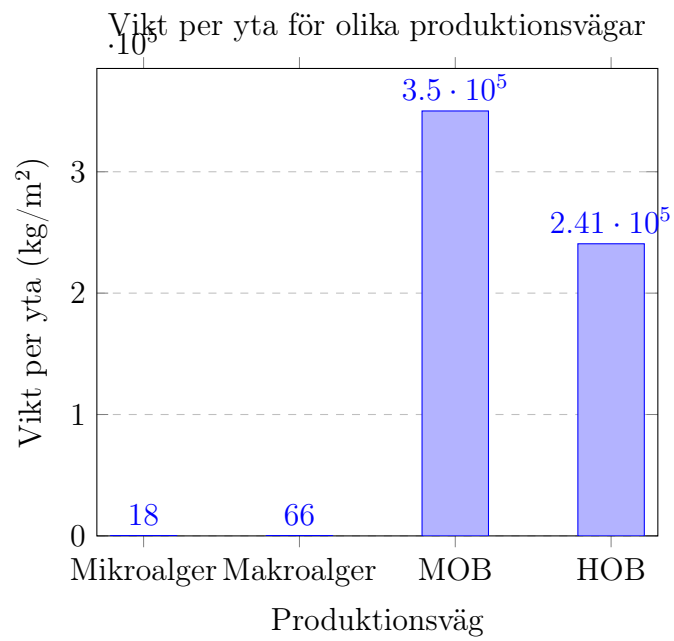
För att skapa heltäckande jämförelse analyseras även det fysiska ytbehovet för de olika produktionsvägarna. Arealbehovet har stor betydelse vid implementering i urbana eller geografiskt begränsade områden, och i figur 16 nedan ges en jämförande bild av markanvändning som varje produktionsväg kräver.



Figur 16: Stapeldiagram över ytbehov för olika produktionsväg.

I figur 17 visas den producerade vikten per yta för att möjliggöra en mer relevant jämfö-

relse av prouktionsvägars ytbehov.



Figur 17: Stapeldiagram över vikt per yta för olika produktionsväg.

## 6 Diskussion

Diskussionen inleds med en analys av resultaten för makro- och mikroalger, följt MOB och HOB, och avslutas med en jämförande diskussion av de olika produktionsvägarna för att diskutera vilken produktionsväg som är bäst utifrån energi- och platsbehov samt störst mängd producerad fisk.

### 6.1 Jämförelse mellan mikro- och makroalger

I resultatet under tabell 31 framgår det att makroalger ger störst fiskproduktion, men detta medför samtidigt en högre total energiförbrukning jämfört med exempelvis mikroalger som syns i tabell 21 och 23. Samtidigt visar beräkningarna att mikroalger är mer energikrävande per kilo producerad röding. Denna skillnad beror i huvudsak på odlingsförhållandena, särskilt den konstanta belysning som krävs för mikroalgen *Chlorella*, vilken behöver 24 timmars ljus för optimal tillväxt. I kontrast kräver makroalgen *Ulva* endast 16 timmars ljus och 8 timmars mörker, vilket resulterar i lägre energiförbrukning för belysning. Masstillväxten hos mikroalgen *Chlorella* är dessutom lägre, vilket innebär att fler odlingstankar och därmed fler lampor behövs för att uppnå önskad produktionsvolym. Detta bidrar ytterligare till den högre energianvändningen per producerad mängd fisk.

Skördemetoderna utgör ytterligare en osäkerhetsfaktor för energiförbrukningen. För mikroalger finns etablerade värden för tekniska metoder som centrifugering. För makroalger saknas standardiserade energivärden för skördemetoder, eftersom skörden ofta sker mekaniskt, exempelvis med håvar. I denna studie har därför energibehovet för skördning av mikroalger även antagits för makroalger, i syfte att skapa en konservativ uppskattning och en buffert för osäkerhet.

Torkningsmetoden har förenklats genom att samma process tillämpats för både mikro- och makroalger. Detta innebär en generalisering som kan påverka energiberäkningarna, eftersom olika algtyper potentiellt kräver olika torkningsmetoder med varierande energibehov. Metoder som ännu inte är färdigutvecklade eller som exkluderats i denna analys kan potentiellt bidra till en mer energieffektiv produktion.

Inblandningen av alger i fiskfodret är också en avgörande faktor för producerad mängd fisk. En högre inblandningsgrad, som i fallet med mikroalger, innebär att mer foder måste produceras för att uppnå samma effekt, vilket höjer den specifika energiförbrukningen. Samtidigt möjliggör makroalger, tack vare sin högre biomassatillväxt, större årlig produktion, vilket förklarar deras högre totala energibehov.

Vid odlingen av alger antas ett cirkulärt vattensystem där överskott av näringsämnen från avloppsvattnet recirkuleras och återanvänds i senare odlingscykler. Detta innebär att inget näringsläckage sker under produktionen. Denna processlösning är dock teoretisk och skulle kunna få tekniska och praktiska konsekvenser, vilka utelämnas i denna studie.

### 6.2 Makroalger

Makroalger visar på störst potentiell produktion vilket beror på att makroalgernas molförhållande mellan C:N:P gynnas av näringsfördelningen i Ryaverkets avloppsvatten, som har en lik fördelning. Kväve blir dimensionerande för odling av makroalger i avloppsvatt-

net vilket också är det näringsämne som finns i störst mängd i vattnet jämfört med fosfor, se tabell 1.

I dimensioneringsprocessen har fler antaganden gjorts baserade på teorier kring makroalger, vilka därefter tillämpats på utformningen av odlingssystemet för mikroalger. Följderna av dessa antaganden kan ha påverkat resultatet och gynnat makroalgernas förutsättningar på bekostnad av mikroalgernas. Parametrar såsom temperatur och tankdimensioner i studien överensstämmer med de optimala förhållandena för makroalger men inte för mikroalger.

