

2019:01069 - Åpen

Rapport

Appendix VIII

Simulert luseindusert dødelighet på virtuell smolt i produksjonsområde 2 til 7 ved bruk av SINMOD

Forfattere

Ingrid Ellingsen
Øyvind Knutsen



Elvefront i Trondheimsfjorden, mai 2019

Foto Ingrid Ellingsen

SINTEF Ocean AS

Postadresse:
Postboks 4762 Torgarden
7465 Trondheim
Sentralbord: 46415000Foretaksregister:
NO 937 357 370 MVA

Rapport

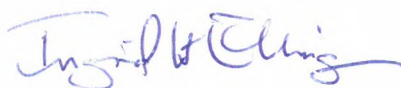
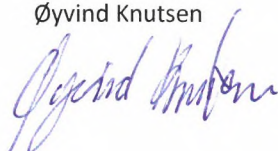
Appendix VIII

Modellert luseindusert dødelighet på virtuell smolt i produksjonsområde 2 til 7 ved bruk av SINMOD

RAPPORTNR	PROSJEKTNR	VERSJON	DATO
2019:01069	302004536	3	2019-10-22

EMNEORD:
Havmodell
Lus
Smolt**FORFATTER(E)**
Ingrid Ellingsen
Øyvind Knutsen**OPPDRAAGSGIVER(E)**
Havforskningsinstituttet**OPPDRAAGSGIVERS REF.**
Ørjan Karlsen**ANTALL SIDER OG VEDLEGG:**
17**GRADERING**
Åpen**GRADERING DENNE SIDE**
Åpen**ISBN**
978-82-14-06362-2**SAMMENDRAG**

Rapporten er Appendix VIII til hovedrapporten om "Vurdering av lakseindusert dødelighet per produksjonsområde i 2019". Den gir en beskrivelse av metode og resultater fra SINMOD-modellen for hvert produksjonsområde

**UTARBEIDET AV**
Ingrid Ellingsen**KONTROLLERT AV**
Øyvind Knutsen**GODKJENT AV**
Ute Brønner

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
Versjon 1	2019-10-09	Dokument sendt til kvalitetssikring
Versjon 2	2019-10-14	Dokumentet gått gjennom kvalitetssikring og godkjenning
Versjon 3	2019-10-22	Små redigeringer av tekst og bedring av figur. Dokumentet gått gjennom kvalitetssikring og godkjenning

Innholdsfortegnelse

1	Oppsummering	4
2	Metoder.....	4
2.1	Modeloppsett og input data for simuleringene	4
2.2	Populasjonsmodell for lus.....	5
2.3	Modell for utvandring av smolt og påslag av lus.....	7
2.4	Resultat for PO 2 til 7	13
2.4.1	PO 2 2019.....	13
2.4.2	PO 3 2019.....	14
2.4.3	PO 4 2019.....	15
2.4.4	PO 5 2019.....	16
2.4.5	PO 6 2019.....	17
2.4.6	PO 7 2019.....	18
2.5	Referanser	18

1 Oppsummering

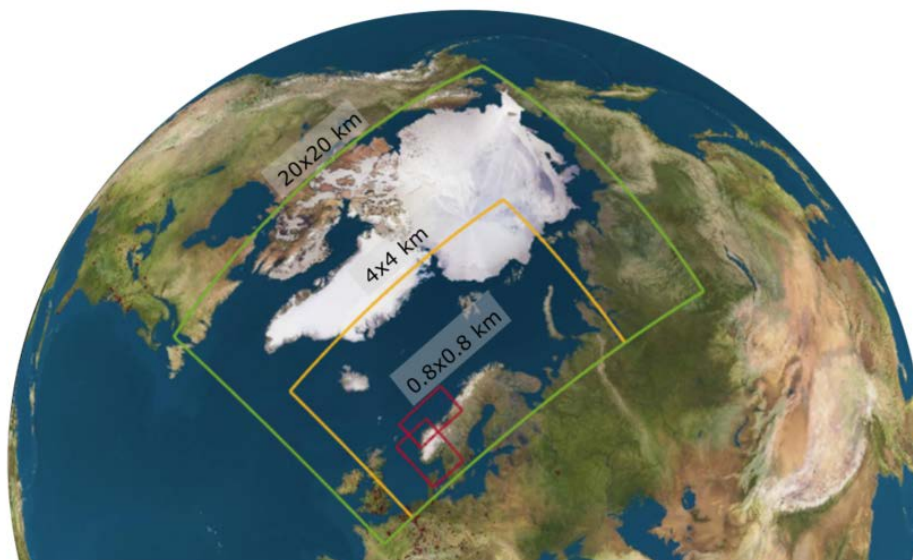
Modellsystemet SINMOD (www.sinmod.com) inkluderer en dynamisk modell for pelagisk utvikling av lakselus og en modell for utvandring av postsmolt. Modellsystemet er brukt og resultatene analysert for å se på spredning av lus og for å estimere påvirkningen dette kan ha for dødelighet hos de ville populasjonene av laks i produksjonsområdene PO2 til PO7 for 2018 og 2019.

2 Metoder

2.1 Modelloppsett og input data for simuleringene

For å dekke området fra PO 2 til 7 er det satt opp to nøstede modellområder med en romlig horisontal oppløsning på 800 m. Nøsting betyr at SINMOD kjøres i flere steg. Utgangspunktet er en modell for nordiske og Arktiske havområder med 20 km oppløsning som produserer grensebetingelser til et modellområde med en oppløsning på 4 km, som igjen produserer grensebetingelser til modellområdene med 800 m oppløsning (Figur 1). På denne måten blir effekter av tidevann og større sirkulasjon ivaretatt i de høyt oppløste områdene med mindre romlig utbredelse.

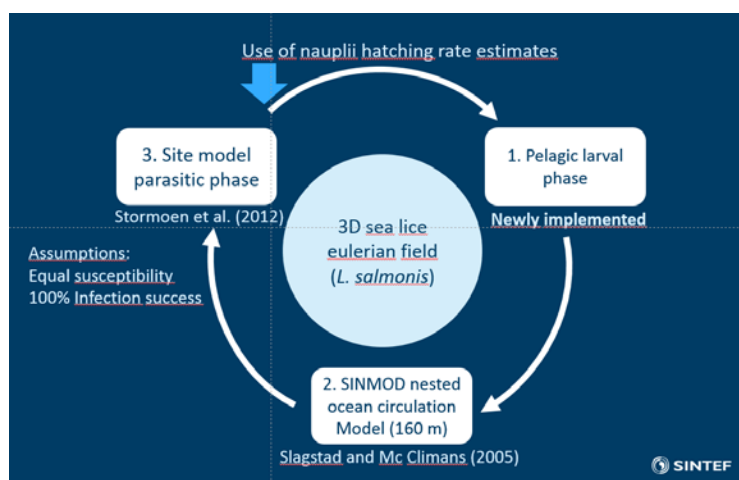
For å drive modellene brukes det ulike datasett. Avrenningsdata for elver hentes fra tilgjengelige kilder og for elver i Norge er det tatt utgangspunkt i tidsserier som er levert av NVE t.o.m. 2018. Ettersom vi ikke har hatt elvedata for 2019 er det brukt data fra 2018 for 2019 simuleringene. Et alternativ ville vært å bruke klimatologi, men ettersom det gir veldig flate avrenningsforløp under vårflommen har vi heller valgt å bruke forløp fra foregående år. Det er brukt to ulike atmosfæriske drivkrefter. For de to store områdene (20 og 4 km oppløsning) er det brukt data fra NOAA Global Forecast System. For områdene med 800 m oppløsning har vi brukt data med 2,5 km oppløsning fra MetCoOp EPS fra met.no. Inputdata (klekkede nauplier av lakselus) for å beregne spredning av lakselus fra oppdrettslokaliteter baseres på databasen til den nasjonale overvåkingsplanen for lakselus (data fra HI, Anne Sandvik, pers. komm.). Inngangsdataene oppdateres hver time ut fra en lineær interpolering fra ukentlige tellinger.



