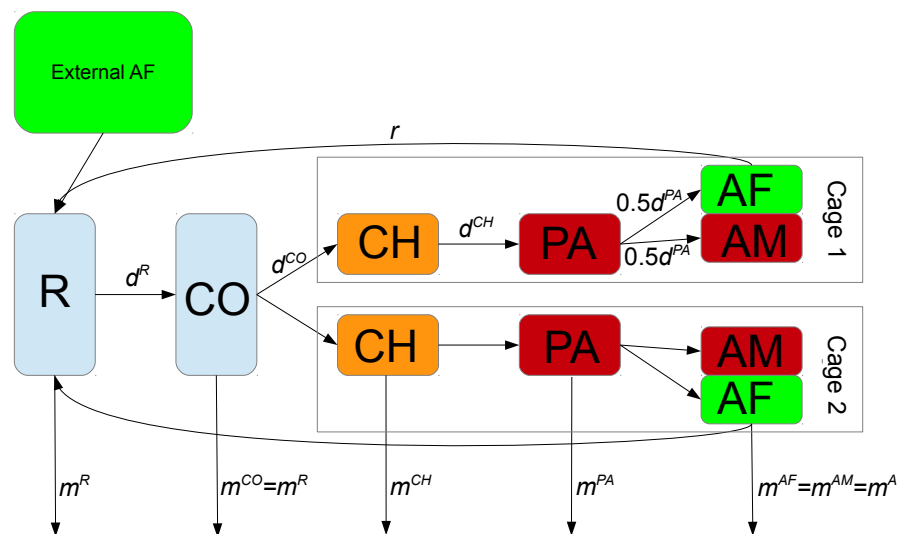


# Re-estimering av populasjonsmodell for lakselus 2019

- Delrapport for prosjekt FHF:901414 "Enhetlig proaktiv lusestrategi Rogaland"



Notatnr  
Forfatter

**SAMBA/28/19**  
**Magne Aldrin**  
**Ragnar Bang Huseby**

Dato

**30. september 2019**

## Forfatteren

Magne Aldrin og Ragnar Bang Huseby er ansatt ved Norsk Regnesentral.

## Norsk Regnesentral

Norsk Regnesentral (NR) er en privat, uavhengig stiftelse som utfører oppdragsforskning for bedrifter og det offentlige i det norske og internasjonale markedet. NR ble etablert i 1952 og har kontorer i Kristen Nygaards hus ved Universitetet i Oslo. NR er et av Europas største miljøer innen anvendt statistisk-matematisk modellering og har et senter for forskningsdrevet innovasjon, Big Insight, med finansiering fra Norges forskningsråd, bedrifter og offentlige partnere. Innen statistikk jobbes det med et bredt spekter av problemstillinger, for eksempel finansiell risiko, jordobservasjon, estimering av fiskebestander, helse og beskrivelse av geologien i petroleumsreservoarer. NR er ledende i Norge innen utvalgte deler av informasjons- og kommunikasjonsteknologi. Innen IKT-området har NR innsatsområdene e-inkludering, informasjonssikkerhet og smarte informasjonssystemer.

NRs visjon er forskningsresultater som brukes og synes.

**Tittel** Re-estimering av populasjonsmodell for  
lakselus 2019  
- Delrapport for prosjekt FHF:901414  
“Enhetlig proaktiv lusestrategi Rogaland”

**Forfatter** Magne Aldrin <magne.aldrin@nr.no>  
Ragnar Bang Huseby <ragnar.huseby@nr.no>

**Dato** 30. september 2019

**Publikasjonsnummer** SAMBA/28/19

## Sammendrag

En populasjonsmodell for lakselus har blitt utviklet i et tidligere prosjekt finansiert av FHF, og estimert på data fra perioden 2011-2014 for oppdrettsanlegg på Vestlandet og Trøndelag. I et oppfølgingsprosjekt, også finansiert av FHF har modellen blitt oppdatert og re-estimert på nyere data, dvs. fra perioden 2012-2017, for en del oppdrettsanlegg i Rogaland. I det nåværende prosjektet har modellen nok en gang blitt re-estimert på nyere data, denne gang på data fra 35 oppdrettsanlegg i Rogaland i perioden 2013-2018. I det nåværende prosjektet har modellen først og fremst blitt brukt til scenariosimulering, og resultatene fra dette er beskrevet i en egen delrapport, samt i sluttrapporten. Den foreliggende rapporten fokuserer på mer tekniske detaljer ved modellen, og oppsummerer modellresultater med fokus på endringer siden første versjon av modellen, samt oppgir de oppdaterte modellparametre. Når det gjelder de relativt nye typer ikke-medikamentelle behandlinger, estimerer modellen at termisk, mekanisk og ferskvannsbehandling gir omkring 55-75% dødelighet av lus i pre-adulte og voksne stadier.

Emneord

Målgruppe

Tilgjengelighet Åpen

Prosjekt

Prosjektnummer

Satsningsområde Marine ressurser og helse

Antall sider 26

© Copyright Norsk Regnesentral

# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Populasjonsmodellen</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Utvalgte resultater</b>	<b>10</b>
3.1	Eksempel på modelltilpasning	10
3.2	Effekt av behandling	11
3.3	Naturlig dødelighet avhengig av modellert salinitet	12
3.4	Effekt av rensefisk	13
3.5	Utviklingstider	14
3.6	Sammenligning med resultater fra andre studier	15
<b>4</b>	<b>Endringer i modellformulering</b>	<b>16</b>
4.1	Smittepressindeks basert på midlere strømkontakt	16
4.2	Nye typer behandlinger	18
4.3	Dødelighet avhengig av salinitet og ny parametrisering av dødelighet	18
4.4	Rensefisk	19
4.5	Temperaturavhengig infeksjonsrate	20
<b>5</b>	<b>Oppdaterte modellparametre - smitteindeks basert på sjøavstand</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>Modellparametre - smitteindeks basert på midlere strømkontakt</b>	<b>24</b>
	<b>Referanser</b>	<b>26</b>

# 1 Innledning

Norsk Regnesentral har, i samarbeid med Veterinærinstituttet og Norsk institutt for naturforskning, tidligere utviklet en populasjonsmodell for lakselus, hovedsakelig finansiert av Fiskeri- og havbruksnæringens forskningsfinansiering (FHF), prosjekt FHF:900970. En full beskrivelse av modellen i den versjon den forelå sommeren 2017 finnes i artikkelen “A stage-structured Bayesian hierarchical model for salmon lice populations at individual salmon farms - Estimated from multiple farm data sets” publisert i tidsskriftet Ecological Modelling (Aldrin et al., 2017), heretter forkortet til ALD17.

Modellen blei seinere utvidet og oppdatert i prosjektet FHF:901424 “Re-estimering av populasjonsmodell for lakselus basert på data fra Rogaland”, og resultatene dokumentert i rapportene Aldrin og Huseby (2018b) og Aldrin og Huseby (2018a). I det foreliggende prosjektet FHF:901414 “Enhetlig proaktiv lusestrategi Rogaland” har modellen blitt brukt til scenariosimulering. Resultatene av dette er dokumentert i en egen del-rapport (Aldrin og Huseby, 2019), samt i sluttrapporten fra prosjektet. Blue Planet har vært prosjektleder i dette prosjektet, og øvrige partnere har vært Proactima, Veterinærinstituttet og Norsk Regnesentral. Norsk Regnesentral har vært hovedansvarlig for arbeid med populasjonsmodellen som beskrives i denne rapporten og i Aldrin og Huseby (2019).

Som en del av prosjektet har modellen blitt oppdatert nok en gang på nyere data fra 35 fullførte eller påbegynte produksjonssykluser i perioden 2013-2018. Dessuten har en ny smittepressindeks basert på gjennomsnittlig strømkontakt blitt testet ut som et alternativ til å bruke sjøavstand som i tidligere utgave av modellen. I den foreliggende rapporten oppsummerer vi først hovedfunn fra den oppdaterte modellen. Deretter gir vi en teknisk beskrivelse av endringer av modellen i forhold til versjonen beskrevet i ALD17. Denne rapporten erstatter dermed de to rapportene fra prosjektet FHF:901424 (Aldrin og Huseby, 2018a,b), og vi har tillatt oss å gjenbruke en del av teksten. Hensikten med rapporten er å dokumentere modellen slik den er i dag og målgruppa for rapporten er de med interesse for detaljene i modellen.

## 2 Populasjonsmodellen

Under beskriver vi hovedtrekkene i populasjonsmodellen. En full beskrivelse av modellen i den versjon den forelå sommeren 2017, finnes i Aldrin et al. (2017).