### 6.3 Mikroalger

En möjlig anledning till att produktionen av mikroalger blir lägre än den för makroalger, som kan utläsas genom att jämföra tabell 20 och 22, trots deras många likheter kan vara skillnaden i atomförhållandet mellan näringsämnena. Mängden mikroalger som produceras beror på mängden näringsämnen som tas upp från avloppsvattnet. För mikroalger utgör fosfor det dimensionerande näringsämnet vilket innebär att proportionerna mellan de olika ämnena i vattnet begränsar produktionen.

För odling av mikroalgerna antogs vattnets temperatur till det från Ryaverket. Det innebär en skillnad med över tio grader från optimala växtförhållanden och kommer därmed påverka tillväxthastigheten. Detta har dock exkluderats i beräkningarna, vilket enbart fokuserar på totala mängden mikroalger som tekniskt sett kan produceras med Ryaverkets näringsämnen. En sänkt tillväxthastighet kan påverka mängden producerade alger och på så sätt påverka det slutliga resultatet.

Antagandet med skördning var tredje vecka togs från en studie med en fotobioreaktor på 100 L med högre vattentemperatur. Detta innebär att skördningsintervallerna som krävs för denna studie riskerar att inte vara samma som för källan som användes. Temperaturskillnaderna kommer innebära andra tillväxthastigheter för de olika tankarna samt att skillnaden i volym ger rum för en större mängd alger.

### 6.4 Potentiella förbättringar för alger

Det finns flera utvecklingsområden inom mikro- och makroalgsproduktion som skulle kunna bidra till lägre energiförbrukning och ökad effektivitet. En viktig faktor är algers behov av ljus, där framtida lösningar kan innefatta ökad användning av naturligt solljus under sommarhalvåret. Genom att minska beroendet av artificiell belysning kan energikostnaderna sänkas avsevärt.

För makroalger är skördningen idag i huvudsak manuell, vilket gör det svårt att uppskatta dess exakta energiförbrukning. Genom att utveckla och implementera automatiserade skördemetoder kan energianvändningen inte bara reduceras, utan också mätas och optimeras mer precist.

En annan möjlig förbättring är att ersätta syrebubbling i odlingstankarna med koldioxidbubbling. Detta skulle potentiellt kunna öka algutväxten och därmed produktionen per ytenhet. Detta skulle kunna innebära en effektivare produktion per vilket i skulle kunna

innebära färre lampor och därmed en lägre energiförbrukning. Dock innebär koldioxidbubblingen också en energikostnad, vilken inte inkluderats i studien. Energioptimeringen till följd av bubblingen är därför osäker.

Dimensioneringen av algodlingen har utgått från en enplanslösning, vilket innebär att odlingen upptar relativt stor yta. Det finns dock en tydlig potential att effektivisera ytanvändningen genom att bygga på höjden, exempelvis genom vertikal odling i flera våningsplan. En sådan lösning skulle avsevärt minska markbehovet och därmed bidra till en mer yteffektiv och hållbar produktionsmodell. Däremot skulle detta möjligen kunna försämra möjligheten att nyttja solljusets fullständiga potential.

## 6.5 Jämförelse mellan MOB och HOB

Studien har undersökt fem olika produktionsvägar för fiskfoder där fiskmjöl ersätts med bakterier. Dessa motsvarar scenarierna 3–7, vilket illustreras i figur 4–8. Av dessa vägar är produktion med MOB, scenario 3, den mest energieffektiva sett till mängden energi som krävs per kilogram producerad fisk. Som framgår av tabell 31 kräver detta scenario 88 MJ/kg fisk, medan den näst minst energikrävande processen, scenario 5, kräver 292,3 MJ/kg fisk (se bilaga 1). Scenario 5 avser en process där HOB produceras genom att vätgas och koldioxid erhålls från ångreformerings av biogas från Ryaverket, medan syrgas extraheras ur luft med hjälp av VSA-teknik.

De metanoxiderande bakteriernas energibehov under ett helt år blir även lägst då den totala mängden producerad mikrobiellt protein blir densamma för både MOB och HOB oavsett produktionsväg.

Det bör dock noteras att MOB har sämre näringsvärde än HOB. Trots detta har studien antagit att samma procentuella inblandning av MOB respektive HOB i fiskfodret ger likvärdiga foder. Detta antagande kan ses som en felkälla och bör därför utvärderas vidare inför eventuell praktisk implementering. Däremot kräver den näst mest energieffektiva produktionsvägen (scenario 5) mer än tre gånger så mycket energi vilket indikerar att scenario 3 ändå är det mest resurseffektiva tillvägagångssättet.

## 6.6 MOB

I figur 4 presenteras den produktionsväg för MOB som analyserats i denna studie. Att endast en väg har studerats beror främst på att MOB-bakterierna, utöver kväve och fosfor, enbart kräver metan och syrgas. De processer för utvinning av metan och syrgas som redovisas i denna studie bedöms som lämpliga för en teoretisk implementering vid Ryaverket, vilket är skälet till att inga ytterligare alternativ analyserats.

Genom uppgradering av biogasen från Ryaverket erhålls i princip ren metan, och den mängd biogas som produceras under ett år bedöms inte vara tillräcklig för att möta metanbehovet hos de metanoxiderande bakterierna – förutsatt att allt kväve och fosfor från reningsverket används (se bilaga 1). Därför köps även extern biogas in för att möta detta behov. Syrgasen utvinns ur luft via VSA, vilket innebär att ingen inköpt råvara krävs. Det är inte motiverat att använda elektrolys i detta fall, eftersom syftet inte är att producera vätgas, vilket är elektrolysens huvudprodukt.

Ett syfte med studien är att ta vara på all inkommande kväve och fosfor till Ryaverket och därav har det inte studerats hur ett scenario där endast metanen från Ryaverket används skulle se ut.