Figur 1 Oversikt over modellområder. Det grønne rektangelet viser området med 20 km oppløsning, det gule området med 4 km oppsett og de to røde området med 800 m oppsett.

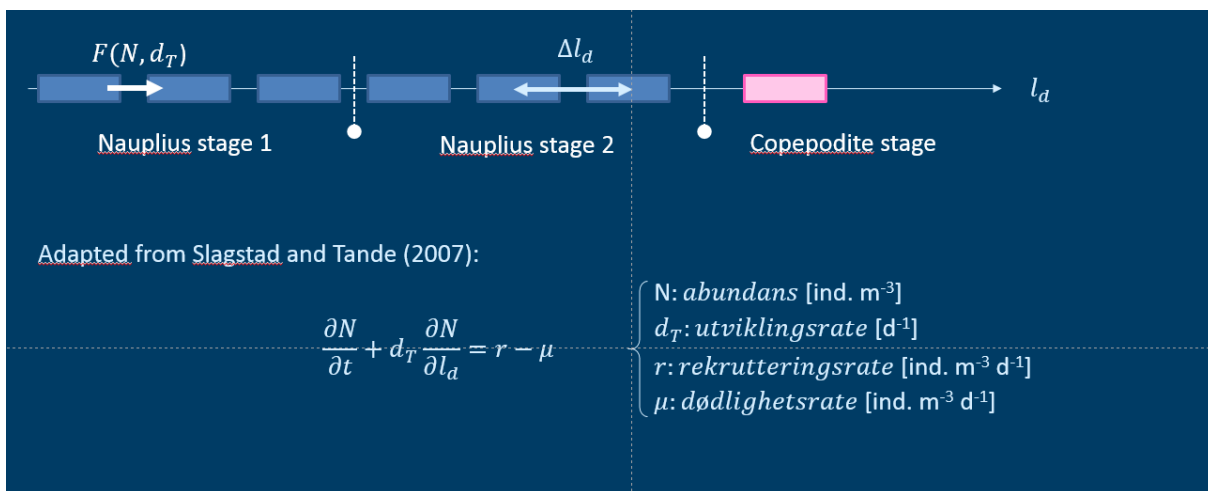
2.2 Populasjonsmodell for lus

Et romlig fordelt oppsett av en strukturert populasjonsmodell for den pelagiske delen av livssyklusen til lakselus har blitt koblet til SINMOD (Figur 2). Lusemodellen beregner tetthet av nauplii stadiene (I og II) og smittestadiet som en funksjon av rekruttering (eggproduksjon/klekkende nauplii), temperaturavhengig utviklingstid og en konstant dødelighetsrate (parametere hentet Stien et al. 2005). Koblingen baseres på en eulersk tilnærming, dvs. at den simulerte lusetettheten i hver gridcelle er konsentrasjonsbasert, og beregnes som et kontinuerlig 3D-felt. Det tas hensyn til lusens adferd i vannsøylen ved å beregne aktiv vertikal vandring i lakselusmodellen: lusefeltet vandrer opp mot overflaten der det har kommet for dypt pga. vertikale blandingsprosesser, virvling og frontdynamikk. Lusefeltet vandrer nedover når det utsettes for lav saltholdighet (under 20).

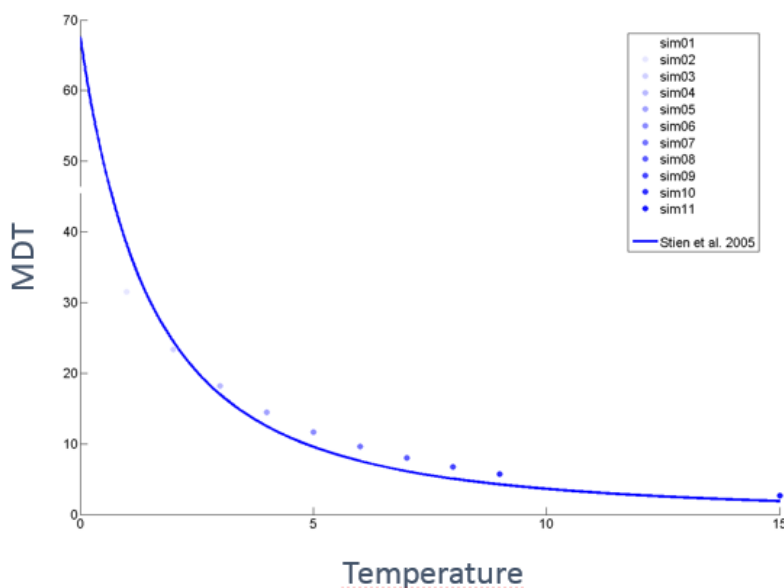


Figur 2 Konseptuelt diagram av lakselusmodellen i modellsystemet SINMOD. Oppsettet består av tre moduler: havmodellen (2), den parasittiske livsfasen til lakselus (3) og den frittlevende planktoniske fasen (1) som er fokuset i denne rapporten.

Dynamikken til en strukturert populasjonsmodell for *L. salmonis* beskrives av en partiell differensialligning (se Figur 3) og er basert på en normalisert utviklingsdimensjon (l_d) etter samme prinsippet som ble anvendt for den stadiefordelte *Calanus*-modellen i SINMOD (Slagstad and Tande, 2007; Alver et al. 2016). Utviklingsraten d_T beregnes som den omvendte funksjonen av utviklingstid (Wroblewski, 1980) mot temperatur, basert på eksperimentelle forsøksdata (Stien, 2005). Diagrammet øverst på Figur 3 antyder den numeriske diskretiseringen av utviklingsdimensjonen (l_d) hvor utviklingsinkrementer vises som små firkanter. Hvert utviklingsstadium består av flere utviklingsinkrementer. For å redusere numerisk diffusjon og samtidig kunne redusere antall inkrementer, et kjent fenomen knyttet til numerisk diskretisering, implementeres det en "flux limiter" -funksjon av typen superbee (Roe, 1986). Figur 4 viser den modellerte ontogenetiske utviklingstiden for 1 grad Celsius intervaller mellom 0-15 °C fra egg til kopepodittstadiet, sammenliknet med funksjonen basert på observert utvikling (Stien et al., 2005). Modellen reproducerer målte verdier innenfor den målte variabiliteten.



Figur 3 Den partielle differensialligningen representerer dynamisk abundans (N) til en strukturert populasjonsmodell som baseres på en normalisert utviklingsdimensjonen (l_d). Skjemaet øverst viser fram den numeriske diskretiseringen av utviklingsdimensjonen (l_d).



Figur 4 Sammenligning av ontogenetisk utviklingstid estimert fra målinger (MDT, antall dager) mot temperatur (°C; Stien et al., 2005) og den simulerte utviklingstiden (blå punkter).

2.3 Modell for utvandring av smolt og påslag av lus

Utvandring

Modellen for utvandring av virtuelle smolt er basert på en partikkelmodell som kjøres som en del av SINMOD-systemet. Modellen beregner utvandring av postsmolt fra elvene ut fra antagelse om at smolten svømmer med strømmen og at de oppholder seg i de øverste 4 m av vannkolonnen. Modellen er den samme som er benyttet i Nilsen et al., 2017, men er i dette arbeidet anvendt for et større område.