Populasjonsmodellen er en stadiestrukturert modell for hvordan lusa utvikler seg

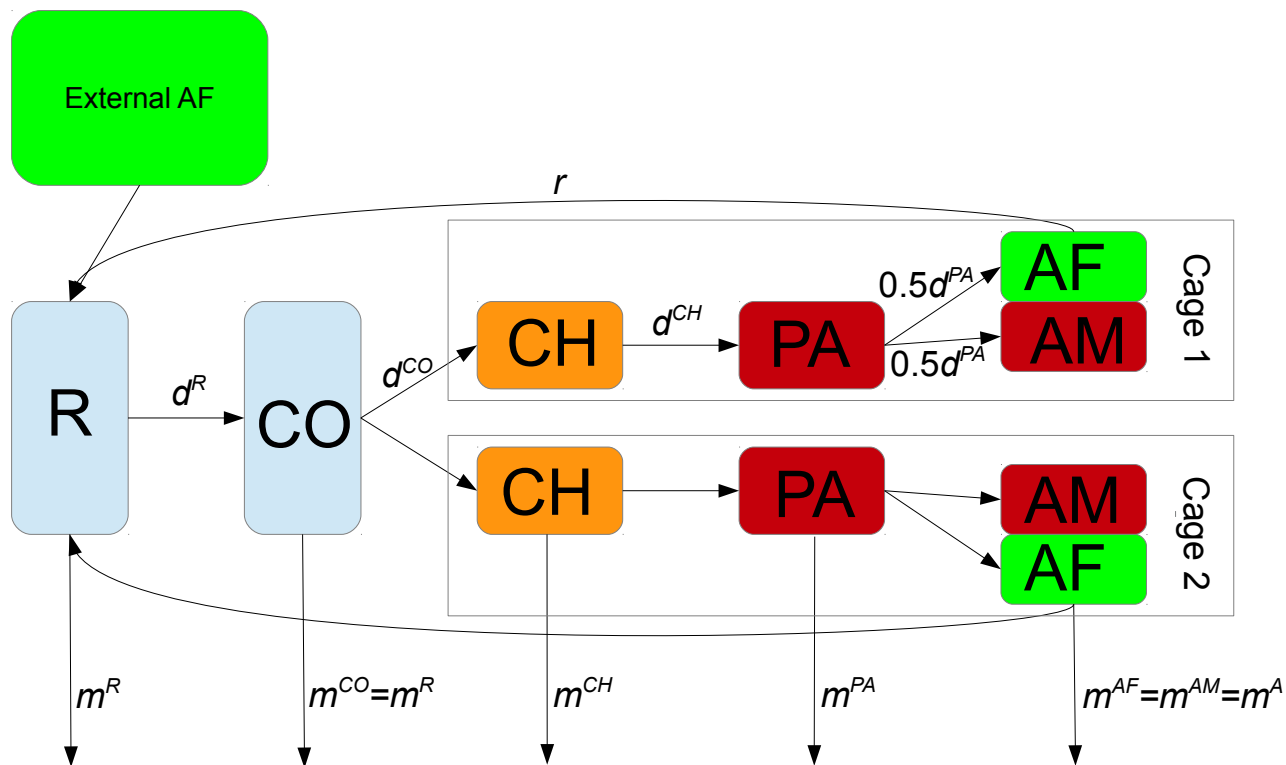
gjennom ulike stadier fra egg til voksne hunnlus, og hvordan de er tilknyttet et oppdrettsanlegg og de enkelte merdene i anlegget. Den er videre stokastisk, slik at hvis en simulerer fra modellen gjentatte ganger under samme forutsetninger, vil en få variasjon i resultatene, og dette er ment å gjenspeile usikkerhet og tilfeldig variasjon. Figur 1 viser en oversikt over modellen. I modellen er lusas livsløp delt inn i fem stadier, dvs. at i modellen er noen av de virkelige biologiske stadiene slått sammen. Rekruttstadiet (R) består av egg og larver i nauplii-stadiet. Kopepoditt-stadiet (CO) består av av infektive larver som ennå ikke har funnet en vertsfisk. (Vi ignorerer den korte tida hvor kopepodittene har funnet en vertsfisk, men ennå ikke har utviklet seg til chalimus-stadiet.) Chalimus-stadiet (CH) består av fastsittende lus på fisken, deretter kommer det pre-adulte (PA, bevegelige) og til sist det adulte eller voksne stadiet (A, også bevegelige). De voksne deles videre inn i voksne hunnlus (AF) og voksne hannlus (AM). I de to første stadiene (R og CO) er lusa ennå ikke tilordnet en merd, mens for de tre påfølgende stadiene, hvor lusa sitter på fisken, er lusepopulasjonen fordelt på merder. I hvert stadium kan lusa i løpet av et døgn enten dø, utvikle seg til neste stadium eller forbli i stadiet ett døgn til. I tillegg kan voksne hunnlus produsere nye rekrutter som forblir i anlegget (internsmitte) eller spres til naboanlegg, og rekrutter kan også tilføres fra naboanlegg (eksternsmitte). Lus i de siste tre stadiene telles på et utvalg av fisk, typisk hver eller annenhver uke i hver merd.

Det som først og fremst skiller denne modellen fra lignende modeller, er at alle modellparametre er estimert ut fra reelle, fullskala produksjonsdata, selv om resultater basert på laboratoriereksperimenter er brukt som tilleggsinformasjon. Modellparameterne i populasjonsmodeller for lakselus som er presentert i litteraturen tidligere, har hovedsakelig vært basert på data fra laboratorieeksperimenter eller småskala-eksperimenter. Vi estimerer modellparameterne fra fullskala data, men bruker også i noen grad resultater fra laboratoriedata og generell biologisk kunnskap for å sikre at resultatene er biologisk plausible.

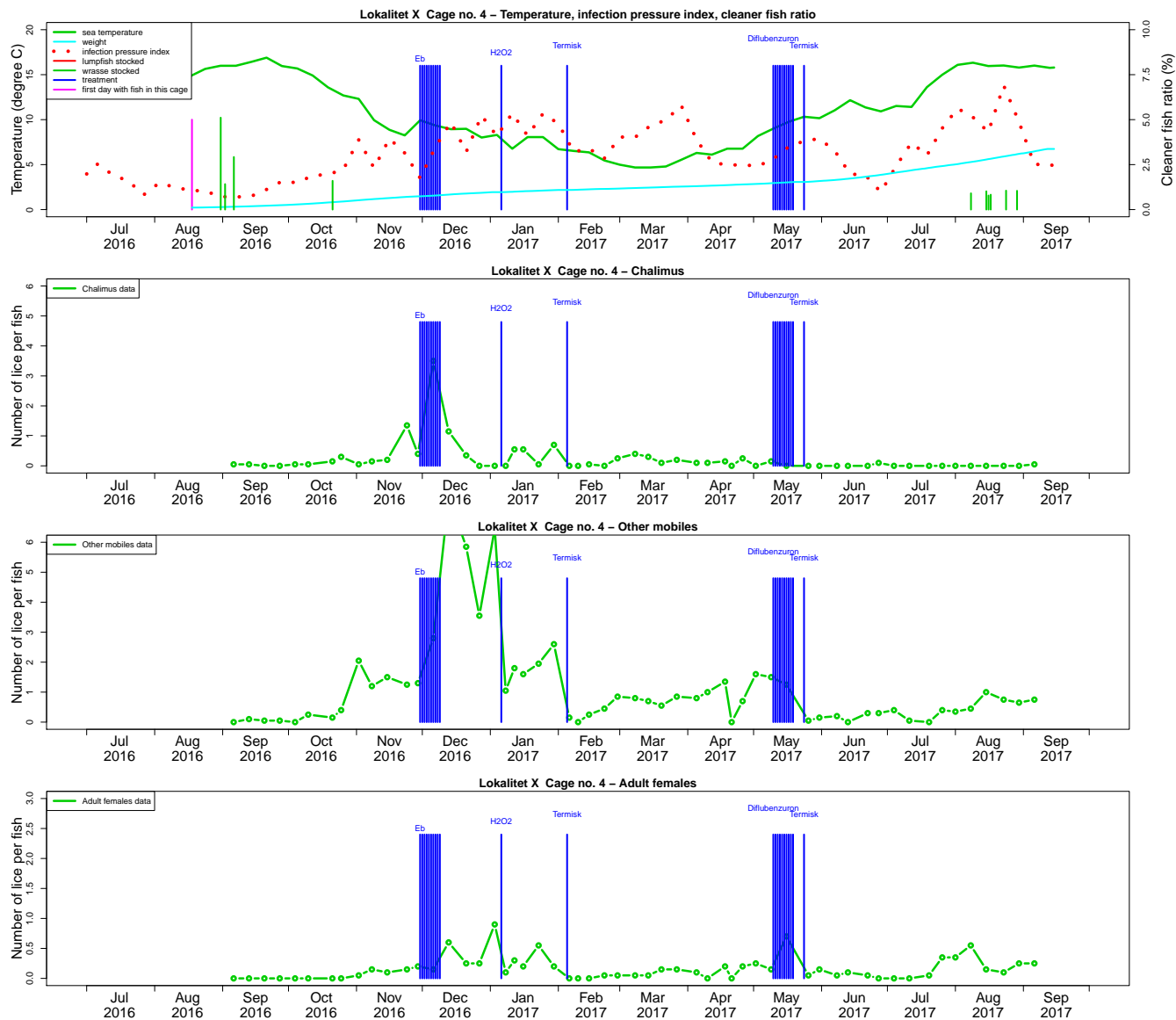
Den versjonen av modellen som er publisert i ALD17, var estimert på grunnlag av data fra en full produksjonssyklus for hvert av 32 oppdrettsanlegg på Vestlandet og i Trøndelag. I dette prosjektet har vi re-estimert modellen på data fra 35 fullførte eller påbegynte produksjonssykluser fra like mange oppdrettsanlegg i Rogaland tilhørende Mowi (den gang Marine Harvest), Bremnes Seashore, Grieg Seafood og Alsaker. For 33 av disse har fisken blitt satt ut i 2015, 2016 eller 2017, mens for to produksjonssykluser er fisken satt ut i 2013 eller 2014. For de påbegynte, men ikke fullførte, produksjonssykluser har vi hatt data for minst ett år.