## 6.7 HOB

Scenario 4, 5 och 6 undersöker olika tillvägagångssätt för produktion av HOB. Utifrån Tabell 27, 28 och 29 framgår det tydligt att scenario 5 är den mest energieffektiva produktionsvägen, följt av scenario 6 och slutligen scenario 4. I det följande avsnittet analyseras de bakomliggande orsakerna till de olika scenariernas energibehov, med fokus på försörjningen av vätgas, koldioxid och syrgas.

### 6.7.1 Vätgasförsörjning

Anledningen till att produktionen av HOB är mer energikrävande än MOB beror främst på att HOB kräver vätgas, som produceras genom mycket energiintensiva processer. Den främsta orsaken till att scenario 5 är det mest energieffektiva alternativet beror på att det enbart får sin vätgas genom ångreforming, medan det mest energikrävande scenariot, scenario 4, får sin vätgas genom enbart elektrolys.

Samtidigt syns i figur 12 att ångreforming är den absolut största energiposten även för scenario 5, trots att processen är mer energieffektiv än elektrolys. Detta visar på att det är behovet av vätgas som främst bidrar till att dessa processer kräver mycket energi. Förutom att ångreforming är energisnålare än elektrolys är det en fördel att ingen separat process krävs för att utvinna koldioxid, som HOB också behöver. I bilaga 1 framgår det att det i scenario 5 produceras mer koldioxid än vad som behövs, medan scenario 6, som använder en kombination av ångreforming och elektrolys, behöver kompletteras med PCC och DAC för att tillgodose sitt koldioxidbehov. Scenario 4 utnyttjar också både PCC och DAC, vilket ökar energiförbrukningen ytterligare jämfört med en process som enbart bygger på ångreforming.

Scenario 6 utgår från att så mycket vätgas som möjligt produceras genom ångreforming av Ryaverkets biogas. Det som återstår för att täcka det totala behovet produceras istället med elektrolys. Syftet är att undersöka den totala energiförbrukningen för denna kombinerade lösning. I bilaga 1 framgår det dock att denna mängd endast täcker drygt 20 % av den vätgas som krävs för HOB-produktion, förutsatt att allt kväve och fosfor från Ryaverket skall återvinnas. Ett motiv till att undersöka denna kombinerade produktionsväg när vätgas från två källor används var att se hur mycket energi som kan sparas genom att utnyttja den biogas som redan finns på Ryaverket jämfört med att bara använda elektrolys, vilket enligt bilaga 1 resulterar i en total energibesparing på 22,6 MJ/kg fisk.

En ytterligare anledning till att detta scenario studerades var att externt inköp av biogas för ångreforming skulle kunna undvikas, vilket skulle kunna innebära en ekonomisk besparing. Ekonomiska aspekter har dock inte analyserats närmare, då de ligger utanför denna studies avgränsningar.

Det finns nackdelar med ångreforming jämfört med elektrolys, men dessa är främst kopplade till klimat- och miljöaspekter snarare än energi, vilket är fokus i denna studie.

Till exempel genererar ångreforming ett överskott av koldioxid och förbrukar biogas, som är en begränsad resurs och kan ha andra mer värdefulla användningsområden.

Ett möjligt sätt att minska energiförbrukningen vid elektrolys, som inte undersökts vidare i denna studie, är att använda spillvärmerna från förbränning av rötslam. Som tidigare nämnts kan elektrolys som drivs med värme kräva 33,3 kWh/kg H<sub>2</sub>, jämfört med de 55 kWh/kg H<sub>2</sub> som använts i denna studies beräkningar.

Eftersom ångreforming av biogas inte är etablerad i större skala antogs energibehovet motsvara det för naturgasbaserad reformering. Det finns dock exempel på småskaliga biogasanläggningar med betydligt lägre energiförbrukning (5 MJ/kg H<sub>2</sub>), vilket tyder på att HOB-produktion via ångreforming i praktiken kan vara ännu mer energieffektivt.

### 6.7.2 Koldioxidförsörjning

PCC är en betydligt mer energieffektiv metod för att tillhandahålla koldioxid än DAC, men metoden förutsätter att det finns rötslam att förbränna, annars finns ingen förbränningsgas att fånga in och extrahera koldioxid från. Därför behöver både scenario 4 och scenario 6 kompletteras med DAC för att kunna tillgodose behovet av koldioxid för HOB (se figur 5 och 7).

I scenario 5 används ångreforming för att producera vätgas till bakterierna, vilket samtidigt ger upphov till koldioxid som biprodukt. Denna koldioxid kan då användas direkt av bakterierna. I denna studie allokeras hela energibehovet för processen till vätgasproduktionen, och koldioxiden betraktas därför som en kostnadsfri biprodukt (se bilaga 1). Skillnaden mellan scenario 5 och scenario 6 (som också tillämpar ångreforming) är att scenario 5 utgår från att all nödvändig vätgas genereras från inköpt biogas, medan scenario 6 enbart använder den biogas som produceras under ett år vid Ryaverket. Detta innebär att koldioxidproduktionen genom ångreforming i scenario 6 inte är tillräcklig för att täcka behovet, och därför behöver kompletteras med både PCC och DAC, vilket illustreras i figur 7.

### 6.7.3 Syrgasförsörjning

Denna studie har endast undersökt två tillvägagångssätt för att erhålla syrgas: VSA och elektrolys. Det är användningen av elektrolys som har avgjort varifrån processerna får sin syrgas. Vid användning av elektrolys anses syrgasen vara en biprodukt, och även här allokeras biprodukterna så att de inte kräver ytterligare energi. Både scenario 4 och scenario 6 använder elektrolys, vilket innebär att ingen ytterligare syrgasproduktion behövs. I bilaga 1 redogörs det för att elektrolysen täcker syrgasbehovet i båda fallen.

