

1867

NINA Rapport

Vanntemperatur i Lærdalselva før og etter regulering. Modellerte effekter på ungfiskvekst og vurdering av alder ved smoltifisering hos laks og ørret.

Grethe Robertsen og Ola Ugedal



NINAs publikasjoner

NINA Rapport

Dette er NINAs ordinære 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 engelsk, som NINA Report.

NINA Temahefte

Heftene utarbeides etter behov og serien favner svært vidt; fra systematiske bestemmelsesnøkler til informasjon om viktige problemstillinger i samfunnet. Heftene har vanligvis en populærvitenskapelig form med vekt på illustrasjoner. NINA Temahefte kan også utgis på engelsk, som NINA Special Report.

NINA Fakta

Faktaarkene har som mål å gjøre NINAs forskningsresultater raskt og enkelt tilgjengelig for et større publikum. 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 forskningsresultater i internasjonale vitenskapelige journaler og i populærfaglige bøker og tidsskrifter.

Vanntemperatur i Lærdalselva før og etter regulering. Modellerte effekter på ungfiskvekst og vurdering av alder ved smoltifisering hos laks og ørret.

Grethe Robertsen
Ola Ugedal

Robertson, G. & Ugedal, O. 2020. Vanntemperatur i Lærdalselva før og etter regulering. Modellerte effekter på ungfiskvekst og vurdering av alder ved smoltifisering hos laks og ørret. NINA Rapport 1867. Norsk institutt for naturforskning.

Trondheim, september 2020

ISSN: 1504-3312

ISBN: 978-82-426-4636-1

RETTIGHETSHAVER

© Norsk institutt for naturforskning

Publikasjonen kan siteres fritt med kildeangivelse

TILGJENGELIGHET

Åpen

PUBLISERINGSTYPE

Digitalt dokument (pdf)

KVALITETSSIKRET AV

Line E. Sundt-Hansen

ANSVARLIG SIGNATUR

Forskningsjef Ingeborg Palm Helland (sign.)

OPPDRAGSGIVER

Østfold Energi AS

KONTAKTPERSON HOS OPPDRAGSGIVER

Magne Netland

FORSIDEBILDE

Feltarbeid i Lærdalselva © Grethe Robertsen

NØKKEWORD

Laks, Lærdalselva, klekkespunkt, klimaendring, sjørørret, sjørørret, swim-up, temperatureffekter, vanntemperatur, vassdragsregulering, vekstmodellering, Vestland

KONTAKTOPPLYSNINGER

NINA hovedkontor
Postboks 5685 Torgarden
7485 Trondheim
Tlf: 73 80 14 00

NINA Oslo
Sognsveien 68
0855 Oslo
Tlf: 73 80 14 00

NINA Tromsø
Postboks 6606 Langnes
9296 Tromsø
Tlf: 77 75 04 00

NINA Lillehammer
Vormstuguvegen 40
2624 Lillehammer
Tlf: 73 80 14 00

NINA Bergen
Thormøhlens gate 55
5006 Bergen
Tlf: 73 80 14 00

www.nina.no

Sammendrag

Robertsen, G & Ugedal, O. 2020. Vanntemperatur i Lærdalselva før og etter regulering. Modellerte effekter på ungfiskvekst og vurdering av alder ved smoltifisering hos laks og ørret. NINA Rapport 1867. Norsk institutt for naturforskning.

Analyser av vanntemperaturer i Lærdalselva fra 1964 til 2018, ved målestasjonene Nedre Hegg og Tønjum, tilsier at reguleringen har medført små til moderate endringer ved disse målepunktene. Nedre Hegg ligger like oppstrøms Sjurhaugfoss på en strekning som er fraført vann i forbindelse med reguleringen. Tønjum ligger 3 km nedstrøms utløpet fra Stuvane kraftverk på en strekning som etter regulering har endret vannføringsregime og er påvirket av vann fra kraftverksmagasiner.

Før regulering var vanntemperaturene tilnærmet like ved Nedre Hegg og Tønjum i perioden juni-august, mens de var noe lavere ved Nedre Hegg i september-november. Ut fra et sparsomt antall målinger fra Nedre Hegg i desember-mai før regulering så var det antageligvis noe lavere temperaturer her enn ved Tønjum også i disse månedene. Etter oppstart av Borgund kraftverk i 1974 økte sommertemperaturen ved Nedre Hegg noe, som er i tråd med forventningene siden sommervannføringen ble redusert. Ved Tønjum økte temperaturen om vinteren etter regulering, mens sommertemperaturen ble lite endret etter oppstart av Borgund.

I den første tiårsperioden etter at Stuvane kraftverk ble satt i drift i 1988 falt sommertemperaturene ved både Tønjum og Nedre Hegg, for så å øke i de to påfølgende tiårsperiodene (1999-2008 og 2009-2018). Fra 1999 til 2018 har det vært en tilsvarende økning i gjennomsnittlig lufttemperatur om sommeren i Lærdal. Det er ingen åpenbar grunn til at driften av Stuvane skulle ha påvirket sommertemperaturen i elva ved Nedre Hegg som ligger oppstrøms kraftverksutløpene. Dette tyder på at økningen i vanntemperatur de siste 20 årene i stor grad er forårsaket av endringer i klimatiske forhold.

For å si noe om mulige konsekvenser av vanntemperaturendringene for laks og ørret, modellerte vi utviklingshastighet for egg og yngel, samt forventet ungfiskvekst. Vi fant små forskjeller i forventet tidspunkt for klekking og swim-up hos begge arter i periodene før og etter regulering. Det samme gjelder modellert størrelse ved alder av ungfisk. Noen forskjeller skiller seg likevel ut. Etter regulering er det modellert tidligere swim-up og raskere vekst hos både laks og ørret ved Nedre Hegg sammenlignet med Tønjum. Videre var det i tiårsperioden etter at Stuvane ble satt i drift i 1988 lavere forventet ungfiskvekst hos begge arter på Tønjum enn i de foregående periodene. Denne effekten var ikke lenger synlig etter 1999, da forventet ungfiskvekst på Tønjum også lå på et høyere nivå enn før reguleringen. Også for Nedre Hegg var modellert vekst høyere i 1999-2018 enn i 1989-1998.

Siden oppstart av Borgund kraftverk ga små temperaturendringer ved Tønjum ga det heller ikke endringer i forventet smoltalder hos laks. Modelleringen tyder også på at størrelse ved alder gikk ned ved Tønjum etter oppstart av Stuvane kraftverk, slik at smoltalder hos laks antageligvis økte i den påfølgende 10-årsperioden. Deretter tyder en økning i forventet størrelse ved alder de siste 20 årene på at forventet smoltalder ved Tønjum kan være uendret eller til og med ha blitt noe lavere enn før regulering. Ut fra modellert størrelse ved alder forventes det generelt lavere smoltalder ved Nedre Hegg sammenlignet med Tønjum. Hvorvidt dette faktisk er tilfelle avhenger av en rekke miljøforhold, som for eksempel næringstilgang og tetthet av ungfisk. Fordi ørret har svært variabel livshistorie er det vanskelig å konkludere med hensyn på hvordan endringer i vekst har påvirket smoltalder.

Vi presiserer at vi kun har vurdert temperaturforholdene ved to målepunkter i elva slik at det kan forholde seg annerledes andre steder i elva.

