UNIVERSITY OF COPENHAGEN

Københavns Universitet

Klimaaftryk fra fiskeopdræt i akvakultur

Nielsen, Rasmus; Nielsen, Max

Publication date:
2020

Document version
Også kaldet Forlagets PDF

Citation for published version (APA):
Nielsen, R., & Nielsen, M., (2020). *Klimaaftryk fra fiskeopdræt i akvakultur*, 24 s., IFRO Udredning Nr. 2020/27

Download date: 06. Oct. 2026

INSTITUT FOR FØDEVARE- OG RESSOURCEØKONOMI
KØBENHAVNS UNIVERSITET

IFRO Udredning

Klimaaftryk fra fiskeopdræt i akvakultur

Rasmus Nielsen
Max Nielsen

2020 / 27

IFRO Udredning 2020 / 27

Klimaaftryk fra fiskeopdræt i akvakultur

Forfattere: Rasmus Nielsen, Max Nielsen

Faglig kvalitetssikring: Aske Skovmand Bosselmann har foretaget faglig kommentering. Ansvaret for udgivelsens indhold er alene forfatternes.

Udredningen er udarbejdet for Miljøministeriet i henhold til aftalen mellem Institut for Fødevare- og Ressourceøkonomi og Miljø- og Fødevareministeriet om forskningsbaseret myndighedsberedskab.

Udgivet december 2020

Se flere myndighedsaftalte udredninger på https://ifro.ku.dk/publikationer/ifro_serier/udredninger/

Institut for Fødevare- og Ressourceøkonomi
Københavns Universitet
Rolighedsvej 23
1958 Frederiksberg
www.ifro.ku.dk

Indholdsfortegnelse

1. Indledning 3
2. LCA-metoden 4
   2.1. Standardisering 4
   2.2. Afgrænsning 5
   2.3. Anvendte måleenheder 6
   2.4. Udvælgelse af effektkategorier 6
   2.5. Allokering af effekt til forskellige dele af processen 7
3. Litteraturgennemgang af LCA-studier for akvakultur 7
   3.1. Oversigt over studier af forskellige akvakultursystemer 7
   3.2. Oversigt over studier af anlægstyper der producerer salmonider 8
   3.3 Studier af ørredopdræt 9
   3.4. Studier af lakseopdræt 11
   3.5. Studier af akvakulturfoder 13
4. Sammenligning af LCA-studier i akvakultur, landbrug og fiskeri 17
5. Diskussion 19
   5.1. Havbrug 19
   5.2. Traditionelle dambrug 19
   5.3. Recirkuleringssystemer, modeldambrug i ferskvand 19
   5.4. Recirkuleringssystemer, RAS-opdræt af laks i saltvand 20
   5.5. Økologiske dambrug 20
   5.6. Metodisk anbefaling til fremtidige studier 20
6. Konklusion 21
7. Anbefaling 22

Referencer 23

1. Indledning

Formålet med denne analyse er at få samlet og beskrevet den tilgængelige viden om klimaaftryk (CO_2-e)[1] fra fisk opdrættet i forskellige typer akvakulturanlæg. Opgaven fokuserer på klimaaftrykket fra forskellige anlægstyper (teknologier) anvendt til opdræt af laks og ørred. Den opsamlede viden sammenlignes med andre animalske fødevareproduktioner som kvæg, svin, kylling samt fisk fanget på traditionel vis.

Udredningen er rekvireret af Miljø- og Fødevareministeriet og udarbejdet under Institut for Fødevare- og Ressourceøkonomis aftale om myndighedsbetjening i 2020. Udredningen er en gennemgang af eksisterende videnskabelig litteratur.

Fisk betragtes generelt som en klimavenlig fødevare, både når det gælder fisk opdrættet i akvakulturanlæg og fanget på traditionel vis. Klimaaftrykket varierer dog på tværs af arter, alt efter hvad de opdrættede fisk fodres med, samt i hvilken type af anlæg fisken opdrættes. For fisk fanget på traditionel vis handler det primært om fangstmetoden i form af redskabstype, da dette har betydning for den anvendte mængde af brændstof.

Det stigende fokus på klima- og miljøeffekter fra forskellige fødevareproduktioner har ført til en øget forskning og udvikling af modeller inden for dette område. Til at sammenligne klima- og miljøeffekter er den mest anvendte metode *Life Cycle Assessment* (LCA), som derfor udgør grundlaget for analysen i dette notat. LCA har gennemgået en større metodisk udvikling gennem de sidste 20 år, som gør det muligt at kortlægge og sammenligne både klima- og miljøeffekter for forskellige fødevareproduktioner fra vugge til grav. Det skyldes især en mere standardiseret tilgang med udviklingen af ISO-standarder (ISO 2006a; ISO 2006b) og en bedre fælles forståelse af afgrænsningen for, hvad der medtages i analyserne. Ved at kigge på de forskellige produktioner i et livscyklusperspektiv kan man sikre, at klima- og miljøindsatsen koncentreres, der hvor det giver den størst mulige gevinst i forhold til klima, miljø og økonomi. Mængden af publicerede videnskabelige artikler, der anvender denne metode, har derfor også været stærkt stigende de senere år. Selv om der er udviklet en fælles ramme for studierne, skal det stadig understreges, at hvert empirisk studie er unikt, da der foretages en række valg undervejs i de enkelte studier, og empirien er unik. Der arbejdes på at harmonisere LCA-metoden yderligere for at sikre sammenlignelighed på tværs af studier og sektorer.

Hovedelementerne i dette notat er:

- En kort beskrivelse af LCA som metode, samt afgrænsning
- Et litteraturstudie med eksisterende viden på akvakulturområdet om klimaeffekter (CO_2-e) fordelt på anlægstyper med fokus på arterne ørred og laks samt foder
- En sammenligning med andre fødevareproduktioner
- Anbefaling til det videre arbejde med afdækning af klimaaftrykket fra den danske akvakultursektor.

Analysen i notatet er baseret på et litteraturstudie af videnskabelige artikler, der anvender LCA-metoden på akvakulturområdet med fokus på klimaeffekten (CO_2-e) fordelt på forskellige anlægstyper. Der anvendes derfor kun i mindre omfang såkaldt grå litteratur (rapporter og ikke-publicerede artikler), da disse ikke er fagfællebedømte.

[1] CO_2-ækvivalenter (CO_2-e) er en standardenhed til måling af *carbon footprint*. Ideen er at udtrykke virkningen fra alle drivhusgasser i form af den mængde CO_2, der ville skabe den samme mængde opvarmning. På den måde kan et CO_2-fodaftryk, der består af mange forskellige drivhusgasser, udtrykkes som et enkelt tal.

2. LCA-metoden

På baggrund af en overordnet gennemgang af studier, der fokuserer på klima- og miljøeffekter fra fødevaresektoren, kan det konkluderes, at LCA er den mest anvendte og anerkendte metode til at foretage en sådan sammenligning. Derfor tages der udgangspunkt i denne metode, og det er inden for rammerne af LCA, at klima- og miljøeffekter fra fødevaresektoren vurderes og sammenlignes.

LCA er en metode der anvendes til at undersøge et produkts klima- og miljøbelastning *fra vugge til grav*. Ved anvendelse af metoden gennemgås fremstillingsprocessen af produktet, herunder hvordan *underprodukter*, der indgår i selve fremstillingen af hovedproduktet, påvirker klima og miljø. Herefter ses der på forarbejdning og transport af produktet til den endelige forbruger. Til sidst vurderes det, hvordan restprodukter bortskaffes eller genbruges. Således undersøges det trin for trin, hvor meget et produkt påvirker klima og miljø i hele produktets *livsforløb*. Ofte identificerer litteraturen kun dele af produktets livsforløb.

2.1. Standardisering

Standardisering af LCA-metoden muliggør sammenligninger på tværs af LCA-studier af forskellige produkter ved anvendelse af ISO-standarder – ISO 14040: ISO (2006a) og ISO 14044: ISO (2006b) – der beskriver rammerne og principperne for gennemførelse af LCA-studier. Efter disse ISO-standarder udføres en LCA i fire forskellige faser:

1. **Mål og systemafgrænsning**
   er en beskrivelse af den **funktionelle enhed**, der præcist definerer og kvantificerer det produkt, der leveres i produktionsprocessen, samt muliggør sammenligning af alternative varer eller tjenester. **Systemafgrænsning** er antagelser og begrænsninger, som afgrænser hvilke processer der skal indgå i analysen. **Datakvalitetskrav** specificerer de data, der anvendes, og hvilke afgrænsninger (tid og studieområde) der er anvendt. **Fordelingsmetoder** beskriver fordelingen af klima- og miljøbelastning fra en produktionsproces, hvis flere produkter eller funktioner deler den samme proces. **Effektkategorier** er eksempelvis CO_2-e, eutrofiering, toksicitet og energiforbrug.

2. **Beholdningsanalyse**
   indeholder oprettelse af beholdningsstrømme fra og til naturen for et produktionssystem. Strømme kan inkludere tilførsel af råmaterialer, vand, energi og påvirkning af luft, jord og vand. Input- og outputdata, der er nødvendige for analysen, skal indsamles fra hele produktionssystemet. Dataene skal være relateret til den funktionelle enhed, der er defineret i mål- og systemafgrænsningen. Beholdningsstrømme kan være meget omfattende afhængigt af systemafgrænsningen. Ud over den individuelle empiriske dataindsamling for det specifikke studie anvendes ofte internationale/nationale databaser eller datasæt til at trække den nødvendige information. Her skal man sørge for, at datakilden korrekt afspejler regionale eller nationale forhold.

3. **Konsekvensanalyse**
   Her evalueres betydningen af potentielle klima- og miljøeffekter ud fra de valgte effektkategorier. Påvirkninger kan fordeles på de forskellige faser af udvikling, produktion, brug og bortskaffelse af et produkt. De første faser inkluderer effekter fra udvinding af råmaterialer, fremstilling (omdannelse af råmaterialer til selve produktet) samt transport af produktet til et marked. Drift af produktionssystem (såsom energi, vand osv.) og vedligeholdelse, renovering eller reparation skal også inkluderes. Til sidst vurderes effekterne fra forbruget af selve produktet og bortskaffelsen i form af behandling af affald eller genanvendelige materialer.