VSA används däremot för att producera syrgas när elektrolys inte ingår i processen, vilket är fallet i scenario 5. Eftersom VSA har ett energibehov kopplat till syrgasproduktion, till skillnad från elektrolys, är det en mer energikrävande process än elektrolys ur detta perspektiv. Men om helheten beaktas, är det definitivt mer energieffektivt att använda VSA.

## 6.8 Kombinerad produktion av MOB och HOB

Scenario 7 beskriver en produktionsväg där både HOB och MOB produceras för att blandas in i fiskfoder (se figur 8). I detta scenario används all metan från biogasen som årligen produceras på Ryaverket, efter biogasuppgradering, för att producera MOB. Den kväve- och fosformängd som inte tas upp av MOB används istället för att producera HOB. Anledningen till att MOB inte kan utnyttja all tillgänglig kväve och fosfor är att metanproduktionen från Ryaverket inte räcker för att möta det metanbehov som krävs för att omvandla hela kväve- och fosformängden. Detta skiljer sig från scenario 3, där extern biogas köps in för att täcka hela metanbehovet.

Eftersom all biogas i scenario 7 används till MOB-produktion måste elektrolys användas för att producera den vätgas som krävs för HOB (se figur 8). För att täcka behovet av koldioxid till HOB används både PCC och DAC, detta eftersom mängden rötslam inte räcker för att via PCC ensam täcka koldioxidbehovet (se bilaga 1).

Detta scenario ses som en realistisk produktionsväg då det utnyttjar de resurser som Ryaverket tillhandahåller (kväve, fosfor, biogas och rötslam). Samtidigt är det mer energieffektivt att enbart producera MOB (scenario 3), eller enbart HOB om vätgasen produceras via ångreformerings (scenario 5). Den högre energiförbrukningen i scenario 7 beror främst på att elektrolys krävs. Dock bör det också beaktas att både scenario 3 och 5 är beroende av inköp av extern biogas, vilket kräver vidare studier för att avgöra om det är ett hållbart alternativ. Det är möjligt att en kombinerad produktionsväg enligt scenario 7, där Ryaverkets biogas används och elektrolysen drivs med förnybar el, är ett mer hållbart val ur både energi- och miljösynpunkt.

## 6.9 Jämförelse mellan alla produktionsvägar

Avloppsvattenrening är en energikrävande process, men om resurser som kväve och fosfor samtidigt kan återvinnas och användas, till exempel inom livsmedelsproduktion, är det önskvärt för att undvika att energi och näringsämnen går till spillo. Att identifiera det mest resurs- och energieffektiva sättet att ta tillvara kväve och fosfor är dock en utmaning. Vidare diskuteras vilket av studiens sju tillvägagångssätt som är mest fördelaktigt utifrån energieffektivitet, fiskproduktion och ytbehov. Eftersom flera scenarier för fiskproduktion med HOB som fiskfoder har analyserats, fokuserar diskussionen i detta avsnitt enbart på det mest energieffektiva alternativet (scenario 5).

### 6.9.1 Energieffektivitet

Om målet är att uppnå maximal resurseffektivitet och därmed undvika utsläpp av kväve och fosfor till vattenmiljön, är det scenario med lägst total energiförbrukning som är mest fördelaktigt ur energisynpunkt. Av tabell 31 framgår att scenario 3, som producerar MOB, har den lägsta totala energiförbrukningen med 976 927 GJ per år. Tabellen visar också att scenario 2, där makroalger produceras, är det mest energikrävande med ett årligt behov på 5 568 551 GJ.

Om målet istället är att producera så mycket fisk som möjligt med så låg energianvändning per kilogram som möjligt, framstår scenario 2 (makroalger) som det mest gynnsamma. Enligt tabell 31 krävs endast 36 MJ per kilogram fisk, vilket är det lägsta värdet bland

samtliga scenarier. Det framgår även att detta scenario ger den största totala mängden producerad fisk per år. Det minst energieffektiva alternativet ur detta perspektiv är scenario 5 (HOB), med ett energibehov på 292 MJ per kilogram fisk.

I enlighet med bilaga 1 är det endast scenarierna med HOB och MOB som inkluderar energibehovet för att utvinna kväve och fosfor. Detta baseras på antagandet att mikro- och makroalger kan ta upp näringsämnen direkt från avloppsvattnet, medan bakterierna kräver kväve och fosfor i extraherad form. Fosfor finns dock huvudsakligen i slammet och inte i det behandlade vattnet, vilket innebär att även alger i praktiken kan behöva en energikrävande extraktionsprocess. Det utgör därmed en potentiell felkälla.

Som framgår av figur 11 och 12 är dock energiposterna för utvinningen av kväve och fosfor små i förhållande till den totala energiförbrukningen, vilket innebär att inkluderingen av denna post i scenarierna för mikro- och makroalger sannolikt inte hade påverkat resultatet i någon större utsträckning.

### 6.9.2 Produktion

Som tidigare nämnt är det scenariot med makroalger som resulterar i den största fiskproduktionen under ett år, med 154 228 ton enligt tabell 31. Mikroalger står för näst störst produktion, med 35 936 ton per år, medan både HOB- och MOB-baserade scenarier ger 11 066 ton per år (se tabell 31).

I studien antas att HOB och MOB, efter att 10 % av kvävet och fosfor går förlorat vid utvinning, kan ta upp 95 % av den kvarvarande mängden. Det innebär ett totalt upptag på 85,5 % av det inkommande kvävet och fosfor (se bilaga 1). Däremot är deras näringsbehov i balans med tillgången i avloppsvattnet, vilket gör att de tillgängliga näringsämnena kan utnyttjas effektivt.

Att endast 95 % av kvävet och fosfor kan tas upp i bakterierna hade kunnat undvikas genom recirkulation av kvarvarande näringsämnen och därmed hade ett hundraprocentigt upptag varit mer rimligt. Detta hade höjt produktiviteten och kan därför ses som en felkälla vid beräkningar.