En av hovedutfordringene med denne tilnærmingen til utvandring er at den forutsetter at strømmen i snitt går utover i overflaten i fra elvemunning til kyst. Dette er ikke tilfelle i alle områder. I områder der større elver kommer ut et stykke ut i fjorden vil ferskvannstilførselen her kunne danne en trykkgradient som driver strømmer innover i fjorden i overflaten. Et eksempel på dette er i Sørfjorden i Hardanger hvor strømmen både er modellert og observert å gå innover i mai (Haave et al., 2015). Konsekvensen er at modellen ikke gir et realistisk utvandringsforløp fra elva Opo som munnar ut innerst i Sørfjorden. I slike tilfeller vil det ikke gis resultat for beregning av lusepåslag. Smoltmodellen er satt opp med et antatt jevnt utvandringsforløp i perioden fra start- til sluttidspunkt for de enkelt elver som gitt i Appendix I. Dette anses som den best mulige tilnærmingen ettersom utvandringsforløpene varierer mye fra elv til elv og mellom år. Når smolten når kysten antas den å ha en mer egenstyrt utvandring mot åpent hav, og den virtuelle smolt modellen vil ikke gi realistiske vandringsruter

For å sette en grense i modellen har vi valgt å bruke saltholdighet for å angi når smolten har nådd kyst og kystvann. I område 2 til 5 er en grense på 32. benyttet og i område 5 til 7 er grensen satt til 33 (saltholdighet i kyststrømmen øker nordover). Det er ikke alle virtuelle smolt som når kystområdene, som i tilfellet for elva Opo nevnt over. Elver der færre enn 50% av smolten når kysten innen 4 uker anses å ha for lite data til å gi et estimat av dødelighet.

Påslag av lus

Påslag av lus på smolt beregnes som en funksjon av eksponeringsvolum og konsentrasjon av smittsomme kopepoditter ($Kop\ m^{-3}$) i de gridcellene smoltene befinner seg i. En av de usikre faktorene i disse beregningen er sannsynligheten for påslag (f_s). For å estimere denne har vi benyttet observasjonsdata fra bur satt ut i 2018 og 2019 (Nilsen et al., 2019).

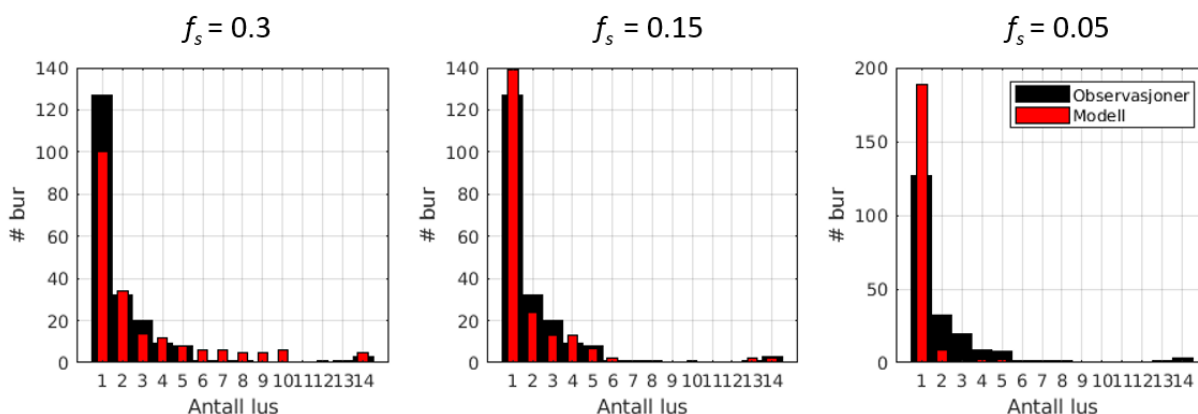
Påslag på virtuell smolt i bur er beregnet fra

$$P = \sum_{n=1}^{n=N} Kop(t) \cdot V(t) \cdot f_s, \quad V(t) = ws * \pi * r^2 * dt, \quad P = \text{påslag i antall lus per fisk.}$$

Eksponeringsvolum (V) beregnes ut fra en antatt detekteringsavstand på 5 cm (r) og mengden vann som passerer ut fra simulert strømhastighet ($ws(t)$) over en periode (dt). Antall lus på den virtuelle smolten beregnes videre ut fra konsentrasjon av kopepoditter per m^{-3} (Kop). Totalt antall lus på hver virtuelle smolt gis da ved å summere opp over den perioden som burene har stått ute (Nilsen et al., 2019). Burdata fra 2018 og 2019 er brukt for å finne et estimat for f_s som gir best overenstemmelse mellom modell og observasjoner. Noen av observasjonene fra 2019 viser veldig høye påslag som modellen ikke reproducerer. Verdier av f_s påvirker ikke dette resultatet og to bur med middel over 26 lus i snitt er utelatt av analysen. Resultatene i Figur 5 viser at $f_s = 0.15$ gir en frekvensfordeling av lus som stemmer godt med observasjonene. Unntaket er veldig høye påslag observert i 2019 som ikke er predikert av modellen (Figur 5). Lavere eller høyere verdier av f_s gir henholdsvis for høye eller lave påslag. Resultat for bur i 2019 i ulike produksjonsområder er vist sammen med modellestimat med $f_s = 0.15$ (Figur 6). Det er generelt en god overenstemmelse mellom

observasjoner og modellresultat i alle områdene bort sett fra i Sognefjorden (PO 4). Dette kan enten skyldes lus som er transportert inn i fjorden som ikke er gjengitt av modellen, eller at det er kilder til lus som ikke er med i utslippsdataene for 2019.

Påslag av lus på utvandrende virtuelle smolt beregnes tilsvarende som for smolt i bur, men eksponeringsvolumet blir i dette tilfellet estimert som en funksjon av den virtuelle smoltens svømmehastighet istedenfor strømhastighet som var brukt for bur som har en fast posisjon. Antall lus per postsmolt med antatt vekt på 20 gram, summeres over tidsrommet de bruker fra elv til kyst. Videre beregnes prosent dødelighet for hver bestand ut fra tabell 1 (Taranger et al., 2014). Det tas ikke hensyn til dødelighet på fastsittende lus etter påslag.

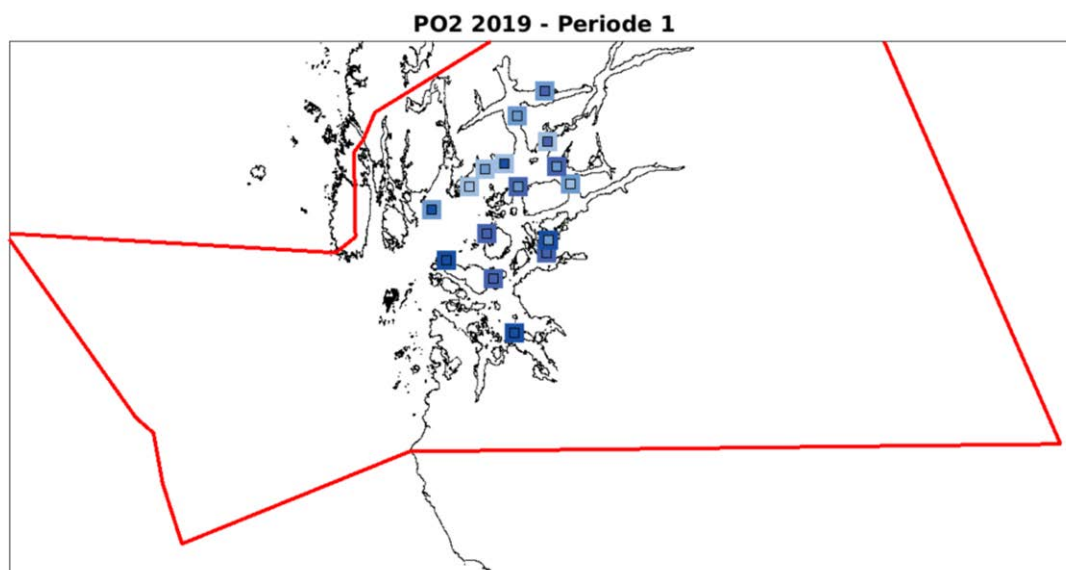
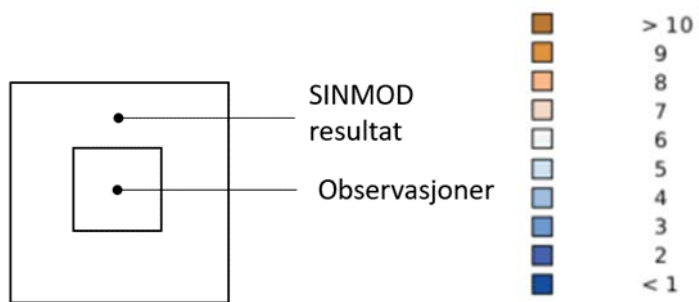


Figur 5 Histogram som viser observert frekvensfordeling av lusenivå for observasjoner (svarte og brede søyler) og modellresultat (smale og røde søyler) for ulike verdier av f_s .