4. **Fortolkning**
   Fortolkningen bør i henhold til ISO 14040 indeholde en kritisk gennemgang af væsentlige problemstillinger i de to faser, *Life Cycle Inventory* (LCI, dataindsamling) og *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA, effekter) med henblik på en kontrol af studiets fuldstændighed, følsomhed og konsistens samt validiteten af konklusioner, begrænsninger og anbefalinger. Selve målet med fortolkningen er at identificere det alternativ, der har den mindste klima- og miljømæssigt negative indflydelse på jord-, hav- og luft-ressourcer.

2.2. Afgrænsning

Som beskrevet ligger et væsentligt element i analysen i selve LCA-afgrænsningen. Der er således stor forskel på, om man ser på hele livsforløbet fra fremstilling til bortskaffelse, eller om man nøjes med (i) at se på fremstillingen af produktet, (ii) inddrager effekterne fra produktionen af fysiske materiel som danner grundlag for produktionen, (iii) og om effekterne fra transport til den endelige forbruger medtages.

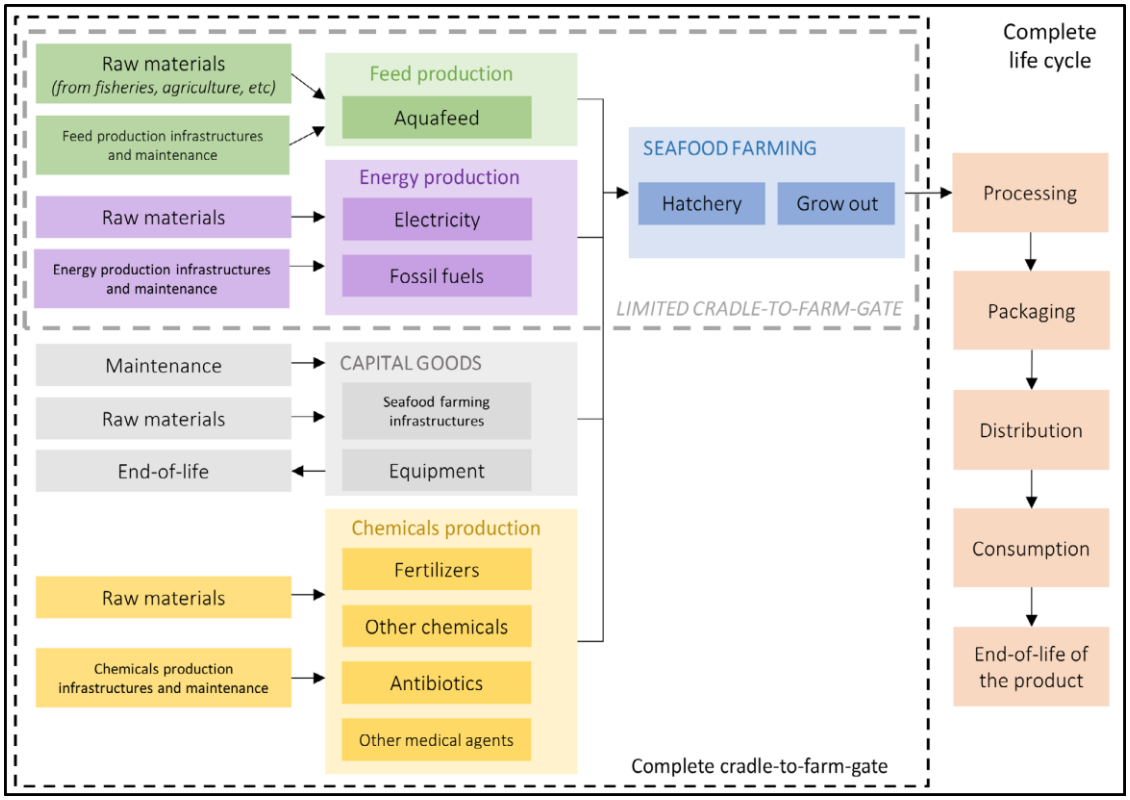
Nedenfor beskrives ud fra Bohnes et al. (2019) de tre trin (afgrænsninger), som oftest indgår i de gennemgåede akvakulturstudier. Trinene er illustreret i figur 1.

I det første trin (*Limited cradle-to-farm-gate*) analyseres effekterne af den løbende (variable input og omkostninger) produktion og dens konsekvenser for klima, miljø og eventuelt økonomi. Et af de vigtigste input i akvakultursammenhæng er foderet. En god illustration af de effekter, der inddrages i analysen, kan derfor vises for dette input. I et foder, hvor der både indgår marine ingredienser (fiskemel og olie) og plantebaserede ingredienser (soja m.m.), beregnes effekten fra både fiskeriet og landbrugets produktion af ingredienserne til foderet samt den videre forarbejdningsproces, indtil man har selve foderet, der er klar til anvendelse i akvakulturproduktionen. Herunder inddrages også de klimaeffekter, der er relateret til den jord, der anvendes i landbrugsproduktionen, eller ændringer i arealanvendelsen, for eksempel afskovning ved dyrkning af soja m.m. Yderligere inddrages alle andre relevante ressourcer, der anvendes til den løbende frembringelse af produktet, som energi, vandforbrug, m.m.

I det andet trin (*Complete cradle-to-farm-gate*) inddrages effekterne af de faste anlæg (fysisk materiel og faste omkostninger). Her indgår også en vurdering af materialer brugt til opførelse af selve produktionsanlægget eller bure og deres beregnede levetid, så effekterne fra disse komponenter kan fordeles ud på den valgte funktionelle enhed (ton fisk i levende vægt) produceret med det fysiske materiel. En ting, som også oftest medtages her, er anvendelsen af hjælpestoffer som kemikalier og medicin, der kan have uønskede effekter for miljøet.

Opdelingen mellem trin 1 og 2 er ikke altid helt klar, og dette kan gøre sammenligninger vanskelige, men hvis de grundlæggende data for studierne er tilgængelige, kan der foretages tilpasninger, så sammenligningerne bliver mere valide. Det skal dog understreges, at sådanne tiltag kan være tidskrævende.

I det sidste trin (*Complete life cycle*) inddrages også de effekter, som produktet har, efter at den primære produktion er afsluttet. Her indgår effekterne fra selve forarbejdningen af fisken i forarbejdningsindustrien til et bestemt produkt (for eksempel filet, røget eller frosset) og forbruget af emballage, transport, opbevaring og distribution, indtil produktet når den endelige forbruger. Som afslutning undersøges der, hvordan man behandler restprodukter og affald. Her kan der være negative effekter til at destruere restprodukterne og affaldet eller positive effekter ved genbrug.



Figur 1. *Afgrænsning af LCA for akvakultur i tre trin (hovedkomponenter)*

Note: Afgrænsningerne er for henholdsvis *cradle-to-farm-gate*-systemet den grå punkterede linje, for *complete cradle-to-farm-gate*-systemet den sorte punkterede linje og for *complete life cycle*-systemet den fuldt optrukne sorte linje. Illustration fra Bohnes et al. (2019).

2.3. Anvendte måleenheder

Den funktionelle enhed beskriver den måleenhed, der anvendes i studiet, hvor fokus i denne analyse er mængden af udledt CO_2-e per produceret ton levende fisk. Det er her vigtigt, at enhederne, der anvendes til at måle udslippet, er sammenlignelige. Påvirkningen kan opgøres på forskellige måder og på forskellige faktorer, hvilket kan gøre en direkte sammenligning mellem studier svær. Der anvendes således i fødevareproduktionen både mål, som beskriver effekten per produceret ton, effekten per ton spiseligt slutprodukt, effekten per ton benfrit produkt med flere. For at sammenligne studierne, der anvender forskellige enheder, er der udregnet standardiserede omregningsfaktorer.

2.4. Udvælgelse af effektkategorier

I analyserne anvendes ofte flere effektkategorier til at måle klima- og miljøeffekter fra en bestemt fødevareproduktion. Til at belyse klimaeffekten anvendes oftest *Carbon Footprint* i CO_2-ækvivalenter (CO_2-e), hvor alle former for *Green House Gases* (GHG) omregnes til CO_2-ækvivalenter eller den samlede energianvendelse (MJ). Til måling af miljøeffekten anvendes blandt andet udledning af næringssalte, som kan medføre eutrofiering, hvor udledningen af fosfat (PO_4) oftest anvendes, men også udledning af kvælstof (N) og organisk materiale. Forsuring måles ved udledning af svovldioxid (SO_2), som ofte stammer fra energiforbrug af fossile brændsler. Yderligere måles anvendelsen af knappe ressourcer som ferskvands-forbrug samt anvendelse af landareal til foderproduktion. Effektkategorierne udvælges alt efter, hvilke effekter der er vigtigst at få belyst i analysen.

2.5. Allokering af effekt til forskellige dele af processen

Hvis der forekommer biprodukter i produktionen, som anvendes i andre produktioner, skal disse også tillægges en vægt. Vægten kan tildeles efter vægt (masseallokering) eller efter værdi (økonomisk allokering) (Winther et al. 2020). Som et eksempel kan nævnes produktionen af akvakulturfoder, hvor der kan være biprodukter fra fisk, soja eller andre ingredienser. Det kan også være senere i processen, når produktet tilberedes i form af afskær som igen kan anvendes til fiskemel og -olie eller lignende. Hvis biprodukter anvendes i andre produktioner, nedsættes klimaaftrykket for hovedproduktet. Det er derfor væsentligt for en korrekt beregning af hovedproduktets aftryk at have viden om dette, samt at mulighederne for en videre udnyttelse af biprodukter anvendes.

3. Litteraturgennemgang af LCA-studier for akvakultur

3.1. Oversigt over studier af forskellige akvakultursystemer

Dette afsnit baseres på Bohnes et al. (2019), som gennemgår 65 LCA-studier (artikler og rapporter) af forskellige akvakulturproduktioner. Der indgår flere fiskearter og typer af opdrætsanlæg, men 42 procent af LCA-studierne er baseret på analyser af salmonider. I metastudiet gennemgås forskelle i metodevalg og data, som kan have indflydelse på de endelige resultater.