Følgende elementer i modellen er nye i dette prosjektet, eller i det foregående prosjektet FHF:901424, i forhold til versjonen som er dokumentert i ALD17:

- En alternativ smitteindeks basert på gjennomsnittlig (over tid) strømkontakt



Figur 1. Oversikt over populasjonmodellen for lakselus som er brukt i scenariosimuleringene. Lus i stadier markert med oransje, rødt og grønt blir talt, mens lus i de blå stadiene ikke blir talt. Lus er assosiert med en merd fra de er fastsittende på en fisk (dvs. i chalimus-stadiet), her illustrert på et anlegg med to merder. Bokstavene d, m og r symboliserer henholdsvis utvikling til neste stadium, dødelighet og rekruttering av nye lus (d for development, m for mortality og r for recruitment).



Figur 2. Eksempel på data for én enkelt merd. Øverste panel viser følgende bakgrunnsdata: Tidspunkt for utsett (rosa vertikal strek i august 2016), utsett av leppefisk (grønne vertikale streker), behandlinger (blå vertikale streker), vekt på laks i merda (blå kurve), sjøtemperatur (grønn kurve) og smittepress fra naboanlegg (rød, prikket kurve). De tre nederste panelene viser tellinger av henholdsvis fastsittende lus (chalimus), bevegelige lus utenom voksne hunnlus pre-adulte lus og voksne hannlus) og voksne hunnlus.



mellom oppdrettsanlegg er tatt i bruk. Denne er et supplement til smittein-  
deksen som vi har brukt tidligere, og som er basert på sjøavstand.

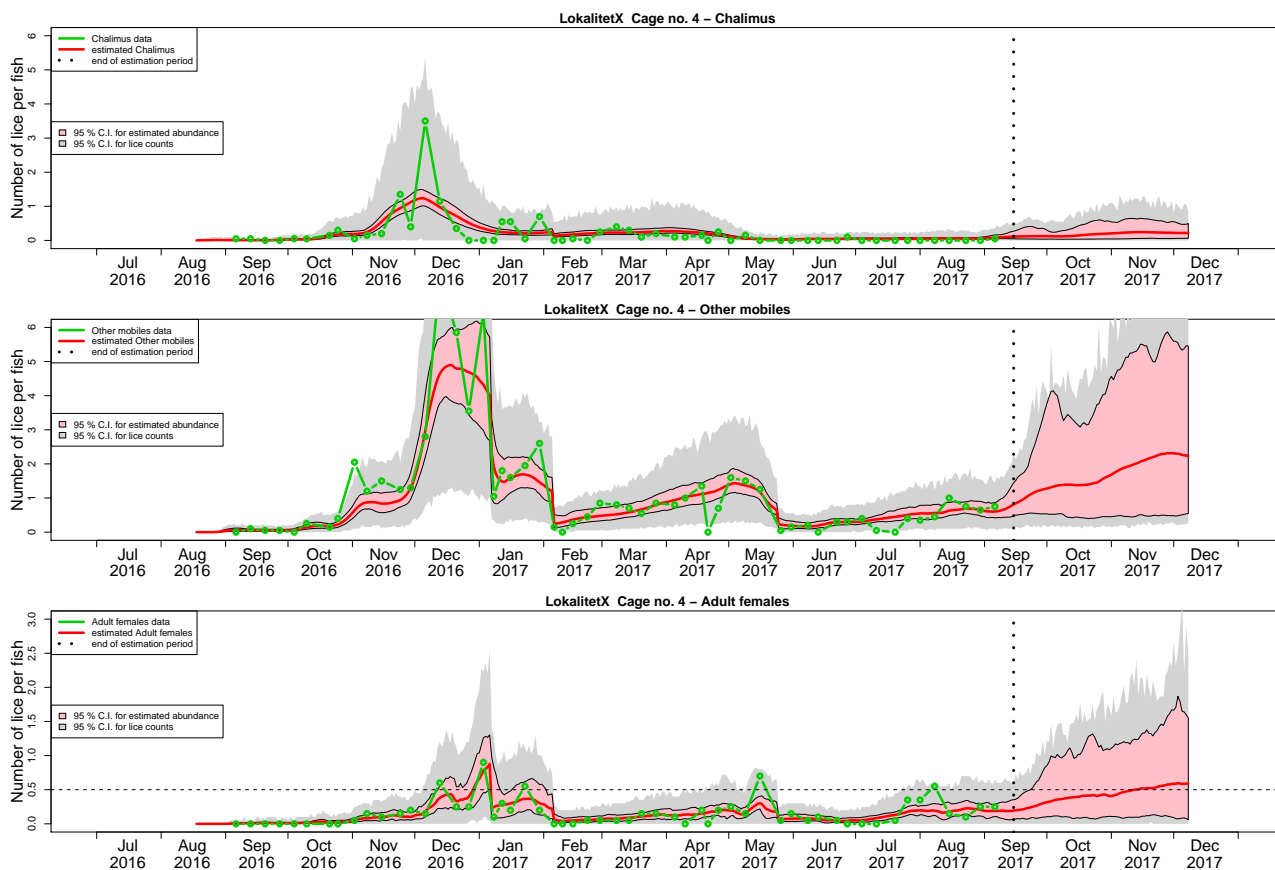
- Tre nye ikke-medikamentelle behandlinger er inkludert, termisk (Thermolicer, Optilicer), mekanisk (Hydrolicer) og ferskvann.
- De ikke-medikamentelle behandlingene kan medføre umiddelbar nedsatt effektivitet av rensefisk, som kan skyldes død av rensefisk, eller at den slutter å spise lus en periode etter en slik behandling.
- Naturlig dødelighet for lusa er avhengig av *modellert* salinitet, fra Meteorologisk institutt sin ROMS NorKyst800m-modellen.
- Rensefisk er gruppert i rognkjeks og leppefisk.
- Påslag av kopepoditter avhenger av sjøtemperatur.

### 3 Utvalgte resultater

En del av de estimerte størrelsene i modellen er av generell interesse, og disse gjengis under, og i kapittel 3.6 sammenlignes noen av disse med resultater fra andre studier. Disse estimatene kommer fra en modell hvor smitteindeksen er basert på sjøavstand.

#### 3.1 Eksempel på modelltilpasning

Figur 3 viser et eksempel på modelltilpasning, samt prognoser fram i tid, for en enkelt merd. Denne figuren er basert på en tidligere versjon av modellen og er hentet fra Aldrin og Huseby (2018a), men illustrerer like godt hvordan den oppdaterte modellen virker, så vi har derfor ikke oppdatert selve figuren.



Figur 3. Eksempel på data, modelltilpasning og prognoser for én enkelt merd. De tre panelene gjelder henholdsvis fastsittende lus, bevegelige lus(utenom voksne hunner) og voksne hunnlus. 15. september 2017 (prikket, svart, vertikal linje) er siste dag med data, slik at kurvene til høyre for det er prognoser fram i tid. Hvert panel inneholder lusetellinger (grønne sirkler med streker i mellom), beste estimat/prognose (rød kurve), 95% usikkerhetsintervall for reelt lusenivå i merda (rosa intervall), 95% usikkerhetsintervall for hvor vi kan forvente observerte lusetellinger basert på telling på 10 fisk (grått intervall).

### 3.2 Effekt av behandling

Tabell 1 viser estimert effekt av noen medikamentelle behandlingsmetoder og av de nye ikke-medikamentelle metodene som vi deler inn i termisk, mekanisk og ferskvannsbehandling. Usikkerheten er klart størst for de to siste av disse, for de har vært i mindre bruk enn termiske behandlinger i vårt datasett. Fordi noen av metodene ikke nødvendigvis fører til umiddelbar dødelighet av lusa, har vi angitt andel lus som har dødd som følge av behandlingen 10 dager etter gjennomført behandling. For de medikamentelle metodene har vi også oppgitt estimatene fra den versjonen av modellen som er dokumentert i ALD17, basert på data fra 2011 til 2014. Vi ser at effekten av de medikamentelle metodene har blitt betydelig dårligere siden den gang.

Tabell 1. Estimer med 95% usikkerhetsintervall (95% C.I.) av effekt av ulike behandlingsmetoder i denne studien og i Aldrin et al. (2017), hvor effekt her er definert som andel (i %) lus drept innen 10 dager etter behandling ved en sjøtemperatur på 10°C. CH=chalinus, PA=pre-adulte, A=adulte=voksne.

Type behandling	Antatt å virke på følgende stadier	Aldrin et al. (2017)		Denne studien	
		Data fra 2011-2014		Data fra 2013-2018	
		Estimat	95% C.I.	Estimat	95% C.I.
Hydrogenperoksid	PA, A	99	97-100	68	58-77
Pyretroider	CH, PA, A	94	89-98	73	63-82
Azametifos	PA, A	75	64-86	46	31-61
Termisk	CH, PA, A			75	71-80
Mekanisk	CH, PA, A			56	35-74
Ferskvann	CH, PA, A			66	41-84

Det er kjent at en uheldig bi-effekt av de ikke-medikamentelle behandlingene er at de også kan føre til at rensefisk dør, og at den også blir en mindre effektiv lusepiser etter behandling. Vi har estimert at i gjennomsnitt minker rensefiskens effektivitet mhp. lusespising med omkring 96% etter en termisk behandling, riktignok med en ganske stor usikkerhet (Tabell 2). Vi kan ikke tallfeste hvor mye av dette som skyldes død eller hvor mye som skyldes en noe tidsbegrenset nedsatt evne til å spise lus. Det må dessuten bemerkes at vi ikke observerer dataene for dette direkte, dette er en indirekte beregning basert på at det tilsynelatende blir mindre effekt av rensefisk i tida etter en termisk behandling, så det estimatet må fortolkes med forsiktighet. Tilsvarende estimer for mekanisk eller ferskvannsbehandling er såpass usikre at de ikke tallfestes her. Den store usikkerheten for disse to siste behandlingstypene skyldes igjen at det er færre av dem i datasettet enn det er termiske behandlinger.