Tabell 1. Estimert dødelighet av smolt som følge av lusepåslag.

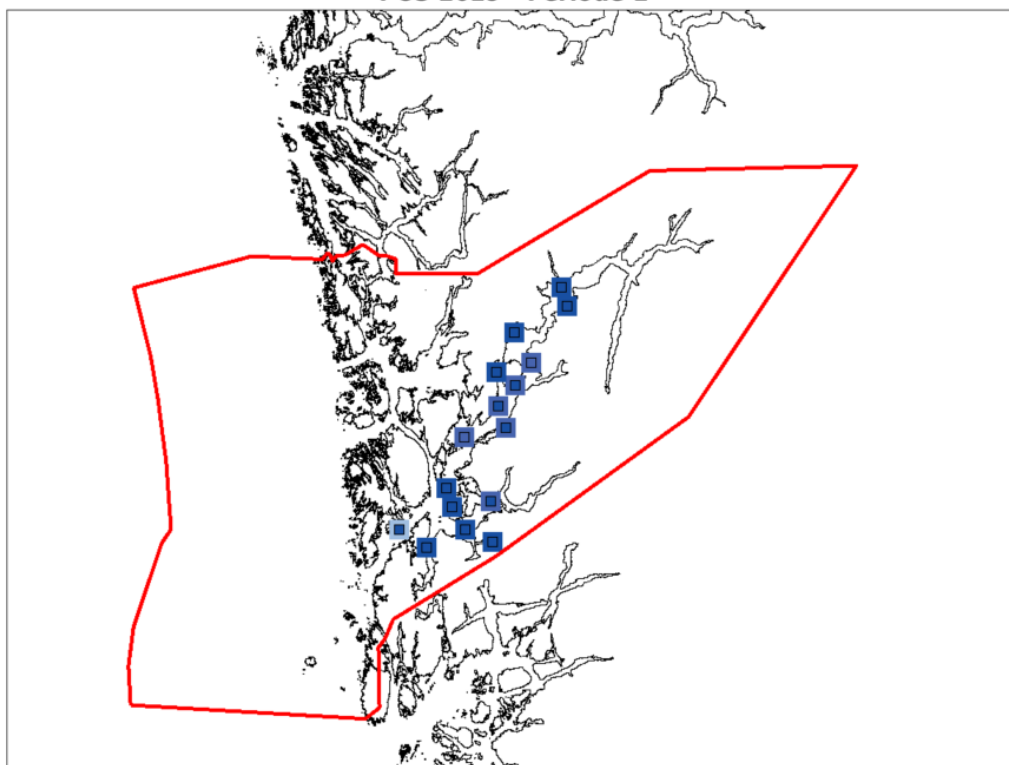
Antall lus per smolt (20 g)	Estimert risiko for dødelighet
Mindre enn 2 lus	0 %
Mellom 2 og 4 lus	20 %
Mellom 4 og 6 lus	50 %
Mer enn 6 lus	100 %

a)



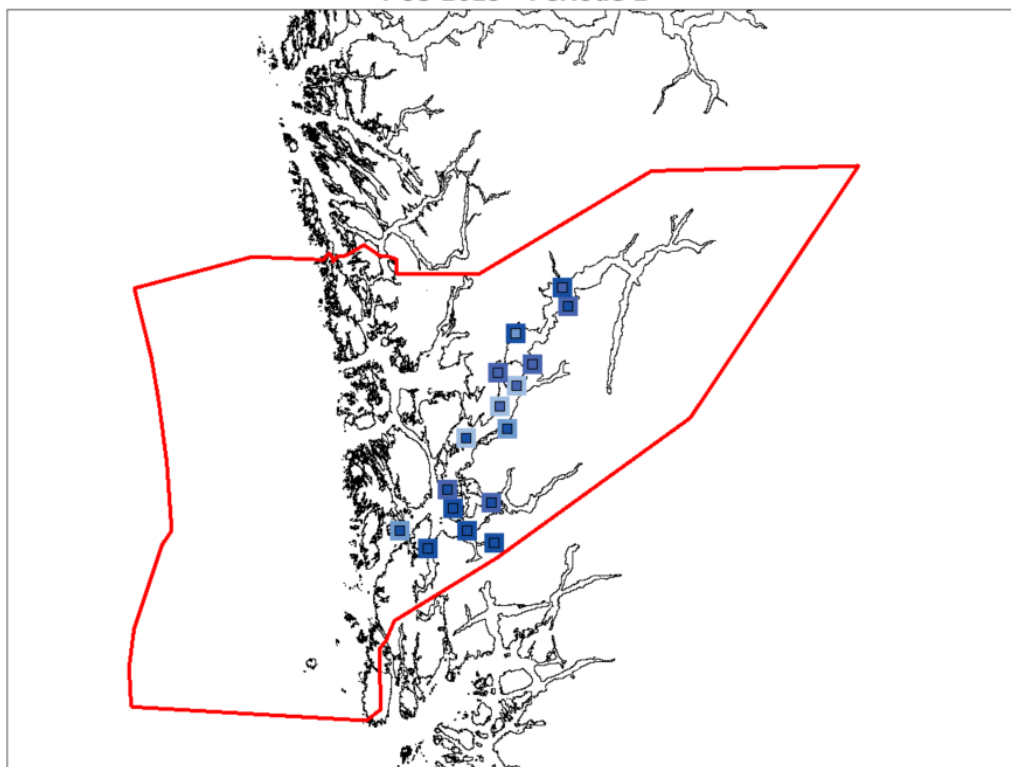
b)

PO3 2019 - Periode 1



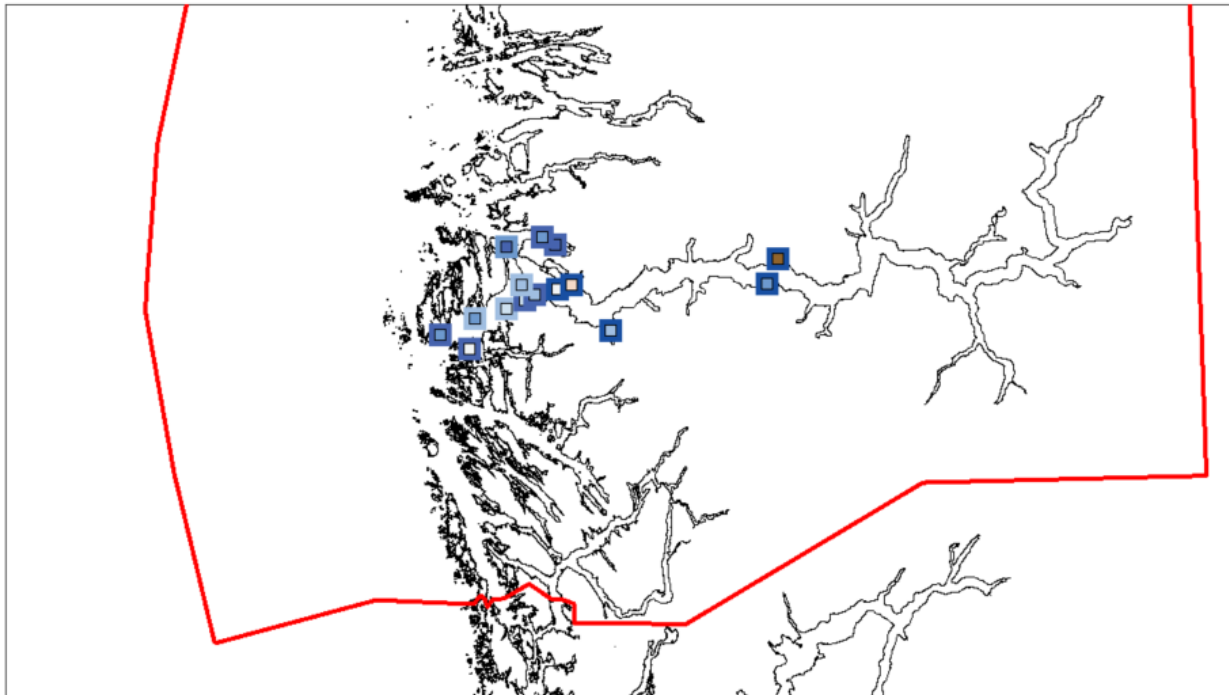
c)

