

## 773 Modellering av gjellealuminium

NINA Rapport

Aluminiumspåslag på gjellene til laksesmolt og betydningen dette kan ha for utvandringen

Ola H. Diserud, Frode Kroglund , Hans-Cristian Teien, Torulv Tjomsland og Finn Økland



## NINAs publikasjoner

### **NINA Rapport**

Dette er en elektronisk serie fra 2005 som erstatter de tidligere seriene NINA Fagrapport, NINA Oppdragsmelding og NINA Project Report. Normalt er dette NINAs rapportering til oppdragsgiver etter gjennomført forsknings-, overvåkings- eller utredningsarbeid. I tillegg vil serien favne mye av instituttets øvrige rapportering, for eksempel fra seminarer og konferanser, resultater av eget forsknings- og utredningsarbeid og litteraturstudier. NINA Rapport kan også utgis på annet språk når det er hensiktsmessig.

### **NINA Temahefte**

Som navnet angir behandler temaheftene spesielle emner. Heftene utarbeides etter behov og serien favner svært vidt; fra systematiske bestemmelsesnøkler til informasjon om viktige problemstillinger i samfunnet. NINA Temahefte gis vanligvis en populærvitenskapelig form med mer vekt på illustrasjoner enn NINA Rapport.

### **NINA Fakta**

Faktaarkene har som mål å gjøre NINAs forskningsresultater raskt og enkelt tilgjengelig for et større publikum. De sendes til presse, ideelle organisasjoner, naturforvaltningen på ulike nivå, politikere og andre spesielt interesserte. Faktaarkene gir en kort framstilling av noen av våre viktigste forskningstema.

### **Annen publisering**

I tillegg til rapporteringen i NINAs egne serier publiserer instituttets ansatte en stor del av sine vitenskapelige resultater i internasjonale journaler, populærfaglige bøker og tidsskrifter.

# Modellering av gjellealuminium

Aluminiumspåslag på gjellene til laksesmolt og betydningen dette kan ha for utvandringen

Ola H. Diserud  
Frode Kroglund  
Hans-Cristian Teien  
Torulv Tjomsland  
Finn Økland

Diserud, O.H., Kroglund, F., Teien, H.-C., Tjomsland, T. & Økland, F. 2012. Modelling av gjellealuminium: Aluminiumspåslag på gjellene til laksesmolt og betydningen dette kan ha for utvandringen. - NINA Rapport 773. 41 s.

Trondheim, november 2012

ISSN: 1504-3312

ISBN: 978-82-426-2368-3

RETTIGHETSHAVER

© Norsk institutt for naturforskning

Publikasjonen kan siteres fritt med kildeangivelse

TILGJENGELIGHET

Åpen

PUBLISERINGSTYPE

Digitalt dokument (pdf)

REDAKSJON

Norunn S. Myklebust

KVALITETSSIKRET AV

Eva B. Thorstad

ANSVARLIG SIGNATUR

Forskningssjef Kjetil Hindar

OPPDRAGSGIVER(E)

Direktoratet for naturforvaltning

KONTAKTPERSON(ER) HOS OPPDRAGSGIVER

Roar Lund

FORSIDEBILDE

Radiomerking av smolt, Storelva. Foto: Frode Kroglund

NØKKELOORD

Atlantisk laks (*Salmo salar*), generalisert additiv modell, gjellealuminium, estuarine blandsoner, salinitet, smoltutvandring, Storelva i Holt - Aust-Agder, telemetri.

KEY WORDS

Atlantic salmon (*Salmo salar*), generalized additive model, gill aluminium, estuary mixing zones, salinity, smolt migration, Storelva, telemetry.

#### KONTAKTOPPLYSNINGER

##### **NINA hovedkontor**

Postboks 5685 Sluppen

7485 Trondheim

Telefon: 73 80 14 00

Telefaks: 73 80 14 01

##### **NINA Oslo**

Gaustadalléen 21

0349 Oslo

Telefon: 73 80 14 00

Telefaks: 22 60 04 24

##### **NINA Tromsø**

Framsenteret

9296 Tromsø

Telefon: 77 75 04 00

Telefaks: 77 75 04 01

##### **NINA Lillehammer**

Fakkeltgården

2624 Lillehammer

Telefon: 73 80 14 00

Telefaks: 61 22 22 15

## Sammendrag

Diserud, O.H., Kroglund, F., Teien, H.-C., Tjomsland, T. & Økland, F. 2012 Modellering av gjellealuminium. Aluminiumspåslag på gjellene til laksesmolt og betydningen dette kan ha for utvandringen – NINA Rapport 773. 41 s.

Etter kalking av Storelva i Holt har utvandringen av smolt vært betydelig, mens fangstene av laks i elva fortsatte å være lave (Kroglund mfl. 2011c). I 2005 ble det observert smolt i dårlig form og uten fluktatferd i brakkvann. Det har også vært påvist omfattende akkumulering av aluminium på gjellene hos laksesmolt i brakkvannssonen (2003, 2005 og 2006) i dette systemet. Til sammen har dette reist spørsmålet om akkumulering av gjellealuminium hos utvandrende smolt medfører redusert overlevelse, eller upresis tilbakevandring til vassdraget.

For å studere effekter av aluminium på smoltadferd ble vill laksesmolt fra elva merket med akustiske merker, og bevegelsene og overlevelsen fulgt fra elvemunningen og ut i havet i 2007 og 2008. I 2007, da vannføringen i elva var lav, nådde 18 % av smolten ut i kyststrømmen, mens 33 % av smolten nådde ut i 2008 i en periode med høy vannføring, og dermed lav salinitet, i de indre delene av estuariet. Videre ble vandringshastigheten kraftig redusert begge år i de områdene av estuariet med salinitet under 10 promille, samtidig som hastigheten økte raskt etter at smolten kom ut i områder med saltere vann.

Undersøkelser av mobilisering av bioreaktivt aluminium har vist at høye nivå av gjellealuminium akkumuleres når saliniteten er mellom 1 og 10 promille. Sammenhengen mellom akkumulering av Al på gjellene og salinitet er godt dokumentert i forsøk og gjennom kjemiske analyser i vassdraget (Teien mfl. 2006; 2009; Kroglund mfl. 2011a-g). Ved å sammenstille informasjonen om smoltens vandring og mobiliseringen av bioreaktivt aluminium i de ulike delene av estuariet har vi kunnet modellere mengden av gjellealuminium hos utvandrende smolt.

I fjordsystemet utenfor Storelva i Holt er endringen i saltnivå fra elv til hav rask i år med liten vannføring, mens brakkvannet dekker større områder når vannføringen er stor. Modellen viste at laksesmolt fort kan nå nivåer av gjellealuminium som ligger høyt over de nivåer som betraktes som sikre, både i år med lite og mye vann i elva. Videre ser det ut som vandringsviljen hos smolten svekkes svært raskt når smolten ankommer områder med dårlig vannkvalitet, det vil si områder med høy mobilisering av bioreaktivt aluminium. Vandringen avtar også før vi forventer at akkumuleringen på gjellene har nådd problematiske nivå, men når laksesmolten først stopper opp i slike områder når forventede skadelige nivå av gjellealuminium raskt. Både i 2007 og 2008 vandret mer smolt ut gjennom fjordsystemet tidlig på sesongen under forhold som var relativt gunstig med tanke på akkumulering av aluminium på gjellene.

Resultatene styrker vår hypotese om at akkumulering av gjellealuminium hos utvandrende smolt i Storelva i Holt kan nå nivåer som er langt over det vi betrakter som biologisk sikre. Det er sannsynlig at dette alene, eller sammen med andre faktorer, er årsaken til den lave tilbakevandringen av voksenlaks til elva. Den utviklede modellen, basert på kunnskap om smoltutvandring og forholdene i et gitt fjordsystem, vil kunne benyttes til å predikere om vi kan forvente skadelige nivåer av gjellealuminium på laksesmolt.

Ola H. Diserud, Finn Økland, NINA - Norsk institutt for naturforskning, Postboks 5685 Sluppen, 7485 Trondheim;

Frode Kroglund, NIVA - Norsk institutt for vannforskning, Televeien 3, 4879 Grimstad;

Torulv Tjomsland, NIVA - Norsk institutt for vannforskning, Gaustadalleen 21, 0349 Oslo;

Hans-Cristian Teien, UMB - Universitetet for miljø- og biovitenskap, Postboks 5003, 1432 Ås.

E-post: [ola.diserud@nina.no](mailto:ola.diserud@nina.no)

## Abstract

Diserud, O.H., Kroglund, F., Teien, H.-C., Tjomsland, T. & Økland, F. 2012. Modeling of gill aluminum: Deposition of aluminum on salmon smolt gills and the potential influence on migration. – NINA Report 773. 41 pp.

After liming of the river Storelva in Holt was initiated, the number of outmigrating smolt has been substantial while the salmon catches have continued to be small (Kroglund et al. 2011c). In 2005, smolt in bad condition and without escape behavior were observed in brackish water. Comprehensive accumulation of aluminum on the gills of salmon smolt has been shown in the brackish zone of this fjord system (2003, 2005 and 2006). Together, this has raised the question whether accumulation of aluminum on the gills of migrating salmon smolt results in reduced survival or imprecise return migration back to this river.

In order to study effects of aluminum on smolt behavior, wild salmon smolt from the river were tagged with acoustic tags, and their movements and survival traced from the river mouth out to sea (2007 and 2008). In 2007, when the river discharge was low, 18% of the smolt reached the coastal currents, whereas in 2008 33% of the smolt came out to sea during a period with high discharge, and thereby low salinity in the inner parts of the estuary. The migratory speed was both years strongly reduced in the parts of the estuary with salinity below 10, whereas the speed increased rapidly after the smolt reached water with higher salinity.

Studies of mobilization of bio-reactive aluminum have shown that high levels of aluminum are accumulated on the gills when salinity is between 1 and 10 ppt. The relationship between accumulation of aluminum on gills and salinity is well documented in experiments and through chemical analysis in the watercourse (Teien et al. 2006; 2009; Kroglund et al. 2011a-g). By combining information on smolt migration and the mobilization of bio-reactive aluminum in the different parts of the estuary, we have been able to model the amount of gill aluminum during migration.

In the fjord system off Storelva in Holt, change in salinity from river to ocean is rapid in years with low discharge, whereas the brackish zone covers larger areas when discharge is high. Our model show that salmon smolt quickly reach levels of gill aluminum high above those considered safe, both in years with low and high discharge. Further, it seems like the smolts' willingness to migrate is rapidly reduced when they reach areas with poor water quality, i.e. areas with high mobilization of bio-reactive aluminum. The migration often stops before we expect the accumulation on the gills to have reached problematic levels, but when the salmon smolt remains in these areas harmful levels of gill aluminum is quickly obtained. Both in 2007 and 2008 more smolt migrated out through the fjord system early in the season, when conditions were more favorable with respect to aluminum accumulation on the gills.

These results strengthen our hypothesis that accumulation of aluminum on the gills of migratory smolt from River Storelva in Holt can reach levels that are well above those considered safe. It is likely that this alone, or together with other factors, is the cause of the low return rate of spawners to the river. The developed model, based on knowledge on smolt migration and the conditions in a given fjord system, can be used to predict whether harmful levels of gill aluminum on salmon smolt can be expected.

Ola H. Diserud, Finn Økland, NINA – Norwegian Institute for Nature Research, PO Box 5685 Sluppen, NO-7485 Trondheim, Norway, E-mail: [ola.diserud@nina.no](mailto:ola.diserud@nina.no) ;  
Frode Kroglund, NIVA - Norwegian Institute for Water Research, Televeien 3, NO-4879 Grimstad, Norway;  
Torulv Tjomsland, NIVA - Norwegian Institute for Water Research, Gaustadalleen 21, NO-0349 Oslo, Norway;  
Hans-Cristian Teien, UMB – Norwegian University of Life Sciences, Post box 5003, NO-1432 Ås, Norway.

# Innhold

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Sammendrag .....</b>                                            | <b>3</b>  |
| <b>Abstract .....</b>                                              | <b>4</b>  |
| <b>Innhold .....</b>                                               | <b>5</b>  |
| <b>Forord .....</b>                                                | <b>6</b>  |
| <b>1 Innledning .....</b>                                          | <b>7</b>  |
| <b>2 Områdebeskrivelse .....</b>                                   | <b>10</b> |
| <b>3 Materialer og metoder .....</b>                               | <b>11</b> |
| <b>4 Resultater .....</b>                                          | <b>12</b> |
| 4.1 Salinitet .....                                                | 12        |
| 4.1.1 Songevatn .....                                              | 13        |
| 4.1.2 Nævestadfjorden .....                                        | 13        |
| 4.1.3 Lagstrømmen .....                                            | 14        |
| 4.1.4 Sandnesfjorden – Vest .....                                  | 14        |
| 4.1.5 Sandnesfjorden – Midt .....                                  | 15        |
| 4.1.6 Sandnesfjorden – Øst .....                                   | 15        |
| 4.2 Aluminium i brakkvann .....                                    | 16        |
| 4.2.1 Modell for <i>Gjelle-Al</i> nivå .....                       | 16        |
| 4.2.2 Modell for akkumuleringshastighet for <i>Gjelle-Al</i> ..... | 19        |
| 4.3 Telemetridata .....                                            | 19        |
| 4.4 Utvandring vs. Salinitet og <i>Gjelle-Al</i> .....             | 21        |
| <b>5 Diskusjon .....</b>                                           | <b>26</b> |
| <b>6 Referanser .....</b>                                          | <b>30</b> |
| <b>7 Vedlegg .....</b>                                             | <b>32</b> |

## Forord

Målsettingen for denne rapporten har vært å modellere aluminiumsnivå på gjellene hos utvandrende laksesmolt fra Storelva gjennom den estuarine blandsonen – Songevann, Nævestadfjorden og Sandnesfjorden. Dette modelleringsarbeidet baserer seg på resultater og kunnskap om fysiske, kjemiske og biologiske forhold i fjordsystemet utenfor Storelva i Holt presentert i tidligere rapporter fra prosjektet.

Ola H. Diserud har vært ansvarlig for modellering, Torulv Tjomsland for salinitetssimuleringer, Hans C. Teien for Al fraksjonering og gjellealuminiumsanalyser, Finn Økland for telemetrisøkene og Frode Kroglund har koordinert prosjektet.

Direktoratet for naturforvaltning har støttet forskning på dette problemfeltet. Forsøkene som presenteres her er utført i Storelva i Holt og utenforliggende estuarier. Arbeidet er utført som et samarbeidsprosjekt mellom NINA, NIVA og UMB. Vi vil takke Direktoratet for naturforvaltning ved Roar Lund for oppdraget og for stor tålmodighet under fullføringen av rapporteringen.

Trondheim, november 2012.

Ola H. Diserud



# 1 Innledning

Det er veldokumentert at aluminium (Al) i ferskvann skader fisk og annen biota (Rosseland og Staurnes, 1994; Gensemer og Playle, 1999). På 1980-tallet ble det rapportert om mystisk fiskedød i brakkvann i fjordene omkring Osterøy (Bjerknes, 1985). Dette ble først knyttet til flommer i elvene hvor hypotesen var at dødelighet skyldtes raske endringer i salinitet (Bakke mfl. 1991). Først i 1993 ble årsaken til død knyttet til Al. Dette ble først gang beskrevet fra Fedafjorden, deretter påvist i flere fjorder på Vestlandet (Rosseland, 2005). Etter dette er Al-påslag med påfølgende dødelighet hos oppdrettsfisk beskrevet fra flere fjorder en rekke ganger (Bjerknes mfl. 2003).

Aluminium foreligger i en rekke tilstandsformer i vann. Giftighet knyttes til de former som kan benevnes som bioreaktive, kationiske eller labile. Mengdefordeling mellom ufarlige og farlige (akkumulerbare) former av Al i ferskvann kan i hovedsak knyttes til vannets organiske innhold samt pH. Bioreaktivt Al vil akkumuleres på fiskens gjeller hvor høye konsentrasjoner vil medføre fiskedød, men hvor lave konsentrasjoner kan gi samme økologiske effekt men da ved å påvirke smoltens sannsynlighet for å overleve etter utvandring til saltvann (Kroglund mfl. 2011c). Mens 300 µg Al/g gjelle tørrvekt (tv) er en grense for økende dødelighet for smolt i ferskvann, reduseres sannsynlighet for sjøoverlevelse når konsentrasjonen overstiger 30 µg/g. Skaden skyldes da at Al svekker smoltens evne til å opprettholde normal saltmengde i kroppsvæsken. Mens det er satt vannkvalitetskriterier for laks i ferskvann foreligger det ikke tilsvarende kriterier for brakkvann. Mens høye konsentrasjoner på gjellene her og forårsaker fiskedød, har man lite kunnskap om kritisk kjemisk grense, eller hvilke nivåer av gjellealuminium som påvirker smolt negativt.

Det har tidligere blitt påvist Al på postsmoltgjeller fra ytterst i Sognefjorden og Nordfjorden (Bjerknes og Kroglund 2000). Vi vet imidlertid ikke om dette skyldes forhold i fjorden eller i elvene smolten kom fra. Voksen laks døde som følge av Al når elvene omkring Osterøy gikk i flom (Bjerknes mfl., 2003). Smolt eksponert i bur vil akkumulere Al på gjellene i fjorden omkring Osterøy (Kroglund mfl. 2004, 2007). Den økologiske effekten av dette påslaget er derimot mer usikker. Forsøk utført etter 1995 har dokumentert årsak-virkningsmekanismer mellom Al i ferskvann og påslag av Al på fiskegjeller i brakkvann (Kroglund mfl. 2011e). Dette er kunnskap i hovedsak fra kontrollerte forsøk. Ut fra disse kan vi ikke avvise at Al i brakkvann kan ha en økologisk effekt. Det har imidlertid vært mangel på god dokumentasjon fra fjorder hvor årsaken til svak laksebestand ikke samtidig kan forklares med andre trusler, for eksempel lakselus.

Formålet med kalking har vært å endre tilstandsformen til Al fra de giftige til ufarlige formene (Teien mfl. 2009), noe som kan oppnås ved å heve pH. Når avgiftet Al, men også organisk bundet Al (i elva), blandes med saltvann endres tilstandsformene på nytt, men da fra ufarlig til farlige former av Al. Her er den drivende kraften endringene i saltnivå (Teien mfl. 2006). Mengden giftig Al vil øke med økende salinitet til saltnivåer i underkant av 10 ppt. Ved høyere saltnivåer er akkumuleringen liten (Kroglund mfl. 2011d). Den biologiske effekten av Al vil normalt være knyttet til konsentrasjon og eksponeringsvarighet. Dermed er respons også knyttet til konsentrasjon av Al i ferskvannet samt saltnivå i blandingen.

Laksesmolt vandrer med varierende hastighet ut til det åpne havet (f.eks. Hansen mfl. 2003, Finstad mfl. 2005, Thorstad mfl. 2007). Når smolt under utvandring eksponeres i miljø med bioreaktivt Al vil Al akkumuleres på gjellene og øke til en konsentrasjon hvor gjellealuminium er i likevekt med Al i vann. Dette innebærer at når fisken vandrer fra ferskvann til brakkvann økes konsentrasjonen av bioreaktivt Al, og dermed akkumuleringen av Al på gjeller, i en fase med økende salinitet. Deretter reduseres konsentrasjonen av bioreaktivt Al med ytterligere økning i salinitet slik at når smolten er ute i sjøvann med høy salinitet vil Al-påslaget forsvinne i løpet av noen timer. Gjellealuminiumsnivået en utvandrende smolt opplever vil dermed avhenge av eksponeringsvarighet (tid smolten eksponeres for en gitt Al konsentrasjon) og endringer i konsentrasjonsnivåer som skyldes at smolten vandrer gjennom saltgradienter. Forsøk i Storelva har tidligere påvist at akkumuleringen av Al øker når saltnivået passerer 1 promille og avtar når

nivået overstiger ca. 10 promille. Akkumulering vil i praksis avhenge av hvor lenge smolt erfarer eller oppholder seg i vann med akkumulerbart Al. Hvis smolt unnviker Al ved for eksempel å dykke kan den utvandre uten påvirkning. Hvis smolt øker vandringshastighet (unnvikelsesatferd) vil eksponeringsvarighet avta. Hvis derimot Al påvirker vandringsvilligheten vil eksponeringsvarighet øke med den tid fisken står i belastende vann.

Avhengig av et estuaries utforming, vanntilførsel fra elv og påvirkning av saltvann fra hav samt vind vil saltnivåene i blandsonen kunne variere raskt i tid og rom, fra å være lave til å være høye. Hvordan de ulike vanntypene blandes vil påvirke hvor brakkvannsområdene lokaliseres og hvilke saltnivåer de kan karakteriseres med; er det en gradvis økning i saltnivå fra elvemunning til hav, eller er endringen "spontan". Sistnevnte vil for eksempel inntreffe hvis elvevannet blandes i hele kyststrømmen. I fjordsystemet utenfor Storelva i Holt er endringene mer gradvise. Graden av "gradvishet" varierer mellom år, og endringene i saltnivå fra elv til hav er raske i år med lav vannføring i elva, og mer gradvise i år med høy vannføring i elva. Når det er lav vannføring i elva øker saltnivået nær elvemunningen, men vil øke først på utsiden av Nævestadfjorden når vannføringen er høy.