Tabell 2. Estimater med 95% usikkerhetsintervall (95% C.I.) for hvor mye mindre effektiv (i %) renseskisk blir mhp. lusespising etter en termisk behandling.

Type	Estimat	95% C.I.
behandling		
Termisk	96	87-100

### 3.3 Naturlig dødelighet avhengig av modellert salinitet

Tabell 3 viser estimerte daglig naturlig dødelighet for lus i ulike stadier, for normal salinitet (over 30 psu) og salinitet 25 psu. Laveste observerte salinitet var forøvrig 24,6 psu i datasettet vi har brukt til estimering. Vi har modellert lusas dødelighet i ulike stadier som en funksjon av *modellert* salinitet ved 3m dyp, og tallfestet hvor mye dødeligheten øker ved synkende salinitet. Vi har brukt modellert salinitet fra ROMS NorKyst800m-modellen til Meteorologisk institutt, fordi denne er tilgjengelig for hele landet og dermed kan brukes i andre sammenhenger også. Resultatene kan ikke nødvendigvis sammenlignes med resultater fra laboratorieeksperimenter, både fordi vi bruker modellert, og ikke reell salinitet, men også fordi salinitet kan variere betydelig med dyp, og mesteparten av fisken, og dermed også lusa på fisken, oppholder seg dypere enn 3m. Videre er modellen utformet slik at det som fortolkes som dødelighet i larvestadiene i tillegg til reell dødelighet inkluderer luselarver som driver vekk fra oppdrettsanleggene. Men resultatet er klart i den forstand at dødeligheten for lus i larvestadier øker med synkende salinitet. Med modellens fortolkning av dødelighet inkluderer det muligheten for at luselarvene responderer på lav salinitet på en slik måte at de driver vekk fra anlegg med lav salinitet. For lus på fisken er det en tendens til det samme, men for disse stadiene er usikkerheten svært stor, og det er uklart om dette er en viktig effekt ved de saliniteter en lokalitet kan oppleve i praksis.

Tabell 3. Estimater med 95% usikkerhetsintervall (95% C.I.) av lusas dødelighet (i%) per dag i ulike stadier for normal (større enn 30 psu) og lav (25 psu) salinitet. R=rekrutter=egg og nauplier, CO=kopepoditter, CH=chalimus, PA=pre-adulte, A=adulte=voksne.

Stadium	Salinitet (psu)	Estimat	95% C.I.
R og CO	≥30	34	33-35
CH	≥30	1.1	1.0-1.1
PA	≥30	3.7	3.4-4.1
A	≥30	12	11-13
R og CO	25	50	47-56
CH	25	2.7	1.4-4.5
PA	25	15	8-23
A	25	13	11-16

### 3.4 Effekt av rensefisk

Tabell 4 viser estimert daglig dødelighet av pre-adulte og voksne lus grunnet rensefisk ved en rensefiskinnblanding på 10%. Vi vil påpeke at vi ikke har pålitelige data for rensefiskinnblanding, kun for antall og tidspunkt for rensefisk satt inn i den enkelte merd, samt at vi også kjenner antall laks (eller ørret) i merda. Vi bruker derfor en estimert rensefiskinnblanding som framkommer ved at det samtidig estimeres en daglig dødelighet av rensefisken. Dette, sammen med at rensefisk har en langsiktig, og ikke umiddelbar, effekt, gjør at det er vanskelig å estimere effekten av rensefisk. I forrige versjon av modellen antok vi at en viss rensefiskinnblanding gir en gitt prosentvis dødelighet av lusa. I den nye modellformuleringa antar vi at hver rensefisk er i stand til å spise en viss mengde lus per dag, slik at det ved lavere lusetall blir en større prosentvis lusedødelighet for en gitt rensefiskinnblanding. Denne formuleringa ga en bedre tilpasning til dataene enn en variant med prosentvis effekt som før. I forrige versjon av modellen antok vi dessuten lik effekt av alle rensefisktyper.

10% innblanding av leppefisk gir en daglig dødelighet på omkring 0.5% på pre-adulte og voksne lus ved et nivå på 1 lus (av hvert stadium) per fisk, og dette øker til omkring 5% ved et lavt lusenivå på 0.1 lus per fisk. For rognkjeks estimerte vi imidlertid en atskillig mindre effekt, omkring 1/5 av effekten for leppefisk (Tabell 4). Disse resultatene endres lite ved andre modellformuleringer.

Tabell 4. Estimer med 95% usikkerhetsintervall (95% C.I.) av effekt av rensefisk i denne studien og i Aldrin et al. (2017), hvor effekt her er definert som andel (i%) lus drept per dag ved 10% rensefiskinnblanding. PA=pre-adulte, A=adulte=voksne.

Art	Stadium	Aldrin et al. (2017) Data fra 2011-2014		Denne studien Data fra 2015-2018 1 lus per fisk		Denne studien Data fra 2015-2018 0.1 lus per fisk	
		Estimat	95% C.I.	Estimat	95% C.I.	Estimat	95% C.I.
Rognkjeks	PA, A	7.9	6.0-9.9	0.1	0.0-0.3	1.2	0.1-2.5
Leppefisk	PA, A	—	—	0.5	0.4-0.6	5.3	4.2-6.5

Vi har så langt ingen plausibel forklaring på at den estimerte effekten av rognkjeks blir så liten. Dette er ikke i samsvar med generell kunnskap, og disse resultatene kan således virke lite troverdige. Disse resultatene må imidlertid fortolkes med større varsomhet enn øvrige resultater fra modellen, fordi det er ukjent hvor stor rensefiskinnblanding det er til enhver tid og fordi det er mye vanskeligere å avdekke en liten, men jevn, effekt enn en større og umiddelbar effekt slik som ved medikamentelle og ikke-medikamentelle lusebehandlinger. Videre kan det være regionale forskjeller mellom hvor effektive de ulike rensefiskartene er, i tillegg til at sjøtemperatur og andre faktorer spiller en rolle. Det er generelt behov for mer forskning på effekt av rensefisk.

### 3.5 Utviklingstider

Vi har ikke data for egg, nauplier eller kopepoditter. Derfor bør modellestimer for disse stadiene fortolkes med varsomhet og være mer usikre enn angitt og være konfundert eller sammenblandet med hverandre. F.eks. vil en for høy reproduksjon (antall egg per døgn) kunne kompenseres med økt dødelighet av egg, nauplier eller kopepoditter.

Tabell 5 viser estimerte median utviklingstid fra et stadium til det neste ved sjøtemperaturer på henholdsvis, 5, 10 og 15°C. Dette er altså den tid det tar til halvpartene av lusa i et stadium har utviklet seg til neste stadium. I tillegg kommer den tid det tar for en kopepoditt å finne en vertsfisk.

Tabell 5. Estimer med 95% usikkerhetsintervall (95% C.I.) for median utviklingstid (i dager) fra ett stadium til det neste for ulike sjøtemperaturer. CO=kopepoditter, CH=chalmus, PA=pre-adulte, A=adulte=voksne.

Stadium	Temperatur (°C)	Estimat	95% C.I.
Egg	5	6.1	5.8-6.2
Nauplier	5	2.9	2.8-3.2
CH	5	20.6	19-22
PA	5	17.7	17-19
Egg	10	4.7	4.5-4.8
Nauplier	10	2.3	2.2-2.5
CH	10	11.4	11-12
PA	10	12.3	12-13
Egg	15	4.0	3.9-4.2
Nauplier	15	2.0	1.8-2.1
CH	15	8.0	7-9
PA	15	10.0	10-10

### 3.6 Sammenligning med resultater fra andre studier

Tabell 6 viser estimert median utviklingstid fra ett stadium til det neste for en sjøtemperatur på 10°C i denne studien. Tabellen viser også delvis sammenlignbare resultater fra andre studier. I forrige versjon av modellen (Aldrin et al., 2017) var estimert utviklingstid fra CH til PA høyere enn i andre studier, mens utviklingstid fra PA til A var tilsvarende lavere enn flere andre studier. Resultatene fra den nåværende analysen samsvarer derimot relativt godt med resultatene fra andre studier.

Tabell 6. Estimer med 95% usikkerhetsintervall (95% C.I.) for median utviklingstid (i dager) fra ett stadium til det neste for en sjøtemperatur på 10°C, sammen med punkt-estimer eller intervaller fra andre studier. CO=kopepoditter, CH=chalmus, PA=pre-adulte, A=adulte=voksne.