De forskellige måleenheder fra studierne omregnes til en fælles sammenlignelig enhed svarende til effekten af at producere 1 ton levende vægt (LW), da 78 procent af studierne anvender denne enhed. Til gengæld foretages der ikke en tilpasning af afgrænsningerne i studierne (trin 1, 2 eller 3), hvilket derfor er en kilde til usikkerhed. Dog skal det nævnes, at 39 af studierne afgrænses af trin 2, *Complete cradle-to-farm-gate*, hvilket er sammenligneligt med studiet foretaget af Philis et al. (2019) for forskellige anlægstyper i akvakultur, som præsenteres efter dette studie.

De anvendte effektkategorier er klimaeffekt (kg CO_2-e per ton LW), forsuring (kg SO_2 per ton LW), eutrofiering (kg PO_4 per ton LW) og samlet energiforbrug (MJ per ton LW). Yderligere to effektkategorier indgår, som er vandforbrug i relation til den producerede biomasse og inputs til nettoprimærproduktionen, som afdækker de væsentligste komponenter i primærproduktionen. Der ses også på intensiteten af akvakulturproduktionen i de 179 studier, der indgår, hvor der sammenlignes mellem intensive (53 procent), semi-intensive (22 procent) og ekstensive (14 procent) anlæg (Bohnes et al. 2019).

Tabel 1. *Gennemsnitlig effekt af akvakulturproduktion (mange arter og anlægstyper) per ton levende vægt*

	CO_2-e	SO_2	PO_4	MJ	*FCR
Gennemsnit	4.371	31	81	67.872	1,6
MAX	31.400	260	1411	353.000	18,0
MIN	-167	0,3	-32	1.700	0,1
'1. kvartil	2.072	14	32	30.500	1,2
'3. kvartil	4.658	36	74	70.700	1,7

* FCR er Foderkonverteringsraten.
Kilde: Bohnes et al. (2019)

Hovedkonklusionen fra studiet er, at akvakulturproduktionen i gennemsnit udleder 4.371 kg CO_2-e per produceret ton i levende vægt. Yderligere ses det, at afstanden mellem 1. og 3. kvartil er relativt lille og derfor

giver en god indikation af, at resultaterne er robuste, når det tages i betragtning, at der indgår mange arter og anlægstyper.

Foder er det vigtigste input til produktionen i 86 procent af studierne (der indgår også muslinger m.m., som ikke anvender foder). Yderligere er foder den vigtigste årsag til forsuring (63 procent), foder er det input, der anvender mest energi (58 procent), og dermed også det input, der bidrager mest til CO_2-e-udledningen (56 procent). Foderkonverteringsraten (FCR) har derfor også afgørende betydning for energiforbruget (35 procent).

I 75 procent af studierne er det i primærproduktionen, at den største andel af vand anvendes, og for 72 procent af studierne er selve primærproduktionen den største kilde til eutrofiering. Der er således ikke tvivl om, at det er her, at indsatsen for at begrænse vandforbrug og udledningerne af kvælstof og fosfor m.m. skal fokuseres.

I forhold til anlægstyperne konkluderes det, at de mest intensive anvender mere energi og dermed har en større klimaeffekt (udledning af CO_2-e), men at de til gengæld har bedre mulighed for at kontrollere lokale forureningseffekter som eutrofiering og forsuring. Det nævnes også, at energisammensætningen (anvendelsen af olie, kul, gas eller vind og sol m.m.) har væsentlig betydning for klimaeffekten.

Det pointeres herudover, at alle studier er kontekstafhængige med hensyn til art, produktionsmetode, anlægstype, fodersammensætning, afgrænsning, produktionsland, valg af effektkategorier etc. Derfor gennemgås i de følgende afsnit de mest relevante anlægstyper og arter for den danske akvakultursektor.

3.2. Oversigt over studier af anlægstyper der producerer salmonider

Dette afsnit baseres på Philis et al. (2019), som gennemgår 24 LCA-studier (artikler og rapporter), der fokuserer på opdræt af salmonider i forskellige typer af produktionsanlæg samt deres foderkonverteringsrate (FCR). For at sikre et sammenligneligt grundlag afgrænses studierne ved trin 2, *Complete cradle-to-farm-gate*. Yderligere omregnes de forskellige måleenheder fra studierne til en fælles enhed, som måler effekten per ton produceret fisk i levende vægt (LW).

De fire mest anvendte effektkategorier i studierne danner rammen om sammenligningen, som er klimaeffekt (kg CO_2-e per ton LW), forsuring (kg SO_2 per ton LW), eutrofiering (kg PO_4 per ton LW) og samlet energiforbrug (MJ per ton LW). Yderligere sammenholdes disse fire effekter med den beregnede FCR i de enkelte studier for at synliggøre effekten fra denne parameter.

Anlæggene i studiet grupperes på fire hovedtyper af anlæg: 1) Lukkede havbrug, 2) Traditionelle åbne dambrug på land, 3) Traditionelle åbne havbrug og 4) Recirkulerede akvakultursystemer (RAS-anlæg).

Tabel 2. *Gennemsnitlig effekt fordelt på effektkategorier per produceret ton, levende vægt*

Anlægstype/effekt	CO_2-e	SO_2	PO_4	MJ	FCR
1) Lukket havbrug	2.404	15,1	26,7	54,620	1,262
2) Åbne dambrug	2.613	16,3	50,6	75,943	1,124
3) Åbne havbrug	2.933	18,7	47,3	37,913	1,256
4) RAS-anlæg	6.414	26,7	17,3	133,220	1,125

Kilde: Philis et al. (2019)

Konklusionen er, at de havbaserede anlæg og de traditionelle dambrug på land er de mest energieffektive (MJ). Dette afspejles også i deres CO_2-e-påvirkning, hvor de har en udledning på under 3.000 kg Co2-e, mens RAS-anlægget har en mere end dobbelt så høj udledning på 6.400 kg CO_2-e og dermed klart det største

klimaaftryk. CO_2-e-udledningen har også en sammenhæng med forsuringseffekten (SO_2), hvor RAS-anlæggene igen klarer sig dårligst. I studiet understreges det, at energisammensætningen har stor betydning for de landbaserede anlægs klimaaftryk, og at en ændret sammensætning kan reducere klimaaftrykket.

Miljøeffekterne i form af eutrofiering er til gengæld lavest fra RAS-anlæg og lukkede anlæg generelt, hvor der er mulighed for at begrænse næringsstofudledningen. De landbaserede anlæg har en lavere FCR end havbaserede anlæg, hvilket kan forklares med den større kontrol over produktionsprocessen på land. Det er dog værd at bemærke, at FCR svinger meget for de forskellige typer af RAS anlæg. Det ses ikke en systematisk sammenhæng mellem FCR og de øvrige klima- og miljøeffekter, som ellers var forventet, da en lavere FCR alt andet lige burde medføre et lavere klima- og miljøaftryk. At dette ikke er tilfældet her kan skyldes de forskellige studiers anvendte metoder og indsamling af data for specielt det anvendte foder i anlæggene.

3.3 Studier af ørredopdræt

Meta-studierne er baseret på en række artikler, som analyserer LCA-effektkategorier for opdræt af ørred i en række lande. Resultaterne fra disse fremgår separat af tabel 3 med klimaeffekt og eutrofieringseffekt med henblik på at vurdere, hvilke studier der gennemgår produktioner, som minder om dansk ørredopdræt.

Det ældste LCA-studie (Grönroos et al. 2006) fokuserer på finsk ørredopdræt i havbrug i udgangssituationen før 2006 og analyserer forskellige scenarier af foder og opdrætssystemer. Finsk ørredopdræt foregår typisk i mindre, kystnære havbrug. LCA-analysen inkluderer effekter både fra drift og etablering.

Grönroos et al. (2006) finder en klimaeffekt på 652 kg CO_2-e per produceret ton ørred (hel vægt) samt en eutrofieringseffekt på 8 kg PO_4 per ton ørred. Endvidere finder de, at både klima- og eutrofieringseffekten følger foderkoefficienten, det vil sige jo højere foderkoefficient, desto større udledning af CO_2-e og PO_4. For det tredje finder de, at foder iblandet soja reducerer både CO_2-e og PO_4 i forhold til foder bestående udelukkende af fiskemel og -olie, idet dette studie ikke indregner effekten af eventuel afskovning af landområder til dyrkning af soja. Både klima- og eutrofieringseffekt kan således reduceres ved at forbedre foderkoefficienten samt ved at bruge foderblandinger med et vist indhold af soja. Lukkede flydende bure kan reducere PO_4, men vil føre til stigende CO_2-e-udledning, da vand pumpes ind i de lukkede bure. På grund af pumpning af fiskeslam er dette også tilfældet for tragtsystemer, hvor næringsstoffer opsamles under burene via en udspændt tragt. Endelig giver indpumpning af saltvand til damme samme effekt, men med en betydelig forøgelse af klimaeffekten til 2.496 kg CO_2-e per ton ørred.

Grönroos et al. (2006) identificerer også kvælstofeffekten, som i udgangssituationen udgør 60 kg per ton ørred. Endelig findes i udgangssituationen, at 517 ud af de 651 kg CO_2-e per ton ørred stammer fra foder, svarende til 80 procent, samt at 7,3 ud af 7,4 kg PO_4 per ton ørred, svarende til 97 procent stammer fra primærproduktionen.