For å studere akkumuleringen av gjellealuminium for smolt på ulike steder i fjordsystemet er smolt eksponert i bur. Dette angir ikke hva en utvandrende smolt vil oppleve ettersom smolt i bur ikke kan vandre fritt. Burforsøkene angir at Al akkumuleres, men ikke hvilke nivåer villsmolt under vandring utsettes for og om frittsvømmende smolt unnviker områder med bioreaktivt Al ved å oppsøke saltere vann. Ettersom gjellealuminium avtar raskt når saltnivået overstiger en kritisk grense, vil heller ikke gjellealuminium målt på fisk fanget utenfor estuariet være en god indikator på hvilke gjellealuminiumsnivå smolten har hatt underveis gjennom fjordsystemet. Den smolten som opplever den største akkumuleringen av gjellealuminium vil sannsynligvis heller ikke overleve lenge nok til å kunne bli fanget utenfor estuariet. Skal den totale historikken for gjellealuminium beregnes, både nivå og tidsperiode, trenger vi nøyaktig informasjon om smoltens oppholdstider i ulike deler av estuariet der vi forventer at miljøforholdene vil variere. Forventede nivåer for gjellealuminium kan angis ved å kombinere informasjon om salinitet og aluminium i brakkvann. Basert på observasjoner i Songevatn i 2005, og på telemetridata fra 2007 og 2008, kan det virke som at smoltvandringen (hvor lenge smolten er i de ulike fjordbasengene) påvirkes av forventet akkumulert gjellealuminium. Hvis dette er tilfellet, har man et dynamisk system hvor endringer i saltnivåer både påvirker konsentrasjon og akkumulering av aluminium på fisken gjeller, samt hvor lenge smolten opplever en gitt konsentrasjon ved at atferden deres påvirkes av vannkvaliteten. Disse faktorene varierer både innen og mellom år, avhengig av vanntilførsel og marin påvirkning. Et bestemt sted i fjorden som var ugunstig i ett år, eller på én dato, trenger ikke være like ugunstig neste dag. Slike variasjoner i giftighet vil være særs variable i områder hvor tidevannet har stor innvirkning på saltnivåene, for eksempel i og omkring Lagstrømmen (kanal mellom Nævestadfjorden og Sandnesfjorden) utenfor Storelva i Holt. På grunn av variasjonen i konsentrasjoner og vandringshastigheter, knyttet til daglig variasjoner i vannføring og havmiljø og til timesvise variasjoner i tidevann, er det ingen enkle sammenhenger mellom dose og respons for et gitt sted i fjorden. Vi har derfor valgt å utvikle dynamiske modeller hvor målet er å kunne predikere aluminiumspåslag på gjellene, fra elv til hav, for den enkelte smolt. Slike modeller kan også brukes til å estimere år til år variasjon i gjellealuminiumsnivå. Tilsvarende akkumulering av Al som påvist i Storelva er beskrevet for Fedafjorden, Kvåsvikfjorden, Sandsfjorden, Osterfjorden og Masfjorden. Et fremtidig mål er å kunne bruke kunnskap innhentet i Storelva til å estimere betydningen av estuarine blandsoner for laksebestandene i andre fjorder som mottar Al fra elver. Hvis antall smolt som når havet for eksempel reduseres med 50 % på grunn av Al i brakkvann, vil dette ha en proporsjonal påvirkning av innsiget av voksen laks, og dermed bidra til at gytebestandsmål satt for det enkelte vassdraget ikke nås. Mens påvirkningsfaktorer i ferskvann ofte er elvespesifikke, vil effekter av forurengning i en fjord påvirke alle bestander som renner ut i fjorden uavhengig av om det enkelte vassdraget er forurengningspåvirket eller ikke.

Akkumuleringsrater, og til dels elimineringsrater, er beskrevet i flere forsøk (Kroglund mfl. 2007; Teien mfl. 2006). For å identifisere akkumulering og elimineringsrater for Al på gjeller

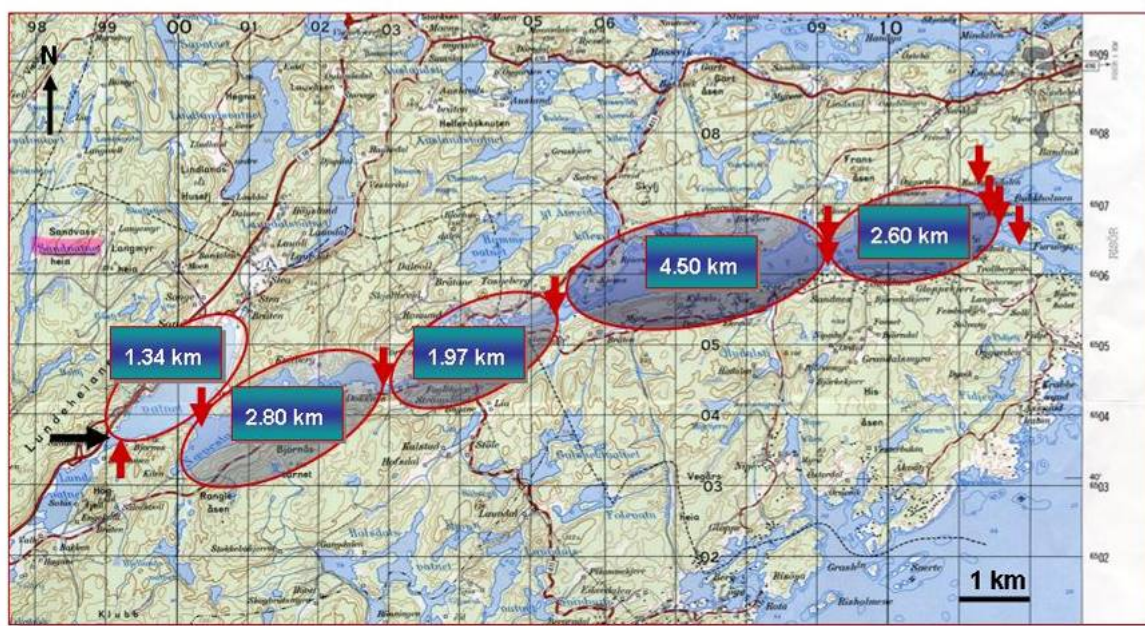
hos smolt ved forskjellige saltnivå ble det i Storelva i 2007 og 2008 utført stampeforsøk på land parallelt med at utvandrende smolt følges ut fjordsystemet (Kroglund mfl. 2011b; 2011c). Den totale akkumuleringen av gjellealuminium på utvandrende smolt kan derfor beskrives som en dynamisk prosess med to hovedkomponenter: a) utgangsnivå som smolten har før og under utvandring av elva (i rent ferskvann) og b) akkumulering under vandring ut gjennom den estuarine blandsonen til sjøvann. For å kunne modellere smoltens gjellealuminiumsnivåer trenger vi derfor informasjon om oppholdstider for smolten i forskjellige soner, og om likevektsnivåer for gjellealuminium ved forskjellige saliniteter. Videre trenger vi informasjon om tiden det tar før likevekten mellom Al på gjellene og i miljøet etableres, dvs. akkumulering og elimineringsrater.

## 2 Områdebeskrivelse

Storelva ved Holt i Aust-Agder munner ut i Songevatn ved Lundestrømmen (**Figur 1**; svart pil). Videre så munner Songevatn ut i Nævestadfjorden. Disse to "innsjø"-bassengene er forbundet med et 230 m bredt sund uten noen terskel, det vil si at vanndybder i sundet er 40–45 m. For undersøkelsene i Storelva har det vært viktig å få fastslått hvilke forhold som bestemmer saltvannstilførselen til og saltinnholdet i Songevann og Nævestadfjorden (Tjomsland og Kroglund 2010). I generelle trekk er det konkludert med at sjøvann har liten inntrenging i disse indre bassengene når vannføringen i Storelva er høy ( $>30 \text{ m}^3 \text{ sek}^{-1}$ ), mens sjøvann trenger inn med flo/fjære og havklima/vind når vannføringen er lav ( $<20 \text{ m}^3 \text{ sek}^{-1}$ ). I praksis innebærer dette at overflatevannet i Songevatn og Nævestadfjorden blir ferskere når vannføringen er høy og salttere når den er lav.

Nævestadfjorden står videre i forbindelse med Sandnesfjorden gjennom Lagstrømmen. Lagstrømmen er en ca. 1,1 km lang "kanal", hvor bredden varierer mellom 20 og 100 m. Lagstrømmen har et minimumsdyp på ca. 4 m. Sandnesfjorden ligger på utsiden av Lagstrømmen. Dette er en langstrakt fjordarm med største dyp på 65–70 m. I den ytre delen, rett sør for Risør, er det et grunnere område med flere øyer. Den dypeste forbindelsen ut til kystvannet ligger på sørsiden av øyene og har et terskeldyp på 25–30 m.

Mer detaljerte opplysninger om fysiske og kjemiske forhold i den estuarine blandsonen ut fra Storelva finnes i Kroglund mfl. (2011c).



**Figur 1.** Brakkvannssonen mellom utløpet av Storelva (svart pil) og ytre del av Sandnesfjorden. Fjordsystemet er delt inn i fem soner (angitt ved ellipser) som forventes å ha relativt like salinitetsnivå for en gitt situasjon (tidevannsfase, mengde ferskvann ut fra Storelva etc.). Fra venstre ligger Songevatnet (lengde 1,34 km), Nævestadfjorden (2,80 km), Lagstrømmen (1,97 km), indre Sandnesfjorden (4,50 km) og ytre Sandnesfjorden (2,60 km).

### 3 Materialer og metoder

En omfattende fysisk og kjemisk karakterisering av elv og fjordvann har tidligere blitt utført i Storelva med utløpsområde (Kroglund mfl. 2011a-g; se spesielt vedlegg H i Kroglund mfl. 2011d), og vi gir her kun en kort oversikt over de forskjellige variablene som er viktig for å tolke effekter av Al på smolt i brakkvann. Vannkjemi, vannføring, temperatur og tidspunktene for smoltutvandring er registrert. Variasjonen i salinitet [ppt=promille] i tid og rom fra Songevatn til Sandnesfjorden, er beskrevet gjennom målinger i hele utvandringssesongen for smolt (Kroglund mfl. 2011a-e) og ved simuleringer hvor strøm og saltholdighet i Sandnesfjorden er modellert (Tjomsland og Kroglund, 2010). Det er utført en analyse av hva som skjer med Al fra ferskvann til saltvann; *Total-Al* [ $\mu\text{g L}^{-1}$ ] inn i brakkvannssonen, mobilisering og transformering av Al i estuariet med spesielt fokus på den bioreaktive tilstandsformen  $0,45 \mu\text{m Ali}$  [ $\mu\text{g L}^{-1}$ ], kalt *Ali.45* i den videre modelleringen (Teien mfl. 2006). Videre er det gjort målinger på gjellealuminium [ $\mu\text{g/g}$ ] i forhold til metallkonsentrasjon og former i brakkvann, og i forhold til salinitet. I tillegg er det utført forsøk på hvor raskt gjellealuminium (*Gjelle-Al*) akkumuleres og elimineres ved forskjellige salinitetsnivåer og i forhold til hvordan saltnivået ble etablert.

De ble også foretatt telemetriundersøkelser av smoltens utvandringssatferd i 2007 og 2008 ved merking av 120 laksesmolt fra Storelva med små akustiske sendere (diameter 7,3 mm, lengde 18 mm, vekt i luft 1,9 g og vekt i vann 1,2 g, THELMA, Norge; Kroglund mfl. 2011c). All smolt ble fanget i et smolthjul der elva fra Lundevann renner inn i Songevann, og etter fangst ble smolten oppbevart i bur ute i elva i 0-4 dager før merking. Før inngrepet ble fisken plassert i 3 minutter i et bedøvelsesbad (2 phenoxy-ethanol EEC No 204 589-7, ca. 0,7 ml per l vann). Senderne ble ført inn gjennom et ca. 10 mm langt snitt i bakre del av bukhulen på høyre side, ca. 5 mm fra midtlinjen. Operasjonssåret ble lukket med to separate sting med spunnet permanent silke (Etichon 5/0). Etter at operasjonen var ferdig, ble fisken satt tilbake i oppbevaringskaret i 1-36 timer før den ble satt ut i elva. All fisk våknet raskt etter operasjonen og var i fin form ved utsetting. For å beregne smoltens oppholdstid i hver sone ble VR2-lyttestasjoner (VEMCO Inc., Canada) utplassert som registrerte all passerende, merket smolt i overgangene mellom sonene. I tillegg ble lyttestasjoner plassert ved inngangen til første sone og ytterst i fjorden. Lyttebøyene ble festet ca. 3 m under overflaten i Songevann, 2 m under overflaten i Nævestadfjorden og mellom 3-4 m dyp i Sandnesfjorden. Dybden ble bestemt etter hvor eksponert for sjø de ulike utleggene var. Smoltens vandringssmønster vil bli grovinndelt i to kategorier; *Gå-smolt* som kommer seg relativt raskt gjennom de indre sonene med mindre gunstige forhold og som blir registrert forbi siste stasjon, og *Stå-smolt* som stanser opp i de indre sonene og som aldri blir registrert helt ut fjordsystemet.

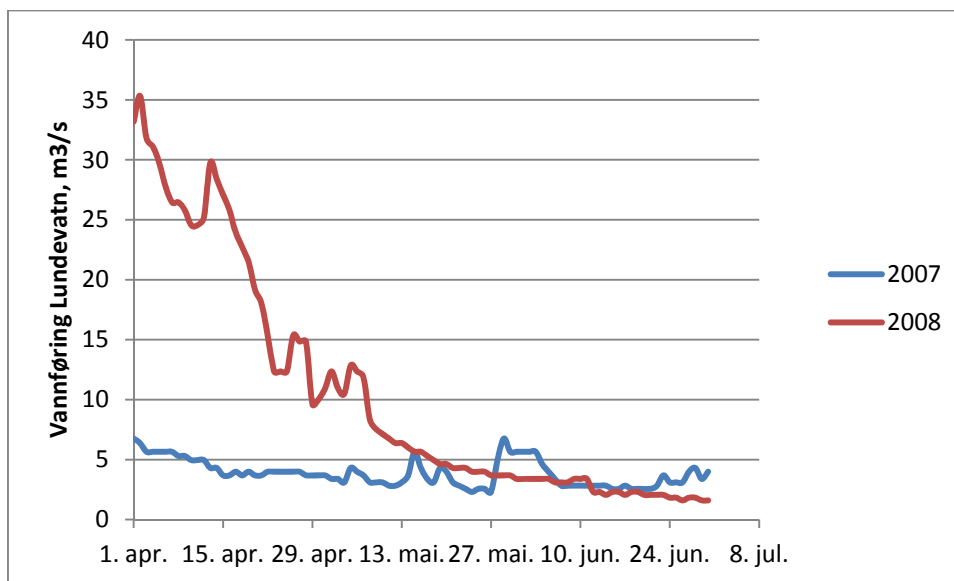
Målsetningen for modelleringen var å beregne *Gjelle-Al* nivået på gjellene hos utvandrende laksesmolt fra Storelva gjennom den estuarine blandsonen – Songevann, Nævestadfjorden og Sandnesfjorden, samt besvare om forventede *Gjelle-Al* nivåene kan forklare individuell variasjon i utvandring. Fra salinitetssimuleringene, og data på konsentrasjonen av *Total-Al* i ferskvann, har vi i denne undersøkelsen modellert konsentrasjonen av bioreaktivt Al (*Ali.45*) i brakkvann. Videre har vi modellert forventet likevektsnivå for *Gjelle-Al* basert på *Salinitet* og *Ali.45*. Fra telemetriregistreringene (vandringshastigheter og oppholdstider) har vi så predikert forventet *Gjelle-Al* nivå for smolten i de forskjellige sonene i fjordsystemet. For flere av disse modellene forventes ikke-lineære sammenhenger så vi har valgt å benytte en GAM (Generalisert Additiv Modell), se for eksempel Wood (2006). En GAM ligner på en GLM (Generalisert Lineær Modell) men med ett viktig unntak; formen på sammenhengen mellom respons og forklaringsvariabel er ikke spesifisert ved en eksplisitt funksjon, men bruker isteden ikke-parametriske glattingsfunksjoner (for eksempel splines). Denne tilnærmingen er spesielt nyttig for sammenhenger som har kompliserte former, slik som kuppelformede kurver.

All modellering og annen statistisk analyse har blitt utført med den statistiske programvaren R (R Development Core Team, 2009).

## 4 Resultater

### 4.1 Salinitet

Vi har begrenset informasjon om de faktiske salinitetsforholdene i de forskjellige delene av fjordsystemet under smoltutvandringen. Kontinuerlig logging ble først igangsatt i 2009 ut fra erfaringer fra de tidligere årene på dynamikk i systemet. På grunn av store fluktuasjoner i mengde ferskvann inn i systemet gjennom en sesong og mellom år (**Figur 2**), og store tidevannsvariasjoner i noen deler av systemet, spesielt Lagstrømmen, er vi derfor avhengige av å simulere salinitetsnivåer i tid og rom for å kunne modellere fra salinitet til bioreaktivt Al og gjel-lealuminium de årene vi har vandringsdata fra.

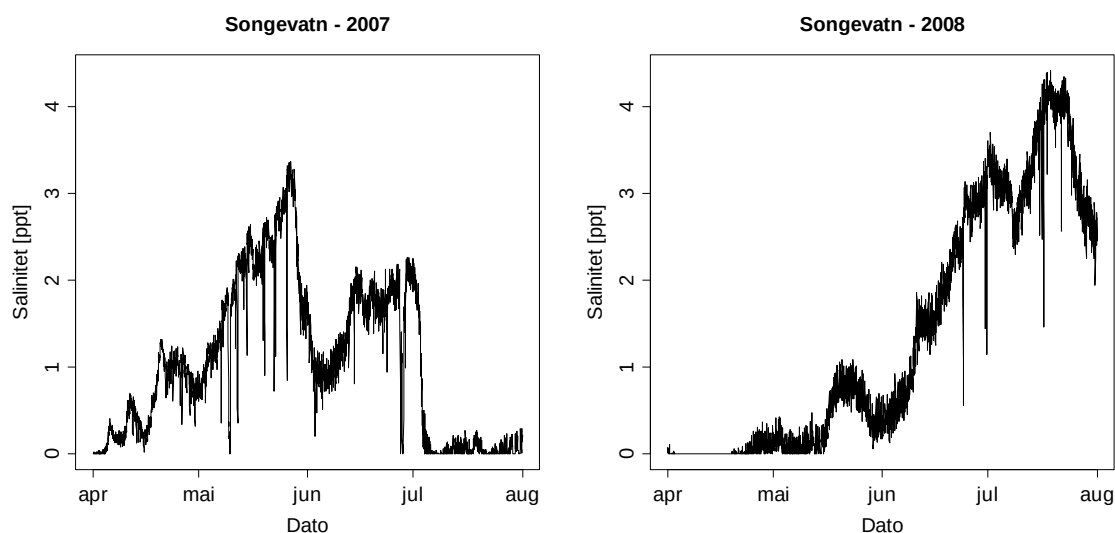


**Figur 2.** Vannføring for 2007 og 2008 i Lundevatn, rett ovenfor utløpet til Storelva i Songevatn.

I denne modelleringen brukes kun de simulerte salinitetsverdiene for overflatelaget, siden vi ikke har informasjon om smoltens vertikale bevegelser. Variabelen *Salinitet* oppgis som konsentrasjon [ppt] og tidsoppløsningen er en time. Simuleringene av salinitet for 2007 og 2008 er gjort for perioden 1. april kl. 00:00 til 31. juli kl. 23:00.

### 4.1.1 Songevatn

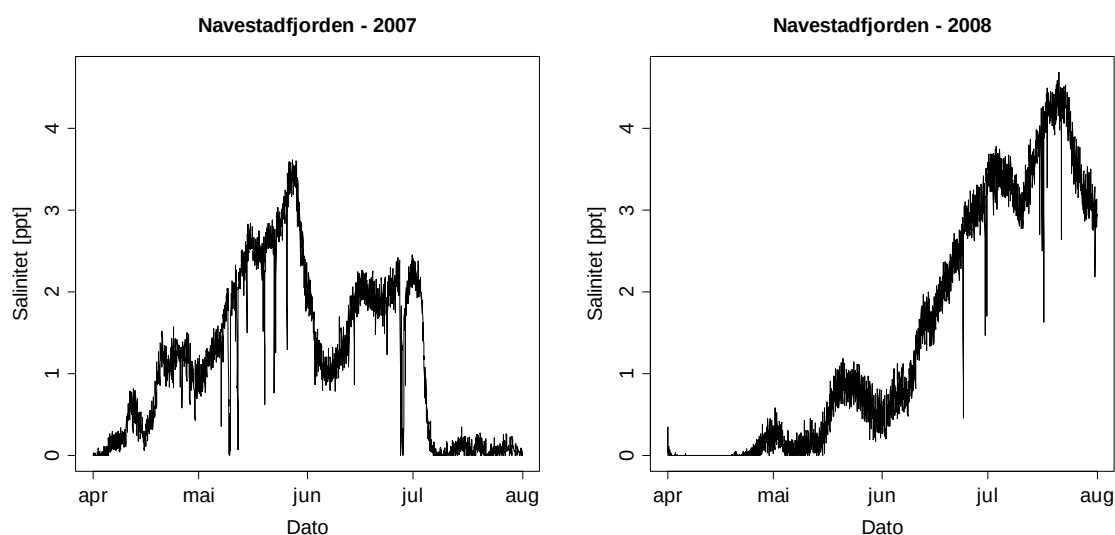
Vi ser store forskjeller i sesongutviklingen for simulerte salinitetsverdier mellom 2007 og 2008 (**Figur 3**). Spesielt ser vi resultatet av mer ferskvann inn i Songevatn i april og mai 2008, noe som ga mye lavere salinitet i denne perioden enn året før.



**Figur 3.** Salinitetssimuleringer for Songevatn fra 1. april til 31. juli for henholdsvis 2007 (venstre panel) og 2008 (høyre panel).

### 4.1.2 Nævestadfjorden

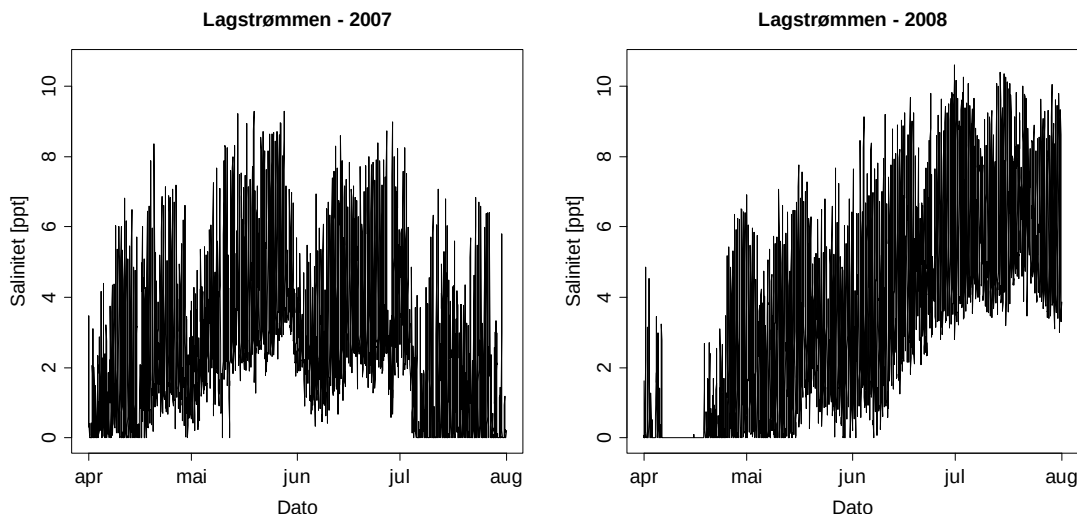
Utviklingene i salinitet i Nævestadfjorden i de to årene var svært like de i Songevatn (**Figur 4**). Som en illustrasjon på samvariasjonen så er krysskorrelasjonene (time mot time) på 0,97 for 2007 og 0,99 for 2008, det vil si svært like simulerte salinitetsutviklinger i de to indre sonene. Dette stemmer godt overens med det som ble observert i kontinuerlige målinger fra 2009.