Stadium	Punkt estimat eller intervall	95% C.I.	Estimat av hva	Kjønn	Kommentar	Referanse
Egg	4.7	4.5-4.8	median			denne studien
	5.0	4.5-5.8	median			Aldrin et al. (2017)
	8.8		minimum		fra deres ligning (8) og tabell 3	Stien et al. (2005)
	4.6		gj.snitt			Samsing et al. (2016)
Nauplier	2.3	2.2-2.5	median			denne studien
	4.0	3.2-4.5	median			Aldrin et al. (2017)
	3.6		minimum		fra deres ligning (8) og tabell 3	Stien et al. (2005)
	3.8		gj.snitt			Samsing et al. (2016)
CH	11.4	11.0-12.0	median			denne studien
	18.8	18.0-19.0	median			Aldrin et al. (2017)
	15.4		minimum	hanner	fra deres ligning (8) og tabell 3	Stien et al. (2005)
	16.5		minimum	hunner	fra deres ligning (8) og tabell 3	Stien et al. (2005)
	11-13		intervall	hanner		Eichner et al. (2015)
	13-15		intervall	hunner		Eichner et al. (2015)
	11-14		minimum		5 forsøk med "juvenile Pacific salmon" ved 9-11°C	Krkošek et al. (2009)
PA	12.3	12.0-13.0	median			denne studien
	10.5	10.0-11.0	median			Aldrin et al. (2017)
	10.4		minimum	hanner	beregnet som forskjell mellom tid fra CH til A og fra CH til PA	Stien et al. (2005)
	15.4		minimum	hunner	beregnet som forskjell mellom tid fra CH til A og fra CH til PA	Stien et al. (2005)

Tabell 7 sammenligner estimer av dødeligheter fra denne studien med resultater fra andre studier.

Tabell 7. Estimater med 95% usikkerhetsintervall (95% C.I.) av lusas dødelighet i ulike stadier for normal (større enn 30 psu) salinitet sammen med punktestimater eller intervaller fra andre studier. R=rekutter=egg og nauplier, CO=kopepoditter, CH=chalimus, PA=pre-adulte, A=adulte=voksne. Estimater for dødelighet for CH og PA er i denne studien satt fast og ikke estimert.

Stage	Punkt estimat eller intervall	95% C.I.	Kjønn	Kommentar	Referanse
Nauplier	0.34	0.33-0.35		for R=egg+nauplier, inkludert drift vekk	denne studien
	0.30	0.29-0.32		for R=egg+nauplier, inkludert drift vekk	Aldrin et al. (2017)
	0.17			"plausible verdier"	Stien et al. (2005)
CO	0.34	0.33-0.35		=dødelighet for R	denne studien
	0.30	0.29-0.32		=dødelighet for R	Aldrin et al. (2017)
	0.22			"plausible verdier"	Stien et al. (2005)
CH	0.011	0.010-0.011			denne studien
	0.0010	0.0008-0.0011			Aldrin et al. (2017)
	0.002-0.01			"plausible verdier"	Stien et al. (2005)
	0.0006-0.020			ytre grenser fra 4 rapporterte studier	--
	0.0002-0.026			intervall over 7 forsøk med "juvenile Pacific salmon"	Krkošek et al. (2009)
PA	0.037	0.034-0.041			denne studien
	0.0071	0.0055-0.0095			Aldrin et al. (2017)
	0.02-0.18		hanner	"plausible verdier"	Stien et al. (2005)
	0.002-0.21		hanner	ytre grenser fra 4 rapporterte studier	--
	0.03-0.07		hunner	"plausible verdier"	--
	0.011-0.102		hunner	ytre grenser fra 4 rapporterte studier	--
	0.14-0.34			PA+A kombinert, intervall over 7 forsøk med "juvenile Pacific salmon"	Krkošek et al. (2009)
A	0.12	0.11-0.13			denne studien
	0.12	0.11-0.13			Aldrin et al. (2017)
	0.03-0.06		hanner	"plausible verdier"	Stien et al. (2005)
	0.008-0.26		hanner	ytre grenser fra 4 rapporterte studier	--
	0.02-0.04		hunner	"plausible verdier"	--
	0.003-0.70		hunner	ytre grenser fra 3 rapporterte studier	--
	0.14-0.34			PA+A kombinert, intervall over 7 forsøk med "juvenile Pacific salmon"	Krkošek et al. (2009)

## 4 Endringer i modellformulering

Vi beskriver her i mer tekniske detaljer de endringer som er gjort i modellen siden forrige publiserte versjon (Aldrin et al., 2017). For øvrige deler av modellen henviser vi til Aldrin et al. (2017).

### 4.1 Smittepressindeks basert på midlere strømkontakt

En daglig smitteindeks for smitte fra naboanlegg er input til populasjonsmodellen ( $N_{t-1}^{AFExt}$  i ligning (1) i ALD17). Den beregnes utenom selve populasjonsmodellen. Tidligere har vi brukt en smitteindeks basert på sjøavstand, hvor antall voksne hunnlus på nabolokaliteter vektet i forhold til hvor nær de ligger i sjøav-



stand fra den aktuelle lokaliteten (ligning (37) i ALD17). Sjøavstand er her definert som korteste vei gjennom sjø mellom to lokaliteter.

Denne gang har vi i tillegg brukt en smitteindeks basert på midlere strømkontakt. Dvs. at vektene i ligning (37) i ALD17 er et estimat av midlere strømkontakt mellom to lokaliteter over tid. Dette er beregnet ved hjelp av Proactimas hydrodynamiske modell (Kierans et al., 2019) for 2013 og 2014 slik: Det slippes ut like mange luseelarvepartikler jevnlig fra alle lokaliteter fra februar 2013 til og med desember 2014, hvor det tas hensyn til det aktuelle været i perioden (med en tidopløsning ca. en time). Dette sier altså ikke noe om luseforholdene i den aktuelle perioden, men om grad av strømkontakt. Det varierer mye fra måned til måned, så vi har derfor valgt å beregne strømkontakt i gjennomsnitt over hele perioden, og antar så at det er rimelig representativt for midlere strømkontakt også i framtida. Til sist har vi skalert midlere strømkontakt slik at den kommer på samme skala som sjøavstand, ved at gjennomsnittet over parvis midlere strømkontakt mellom 56 lokaliteter skaleres til å bli lik tilsvarende gjennomsnitt over sjøavstandene for de samme lokalitetene. Midlere strømkontakt er bare beregnet for lokaliteter inne i Rogalandsbassenget. For smitte fra lokaliteter utenfor dette området har vi brukt sjøavstand i stedet. Dette utgjør en relativt liten del av total smitte.

Merk at kontakt basert på sjøavstand er symmetrisk, dvs. det er like langt fra lokalitet A til B som motsatt vei. Det er ikke tilfelle når vi bruker midlere strømkontakt, det kan for eksempel være mer kontakt fra A til B enn motsatt vei.

Populasjonsmodellen er så estimert separat for begge typer smitteindeks. Smitteindeks basert på sjøavstand ga best tilpasning til data på den måten at den ga en bedre (større) log likelihood på 300 i forhold til når vi brukte en smitteindeks basert på midlere strømvastand, dvs. en statistisk signifikant forskjell. I tillegg estimerte vi modellen med en kombinert smitteindeks, slik at den kombinerte smitteindeksen ga vekt  $w$  til smitteindeksen basert på sjøavstand og vekt  $(1 - w)$  til smitteindeksen basert på midlere strømkontakt, og hvor parameteren  $w$  blei estimert simultant med alle andre modellparametre. Estimatet for  $w$  blei nær 1, dvs. at smittepressindeksen basert på sjøavstand fikk nesten all vekt i den kombinerte smittepressindeksen.

Ut fra dette konkluderer vi med at til bruk i populasjonsmodellen vil det per i dag fortsatt være best å bruke en smitteindeks basert på sjøavstand. Imidlertid hadde valg av smitteindeks ganske lite å si for estimatene for øvrige modellparametre. Og det kan selvsagt innvendes mot den sjøavstandsbaserte smitteindeksen at den ignorerer strømforhold. Derfor er alle scenariosimuleringene som er utført i dette prosjektet og beskrevet i Aldrin og Huseby (2019) utført to ganger, en gang med smitteindeks basert på sjøavstand og en gang med smitteindeks basert på midlere strømkontakt.

Merk forøvrig at Proactimas hydrodynamiske modell kan gi mer detaljert informasjon enn det vi har brukt. Den kan predikere hvordan kopepodtettethet i et punkt varierer over tid, selvsagt med en usikkerhet (som vi ikke har vurdert). Dette kunne i prinsippet vært input til populasjonsmodellen. Men for det første var dette tilgjengelig bare for 2013 og 2014, mens populasjonsmodellen har blitt estimert ut fra data fram til 2018. For det andre er vi med scenariosimuleringene interessert i effekter i det lange løp, slik at en midlere strømkontakt over lang tid er mer relevant enn den daglige strømkontakt.

## 4.2 Nye typer behandlinger

Tre nye ikke-medikamentelle behandlinger, termisk (Thermolicer, Optilicer), mekanisk (Hydrolicer) og ferskvann er inkludert i modellen. Dette inkluderer deres effekt på lus, dvs. økt dødelighet av lus, men også potensiell økt dødelighet av renseskisk.

De nye typer behandlinger inngår i modellen på samme måte som medikamentell behandling (ligningene (21)-(23) i ALD17), og er antatt å ha 0 forsinkelse og varighet 1 dag, og effekt på lus i stadiene CH, PA og A (jfr. tabell 1 i ALD17).

Modellen for dødelighet av renseskisk, som i ALD17 kun inkluderte en naturlig dødelighet, er utvidet til å inkludere dødelighet pga. termisk, mekanisk eller ferskvannsbehandling. Ligning (40) i ALD17 er dermed for rognkjeks erstattet med

$$N_{tc}^{lump} = N_{(t-1)c}^{lump}(1 - \kappa^{lump}) + S_{tc}^{lump} \quad (1)$$

i tidspunkt uten ikke-medikamentell behandling og

$$N_{tc}^{lump} = N_{(t-1)c}^{lump}(1 - \kappa^{lump}) \cdot (1 - \kappa^{therm} I_{t-1}^{therm})(1 - \kappa^{mech} I_{t-1}^{mech})(1 - \kappa^{freshw} I_{t-1}^{freshw}) + S_{tc}^{lump}, \quad (2)$$

i de tidspunkt det er gjennomført behandling, hvor  $I_{t-1}^{therm}$  er 1 hvis det er gjennomført en termisk behandling ved tid  $t - 1$  med en dødelighet på rognkjeks på  $\kappa^{therm}$ , og tilsvarende for mekanisk og ferskvannsbehandling. En tilsvarende modell brukes også for leppefisk, men dødeligheten pga. behandling er antatt å være den samme for både rognkjeks og leppefisk.

