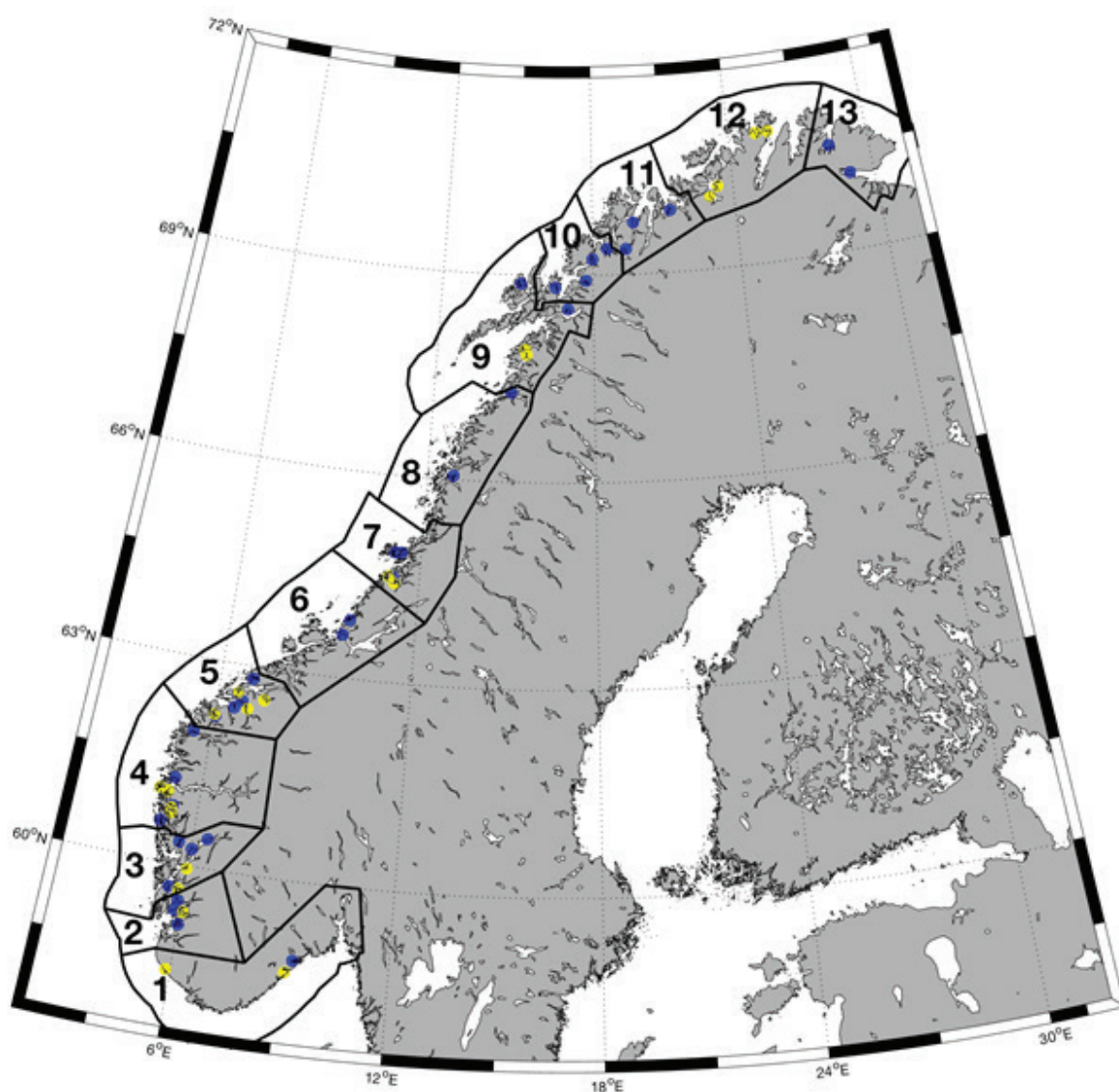
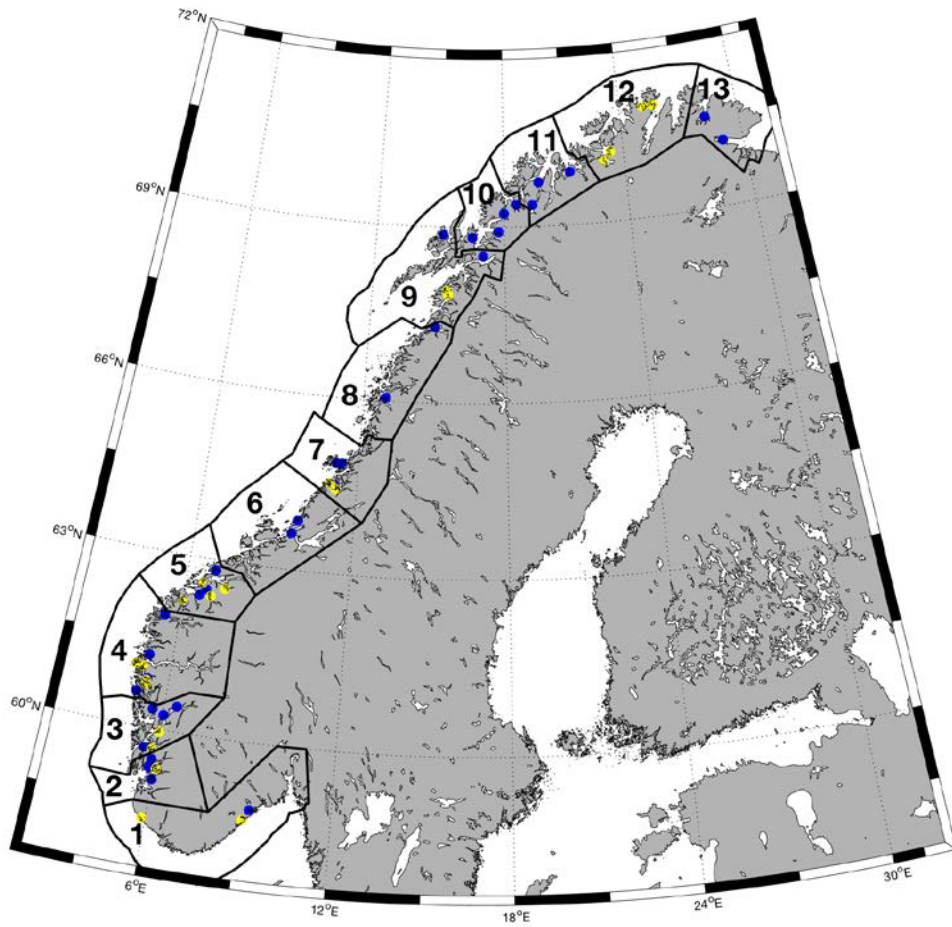


# Hydrodynamisk spredningsmodell for lakselus og konsentrasjon av smittsomme kopepoditter

Anne D. Sandvik, Lars Asplin, Jon Albretsen, Pål Arne Bjørn, Ingrid A. Johnsen,  
Jofrid Skarøhamar, Mari S. Myksvoll og Bjørn Ådlandsvik  
31. mars 2017





**Figur 1:** NALO-posisjoner 2015 (gul) og 2016 (blå), og alle 13 produksjonssonene.

## Innhold

1. Bakgrunn
2. Strømmodellsystem
3. Spredningsmodell for lakselus
  - 3.1. Kildeleddet
4. Modellresultater
5. Modellresultatvalidering
6. Modellprodukter
  - 6.1. Tidsutvikling av kopepoditter innen produksjonsområdene
  - 6.2. Geografisk fordeling av kopepoditter
7. Fakta om produksjonsområdene
8. Referanser



## 1. Bakgrunn - hvorfor modellere?

Siden det er praktisk umulig å få en fullstendig oversikt over luseinfeksjoner på laksefisk langs hele kysten ved hjelp av tradisjonelle feltobservasjoner, har Havforskningsinstituttet utviklet en lakselusmodell som utfyller observasjonene, både i tid og rom.