Grethe Robertsen (grethe.robertsen@nina.no) og Ola Ugedal (ola.ugedal@nina.no),
Norsk institutt for naturforskning, Høgskoleringen 9, 7030 Trondheim

Innhold

Sammendrag	3
Innhold	4
Forord	5
1 Innledning	6
2 Materialer og metoder	8
2.1 Temperaturdata	8
2.2 Modellering av klekketidspunkt og swim-up.....	11
2.3 Vekstmodellering	12
3 Resultater og diskusjon	13
3.1 Vanntemperatur	13
3.2 Modellert klekketidspunkt og swim-up.....	22
3.3 Modellert vekst hos ungfisk	26
3.4 Smoltalder.....	30
4 Referanser	32
5 Vedlegg	34

Forord

I denne rapporten undersøkes utviklingen i temperaturforhold i Lærdalselva før og etter regulering. Dette blir gjort ved bruk av tilgjengelige vanntemperaturdata fra målestasjonene ved Nedre Hegg og Tønjum, som er lastet ned fra NVEs database Hydra II. Nedre Hegg ligger oppstrøms Sjurhaugfoss på en strekning fraført vann fra og med opprettelsen av Borgund Kraftstasjon. Tønjum ligger 3 km nedstrøms Stuvane Kraftstasjon på en strekning hvor reguleringen har endret vannføringsregimet og som er påvirket av vann fra kraftverksmagasiner. Ved hjelp av modellering vurderer vi om eventuelle endringer i temperaturregimer kan forventes å påvirke vekst og smoltalder hos laks og sjørret. For å kunne si noe om hvorvidt eventuelle endringer i vanntemperatur også er påvirket av klimatiske endringer, blir utviklingen i lufttemperatur i Lærdal også vurdert.

Dette arbeidet er en oppfølging av analyser som ble gjennomført i Fjellstad m.fl. (2019): «*Miljødesign i Lærdalselva: Flaskehalsen for produksjon av laks og ørret*» som avdekket at vanntemperaturene ved Tønjum generelt sett var lavere enn ved Nedre Hegg i perioden 2000-2018. Disse temperaturforskjellene kan teoretisk forventes å føre til at ungfisk vokser raskere og har lavere smoltalder på strekningen som er fraført vann sammenlignet med strekningen nedstrøms utløpspunktet hvor kraftverksvann blir tilført elva.

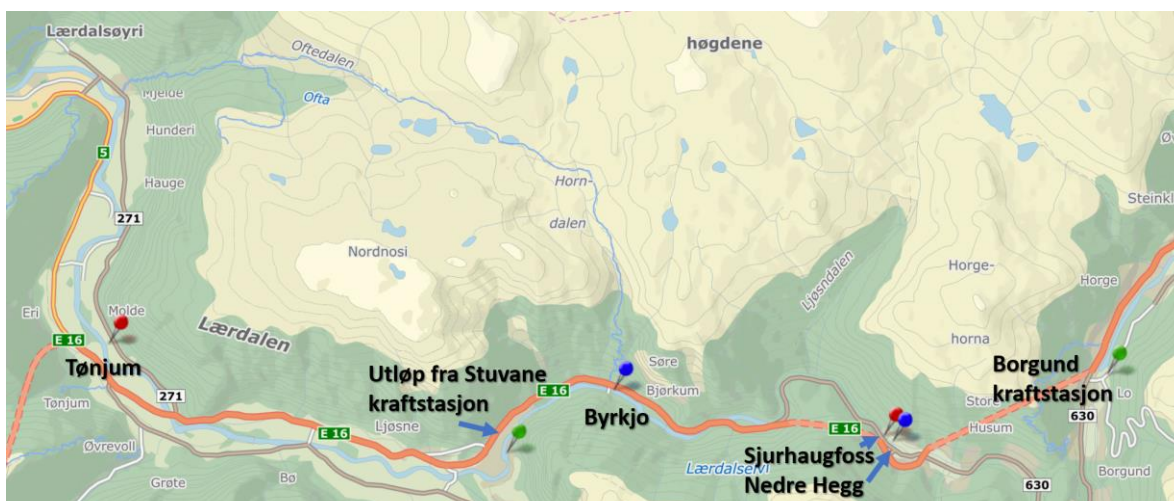
Denne undersøkelsen er gitt som et pålegg til Østfold Energi AS fra Miljødirektoratet og er en supplerende undersøkelse til miljødesignprosjektet som SINTEF Energi AS utførte i 2019.

Vi takker Østfold Energi AS for oppdraget.

18. september 2020
Grethe Robertsen

1 Innledning

Lærdalselva har status som «nasjonalt laksevasdrag» og er derved gitt en særlig beskyttelse mot aktiviteter i vassdraget og nære fjordområder som kan påvirke laksebestanden negativt. Lærdalsvassdraget har over årene blitt utsatt for en rekke inngrep som sannsynligvis har påvirket forholdene for de lokale bestandene av laks og ørret (oppsummert i Sættem 2020). Blant disse påvirkningsfaktorene er bygging av tersker, infeksjon av lakseparasitten *Gyrodactylus salaris* og behandlinger for å utrydde denne i perioden 1995-2012, samt vasskraftregulering. Som en del av reguleringen fungerer flere innsjøer som reservoarer for et inntaksmagasin i Vassevatn. Fra Vassevatn blir vann hentet inn til Borgund kraftverk, som ligger oppstrøms opprinnelig anadrom strekning og ble satt i drift i 1974. I perioden mellom 1974 og fram til Stuvane kom i drift i 1988 ble vannet fra Borgund tilført elva ved Sjurhaugfoss eller ved Byrkjo via en omløpstunell. I 1988 ble denne tunnelen forlenget for å føre vannet inn i Stuvane kraftverk, før det renner inn i elva nedstrøms kraftverket (omtrent midt i opprinnelig anadrom strekning, se **figur 1.1**). Dette betyr at elva fra 1988 i deler av året er fraført vann ned til utløpstunellen fra Stuvane kraftverk, men i noen tilfeller blir vann fra Borgund kraftstasjon tilført elva ved Sjurhaugfoss (**figur 1.1**).



Figur 1.1. Plasseringen av Borgund kraftstasjon, målestasjonen ved Nedre Hegg, Sjurhaugfoss, utløpet av omløpstunellen fra Borgund nedstrøms Byrkjo, utløpet fra Stuvane kraftverk og målestasjonen ved Tønjum.

På oppdrag fra Østfold Energi AS ble metodikk fra «Håndbok for miljødesign i regulerte laksevasdrag» (Forseth og Harby 2013) brukt til å identifisere flaskehals for produksjon av laks i Lærdalselva (Fjellstad m.fl. 2019). Blant undersøkelsene som ble gjort var en analyse av vanntemperaturer ved to målepunkter: Nedre Hegg, som ligger på strekningen mellom Borgund og Stuvane kraftverk, og Tønjum, som ligger nedstrøms Stuvane kraftstasjon (**figur 1.1**). I disse analysene ble det avdekket at det var forskjeller i vanntemperaturene på Nedre Hegg og Tønjum i perioden 2000-2018. Disse forskjellene var store nok til å potensielt forårsake ulike vekstmønstre hos laks. Spesifikt ble det rapportert at sommertemperaturene ved Tønjum var lavere enn ved Nedre Hegg, og at dette kan ha gitt høyere smoltalder hos laks nedstrøms Stuvane sammenlignet med i strekningen med fraført vann. Basert på undersøkelsene i Fjellstad m.fl. (2019) var det imidlertid ikke mulig å vurdere hvordan vassdragsreguleringen hadde påvirket temperaturforholdene. For å si noe om dette trengs en grundig vurdering av hvordan vanntemperaturene ved de to omtalte målepunktene utviklet seg fra perioden før Borgund kraftverk ble satt i drift i 1974, i perioden etter at Borgund kom i drift og fram til Stuvane kraftverk ble satt i drift i 1988, og i perioden etter at Stuvane ble satt i drift. I dette prosjektet bruker vi vanntemperaturdata fra målestasjonene ved Tønjum og Nedre Hegg til å vurdere om 1) vanntemperaturregimet