Aubin et al. (2009) og Chen et al. (2015) har gennemført LCA-studier af ørredopdræt i Frankrig. Analyserne inkluderer drift og etablering indtil videresalg i første omsætningsled. Aubin et al. (2009) finder en klima- og eutrofieringseffekt på henholdsvis 2.753 og 66 kg per produceret ton ørred. Endvidere finder de, at 2.020 kg (73 procent) af klimaeffekten stammer fra foderet, og at 61 kg af eutrofieringseffekten stammer fra primærproduktionen (92 procent). Chen et al. (2015) gennemførte LCA-analysen separat for henholdsvis portionsstørrelsesørreder, ørreder større end 2 kg samt en kategori af både ørreder af mellemstørrelse og ørreder af blandet størrelse. Klimaffekten identificeres til 2.312-2.642 kg CO_2-e per ton ørred i de tre kategorier af fiskestørrelse, hvor de tilsvarende eutrofieringseffekter er 60-73 kg PO_4 per ton ørred. Artiklen finder således ikke betydelig forskel i hverken klima- eller eutrofieringseffekt mellem de forskellige

fiskestørrelser. Samtidig er både klima- og eutrofieringseffekt fra de to studier på nogenlunde samme niveau, men noget større end i det finske studie.

Tabel 3. *Klima- og eutrofieringseffekt af ørredopdræt, kg CO_2-e og PO_4 per produceret ton ørred, levende vægt*

Studie	Land	CO_2-e	PO_4
Grönroos et al. (2006)	Finland		
Udgangspunkt med FCR[1]=1,26		652	7
1. Udgangspunkt, FCR=0,90		510	5
2. Udgangspunkt, FCR=1,53		770	10
3. Udgangspunkt, sojafoder		602	5
4. Lukkede flydende bure		913	3
5. Tragtsystem		754	6
6. Indpumpning af saltvand til damme		2.496	5
Aubin et al. (2009)	Frankrig		
Gennemstrømning		2.753	66
- heraf foder		2.020	5
- heraf primærproduktion		0	61
Samuel-Fitwi et al. (2013a)	Tyskland, Danmark		
1. Forøget opdræt på mere land i Tyskland		767	60
2. Forøget opdræt større tæthed i Tyskland		900	60
3. Forøget opdræt på mere land i Danmark		2.552	60
4. Forøget opdræt større tæthed i Danmark		2.550	60
Samuel-Fitwi et al. (2013b)	Tyskland, Danmark		
1. Ekstensivt i Tyskland		2.239	60
- heraf foder		2.156	2
- heraf primær produktion		0	58
2. Intensivt i Tyskland		3.561	60
- heraf foder		1.640	2
- heraf primær produktion		0	58
- heraf el		1.890	0
3. Recirkulering i Danmark		13.622	4
- heraf foder		1.545	2
- heraf el		12.056	2
Chen et al. (2015)	Frankrig		
1. Portionsstørrelse (250-400 g)		2.412	63
2. Mellemstørrelse og blandet (200 g - 3 kg)		2.642	73
3. Store (> 2 kg.)		2.312	60
Dekamin et al. (2015)	Iran		
1. Gennemstrømning		1.157	71
2. Delvis lukket recirkulering		6.380	136
3. Lukket recirkulering		6.102	9

[1] FCR er foderkoefficient, svarende til hvor mange kg foder der skal til for at producere 1 kg hel fisk.
Kilder: Grönroos et al. (2006), Aubin et al. (2009), Samuel-Fitwi et al. (2013a; b), Chen et al. (2015) og Dekamin et al. (2015).

To studier af Samuel-Fitwi et al. (2013a; b) undersøger effekten af forøget opdræt til at imødegå stigende efterspørgsel efter ørred i portionsstørrelse i Tyskland. Det forøgede opdræt antages at ske både i Tyskland og Danmark. Analysen inkluderer drift. Samuel-Fitwi et al. (2013a) gennemfører en scenarieanalyse, hvor det forøgede opdræt opnås dels via brug af mere land (flere damme), dels via en større tæthed af fisk i eksisterende damme. De finder en klimaeffekt på 767 og 900 kg CO_2-e per produceret ton fisk ved forøget opdræt i Tykland i form af henholdsvis anvendelse af flere damme og større tæthed. Imødegås den stigende tyske efterspørgsel ved større produktion i Danmark, er de tilsvarende tal 2.552 og 2.550 kg CO_2-e per ton ørred henholdsvis ved brug af flere damme og større tæthed. De større danske tal skal ses i sammenhæng med både at de danske dambrug er større og mere intensive end de tyske og derfor anvender større pumper i større omfang, samt at tætheden i dammene er større. Der er ikke forskel i den identificerede eutrofieringseffekt.

Samuel-Fitwi et al. (2013b) finder at klimaeffekten af ekstensivt og intensivt ørredopdræt i Tyskland er henholdsvis 2.239 og 3.561 kg CO_2-e per ton ørred, samt at eutrofieringseffekten er 60 kg PO_4 per ton ørred i begge systemer. Som i de øvrige studier stammer eutrofieringseffekten næsten udelukkende fra primærproduktion. Klimaeffekten i ekstensivt opdræt bekræfter ovenstående studier ved at stamme næsten udelukkende fra foder, hvorimod klimaeffekten i intensivt dambrug stammer både fra foder, med 1.640 kg, og fra brug af el, med 1.890 kg per produceret ton ørred. Dette svarer til henholdsvis 46 og 53 procent.

Klima- og eutrofieringseffekten af at imødekomme den tyske efterspørgsel ved ørredopdræt i recirkulerede danske dambrug undersøges også. Der identificeres en klimaeffekt på 13.622 kg CO_2-e per ton ørred og en eutrofieringseffekt på 4 kg PO_4 per ton ørred. Eutrofieringseffekten i danske recirkulerede dambrug er således meget beskeden. Eutrofieringseffekten er 15 gange højere i de tyske ekstensive og intensive dambrug. Klimaeffekten er omvendt betydelig og væsentligt større end i alle øvrige studier. Samtidig afspejles, at 12.056 kg CO_2-e per ton ørred stammer fra el, hvor 1.545 kg stammer fra foder. Dette svarer til 88 procent fra elforbrug og 11 procent fra foder. Den høje klimaeffekt fra recirkulerede danske dambrug skal dog ses i sammenhæng med en løbende udvikling henimod en stadig større andel af fornybar energi, herunder fra vindmøller, siden studiet blev gennemført.

Dekamin et al. (2015) gennemførte et LCA-studie af ørred opdrættet i gennemstrømningsanlæg, delvis recirkulering og fuld recirkulering i Iran. Analysen inkluderer effekter fra drift. Klimaeffekten identificeres til henholdsvis 1.157 kg, 6.380 kg og 6.102 kg CO_2-e per ton ørred for de tre typer anlæg, hvor eutrofierings-effekten i disse udgør henholdsvis 71 kg, 136 kg og 9 kg PO_4 per ton ørred. Studiet bekræfter de øvrige studier i både den lave eutrofieringseffekt i fuldt recirkulerede dambrug samt den forholdsvis høje klimaeffekt i delvist og fuldt recirkulerede anlæg.

Samlet identificerer LCA-studierne af ørred klimaeffekter i størrelsesordenen 652-13.622 kg CO_2-e per produceret ton ørred og eutrofieringseffekter i intervallet 4-66 kg PO_4 per ton ørred. Klimaeffekten er beskeden for havbrug og dambrug med gennemstrømning og er for disse primært forårsaget af foder. Klimaeffekten stiger med brugen af pumper og er væsentlig specielt for recirkulerede anlæg. På fuldt recirkulerede dambrug er elforbruget den vigtigste faktor, der påvirker klimaeffekten, hvor eutrofierings-effekten er meget beskeden. Der ses således en situation, hvor recirkulering kan reducere eutrofierings-effekten, men samtidig forårsager en klimaeffekt. Klimaeffekten kan dog reduceres ved stigende anvendelse af fornybar energi.

3.4. Studier af lakseopdræt

Metastudierne er baseret på en række artikler, som analyserer LCA-effektkategorier for opdræt af laks i en række lande. Nye resultater samt resultater fra de mest relevante studier fremgår separat af tabel 4 med

klima- og eutrofieringseffekt med henblik på at vurdere, hvilke studier der beskriver produktioner, som minder om den danske havbrugsproduktion og produktion i RAS-anlæg af laks.

Tabel 4. *Klima- og eutrofieringseffekt af lakseopdræt, kg. CO_2-e og PO_4 per produceret ton laks, levende vægt*

Studie	**Land**	**CO_2-e**	**PO_4**	*** Nyt energimix**
Pelletier et al. (2009)				
Havbrug	Norge	1.790	41,0	
	UK	3.270	62,7	
	Canada	2.370	74,9	
	Chile	2.300	51,3	
Ayer og Tyedmers (2009)	Canada	90%, hydro		60%, hydro
Havbrug		2.073	35,3	2.073
Lukket havbrug (Bag)		1.900	31,8	2.250
Åbent landbaseret		2.770	29,9	5.410
		77%, kul		
RAS ferskvand, Arctic char		28.200	20,1	10.300
Winther et al. (2009; 2020)	Norge			
Havbrug 2009		2.000		
Havbrug 2017 (base)		5.300		
McGrath et al. (2015)	Canada			
Lukket havbrug (Solid walls)		3.874		
Chinook salmon				
Liu et al. (2016)				90%, hydro
RAS (Alm. el-mix og Grønt el-mix)	USA	7.010		3.730
Havbrug	Norge	3.390		
Song et al. (2019)	Kina			
RAS		16.700		

* Nyt energimix anvendes i flere studier for at synliggøre effekten af en ændret energisammensætning end den oprindeligt anvendte i produktionsanlæggene.
Kilder: Pelletier et al. (2009), Ayer og Tyedmers (2009), Winther et al. (2009; 2020), McGrath et al. (2015), Liu et al. (2016), Song et al. (2019).

Ved gennemgangen af LCA-studier for laks bør der især lægges mærke til følgende:

Pelletier et al. (2009) gennemgår i deres studie opdræt af laks i havbrug i de fire største producentlande Norge, UK, Canada og Chile. Afgrænsningen af analysen er *cradle-to-farm-gate* for et ton laks i levende vægt. Konklusionen er, at foderet bidrager med mere end 90 procent af CO_2-e-påvirkningen i alle fire lande, mens eutrofiering hovedsagligt sker ved udledninger fra anlæggene. Norge klarer sig bedst i sammenligningen på alle parametre, da de har den mest effektive sektor. Udledningen af CO_2-e varierer fra 1.790-2.300 kg, mens udledningen af næringsstoffer (PO_4) går fra 41-75 kg.