Les mer om overvåkning på

[http://www.imr.no/temasider/parasitter/lus/lakselus/overvaking\\_av\\_lakselus\\_1/nb-no](http://www.imr.no/temasider/parasitter/lus/lakselus/overvaking_av_lakselus_1/nb-no).

Lakselusmodellen er egentlig en sammenkopling av en rekke ulike modeller som først beregner utslipp av lakselus fra alle rapporteringspliktige oppdrettsanlegg i landet. Når luselarvene så er klekket direkte inn i vannmassene (representert ved spredningsmodellen) opplever de temperatur, saltholdighet og strøm i den posisjonen de befinner seg. Basert på tilgjengelig kunnskap om biologi, adferd og dødelighet blir det beregnet hvordan larvene sprer seg i vannmassene, først som ikke smittsomme naupliene og videre som smittsomme kopepoditter. Sluttproduktet er tetthet av smittsomme lakseluslarver (kopepoditter) langs hele kysten en gang i timen.

Vi vet at tetthet av lakselus kopepoditter er proporsjonal med sannsynligheten for smitte på villfisk og at lakselusa fordeler seg i vannmassene i fjord- og kystområdene på en svært variabel måte. Denne fordelingen varierer både over korte tidsperioder og små geografiske avstander (Asplin mfl., 2014; Johnsen mfl., 2014; Sandvik mfl., 2016). Dette er en naturlig konsekvens av lakselusenes vertikale posisjonering i et varierende strømfelt (Johnsen mfl., 2016). En rekke modellsimuleringer med likt utslipp av nauplier fra ulike anlegg har blitt utført (se for eksempel <http://www.imr.no/temasider/parasitter/lus/lakselus/90683/nb-no> og Asplin mfl. 2014) og viser at en fullstendig beskrivelse av hvilken fordeling lakselus kopepoditter har langs kysten, bare kan gjøres gjennom å modellere spredning med bruk av informasjon om realistisk strøm, saltholdighet og temperatur.

Modellresultater for kopepodittfordeling blir hele tiden vurdert mot lakseluspåslag på villfisk fra observasjoner i felt for å etablere så presise kvantitative relasjoner som mulig.

Modellsystemet for spredning av lakselus baserer seg på eksisterende og veldokumenterte metoder, der modellene for strøm har mye til felles med værvarslings- og klimamodeller som har et omfattende vitenskapelig miljø for utvikling og validering, samt håndtering av usikkerhet. En kan også anvende modellsimuleringer for å teste ulike scenarier, som for eksempel konnektivitet mellom oppdrettsanlegg, effekten av tiltak (medisinske eller preventive) og lokalisering av oppdrettsanlegg.

## 2. Strømmodellsystem

[http://www.imr.no/temasider/modeller/kystmodellen/kystmodellen\\_norkyst800/nb-no](http://www.imr.no/temasider/modeller/kystmodellen/kystmodellen_norkyst800/nb-no)

Prinsippet for å skaffe informasjon om strøm er å inkludere en så fullstendig beskrivelse av de ulike fysiske prosessene og drivkrefter som vind, tidevann og ferskvannsavrenning som mulig. Dessuten trenger en geografisk informasjon om bunndyp i forhold til modellopløsningen. Modellsystemet beregner strøm, vannstand og hydrografi prognostisk ved hjelp av numeriske teknikker med et tredimensjonalt beregningsgitter, og strømmodellen vi anvender er for tiden Regional Ocean Modeling System (ROMS, [www.myroms.org](http://www.myroms.org); Albretsen mfl., 2011). Gitteroppløsningen er 800 m horisontalt, og vi må anvende spesielle tungregnemaskiner for å gjennomføre simuleringene. Vi kjører modeller med høyere romlig oppløsning (typisk 160 m) ved behov. Vertikalt benytter vi nå 35 nivåer med høy oppløsning i de øvre 10 m for å fange opp den vertikale dynamikken som intensiveres mot overflaten. Atmosfæriske drivkrefter (vind og stråling) henter vi fra en separat vindmodell (WRF,

www.wrf-model.org, eller operasjonelle atmosfæreprognoser fra Meteorologisk institutt) og åpne grenseverdier mot havet tas fra havmodellresultater med større geografisk utstrekning og verdier minst hver time.

Strømmodellresultater valideres fortløpende mot observasjoner av strøm og hydrografi i den utstrekning disse finnes. Eksempler på dette kan finnes i Asplin m.fl. (2014), Johnsen m.fl. (2014), Johnsen m.fl. (2016), Sandvik m.fl. (2016).

Resultater fra strømmodellen ligger i *Appendix III: Fysisk miljø*.