**Figur 4.** Salinitetssimuleringer for Nævestadfjorden fra 1. april til 31. juli for henholdsvis 2007 (venstre panel) og 2008 (høyre panel).

### 4.1.3 Lagstrømmen

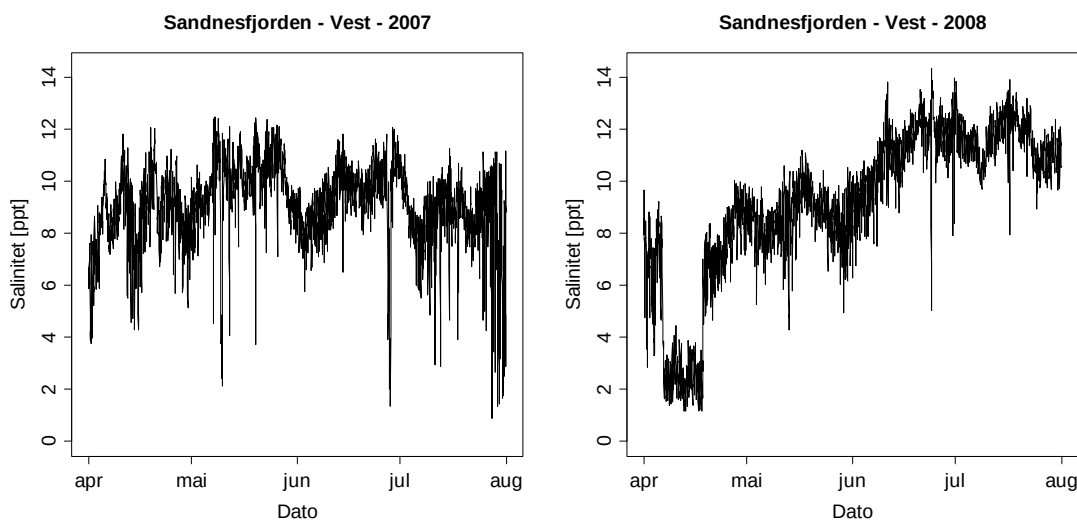
Vi ser fortsatt noe av den samme storskala dynamikken gjennom sesongene for Lagstrømmen (**Figur 5**) som vi ser innenfor i Nævestadfjorden, men med mye større tidevannsflyktuasjoner i salinitet. Krysskorrelasjonene mellom Laget og Nævestadfjorden var henholdsvis 0,59 for 2007 og 0,72 for 2008. Lavere verdier for krysskorrelasjonen betyr at de to tidsseriene for salinitet ikke samvarierer like mye.



**Figur 5.** Salinitetssimuleringer for Lagstrømmen fra 1. april til 31. juli for henholdsvis 2007 (venstre panel) og 2008 (høyre panel).

### 4.1.4 Sandnesfjorden – Vest

I den indre (vestre) delen av Sandnesfjorden begynner inntrykket av dynamikken i salinitet å bli litt annerledes for 2007 (**Figur 6**); det er ikke så lett å kjenne igjen de større fluktuasjonene lenger. Krysskorrelasjonene mellom nabosoner (Sandnesfjorden - Vest og Lagstrømmen) var nå 0,49. Variasjonene i ferskvannsinnsig hadde ikke lenger like stor betydning for variasjon i salinitet, selv om vi fortsatt ser signaler fra mye ferskvann i systemet noen dager i første halvdel av mai og mot slutten av juni i 2007. For 2008 ser vi fortsatt effekten av vårflommen i april, med svært lave salinitetsverdier også innerst i Sandnesfjorden.

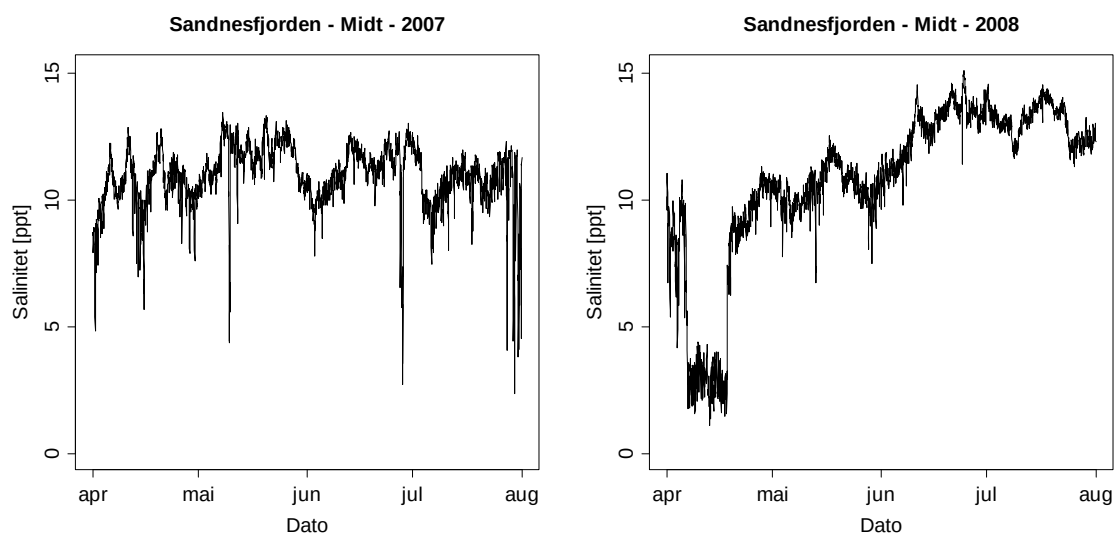


**Figur 6.** Salinitetssimuleringer for Sandnesfjorden - Vest fra 1. april til 31. juli for henholdsvis 2007 (venstre panel) og 2008 (høyre panel).



### 4.1.5 Sandnesfjorden – Midt

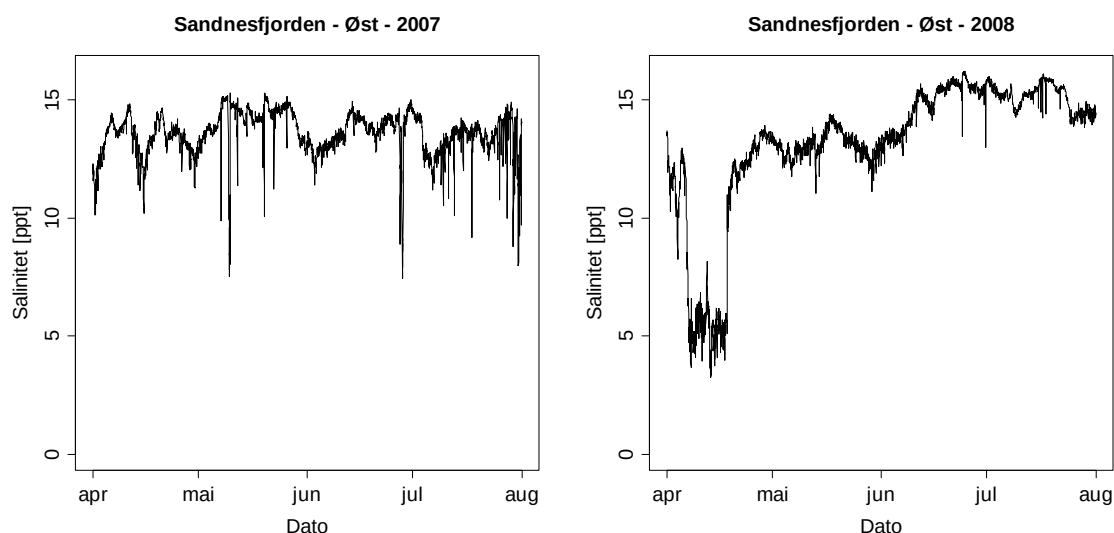
Videre utover Sandnesfjorden ser vi som forventet en stadig høyere salinitet og mindre tidevannsfluktuasjoner, mens vi fortsatt ser igjen noen av de største trendene, spesielt episoden med lave verdier for *Salinitet* i april 2008 (**Figur 7**).



**Figur 7.** Salinitetssimuleringer for Sandnesfjorden - Midt fra 1. april til 31. juli for henholdsvis 2007 (venstre panel) og 2008 (høyre panel).

### 4.1.6 Sandnesfjorden – Øst

Vi ser her den samme utvikling i salinitet for ytre (østre) del av Sandnesfjorden som for midtre del (**Figur 8**). Krysskorrelasjoner var på henholdsvis 0,89 og 0,98.



**Figur 8.** Salinitetssimuleringer for Sandnesfjorden - Midt fra 1. april til 31. juli for henholdsvis 2007 (venstre panel) og 2008 (høyre panel).

## 4.2 Aluminium i brakkvann

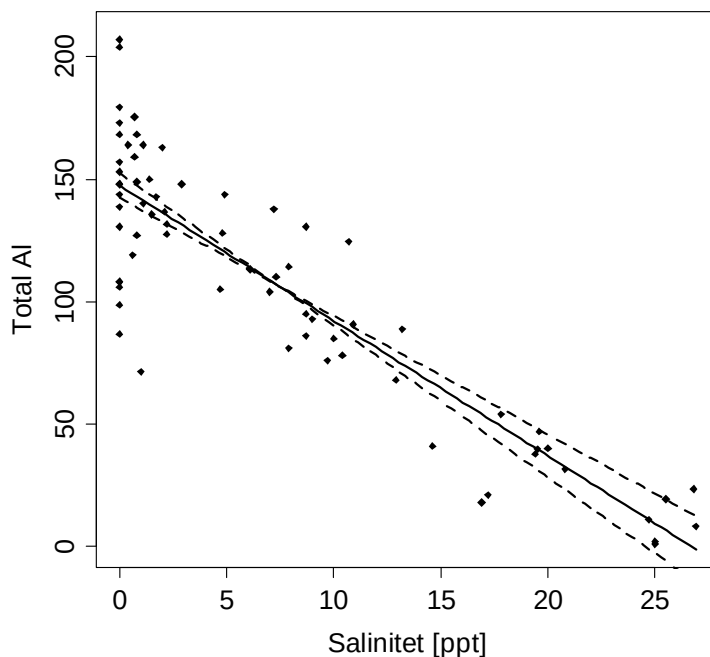
Kilden til aluminium i brakkvann er ferskvannet. Innblanding av saltvann i vann fra Storelva resulterer dermed i en fortykning av *Total-Al*, slik at konsentrasjonen av *Total-Al* i brakkvann avtar lineært med økende saltholdighet (Kroglund mfl. 2011d). Videre viste forsøksresultatene at reaktiviteten til Al-tilstandsformene endres etter innblanding av sjøvann slik at andelen bioreaktiv Al (*Ali.45*) av *Total-Al* øker i brakkvannet. Konsentrasjonen av *Ali.45* økte dermed først med økende innblanding av sjøvann før uttynningseffekten begynner å dominere og *Ali.45* konsentrasjonen avtok igjen.

### 4.2.1 Modell for Gjelle-Al nivå

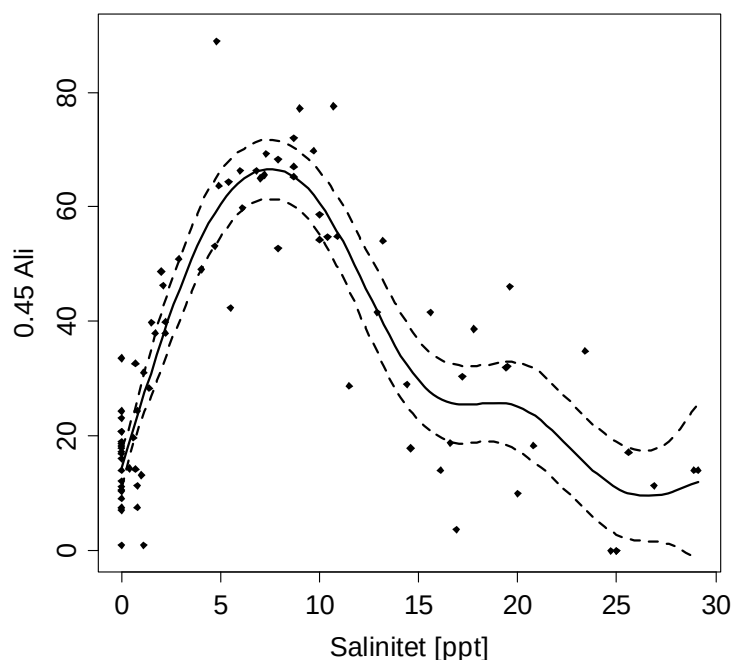
Som en illustrasjon på uttynningseffekten har vi vist konsentrasjonen av *Total-Al* mot *Salinitet* (**Figur 9**). Vi ser en relativt stor variasjon i konsentrasjonen av *Total-Al* for de laveste salinitetsverdiene (som skyldes variasjon i Al-konsentrasjon i ferskvann), mens for salinitet fra rundt 1 beskriver sammenhengen godt ved den lineære kurven. Modellen forklarer 78,5 % av variasjonen i *Total-Al* konsentrasjon. Dersom konsentrasjon i ferskvann inkluderes som variabel forbedres forklaringsgraden.

Modellen for konsentrasjon av bioreaktiv Al *Ali.45* fra *Salinitet* forventes dermed å ha en ikke-lineær form slik at vi har brukt en generalisert additiv modell (GAM; se seksjon 3.2). Modellen, illustrert i **Figur 10**, har en  $R^2$  på 79 % og en tilnærmet signifikans for den ikke-lineære glattingsfunksjonen med  $P < 0,0001$ . For ferskvann (*Salinitet* = 0) predikerer modellen en 0,45 Ali konsentrasjon på  $14,5 \mu\text{g L}^{-1}$ . Konsentrasjonen av 0,45 Ali stiger fram til en salinitet på rundt 7-8, før den så avtar med økende salinitet. Detaljene for denne modellen er gitt i **Tabell V1** (Vedlegg 1).

Konsentrasjonen av *Total-Al* fra ferskvann og inn i estuariet kan variere relativt mye (**Figur 9**). En GAM for konsentrasjon av bioreaktivt Al *Ali.45* fra både *Salinitet* og *Total-Al* gir dermed den forventede forbedring av  $R^2$  til 84 % (**Tabell V2**).



**Figur 9.** Uttynningseffekten av *Total-Al* ved innblanding av sjøvann i ferskvann fra Storelva. Observasjonene er gitt ved de svarte punktene, forventet konsentrasjon total Al er angitt ved heltrukken linje, mens de stiplede linjene angir  $\pm 2$  standardfeil.

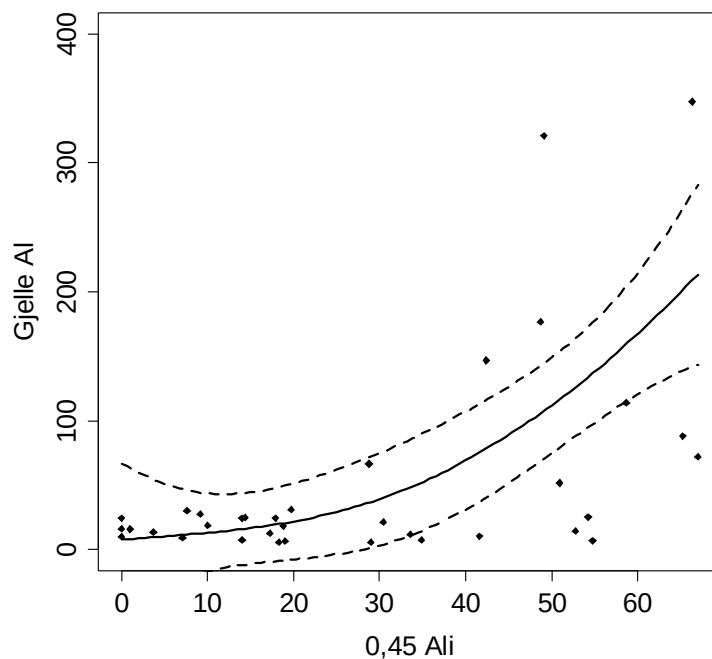


**Figur 10.** Modell (GAM) for konsentrasjon av bioreaktivt Al ( $0,45 \mu\text{m Ali}$  [ $\mu\text{g L}^{-1}$ ]) basert på saliniteten i brakkvannet. Observasjonene er gitt ved punktene, forventet konsentrasjon  $0,45 \text{ Ali}$  er angitt ved heltrukken linje, mens de stiplede linjene angir  $\pm 2$  standardfeil.

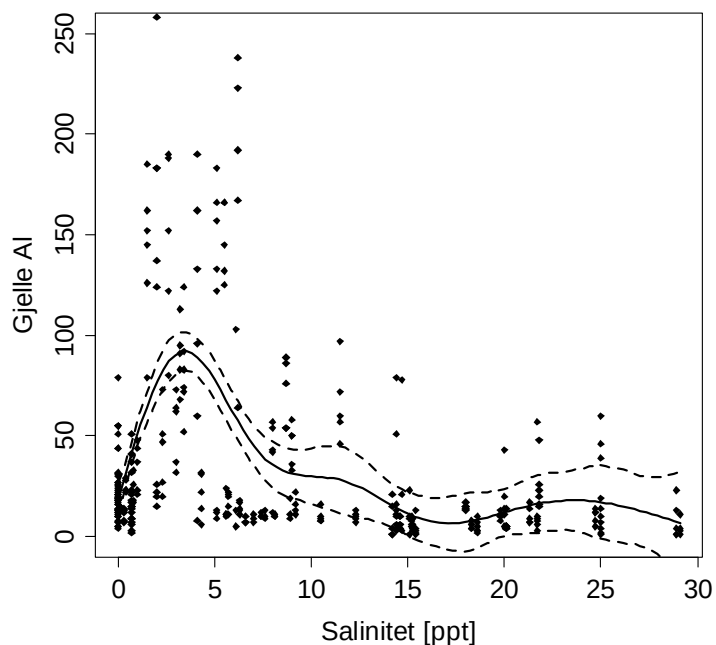
Neste steg blir så å modellere sammenhengen mellom *Ali.45* og *Gjelle-Al* (**Figur 11**). Vi ser av figuren at denne modellen ikke er like god; for de høyere konsentrasjonene av *Ali.45* ser vi en svært stor spredning i *Gjelle-Al* nivå. For *Ali.45* verdier under 20 (som nesten tilsvarer nivået i ferskvann) tilsier modellen at det nesten ikke skal finnes *Gjelle-Al*. Denne modellen har  $R^2$  lik 36 % og en tilnærmet signifikans for den ikke-lineære glattingsfunksjonen med  $P = 0,0005$  (**Tabell V3**). Mulige usikkerhetsskilder vurderes nærmere i diskusjonen (**Kap. 5**), men sannsynligvis skyldes mye av dette en tidsforsinkelse i akkumuleringen / elimineringen av *Gjelle-Al* som, sammen med store tidevannsfluktuasjoner i *Salinitet* (og dermed *Ali.45*) i noen soner, kan gi et misforhold mellom målt *Gjelle-Al* nivå og *Salinitet* / *Ali.45* konsentrasjon.

Konsentrasjonen av bioreaktivt *Ali.45* er vanskelig å måle i felt, slik at en modell som kan predikere en smolts påslag av *Gjelle-Al* direkte fra *Salinitet* vil være svært nyttig. **Figur 12** viser tydelig den store spredningen i *Gjelle-Al* verdier, spesielt for *Salinitet* mellom 2 og 6, som gir dårlig forklaringsgrad for modellen ( $R^2 = 32 \%$ ,  $P < 0,0001$ ; **Tabell V4**). Dette er salinitetsnivåer som passer godt med de som er simulert for Lagstrømmen hvor vi har svært store tidevannsfluktuasjoner i *Salinitet*. Den generelle formen på kurven er imidlertid som forventet, med et relativt lavt nivå for *Gjelle-Al* i ferskvann (skjæringspunktet for modellen), så en markant økning i *Gjelle-Al* fram til saltnivåer på 4-5 ppt, før nivåene igjen avtar med økende *Salinitet* til *Gjelle-Al* er tilbake på utgangsnivået for *Salinitet* rundt 10 ppt.

Til tross for store utvalg ( $n = 347$ ) og svært signifikante sammenhenger er det fortsatt mye av variasjonen vi ikke klarer å forklare med modellene. Denne "uforklarte" støyen kan for eksempel skyldes tidevannsfluktuasjoner i salinitet, variabel eksponeringstid for et gitt salinitetsnivå, variasjon i hvor mye totalt aluminium som kommer inn i systemet og hvilket vann fisken faktisk opplevde (smolten i bur kan velge ulike dyp og dermed vannkjemi).



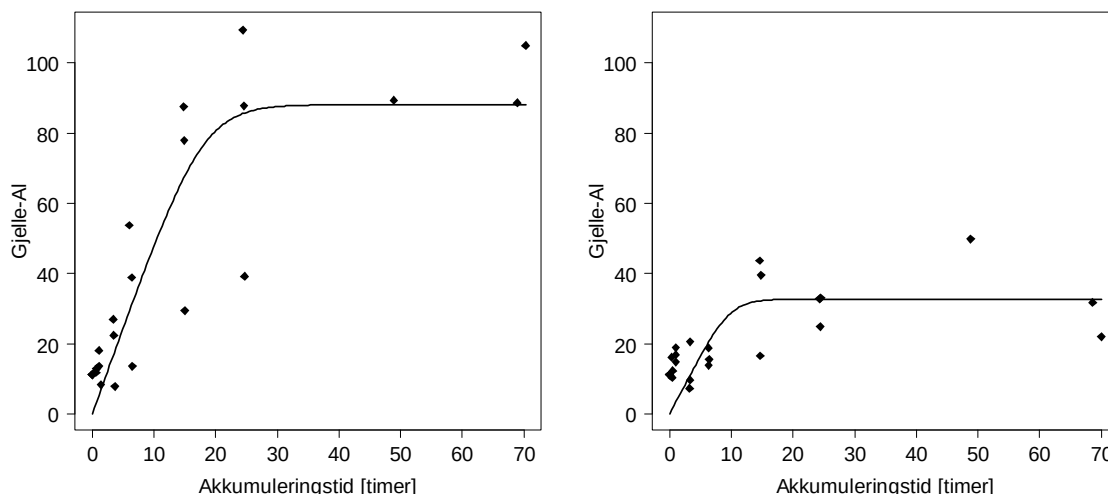
**Figur 11.** Modell (GAM) for Gjelle-Al [ $\mu\text{g/g}$ ] fra konsentrasjon av bioreaktivt Al ( $0,45 \mu\text{m Ali}$  [ $\mu\text{g Al}\cdot\text{L}^{-1}$ ]). Observasjonene er gitt ved punktene, forventet Gjelle-Al nivå er angitt ved heltrukken linje, mens de stiplede linjene angir  $\pm 2$  standardfeil.