## 4.3 Dødelighet avhengig av salinitet og ny parametrisering av dødelighet

Naturlig dødelighet for lusa er i populasjonsmodellen nå en funksjon av modellert salinitet fra Meteorologisk institutt sin ROMS NorKyst800m-modell. Naturlig

dødelighet er for nå alle stadier gitt ved det som var ligning (15) i ALD17:

$$m_{tfac}^{nat} = m_{tf}^{nat} = \exp(z_{tf}^{nat} / (1 + \exp(z_{tf}^{nat}))), \quad (4)$$

(5)

For R og CO er nå

$$z_{tf}^{nat} = \lambda_0^{RCOnat} + \lambda_1^{RCOsal} x_{tf}^{sal}, \quad (6)$$

hvor  $\lambda_0^{nat}$  og  $\lambda^{sal}$  er parametre separate for hvert stadium, bortsett fra at de er like for R og CO. Videre er  $x_{tf}^{sal}$  gitt ved

$$x_{tf}^{sal} = \min(s_{tf}, \theta^{sal}) - \theta^{sal}, \quad (7)$$

hvor  $s_{tf}$  er salinitet angitt i psu, mens  $\theta^{sal}$  er en parameter felles for alle stadier. Det vil si at  $x_{tf}^{sal} = 0$  så lenge  $s_{tf} \geq \theta^{sal}$  og er  $s_{tf} - \theta^{sal}$  ellers, slik at det er ingen effekt av salinitet så lenge saliniteten er større eller lik  $\theta^{sal}$ .

For CH, PA og A er  $z_{tf}^{nat}$  en AR(1)-prosess gitt ved en modifikasjon av ligning (16) i ALD17:

$$(z_{tf}^{nat} - \lambda_0^{nat} - \lambda_1^{sal} x_{tf}^{sal}) = \phi^{nat} \cdot (z_{(t-1)f}^{nat} - \lambda_0^{nat} - \lambda_1^{sal} x_{tf}^{sal}) + \varepsilon_{tf}^{nat}, \quad (8)$$

$$\text{Var}(\varepsilon_{tf}^{nat}) = (\sigma^{nat})^2, \quad (9)$$

hvor parameterne er separate for CH, PA og A.

Med denne formuleringa vil  $\lambda_0^{nat}$  og  $(\sigma^{nat})^2$  være ganske korrelert, og vi har derfor reparametrisert  $\lambda_0^{nat}$  ved

$$\lambda_0^{nat} = \log(\mu) - (\sigma^{nat})^2 / (2(1 - \phi^2)), \quad (10)$$

hvor  $\mu$  er den frie parameteren som estimeres, og denne vil være tilnærmet lik forventninga til den naturlige dødeligheten  $m_{tf}^{nat}$ .

#### 4.4 Rensefisk

Rensefisk er gruppert i rognkjeks (lumpsucker) og leppefisk (wrasse). Vi har valgt en annen formulering enn i ALD17, ved at dødelighet per døgn på lus i PA eller A stadier på grunn av av rensefisk i merd  $c$ , anlegg  $f$  ved tid  $t$  (ligning (18) i ALD17) er erstattet med

$$m_{tfac}^{clf} = m_{tfc}^{clf} = \min(m_{tfc}^{lump} + m_{tfc}^{wrasse}, 0.5), \quad (11)$$

hvor dødelighet grunnet rognkjeks er gitt ved

$$\begin{aligned} m_{tfc}^{lump} &= (1 - \exp(-\gamma^{lump} N_{tfc}^{lice} / N_{tfc}^{SAL})) \lambda^{lump} (N_{tfc}^{lump} / N_{tfc}^{SAL}) / (N_{tfc}^{lice} / N_{tfc}^{SAL}) \\ &= (1 - \exp(-\gamma^{lump} N_{tfc}^{lice} / N_{tfc}^{SAL})) \lambda^{lump} (N_{tfc}^{lump}) / (N_{tfc}^{lice}), \end{aligned} \quad (12)$$

og tilsvarende formel gjelder dødelighet grunnet leppefisk  $m_{tfc}^{wrasse}$ , men da med separate parametre. Her er  $N_{tfc}^{lump}$  antall rognkjeks og rensefisk, mens  $N_{tfc}^{lice}$  er antall lus i enten PA- eller A-stadiet og  $N_{tfc}^{SAL}$  er antall laks (eller ørret). Parameterne  $\lambda^{lump}$  og  $\lambda^{wrasse}$  fortolkes som midlere antall lus i enten PA- eller A-stadiet som spises per dag av én rensefisk når det er tilstrekkelig med lus tilstede. Leddet  $(1 - \exp(-\gamma(\lambda^{lump} N_{tfc}^{lice}/N_{tfc}^{SAL}))$  gjør at dødelighet for lus går ned når det er svært få lus per fisk, en kan tenke seg at de da er vanskelig å finne.

Vi har også estimert modeller som er varianter av den opprinnelige formuleringa av ligning (18) i ALD17, men alle disse ga dårligere tilpasning til dataene enn den ovenstående formuleringa. Den forrige formuleringa var basert på en prosentvis effektivitet av rensefisk, og variantene vi testet ut, var umiddelbar effekt, effekt fra og med to uker etter utsett, temperaturavhengig effekt og vektavhengig effekt, men alle disse hadde altså dårligere forklaringskraft enn den valgte modellen.

## 4.5 Temperaturavhengig infeksjonsrate

Infeksjonsraten, eller andelen av kopepoditter som finner en vertsfisk i løpet av et døgn er nå avhengig av sjøtemperatur, og modelleres slik:

$$d_{tfc}^{CO} = \exp(\eta_{tfc}^{CO}) / (1 + \sum_c \exp(\eta_{tfc}^{CO})), \quad (13)$$

hvor

$$\eta_{tfc}^{CO} = \delta_{0fc}^{CO} + \log(N_{tfc}^{SAL}) + \delta_1^{CO}(\log(W_{tfc}) - 0.55) + \quad (14)$$

$$\delta_2^{CO}(T_{tf} - 9) + \delta_3^{CO}(T_{tf} - 9)^2. \quad (15)$$

Det var forøvrig en trykkfeil i denne formelen i den tidligere rapporten Aldrin og Huseby (2018a).

Her er  $N_{tfc}^{SAL}$  og  $W_{tfc}$  henholdsvis antall fisk (i millioner) og gjennomsnittsvekt av fisk (i kg) for fisk i merd  $c$  på anlegg  $f$  og ved tid  $t$ . Videre er  $T_{tf}$  sjøtemperaturen på anlegget på den aktuelle dagen, målt på 3m dyp.

## 5 Oppdaterte modellparametre - smitteindeks basert på sjøavstand

Tabellene 8 og 9 angir parameterestimaterne når vi bruker en smitteindeks basert på sjøavstand. De viktigste resultatene fortolkes i kapittel 4 eller i ALD17. A posteriori fordelingene for parameterne merket med \* i tabellene er svært like a priori fordelingene, hvilket vil si at dataene inneholder svært lite informasjon om disse.

Det gjelder naturlig dødelighet for rognkjeks ( $\kappa^{lump}$ ), og det skyldes at rognkjeks er estimert til å ha minimal effekt på lusas dødelighet, slik at denne parameteren blir uidentifiserbar. Det gjelder også dødelighet av rensefisk grunnet mekanisk ( $\kappa^{mech}$ ) eller ferskvannsbehandling ( $\kappa^{freshw}$ ), og årsaken er trolig at det er relativt få tilfeller av disse behandlingene i dataene. Til sist gjelder det dødelighet relatert til lav salinitet for CH, PA og A ( $\lambda_1^{CHsal}$ ,  $\lambda_1^{PAsal}$ ,  $\lambda_1^{Asal}$ ), og årsaken er trolig at det er sjelden at saliniteten er såpass lav at den har særlig betydning. Infeksjonsraten faller med stigende sjøtemperatur, og dette er ikke hva vi forventer ut fra kunnskap fra laboratorieforsøk, og vi vi trolig ta bort igjen den effekten i kommende versjoner av modellen.

Tabell 8. Posterior means with 95% credible intervals of parameters in the static parts of the model, using the infection index based on sea distance. Parameter estimates and credible intervals marked with \* are close to the prior, and thus the data contain little information on these.