### 3. Spredningsmodell for lakselus

<http://www.imr.no/temasider/parasitter/lus/lakselus/90683/nb-no>

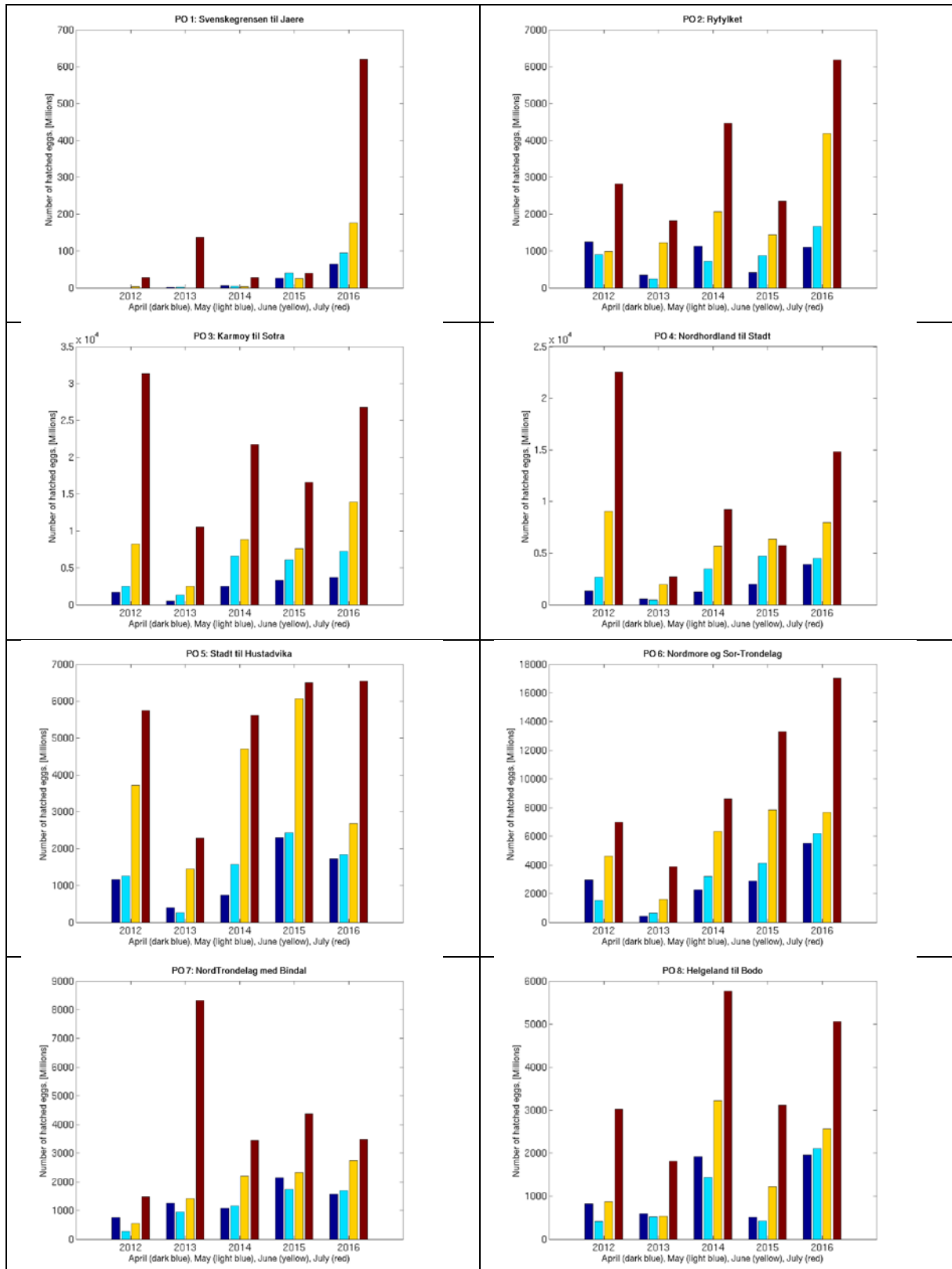
Vi har valgt å spre planktonisk lakselus som **partikler** og beregne spredningsprosessen, vekst, adferd og dødelighet basert på informasjon fra litteraturen og fra sensitivitetsstudier med modell (Asplin m.fl., 2011, Asplin m.fl., 2014, Johnsen m.fl., 2014, Johnsen m.fl., 2016). Horisontalt driver lakseluslarvene passivt med strømmen, men vertikalt er lakseluslarvene i stand til å posisjonere seg basert på miljøfaktorer som lys og saltholdighet. Lakselusene er i modellen gitt evnen til å plassere seg nær overflaten, når eksponert for lys, og å synke lenger ned i vannsøylen ved lave saltholdigheter. I tillegg vil den vertikale forflytningen inneholde småskala turbulent bevegelse.

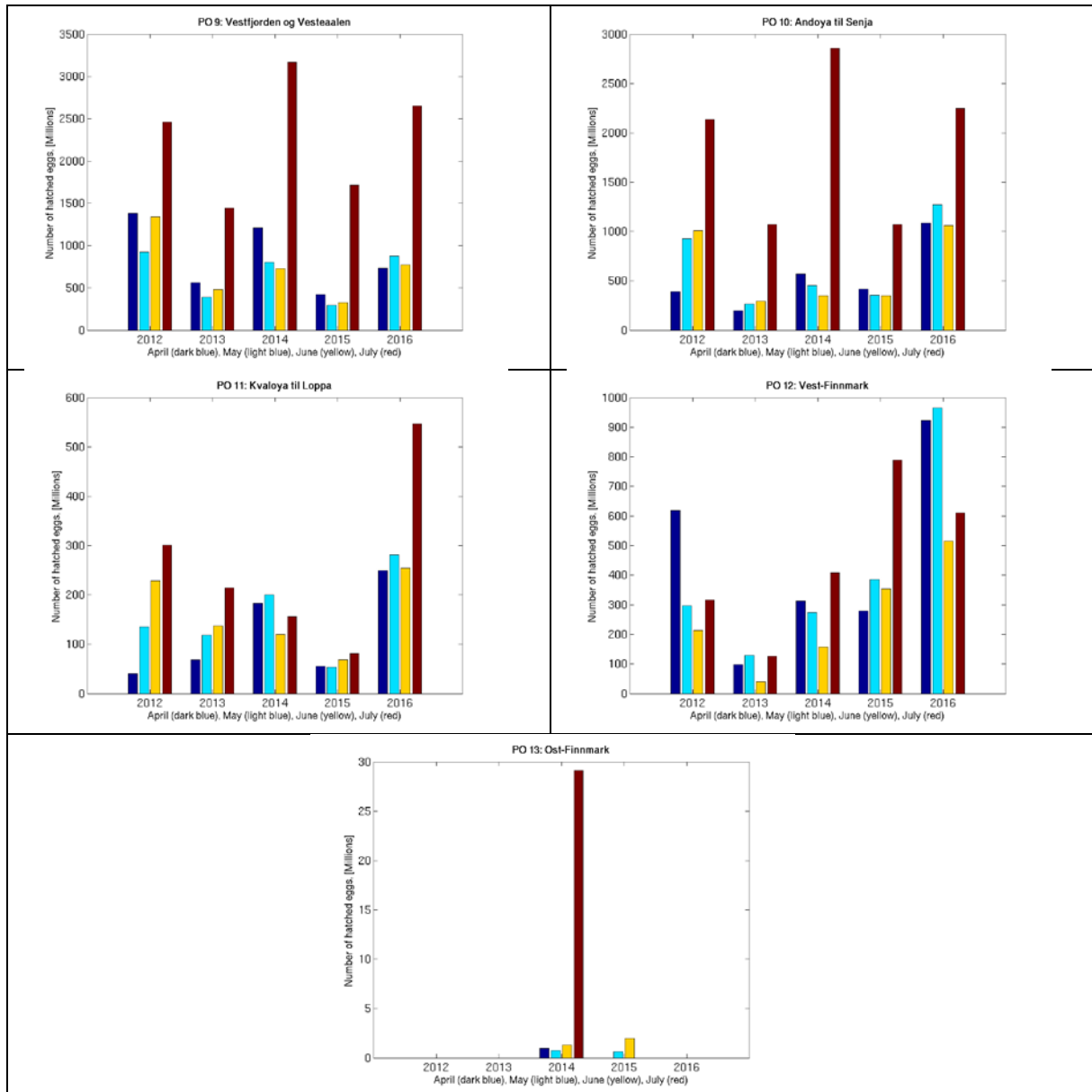
Lakselusa vil vokse og utvikle seg som en funksjon av temperatur, og vi modellerer dette ved å bruke døgngrader som er tid multiplisert med omgivelsestemperatur. Grensene for når lakselusa er i de to første naupliestadiene og når de er i det smittsomme kopepodittstadiet, angis i døgngrader og er basert på laboratoriestudier. Det smittsomme kopepodittstadiet er antatt å være mellom 40 og 170 døgngrader (Samsing m.fl., 2016) Ved høyere vanntemperatur vil altså lakselusa raskere bli kopepoditt samtidig som levetiden som kopepoditt er kortere.

I forhold til kvantitative mål for lakseluskonsentrasjon vil dette hovedsakelig være avhengig av hvor mange nauplier som klekkes (kildeledd, hovedsakelig lus på oppdrettsfisk) og hvor stor dødeligheten er. Begge ledd inneholder i dag (og i overskuelig fremtid) usikkerheter, og selv om vi benytter best tilgjengelig kunnskap forventer vi at det er et potensiale for å forbedre denne framover. Fordelingen av lakselus kopepoditter i rom og tid vil derimot rent kvalitativt bare i mindre grad påvirkes av detaljer i kildeledd eller dødelighet. Manglende kilder vil derimot kunne være av stor betydning.