PO3 2019 - Periode 2



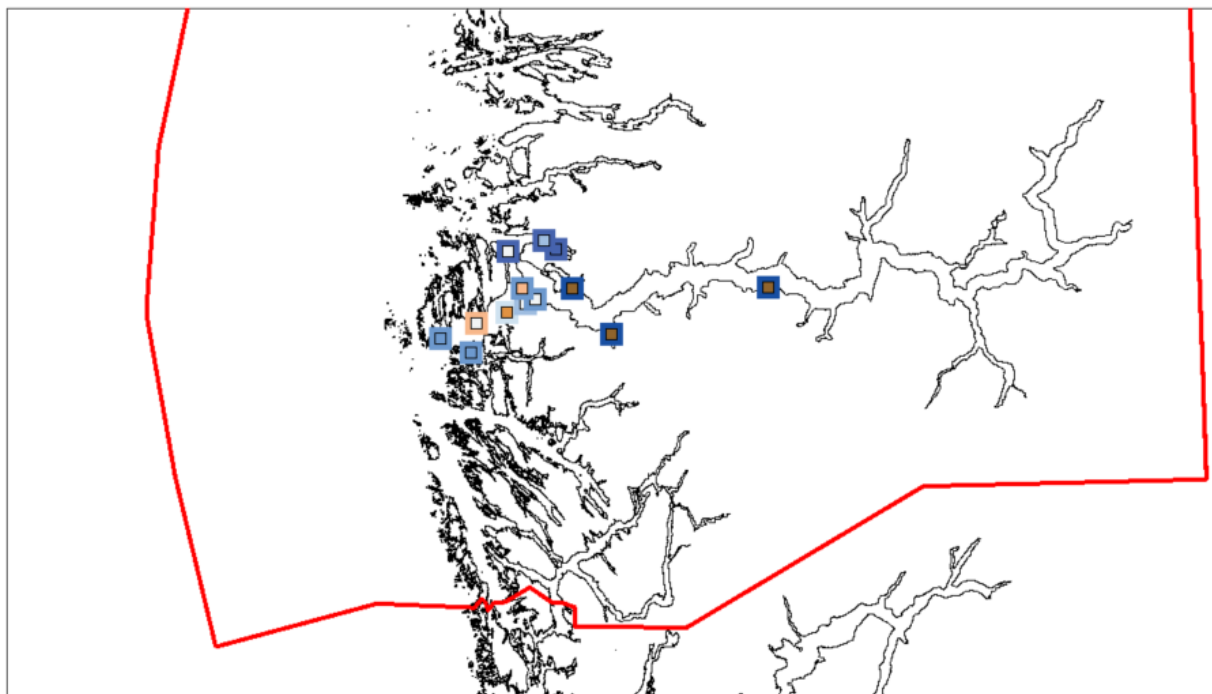
d)

PO4 2019 - Periode 1

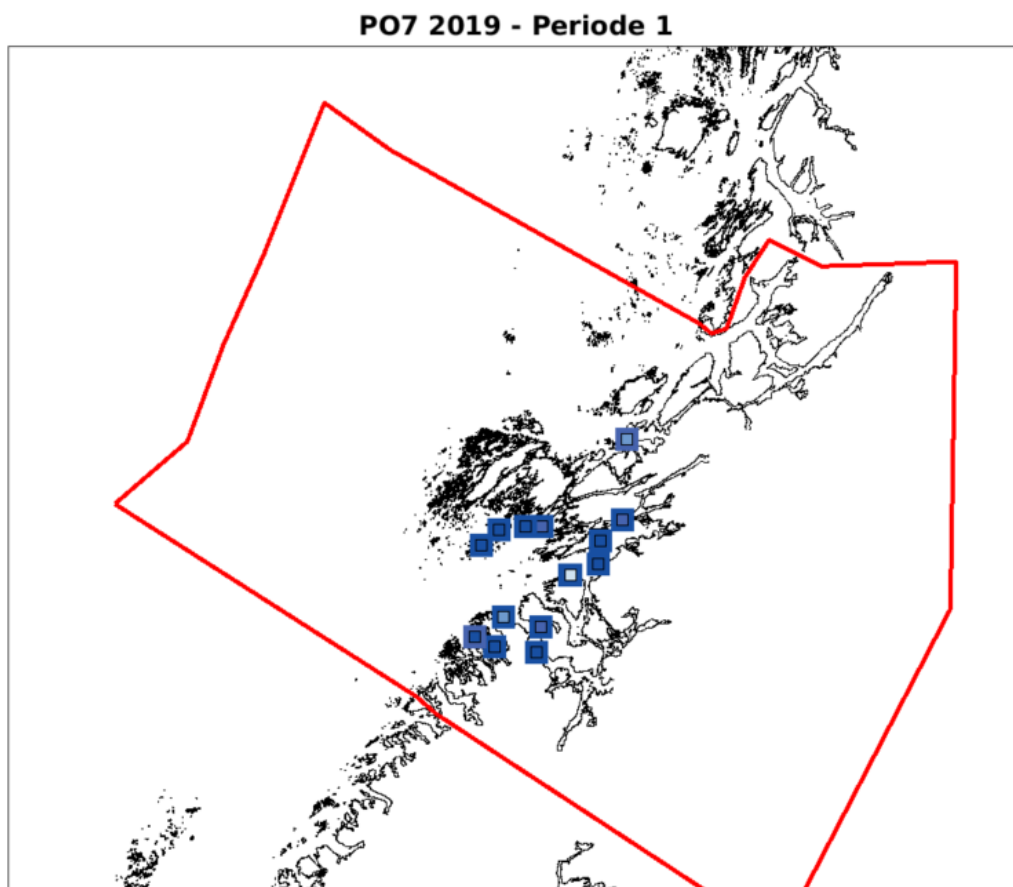


e)

PO4 2019 - Periode 2



f)



Figur 6 Sammenligning av modellerte påslag (store kvadrater) av lus på bur mot observasjoner (små kvadrater) for burdata i 2019 for a) PO2 for periode 1, b) PO3 for periode 1, c) PO3 for periode 2, d) PO4 for Periode 1, e) PO4 for periode 2 og f) PO7 for periode 1. Fargene angir antall lus.