**Figur 12.** Modell (GAM) for Gjelle-Al [ $\mu\text{g/g}$ ] fra salinitet. Observasjonene er gitt ved punktene, forventet Gjelle-Al nivå er angitt ved heltrukken linje, mens de stiplede linjene angir  $\pm 2$  standardfeil.

## 4.2.2 Modell for akkumuleringshastighet for *Gjelle-AI*

Modellene i **Figur 13** tyder på at vi har en gradvis akkumulering av *Gjelle-AI* før akkumuleringen så flater ut. Datagrunnlaget er ikke helt optimalt, blant annet har vannet forskjellige "lagringstider", så vi bør ikke legge for mye vekt på det modellerte utflatningsnivået. Men denne modelleringen viser uansett at det er en tidsforsinkelse i akkumuleringen av *Gjelle-AI* for et gitt miljø, slik at vi ikke kan forvente så gode sammenhenger mellom samtidige målinger av salinitet og *Gjelle-AI*, spesielt ikke i situasjoner med store tidevannsfluktuasjoner.



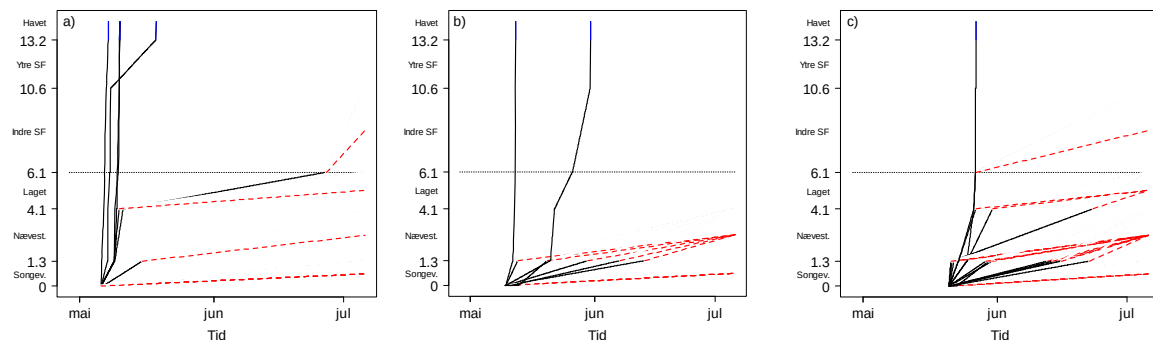
**Figur 13.** Asymptotisk modell for akkumuleringshastigheten for *Gjelle-AI* ved konstant salinitet. Venstre panel angir akkumuleringen til salinitet 4 ( $R^2=77\%$ ), mens høyre panel angir akkumuleringen til salinitet 8 ( $R^2=35\%$ ).

## 4.3 Telemetridata

For å illustrere villsmoltens utvandring gjennom fjordsystemet er oppholdstiden i hver sone plottet (**Figur 14** og **15**). Smolten ble gitt fortløpende ID-koder under merking, fra 1 til 60 for 2007 og fra 1 til 100 for 2008.

**Figur 14** angir utvandringene i 2007 som er fordelt på tre plott etter tidspunkt for passering inn i Songevatn. Øvre, venstre panel (**Figur 14a**) viser smolt som i 2007 vandret inn i Songevatn mellom 5. mai kl. 20:00 og 6. mai kl. 08:00 ( $n=10$ ; kode 1-10). Merk at noen smolt har svært lik utvandringshistorie slik at linjene ligger tilnærmet oppå hverandre. Vi ser her en tydelig todeling for smoltens vandring (Gå vs. Stå); en gruppe på fire smolt (Gå-smolt; 40 %) kom seg raskt gjennom de indre sonene med de mindre gunstige forholdene (høyere konsentrasjoner med bioreaktivt Al) og ble registrert forbi siste stasjon. De resterende seks smoltene fra første periode (Stå-smolt; 60 %) stanset opp i en av indre sonene og ble aldri registrert helt ut fjordsystemet. Neste pulje med smolt inn i Songevatn kom mellom 9. mai kl. 21:00 og 13. mai kl. 00:00 (**Figur 14b**;  $n=10$ ; kode 11-17 og 19-21). I denne puljen var det to smolt (kode 12 og 13) som ikke ble registrert inn i sonene 3 og 4, men som ble registrert forbi den siste lyttestasjonen og dermed kan kategoriseres som Gå-smolt. Disse to smoltene er tegnet gjennom hele fjordsystemet i figuren, men med interpolerte linjer gjennom Sandnesfjorden. Ingen av de resterende åtte smoltene ble registrert ut av Nævestadfjorden (Stå-smolt; 80 %). Siste pulje i 2007 vandret inn i Songevatn mellom 20. mai kl. 20:00 og 22. mai kl. 15:00 (**Figur 14c**;  $n=19$ ; kode 22-30 og 51-60). Av disse smoltene var det kun én som ble registrert forbi alle lyttestasjonene (Gå; 5 %), mens de resterende 18 stanset opp lenger inn i fjordsystemet (Stå; 95 %). Vi ser altså en tendens til en avtagende andel Gå-smolt utover i sesongen, og at de som vandret seint gjennom Songevatn hadde svært dårlige sjanser for å komme seg helt ut fjordsystemet.

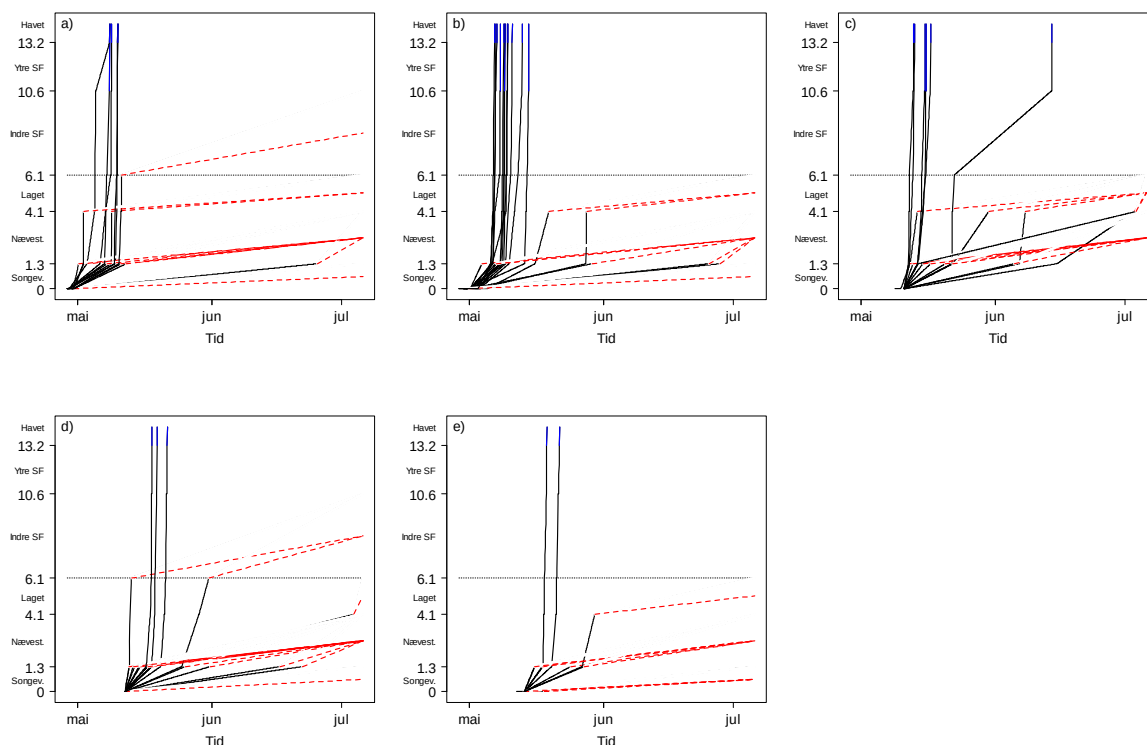
Totalt i 2007 vandret 7 smolt helt ut til havet (Gå; 18 %), mens 32 stanset opp i fjordsystemet (Stå; 82 %).



**Figur 14.** Telemetriobservasjonene for 2007, oppdelt etter tidspunkt for når smolten vandret inn i Songevatn. Y-aksen viser distansen utover i fjordsystemet. a) Smolt med kode 1-10 med passering første lyttestasjon mellom 5.5 kl. 20:00 og 6.5 kl. 08:00; b) Smolt med kode 11-17 og 19-21 ( $n=10$ ) med passering mellom 9.5 kl. 21:00 og 13.5 kl. 00:00; c) Smolt med kode 22-30 og 51-60 ( $n=19$ ) med passering mellom 20.5 kl. 20:00 og 22.5 kl. 15:00. Smolt som ble registrert gjennom hele fjordsystemet (Gå-smolt) er vist med svart heltrukken linje for alle soner og til slutt med en blå linje ut i åpent hav. Smolt som ikke passerte alle lyttestasjonene (Stå-smolt) er vist med en rød stiplet linje for resten av sesongen i den sonen de stanset opp (registreres inn i men ikke ut av sonen). Horisontal svart stiplet linje viser overgangen fra Lagstrømmen til Sandnesfjorden.

Utvandringene i 2008 (**Figur 15**) er fordelt på fem plott etter tidspunkt for passering inn i Songevatn. Øvre, venstre panel (**Figur 15a**) viser smolt som vandret inn i Songevatn mellom 28. april kl. 15:00 og 30. april kl. 03:00 ( $n=15$ ; kode = 1, 5, 7, 10, 11, 14, 15, 18, 21, 22, 30-34). Fem smolt ble registrert helt ut fjordsystemet (Gå-smolt; 33 %) mens 10 stanset opp (Stå-smolt; 67 %). Neste pulje inn i Songevatn kom mellom 30. april kl. 19:00 og 5. mai kl. 01:00 (**Figur 15b**;  $n=21$ ; kode = 2, 6, 12, 13, 16, 23-28, 36-39, 40, 41, 43, 45, 47, 48). Denne puljen omfatter 12 Gå smolt (57 %) mens 9 ikke ble registrert helt ut (Stå; 43 %). Pulje 1 og 2 ble splittet for å unngå for mange linjer i panelene, men det er kort tid mellom disse puljene slik at de kan vurderes samlet. Vi vil da få 47 % Gå-smolt og 53 % Stå-smolt. Pulje nummer tre (**Figur 15c**;  $n=18$ ; kode = 4, 8, 9, 19, 49-53, 57, 58, 60, 64, 68, 70, 78, 84, 99) passerte ut fra elva mellom 10. mai kl. 04:00 og 10. mai kl. 23:00. Blant disse vandret 6 helt til havs (Gå; 33 %) mens 12 ble igjen (Stå; 67 %). Fjerde pulje (**Figur 15d**;  $n=19$ ; kode = 54, 55, 61-63, 67, 69, 71-77, 85, 87, 95, 97, 100) kom inn i Songevatn mellom 11. mai kl. 22:00 og 12. mai kl. 04:00. Her var det bare 3 Gå-smolt (16 %) mens 16 stanset opp (Stå; 84 %). Pulje fem (**Figur 15e**;  $n=12$ ; kode = 59, 79, 80, 81, 82, 83, 86, 88, 93, 94, 96, 98) kom inn i Songevatn mellom 13. mai kl. 15:00 og 18. mai kl. 07:00. Av de 12 smoltene var 2 som Gå-smolt (17 %) mens 10 var Stå-smolt (83 %).

Totalt i 2008 vandret 28 smolt helt ut til havet (Gå; 33 %), mens 57 stanset opp i fjordsystemet (Stå; 67 %). Ellers kan det se ut som om Gå-smolten brukte lenger tid på å vandre gjennom Songevatn i 2008 enn i 2007, men da de først kom til Nævestadfjorden vandret de raskt ut resten av estuariet. Også for 2008 kan det se ut som om andelen Gå-smolt avtok utover i sesongen.

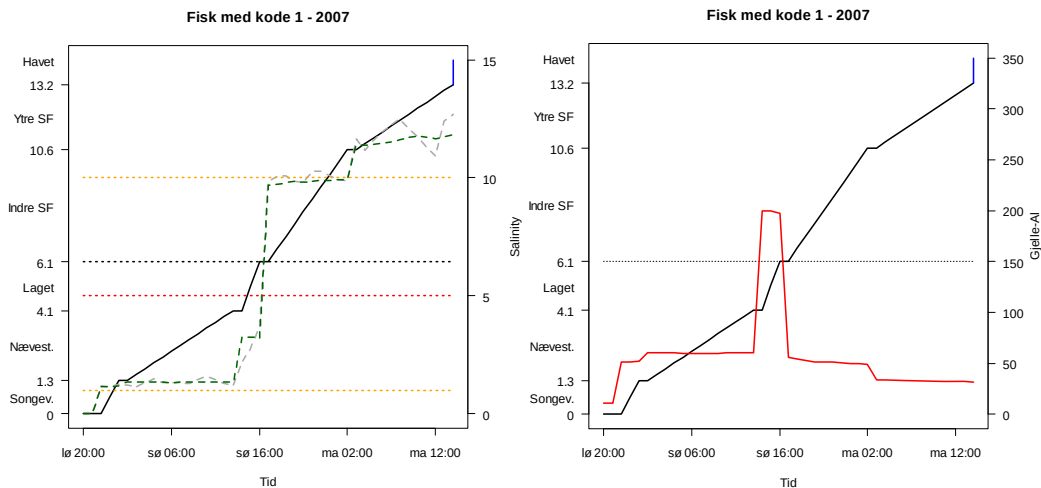


**Figur 15.** Telemetriobservasjonene for 2008, oppdelt etter tidspunkt for når smolten vandret inn i Songevatn. Y-aksen viser distansen utover i fjordsystemet. a) Smolt med passering første lyttestasjon mellom 28.4 kl. 15:00 og 30.4 kl. 03:00; b) Smolt med passering mellom 30.4 kl. 19:00 og 5.5 kl. 01:00; c) Smolt med passering mellom 10.5 kl. 04:00 og 10.5 kl. 23:00; d) Smolt med passering mellom 11.5 kl. 22:00 og 12.5 kl. 04:00; e) Smolt med passering mellom 13.5 kl. 15:00 og 18.5 kl. 07:00. For nærmere forklaring av figuren, se **Figur 14**.

#### 4.4 Utvandring vs. Salinitet og Gjelle-AI

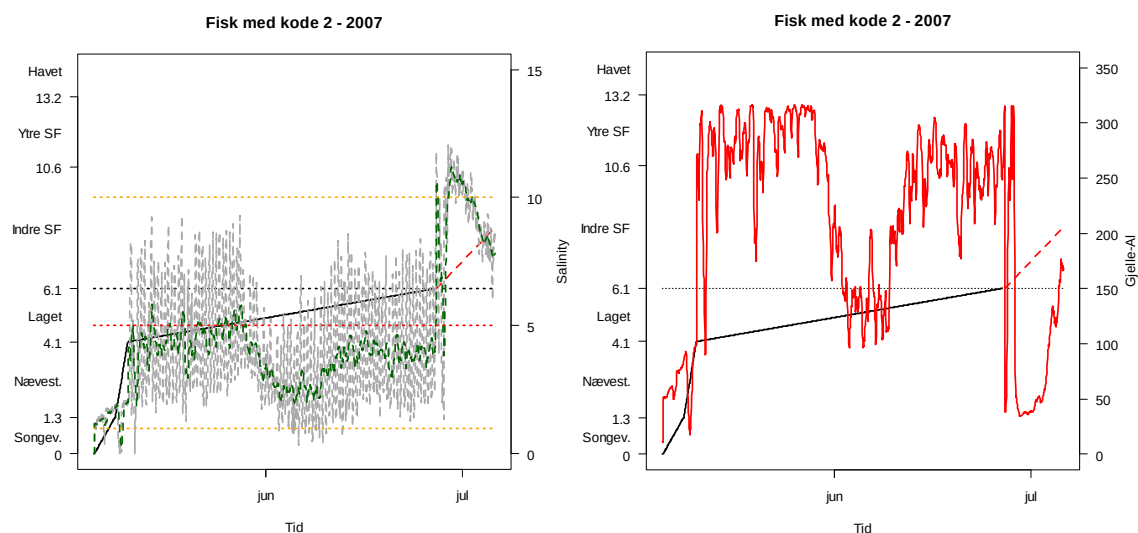
Telemetriobservasjonene av smoltens utvandring kan koples mot salinitetssimuleringene for aktuell sone og tidspunkt, eller mot predikert påslag av *Gjelle-AI* for gitt salinitetsnivå ved bruk av modell (**Figur 12**; **Tabell V4**). Siden det vil bli svært komplisert å korrigere for akkumulering og elimineringsforsinkelser for *Gjelle-AI* på grunn av tidevannsfluktuasjonene, ignorerer dette i denne rapporten.

Sammenhengen mellom utvandringshastighet og salinitet ble først studert visuelt fra plott, som for smolt med kode 1 fra 2007 som er vist som et eksempel (**Figur 16a**). Vi benytter gjennomsnittlig salinitet over 12 timer for å dempe de største utslagene av tidevannsfluktuasjonene, og dermed komme nærmere det salinitetsnivået som muligens korresponderer best med realisert *Gjelle-AI* nivå, siden smolten aldri vil "rekke" å akkumulere de *Gjelle-AI* nivåene som de mer ekstreme salinitetsnivåene tilsier. Smolt nr. 1 i 2007 vandret raskt gjennom de indre sonene og Lagstrømmen, og passerte dermed raskt de mer ugunstige salinitetsnivåene. Modellen viser at den fikk et høyt *Gjelle-AI* nivå i perioden gjennom Lagstrømmen, men dette pågikk kun noen få timer og fisken vandret raskt ut i Sandnesfjorden hvor høyere salinitetsnivåer tilsier at det meste av det reaktive AI ble eliminert fra gjellene igjen (**Figur 16b**).

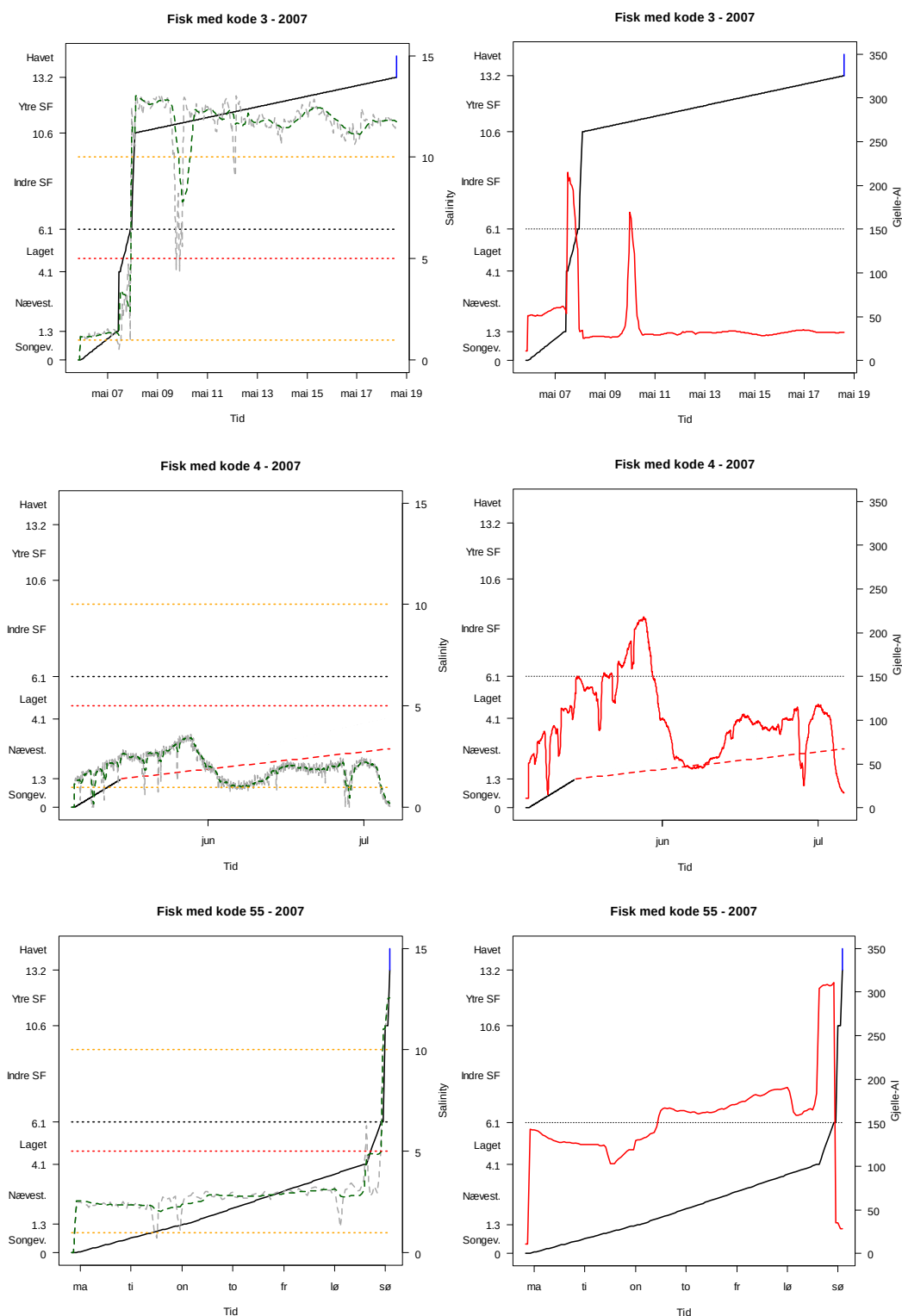


**Figur 16.** Smolt med kode 1 i 2007. Venstre panel (a) viser utvandring mot simulert salinitetsnivå, mens høyre panel (b) viser utvandring mot predikert Gjelle-Al nivå. Venstre vertikal akse viser distansen utover i fjordsystemet. Den hele, svarte linja i panel (a) angir smoltens utvandringshistorie, mens de grå og grønne stiplede linjene angir simulert salinitet for sone og tidsperiode (grå gir samtidig timevis salinitet mens den grønne gir saliniteten midlet over de siste 12 timene). Rød horisontal stiplede linje angir Salinitet lik 5 ppt ("verste" nivå), mens de oransje stiplede linjene gir Salinitet hhv. lik 1 og 10 ppt. I panel (b) er telemetriere registreringene plottet på samme måte som tidligere mens den røde heltrukne linja angir predikert Gjelle-Al for 12 timers midlet salinitet.