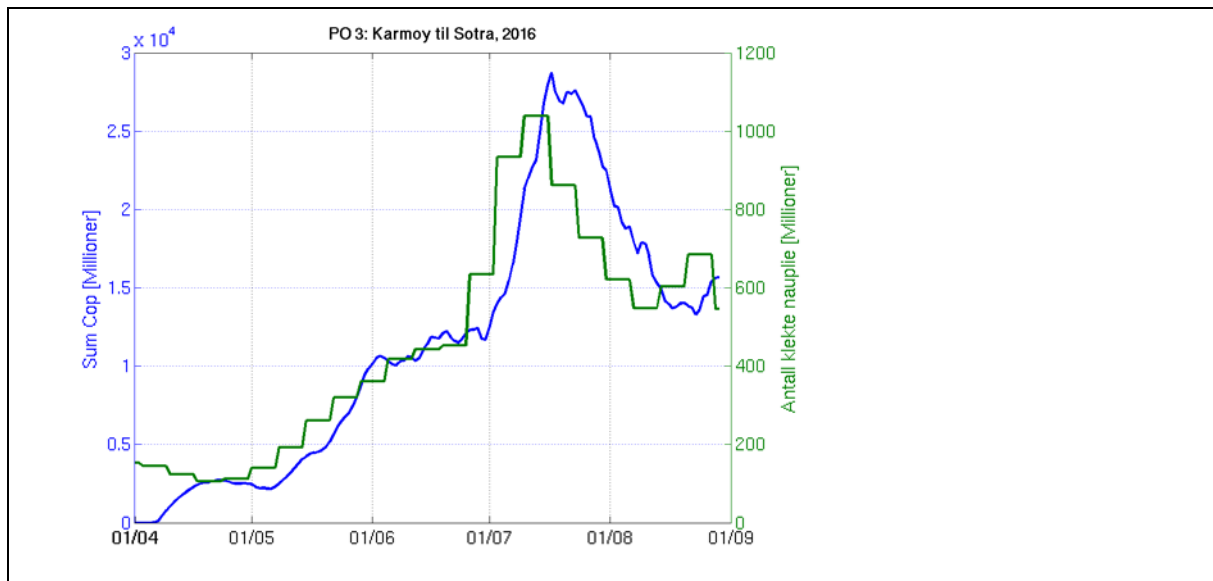
#### 3.1 Kildeleddet

En detaljer beskrivelse av hvordan vi beregner kildeleddet er lagret i et google dokument <https://docs.google.com/document/d/1zjAG6jxURC7UwVAVdZJseR13ZDRRfZkxYc9nyXEb46A/pub>. Siden produksjonsområdene er plassert slik at det skal være minimal utveksling av partikler mellom områdene vil summen av antall infektive kopepoditter følge klekkingen av nauplier med en tidsforsinkelse som er avhengig av temperaturen, som vi kan se av eksempelet i Figur 3. Informasjonen om antall infektive kopepoditter er egentlig et bedre mål på den samlede tilstanden i produksjonsområdet, men fordelingen med å plote antall klekte nauplier er at vi slipper å kjøre modellen. Her er summen (over måned) av antall klekte nauplier per produksjonsområde plottet år for år. Merk at skalaen på y-aksen varierer mellom produksjonsområdene.





**Figur 2:** Kildeleddet (antall klekte nauplier) integrert over produksjonsområde. Merk at skalaen på y-aksen varierer mellom produksjonsområdene.



**Figur 3:** Sum over antall nyklekte nauplier (grønn) og sum over antall smittsomme kopepoditter (blå) i produksjonsområde 3. Kurvene følger hverandre, men kopepodittene ligger litt etter naupliene og har lavere verdi pga. en konstant dødelighet på 17 % per dag.

#### 4. Modellresultater

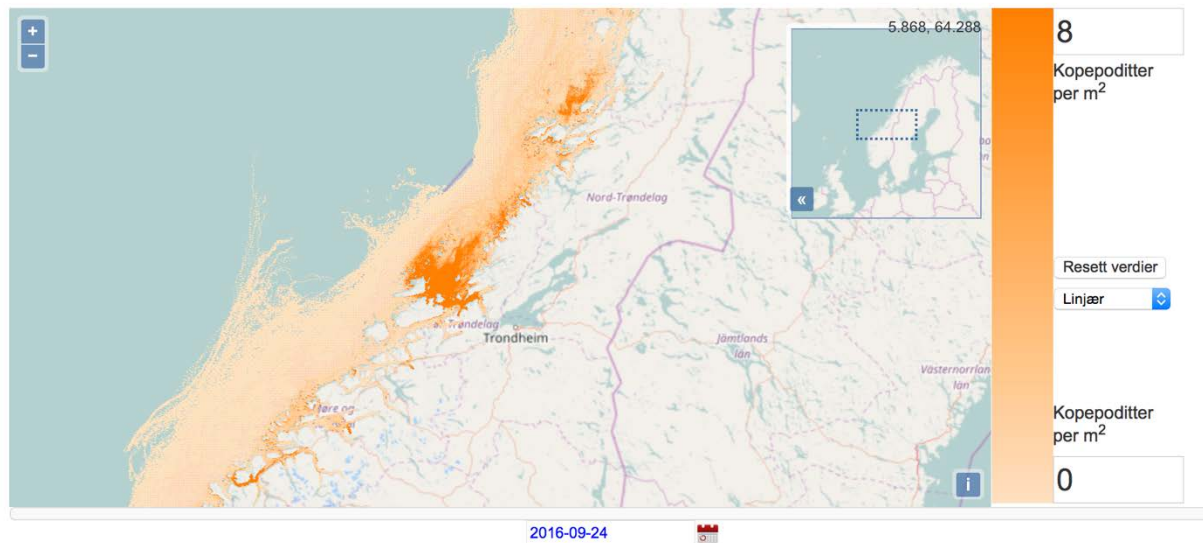
Sluttproduktet fra lakselusmodellen er en geografisk fordeling av planktonisk lakselus (stadiefordelt på nauplier og kopepoditter) time for time for en tidsperiode. Dette summeres gjerne til konsentrasjon pr. m<sup>2</sup>, eventuelt bare for den øvre delen av vannsøylen hvor vi antar at den ville fisken hovedsakelig oppholder seg.

Denne typen resultater kan produseres for en hvilken som helst periode der vi har modellresultater for strøm, samt reelle estimat på hvor mange lakselusnauplier som slippes ut. Dette siste får vi gjennom den rapporteringen industrien gir ukentlig for antall lus og månedlig for biomasse. Ideelt sett skulle denne informasjonen vært tilgjengelig hyppigere. I 2016 har Havforskningsinstituttet gjennomført operasjonelle simuleringer av lakseluskonsentrasjoner langs Norskekysten basert på rapporter fra alle oppdrettsanlegg i drift samt resultater fra Meteorologisk institutts operasjonelle simuleringer av strøm med modellen NorKyst800 (Figur 4). Resultatene lagres ukentlig som 10-dagers gjennomsnittsverdier på Havforskningsinstituttets webside (<http://webprod1.nodc.no:8080/smittepress/v1/>).