2.4 Resultat for PO 2 til 7

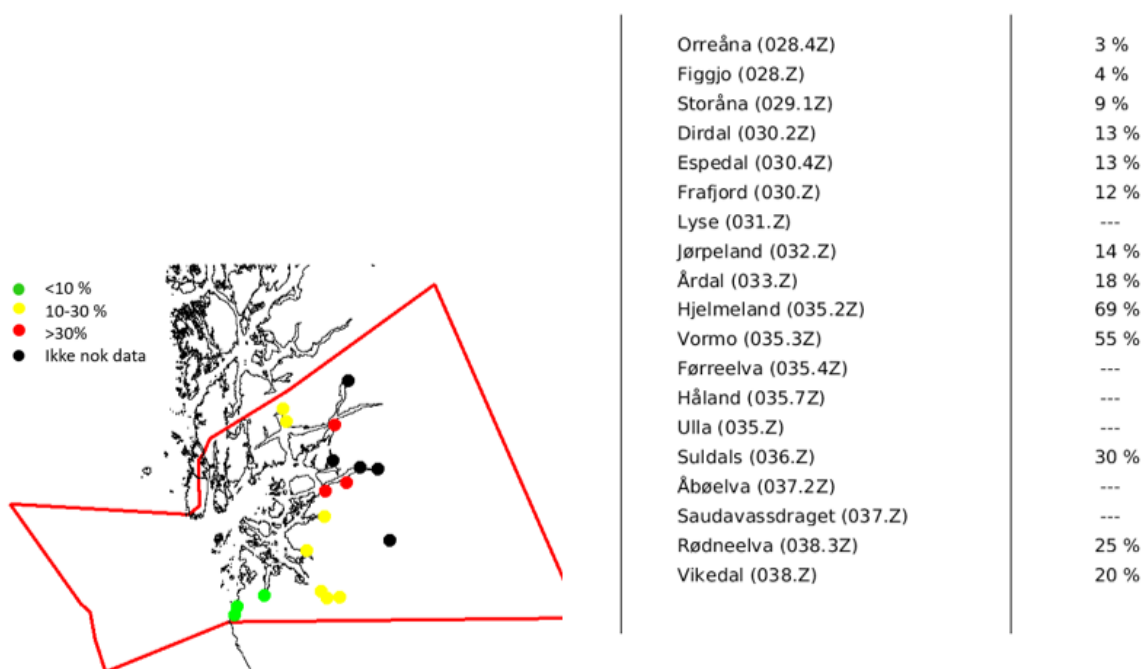
2.4.1 PO 2 2019

Uvektet gjennomsnitt 22 %.

Estimert luseindusert dødelighet varierer fra lav til høy påvirkning for ulike elver i området (Figur 7). Estimaten gir lav påvirkning for Orreåna og Figgjo (hhv 3 og 4%) som har korte utvandningsruter. Estimert dødelighet øker innover sørlige deler av fjorden (til moderate nivå) og modellen predikerer høy påvirkning for Hjelmeland, Vormo og Suldal. De høye verdiene stemmer ikke overens med tråldata (appendix II), mens det er bedre samsvar med lav påvirkning for de ytre elvene. Det mangler data for 5 elver hvor metoden ikke gir nok data for vurdering av dødelighet. Sammenligning av burdata og modellestimater stemmer relativt godt overens (Figur 6 a). Basert på den store variasjonen i estimatene, sammenholdt med manglende estimater for enkelte elver vurderes den helhetlige konklusjonen for området å være usikker.

Konklusjon: Moderat påvirkning

Usikkerhet: Stor



Figur 7 Kart over resultater kategorisert ut fra luseindusert dødelighet til venstre og tabell over dødelighet for hver enkelt elv til høyre.

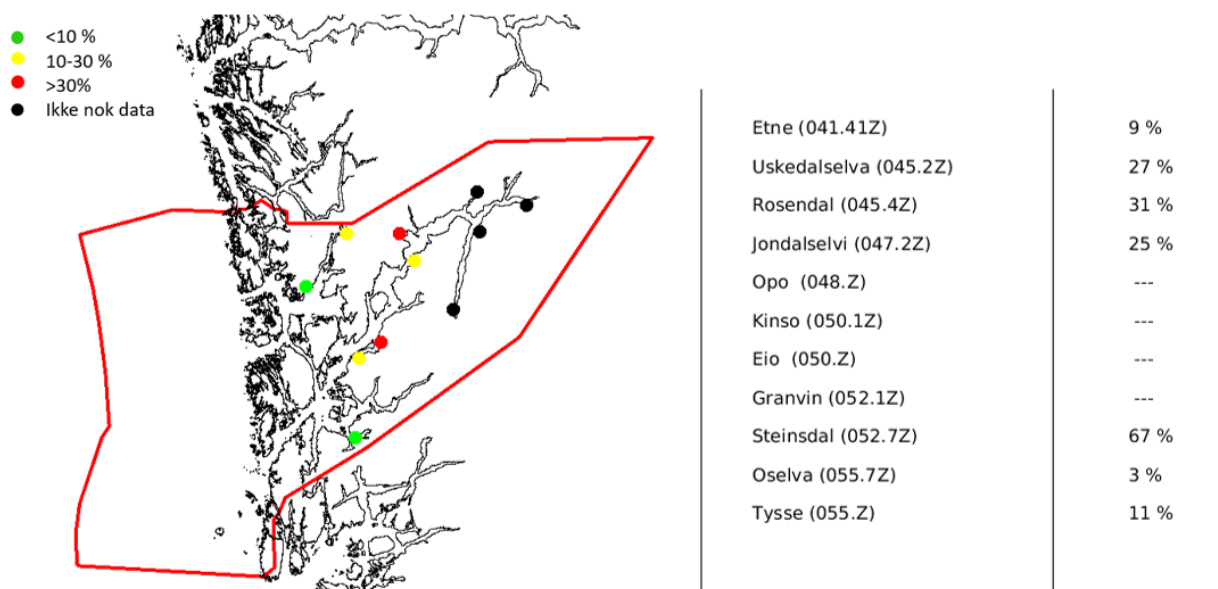
2.4.2 PO 3 2019

Uvektet gjennomsnitt 25 %.

Estimat av luseindusert dødelighet grenser mot moderat påvirkning for smoltbestanden fra Etne (9 %) og lav for bestanden fra Oselva (3 %) (Figur 8). Den sistnevnte vurderes som lite troverdig ettersom det var mye lus i Bjørnafjordsystemet. Estimaten for dødelighet øker innover Hardangerfjorden og går mot moderat og høy påvirkning. Metoden for utvandring har ikke gitt resultater for de innerste elvene. Resultatene stemmer ellers delvis med tråldata (appendix II) som viser lave nivå i ytre deler av Hardangerfjorden og at påvirkningen øker innover fjorden. Sammenligning av burdata og modellestimater stemmer relativt godt overens (Figur 6 b og c). Basert på store variasjoner i estimatene og manglende estimater for enkelte elver vurderes konklusjonen å være usikker.

Konklusjon: Moderat påvirkning

Usikkerhet: Stor



Figur 8 Kart over resultater kategorisert ut fra luseindusert dødelighet til venstre og tabell over dødelighet for hver enkelt elv til høyre.

2.4.3 PO 4 2019

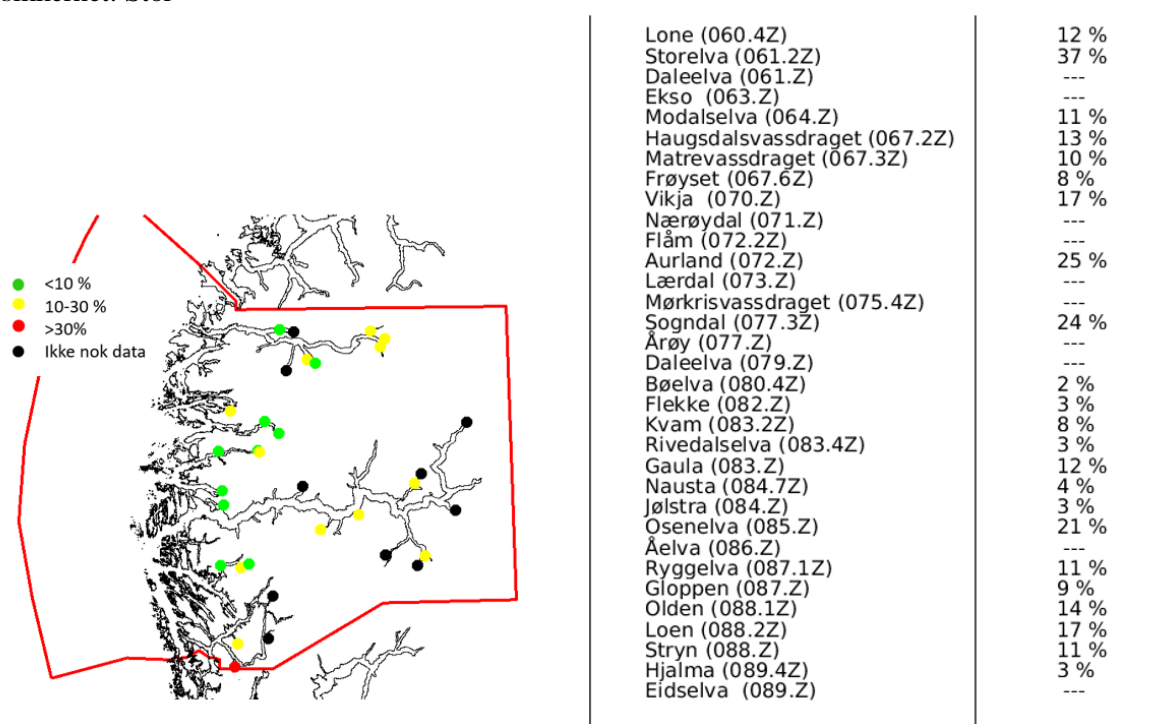
Uvektet gjennomsnitt 12 %.