För mikro- och makroalger ser det annorlunda ut. Trots att de antas ha tillgång till 100 % av kvävet och fosfor, överensstämmer inte deras upptagsförhållande mellan näringsämnen med fördelningen i avloppsvattnet. Det leder till att ett av näringsämnena tillförs i överskott och därmed inte kan tas upp i sin helhet, vilket medför en mindre effektiv resursanvändning.

Antagandet att algerna kan ta upp hela mängden tillgängligt kväve och fosfor är en av orsakerna till att de i studien uppnår en högre årlig produktion jämfört med bakteriebaserade scenarier. Detta påverkar dock inte siffrorna för energiförbrukning per kilogram producerad fisk.

Den främsta anledningen till att makroalgerna har överlägset störst produktion beror på dess ratio mellan kol, kväve och fosfor i jämförelse till ration mellan näringsämnen som mikroalger, HOB och MOB behöver. Tillväxthastighet spelar även en betydande roll för hur mycket som produceras.

### 6.9.3 Ytbehov

MOB är det scenario som har det absolut minsta ytbehovet. Som framgår av figur 16 kräver alger generellt sett betydligt större yta än bakterier. En bidragande orsak till detta är att bioreaktorer för bakterieodling antas kunna vara upp till 12 meter höga, medan tankar för algodling endast är 2 meter höga på grund av algers behov av ljus (se bilaga 1). Detta förklarar dock inte hela skillnaden i ytbehov. Till exempel har makroalgerna den högsta årliga biomassaproduktionen i studien, vilket också bidrar till deras större utrymmeskrav.

Figur 17 visar att odling av MOB är det scenario som med god marginal producerar mest biomassa i vikt per kvadratmeter. Detta förklaras delvis av att bioreaktorer för bakterier är högre än de som används för algodling. Eftersom MOB dock har en betydligt högre produktion per kvadratmeter än HOB, är detta inte den enda förklaringen. MOB uppvisar en högre volymetrisk produktionstakt jämfört med HOB (se bilaga 1), vilket möjligen kan bero på att vätgas är mindre löslig än metan. Därmed kräver odling av HOB en större reaktorvolym per producerad massenhet. Mikro- och makroalger har även en mycket lägre volymetrisk produktionstakt än både HOB och MOB (se bilaga 1).

### 6.9.4 Verklig implementering

Produktionssiffrorna i tabell 31 är baserade på den andel av fiskfodret som respektive produktionsväg förväntas bidra med. Det innebär att den totala mängden fisk som produceras i verkligheten skulle vara betydligt större än vad som anges i tabellen, om man tar hänsyn till hur mycket fisk det fullständiga fodret kan generera. I kapitel 4.5 anges vilken inblandningsgrad som makroalger, mikroalger, HOB respektive MOB kan ha i fiskfoder. Fiskodlingarna behöver därför dimensioneras för att rymma betydligt fler fiskar än vad tabell 31 visar.

Makroalger utgör det scenario som kan försörja flest människor med mat. Enligt figur 15 skulle en befolkning på 825 000 personer (motsvarande antalet anslutna till Ryaverket) kunna försörjas i 101 dagar, baserat på ett dagligt kaloribehov för en 18-24 årig medelaktiv man på 2800 kcal (se bilaga 1) (*Energi, kalorier* u. å.). Denna beräkning utgår från att fisken uteslutande matas med fiskfoder innehållande makroalger, där 20 % av den totala fiskproduktionen antas komma från makroalger. Det innebär att siffran för 825 000 personer i 101 dagar endast representerar den mängd fisk som produceras från de 20 % makroalger i fodret. Om fisk matas med detta foder, blir den faktiska fiskproduktionen betydligt högre, vilket skulle kunna försörja fler personer under längre tid. Alltså representeras mängden producerad fisk (utifrån makroalger) i resultatet endast 20 % av den faktiska produktionen (se tabell 20).

Givet det stora ytbehovet för makroalgodling är denna lösning dock inte realistisk att implementera i praktiken. Om mer yteffektiva odlingssystem kan utvecklas, skulle det däremot innebära en betydande resurs för livsmedelsförsörjning, men då i mindre skala. Samtidigt är det inte rimligt eller hållbart att konsumera så stora mängder fisk per år. Det kan därför argumenteras för att scenario 3, med MOB, skulle vara ett mer lämpligt alternativ vid verklig implementering, då det både kräver minst energi över ett år och har det minsta ytbehovet.

## 7 Slutsatser

Nedan listas studiens slutsatser.

- Fiskfoder med inblandning av makroalger (scenario 2) ger störst mängd fisk per år, med en mängd på 154 228 ton. Denna mängd fisk kan försörja 825 000 personer (antalet kopplade till Ryaverket) i 101 dagar.
- Produktion av fiskfoder med inblandning av makroalger (scenario 2) kräver minst energi per kilogram producerad fisk, med ett värde på 36 MJ/kg fisk.
- Produktion av fiskfoder med inblandning av MOB (scenario 3) kräver minst energi per år om alla scenarion antas använda det kväve och fosfor som inkommer till Ryaverket under ett års tid som går. Energibehovet ligger på 976 927 GJ.
- Odling av MOB (scenario 3) är den produktionsvägen som studerats i denna studie som har minst ytbehovet vid odling, vilket är 78 m<sup>2</sup>. Detta scenario kan även producera mest mängd biomassa per ytenhet.
- Biogasen som produceras under ett år på Ryaverket räcker varken till för att täcka metanbehovet hos MOB eller för att producera vätgas genom ångreformering till HOB, förutsatt att allt kväve och fosfor som tillförs Ryaverket per år ska utnyttjas.