## Smittepress lakselus

(14.9.2016 - 24.9.2016)



**Figur 4.** Eksempel på fordeling av smittsomme lakseluskoepoditter. Fordelingen gjelder for perioden 14.-24. september 2016 og viser antall kopepoditter per m<sup>2</sup> utenfor Midt-Norge. Figuren er hentet fra Havforskningsinstituttets operasjonelle lusesimulering (<http://webprod1.nodc.no:8080/smittepress/v1/>).

For områder av særskilt interesse eller der kystlinjen tilsier at vi trenger høyere romlig oppløsning enn NorKyst800 (800 m gitter), gjennomfører vi rutinemessig spredningssimuleringer med strømmodellresultater fra 50 m til 160 m (andre områder kan simuleres ved behov).

### 5. Modellresultatvalidering

Det er viktig å kunne bestemme i hvilken grad modellresultatene gir en realistisk beskrivelse av det smittepresset de ville laksefiskene opplever. Validering av denne type modellsystem er imidlertid ingen enkel øvelse. Først estimerer modellen antall smittsomme lakseluskoepoditter (smittedose), mens de aller fleste observasjoner er fra tellinger av lakselus (koepoditter og andre stadier) som sitter på fisken (smitterespons). Vi trenger altså å etablere en sammenheng mellom antall kopepoditter i vannmassene og det antallet som fester seg på fisken. Det finnes noen studier som beskriver hvordan temperatur, saltholdighet og strøm påvirker smitteprosessen. Det er vist at smitteeffektiviteten er påvirket av temperatur, saltholdighet og strømhastighet (Tucker m.fl., 2000; Browman m.fl., 2004; Genna m.fl., 2005; Frenzl, 2014). Hvordan man skal representere denne smitteprosessen som en funksjon av flere variabler er imidlertid enda ikke beskrevet i litteraturen, og som en første ordens tilnærming antar vi en lineær sammenheng mellom smittedose og smitterespons for individuell fisk. For det andre må vi finne en best mulig måte å sammenligne diskrete punktobservasjoner som har grov tidsoppløsning med modellresultater som har god oppløsning i både tid og rom. Dette er heller ikke rett frem og det er mulig å velge flere fremgangsmåter, samt ulike parameter som sier noe om kvaliteten på modellproduktet. En oversikt over litteraturen på dette feltet, samt de valg som er gjort for å sammenligne modellresultatene med observasjoner fra smoltbur i Hardangerfjorden er i beskrevet i Sandvik m.fl., 2016.

Resultatene fra Hardangerfjorden, som inkluderer fire år og mer enn 100 ulike datapunkt, viste at fordelingen av lakseluslarver estimert med modellen passet godt sammen med den skjeve fordelingen som kom frem i det observerte datasettet, inndelt i infeksjonsklasser. Infeksjonsklassene er definert som under 1 lus i snitt på burfisk (abundans), 1-5 lus, 5-10

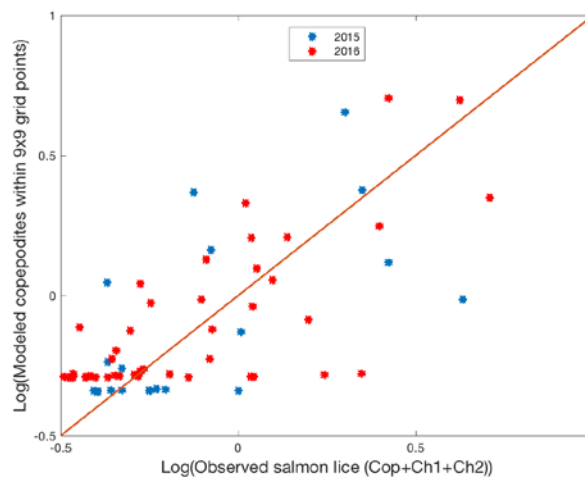
lus og mer enn 10 lus. I 78 % av burobservasjonene var modellen i stand til å estimere riktig infeksjonsklasse, mens den i 18 % av burobservasjonene underestimerte med en luseklasse, mens de resterende 4 % ble over eller underestimert med to luseklasser. Det ble også vist at den høye treffsikkerheten til modellen er langt over det vi kunne ha oppnådd ved en ren tilfeldighet.

I et pågående arbeid har vi videre sammenlignet modellert fordeling av lakseluskoepoditter med observert mengde lus på villfanget ørret. Vi har kun sett på fisk som ble fanget i den første perioden av overvåkningen (Nilsen m.fl., 2017), siden denne best representerer forventet utvandringstidspunkt for laksesmolt i de ulike områdene. Vi har videre avgrenset til fisk som er mindre enn 150 gram. Perioden strekker seg fra 23. mai på Sørlandet til slutten av juni i Finnmark. Datagrunnlaget fra 2015 utgjør da 1088 fisk fordelt på 21 stasjoner og fra 2016 var det 1733 fisk fordelt på 44 stasjoner. Fra observasjonene har vi summert opp antall tidlige lus (koepoditter, chalimus 1+2) og beregnet totalt antall lus relativt til vekt (lus per gram kroppsvekt) i gjennomsnitt for hver stasjon. Fra modellen har vi beregnet antall koepoditter innenfor ulike radius fra observasjonspunktet (3x3, 5x5, 9x9 gridruter), midlet i rom og summert over en tre ukers periode som inkluderer de to ukene prøvofisket har foregått og en uke i forveien (Tabell 1, Figur 5).

**Tabell 1:** Spearman rank korrelasjon mellom observasjoner (tidlige stadier og relativt antall per gram) og modellresultater i ulike radius omkring observasjonspunktet (3x3, 5x5, 9x9 gridpunkter).

2015/2016	Tidlige stadier	Totalt antall (lus/gr)
3x3 gridruter	0,61/0,57	0,63/0,67
5x5 gridruter	0,61/0,64	0,62/0,69
9x9 gridruter	0,71/0,69	0,73/0,72

Når man slår sammen de to ulike årene til en lang serie, blir korrelasjonen 0,675 for tilfellet med tidlige stadier og 9x9 gridpunkter (0,71/0,69). Ellers er tidsseriene holdt separat fordi antall observasjoner er cirka dobbelt så mange i 2016 sammenlignet med 2015, og stasjonene er ikke nødvendigvis de samme mellom år. 2016 var også det første året med observasjoner i alle produksjonsområder.



**Figur 5.** Sammenheng mellom observerte lusepåslag (tidlige stadier) og modellert konsentrasjon av koepoditter (9x9 gridruter) for 2015 (blå) og 2016 (rød), tidsseriene er standardisert og plottet på logaritmisk skala for sammenligning.

Sammenligningen viser at modellen viser høy korrelasjon mellom modellert og observert smittepress i hele landet. Kvaliteten på modellresultatene anses derfor som svært god og man kan dermed konkludere at modellen beregner realistisk smittepress i alle produksjonsområdene, både høye og lave verdier.