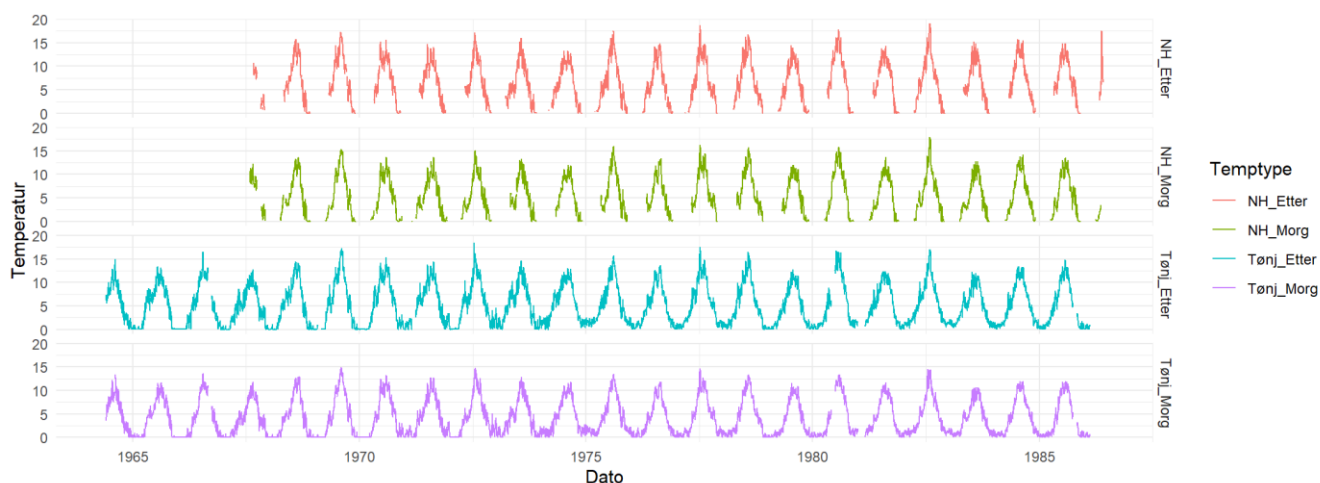
i elva endret seg etter at Borgund kraftverk ble satt i drift, 2) vanntemperaturene endret seg nedstrøms utløpet fra Stuvane kraftverk etter at dette ble satt i drift, og 3) hvordan eventuelle endringer i vanntemperaturer kan forventes å påvirke vekst og smoltalder hos ungfisk av laks og sjørøret. I tillegg har vi undersøkt om endringer i klimatiske forhold gitt ved utvikling i lufttemperatur også kan bidra til å forklare endringer i vanntemperatur i Lærdalselva.

2 Materialer og metoder

2.1 Temperaturdata

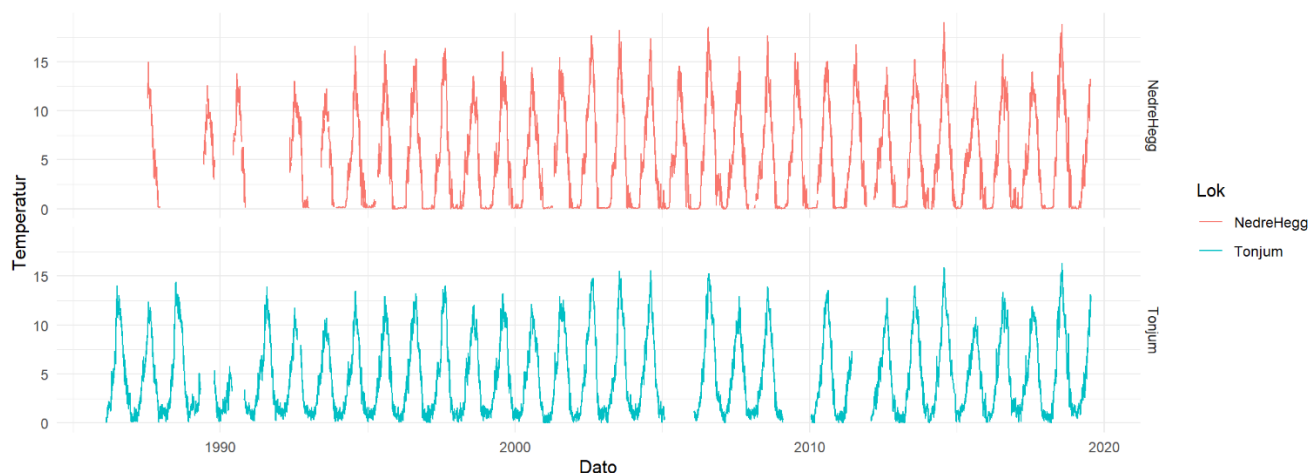
Vanntemperatur

Tilgjengelige vanntemperaturdata fra målestasjonene Nedre Hegg (stasjonsnummer: 73.42.0, UTM 33: 109312Ø, 6789960N) og Tønjum (stasjonsnummer: 73.41.0, UTM33: 96712Ø, 6792981N) fram til 2018 ble lastet ned fra NVEs database Hydra II. Ved Nedre Hegg ble vanntemperaturen målt manuelt i perioden 1967-1986 og da ofte en gang om morgenen rundt kl. 08 og en gang om ettermiddagen rundt kl. 20 (**figur 2.1**). Ved Tønjum ble det i perioden 1964-1985 målt vanntemperatur manuelt, ofte én gang om morgenen omtrent kl. 07 og en gang om ettermiddagen omtrent kl. 19 (**figur 2.1**). Disse klokkeslettene var de eneste som var funnet oppgitt i skjemaer med rådata og det ble derfor antatt at målingene ble tatt rundt disse tidspunktene gjennom hele tidsrommet for de manuelle dataseriene. Ved Tønjum ble det vanligvis gjennomført to målinger per dag gjennom hele året, og dataserien har få lange perioder uten målinger. Ved Nedre Hegg ble det gjennomført to målinger per dag fra 15. mai og ut november i perioden 1967-1974 og fra 1. mai og ut november i perioden 1975-1986. Om vinteren og våren var det mer sporadiske målinger og da vanligvis bare en gang i døgnet.



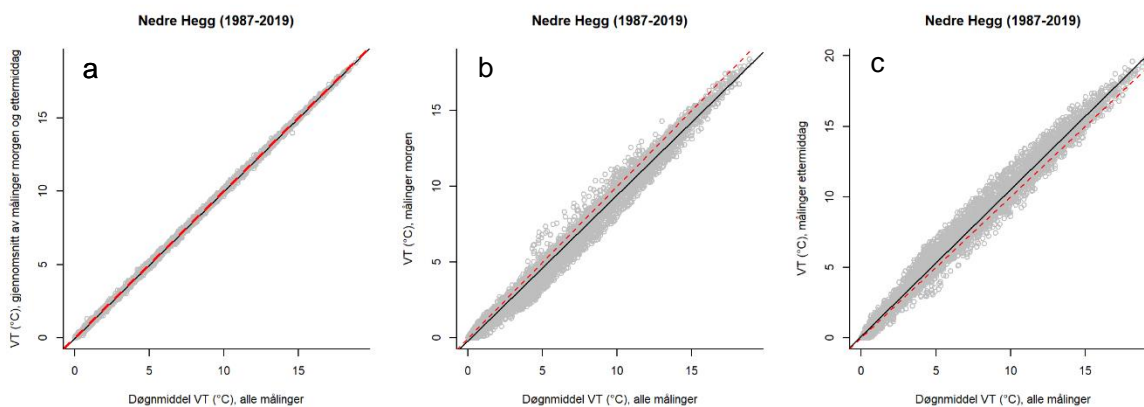
Figur 2.1. Manuelle måleserier av vanntemperaturer (°C) morgen og ettermiddag fra Nedre Hegg (1967-1986) og Tønjum (1964-1985).