Part of model	Stage	Parameter interpretation	Parameter symbol	Section	Posterior mean	95% C.I. lower	95% C.I. upper
Natural mortality	R,CO	Intercept	$\lambda_0^{RCOnat}$	4.3	0.339	0.334	0.346
Salinity mortality	R,CO	Regression coeff.	$\lambda_1^{RCOsal}$	4.3	-0.147	-0.255	-0.105
Salinity mortality	R,CO	Threshold	$\theta^{sal}$	4.3	29.600	28.464	29.994
Mortality lump sucker	PA, A	No. lice per day	$\lambda^{lump}$	4.4	0.012	0.001	0.025
Mortality lump sucker	PA, A	No. lice per day	$\gamma^{lump}$	4.4	295.550	9.377	488.278
Mortality wrasse	PA, A	No. lice per day	$\lambda^{wrasse}$	4.4	0.053	0.042	0.065
Mortality wrasse	PA, A	No. lice per day	$\gamma^{wrasse}$	4.4	456.726	371.967	496.877
Development	Egg	Median at 10°C	$\delta^{Em10}$		4.564	4.393	4.702
Development	Nauplii	Median at 10°C	$\delta^{Nm10}$		2.220	2.087	2.392
Development	R	Shape parameter	$\delta^{Rs}$		19.128	17.175	19.975
Development	R	Power parameter	$\delta^{Rp}$		0.407	0.400	0.417
Development	CH	Median at 10°C	$\delta^{CHm10}$		11.585	10.837	12.188
Development	CH	Shape parameter	$\delta^{CHs}$		3.121	2.762	3.628
Development	CH	Power parameter	$\delta^{CHp}$		0.844	0.786	0.907
Development	PA	Median at 10°C	$\delta^{PAm10}$		12.533	12.100	12.978
Development	PA	Shape parameter	$\delta^{PAs}$		2.092	1.848	2.370
Development	PA	Power parameter	$\delta^{PAp}$		0.515	0.451	0.579
Development	CO	Expectation	$\delta_0^{CO}$		-2.317	-2.603	-2.042
Development	CO	Regression coeff. weight	$\delta_1^{CO}$		0.203	0.166	0.238
Development	CO	Regr. coeff. seatemp.	$\delta_2^{CO}$		-0.159	-0.182	-0.135
Development	CO	Regr. coeff. seatemp <sup>2</sup>	$\delta_3^{CO}$		0.000	-0.004	0.003
Development	CO	Variance within farm	$(\sigma^{COdf})^2$		0.028	0.023	0.035
Development	CO	Variance between farms	$(\sigma^{COd})^2$		0.600	0.361	0.962
Reproduction	AF to R	Basic number of eggs	$\beta_0^r$		172.500	fixed	
Reproduction	AF to R	Age dependence	$\beta_1^r$		0.200	fixed	
Reproduction	AF to R	Density dependence	$\gamma^r$		338.886	177.238	487.135
Lumpsucker model		Mortality rate	$\kappa^{lump}$	4.4	0.027	0.011	0.053
Wrasse model		Mortality rate	$\kappa^{wrasse}$	4.4	0.009	0.006	0.011
New treatments		Mortality rate	$\kappa^{therm}$	4.2	0.961	0.865	0.999
New treatments		Mortality rate	$\kappa^{mech}$	4.2	0.490	0.026	0.971
New treatments		Mortality rate	$\kappa^{freshw}$	4.2	0.480	0.039	0.962
Data model	CH	Aggregation parameter	$\rho^{CH}$		0.053	0.051	0.056
Data model	OM=PA+AM	Aggregation parameter	$\rho^{OM}$		0.191	0.182	0.199
Data model	AF	Aggregation parameter	$\rho^{AF}$		0.133	0.124	0.142
Data model	CH	Expectation	$\beta_0^{CHcount}$		-1.622	-1.839	-1.401
Data model	CH	Variance	$(\sigma^{CHcount})^2$		0.341	0.218	0.530
Data model	CH	Regression coeff.	$\beta_1^{CHcount}$		-0.245	-0.267	-0.224

Tabell 9. Posterior means with 95% credible intervals of parameters in the time-varying parts of the model, using the infection index based on sea distance. Parameter estimates and credible intervals marked with \* are close to the prior, and thus the data contain little information on these.

Part of model	Stage	Parameter interpretation	Parameter symbol	Section	Posterior mean	95% C.I. lower	95% C.I. upper
Natural mortality	CH	Expectation of exp. AR(1)	$\mu_0^{CHnat}$	4.3	0.011	0.010	0.011
Salinity mortality	CH	Regression coeff.	$\lambda_1^{CHsal}$	4.3	-0.200	-0.332	-0.069
Natural mortality	CH	AR coefficient in AR(1)	$\phi^{CHnat}$	4.3	0.065	0.004	0.149
Natural mortality	CH	Variance in AR(1)	$(\sigma^{CHnat})^2$	4.3	0.022	0.014	0.030
Natural mortality	PA	Expectation of exp. AR(1)	$\mu_0^{PAnat}$	4.3	0.040	0.036	0.044
Salinity mortality	PA	Regression coeff.	$\lambda_1^{PAsal}$	4.3	-0.336	-0.422	-0.233
Natural mortality	PA	AR coefficient in AR(1)	$\phi^{PAnat}$	4.3	0.415	0.375	0.451
Natural mortality	PA	Variance in AR(1)	$(\sigma^{PAnat})^2$	4.3	0.404	0.359	0.454
Natural mortality	A	Expectation of exp. AR(1)	$\mu_0^{Anat}$	4.3	0.167	0.152	0.182
Salinity mortality	A	Regression coeff.	$\lambda_1^{Asal}$	4.3	-0.022	-0.082	-0.001
Natural mortality	A	AR coefficient in AR(1)	$\phi^{Anat}$	4.3	0.680	0.660	0.698
Natural mortality	A	Variance in AR(1)	$(\sigma^{Anat})^2$	4.3	0.695	0.658	0.737
Mortality ch.tr.	CH, PA, A	Expectation, deltamethrin	$\lambda^{DMcht}$		0.273	-0.633	1.192
Mortality ch.tr.	CH, PA, A	Variance, deltamethrin	$(\sigma^{DMcht})^2$		20.104	14.749	24.618
Mortality ch.tr.	PA, A	Expectation, azamethiphos	$\lambda^{AZcht}$		-2.328	-3.846	-0.882
Mortality ch.tr.	PA, A	Variance, azamethiphos	$(\sigma^{AZcht})^2$		$(\sigma^{DMcht})^2$		
Mortality ch.tr.	PA, A	Expectation, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	$\lambda^{HPcht}$		-0.234	-0.913	0.467
Mortality ch.tr.	PA, A	Variance, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	$(\sigma^{HPcht})^2$		$(\sigma^{DMcht})^2$		
Mortality ch.tr.	CH, PA, A	Expectation, emamectin	$\lambda^{EMcht}$		-5.235	-6.026	-4.616
Mortality ch.tr.	CH, PA, A	Variance, emamectin	$(\sigma^{EMcht})^2$		4.983	2.831	7.899
Mortality ch.tr.	CH, PA, A	Expectation, diflubenzuron	$\lambda^{DBcht}$		-3.178	-3.793	-2.650
Mortality ch.tr.	CH, PA, A	Variance, diflubenzuron	$(\sigma^{DBcht})^2$		$(\sigma^{EMcht})^2$		
Mortality new tr.	PA, A	Expectation, thermal	$\lambda^{therm}$	4.2	1.465	1.334	1.592
Mortality new tr.	PA, A	Variance, thermal	$(\sigma^{therm})^2$	4.2	1.730	1.357	2.151
Mortality new tr.	PA, A	Expectation, mechanical	$\lambda^{mech}$	4.2	0.316	-0.773	1.327
Mortality new tr.	PA, A	Variance, mechanical	$(\sigma^{mech})^2$	4.2	$(\sigma^{therm})^2$		
Mortality new tr.	PA, A	Expectation, freshwater	$\lambda^{freshw}$	4.2	0.894	-0.480	2.068
Mortality new tr.	PA, A	Variance, freshwater	$(\sigma^{freshw})^2$	4.2	$(\sigma^{therm})^2$		
External recr.	AF to R	Expectation in AR(1)	$\mu^{Ext}$		0.336	0.220	0.442
External recr.	AF to R	Coefficient in AR(1)	$\phi^{Ext}$		0.912	0.899	0.925
External recr.	AF to R	Variance in AR(1)	$(\sigma^{Extar})^2$		0.192	0.174	0.208
External recr.	AF to R	Variance	$(\sigma^{Ext})^2$		0.020	0.000	0.102

## 6 Modellparametre - smitteindeks basert på midlere strømkontakt

Tabellene 10 og 11 angir parameterestimatene når vi bruker en smitteindeks basert på midlere strømkontakt.

Tabell 10. Posterior means with 95% credible intervals of parameters in the static parts of the model, using the infection index based on average sea current contact. Parameter estimates and credible intervals marked with \* are close to the prior, and thus the data contain little information on these.