I Ayer og Tyedmers (2009) er analysen fokuseret på forskellige anlægstyper til lands og til havs for at vurdere anlægstypernes forskellige påvirkning af klima og miljø. Konklusionen er, at de havbaserede anlæg er de mest klimavenlige (1.900-2.073 kg CO_2-e), men til gengæld er påvirkningen af næringsstoffer PO_4 højere. For det landbaserede RAS-anlæg er CO_2-e udledningen helt oppe på 28.200 kg CO_2-e per produceret ton. Af dette udgør elektricitetsproduktionen hele 84 procent af udledningen, da energisammensætningen i det

analyserede anlæg primært er baseret på kul (77 procent), hvor de øvrige anlæg i analysen opererer med en energisammensætning med 90 procent vandkraft. I studiet gennemføres en følsomhedsanalyse, hvor energisammensætningen ændres for alle anlæg til den gennemsnitlige canadiske sammensætning (61 procent vandkraft, 18 procent kul, 13 procent atomkraft, 4 procent olie og 4 procent naturgas). Det betyder, at RAS-anlæggets påvirkning falder til næsten en tredjedel, 10.300 kg CO_2-e. Yderligere skal det nævnes, at RAS-anlægget producerer *arctic char* (fjeldørred/rødding), mens de øvrige producerer laks.

I rapporter fra SINTEF (Winther et al. 2009; 2020) gennemgås udledningen af CO_2-e fra den norske fiskeri- og akvakultursektor med omtrent 10 års mellemrum. Rapporterne udgør et væsentligt bidrag til at vurdere udviklingen inden for LCA mellem de to udgivne rapporter, da den metodiske tilgang har ændret sig. En væsentlig pointe fra den nyeste rapport er, at aftrykket fra de marine ingredienser i foderet er aftagende, mens aftrykket fra de landbaserede ingredienser er stigende. Dette skyldes især en metodeændring, hvor arealanvendelsen (*land use*) for de landbaserede ingredienser tillægges langt større vægt i CO_2-e-beregningerne. Hvis nye arealer (de sidste 20 år) inddrages til produktion (for eksempel til soja), indregnes klimaeffekterne i beregningerne. Desuden er fiskerisektoren blevet mere effektiv og udleder mindre CO_2-e.

Ved gennemgangen af de enkelte input til havbrugsproduktionen i Norge i 2017 bliver det konkluderet, at foder alene står for 85 procent af den udledte mængde af CO_2-e. Derudover stod energiforbrug på anlægget samt fragt af materiel til og fra anlægget for yderligere 9 procent af udledningerne. Således kan hele 94 procent henledes til disse input. Yderligere understreges det, at den ændrede CO_2-e-udledning mellem rapporterne udgivet i 2009 (2.000 kg CO_2-e) og 2020 (5.300 kg CO_2-e) hovedsagelig skyldes en ændring i metoden, hvor især inddragelsen af landanvendelsen ved sojaproduktion samt mikroingredienser (farvestof m.m.) i foderet påvirker den samlede CO_2-e-udledning.

McGrath et al. (2015) analyserer et lukket system i havet, hvor vand pumpes ind og suppleres med ilt. Organisk materiale, der bundfælles, pumpes på land og komposteres. Systemet er således en mellemting mellem åbne havbrug og fuldt lukkede systemer. Den samlede CO_2-e-udledning fra anlægget i drift blev opgjort til 3.874 kg CO_2-e, hvor målet var en udledning på 3.025 inden ibrugtagning.

Liu et al. (2016) sammenligner et mindre åbent havbrug i Norge med et større landbaseret RAS-anlæg i USA. Analysen viser, at det norske anlæg er mere økonomisk rentabelt og kun udleder 3.390 kg CO_2-e i modsætning til det lukkede anlæg, som udleder 7.010 kg CO_2-e. Ved at anvende en anden energi-sammensætning, fortrinsvis baseret på vandkraft, kan det lukkede anlæg dog blive konkurrencedygtigt med en udledning på 3.730 kg CO_2-e. Hvis man yderligere tager i betragtning, at den norske laks skal leveres fersk til det amerikanske marked, bliver udledningen fra de norske laks højere og den økonomiske rentabilitet i de amerikanske anlæg bedre i sammenligning.

Song et al. (2019) vurderer produktionen i et nybygget RAS-anlæg i det nordlige Kina, der producerer laks. Den samlede udledning af CO_2-e per ton i levende vægt blev opgjort til 16.700 kg CO_2-e. Anbefalinger til optimering af driften og dermed reducering af CO_2-e-udledningen per produceret kilo fisk er en højere udnyttelse af anlægget per m^3, foderoptimering og -sammensætning samt større fokus på energi-sammensætningen.

3.5. Studier af akvakulturfoder

Foder til akvakultur består af blandinger af animalske og vegetabilske ingredienser samt vitaminer og mineraler. Fiskemel og fiskeolie har traditionelt udgjort de vigtigste animalske ingredienser, mens fjerkræmel, blodmel og biprodukter af disse samt afskær fra konsumfisk kan indgå. Vegetabilske ingredienser inkluderer en lang række forskellige planter; vigtigst er soja, raps og hvede. Udviklingen er gået fra, at

akvakulturfoder hovedsageligt bestod af fiskemel og fiskeolie til i dag primært at bestå af vegetabilske ingredienser. Årsagen til denne udvikling er, at højere priser på fiskemel og fiskeolie, forårsaget af den til stadighed stigende efterspørgsel fra den voksende globale akvakultursektor, skaber knaphed på fiskemel og fiskeolie. Disse erstattes derfor delvist af billigere vegetabilske ingredienser. Fiskemel og -olie stammer fra industrifiskeri og omsættes på et verdensmarked, hvor de største leverandører er Peru, Chile, Norge, Danmark og Island. Soja dyrkes i landbruget med Brasilien, USA og Argentina som største producenter.

Som det fremgår af de forrige afsnit, er foder til laks og ørred en vigtig kilde til CO_2-e-udledning fra akvakultur og for både havbrug og gennemstrømningsanlæg på land den vigtigste kilde. LCA-studier af foderets klima- og miljøeffekt identificeres derfor i det følgende i forhold til størrelse og kilder. LCA-studierne inkluderer effekter fra "vugge" indtil salg til akvakultur, herunder primærproduktion i fiskeri og landbrug, forarbejdning og transport af foder. Effekterne måles i to forskellige funktionelle enheder, per ton opdrættet fisk og per ton foder. Resultater fra en række centrale studier fremgår af tabel 5.

Tabel 5. *LCA-studier af akvakulturfoders klima- og eutrofieringseffekt, kg CO_2-e og PO_4 per ton opdrættet fisk i levende vægt og per ton foder*

Studie	**Land og fodertype**	**Per ton opdrættet fisk**		**Per ton foder**	
		CO_2-e	**PO_4**	**CO_2-e**	**PO_4**
Papatryphon et al. (2004)	Frankrig,				
1. Fiskemel (63 % fisk)	ørredfoder	1.340	44	.	.
- heraf fra planter		230	2		
- heraf fra fisk		907	1		
- heraf fra transport		155	0		
- heraf fra fodring		0	40		
2. Fiskemel/fiskeaffald (72 % fisk)		1.120	50		
- heraf fra planter		134	2		
- heraf fra fisk		793	1		
- heraf fra transport		141	0		
- heraf fra fodring		0	47		
3. Vegetabilsk (ingen fisk)		1.560	41		
- heraf fra planter		1.278	11		
- heraf fra fisk		0	0		
- heraf fra transport		183	0		
- heraf fra fodring		0	29		
Pelletier og Tyedmers (2007)	Canada,	.	.		
1. Konventionelt foder (plante 51 %, konv. fiskemel/olie 38 %, biprodukt fjerkræmel 11 %)	laksefoder			1.400	5
2. Økologisk foder (øko-plante 51 %, konv. biprodukt fiskemel-olie 49 %)				1.810	7
3. Økologisk foder (øko-plante 70 %, konv. fiskemel 30 %)				690	2

Studie	Land og fodertype	Per ton opdrættet fisk		Per ton foder	
		CO_2-e	PO_4	CO_2-e	PO_4
Samuel-Fitwi et al. (2013c)	Danmark,				
1. Standard foder (77 % fisk)	ørredfoder	.	.	1.797	2
a. Energi fra elnettet				1.797	2
b. Kul				2.155	2
c. Naturgas				1.816	2
d. Vind				1.051	2
2. Sojamelsfoder (45 % fisk)				1.020	2
3. Rapsmelsfoder (45 % fisk)				1.037	2
Silva et al. (2017)	Peru, Brasilien,	.	.		
1. Fiskemel fra Peru	Portugal, foder-			1.310	1
- heraf fiskeri	ingredienser			52	0
- heraf transport (Per-Hol-Por)				1.100	1
2. Fiskeolie fra Peru				2.190	2
- heraf fiskeri				285	0
- heraf transport (Per-Hol-Por)				1.139	1
3. Sojamel fra Brasilien				6.520	9
- heraf planteproduktion				5.020	6
- heraf transport (Bra-Hol-Por)				1.369	2
4. Sojaolie fra Brasilien				7.940	31
- heraf planteproduktion				6.431	28
- heraf transport (Bra-Hol-Por)				1.350	2
Maiolo et al. (2020)	Italien,	.	.		
1. Insektmel Frankrig, (soldaterflue blandet med bønner, lucerne og korn)	Frankrig, akvakulturfoder			1.023	7
2. Tørret mikroalgebiomasse Italien fra *Tetraselmis suecica* injiceret med røggas				15.371	14
Ghamkhar og Hicks (2020)	USA, lakse-	.	.		.
1. Fiskemel, hvedeprodukter, kasein, rapsolie (25-24-14-8 %)	/ørredfoder			1.069	
2. Sojamel, risklid hvedeprodukter, fiskemel (45-20-13-11 %)				2.816	
3. Rapsolie, sojaprodukter, marin protein, hvedemel (20-19-15-9 %)				676	
4. Sojamel, mejsmel, kornblanding, fiskeolie (40-23-18-10 %)				1.131	
5. Nøddeblanding, fjerkræmel, fiskeolie, hvedemel (32-30-18-10 %)				2.938	

Kilder: Papatryphon et al. (2004), Pelletier og Tyedmers (2007), Samuel-Fitwi et al. (2013c), Silva et al. (2017), Maiolo et al. (2020) and Ghamkhar og Hicks (2020).