## 8 Referenser

- Aas, Turid Synnøve m. fl. (sept. 2006). “Improved growth and nutrient utilisation in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed diets containing a bacterial protein meal”. I: *Aquaculture* 259.1-4, s. 365–376. ISSN: 00448486. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2006.05.032.
- Ahmad, Muhammad Talba m. fl. (nov. 2018). *Applications of microalga Chlorella vulgaris in aquaculture*. DOI: 10.1111/raq.12320.
- Ale, Marcel Tutor m. fl. (juni 2011). “Differential growth response of *Ulva lactuca* to ammonium and nitrate assimilation”. I: *Journal of Applied Phycology* 23.3, s. 345–351. ISSN: 09218971. DOI: 10.1007/s10811-010-9546-2.
- Alltech Fennoaqua och SWECO (2024). *We Feed Success-Responsibly Sustainability Report for Year 2024*. Tekn. rapport.
- Aly, Salah M. m. fl. (aug. 2023). *Chlorella in aquaculture: challenges, opportunities, and disease prevention for sustainable development*. DOI: 10.1007/s10499-023-01229-x.
- Ann Lyngå (okt. 1989). “Pilotförsök med ammoniakavdrivning på Ryaverket”. I.
- Anna Liljeblad (juli 2022). *Vad är naturgas?* URL: <https://www.energigas.se/fakta-om-gas/naturgas/vad-ar-naturgas/>.
- Aziz, Muhammad m. fl. (2013). “Enhanced high energy efficient steam drying of algae”. I: *Applied Energy* 109, s. 163–170. ISSN: 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.04.004.
- Barros, Ana I. m. fl. (okt. 2014). *Harvesting techniques applied to microalgae: A review*. DOI: 10.1016/j.rser.2014.09.037.
- Bauer, Fredric m. fl. (sept. 2013). “Biogas upgrading - technology overview, comparison and perspectives for the future”. I: *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 7.5, s. 499–511. ISSN: 1932104X. DOI: 10.1002/bbb.1423.
- Bo Thunholm m. fl. (2025). *Övergödning*. URL: <https://www.sverigesvattenmiljo.se/sa-mar-vara-vatten/2023/sammanfattningar/0/0/4>.
- Bouaboula, Houssam m. fl. (mars 2024). *Comparative review of Direct air capture technologies: From technical, commercial, economic, and environmental aspects*. DOI: 10.1016/j.cej.2024.149411.
- Bruhn, Annette m. fl. (febr. 2011). “Bioenergy potential of *Ulva lactuca*: Biomass yield, methane production and combustion”. I: *Bioresource Technology* 102.3, s. 2595–2604. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.10.010.
- Chen, Cheng m. fl. (juli 2022). *The potential and challenge of microalgae as promising future food sources*. DOI: 10.1016/j.tifs.2022.06.016.
- Cheregi, Otilia m. fl. (febr. 2019). “Microalgae biotechnology in Nordic countries – the potential of local strains”. I: *Physiologia Plantarum* 166, s. 438–450. ISSN: 13993054. DOI: 10.1111/pp1.12951.
- Choi, Hee Jeong och Seung Mok Lee (nov. 2014). “Effect of the N/P ratio on biomass productivity and nutrient removal from municipal wastewater”. I: *Bioprocess and Bio-systems Engineering* 38, s. 761–766. ISSN: 16157605. DOI: 10.1007/s00449-014-1317-z.
- Díaz, Juan Pablo m. fl. (juni 2023). “Yield and production cost of *Chlorella* sp. culture in a Fibonacci-type photobioreactor”. I: *Process Biochemistry* 129, s. 209–220. ISSN: 13595113. DOI: 10.1016/j.procbio.2023.03.028.
- Dinesh Kumar, S. m. fl. (juni 2024). *Tank cultivation of edible seaweeds: an overview of the Indian perspective for opportunities and challenges*. DOI: 10.1007/s13399-022-03729-x.

- Dolganyuk, Vyacheslav m. fl. (aug. 2020). *Microalgae: A promising source of valuable bioproducts*. DOI: 10.3390/biom10081153.
- Energi, kalorier (u. å.). URL: <https://www.livsmedelsverket.se/livsmedel-och-innehall/naringsamne/energi-kalorier>.
- Energy Transitions Commission (mars 2023). *Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy*. Tekn. rapport. URL: [https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/04/2022-053-ETC-Hydrogen-Technical-Annex-Final\\_.pdf](https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/04/2022-053-ETC-Hydrogen-Technical-Annex-Final_.pdf).
- European Commission (2025). *Circular economy*. URL: [https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy_en).
- European Commission, Directorate-General for Environment (okt. 2022). *Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning urban wastewater treatment (recast)*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0541&qid=1668778087100>.
- Facchini, Francesco m. fl. (2023). “An Environmental Analytical Model to Assess the Decarbonization Potential of Municipal Solid Waste-Based Hydrogen Production Routes”. I: *Springer Proceedings in Mathematics and Statistics*. Vol. 431. Springer, s. 387–398. ISBN: 9783031470578. DOI: 10.1007/978-3-031-47058-5\_{\\_}30.
- Fakhri, Muhammad m. fl. (nov. 2021). “Biomass, pigment production, and nutrient uptake of chlorella sp. Under different photoperiods”. I: *Biodiversitas* 22, s. 5344–5349. ISSN: 20854722. DOI: 10.13057/biodiv/d221215.
- Fasolin, L. H. m. fl. (nov. 2019). *Emergent food proteins – Towards sustainability, health and innovation*. DOI: 10.1016/j.foodres.2019.108586.
- Feron, Paul H.M. (2010). “Exploring the potential for improvement of the energy performance of coal fired power plants with post-combustion capture of carbon dioxide”. I: *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4.2, s. 152–160. ISSN: 17505836. DOI: 10.1016/j.ijggc.2009.10.018.
- Ferro, Lorenza m. fl. (aug. 2018). “Subarctic microalgal strains treat wastewater and produce biomass at low temperature and short photoperiod”. I: *Algal Research* 35, s. 160–167. ISSN: 22119264. DOI: 10.1016/j.algal.2018.08.031.
- Fortes, M D och K Lfining (1980). *Growth rates of North Sea macroalgae in relation to temperature, irradiance and photoperiod*. Tekn. rapport, s. 15–29.
- Gryaab (2025). *Kort om Gryaab*. URL: <https://www.gryaab.se/om-gryaab/kort-om-gryaab/>.
- Helbio (u. å.). *A reliable solution for CLEAN, QUIET, and EFFICIENT hydrogen GENERATION*. Tekn. rapport.
- Henrik Öhlin (2024). *Solar Foods handlas i premiärhandeln i Helsingfors - Placera.se*. URL: <https://www.placera.se/telegram/solar-foods-handlas-i-premiarhandeln-i-helsingfors-2024-09-10>.
- Hofmann, Laurie C. m. fl. (2024). *The green seaweed Ulva: tomorrow’s “wheat of the sea” in foods, feeds, nutrition, and biomaterials*. DOI: 10.1080/10408398.2024.2370489.
- Hogstad, Solbjørg m. fl. (2023). “temanord2022-564”. I: URL: <http://dx.doi.org/10.6027/temanord2022-564>.
- Hosseinzand, Hasti m. fl. (juli 2018). “Studying the drying mechanism of microalgae *Chlorella vulgaris* and the optimum drying temperature to preserve quality characteristics”. I: *Drying Technology* 36.9, s. 1049–1060. ISSN: 15322300. DOI: 10.1080/07373937.2017.1369986.