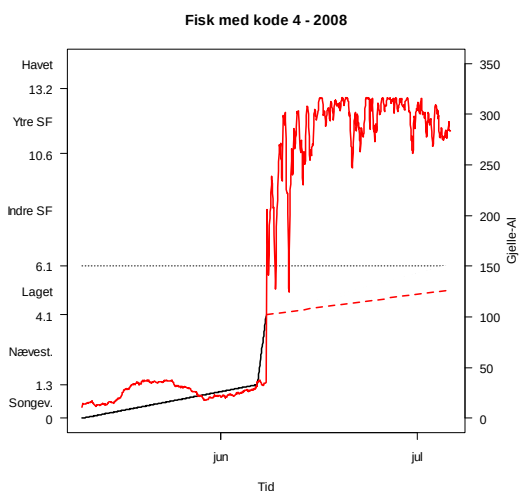
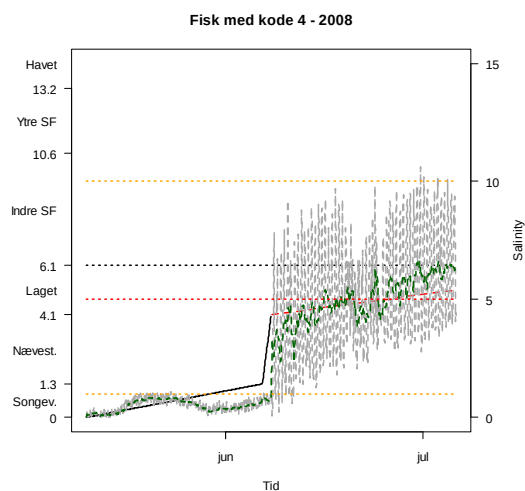
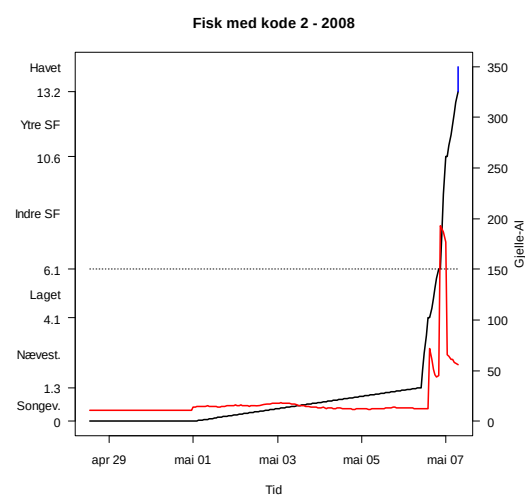
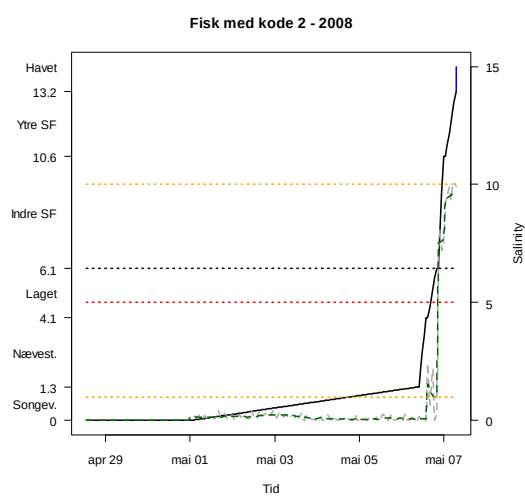
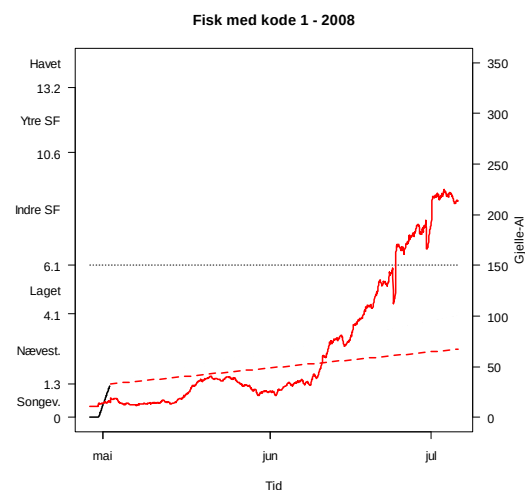
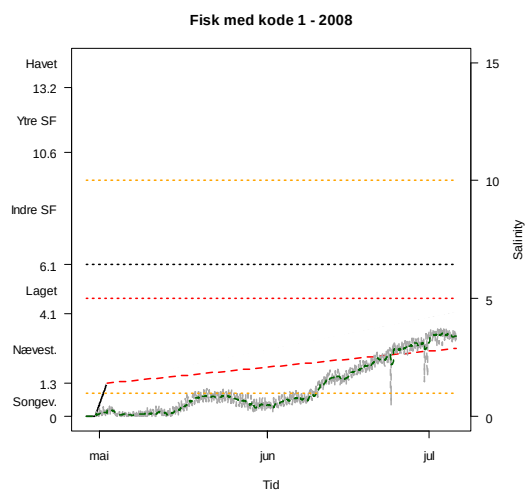
Utvandring mot simulert salinitetsnivå og predikert Gjelle-Al nivå er vist for flere individer i **Figur 17** (2007) og **Figur 18** (2008). Merk at tidsaksen varierer mellom smolt, fra en utvandring i løpet av to dager til smolt som ikke vandret ut av fjordsystemet i det hele tatt i løpet av sesongen. En komplett serie med figurer for alle smolt fra 2007 og et større utvalg fra 2008 er gitt i **Vedlegg 2** (Figur V2-1 og V2-2).

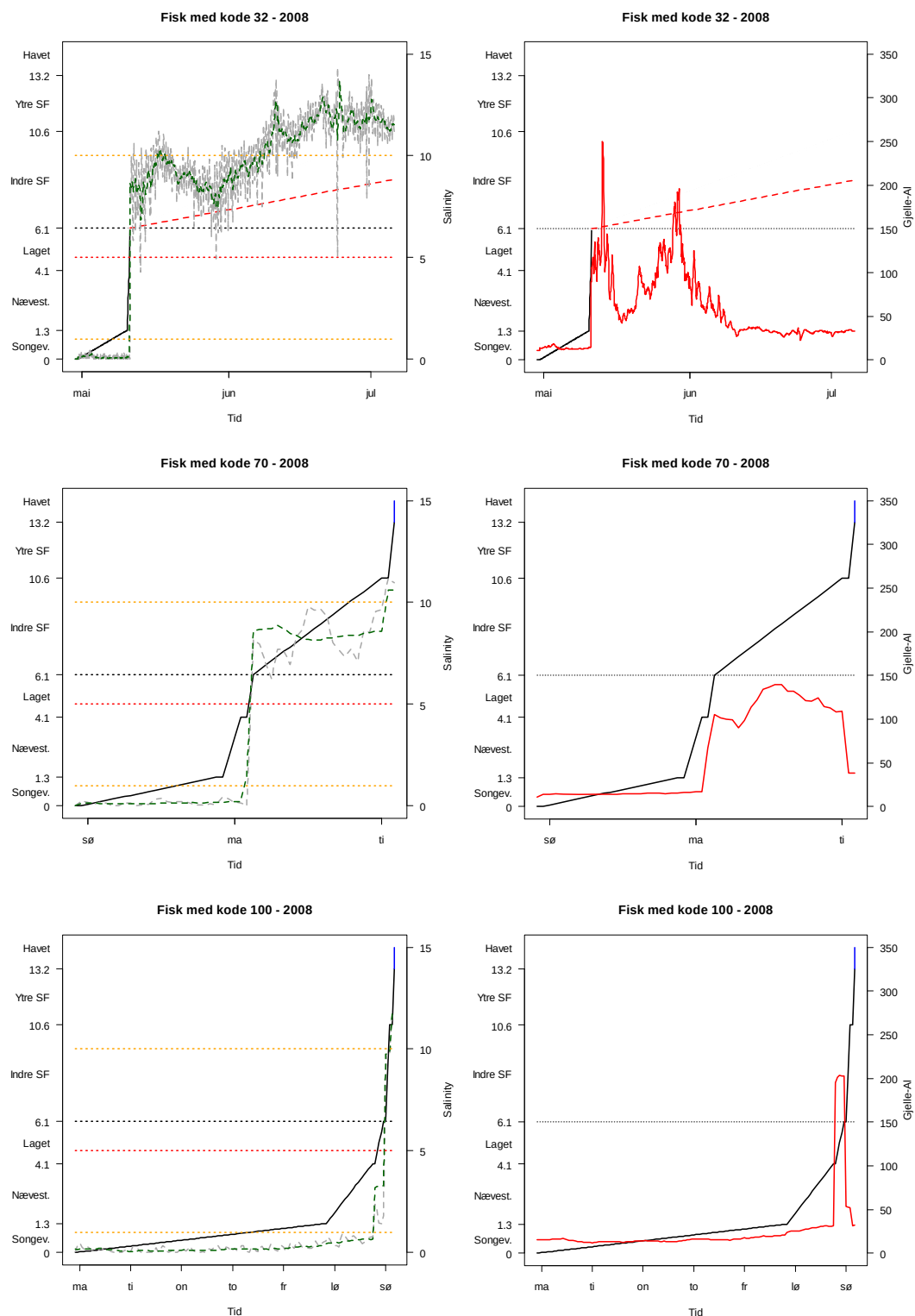






**Figur 17.** Noen utvalgte smolt fra 2007 med forskjellig utvikling. Venstre panel gir utvandring mot simulert salinitet, mens høyre panel gir utvandring mot predikert Gjelle-Al nivå. Venstre vertikal akse viser distansen utover i fjordsystemet. Den hele, svarte linja i venstre panel angir smoltens utvandringshistorie, mens de grå og grønne stiplede linjene angir simulert salinitet for sone og tidsperiode (grå gir samtidig timevis salinitet mens den grønne gir saliniteten midlet over de siste 12 timene). Rød horisontal stiplede linje angir Salinitet lik 5 ppt ("verste" nivå), mens de oransje stiplede linjene gir Salinitet hhv. lik 1 og 10 ppt. I høyre panel er telemetriregistreringene plottet på samme måte som tidligere mens den røde heltrukne linja angir predikert Gjelle-Al for 12 timers midlet salinitet.





**Figur 18.** Noen utvalgte smolt fra 2008 med forskjellig utvikling. Venstre panel gir utvandring mot simulert salinitet, mens høyre panel gir utvandring mot predikert Gjelle-Al nivå. Venstre vertikal akse viser distansen utover i fjordsystemet. Den hele, svarte linja i venstre panel angir smoltens utvandringshistorie, mens de grå og grønne stiplede linjene angir simulert salinitet for sone og tidsperiode (grå gir samtidig timevis salinitet mens den grønne gir saliniteten midlet over de siste 12 timene). Rød horisontal stiplede linje angir Salinitet lik 5 ppt ("verste" nivå), mens de oransje stiplede linjene gir Salinitet hhv. lik 1 og 10 ppt. I høyre panel er telemetriregistreringene plottet på samme måte som tidligere mens den røde heltrukne linja angir predikert Gjelle-Al for 12 timers midlet salinitet.

## 5 Diskusjon

Dette modelleringsarbeidet har for første gang satt sammen data fra de ulike prosjektene som har foregått i Storelva over flere år. Hensikten med et slikt arbeid har vært å prøve å se sammenhenger mellom salinitet, aluminium i brakkvann og aluminiumspåslag på gjellene til laksesmolt, og så utvikle en modell som kan gi oss en bedre innsikt i hva som skjer med laksesmolt som vandrer ut fra elva og gjennom den estuarine blandsonen.

Vannføringsforløpet i Storelva og fjordsystemet utenfor var svært ulikt i 2007 og 2008. Ut fra vannføring alene kan man forvente at de indre fjordområdene var saltere i 2007 enn i 2008. I 2008 kan man forvente at saltnivået økte etter hvert som vannføringen i elva avtok. Saltmålinger utført i sundet mellom Songevatn og Nævestadfjorden og på utløpet av Nævestadfjorden bekreftet dette og viste klart at vannet var saltere i 2007 enn i 2008 og at saltnivået økte med dato i 2008. Ut fra den generelle hypotesen kan det forventes at smolt opplever belastende forhold i Songevatn og Nævestadfjorden i 2007 hele perioden fra mai til juni, mens belastende forhold først tiltok fra midten av mai i 2008. I 2007 ble 25 og 75 % prosentilene for utvandrende laksesmolt registrert henholdsvis 27. april og 3. mai (**Tabell 1**). Denne fisken utvandret da til vann som antas å være belastende. I 2008 utvandret det meste av fisken i perioden 4. til 9. mai. I denne perioden vil ikke de indre fjordområdene ha vært belastende, basert på salinitet. Hvis derimot smolten bruker tid på å navigere ut Songevatn og Nævestadfjorden vil forsinkelsene i de indre fjordområdene innebære at denne fisken opplevde økende belastende forhold fra omkring midten av mai i 2008. I 2008 var området med salinitetsnivåer som assosieres med belastende Al konsentrert til det indre området av Sandnesfjorden og kun fram til 12. mai. Etter denne datoen og videre utover i fjorden var vannet for salt til at Al vil foreligge på en akkumulerbar form. Resultatene fra dette arbeidet viser klart at de fleste utvandrende smolt fra Storelva kan nå nivåer av gjellealuminium som ligger langt over de nivåer som regnes som sikre. Den utviklede modellen viser at slike høye gjellealuminiumsnivåer nås tidlig i utvandringen både i år med liten (2007) og høy (2008) vannføring i elva. Vannføringsnivåene i er gitt i **Figur 2**.

**Tabell 1.** Tidspunkt for når henholdsvis 25 % og 75 % av smoltbestanden har startet utvandringen. Saliniteten (ppt) i Songevatn og Nævestadfjorden er angitt for fire etterfølgende perioder i løpet av utvandningsperioden. Blå farge angir gode salinitetsforhold, lyserødt angir perioder hvor forholdene antas å være belastende.

|      | 25 % av smolt utvandret | 75 % av smolt utvandret | Fjordområde    | Salinitet 27. apr. til 3. mai | Salinitet 3. mai til 10. mai | Salinitet 10. mai til 17. mai | Salinitet fra 17. mai |
|------|-------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 2007 | 27. apr.                | 3. mai                  | Ut Songevt.    | 5,2-6,2                       | 6,2-7,0                      | 7,0-9,0                       | 9,0-4,6               |
|      |                         |                         | Ut Nævestadfj. | 10,1-9,0                      | 9,0-8,7                      | 8,7-7,0                       | 7,0-4,6               |
| 2008 | 4. mai                  | 9. mai                  | Ut Songevt.    | 0,1-0,1                       | 0,1-0,1                      | 0,1-0,6                       | 0,6-1,8               |
|      |                         |                         | Ut Nævestadfj. | 0,2-0,2                       | 0,2-0,2                      | 0,2-0,6                       | 0,6-3,2               |

I andre fjordsystemer vi har studert, spesielt Eresfjorden og Hardangerfjorden (Thorstad mfl. 2004; 2007; Plantalech mfl. 2009), går vandringen relativt raskt ut fjorden i den delen av systemet som har saltvann. I ferskvann er forholdene noe mer nyanserte. I Danmark ble det observert en rask vandring gjennom Tange Sø inntil smolten ble spist (Aarestrup mfl. 1999), men det var store forskjeller mellom de to ulike stammene av laks som ble fulgt. Det ble konkludert med at laks fra elver der smolten må vandre gjennom store innsjøer gjør dette raskere enn smolt fra systemer uten innsjøer. Dessverre er fjordsystemet utenfor Storelva i Holt svært forskjellig fra disse andre fjordsystemene så vi ønsker ikke å gi detaljerte sammenligninger, men heller kun konstatere at smolten stanser umiddelbart ved ankomst til Songevatn og at vandringshastighetene er svært raske i Sandnesfjorden.

I de fleste delene av utvandningsruta var variasjonen i salinitet sterkt korrelert med vannføring- en i Storelva (Tjomsland og Kroglund 2010). Store variasjoner kunne forekomme i løpet av un- dersøkelsesperioden, men dette var oftest endringer som gikk over flere dager. Unntaket var Lagstrømmen der flo og fjære kunne skape store variasjoner i saltholdighet over kort tid. Siden det tar tid fra en smolt kommer inn i et område til likevektsnivået nås, vil det være svært kre- vende å simulere gjellealuminiumsnivået når saliniteten endres raskere enn tiden det tar å nå likevektsnivået.

For å kunne modellere et aluminiumsnivå på gjellene hos utvandrende smolt trengs detaljert kunnskap om det vannmiljøet smolten vandrer gjennom fra elva og ut til havet. Modelleringsar- beidet har vist at det er en god sammenheng mellom saltholdigheten i vannet og konsentrasjo- nen av bioreaktivt aluminium *Ali*.45 (**Figur 10; Tabell V1**). Denne ikke-lineære sammenhengen stemmer godt overens med teorien om de to underliggende prosessene; uttynning av alumini- umskonsentrasjonen i ferskvannet med salt sjøvann og endringen av Al-tilstandsformer mot mer bioreaktivt Al med økende salinitet.

Større usikkerhet er knyttet til sammenhengen mellom gjellealuminiumsnivå og salinitet, spesi- elt ved lave saltkonsentrasjoner er variasjonen i registrert gjellealuminiumsnivå stort. Dette er uheldig, siden det er tidlig i utvandringen at de fleste problemene for smolten oppstår. For mo- delleringen av sammenhengen mellom gjellealuminiumsnivå og saltholdighet (**Figur 12; Tabell V4**) er nok det største problemet å relatere observert nivå med "korrekt" salinitet, hovedsakelig på grunn av tidsforsinkelsen i akkumuleringen av gjellealuminium og tidevannsflyktuasjonene som kan gi raske salinitetsflyktuasjoner. I Storelva er det et ekstra usikkerhetsmoment at vi benytter simulerte salinitetsverdier i de forskjellige sonene i stedet for reelle observasjoner. Til sammen gjør dette at modellen kan brukes til røffe estimat, men den bør ikke brukes til å for- søke å gi presise prediksjoner.

Figurene i **Kapittel 4.4** og **Vedlegg 2** kopler telemetriobservasjonene for utvandring med sali- nitet og gjellealuminiumsnivå. Fra disse figurene ser det ikke ut som om det nødvendigvis er totalnivået for gjellealuminium som påvirker utvandringen, men heller at det er forhold i den første perioden i de indre sonene som påvirker sannsynligheten for at en smolt skal få en rask og vellykket utvandring eller stanse opp. Vandringstilviljen kan påvirkes før en når opp til kritiske gjellealuminiumsnivåer, men blir først smolten værende i Songevatn eller Nævestadfjorden ak- kumulerer de raskt tilstrekkelig gjellealuminium til at deres sjanser for vellykket utvandring og overlevelse reduseres betydelig. I 2007 så vi en klar tendens til en avtagende andel smolt med vellykket utvandring utover i sesongen, samtidig som saliniteten etter hvert passerte den nedre kritiske grense på 1 promille. Smolt som bruker lang tid på å vandre gjennom Songevatn vil heller ikke klare å komme seg helt ut fjordsystemet. I 2008 var det en bedre utvandringstilvil- jighet tidlig i sesongen, men også da en avtagende andel smolt som kom seg helt ut fjordsyste- met etter hvert som saliniteten i Songevatn og Nævestadfjorden nærmet seg 1 promille utover i perioden.

Hva trengs videre for å forbedre modellen for gjellealuminium på smolt som vandrer gjennom Storelvas estuarine blandsoner? For det første er det spesielt viktig å ha så nøyaktige tidsserier for saliniteten som mulig i Songevatn og Nævestadfjorden, enten simulerte eller reelle verdier, da det er her vi forventer at de største problemene oppstår. Videre vil det være ønskelig å se om i hvert fall deler av den uforklarte variasjonen som er registrert i gjellealuminiumsnivå for lave saltkonsentrasjoner kan reduseres, slik at den funksjonelle sammenhengen bedre kan identifiseres.

Det er vanskelig å identifisere hva som er den viktigste årsaken til den varierende utvandnings- evnen i Songevatn og Nævestadfjorden; om det er akkumulert gjellealuminium eller om smolt som starter seint i sesongen generelt er dårligere til å navigere? Vannkvalitet og salinitetsgra- dient i Songevann og Nævestadfjorden er ganske forskjellig fra andre studerte systemer, f.eks. Eresfjorden, slik at en direkte sammenligning blir urealistisk. Den geografiske utformingen av Songevann tilsier ikke at det skal være noen fysiske hinder for utvandring; etter ankomst vil det eneste problemet være å finne åpningen ut til Nævestadfjorden. Manuell kartlegging av hvor smolten oppholdt etter utsetting viste at den stanset opp umiddelbart etter ankomst til Songe- vann, noe som er vanskelig å forklare med annet enn dårlig vannkvalitet.

Resultatene på atferd fra 2007 og 2008 kan tolkes som en hemming av utvandring knyttet til Al i brakkvann. Ut fra resultatene kan man imidlertid ikke trekke konklusjoner om eventuelle effekter på bestandsnivå. Det ble derfor igangsatt et merkeprogram i 2009 (**Tabell 2**). Her ble utvandrende smolt fanget og merket med passive integrerte transpondere (PIT-merker). Smolten ble deretter enten kjørt med bil til Trollbergvika og satt ut i vann med > 20 promille salt eller sluppet i munningen av Storelva. Denne gruppen erfarte brakkvann under sin utvandring hvor brakkvannsnivået varierte med dato. Brakkvannsnivået målt på 1 m dyp i de indre fjordbassengene (Songevatn og Nævestadfjorden) økte fra nivåer < 1 promille til nivåer > 1 promille i løpet av den perioden smolt ble satt ut. Utsettingene ble gjenfanget som oppvandrende laks i 2010 (n=7) og 2011 (n=40). Samlet er det gjenfanget 3,2 % av den merkede smolten. Eventuell gjenfangst av 3-sjøvinter laks vil først gjøres i 2012 og inngår følgelig ikke her. Hvis gjenfangstene fra 2010 og 2011 fordeles på utsettingsgruppe og forhold til salinitet i de indre fjordområdene (Songevatn og Nævestadfjorden) var det ingen forskjell i sjøoverlevelse når hele området fra Songevatn til utløpet av Nævestadfjorden hadde et saltnivå under 1 promille. Det var en ikke-signifikant forskjell i sjøoverlevelse mellom smoltgruppene satt ut i perioden 8. til 14. mai. Saltnivået var i denne perioden gradvis økende i Nævestadfjorden. Det var en signifikant forskjell i sjøoverlevelse mellom utsettingene utført fra 15. mai. Her ble det gjenfanget 6 ganger mer smolt fra bilkjørt smolt enn fra smolt som måtte passere brakkvannsområdene selv. Et predatorfiske utført flere ganger i mai 2009 påviste ikke fiskepredasjon. Endringene og forskjellene i sjøoverlevelse er derimot i samsvar med hypotesen om at brakkvann med 1-10 promille påvirker den utvandrende smoltens overlevelse.