Part of model	Stage	Parameter interpretation	Parameter symbol	Section	Posterior mean	95% C.I. lower	95% C.I. upper
Natural mortality	R,CO	Intercept	$\lambda_0^{RCOnat}$	4.3	0.319	0.315	0.323
Salinity mortality	R,CO	Regression coeff.	$\lambda_1^{RCOsal}$	4.3	-0.105	-0.126	-0.083
Salinity mortality	R,CO	Threshold	$\theta^{sal}$	4.3	29.963	29.865	29.999
Mortality lumpsucker	PA, A	No. lice per day	$\lambda^{lump}$	4.4	0.011	0.000	0.027
Mortality lumpsucker	PA, A	No. lice per day	$\gamma^{lump}$	4.4	227.099	1.445	486.733
Mortality wrasse	PA, A	No. lice per day	$\lambda^{wrasse}$	4.4	0.057	0.049	0.066
Mortality wrasse	PA, A	No. lice per day	$\gamma^{wrasse}$	4.4	452.782	359.352	496.263
Development	Egg	Median at 10°C	$\delta^{Em10}$		4.362	4.243	4.454
Development	Nauplii	Median at 10°C	$\delta^{Nm10}$		2.385	2.317	2.512
Development	R	Shape parameter	$\delta^{Rs}$		18.225	15.501	19.899
Development	R	Power parameter	$\delta^{Rp}$		0.406	0.400	0.415
Development	CH	Median at 10°C	$\delta^{CHm10}$		11.824	11.049	12.533
Development	CH	Shape parameter	$\delta^{CHs}$		3.210	2.849	3.607
Development	CH	Power parameter	$\delta^{CHp}$		0.833	0.783	0.886
Development	PA	Median at 10°C	$\delta^{PAm10}$		12.006	11.397	12.472
Development	PA	Shape parameter	$\delta^{PAs}$		2.101	1.842	2.387
Development	PA	Power parameter	$\delta^{PAp}$		0.507	0.448	0.580
Development	CO	Expectation	$\delta_0^{CO}$		-2.367	-2.666	-2.078
Development	CO	Regression coeff. weighth	$\delta_1^{CO}$		0.163	0.128	0.198
Development	CO	Regr. coeff. seatemp.	$\delta_2^{CO}$		-0.148	-0.166	-0.135
Development	CO	Regr. coeff. seatemp <sup>2</sup>	$\delta_3^{CO}$		0.000	-0.002	0.002
Development	CO	Variance within farm	$(\sigma^{COdf})^2$		0.032	0.026	0.040
Development	CO	Variance between farms	$(\sigma^{COd})^2$		0.533	0.335	0.837
Reproduction	AF to R	Basic number of eggs	$\beta_0^r$		172.500	fixed	
Reproduction	AF to R	Age dependence	$\beta_1^r$		0.200	fixed	
Reproduction	AF to R	Density dependence	$\gamma^r$		391.478	241.394	493.348
Lumpsucker model		Mortality rate	$\kappa^{lump}$	4.4	0.028	0.010	0.055
Wrasse model		Mortality rate	$\kappa^{wrasse}$	4.4	0.009	0.008	0.010
New treatments		Mortality rate	$\kappa^{therm}$	4.2	0.956	0.847	0.999
New treatments		Mortality rate	$\kappa^{mech}$	4.2	0.477	0.020	0.970
New treatments		Mortality rate	$\kappa^{freshw}$	4.2	0.487	0.033	0.972
Data model	CH	Aggregation parameter	$\rho^{CH}$		0.051	0.049	0.054
Data model	OM=PA+AM	Aggregation parameter	$\rho^{OM}$		0.187	0.179	0.195
Data model	AF	Aggregation parameter	$\rho^{AF}$		0.126	0.118	0.135
Data model	CH	Expectation	$\beta_0^{CHcount}$		-1.682	-1.888	-1.465
Data model	CH	Variance	$(\sigma^{CHcount})^2$		0.328	0.209	0.507
Data model	CH	Regression coeff.	$\beta_1^{CHcount}$		-0.232	-0.252	-0.213



Tabell 11. Posterior means with 95% credible intervals of parameters in the time-varying parts of the model, using the infection index based on the average sea current contact. Parameter estimates and credible intervals marked with \* are close to the prior, and thus the data contain little information on these.

Part of model	Stage	Parameter interpretation	Parameter symbol	Section	Posterior mean	95% C.I. lower	95% C.I. upper
Natural mortality	CH	Expectation of exp. AR(1)	$\mu_0^{CHnat}$	4.3	0.009	0.009	0.010
Salinity mortality	CH	Regression coeff.	$\lambda_1^{CHsal}$	4.3	-0.270	-0.398	-0.131
Natural mortality	CH	AR coefficient in AR(1)	$\phi^{CHnat}$	4.3	0.127	0.003	0.260
Natural mortality	CH	Variance in AR(1)	$(\sigma^{CHnat})^2$	4.3	0.033	0.030	0.037
Natural mortality	PA	Expectation of exp. AR(1)	$\mu_0^{PAnat}$	4.3	0.039	0.037	0.043
Salinity mortality	PA	Regression coeff.	$\lambda_1^{PAsal}$	4.3	-0.383	-0.441	-0.334
Natural mortality	PA	AR coefficient in AR(1)	$\phi^{PAnat}$	4.3	0.419	0.384	0.454
Natural mortality	PA	Variance in AR(1)	$(\sigma^{PAnat})^2$	4.3	0.420	0.377	0.479
Natural mortality	A	Expectation of exp. AR(1)	$\mu_0^{Anat}$	4.3	0.184	0.169	0.200
Salinity mortality	A	Regression coeff.	$\lambda^{Asal}$	4.3	-0.010	-0.032	0.000
Natural mortality	A	AR coefficient in AR(1)	$\phi^{Anat}$	4.3	0.698	0.679	0.715
Natural mortality	A	Variance in AR(1)	$(\sigma^{Anat})^2$	4.3	0.677	0.635	0.716
Mortality ch.tr.	CH, PA, A	Expectation, deltamethrin	$\lambda^{DMcht}$		0.635	-0.231	1.532
Mortality ch.tr.	CH, PA, A	Variance, deltamethrin	$(\sigma^{DMcht})^2$		19.237	13.072	24.559
Mortality ch.tr.	PA, A	Expectation, azamethiphos	$\lambda^{AZcht}$		-2.074	-3.517	-0.673
Mortality ch.tr.	PA, A	Variance, azamethiphos	$(\sigma^{AZcht})^2$		$(\sigma^{DMcht})^2$		
Mortality ch.tr.	PA, A	Expectation, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	$\lambda^{HPcht}$		-0.157	-0.781	0.513
Mortality ch.tr.	PA, A	Variance, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	$(\sigma^{HPcht})^2$		$(\sigma^{DMcht})^2$		
Mortality ch.tr.	CH, PA, A	Expectation, emamectin	$\lambda^{EMcht}$		-5.027	-5.735	-4.427
Mortality ch.tr.	CH, PA, A	Variance, emamectin	$(\sigma^{EMcht})^2$		4.318	2.559	6.698
Mortality ch.tr.	CH, PA, A	Expectation, diflubenzuron	$\lambda^{DBcht}$		-3.066	-3.627	-2.578
Mortality ch.tr.	CH, PA, A	Variance, diflubenzuron	$(\sigma^{DBcht})^2$		$(\sigma^{EMcht})^2$		
Mortality new tr.	PA, A	Expectation, thermal	$\lambda^{therm}$	4.2	1.481	1.361	1.600
Mortality new tr.	PA, A	Variance, thermal	$(\sigma^{therm})^2$	4.2	1.606	1.197	2.028
Mortality new tr.	PA, A	Expectation, mechanical	$\lambda^{mech}$	4.2	0.447	-0.594	1.344
Mortality new tr.	PA, A	Variance, mechanical	$(\sigma^{mech})^2$	4.2	$(\sigma^{therm})^2$		
Mortality new tr.	PA, A	Expectation, freshwater	$\lambda^{freshw}$	4.2	0.796	-0.620	1.983
Mortality new tr.	PA, A	Variance, freshwater	$(\sigma^{freshw})^2$	4.2	$(\sigma^{therm})^2$		
External recr.	AF to R	Expectation in AR(1)	$\mu^{Ext}$		0.242	0.078	0.405
External recr.	AF to R	Coefficient in AR(1)	$\phi^{Ext}$		0.904	0.892	0.917
External recr.	AF to R	Variance in AR(1)	$(\sigma^{Extar})^2$		0.194	0.180	0.207
External recr.	AF to R	Variance	$(\sigma^{Ext})^2$		0.181	0.056	0.358

# Referanser

- Aldrin, M. og Huseby, R. (2018a). Re-estimering av populasjonsmodell for lakselus 2018 - endringer i modellstruktur og oppdaterte modellparametre. Technical report, Norsk Regnesentral. SAMBA/12/18.
- Aldrin, M. og Huseby, R. (2018b). Sluttrapport for prosjekt fhf:901424 "re-estimering av populasjonsmodell for lakselus basert på data fra rogaland". Technical report, Norsk Regnesentral. SAMBA/11/18.
- Aldrin, M. og Huseby, R. (2019). Strategier for bekjempelse av lakselus - en vurdering basert på scenariosimulering for rogaland - delrapport for prosjekt fhf:901414 "enhetlig proaktiv lusestrategi rogaland". Technical report, Norsk Regnesentral. SAMBA/29/19.
- Aldrin, M., Huseby, R., Stien, A., Grøntvedt, R., Viljugrein, H. og Jansen, P. (2017). A stage-structured bayesian hierarchical model for salmon lice populations at individual salmon farms - estimated from multiple farm data sets. *Ecological Modelling*, 359:333–348.
- Eichner, C., Hamre, L. og Nilsen, F. (2015). Instar growth and molt increments in *Lepeophtheirus salmonis* (copepoda: Caligidae) chalimus larvae. *Parasitology International*, 64:86–96.
- Kierans, L., Eckroth, J. og Birkeland, M. (2019). Fhf «3d hydrodynamic and lice forecast model ». Technical report, Proactima. Report no. 1072801-RE-01.
- Krkošek, M., Morton, A., Volpe, J. og Lewis, M. (2009). Sea lice and salmon population dynamics: effects of exposure time for migratory fish. *Proc R Soc BScience*, 276:2819–2828.
- Samsing, F., Oppedal, F., Dalvin, S., Johnsen, I., Vågseth, T. og Dempster, T. (2016). Salmon lice (*Lepeophtheirus salmonis*) development times, body size, and reproductive outputs follow universal models of temperature dependence. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 73:1841–1851.
- Stien, A., Bjørn, P., Heuch, P. og Elston, D. (2005). Population dynamics of salmon lice *Lepeophtheirus salmonis* on atlantic salmon and sea trout. *Mar Ecol Prog Ser*, 290:263–275.