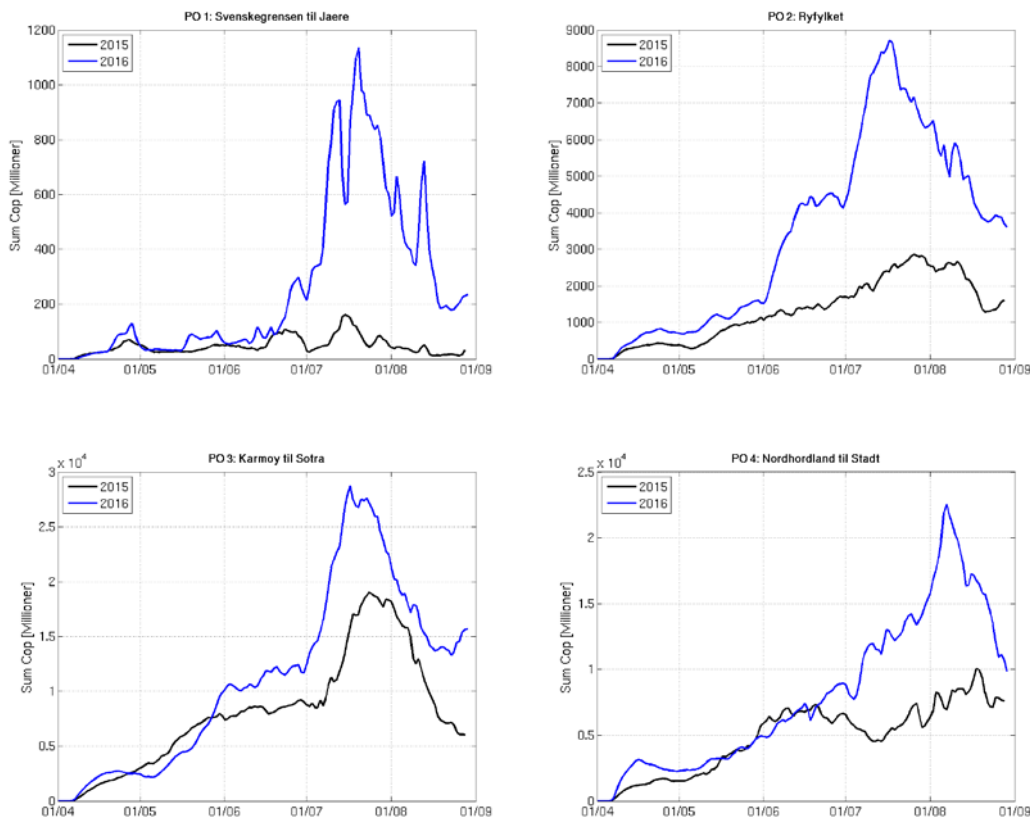
## 6. Modellprodukter

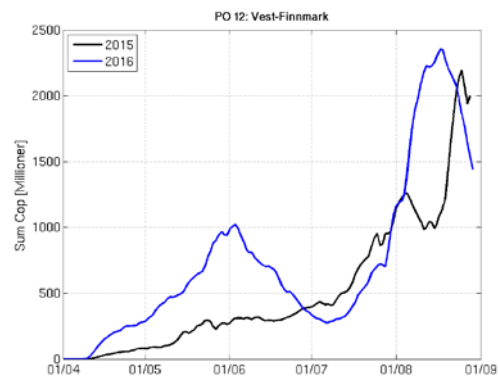
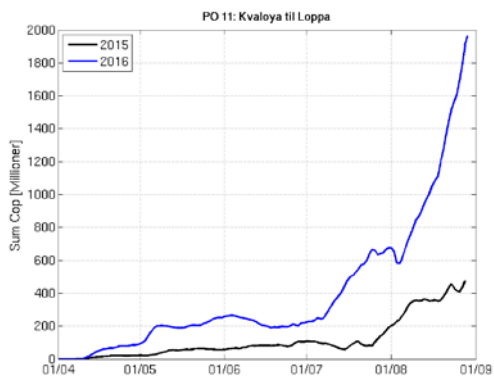
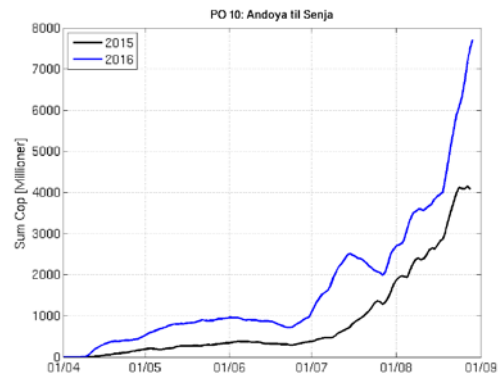
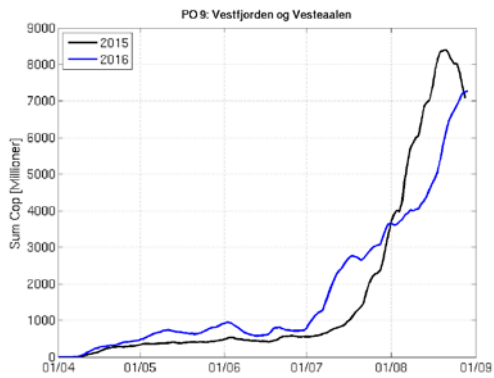
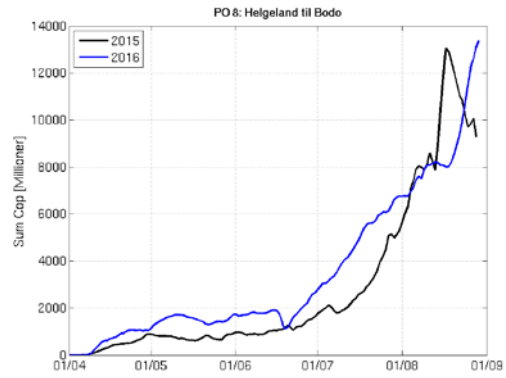
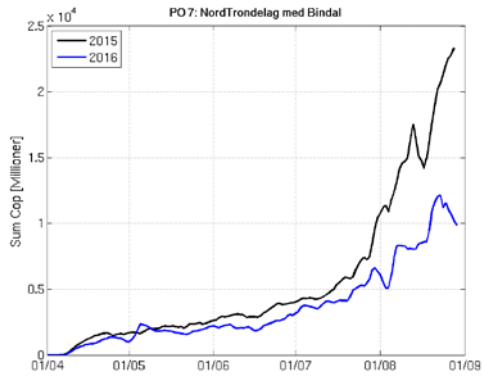
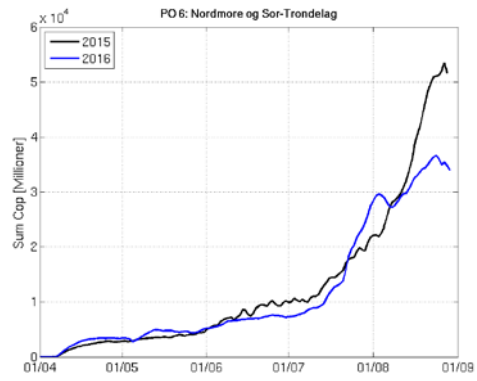
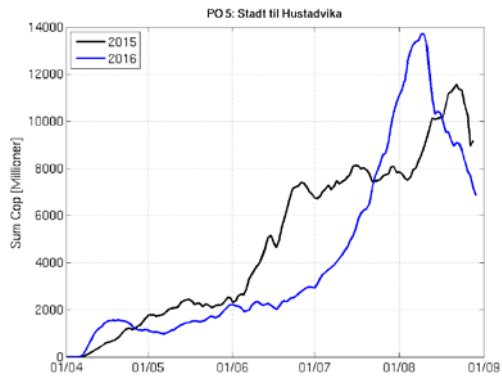
Sluttproduktet fra lakselusmodellen er antallet smittsomme kopepoditter i produksjonsområdene til enhver tid. Summen over hvert produksjonsområde er vist som tidsserier for 2015 og 2016 under.