På Nedre Hegg ble vanntemperaturen målt med loggere fra 1987 og utover og ved Tønjum fra 1986 (**figur 2.2**). De første årene ble temperaturen logget fra 4-6 ganger i døgnet. Deretter ble målehyppigheten økt til 8-12 ganger i døgnet før det fra juli 2014 ble foretatt logginger hver time. Både ved Nedre Hegg og Tønjum er det lengre perioder uten temperaturmålinger i dataserien (**figur 2.2**). Vi har brukt døgnmiddelverdier siden det også gikk inn i modellene som predikerer klekkesetidspunkt, swim-up og vekst (beskrevet i kapitlene **2.2 Modellering av klekkesetidspunkt og swim-up** og **2.3 Vekstmodellering**). Små hull i temperaturdataseriene ble fylt inn med estimater fra lineære regresjoner mellom nærmeste målte temperaturer før og etter. Lengre perioder med manglende data ble ikke forsøkt estimert. Ved analyser av vanntemperatur i ulike perioder har vi regnet ut månedsmiddelverdier basert på døgnverdiene, og i de videre analysene er det bare benyttet måneder hvor det finnes data for hele måneden. Ved sammenlikning av perioder har vi regnet ut gjennomsnittlig månedsmiddelverdi for de ulike månedene.

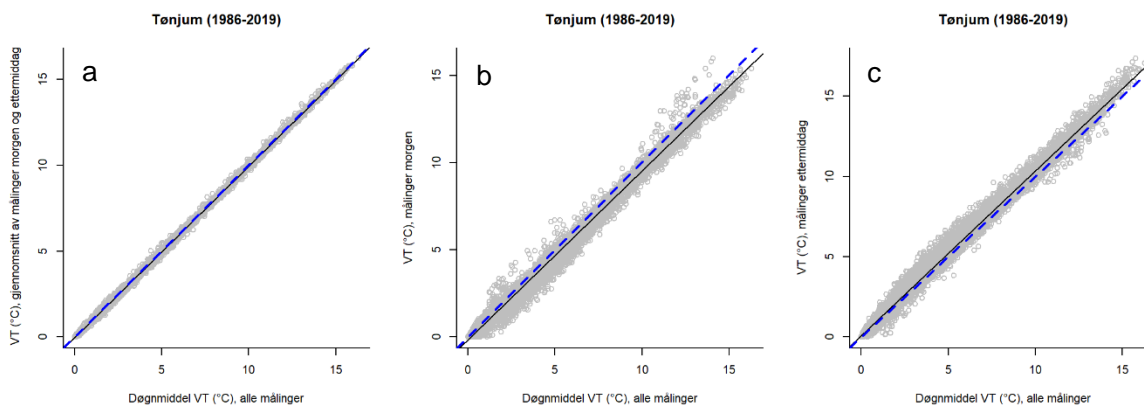


Figur 2.2 Døgn gjennomsnitt av loggede vanntemperaturer (°C) fra Nedre Hegg (1987-2019) og Tønjum (1986-2019).

Endringene i prosedyrer for måling av vanntemperaturer er en potensiell metodisk utfordring i og med at døgn gjennomsnitt beregnet basert på to vs. mange målinger i døgnet ikke nødvendigvis blir like. Vi undersøkte dette ved å sammenligne gjennomsnitt av loggede vanntemperaturer morgen (kl. 06-09) og ettermiddag (kl. 18-21) med døgn gjennomsnitt basert på alle loggede temperaturer. Dette ble gjort med temperaturseriene fra både Nedre Hegg og Tønjum (**figur 2.3a og 2.4a**).



Figur 2.3. Døgnmiddel vanntemperatur ved Nedre Hegg basert på alle loggede målinger sammenlignet med gjennomsnittet av målinger a) morgen (06-09) og ettermiddag (18-21), b) kun morgen (06-09) og c) kun ettermiddag (18-21). Sort linje viser forhold estimert i lineære regresjoner og rød stiple linje representerer et én-til-én-forhold.



Figur 2.4. Døgnmiddel vanntemperatur ved Tønjum basert på alle loggede målinger sammenlignet med gjennomsnittet av målinger a) morgen (06-09) og ettermiddag (18-21), b) kun morgen (06-09) og c) kun ettermiddag (18-21). Sort linje viser forhold estimert ved lineære regresjoner og blå stiplede linje representerer et én-til-én-forhold.

Det estimerte forholdet mellom døgnmiddelverdier som var basert på alle loggede temperaturer og døgnmiddelverdier som var basert på snittet av loggede temperaturer morgen og ettermiddag sammenfaller med et én-til-én-forhold. Dette forteller oss at gjennomsnitt av morgen og ettermiddagsmålingene representerer døgnmiddel vanntemperatur på en god måte. Forholdet mellom døgnmiddelverdier basert på snittet av loggede verdier og målinger morgen (06-09) og ettermiddag (18-21) hver for seg er mer forskjellig (**figur 2.3b,c og 2.4b,c**). Bruk av enten morgen eller ettermiddagsmålinger vil dermed gi et mindre korrekt bilde av temperaturendringene mens gjennomsnittet av morgen og ettermiddagsmålinger synes å være en god tilnærming. Altså vil metodeforskjeller mellom periodene før og etter 1988 neppe påvirke resultatene så lenge vi bruker gjennomsnittet av morgen og ettermiddagsmålinger i periodene før det ble brukt loggere.

Vi kunne dermed bruke døgnmiddel vanntemperaturdata fra Nedre Hegg (1967-2018) og Tønjum (1964-2018) til å undersøke om vanntemperaturregimet på 1) strekningen oppstrøms utløpspunktet hvor vannet fra Borgund kraftverk blir tilført elva, og 2) på strekningen nedstrøms utløpet fra Stuvane kraftverk, endret seg da Borgund ble satt i drift i 1974 eller da Stuvane ble satt i drift i 1988. Dataseriene for manuelle målinger av vanntemperatur ved Tønjum før regulering (1964-1973) og etter oppstart av Borgund kraftverk er begge på om lag 10 år (1975-1985). For å undersøke om det var en utvikling i vanntemperatur over tid ble den 30 år lange tidsperioden med data etter oppstart av Stuvane kraftverk delt i tre 10-års perioder: 1989-1998, 1999-2008 og 2009-2018. I alt ble det analysert data i følgende perioder:

- 1) oppstart av temperaturmålinger (1964 for Tønjum, 1967 for Nedre Hegg) -1973
- 2) 1975-slutt på manuell måleserie (1985 for Tønjum, 1986 for Nedre Hegg)
- 3) 1989-1998
- 4) 1999-2008
- 5) 2009-2018

Vi utelukket oppstartsårene for de to kraftverkene fordi vi ikke kjenner til de eksakte tidspunktene for oppstart.

En sammenligning av morgen og ettermiddagsmålinger i Lærdalselva viser at gjennomsnittstemperaturen i juni-september, som er de viktigste månedene for vekst hos ungfisk, var henholdsvis 1,4 °C og 1,3 °C høyere om ettermiddagen enn om morgenen både ved Nedre Hegg og Tønjum før regulering (**vedlegg 1**). Forskjellen mellom morgen og ettermiddagsmålinger var nøyaktig like stor i perioden etter at Borgund kraftverk ble satt i drift (**vedlegg 1**).