Luseindusert dødelighet er lav for enkelte elver med kort avstand til kysten (Figur 9). Høy påvirkning er beregnet for smolt som kommer ut i fjordsystemene rundt Osterøy. Det er ellers en del elver som ligger på moderat påvirkning i Sognefjorden, Førdefjorden og Nordfjord. Resultatene viser lave verdier sammenlignet med tråldata (appendix II) i Sognefjorden og til dels i Nordfjord. Det er store avvik mellom modellerte påslag i bur og modellerte data innover Sognefjorden, spesielt i periode 2 (Figur 6 d og e).

Basert på uoverensstemmelse med burobservasjoner i tillegg til manglende data for enkelte elver vurderes konklusjonen å være usikker.

Konklusjon: Moderat påvirkning

Usikkerhet: Stor



Figur 9 Kart over resultater kategorisert ut fra luseindusert dødelighet til venstre og tabell over dødelighet for hver enkelt elv til høyre.

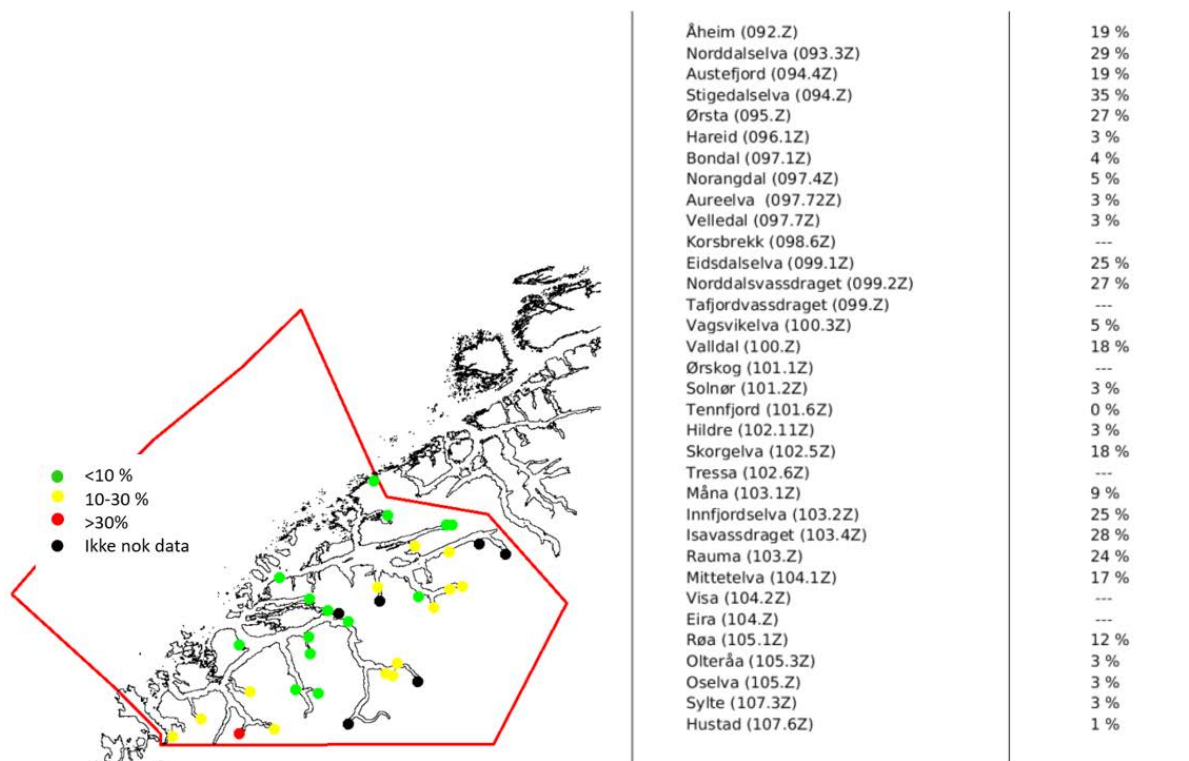
2.4.4 PO 5 2019

Uvektet gjennomsnitt 13 %.

Modellen gir luseindusert dødelighet med moderat og høy påvirkning for smoltbestander fra elver som kommer ut i Storfjorden (Figur 10). Lenger nord i området varierer estimatene fra lav til moderate påvirkning for smolt fra elver med lengre vandringsavstand til kyst. Det er generelt høye estimat som grenser til høy påvirkning innerst i Romsdalsfjorden. Data mangler fra enkelte elver (bla Eira). Modellen predikerer høye nivå av lusedødelighet som stemmer delvis med tråldata (appendix II). Usikkerheten vurderes å være moderat ut fra nivå og sammenligning med observasjoner, men pga av manglende data for enkelte elver vurderes konklusjonen for hele området å være usikker.

Konklusjon: Moderat påvirkning

Usikkerhet: Stor



Figur 10 Kart over resultater kategorisert ut fra luseindusert dødelighet til venstre og tabell over dødelighet for hver enkelt elv til høyre.