Anvendes derimod foder helt uden fiskeindhold forøges klimaeffekten til 1.560 kg CO_2-e, hvor eutrofierings-effekten reduceres til 41 kg PO_4. Studiet peger på, at fiskebaseret foder er mere klimavenligt og mindre miljøvenligt end vegetabilsk baseret foder, men forskellen er lille.

Papatryphon et al. (2004) finder endvidere, at klimaeffekten hovedsageligt stammer fra primærproduktion i fiskeri og landbrug. 71-85 procent af foderets klimaeffekt kommer således fra primærproduktion, hvor

transport med 12 procent er af mindre betydning. Eutrofieringseffekten kommer næsten udelukkende fra opdræt, og for fiskemelsbaseret foder er der næsten ingen PO_4-udledning før opdræt. For vegetabilsk foder stammer 29 ud af 41 kg PO_4 fra planteproduktionen. Dette studie inkluderer selve opdrættet, det vil sige anvendelsen af foderet, hvor nyere studier udelader denne.

Pelletier og Tyedmers (2007) sammenligner klima- og miljøeffekt af foder til konventionelt og økologisk lakseopdræt i Canada. En konventionel foderblanding (type 1) med 38 procent fiskemel/fiskeolie, 11 procent biprodukt af fjerkræmel og 51 procent vegetabilske ingredienser sammenlignes med to typer økologisk foder, hvor økologiske vegetabilske ingredienser erstatter de konventionelle (type 2), og hvor økologiske vegetabilske ingredienser udgør 70 procent og konventionelt fiskemel 30 procent (type 3). LCA-analysen inkluderer primærproduktion, foderforarbejdning og fodertransport.

Konventionelt foder forårsager en CO_2-e-udledning på 1.400 kg per ton foder. CO_2-e-udledningen fra type 2 udgør 1.810 kg, hvor den falder til 690 kg for type 3. Eutrofieringseffekten er for alle disse fodertyper beskeden, da anvendelsen af foderet ikke indgår.

Samuel-Fitwi et al. (2013c) identificerer klima- og miljøeffekt af standardfoder, sojamelsfoder og rapsmelsfoder til ørredopdræt i Danmark. Standardfoder består af 77 procent fiskeindhold (fiskemel, fiskeolie og biprodukt fra konsumfisk), hvor fiskeindholdet i de to øvrige fodertyper udgør 45 procent.

Klimaeffekten af standardfoder er 1.797 kg per ton foder, hvilket er lidt højere end i Pelletier og Tyedmers (2007). For sojamelsfoder og rapsmelsfoder findes der, at klimaeffekten med henholdsvis 1.020 og 1.037 kg CO_2-e er lavere end for standardfoder. Studiet finder således for de analyserede fodertyper, at vegetabilsk foder er mere klimavenligt end fiskemelsbaseret foder. Dette er det modsatte resultat af Papatryphon et al. (2004), som dog ikke fandt en stor forskel. Eutrofieringseffekten findes der for alle tre fodertyper beskeden.

Samuel-Fitwi et al. (2013c) analyserer også de danske energikilders betydning for klimaeffekten i standardfoder. Anvendelse af kulenergi giver en klimaeffekt på 2.155 kg CO_2-e per ton foder, hvor anvendelse af vindenergi giver 1.051 kg CO_2-e. Anvendelse af vindenergi i foderforarbejdning frem for kulenergi kan således mere end halvere klimaeffekten.

Silva et al. (2017) har gennemført et LCA-studie af foderingredienserne fiskemel/fiskeolie fra Peru og sojamel og sojaolie fra Brasilien og inkluderer klima- og eutrofieringseffekt fra "vugge" til og med transport via Rotterdam til Portugal. Foderanvendelse i akvakultur inkluderes ikke. Ingredienserne er således "rene" produkter, der efterfølgende anvendes i foderblandinger.

Klimaeffekten af fiskemel og fiskeolie er med henholdsvis 1.310 og 2.190 kg CO_2-e per ton foder på nogenlunde samme niveau som de foregående studier. Imidlertid ses klimaeffektens hovedkilde at være transport, hvilket er det modsatte resultat af Papatryphon et al. (2004). Dette indikerer, at transport muligvis kan have en vis betydning for foder, når det sker over lange afstande.

Klimaeffekten af sojamel og sojaolie fra Brasilien udgør henholdsvis 6.250 og 7.940 kg CO_2-e per ton foder. 80 procent stammer fra primærproduktion. Dette er fire-fem gange så højt som for fiskemel/fiskeolie og væsentligt højere end identificeret i de foregående studier. Forskellen skyldes primært, at dette studie indregner klimaeffekten af afskovning af land anvendt til sojaopdræt i Brasilien og ses i form af faldende oplagring af CO_2-e i regnskovene. Forfatterne betegner deres studie som et *worst case*-scenarie.

Klimaeffekten fra transport af sojamel/sojaolie fra Brasilien via Rotterdam til Portugal er nogenlunde den samme som for transport af fiskemel/fiskeolie fra Peru via Rotterdam til Portugal (henholdsvis 1.100-1.139 og 1.350-1.369 kg CO_2-e per ton foder). Dette er væsentlig over klimaeffekten fra transport af soja fra Brasilien til Danmark på 273 kg CO_2-e, som blev identificeret i Bosselmann og Gylling (2014). Forskellen

skyldes, at lastbilstransporten fra Rotterdam til Portugal foregår over omkring 2.000 km, hvor der alene er indregnet 100 km lastbilstransport i Danmark. Eutrofieringseffekten er ubetydelig for sojamel, men udgør 31 kg PO_4 per ton foder for sojaolie. For sojaolie fra Brasilien er der således ud over en klimaeffekt også en mærkbar eutrofieringseffekt.

Resultaterne i Silva et al. (2017) bekræfter således Papatryphon et al. (2004) i, at foder baseret på fiskemel/fiskeolie er mere klimavenligt end foder baseret på sojamel/sojaolie, men modsiger resultaterne i Samuel-Fitwi et al. (2013c). Årsagen til forskellen er, at visse studier inkluderer udledninger fra afskovning i produktionen af soja, mens andre studier ekskluderer denne effekt.

Maiolo et al. (2020) undersøgte klima- og miljøeffekten i et LCA-studie af blandt andet de to alternative fodertyper insektmel af soldaterflue fra Frankrig iblandet vegetabilske ingredienser og tørret mikroalgebiomasse af *Tetraselmis suecica* fra Italien injiceret med CO_2-e. Klimaeffekten er 1.023 og 15.371 kg CO_2-e per ton foder for henholdsvis insektmel og tørret mikroalgebiomasse, hvor eutrofieringseffekten udgør 7 og 14 kg PO_4 per ton foder. Insektmelet er således et klimavenligt alternativ til de traditionelt anvendte fodertyper, hvor den undersøgte mikroalgebiomasse modsat har en betydelig klimaeffekt. Eutrofieringseffekten er beskeden for begge fodertyper.

Ghamkhar og Hicks (2020) har gennemført et studie i USA af en række forskellige foderblandinger til ørred og laks. Klimaeffekten identificeres, men da eutrofieringseffekten ikke måles som PO_4, gennemgås denne ikke. LCA-analysen inkluderer primærproduktion, foderforarbejdning og fodertransport. Klimaeffekten af de fem fodertyper udgør 676-2.938 kg CO_2-e per ton foder, størst for fodertype 5 med en nøddeblanding, fjerkræmel, fiskeolie og hvedemel som de vigtigste ingredienser og mindst for fodertype 3, hvor rapsolie, sojaprodukter, marin protein og hvedemel er vigtigst.

Samlet identificerer LCA-studierne af akvakulturfoder klimaeffekter fra 676 til 2.938 kg CO_2-e per ton foder. Hertil kommer højere bidrag fra foderingredienserne sojamel og sojaolie fra Brasilien på henholdsvis 6.520 og 7.940 kg i de studier, der indregner udledninger fra afskovning, som sker for at frigøre arealer til sojaproduktion, samt fra den alternative fodertype af mikroalgebiomasse på 15.371 kg CO_2-e. Studierne tegner ikke et entydigt billede af, hvilke faktorer der forårsager foderets klimaeffekt.

Flere studier finder, at primærproduktionen i landbrug og fiskeri bidrager mest til foderets klimaeffekt. Tages der højde for, at sojamel/sojaolie fører til afskovning og faldende CO_2-e-oplagring i regnskove, er klimaeffekten meget væsentlig. Endvidere finder flere studier, at transport af foder har lille klimaeffekt, hvor ét studie, Silva et al. (2017), dog finder, at klimaeffekten af transport inden for EU er betydelig.

4. Sammenligning af LCA-studier i akvakultur, landbrug og fiskeri

Dette afsnit baseres på Clune et al. (2017), som i et metastudie gennemgår 369 publicerede LCA-studier (artikler og rapporter), som har set på 1.718 forskellige fødevareproduktioners bidrag til global opvarmning (CO_2-e) fordelt på 168 forskellige friske fødevarer. Her indgår 9 LCA-studier af laks fordelt på 21 forskellige værdikæder og 9 LCA-studier af ørred fordelt på 20 forskellige værdikæder. I artiklen fokuseres der udelukkende på en opstilling af sammenlignelige værdier for CO_2-e-udledningen for at understøtte udregninger af klimaeffekten af forskellige kostanbefalinger.

I studiet medtages forarbejdning, emballage og distribution til engrosmarkedet i afgrænsningen. Det betyder alt andet lige, at værdierne vil være højere end i de foregående studier, da en større del af værdikæden medregnes. For at gøre resultaterne sammenlignelige med de øvrige studier omregnes resultaterne i dette studie fra kg CO_2-e per kg benfrit kød til kg CO_2-e per ton LW ved anvendelse af de omregningsfaktorer, der er anvendt i studiet, Clune et al. (2017, tabel 1, ratio live weight: bone free meat).