**Tabell 2.** Salinitet (ppt) i de forskjellige sonene for mai 2009, og etterfølgende sjøoverlevelse for gjenfangstene fra de forskjellige utsettingsgruppene.

|                                 | Salinitet<br>Strømmen | Salinitet<br>Doknes | Salinitet indre<br>Sandnesfj. | Salinitet<br>Trollbergvika | % sjøoverlevelse<br>Strømmen utsett. | % sjøoverlevelse<br>Trollbergvika utsett. |
|---------------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|
| Avstand fra<br>elvemunning (km) | 1,8                   | 4,1                 | 6,2                           | 14,3                       |                                      |                                           |
| <b>Ant. smolt satt ut</b>       |                       |                     |                               |                            | <b>603</b>                           | <b>676</b>                                |
| 1-7 mai                         | 0,3-0,8               | 0,3-0,8             | 20,2-22,5                     | 22,9-26,5                  | 5,05                                 | 4,03                                      |
| 8-14 mai                        | 0,8-0,8               | 0,8-1,0             | 22,5-17,3                     | 26,5-20,9                  | 2,61                                 | 4,11                                      |
| Fra 15 mai                      | 0,8-3,5               | 1,0-4,9             | 17,3-24,2                     | 20,9-26,2                  | 0,42                                 | 2,54                                      |

Ut fra smoltvandring i 2007 og 2008, samt sjøoverlevelse til smolt satt ut i 2009, synes smolt-overlevelse å bli redusert når saltinnholdet utenfor Storelva er >1 promille. Det er ikke like opplagt hvor øvre grense for effekt går. Ut fra erfaringer basert på sammenhenger mellom *gjelle-Al* og salinitet antas det at øvre grense går et sted omkring 10 promille. Når salinitet er i intervallet 1 til 10 promille i Songevatn og Nævestadfjorden forventes det redusert overlevelse av den utvandrende smolten. Graden av påvirkning vil være knyttet til hvor salinitetsøkningen inntreffer, hvor den antas å være mest destruktiv når de innerste fjordbassengene har salinitetsnivåer mellom 1 og 10 ppt. Smolten brukte imidlertid uventet lang tid ut av Songevatn og Nævestadfjorden også når disse områdene var dominert av ferskvann og hadde salinitetsnivåer godt under 1 ppt. En hypotese kan være å betrakte vandring gjennom dette fjordbassenget som en vandring gjennom innsjøer. Noen studier har vist at smolt kan bruke lang tid på å passere innsjøer (Uglen mfl. 2005) mens i andre innsjøer vandrer smolten raskt, så hastigheten har sannsynligvis sammenheng med den geografiske utformingen av systemet. I Songevatn stoppet smolten opp allerede ved inngangen til vannet og vandret svært langsomt videre inntil ankomst Sandnesfjorden og salt vann.

En hypotese er at silikat tilsatt ferskvannet vil binde Al på en form hvor den ikke blir tilgjengelig i brakkvann. Hvis en eventuell silikatbehandling gir en markert økning i andel smolt som vandrer ut systemet, ville det styrket antagelsen om at Al er den viktigste faktoren for den manglende utvandringen og retursuksessen for laks i Storelva. Alternativt ville bedre data på simultane utvandrings- og saltholdighetsobservasjoner kunne brukes til å analysere mer eksakt årsakene til når og hvorfor smolten stanser opp. Modellene så langt gir dermed mer informasjon om

sammenhengene mellom salinitet, bioreaktivt aluminium og gjellealuminium, enn om hvordan disse variablene direkte påvirker utvandringsevne eller –vilje. Nivåene for gjellealuminium trenger ikke nødvendigvis være direkte dødelige, men de kan for eksempel medføre forsinkelser i smoltutvandringen, som igjen vil kunne medføre økt mortalitet forårsaket av andre faktorer. Modellene vil også, etter en viss bearbeiding, kunne brukes til å si noe om under hvilke forhold vi kan forvente å få ut den største andelen smolt, selv om prediksjonene for enkeltsmolt vil kunne være svært usikre.

Et av hovedpoengene med modelleringen av aluminiumspåslag på gjellene til utvandrende laksesmolt har vært å se på overføringspotensialet av modell og kunnskap fra Storelva til andre vassdrag og fjordsystem med bioreaktivt aluminium i blandsonen. Spørsmålet er da hvilke forhold og sammenhenger som kan antas generelle, og dermed overførbare, og hvilke faktorer vi vil trenge spesifikk kunnskap om for hvert system? Vilkår for at en slik modelleringsøvelse skal være av interesse vil i første omgang være at det er laksesmolt i systemet, at det er mobiliserbart aluminium i elva og / eller fjorden, og at utvandringsruta går gjennom et brakkvannsområde med en viss utbredelse. Her er det verdt å merke seg at et fjordsystem kan ha mange tilførselselver med svært varierende konsentrasjoner av aluminium, slik at et ensidig fokus på et vassdrag, for eksempel med liten konsentrasjon av mobiliserbart aluminium, kan føre til at en overser problemer smolten kan oppleve på vei ut fjorden.

En generell forutsetning for enkelt å kunne overføre modeller fra Storelva til andre systemer må være at sammensetningen av det totale aluminiumet er relativt konstant, det vil si at andelen av de forskjellige Al-tilstandsformene i ferskvannet ikke varierer for mye mellom vassdrag. En modell for *Gjelle-Al* nivå, eller for konsentrasjonen av bioreaktivt aluminium, fra salinitet kan dermed settes opp, etter først å ha korrigert for konsentrasjonen av total aluminium tilført fjordsystemet. Videre må vi kunne anta at akkumuleringshastighetene for aluminium på gjellene ikke varierer mellom bestander.

Informasjon det vil være nødvendig å skaffe for hvert vassdrag og fjordsystem vil blant annet være konsentrasjonen av total aluminium tilført fjordsystemet, salinitetsgradienten ut gjennom fjordsystemet (som vil avhenge av ferskvannstilførsel og estuariets utforming), og smoltens forventede vandringsrute og -hastighet gjennom de forskjellige delene av fjordsystemet. Jo mer kunnskap vi har om disse forholdene, desto mer pålitelige vil resultatene fra en modellering være.

## 6 Referanser

- Aarestrup, K., Jepsen, N., Rasmussen, G. & Økland, F. 1999. Movements of two strains of radio tagged Atlantic salmon, *Salmo salar* L., smolts through a reservoir. – *Fisheries Management and Ecology* **6**: 97-107.
- Bakke, H., Bjerknes, V., & Overeide, A. 1991. Effects of rapid changes in salinity on the osmoregulation of postsmolt Atlantic salmon (*Salmo salar*). – *Aquaculture* **96**: 375-382.
- Bjerknes, V. 1985. Mortality of reared salmon during winter in fjord areas. – *Norsk.Fiskeoppdrett*. **10**: 40-41, 43.
- Bjerknes, V., & Kroglund, F., 2000. Aluminium pd gjeller av vill laks (postsmolt) i Sogn og Fjordane våren 1999. – *NIVA-notat*: 7s.
- Bjerknes V., Fyllingen I., Holtet L., Teien H.-C., Rosseland B.O., & Kroglund F. 2003. Aluminium in acidic river water causes mortality of farmed Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.) in Norwegian fjords. – *Mar Chem* **83**:169-174.
- Finstad, B., Økland, F., Thorstad, E.B., mfl. 2005. Migration of hatchery-reared Atlantic salmon and wild sea trout post-smolts in a Norwegian fjord system. – *Journal of fish biology* **66**: 86-96.
- Gensemer, R.W., & Playle, R.C. 1999. The bioavailability and toxicity of aluminum in aquatic environments. – *Critical Reviews In Environmental Science And Technology* **29**: 315-450
- Hansen, L.P., Holm, M., Holst, J.C. & Jacobsen, J.A. 2003. The ecology of post-smolts of Atlantic salmon. I: - *Salmon at the Edge* (D. Mills, red.), Blackwell Science Ltd., Oxford, UK, s. 25-39.
- Kroglund, F., Åtland, Å., Bjerknes, V., & Barlaup, B.T. 2004. Aluminium som trusselfaktor i brakkvann. – *Vossolaksen, bestandsutvikling, trusselfaktorer og tiltak*. Utredning 2004-7.
- Kroglund, F., Gutterup, J. Kleiven, E., Stefansson, S., Barlaup, B. & Teien, H.-C. 2007. Aluminium, et miljøproblem for laks i Sandnesfjorden, Aust-Agder? – *NIVA-rapport* **5366**: 47 s.
- Kroglund, F., Teien, H.-C, Salbu, B., Rosseland, B.O., & Güttrup, J. 2011a. Aluminium, en potensiell trussel for utvandrende laksesmolt smolt. – *Datarapport fra Storelva i Holt og Audna, 2006*. *NIVA-rapport* **6244**: 35 s. + vedlegg.
- Kroglund, F., Høgberget, R., Økland, F., Thorstad, E.B., Teien, H.-C., Rosseland, B.O., Salbu, B., Nilsen, T.O., Stefansson, S., & Guttrup, J. 2011b Påvirkes smoltvandring av aluminium i brakkvann? - *Storelva datarapport 2007*. *NIVA-rapport* **6245**: 81 s + vedlegg.
- Kroglund, F., Høgberget, R., Haraldstad, T., Økland, F., Thorstad, E.B., Teien, H.-C., Rosseland, B.O., Salbu, B., Nilsen, T.O., Stefansson, S., Guttrup, J. & Johansen, Å. 2011c. Påvirkes smoltvandring av aluminium i brakkvann? – *Storelva datarapport 2008*. *NIVA-rapport* **6246**: 69 s + vedlegg.
- Kroglund, F., Teien, H.-C., Rosten, C., Hawley, K., Guttrup, J., Johansen, Å., Høgberget, R., Kristensen, T., Tjomsland, T. & Haugen, T. 2011d. Betydning av kraftverk og predasjon fra gjedde for smoltproduksjon og aluminium i brakkvann for postsmoltoverlevelse. – *Storelva datarapport 2009*. *NIVA-rapport* **6084**: 103 s.
- Kroglund, F., Haraldstad, T., Teien, H.-C., Guttrup, J. & Johansen, Å. 2011e. Mobilisering av aluminium i brakkvann og akkumulering på fiskegjeller. - *Storelva datarapport brakkvann 2010*. *NIVA-rapport* **6149**: 30 s.
- Kroglund, F., Haugen, T., Guttrup, J., Hawley, K., Johansen, Å., Rosten, C., Kristensen, T. & Tormodsgard, L. 2011f. Effekter av å passere en kraftverksturbin på smoltoverlevelse og atferd. Betydningen av tiltak. – *NIVA-rapport* **6139**: 35 s.
- Kroglund, F., Guttrup, J., Haugen, T., Hawley, K., Johansen, Å., Karlsson, A., Kristensen, T., Lund, E., & Rosten, C. 2011g. Samvirkning mellom ulike trusler på oppnåelse av gytebestandsmål for laks. Storelva i Holt som eksempel. – *NIVA-rapport* **6148**: 71 s.
- Plantalech Manel-la, N., Thorstad, E.B., Davidsen, J.G., Økland, F., Sivertsgård, R., McKinley, R.S. & Finstad, B. 2009. Vertical movements of Atlantic salmon post-smolts relative to measures of salinity and water temperature during the first phase of the marine migration. - *Fisheries Management and Ecology* **16**: 147-154.
- R Development Core Team 2009. R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Rosseland, B.O., & Staurnes, M. 1994. Physiological Mechanisms for Toxic Effects and Resistance to Acidic Water: An Ecophysiological and Ecotoxicological Approach. I: *Acidification of Freshwater Ecosystems: Implications for the Future*. Red: C.E.W. Steinberg & R.F. Wright. John Wiley & Sons Ltd. s.. 227-246.



- Rosseland, 2005. Vann og gjelleanalyser av laks i forbindelse med fiskedød i Feda fjorden. – *NIVA notat* 2002.
- Teien H.-C., Standring W.J.F. & Salbu B. 2006. Mobilization of river transported colloidal aluminium upon mixing with seawater and subsequent deposition in fish gills. – *Science of the Total Environment* **364**:149-164.
- Teien, H.-C., Kroglund, F., Kleiven, M., Salbu, B. & Rosseland, B.O. 2009. Bruk av natriumsilikat i forhold til kalk for å avgifte aluminium i ferskvann og brakkvann. – *UMB-rapport* **2/2009**. ISSN 0805 – 7214: 65 s.
- Thorstad, E.B., Økland, F., Finstad, B., Sivertsgård, R., Bjørn, P.A. & McKinley, R.S. 2004. Migration speeds and orientation of Atlantic Salmon and sea trout post-smolts in a Norwegian fjord system. – *Environmental Biology of Fishes* **71**: 305-311.
- Thorstad, E.B., Økland, F., Finstad, B., Sivertsgård, R., Plantalech, N., Bjørn, P.A. & McKinley, R.S. 2007. Fjord migration and survival of wild and hatchery-reared Atlantic salmon and wild brown trout post-smolts. – *Hydrobiologia* **582**: 99-107.
- Tjomsland, T. & Kroglund, F. 2010. Modellering av strøm og saltholdighet i Sandnesfjorden ved Risør. – *NIVA-rapport* **6049**: 31 s.
- Uglen, I., Økland, F., Forseth, T., Diserud, O.H., Fiske, P., Thorstad, E.B. & Berger, H.M. 2005. Smoltvandring forbi Laudal kraftverk i Mandalselva. – *NINA-rapport* **13**: 31 s.
- Wood, S.N. 2006. Generalized Additive Models: An Introduction with R. Chapman & Hall / CRC Press, London, UK.

## 7 Vedlegg

### Vedlegg 1: Modelldetaljer

**Tabell V1:** GAM for *Ali.45* fra *Salinitet*:  $\text{Ali.45} \sim \text{s}(\text{SAL})$ 

|                                                      | Estimate | Std. Error | t-value | Pr(> t ) |     |
|------------------------------------------------------|----------|------------|---------|----------|-----|
| (Intercept)                                          | 33.387   | 1.126      | 29.66   | <2e-16   | *** |
| Approximate significance of smooth terms:            |          |            |         |          |     |
|                                                      | edf      | Ref.df     | F       | p-value  |     |
| s(SAL)                                               | 6.305    | 7.437      | 42.78   | <2e-16   | *** |
| R-sq.(adj) = 0.787      Deviance explained = 80.20 % |          |            |         |          |     |
| GCV score = 120.35      Scale est = 110.24      n=87 |          |            |         |          |     |

**Tabell V2:** GAM for *Ali.45* fra *Total Al* og *Salinitet*:  $\text{Ali.45} \sim \text{s}(\text{Al.tot}) + \text{s}(\text{SAL})$ 

|                                                     | Estimate | Std. Error | t-value | Pr(> t ) |     |
|-----------------------------------------------------|----------|------------|---------|----------|-----|
| (Intercept)                                         | 33.834   | 1.126      | 30.06   | <2e-16   | *** |
| Approximate significance of smooth terms:           |          |            |         |          |     |
|                                                     | edf      | Ref.df     | F       | p-value  |     |
| s(Al.tot)                                           | 3.292    | 4.161      | 3.213   | 0.0177   | *   |
| s(SAL)                                              | 6.432    | 7.528      | 29.567  | <2e-16   | *** |
| R-sq.(adj) = 0.844      Deviance explained = 86.7 % |          |            |         |          |     |
| GCV score = 102.3      Scale est = 86.168      n=68 |          |            |         |          |     |

**Tabell V3:** GAM for *Gjelle-Al* fra *Ali.45*:  $\text{GAL} \sim \text{s}(\text{Ali.45})$ 

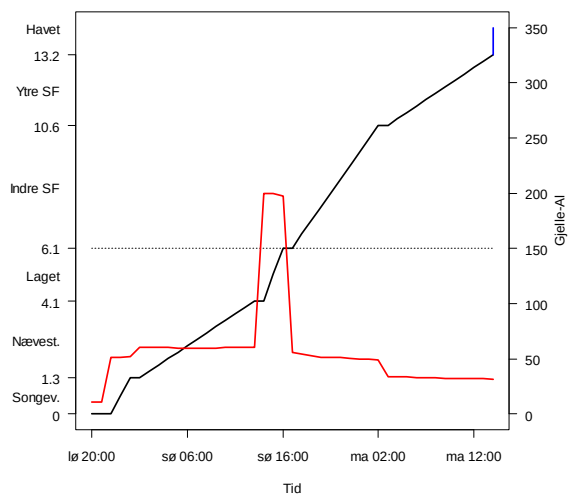
|                                                      | Estimate | Std. Error | t-value | Pr(> t )  |     |
|------------------------------------------------------|----------|------------|---------|-----------|-----|
| (Intercept)                                          | 65.05    | 15.13      | 4.299   | 0.000143  | *** |
| Approximate significance of smooth terms:            |          |            |         |           |     |
|                                                      | edf      | Ref.df     | F       | p-value   |     |
| s(Ali.45)                                            | 1.973    | 2.468      | 8.425   | 0.0000549 | *   |
| R-sq.(adj) = 0.36      Deviance explained = 39.7 %   |          |            |         |           |     |
| GCV score = 8985.6      Scale est = 8243.5      n=36 |          |            |         |           |     |

**Tabell V4:** GAM for *Gjelle-Al* direkte fra *Salinitet*:  $\text{GAL} \sim \text{s}(\text{SAL})$ 

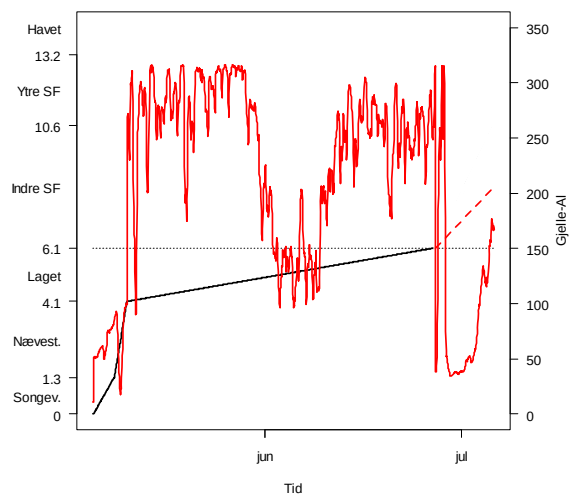
|                                                       | Estimate | Std. Error | t-value | Pr(> t ) |     |
|-------------------------------------------------------|----------|------------|---------|----------|-----|
| (Intercept)                                           | 35.646   | 2.087      | 17.08   | <2e-16   | *** |
| Approximate significance of smooth terms:             |          |            |         |          |     |
|                                                       | edf      | Ref.df     | F       | p-value  |     |
| s(Ali.45)                                             | 7.644    | 8.525      | 19.58   | <2e-16   | *** |
| R-sq.(adj) = 0.324      Deviance explained = 33.9 %   |          |            |         |          |     |
| GCV score = 1550.4      Scale est = 1511.8      n=347 |          |            |         |          |     |