Lufttemperatur

Målingene av vanntemperatur i Lærdalsvassdraget dekker en periode på 55 år, og det har sannsynligvis vært variasjoner i klimatiske forhold som påvirker vanntemperaturen i løpet av denne perioden (Hanssen-Bauer m.fl. 2015). For å få et begrep om hvorvidt de ulike tidsperiodene har hatt ulike klimatiske forhold har vi gjort en enkel analyse av om og eventuelt hvordan lufttemperaturen har endret seg i løpet av perioden 1964-2018. Data for månedsmiddel lufttemperatur for Lærdal ble lastet ned fra Meteorologisk institutt (www.eklima.no) for perioden 1964-2018. I denne perioden har beliggenheten til stasjonen for målinger av lufttemperatur i Lærdal endret seg. Fram til og med april 1996 ble temperaturen målt ved stasjonen Lærdal-Tønjum (stasjonsnummer: 54130; hoh: 36 m; 61.0617 N, 7.5167 Ø). Fra og med mai 1996 til og med september 2008 ble målingene foretatt ved Lærdal-Moldo (stasjonsnummer: 54120; hoh: 24 m; 61.0663 N, 7.5142 Ø). Fra og med oktober 2008 til og med i dag skjer målingene ved stasjonen Lærdal IV (stasjonsnummer: 54110; hoh: 2 m; 61.1033 N, 7.5025 Ø). Vi har ikke innhentet noen vurdering av om flytting av stasjon har betydning for hvor sammenliknbare dataene er over tid, men i det videre arbeidet har vi antatt at endringen i stasjonsplassering ikke har hatt vesentlig betydning for sammenlikningen mellom tidsperioder.

2.2 Modellering av klekkesidspunkt og swim-up

Utviklingshastigheten til egg og yngel av fisk avgjøres i stor grad av temperaturene i det omkringliggende vannet. Ved hjelp av utviklingsmodeller for egg og yngel (Crisp 1981, 1988) modellerte vi median tidspunkt for klekking og swim-up fra døgntemperaturer basert på vanntemperaturseriene ved Nedre Hegg (1989-2018) og Tønjum (1964-2018). Vi benyttet de samme fem periodene som beskrevet i kapittel 2.1 **Temperaturdata**.

Borgund kraftverk ble satt i drift i 1974, og vanntemperaturdata fra dette året er utelatt siden det er mulig at kjøringen av kraftverket var uvanlig i forbindelse med oppstarten. Det sammen gjelder for 1988 da Stuvane kraftverk ble satt i drift. Ved å dele opp den lange perioden etter at begge kraftverkene var satt i drift (1989-2018) i 10-årsintervaller har vi mulighet til å fange opp eventuelle endringer forårsaket av eksempelvis klimatiske trender eller forandringer i kjøringen av kraftverkene. Siden Crisp-modellen krever vanntemperaturdata med kontinuerlige målinger, er kun år som mangler få verdier for døgnmiddel av vanntemperatur inkludert. For år med gode data men med enkelte manglende målinger av vanntemperaturer over begrensede tidsperioder, er manglende målinger estimert med en lineær regresjon mellom de to nærmeste kjente verdiene. Selv om det ved Tønjum foreligger loggede målinger fra 1986 og ved Nedre Hegg fra 1987, er disse to årene utelatt siden det kun er to år med vanntemperaturdata for Tønjum og et år med svært mangelfulle data fra Nedre Hegg i perioden fra oppstart av de loggede dataseriene til kraftstasjonen ved Tønjum ble satt i drift (**figur 2.2**).

Gytetiden for laks i Lærdalselva er fra ultimo oktober til medio november (Sættem pers med), som tilsvarer omtrent 21. oktober til 20. november. Tidspunkt for klekking og swim-up for laks ble modellert for gytetidatoen 5. november, som ligger midt i perioden fra 21. oktober til 20. november. Denne dato ligger innenfor oppgitt gyteperiode i Gabrielsen m.fl. (2003), som ut fra stryketidspunktet av stamfisk og observasjoner av gytefisk satte den fra 25 oktober til 11 november.

Sjørreteten i Lærdal gyter fra primo oktober til primo november (Sættem pers med), altså omtrent fra 1. oktober til 10. november. Vi brukte utviklingsmodellene til Crisp (1981, 1988) til å modellere tidspunkt for klekking og swim-up for ørret med gytedato 21. oktober, som er midt i den forventede gyteperioden. Tidspunkt for klekking og swim-up hos ørret ble modellert ved bruk av de samme vanntemperaturdataene og periodene som de vi brukte for laks.

2.3 Vekstmodellering

Vekst hos årsyngel (0+), ettåringer (1+) og toåringer (2+) av laks og ørret ble modellert med bruk av temperaturdata for Nedre Hegg og Tønjum for hver av de samme fem periodene som er beskrevet i **2.1. Temperaturdata**. Dette ble gjort ved bruk av en Ratkowsky-modell (Ratkowsky m.fl. 1983) tilpasset laks og ørret (Jonsson m.fl. 2001; Forseth m.fl. 2001, 2009; Forseth og Harby 2013). I disse modellene ble kroppsmassen til ungfisk ved et gitt tidspunkt (M_t) modellert som en funksjon av temperatur som følgende:

$$M_t = (M_0^b + (b * (t * d(T - T_L) * (1 - e^{g(T-T_U)})))/100))^{1/b},$$

hvor T er observert temperatur, T_L og T_U er henholdsvis nedre og øvre kritisk temperatur for vekst, t er antall dager, og d og g er konstanter. I modelleringen av vekst hos ungfisk av laks brukte vi følgende parameterverdier hentet fra Jonsson m.fl. (2001): $T_L = 6,9$, $T_U = 24,3$, $d = 0,374$, $g = 0,201$, og vi tok utgangspunkt i en startvekt på 0,2 g (jfr. Gabrielsen m.fl. 2003). Vekst hos ungfisk av ørret ble modellert ved bruk av parameterverdier fra Forseth m.fl. (2009): $T_L = 5,4$, $T_U = 23,3$, $d = 1,1$ og $g = 0,03$. Startvekten ved første næringsinntak ble satt til 0,15 g for ørreten (jfr. Skoglund m.fl. 2012). For begge arter brukte vi et allometrisk forhold mellom kroppsstørrelse og vekstrate estimert for laks: $b = 0,31$ (Elliott og Hurley 1997). Median dato for swim-up for gyting midt i gyteperiodene for laks og ørret som ble beregnet for de fem periodene i foregående kapittel ble brukt som startdato i vekstmodellene. Veksten ble antatt å være lik null når $T < T_L$. Modellen forutsetter ubegrenset tilgang på mat. Dette er en forutsetning som ikke alltid er oppfylt under naturlige forhold.

For å kunne gjøre en vurdering av om oppnådd kroppsstørrelse ved alder sannsynliggjør smoltifisering i løpet av påfølgende vår omregner vi modellert kroppsmasse for laks ved slutten av hver vekstsesong til total lengde (mm) ved bruk av følgende forhold hentet fra Weatherley (1972):

$$Lengde = \left(\frac{10^5 * M_t}{0,84} \right)^{1/3}.$$

Vi brukte følgende forhold for ørret for å ta høyde for at den har høyere kondisjonsfaktor enn laks:

$$Lengde = \left(\frac{10^5 * M_t}{1} \right)^{1/3},$$

M_t er kroppsvikt ved et gitt tidspunkt t .