I tabel 6 nedenfor præsenteres hovedresultaterne for arterne sild, makrel og torsk fra fiskeri, laks og ørred fra akvakulturopdræt samt produktionen af kylling, svin, kvæg og lam. Fisk i alt er en samlekategori, der spænder meget bredt, og det vurderes derfor, at samlekategorien er mindre relevant i forhold til sammenligninger med danske forhold.

Tabel 6. *Kg udledt CO_2-e per produceret ton i levende vægt*

Kg CO_2-e	Middel	Median	Min	Max	Q1	Q3	Studier	Kæder
Sild, fiskeri	1.872	1.856	1.568	2.224	1.744	2.000	3	4
Makrel, fiskeri	3.200	2.880	1.504	7.200	1.648	3.840	9	21
Torsk, fiskeri	5.584	5.616	2.528	8.608	3.600	7.200	10	16
Ørred, akva	5.968	6.720	2.192	9.520	4.976	6.928	9	20
Laks, akva	6.016	5.552	3.264	13.328	4.608	6.608	9	21
Fisk i alt	**7.056**	**5.584**	**1.248**	**33.376**	**3.184**	**8.256**	**47**	**148**
Kylling	7.630	6.759	1.963	18.481	5.130	9.833	29	95
Svin: WA	13.605	13.419	7.442	27.581	10.465	15.326	38	130
Kvæg: WA	59.237	54.866	22.144	225.361	45.897	65.093	49	165
Lam: WA	64.907	59.488	23.372	131.860	40.953	78.721	22	56

Note: WA = *World average*.
Kilde: Clune et al. (2017)

Overordnet set kan det konkluderes, at vildt fanget pelagiske fisk er det mest klimavenlige animalske fødevarevalg, mens demersale arter og produkter fra akvakultur som laks og ørred er næstbedste alternativ. Kylling er dog meget tæt på at have samme klimaeffekt som fisk, mens produktionen af lam og kvæg er væsentligt mere klimabelastende. Igen må det dog understreges, at der er usikkerheder, selv om der her er samlet en stor mængde af studier for at gøre estimaterne mere valide.

Det, der taler for, at akvakultur kan blive et endnu mere konkurrencedygtigt erhverv målt på både klima- og miljøeffekter, er, at produktionsformen stadig er relativt ny, og at der derfor i forhold til andre animalske produktioner er flere effektiviseringsgevinster at hente i dette erhverv (Asche 2008).

Ingen af de ovennævnte studier inkluderer en specifik LCA-analyse fra den danske akvakultursektor. Hvis man vil have et mere præcist estimat, der eksplicit tager højde for danske forhold og teknologier, vil det være nødvendigt at gennemføre et dansk LCA-studie. Man bør dog overveje, hvor store omkostninger der er relateret til dette i forhold til den formodede relativt begrænsede yderligere information, et sådant studie vil bidrage med.

5. Diskussion

I nedenstående tabel er der samlet oplysninger om udledning af CO_2-e fra de gennemgåede studier, der bedst kan sammenlignes med danske forhold og anlægstyper. For at synliggøre at det ikke er muligt at give et enkelt tal for hver anlægstype, præsenteres et interval fra de gennemgåede studier. Yderligere er der nedenfor præsenteret en række forbehold, som bør tages i betragtning, når man ser på den danske akvakultursektor.

Tabel 7. *Oversigt over anlægstypernes udledning i kg CO_2-e*

Udledning af CO2-e for udvalgte anlægstyper.	**Kg CO_2-e**
Havbrug	1.800 - 5.300
Traditionelle dambrug	2.200 - 2.800
Recirkuleringssystemer (modeldambrug), ferskvand	
Model 1	2.600 - 3.600
Model 3	3.600 - 13.600
Recirkuleringssystemer (RAS), saltvand, laks	3.700 - 16.700
Økologiske dambrug*	2.200 - 2.800

* Estimater fra traditionelle dambrug.

5.1. Havbrug

De danske havbrug er i sammenligning med de norske, skotske og canadiske forholdsvis små og placeret relativt kystnært. De danske havbrug producerer regnbueørreder på 3 til 4 kg, hvor hovedproduktet er rogn. Derfor er den danske produktion anderledes end hovedparten af de gennemgåede studier, der fokuserer på lakseopdræt, og hvor kødet er det primære produkt. Dette vil for nogle parametre betyde, at den danske produktion er mere klimavenlig, mens det modsatte vil være tilfældet for andre. Den mindre anlægsstørrelse og dermed mindre anvendelse af permanente foderfartøjer kan eksempelvis betyde, at transport til og fra anlæggene øges, hvilket øger den negative effekt fra CO_2-e, mens valg af art, hovedprodukt og mindre størrelse kan have en positiv effekt via foderforbruget. Ved valg af et klimavenligt foder, hvor *land use*-effekten er lille, vil de danske havbrug formentlig ligge i den nedre ende af de intervaller, som er vist i tabel 7.

5.2. Traditionelle dambrug

I Danmark er de traditionelle ferskvandsdambrug ofte større og mere effektive, end hvad man ser i resten af Europa (Tyskland, Frankrig, Finland, Italien og Spanien). Da der ikke anvendes ret meget energi i disse anlæg, er det primært foderet, der udgør hovedparten af bidraget til CO_2-e-udledningen. Fodersammensætningen og fodereffektiviteten i selve anlæggene er derfor også den væsentligste faktor til at nedbringe udledningen. Intervallet, som vises i tabel 7, er derfor også mindre end i de øvrige kategorier.

5.3. Recirkuleringssystemer, modeldambrug i ferskvand

I de gennemgåede studier har det været svært at afgøre, hvor stor recirkuleringsgraden i anlæggene har været. Denne kategori indeholder derfor et bredere spænd, som kan sammenlignes med de danske Model 1- og Model 3-dambrug. For anlæg svarende til Model 1-dambrug vurderes det, at intervallet for CO_2-e-udledningen er lidt højere end for traditionelle anlæg grundet det øgede elforbrug. For anlæg svarende til Model 3 vurderes det, at udledningen næsten er på højde med fuldt recirkulerede anlæg grundet den store mængde af el, der anvendes til at recirkulere vandet m.m. I forhold til de danske anlæg skal det bemærkes, at foderkvotienten i Model 1- og 3-anlæg ofte er lavere end i de traditionelle anlæg, hvilket giver disse anlæg

en fordel, når der fokuseres på foderet. Herudover skal det igen bemærkes, at et grønnere energimix væsentligt forbedrer de recirkulerede anlægs CO_2-e-udledning.

5.4. Recirkuleringssystemer, RAS-opdræt af laks i saltvand

I denne type anlæg indgår kun fuldt lukkede anlæg med recirkulering, der producerer laks i saltvand. Disse anlæg kan således sammenlignes med de danske saltvandsbaserede RAS-anlæg, der producerer samme art. Her er foder og energiforbrug igen de væsentligste kilder til CO_2-e-udledningen. De meget store forskelle i resultaterne skyldes udelukkende forskelle i den anvendte energisammensætning. Ved anvendelse af udelukkende kul som energikilde kan påvirkningen nå 30.000 kg CO_2-e, mens anvendelsen af 100 procent grøn energi (vind, sol, vandkraft) betyder, at foderet står for cirka 90 procent af CO_2-e-udslippet, hvilket er på linje med havbrug og traditionelle anlæg. Derfor bør man se på det danske energimix for at vurdere udledningen i dag, og også når man skal vurdere den fremtidige påvirkning fra disse anlæg.

5.5. Økologiske dambrug

I de gennemgåede studier indgår der ikke økologiske anlæg, som producerer efter de danske principper for økologi. Derfor er det nærmeste udgangspunkt de traditionelle anlæg. Her skal det tages i betragtning, at de økologiske anlæg er mindre, og der anvendes mere plads til produktionen per produceret kg. Dette betyder alt andet lige en mindre effektivitet, som giver en større udledning af CO_2-e per kg fisk. Yderligere kan fodersammensætningen til økologisk produktion bidrage både positivt og negativt til det samlede CO_2-e-aftryk, da anvendelsen af mere bæredygtige proteinkilder kan have en positiv effekt i forhold til *land use*-effekten, mens anvendelsen af et større areal til produktionen bidrager negativt. På miljøsiden kan den økologiske produktion bidrage positivt ved mindre udledninger af medicin og hjælpestoffer, øget dyrevelfærd samt at næringsstofudledningerne lokalt kan være mindre samlet set ved en mindre intensiv produktion.

5.6. Metodisk anbefaling til fremtidige studier

LCA er den mest udbredte og detaljerede metode til opgørelse af klima- og miljøeffekter for forskellige fødevareproduktioner, men er samtidig også meget omfattende og dermed dyr og tidskrævende. Da det kan konkluderes fra gennemgangen af LCA-studierne på akvakulturområdet, at mere end 90 procent af klimaeffekten og størstedelen af miljøeffekterne stammer fra blot to input, foder og energiforbrug, vil en begrænset analyse af disse to input kunne afdække størstedelen af klima- og miljøeffekterne fra dansk akvakultur.

På anlægsniveau kan oplysninger om foder og energiforbrug findes i regnskabsstatistik for akvakultur udgivet af Danmarks Statistik. Ved at sammenholde disse oplysninger med fodersammensætning fra danske foderproducenter samt information om det danske energimix fra Energistyrelsen kan størstedelen af de danske anlægs klimapåvirkning formentlig afdækkes forholdsvis hurtigt og præcist. Derudover kan udledningen af næringsstoffer på anlægsniveau findes i Miljøstyrelsens database.

SENSE-projektet (SENSE 2015) har også lavet en gennemgang af akvakulturs påvirkning ved at udvælge de input, som har størst betydning for klima og miljø (begrænset mængde input). Derved kan man hurtigere og nemmere foretage en begrænset LCA-analyse.

Endelig bør der foretages en økonomisk analyse med udgangspunkt i LCA, hvor de økonomiske omkostninger og gevinster ved en ændret energi- og fodersammensætning vurderes (cost/benefit), således at der kan dannes et overblik over, hvordan CO_2-e-reduktioner opnås billigst. Her bør også medtages de skift, der sker i

eksternalitetspåvirkningerne, når energi- og fodersammensætning ændres. Det vil sige, at i valget af klimatiltag bliver en afvejning af klima- og miljøeffekter nødvendig.