- Hu, Yaowei m. fl. (juni 2023). “Efficiency analysis of sorption-enhanced method in steam methane reforming process”. I: *Carbon Resources Conversion* 6.2, s. 132–141. ISSN: 25889133. DOI: 10.1016/j.crcon.2022.12.004.
- Humpenöder, Florian m. fl. (maj 2022). “Projected environmental benefits of replacing beef with microbial protein”. I: *Nature* 605.7908, s. 90–96. ISSN: 14764687. DOI: 10.1038/s41586-022-04629-w.
- Jakob Hydén (okt. 2019). *Fiskodling i kassar - livsmedelsproduktion med potential - Landsbygdsnätverket*. URL: <https://www.landsbygdsnatverket.se/inspiration/artiklarinspirerandinspirerandeexempel/fiskodlingikassarlivsmedelsproduktionmedpotential.5.5fa25aa016d179872d2336a8.html>.
- Jason Bailey (2018). *VATTENBRUK FOKUS PÅ ODLING AV SÖTVATTENSFISKAR I RECIRKULERANDE AKVATISKA SYSTEM (RAS)*. Tekn. rapport. Vattenbrukscentrum Ost.
- Karl-Emil Videbris (mars 2023). *Miljörapport Ryaverket 2023*. Tekn. rapport. Göteborg: Gryaab.
- Kiessling, Anders och Wenche Hansen (2024). *Akvakultur i Världen och i Sverige : produktionssystem, arter och volymer (2024)*. Tekn. rapport. DOI: 10.54612/a.5fpc6vk0j0. URL: <https://res.slu.se/id/publ/131050>.
- Koskue, Veera m. fl. (juni 2021). “Optimising nitrogen recovery from reject water in a 3-chamber bioelectroconcentration cell”. I: *Separation and Purification Technology* 264. ISSN: 18733794. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.118428.
- Lam, Man Kee och Keat Teong Lee (sept. 2014). “Cultivation of *Chlorella vulgaris* in a pilot-scale sequential-baffled column photobioreactor for biomass and biodiesel production”. I: *Energy Conversion and Management* 88, s. 399–410. ISSN: 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.08.063.
- Lantbrukarnas riksförbund (2025). *Landbaserad fiskodling*.
- Lawton, Rebecca J. m. fl. (maj 2013). “Selecting Reliable and Robust Freshwater Macroalgae for Biomass Applications”. I: *PLoS ONE* 8.5. ISSN: 19326203. DOI: 10.1371/journal.pone.0064168.
- Leger, Dorian m. fl. (april 2021). “Photovoltaic-driven microbial protein production can use land and sunlight more efficiently than conventional crops”. I: DOI: 10.1073/pnas.2015025118/-/DCSupplemental. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.2015025118>.
- Linder, Tomas (april 2019). *Making the case for edible microorganisms as an integral part of a more sustainable and resilient food production system*. DOI: 10.1007/s12571-019-00912-3.
- Livsmedelsverket (u. å.). *Röding rå » Näringsvärde | Livsmedelsdata.se*. URL: <https://www.livsmedelsdata.se/fisk-skaldjur/roeding-raa/>.
- Lubsch, A och R.A Lansbergen (2020). “seaweed\_factsheet\_nutrient\_uptake\_and\_requirement-wageningen\_university\_and\_research\_537009”. I.
- Madeira, Jonni Guiller Ferreira m. fl. (febr. 2021). “Hydrogen production from swine manure biogas via steam reforming of methane (SRM) and water gas shift (WGS): A ecological, technical, and economic analysis”. I: *International Journal of Hydrogen Energy* 46.13, s. 8961–8971. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.015.
- Matassa, Silvio m. fl. (sept. 2016). “Microbial protein: future sustainable food supply route with low environmental footprint”. I: *Microbial Biotechnology* 9.5, s. 568–575. ISSN: 17517915. DOI: 10.1111/1751-7915.12369.