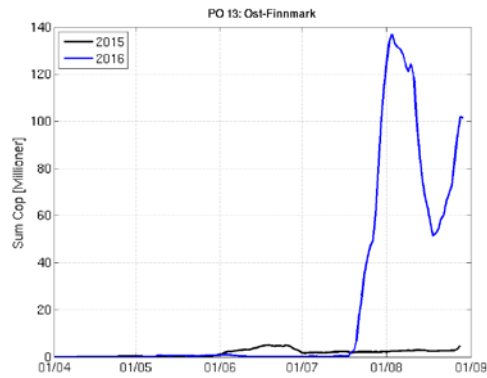
### 6.1 Tidsutvikling av kopepoditter innen produksjonsområdene

Gitt at den modellerte fordelingen av smittsomme lakseluscopepoditter i rom og tid er en realistisk beskrivelse av det reelle smittepresset for villfisk, og gitt at sammenhengen mellom smittedose og smitterespons er tilnærmet lineær, kan vi estimere individuell smitte på den villfisk som befinner seg i modellområdet. Vi trenger da å kjenne hvor fisken er og når den er der for å sammenholde med den modellerte kopepodittkonsentrasjonen. Med denne bakgrunnen har vi definert to ulike produkter som søker å relatere modellresultatene til dødelighet på villfisk i produksjonsområdene: *Smittepresskart* og *Virtuell smoltutvandring*. Disse produktene er beskrevet i Appendix V og VI sammen med resultater for 2015 og 2016.

Figurer med tidsutviklingen av antall smittsomme kopepoditter i hvert produksjonsområde for 2015 og 2016 som beregnet med spredningsmodellen for lakselus. Siden den tillatte biomassen, og dermed mulig antall klekte nauplier, varierer mye mellom de ulike produksjonsområdene, har figurene ulik skala på y-aksen.