6. Konklusion

Den overordnede konklusion på dette litteraturstudie baseret på LCA-analyser af akvakultur er:

- At laks og ørred opdrættet i akvakultur er en relativt klimaeffektiv fødevareproduktion på linje med vildt fangede demersale arter som torsk.
- At laks og ørred fra akvakultur udleder relativt mindre CO_2-e end kylling, svin, kvæg og lam.
- At effektiviseringsmulighederne inden for akvakultur er større end for andre animalske fødevareproduktioner, da sektoren er relativt ny sammenlignet med de traditionelle landbrugssektorer. Dette gælder specielt for anlæg, som anvender nyere former for teknologi som modeldambrug og RAS-anlæg.
- At foderet, der indgår i produktionen, er den væsentligste kilde til udledning af CO_2-e, hvor både de landbaserede og marine ingredienser spiller en væsentlig rolle. Både den relative og absolutte klimaeffekt fra marine ingredienser i foderet har været faldende over tid, mens klimaeffekten fra de landbaserede ingredienser har været stigende. I dag kan man anvende et foder, som er 100 procent baseret på landbaserede ingredienser, men om dette vil være en klimamæssig fordel afhænger af, hvordan udviklingen i den landbaserede og marine produktion udvikles i fremtiden.
- At foderkonverteringsraten (FCR) er et mål for, hvor effektivt foderet anvendes i produktionen, og dermed har afledte konsekvenser for udledningen af CO_2-e og miljøeffekter. Landbaserede anlæg, hvor kontrollen over produktionen er størst, giver alt andet lige de bedste muligheder for en effektiv foderudnyttelse og dermed en lav FCR og således en fodermæssigt set mere klima- og miljøvenlig produktion.
- At intensive lukkede anlæg med et højere energiforbrug (el) har et større klimaaftryk end åbne anlæg på land og til havs. Det afhænger dog udelukkende af energisammensætningen (om der anvendes kul, olie og gas, eller vind, vand og sol), hvor stor effekten er. Til gengæld klarer de lukkede anlæg sig bedre i forhold til de åbne anlæg, når det kommer til miljøeffekter som eutrofiering.
- At effekten fra økologiske anlæg ikke har kunnet identificeres særskilt, og at sådanne anlæg derfor antages at være identiske med traditionelle åbne dambrugsanlæg, hvor klimaeffekten er relativt lav og overvejende kommer fra foderet. Her kan økologiske krav til fodersammensætningen og dyrevelfærd påvirke både klima- og miljøeffekter i begge retninger, da effektiviteten (ton fisk per udledt mængde) er mindre i disse anlæg. Til gengæld vil de alt andet lige have en positiv miljøeffekt ved et lavere forbrug af medicin og hjælpestoffer.
- At der i de gennemgåede LCA-analyser ikke indgår økonomiske overvejelser om substitutionen mellem foderemner eller anvendt teknologi og deres respektive klima- og miljøeffekter.

7. Anbefaling

Til arbejdet med at etablere et vidensgrundlag for den videre udvikling af den danske akvakultursektor på et bæredygtigt grundlag anbefales det:

- At der foretages specifikke analyser af de danske anlægstypers klima- og miljøeffekter, baseret på en reduceret LCA, der inddrager de mest betydende parametre som foder og energiforbrug.
- At dansk akvakulturs foderforbrug og sammensætning analyseres med henblik på at reducere klima- og miljøeffekterne fra de danske anlæg.
- At dansk akvakulturs elforbrug og energisammensætning analyseres med henblik på at reducere klima- og miljøeffekterne fra de danske anlæg
- At de økonomiske konsekvenser for substitutionen mellem foder og teknologi (energiforbrug) og deres respektive klima- og miljøeffekter inddrages i kommende analyser for at tilvejebringe et mere fyldestgørende vidensgrundlag.

Referencer

Asche, F. (2008). Farming the Sea. *Marine Resource Economics*, 23 (4): 527-547.

Aubin J., Papatryphon, E., van der Werf, H.M.G. & Chatzifotis, S. (2009). Assessment of the environmental impact of carnivorous finfish production systems using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 17 (3): 354-361.

Ayer, N.W. & Tyedmers, P.H. (2009). Assessing alternative aquaculture technologies: life cycle assessment of salmonid culture systems in Canada. *Journal of Cleaner Production*, 17: 362-373.

Bohnes, F.A., Hauschild, M.Z., Schlundt, J. & Laurent, A. (2019). Life cycle assessments of aquaculture systems: a critical review of reported findings with recommendations for policy and system development. *Reviews in Aquaculture*, 11 (4): 1061-1079.

Bosselmann, A.S. & Gylling, M. (2014). Miljømæssige konsekvenser ved den danske import af majs og soja til svinefoderproduktionen. Institut for Fødevare- og Ressourceøkonomi, Københavns Universitet, IFROm Udredning 2014/20. https://static-curis.ku.dk/portal/files/129784130/IFRO_Udredning_2014_20.pdf

Chen, X., Samson, E., Tocqueville, A. & Aubin, J. (2015). Environmental assessment of trout farming in France by life cycle assessment: using bootstrapped principal component analysis to better define system classification. *Journal of Cleaner Production*, 87: 87-95.

Clune, S., Crossin, E. & Verghese, K. (2017). Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories. *Journal of Cleaner Production*, 140, 2: 766-783.

Dekamin, M., Veisi, H., Safari, E., Liaghati, H., Khoshbakht, K. & Dekamin, M.G. (2015). Life cycle assessment for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) production systems: a case study for Iran, *Journal of Cleaner Production*, 91: 43-55.

Ghamkhar, R. & Hicks, A. (2020). Comparative environmental impact assessment of aquafeed production: Sustainability implications of forage fish meal and oil free diets. *Resources Conservation and Recycling*, 161: 104849.

Grönroos, J., Seppälä, J., Silvenius, F. & Mäkinen, T. (2006). Life cycle assessment of Finnish cultivated rainbow trout. *Boreal Environment Research*, 11 (5): 401-414.

ISO (2006a). Environmental management – life cycle assessment – principles and framework (ISO 14040:2006). ISO, Geneva.

ISO (2006b) Environmental Management – life cycle assessment – requirements and guidelines (ISO 14044:2006). ISO, Geneva.

Liu, Y., Rosten, T.W., Henriksen, K., Hognes, E.S., Summerfelt, S. & Vinci, B. (2016). Comparative economic performance and carbon footprint of two farming models for producing Atlantic salmon (*Salmo salar*): Land-based closed containment system in freshwater and open net pen in seawater. *Aquacultural Engineering*, 71: 1-12.

Maiolo, S., Parisi, G., Biondi, N., Lunelli, F., Tibaldi, E. & Pastres, R. (2020). Fishmeal partial substitution within aquafeed formulations: life cycle assessment of four alternative protein sources. *International Journal of Life Cycle Assessment,* 25: 1455-1471.

McGrath, K.P., Pelletier, N.L. & Tyedmers, P.H. (2015). Life cycle assessment of a novel closed-containment Salmon aquaculture technology. *Environmental Science & Technology*, 49: 5628-5636.

Papatryphon, E., Petit, J., Kaushik, S.J. & van der Werf, H.M.G. (2004). Environmental Impact Assessment of Salmonid Feeds Using Life Cycle Assessment (LCA). *Ambio*, 33 (6): 316-323.

Pelletier, N. & Tyedmers, P. (2007). Feeding farmed salmon: Is organic better? *Aquaculture*, 272: 399-416.

Pelletier, N., Tydmers, P., Sonesson, U., Scholz, A., Ziegler, F., Flysjo, A., Kruse, S., Cancino, B. & Silverman, H. (2009). Not all salmon are created equal: life cycle assessment (LCA) of global salmon farming systems. *Environmental Science & Technology*, 43: 8730-8736.

Philis, G., Ziegler, F., Gansel, L.C., Jansen, M.D., Gracey, E.O. & Stene, A. (2019). Comparing Life Cycle Assessment (LCA) of Salmonid Aquaculture Production Systems: Status and Perspectives. *Sustainability*, 11 (9): 2517.

Samuel-Fitwi, B., Schroeder, J.P. & Schulz, C. (2013a). System delimitation in life cycle assessment (LCA) of aquaculture: striving for valid and comprehensive environmental assessment using rainbow trout farming as a case study. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18: 577-589.

Samuel-Fitwi, B., Nagel, F. & Meyer, S. (2013b). Comparative life cycle assessment (LCA) of raising rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in different production systems. *Aquaculture Engineering*, 54: 85-92.

Samuel-Fitwi, B., Meyer, S. & Reckmann, K. (2013c). Aspiring for environmentally conscious aquafeed: comparative LCA of aquafeed manufacturing using different protein sources. *Journal of Cleaner Production*, 52: 225-233.

SENSE (2015). Harmonised environmental sustainability in the European food & drink chain. European research project supported by the 7th Framework Programme of the European Commission. https://cordis.europa.eu/project/id/288974

Silva, C.B., Valente, L.M.P., Matos, E., Brandão, M. & Neto, B. (2018). Life cycle assessment of aquafeed ingredients. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23: 995-1017.

Song, X., Liu, Y., Pettersen, J.B., Brandão, M., Ma, X., Røberg, S. & Frostell, B. (2019). Life cycle assessment of recirculating aquaculture systems: A case of Atlantic salmon farming in China. *Journal of Industrial Ecology*, 23 (5): 1077-1086.

Winther, U., Ziegler, F., Hognes, E.S., Emanuelsson, A., Sund, V. & Ellingsen, H. (2009). Carbon footprint and energy use of Norwegian seafood products. SINTEF Fisheries and Aquaculture. Report SFH80 A096068.

Winther, U., Hognes, E.S., Jafarzadeh, S. & Ziegler, F. (2020). Greenhouse gas emissions of Norwegian seafood products in 2017. SINTEF Ocean AS, Seafood Technology. Report.