## Vedlegg 2: Figurer for utvalgte smolt

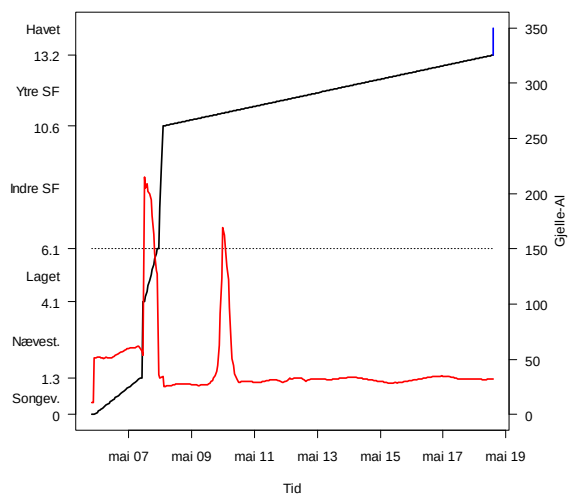
Fisk med kode 1 - 2007



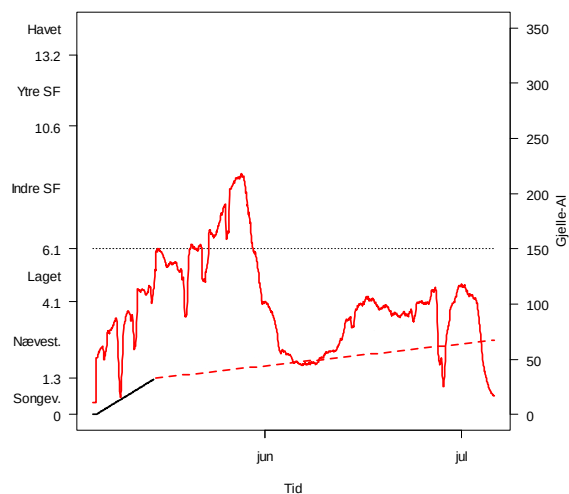
Fisk med kode 2 - 2007



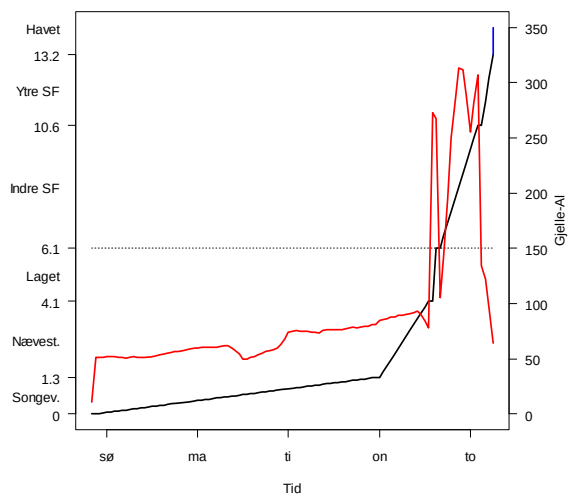
Fisk med kode 3 - 2007



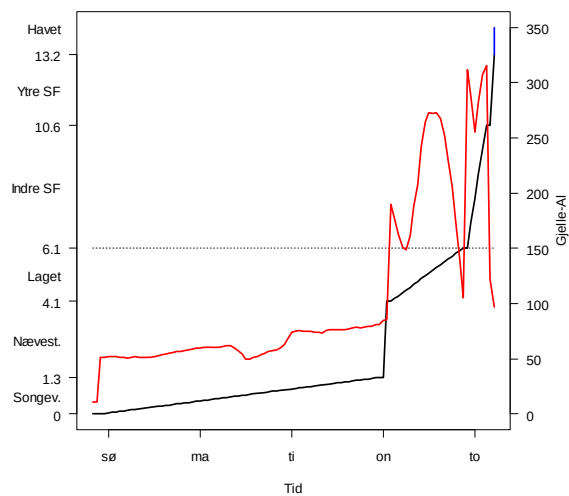
Fisk med kode 4 - 2007



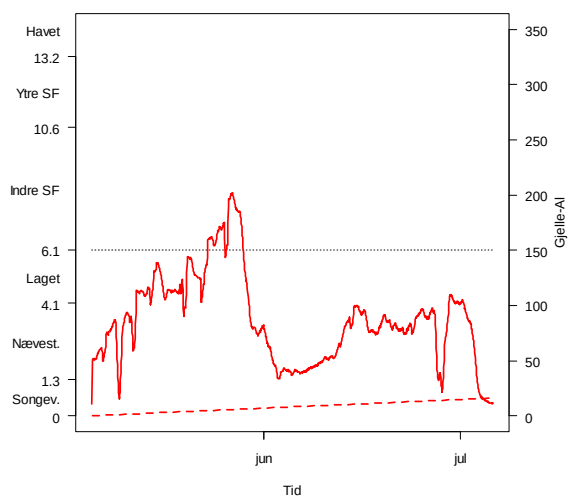
Fisk med kode 5 - 2007



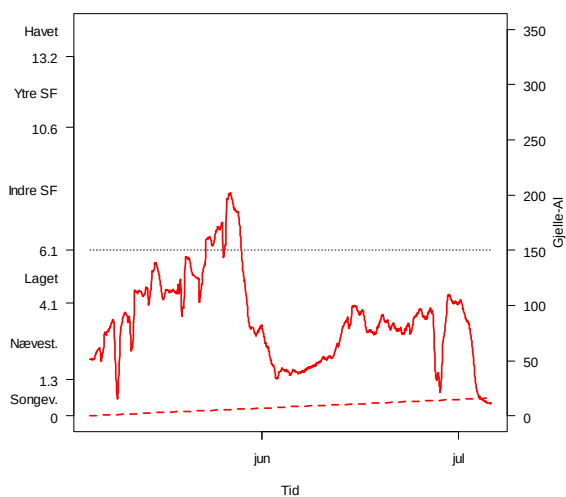
Fisk med kode 6 - 2007



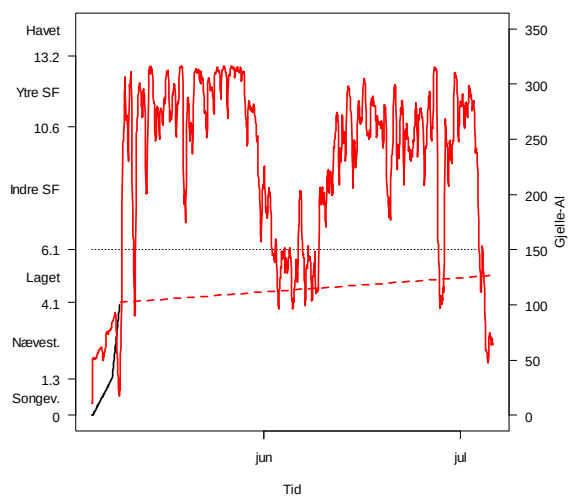
Fisk med kode 7 - 2007



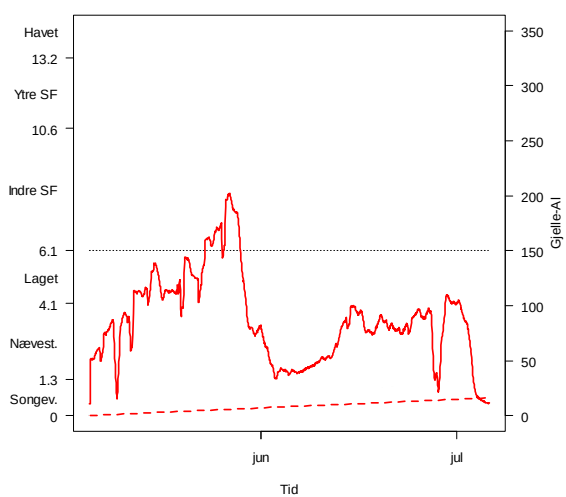
Fisk med kode 8 - 2007



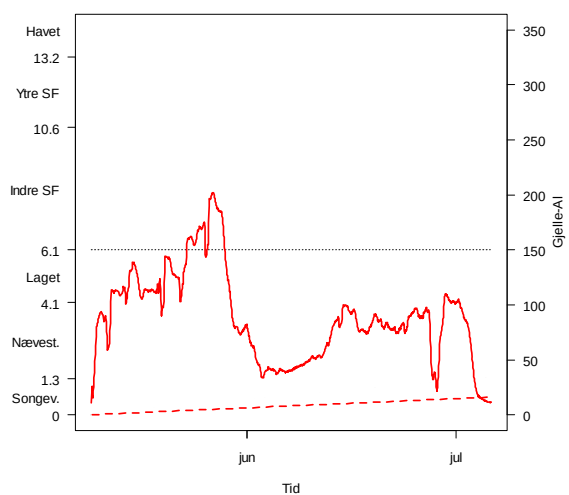
Fisk med kode 9 - 2007



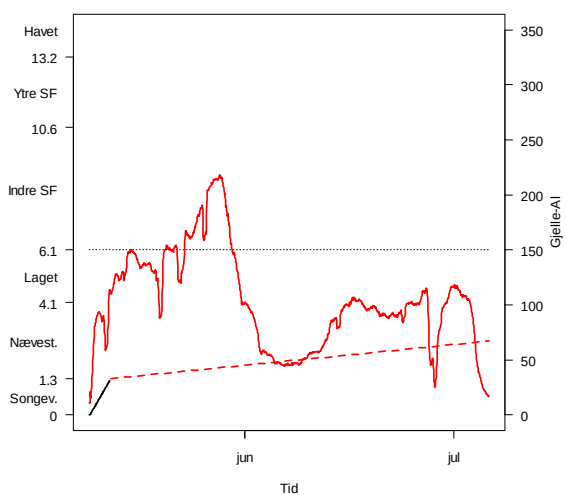
Fisk med kode 10 - 2007



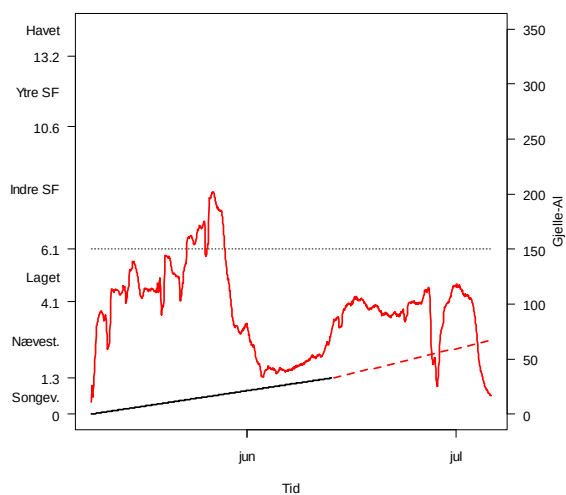
Fisk med kode 11 - 2007



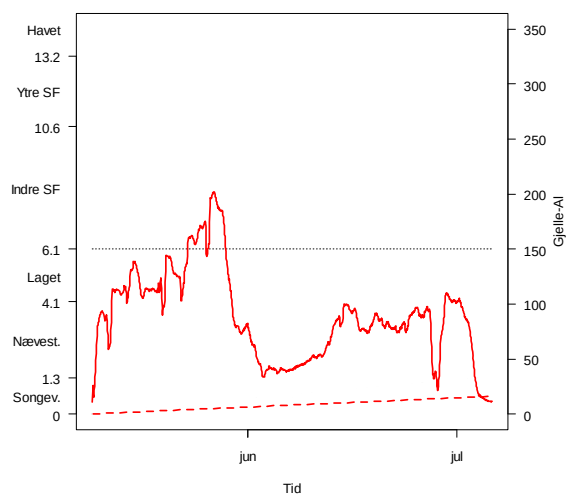
Fisk med kode 14 - 2007



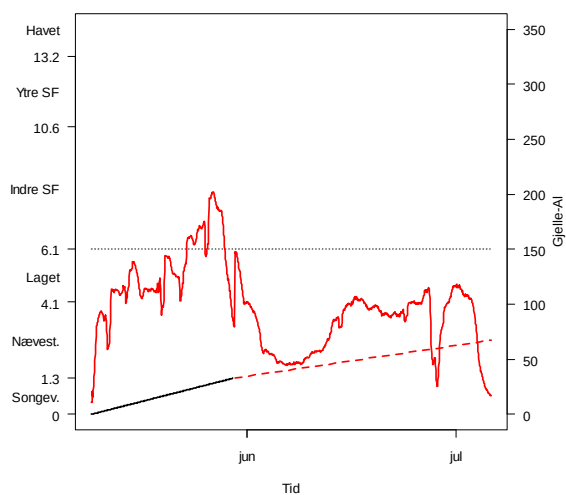
Fisk med kode 15 - 2007



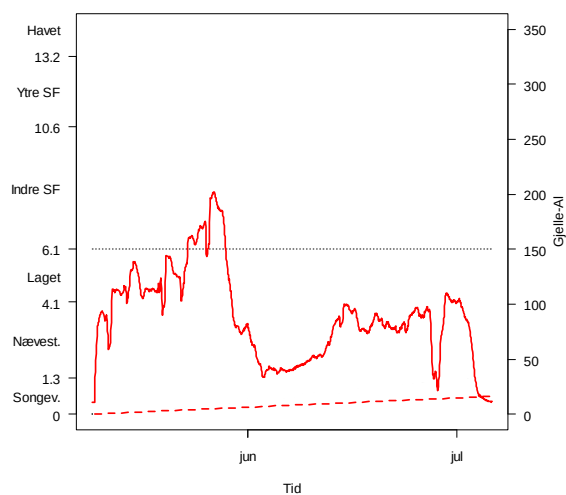
Fisk med kode 16 - 2007



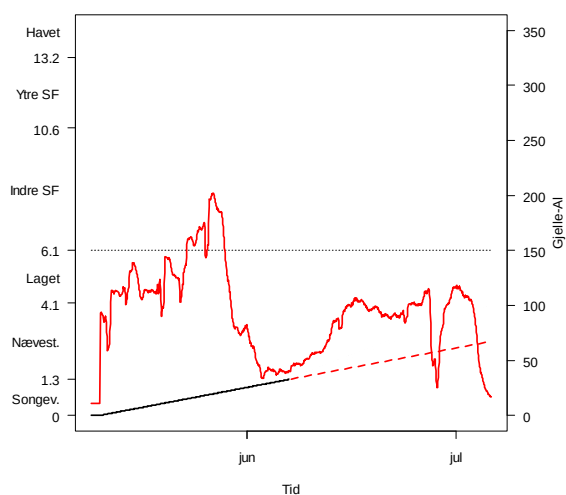
Fisk med kode 17 - 2007



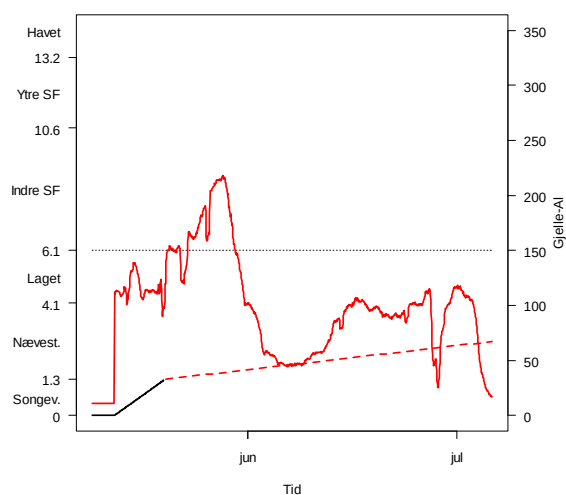
Fisk med kode 19 - 2007



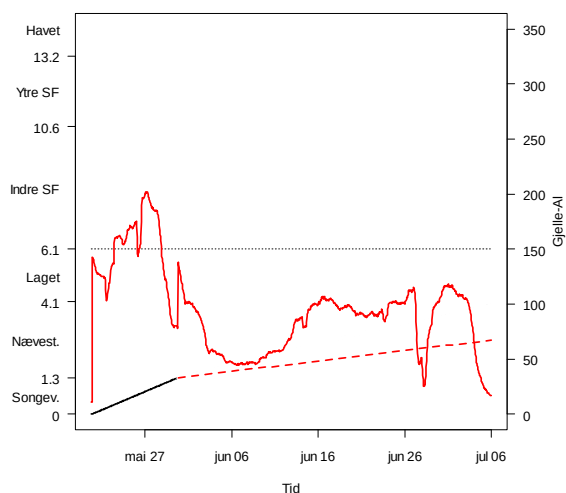
Fisk med kode 20 - 2007



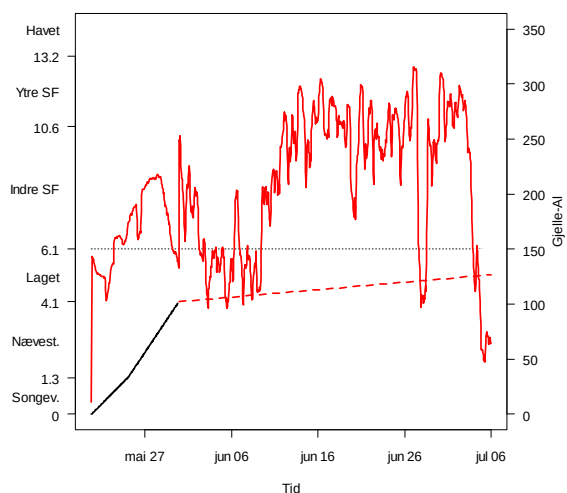
Fisk med kode 21 - 2007



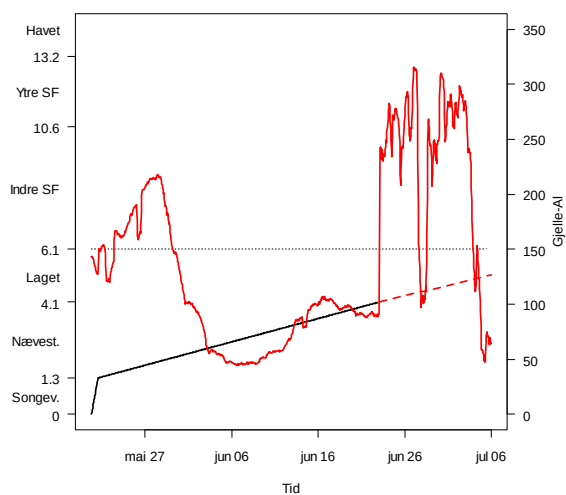
Fisk med kode 22 - 2007



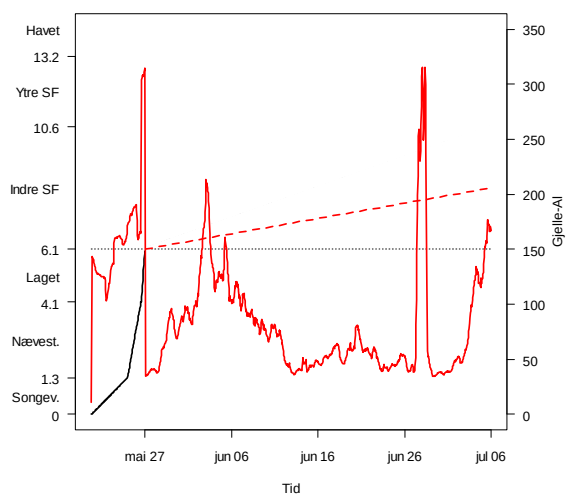
Fisk med kode 23 - 2007



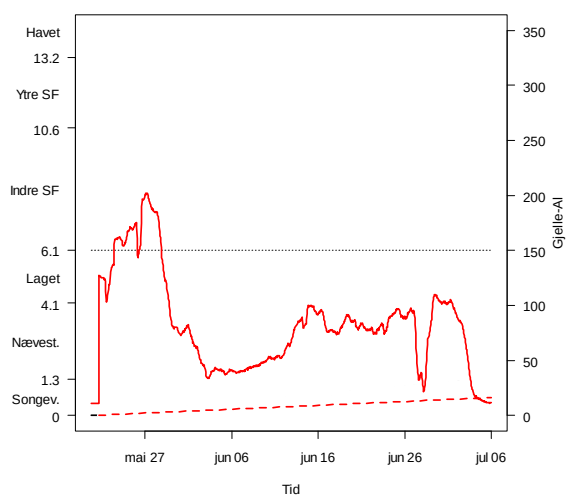
Fisk med kode 24 - 2007



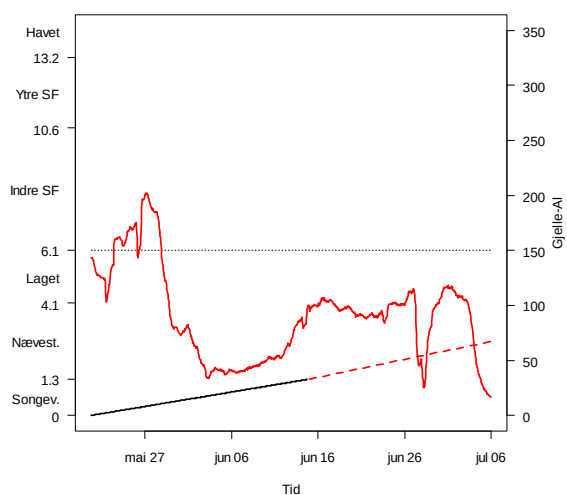
Fisk med kode 25 - 2007



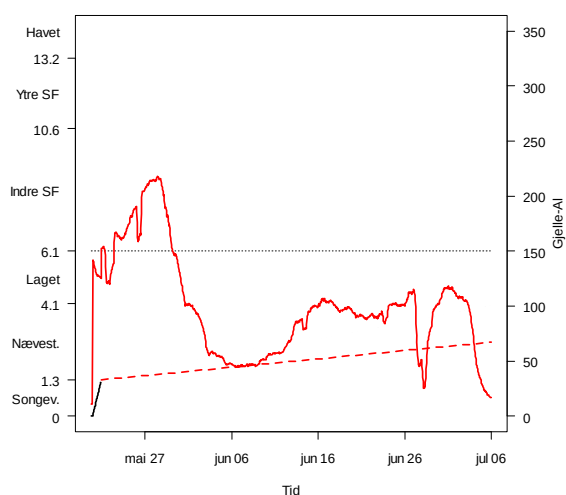
Fisk med kode 26 - 2007



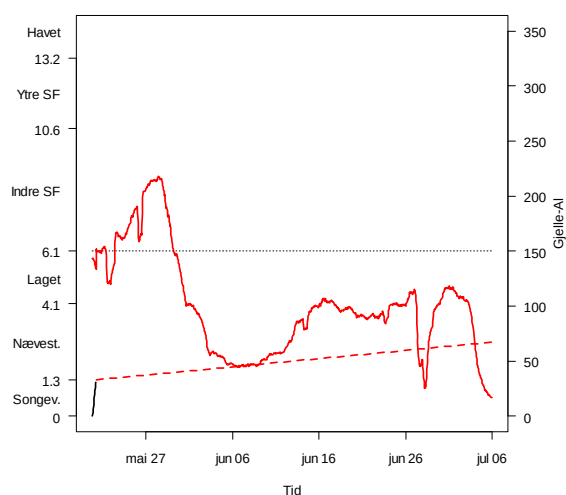
Fisk med kode 27 - 2007



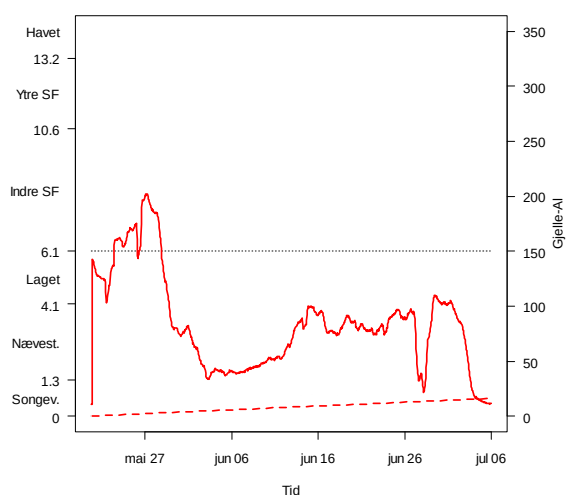
Fisk med kode 28 - 2007



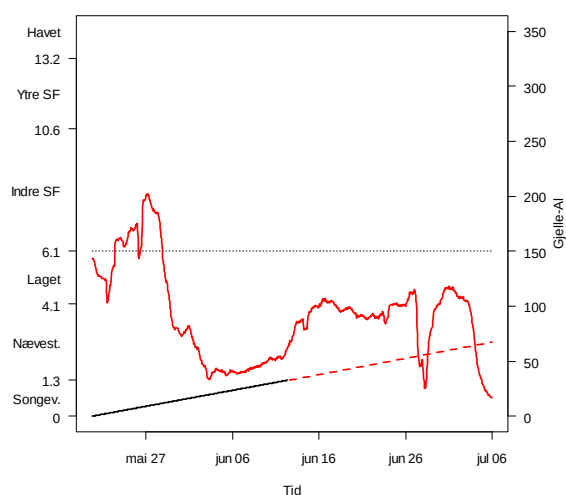
Fisk med kode 29 - 2007



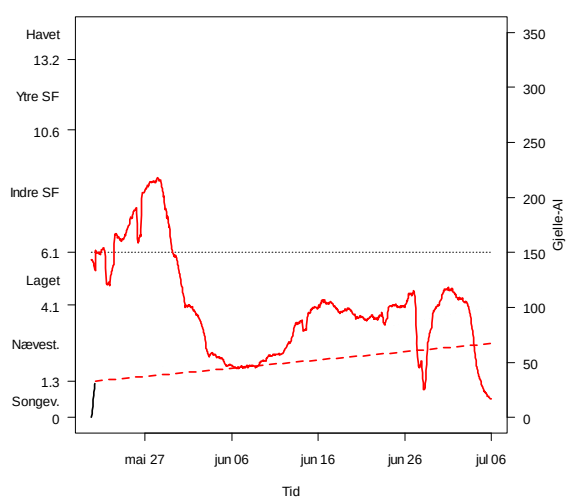
Fisk med kode 30 - 2007



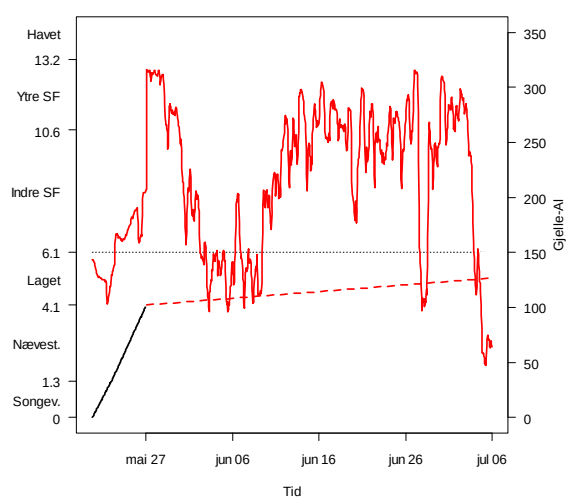
Fisk med kode 51 - 2007



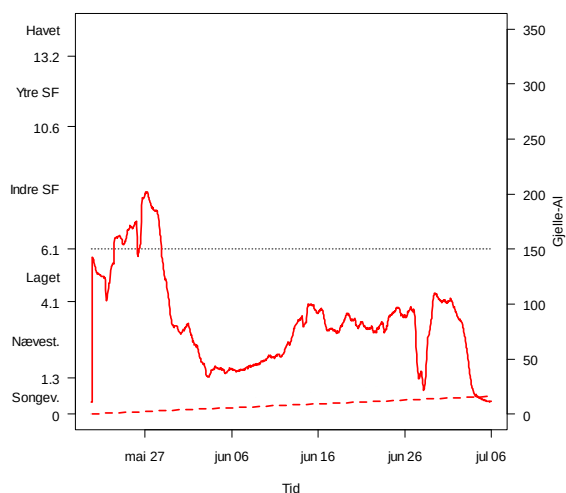
Fisk med kode 52 - 2007



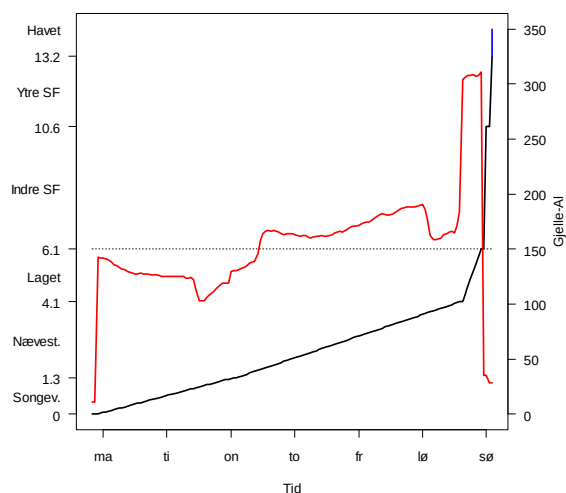
Fisk med kode 53 - 2007



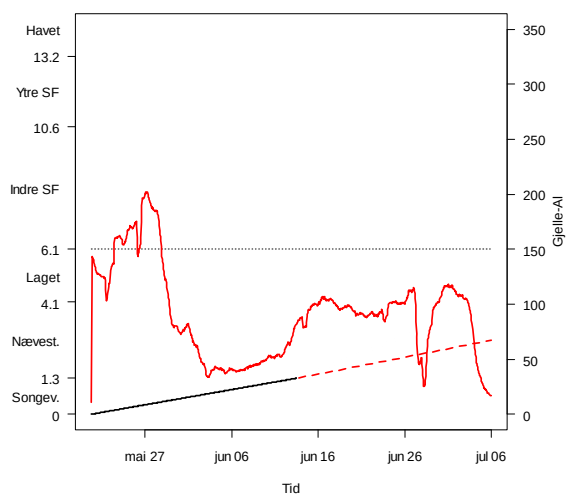
Fisk med kode 54 - 2007



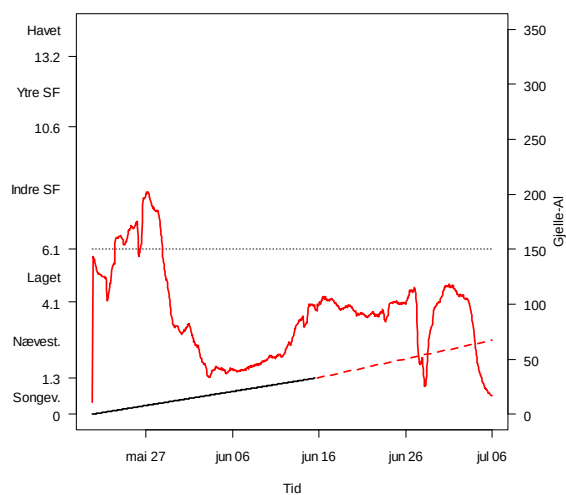
Fisk med kode 55 - 2007



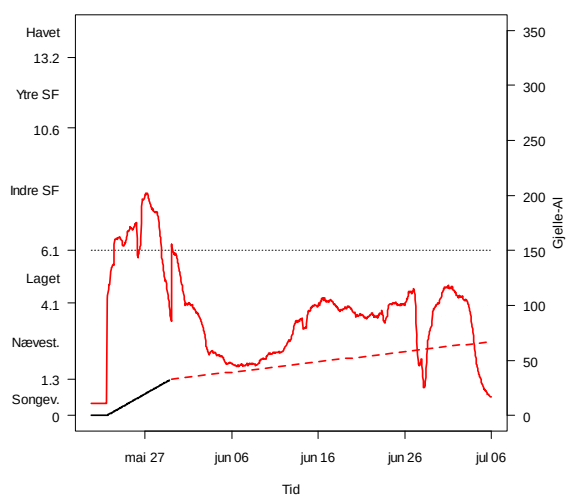
Fisk med kode 56 - 2007



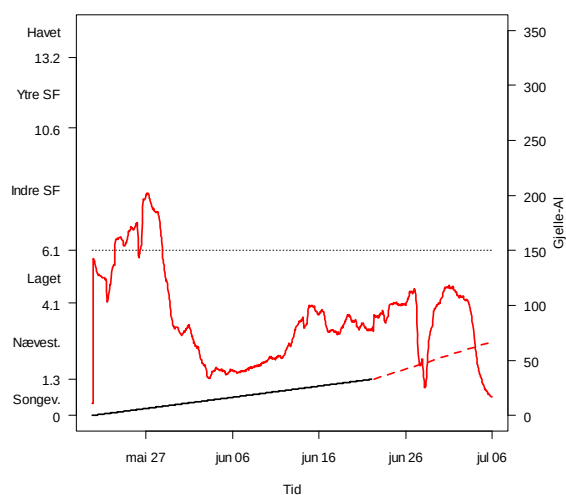