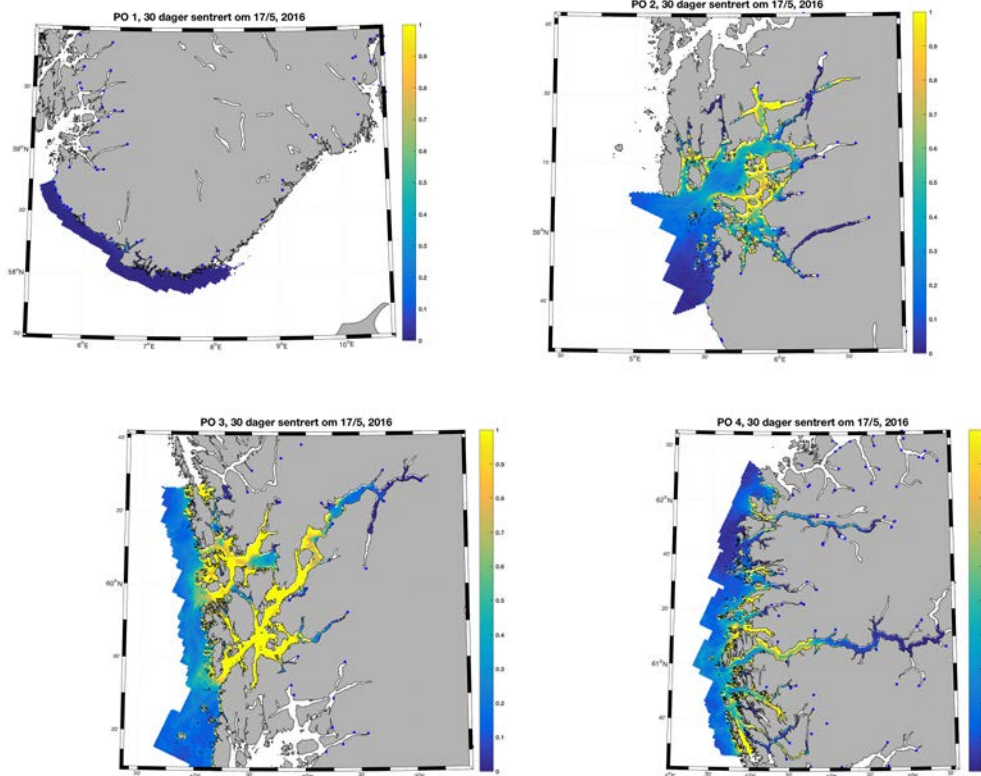


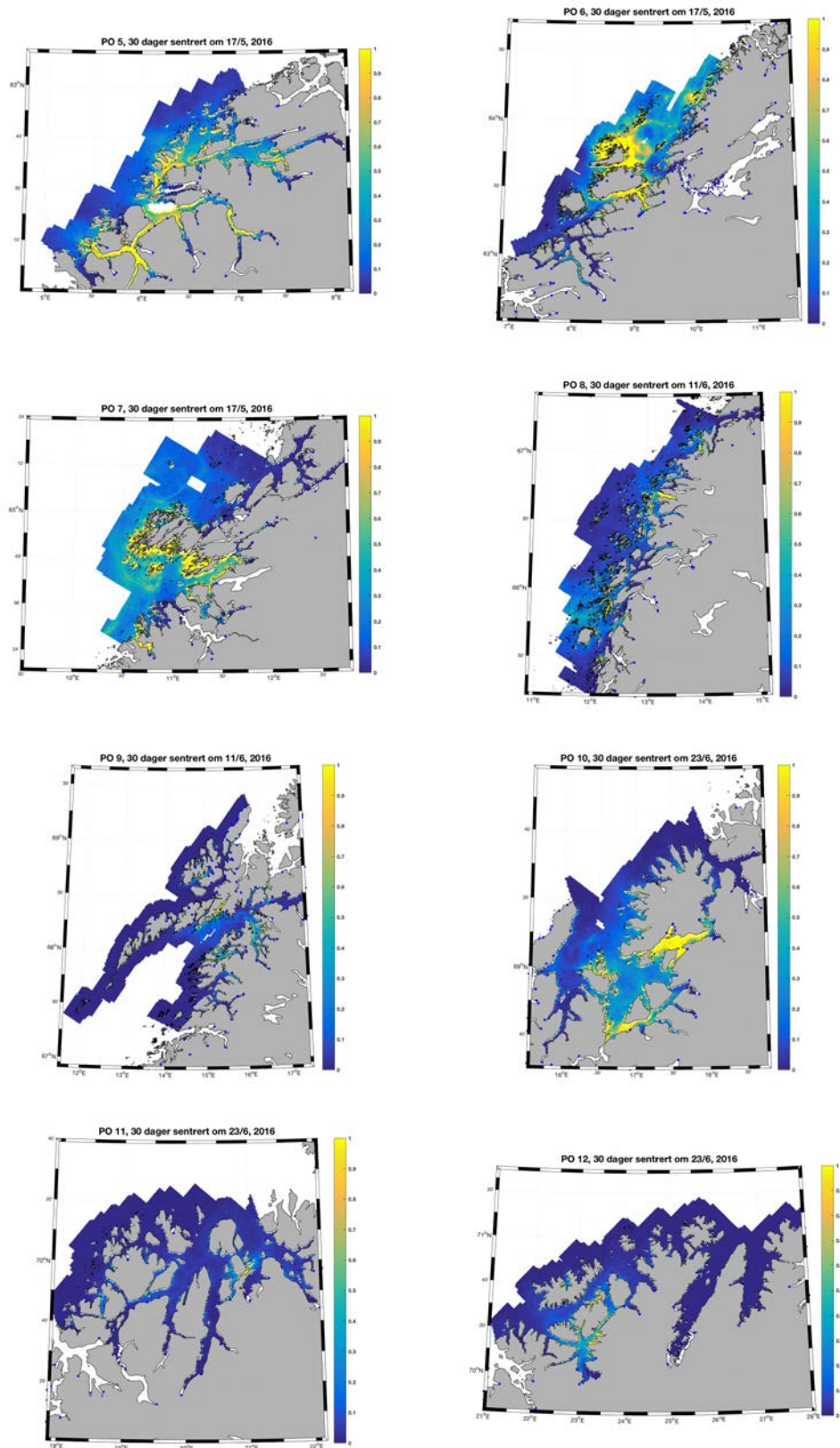


**Figure 6.** Tidsutviklingen av antall smittsomme kopepoditter i hvert produksjonsområde for 2015 og 2016 som beregnet med den hydrodynamiske spredningsmodellen for lakselus. Siden den tillatte biomassen, og dermed mulig antall klekte nauplier, varierer mye mellom de ulike produksjonsområdene, har figurene ulik skala på y-aksen.

## 6.2 Geografisk fordeling av kopepoditter

Sluttproduktet fra lakselusmodellen er antallet smittsomme kopepoditter i produksjonsområdene til enhver tid. Summen over 30 dager omkring den datoen det er estimert at 50 % av smolten vandrer fra elv til hav er vist som horisontale kart under, og viser relative forskjeller innen de ulike produksjonsområdene. Estimert for utvandring fra over 400 elever er summert i Appendix VI.





**Figure 7.** Tetthet av smittsomme kopepoditter (antall per kvadratmeter) beregnet med den hydrodynamiske spredningsmodellen for lakselus. Figurene viser antall per kvadratmeter, beregnet med den hydrodynamiske spredningsmodellen for lakselus.

## 7 Fakta om produksjonsområdene

Basert på konnektivitet mellom anlegg (Ådlandsvik 2015), er det bestemt at kysten deles inn i 13 produksjonsområder, som vist i figur 1. Se også

<https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/forskrift-om-produksjonsomrader-for-akvakultur-av-matfisk-i-sjo-av-laks-orret-og-regnbueorret-produksjonsomradeforskriften/id2527418/>.

Når tilstanden i de ulike produksjonsområdene skal beskrives kan det være nyttig å sette opp noen faktiske tall for hvert område, for eksempel i tabellen under.

	Antall anlegg	MTB	Antall gridruter (800x800 m)
PO 1	10	29 770	79 562
PO 2	43	127 670	27 908
PO 3	130	346 325	33 618
PO 4	116	319 685	64 334
PO 5	35	115 025	34 209
PO 6	110	425 917	59 115
PO 7	41	170 825	34 177
PO 8	62	196 610	50 079
PO 9	65	200 078	59 589
PO 10	54	214 615	23 088
PO 11	31	128 940	33 152
PO 12	47	173 078	55 218
PO 12	4	14 160	31 370

**Tabell 2.** Liste over produksjonsområder med antall anlegg, maksimal tillatt biomasse og areal. PO 1: Svenskegrensen til Jæren, PO 2: Ryfylke, PO 3: Karmøy til Sotra, PO 4: Nordhordland til Stadt, PO 5: Stadt til Hustadvika, PO 6: Nordmøre og Sør-Trøndelag, PO 7: Nord-Trøndelag med Bindal, PO 8: Helgeland til Bodø, PO 9: Vestfjorden og Vesterålen, PO 10: Andøya til Senja, PO 11: Kvaløya til Loppa, PO 12: Vest-Finnmark, PO13: Øst-Finnmark. Antall anlegg i området vil variere noe fra år til år og gjennom året avhengig av slakt/brakklegging og utsett av ny fisk (tallene her er fra 2016). Maksimalt tillatt biomasse delt på vekt gir totalt antall fisk som er tillatt i produksjonsområdet.

## 8 Referanser

Albretsen, J., Sperrevik, A.K., Staalstrøm, A., Sandvik, A.D., Vikebø F. and Asplin, L., 2011. NorKyst-800 report no. 1: User manual and technical descriptions. Fisken og Havet nr. 2/2011, 51 pages.

Asplin, L., Boxaspen, K.K. & Sandvik, A.D. 2011. Modeling the distribution and abundance of planktonic larval stages of *Lepeophtheirus salmonis* in Norway. In S.R.M. Jones and R.J. Beamish (eds.) *Salmon Lice: An integrated approach to understanding parasite abundance and distribution*. Wiley-Blackwell, Hoboken, New Jersey, pp. 31-50.

Asplin, L., Johnsen, I.A., Sandvik, A.D., Albretsen, J., Sundfjord, V., Aure, J. & K.K. Boxaspen. 2014. Dispersion of salmon lice in the Hardangerfjord. *Marine Biology Research*, 10:3, 216-225, DOI:10.1080/17451000.2013.810755.

Browman, H., Boxaspen, K.K., Kuhn, P., 2004. The effect of light on the settlement of the salmon louse, *Lepeophtheirus salmonis*, on Atlantic salmon, *Salmo salar* L., Journal of Fish Disease, 27, 701-706.

Frenzl, B., 2014. Understanding key factors associated with the infection of farmed Atlantic salmon by the salmon louse *Lepeophtheirus salmonis*. PhD-avhandling ved Institute of Aquaculture, University of Sterling, Skottland. 165 sider.

Genna, R.L., Mordue, W., Pike, A.W., Mordue (Luntz), A.J., 2005. Light intensity, salinity, and host velocity influence presettlement intensity and distribution on hosts by copepodids of sea lice, *Lepeophtheirus salmonis*, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 62, 2675-2682.

Johnsen, I.A., Fiksen, Ø., Sandvik, A.D., Asplin, L., 2014. Vertical salmon lice behaviour as a response to environmental conditions and its influence on regional dispersion in a fjord system, Aquaculture Environment Interactions, 5, 127-141. DOI: 10.3354/aei00098.

Johnsen, I.A., Asplin, L., Sandvik, A.D., Serra-Llinares, R.M., 2016. Salmon lice dispersion in a northern Norwegian fjord system and the impact of vertical movements. Aquaculture Environment Interactions, 8: 99-116, DOI: 10.3354/aei00162.

Nilsen, R. m.fl., 2017. Lakselusinfestasjon på vill laksefisk langs norskekysten i 2016, Rapport fra Havforskningen, Nr1-2017, 56 sider.

Sandvik, A.D., Bjørn, P.A., Ådlandsvik, B., Asplin, L., Skarðhamar, Johnsen, I.A., Myksvoll, M., Skogen, M.D., 2016. Toward a model-based prediction system for salmon lice infestation pressure. Aquaculture Environment Interactions, 8: 527-542, doi:10.3354/aei00193.

Sandvik, A.D., Skagseth, Ø., Skogen M.D., 2016. Model validation: Issues regarding comparisons of point measurements and high-resolution modeling results, Ocean Modelling, 106, 68-73.