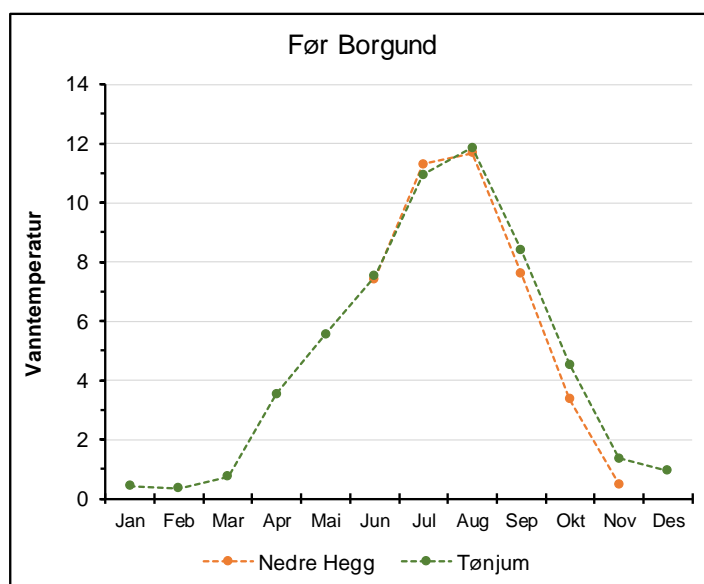
For begge arter ble ungfiskvekst beregnet som vekt (g) ved et gitt tidspunkt (t) ved bruk av gjennomsnittlig døgntemperaturer per kalenderdato (juliansk dato) for Tønjum og Nedre Hegg. For hver av de samme fem periodene som er beskrevet i **2.1. Temperaturdata**, ble gjennomsnittet av tilgjengelige døgntemperaturer fra hhv. Nedre Hegg og Tønjum beregnet for hver kalenderdato. Innenfor hver periode er verdien for enkelte kalenderdatoer basert på flere år med observasjoner enn andre. Denne tilnærmingen ble brukt for å sikre at flest mulig av de tilgjengelige temperaturmålingene ble inkludert.

3 Resultater og diskusjon

3.1 Vanntemperatur

Før regulering: Nedre Hegg vs. Tønjum

Vanntemperaturen før regulering ved Nedre Hegg og Tønjum kan sammenliknes direkte for månedene juni-november for årene 1968-1973. En sammenlikning basert på gjennomsnitt av månedsmiddelverdier disse seks årene viser at temperaturen var tilnærmet lik ($< 0,3$ °C forskjell) i juni-august ved de to målestedene, mens temperaturen var noe lavere (0,8-1,1 °C) ved Nedre Hegg i september-november (**figur 3.1**). I 1971 foreligger det målinger for hele mai på begge stasjonene og dette året var gjennomsnittstemperaturen 4,2 og 5,5 °C ved henholdsvis Nedre Hegg og Tønjum. I de andre årene foreligger det målinger på Nedre Hegg fra og med 15. mai og gjennomsnittstemperaturen for siste halvdel av mai var 1,0 °C høyere ved Tønjum enn ved Nedre Hegg. Disse resultatene tyder på at vanntemperaturen økte noe senere på våren ved Nedre Hegg enn ved Tønjum før regulering. I perioden desember-april foreligger bare sporadiske målinger av vanntemperatur ved Nedre Hegg og vanligvis bare på ett tidspunkt på døgnet. Det er derfor ikke mulig å gjøre en direkte sammenlikning av målinger med Tønjum, men hvis vi tar gjennomsnittet av alle målinger de ulike månedene tyder resultatene på at temperaturen gjennomgående var lavere ved Nedre Hegg enn ved Tønjum i hele perioden desember-april.

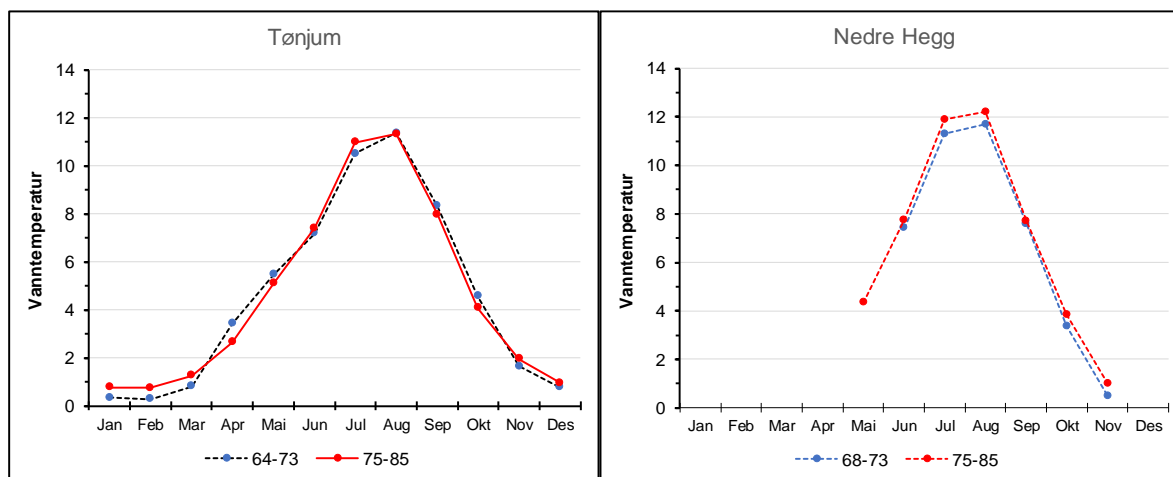


Figur 3.1. Vanntemperatur (°C) ved Nedre Hegg og Tønjum i Lærdalselva før oppstart av Borgund kraftverk. Figuren viser gjennomsnitt av månedsmiddelverdier (snitt av daglige manuelle målinger på morgen og ettermiddag) for årene 1968-1973. Kun måneder med tilnærmet komplette data med målinger to ganger om dagen er inkludert i beregningene. Data fra NVE.

Etter oppstart av Borgund kraftverk

Etter oppstart av Borgund kraftverk viser målingene ved Nedre Hegg at gjennomsnittstemperaturen for perioden 1975-1985 var lik eller noe høyere enn i perioden 1968-1973 for alle månedene juni-november. Forskjellene var størst i juni og juli med henholdsvis 0,6 og 0,5 °C høyere temperatur etter regulering (**figur 3.2**).

Ved Tønjum var gjennomsnittstemperaturen også noe høyere etter oppstart av Borgund kraftverk (1975-1985) for alle måneder i perioden november-mars sammenliknet med før oppstart (1964-1973). I april og mai var temperaturen noe lavere, mens det i juni-september var små forskjeller i gjennomsnittstemperatur mellom de to periodene. Dette resultatet er i samsvar med tidligere analyser av temperaturforhold i Lærdalselva etter at Borgund kraftverk startet opp (se Saltveit 1986). Den mest markerte endringen skjedde i vinterhalvåret med om lag 0,5 °C høyere temperatur i januar-mars. Gjennomsnittsberegningene tyder også på at temperaturen i april avtok med om lag 1°C etter oppstart av Borgund, men dette kan delvis være påvirket av tilfeldig mellomårsvariasjon på grunn av at vi sammenlikner korte tidsperioder. En nærmere inspeksjon av dataene viser at temperaturen i april i 1971-1973 var vesentlig høyere (4,2 °C i alle tre år) enn i de andre årene i perioden 1964-1970 (2,5-3,7 °C). Nedgangen i april-temperatur ved Tønjum etter regulering kan derfor være noe overvurdert.