- Meng, Jizhong m. fl. (aug. 2024). *Application of electro dialysis technology in nutrient recovery from wastewater: A review*. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105855.
- Mohd Rasdi, Wan Noor Athina m. fl. (maj 2022). "A novel membrane-based bubble generator for oxygen dissolution in water". I: *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* 175. ISSN: 02552701. DOI: 10.1016/j.cep.2022.108938.
- Nationalencyklopedin (2025). "alger - Uppslagsverk - NE.se". I.
- Naturhistoriska riksmuseet (mars 2025). *Havssallat, Ulva lactuca*.
- NE (2025a). *Fosfor*. URL: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/fosfor?isSearchResult=true>.
- (2025b). *Kväve*. URL: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/kv%C3%A4ve>.
- Noori, Farzaneh och Saeid Vahdat (juli 2023). "Variation of Chemical Compositions and Fatty Acids Profiles of *Chlorella* sp. Utilizing Physical Shocks". I: *Bioenergy Research* 17, s. 87–95. ISSN: 19391242. DOI: 10.1007/s12155-023-10638-y.
- ON-SITE OXYGEN SOLUTIONS Industrial* (u. å.). Tekn. rapport.
- Runefors, Marcus (u. å.). *Säker vätgashantering*. Tekn. rapport.
- Safi, Carl m. fl. (april 2014). *Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review*. DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.007.
- Sander, Kyle och Ganti S. Murthy (aug. 2010). "Life cycle analysis of algae biodiesel". I: *International Journal of Life Cycle Assessment* 15.7, s. 704–714. ISSN: 09483349. DOI: 10.1007/s11367-010-0194-1.
- Savvashe, Prashant m. fl. (dec. 2021). "High yield cultivation of marine macroalga *Ulva lactuca* in a multi-tubular airlift photobioreactor: A scalable model for quality feed-stock". I: *Journal of Cleaner Production* 329. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129746.
- Sebbahi, Seddiq m. fl. (sept. 2024). "A comprehensive review of recent advances in alkaline water electrolysis for hydrogen production". I: *International Journal of Hydrogen Energy* 82, s. 583–599. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2024.07.428.
- Shilei Zhang (maj 2023). *Solar Foods' Solein® makes its debut in Singapore's resilient food culture - Solar Foods*. URL: <https://solarfoods.com/solar-foods-solein-makes-its-debut-in-singapores-resilient-food-culture/>.
- Souza, Marcella Fernandes de m. fl. (juni 2024). "The potential of microalgae for carbon capture and sequestration". I: *EFB Bioeconomy Journal* 4, s. 100067. ISSN: 26670410. DOI: 10.1016/j.bioeco.2024.100067.
- Steinhagen, Sophie (juni 2021). *Genombrott för svensk odling av havssallat*.
- Svenskt vattenbruk (2020). *Svenskt vattenbruk - Fiskfoder*.
- Sveriges Radio (april 2011). *Odling av mikroalger kan minska utfiskningen - Klotet | Sveriges Radio*. URL: <https://www.sverigesradio.se/artikel/4466140>.
- Tolley, Joshua och Libardo Estupinan (u. å.). *Energy Consumption of Pressure Swing Adsorption vs. Vacuum Swing Adsorption-A Thermodynamic Study*. Tekn. rapport. URL: <https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?ID=C7727379&TUnit>.
- Torres-Tiji, Yasin m. fl. (mars 2020). *Microalgae as a future food source*. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2020.107536.
- Toth, Gunilla (mars 2025). *Intervju med Gunilla Toth- Universitetslektor inom institutitionen för marina vetenskaper, Göteborgs universitet*. Göteborg.
- Toth, Gunilla och Susanne Liljenström (juni 2023). *Möjligheter och hinder för en svensk algindustri*. Tekn. rapport. Göteborgs universitet.
- UNDP (2025). *Globala målen*. URL: <https://globalamalen.se/>.

- Uribe, Elsa m. fl. (juni 2019). “Effect of different drying methods on phytochemical content and amino acid and fatty acid profiles of the green seaweed, *Ulva* spp.” I: *Journal of Applied Phycology* 31.3, s. 1967–1979. ISSN: 15735176. DOI: 10.1007/s10811-018-1686-9.
- Verbeeck, Kristof m. fl. (maj 2021). “Assessing the potential for up-cycling recovered resources from anaerobic digestion through microbial protein production”. I: *Microbial Biotechnology* 14.3, s. 897–910. ISSN: 17517915. DOI: 10.1111/1751-7915.13600.
- Wulff, Angela och Ellen Schagerström (nov. 2021). *Episod 1- Algekunskap*.
- WWF (2024). *Röding, Fjällröding, Bäckeröding*.
- XOMA (2025). *FLOW - Filtrering av vätskor och organiskt avfall*. URL: <https://www.xoma.se/se/teknologi/flow/>.
- Yeh, Kuei Ling m. fl. (juni 2010). “Effect of light supply and carbon source on cell growth and cellular composition of a newly isolated microalga *Chlorella vulgaris* ESP-31”. I: *Engineering in Life Sciences* 10.3, s. 201–208. ISSN: 16180240. DOI: 10.1002/elsc.200900116.
- You, Xiaogang m. fl. (mars 2024). *Micro-nano-bubbles and their application in microalgae production: Wastewater treatment, carbon capture and microalgae separation*. DOI: 10.1016/j.algal.2024.103398.
- Zhu, Jiangyu m. fl. (jan. 2024). *Advances in industrial harvesting techniques for edible microalgae: Recent insights into sustainable, efficient methods and future directions*. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140626.
- Zoli, Michele och Jacopo Bacenetti (aug. 2025). “Energy analysis in fish aquaculture: Cumulative energy demand of different farming systems”. I: *Aquacultural Engineering* 110. ISSN: 01448609. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2025.102525.
- Øverland, Margareth m. fl. (juni 2010). *Evaluation of methane-utilising bacteria products as feed ingredients for monogastric animals*. DOI: 10.1080/17450391003691534.

## 9 Bilaga

Bilaga 1: [Klicka här](#) för att komma till bilaga 1