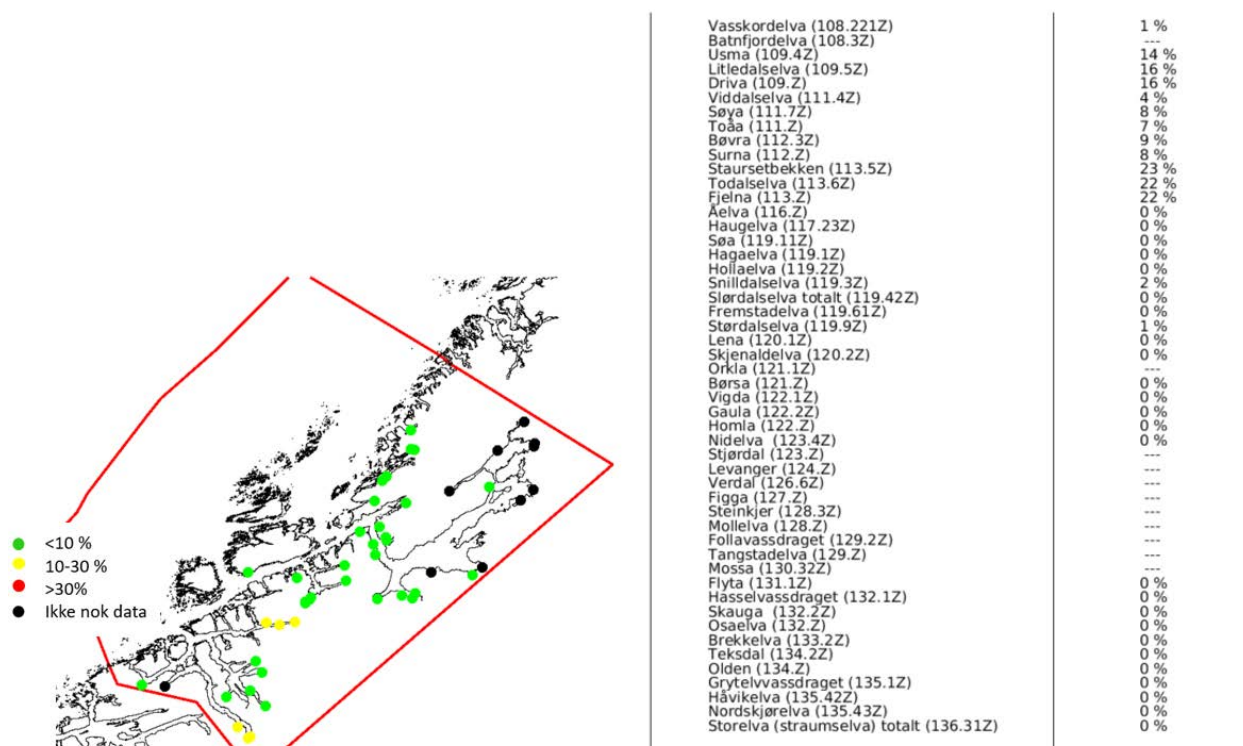
2.4.5 PO 6 2019

Uvektet gjennomsnitt 5 %.

Luseindusert dødelighet er generelt på lavt nivå i området, men gir moderat påvirkning innerst i Sunndalsfjorden (for eksempel 16% for Driva) og innerst i Vinjefjorden (22% for Todalselva)(Figur 11). Veldig lave estimater (~0%) er beregnet for smoltbestander i Trondheimsfjordsystemet. Estimatenes stemmer med tråldata. Usikkerheten ut ifra nivå og observasjoner vurderes å være lave. Det mangler data for viktige elver som kommer ut innerst i Trondheimsfjorden. Smolt fra disse elvene vil ha lengre vandringsvei, men det er lite lus innerst i Trondheimsfjordem og det er lite sannsynlig at disse vil få betydelig flere lus enn smolt som kommer fra elver lengre ut i systemet. Konklusjonen vurderes å være middels usikker.

Konklusjon: Lav påvirkning

Usikkerhet: Middels

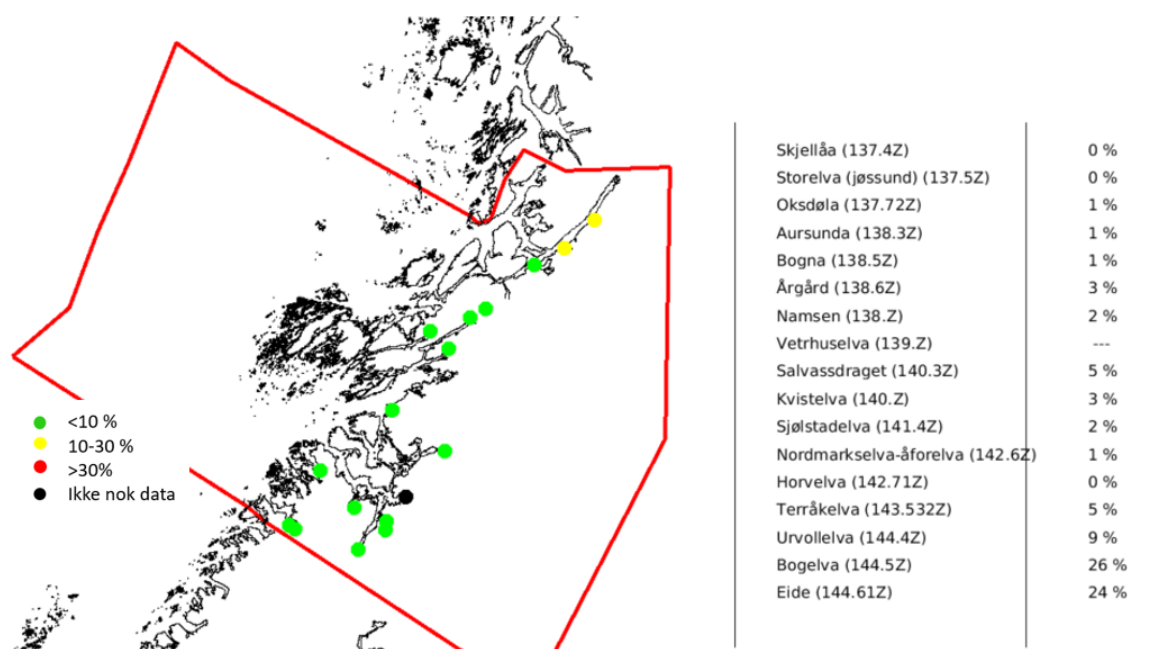


Figur 11 Kart over resultater kategorisert ut fra luseindusert dødelighet til venstre og tabell over dødelighet for hver enkelt elv til høyre.

2.4.6 PO 7 2019

Uvektet gjennomsnitt 5 %. Estimert av luseindusert dødelighet gir lav påvirkning på bestander over store deler av området (Figur 12). Unntaket er i Tosen hvor påvirkningen er moderat med 26 og 24 % for Bogelva og Eide. Nivå av påvirkning stemmer med tråldata (appendix II). Beregnet lusepåslag i bur stemmer godt overens med burobservasjoner (Figur 6 f). Ut ifra nivå og sammenligning med observasjoner vurderes usikkerheten rundt konklusjonen å være liten/middels.

Konklusjon: Lav påvirkning
Usikkerhet Liten/Middels



Figur 12 Kart over resultater kategorisert ut fra luseindusert dødelighet til venstre og tabell over dødelighet for hver enkelt elv til høyre.

2.5 Referanser

Alver, M.O., Broch, O.J., Melle, W., Bagøien, E., Slagstad, D.. Validation of an Eulerian population model for the marine copepod *Calanus finmarchicus* in the Norwegian Sea. *Journal of Marine Systems*. 2016;160:81-93.

Finstad B, Økland F, Thorstad E, Bjørn P, McKinley R (2005) Migration of hatchery-reared Atlantic salmon and wild anadromous brown trout post-smolts in a Norwegian fjord system. *J Fish Biol* 66:86-96

Haave, , Bye-Ingebrtsen, E, Thiem, Ø (2015). "Strømmålinger i Sørfjorden i Hardanger", SAM e-rapport nr 15-2015, ISSN: 1890-5153.

Nilsen, R., M., Serra-Llinares, R. M., Sandvik, A. D., Schrøder Elvik, K.M., Kjær, R., Karlsen, Ø. Finstad, B., Berg, M., Berg, M., Lehmann, G. B. (2019) . Lakselusinfestasjon på vill laksefisk langs Norskekysten i 2019. Rapport fra Havforskningen. 2019-35. ISSN 1893-4536

Roe, P.L. (1986), "Characteristic-based schemes for the Euler equations", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **18**: 337–365, [Bibcode:1986AnRFM..18..337R](#), [doi:10.1146/annurev.fl.18.010186.002005](#)

Slagstad, D. and K. S. Tande (2007). "Structure and resilience of overwintering habitats of *Calanus finmarchicus* in the Eastern Norwegian Sea." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **54**(23-26): 2702-2715.

Stien A, Bjorn, P.A., Heuch, P.A., Elston, D.A. (2005) Population dynamics of salmon lice *Lepeophtheirus salmonis* on Atlantic salmon and sea trout. *Marine Ecology Progress Series* 290:263-275

Taranger, G.L., Karlsen Ø, Bannister R.J., Glover K.A., Husa, V, Karlsbakk, E, Kvamme, B.O., Boxaspen, K.K., Bjørn, P.A., Finstad, B (2014) Risk assessment of the environmental impact of Norwegian Atlantic salmon farming. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*:fsu132.

Wroblewski, J. S. (1980). "A simulation of the distribution of *Acartia clausi* during Oregon Upwelling, August 1973 " *Journal of Plankton Research* **2**(1): 43-68.