Figur 3.2. Vanntemperatur (°C) ved Tønjum og Nedre Hegg i Lærdalselva før (1964-1973) og etter (1975-1985) oppstart av Borgund kraftverk. Figuren viser gjennomsnitt av månedsmiddelverdier (snitt av daglige manuelle målinger på morgen og ettermiddag). Kun måneder med tilnærmet komplette data med målinger to ganger om dagen er inkludert i beregningene. Målingene ved Nedre Hegg før regulering dekker en kortere periode (68-73) enn ved Tønjum (64-73). Data fra NVE.

Fra og med februar 1986 ble temperaturen ved Tønjum registrert med logger slik at vi også har målinger fra og med mars 1986 og frem til Stuvane kraftverk ble startet opp i august 1988. Hvis vi inkluderer data fra 1986 og 1987 i beregningene av gjennomsnittstemperatur etter oppstart av Borgund kraftverk (dvs. beregner for hele perioden 1975-1987) får vi samme resultat som hvis vi bare benytter de manuelle målingene i perioden 1975-1985.

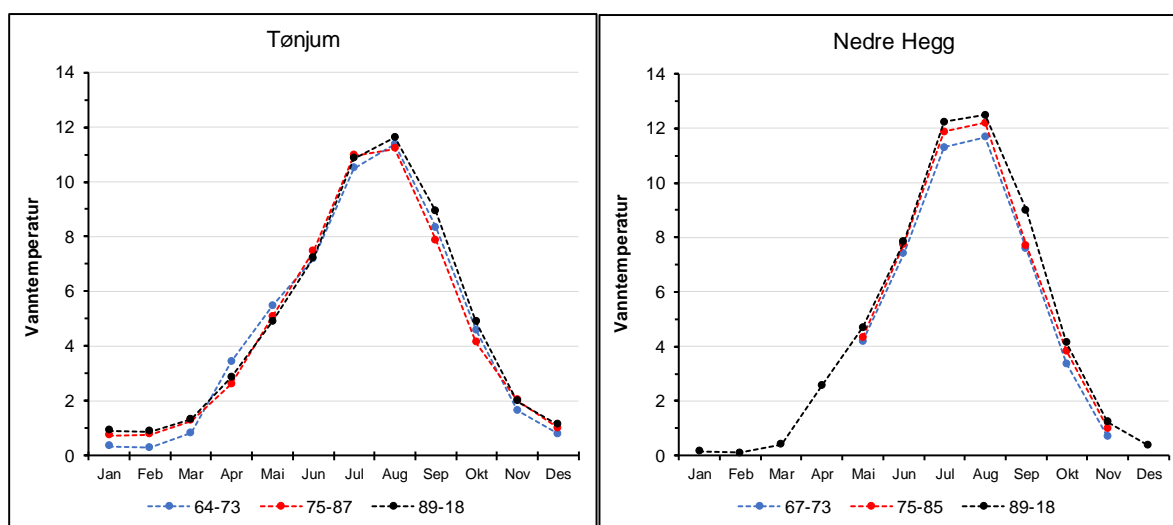
Etter oppstart av Stuvane kraftverk

En sammenlikning av månedsmiddelverdier for en 30-års periode (1989-2018) ved Tønjum etter oppstart av Stuvane kraftverk i 1988, med målingene fra 1975-1987 viser at det var små forskjeller (< 0,3 °C) i alle måneder fra oktober-juli. I august, september og oktober var middeltemperaturen henholdsvis 0,4, 1,1 og 0,7 grader høyere etter oppstart av Stuvane (**figur 3.3**), hvis en

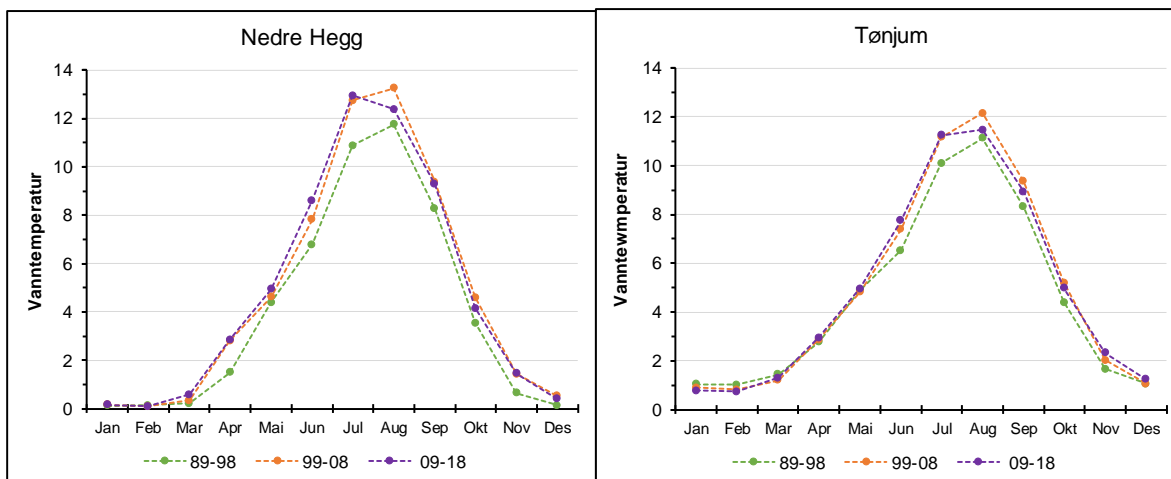
sammenlikner med målingene før regulering. Disse resultatene tyder altså på at vanntemperaturen ved målepunktet Tønjum økte noe både om sommeren og vinteren etter oppstart av Stuvane kraftverk.

En oppdeling av denne 30-årsperioden i tre 10-års perioder viser imidlertid at snittemperaturen i månedene juni-oktober var høyere i de siste to periodene (1999-2008 og 2009-2018) enn den første perioden etter oppstart av Stuvane kraftverk (1989-1998). I månedene oktober-mai var det små forskjeller i månedsmiddeltemperatur mellom de tre tiårsperiodene (**figur 3.4**), men temperaturen i juni og juli var vesentlig lavere i 1989-1998 enn de to senere periodene.

Målingene ved Nedre Hegg viser også at temperaturen i juni-oktober var høyere etter oppstart av Stuvane kraftverk hvis vi sammenlikner hele perioden 1998-2018 med de to periodene før oppstart av kraftverket (**figur 3.3**). Ved Nedre Hegg var også sommertemperaturen vesentlig høyere de to siste 10-års periodene enn i perioden 1989-1998, noe som er i samsvar med utviklingen ved Tønjum (**figur 3.4**). Det er ingen åpenbar grunn til at driften av Stuvane kraftverk skulle ha en slik påvirkning på sommertemperaturen ved Nedre Hegg som ligger oppstrøms kraftverksutløpene. Endringer i klimatiske forhold som påvirker vanntemperaturen framstår derfor som en mulig forklaring til at vanntemperaturene om sommeren i gjennomsnitt har vært høyere de siste 20-årene enn de var i 1989-1998 både ved Nedre Hegg og ved Tønjum. Variasjoner i vanntemperaturer både ved Nedre Hegg og Tønjum kan også være påvirket av forskjeller i tidspunkt for snøsmelting og tilsig mellom år. Hvis ulike tidsperioder er vesentlig forskjellig med hensyn på slike klimatiske forhold vil dette også kunne påvirke gjennomsnittlig vanntemperatur i samme periode. Ved Tønjum kan endringer i vanntemperaturen over tid etter oppstart av Stuvane kraftverk også være forbundet med eventuelle endringer i drift av magasinene og kraftverkene i løpet av perioden 1989-2018. Vi har ikke kunnskap om hvorvidt det har skjedd slike endringer og kan derfor ikke vurdere om, og eventuelt i hvor stor grad dette har påvirket temperaturutviklingen i perioden 1989-2018.