Fisk med kode 57 - 2007



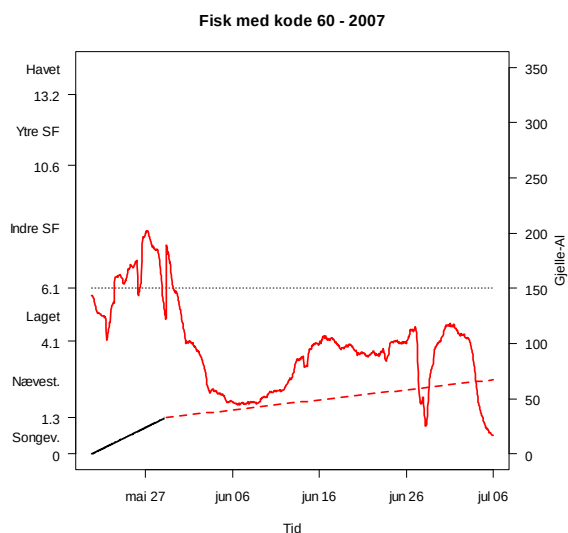
Fisk med kode 58 - 2007



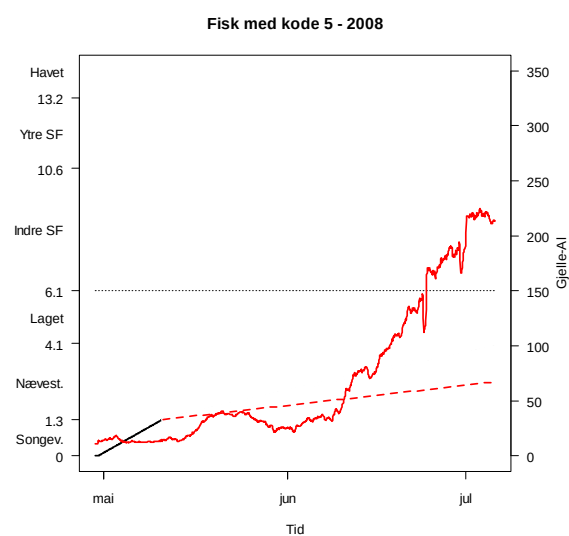
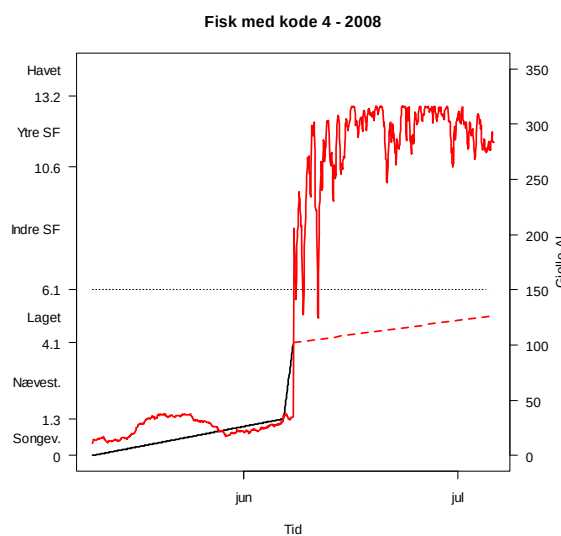
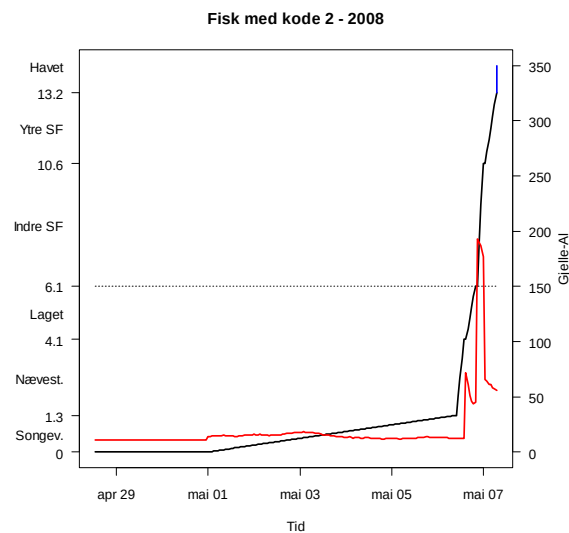
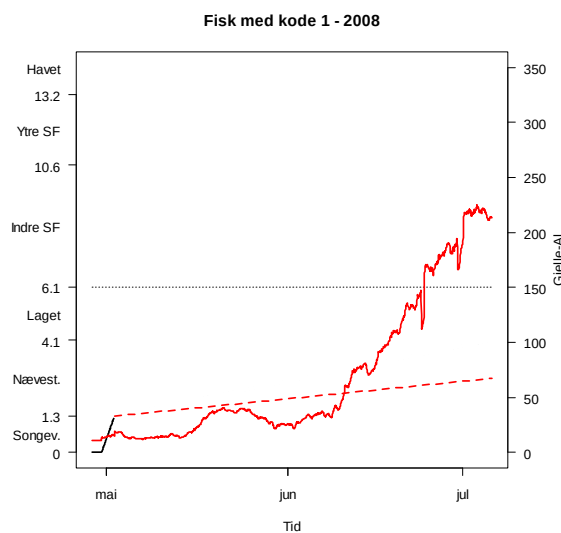
Fisk med kode 59 - 2007

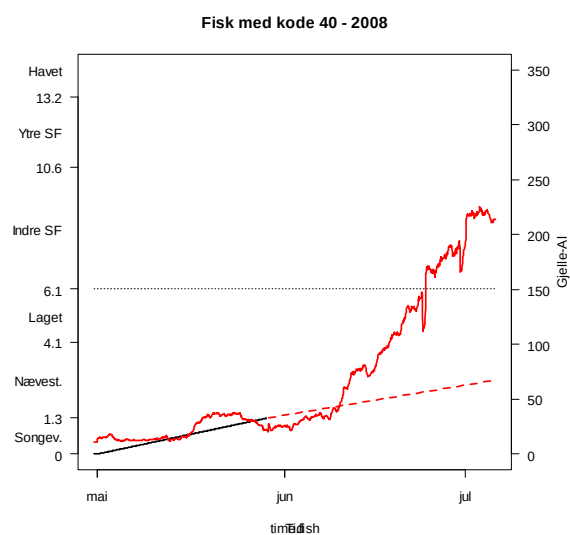
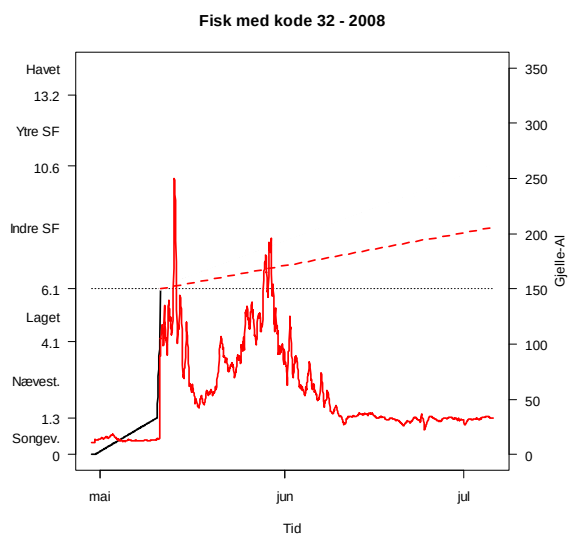
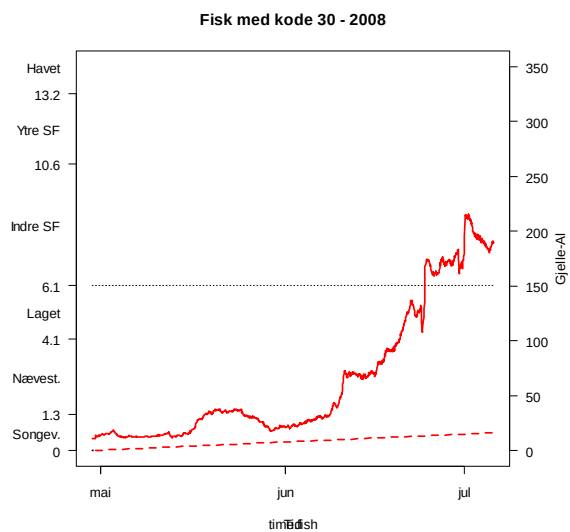
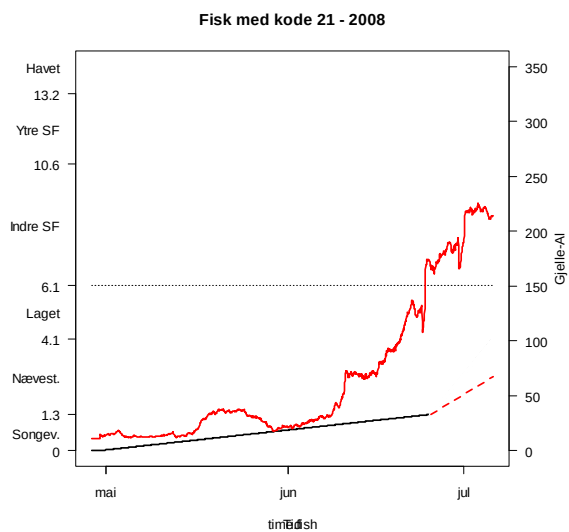
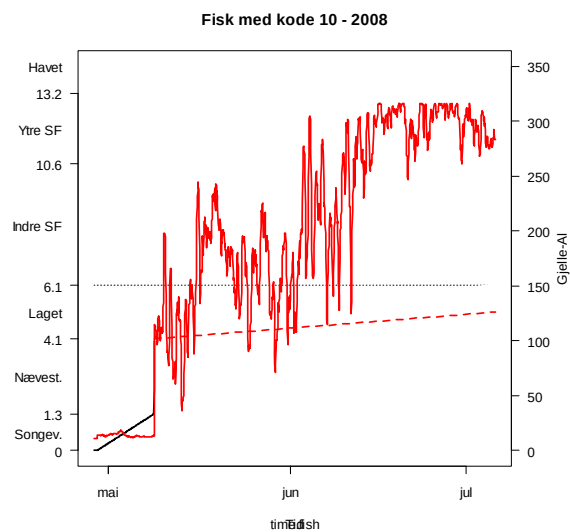
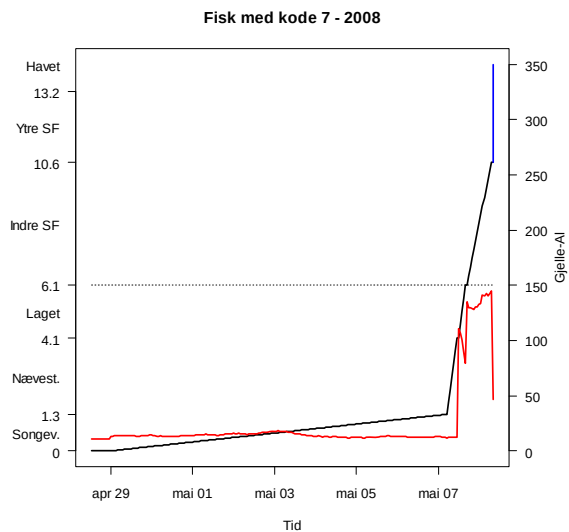


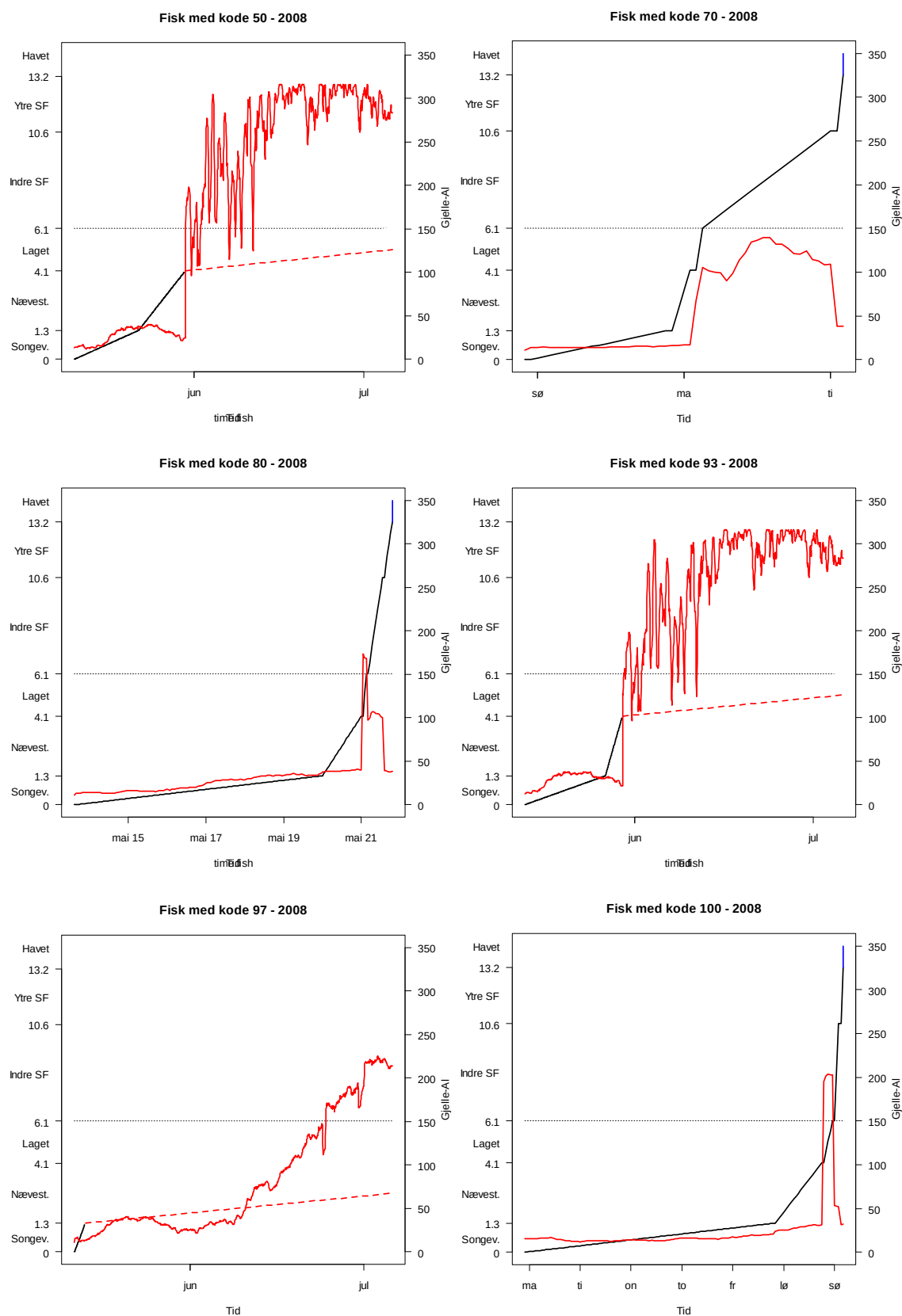




**Figur V2-1:** Utvandring mot predikert Gjelle-AI for alle smolt i 2007. Venstre vertikal akse viser distansen utover i fjordsystemet. Den hele, svarte linja angir smoltens utvandringshistorie mens den røde heltrukne linja angir predikert Gjelle-AI for 12 timers midlet salinitet.







**Figur V2-2:** Utvandring mot predikert Gjelle-AI nivå for noen utvalgte smolt i 2008. Venstre vertikale akse viser distansen utover i fjordsystemet. Den hele, svarte linja angir smoltens utvandringshistorie mens den røde heltrukne linja angir predikert Gjelle-AI for 12 timers midlet salinitet.







*Norsk institutt for naturforskning (NINA) er et nasjonalt og internasjonalt kompetansesenter innen naturforskning. Vår kompetanse utøves gjennom forskning, utredningsarbeid, overvåking og konsekvensutredninger.*

*NINAs primære aktivitet er å drive anvendt forskning. Stikkord for forskningen er kvalitet og relevans, samarbeid med andre institusjoner, tverrfaglighet og økosystemtilnærming. Offentlig forvaltning, næringsliv og industri samt Norges forskningsråd og EU er blant NINAs oppdragsgivere og finansieringskilder.*

*Virksomheten er hovedsakelig rettet mot forskning på natur og samfunn, og NINA leverer et bredt spekter av tjenester gjennom forskningsprosjekter, miljøovervåking, utredninger og rådgiving.*

ISSN:1504-3312  
ISBN: 978-82-426-2368-3

## Norsk institutt for naturforskning

NINA Hovedkontor

Postadresse: Postboks 5685 Sluppen, NO-7485 Trondheim

Besøks/leveringsadresse: Tungasletta 2, NO-7047 Trondheim

Telefon: 73 80 14 00, Telefaks: 73 80 14 01

E-post: [firmapost@nina.no](mailto:firmapost@nina.no)

Organisasjonsnummer 9500 37 687

<http://www.nina.no>

Samarbeid og kunnskap for framtidens miljøløsninger