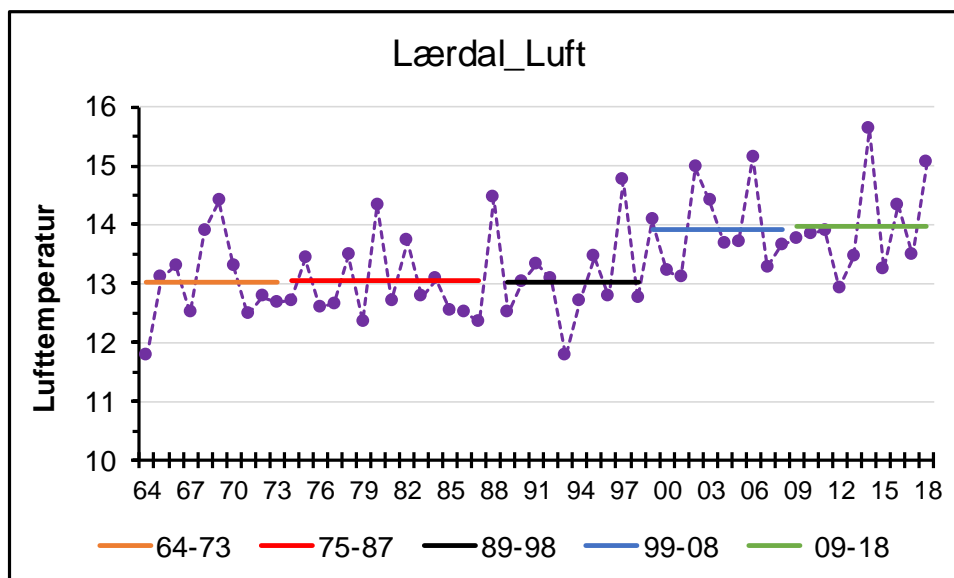
Figur 3.3. Vanntemperatur (°C) ved Tønjum og Nedre Hegg i Lærdalselva før (1964-1973) og etter (1975-1985) oppstart av Borgund kraftverk, og etter oppstart av Stuvane kraftverk (1989-2018). Figuren viser gjennomsnitt av månedsmiddelverdier for de aktuelle årene. Målingene ved Nedre Hegg før regulering (68-73) og i perioden med drift i bare Borgund kraftverk (75-85) dekker en kortere periode enn ved Tønjum (64-73 og 75-87). Data fra NVE.



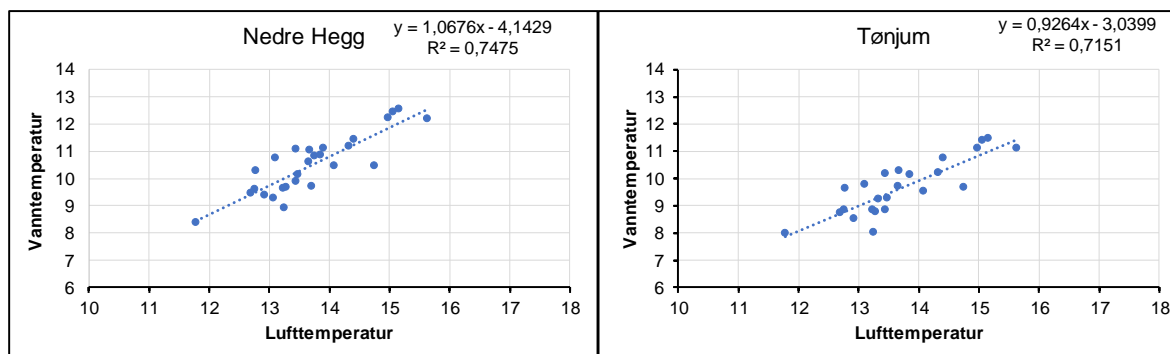
Figur 3.4. Vanntemperatur (°C) ved Nedre Hegg og Tønjum i Lærdalselva vist som gjennomsnitt for tre tiårs-perioder (1989-1998, 1999-2008 og 2009-2018) etter oppstart av Stuvane kraftverk. Figuren viser gjennomsnitt av månedsmiddelværdier for alle måneder med komplette data i de ulike tiårs-periodene. Vi gjør oppmerksom på at det er flere måneder med manglende data ved begge stasjonene og at det ikke nødvendigvis er overlapp i manglende data mellom målepunktene.

En sammenlikning av gjennomsnittlig månedsmiddel lufttemperatur i de tre 10-års periodene etter at Stuvane kraftverk ble satt i produksjon viser at lufttemperaturen om sommeren var en god del høyere i de to siste periodene enn i perioden 1989-2018 (**figur 3.5**). I perioden juni-september, som er de viktigste for fiskevekst, var gjennomsnitt for disse månedene 13,0 °C i 1989-1998. Dette er en god del lavere enn i 1999-2008 og 2009-2018 som hadde gjennomsnitt på henholdsvis 14,0 og 13,9 °C.

Hvis vi sammenlikner sommertemperaturer i vekstperioden så var det svært god overensstemmelse mellom perioden 1989-1998 og periodene før regulering og perioden etter oppstart av Borgund kraftverk (**figur 3.5**). Snittemperaturen for månedene juni-september var 13,0 og 13,1 °C i de to periodene før oppstart av Stuvane kraftverk og 13,0 °C i 10-årsperioden etter oppstart, noe som kan tyde på at klimatiske forhold som er direkte knyttet til lufttemperatur og som påvirker vanntemperaturen, ikke endret seg vesentlig i perioden 1964-1998. Dette innebærer at de forskjellene vi finner i vanntemperatur om sommeren i disse tre periodene kan være forårsaket av reguleringen.



Figur 3.5. Lufttemperatur om sommeren gitt som gjennomsnittlig temperatur (°C) i juni-september ved målestasjoner i Lærdal i perioden 1964-2018. Heltrukne linjer angir gjennomsnittsverdier for ulike tidsperioder: Før regulering (1964-1973), etter oppstart av Borgund kraftverk (1975-1987), og etter oppstart av Stuvane kraftverk (1989-1998, 1999-2008 og 2009-2018). Beliggenhet av stasjon for temperaturmålinger er endret to ganger i løpet av perioden. Data fra Meteorologisk institutt.



Figur 3.6. Sammenhenger mellom gjennomsnittlig lufttemperatur og gjennomsnittlig vanntemperatur om sommeren, juni-september, i Lærdalselva i perioden 1998-2018 ved de to målepunktene for vanntemperatur ved Nedre Hegg og ved Tønjum. Data fra NVE og Meteorologisk institutt.

Det er sterke positive sammenhenger mellom lufttemperatur og vanntemperatur om sommeren i perioden 1989-2018, både ved Nedre Hegg og ved Tønjum (**figur 3.6**). Dette tyder på at økningen i vanntemperatur om sommeren ved begge disse målepunktene de siste 20-årene er påvirket av økt lufttemperatur enten direkte eller indirekte.

Det kan også nevnes at en regresjonsanalyse med både gjennomsnittlig lufttemperatur og gjennomsnittlig vannføring i sommermånedene ga en høyere forklaringsgrad for variasjonen i gjennomsnittlig vanntemperatur om sommeren både ved Nedre Hegg (vannføringer fra Lo Bru) og ved Tønjum (vannføringer fra Stuvane/Båthølen) enn regresjonsanalyser med lufttemperatur som eneste forklaringsvariabel. Ved begge målepunktene var det en signifikant positiv sammenheng mellom vanntemperatur og lufttemperatur og en signifikant negativ sammenheng mellom vanntemperatur og vannføring. Slike sammenhenger påvirker ikke konklusjonene av vår analyse

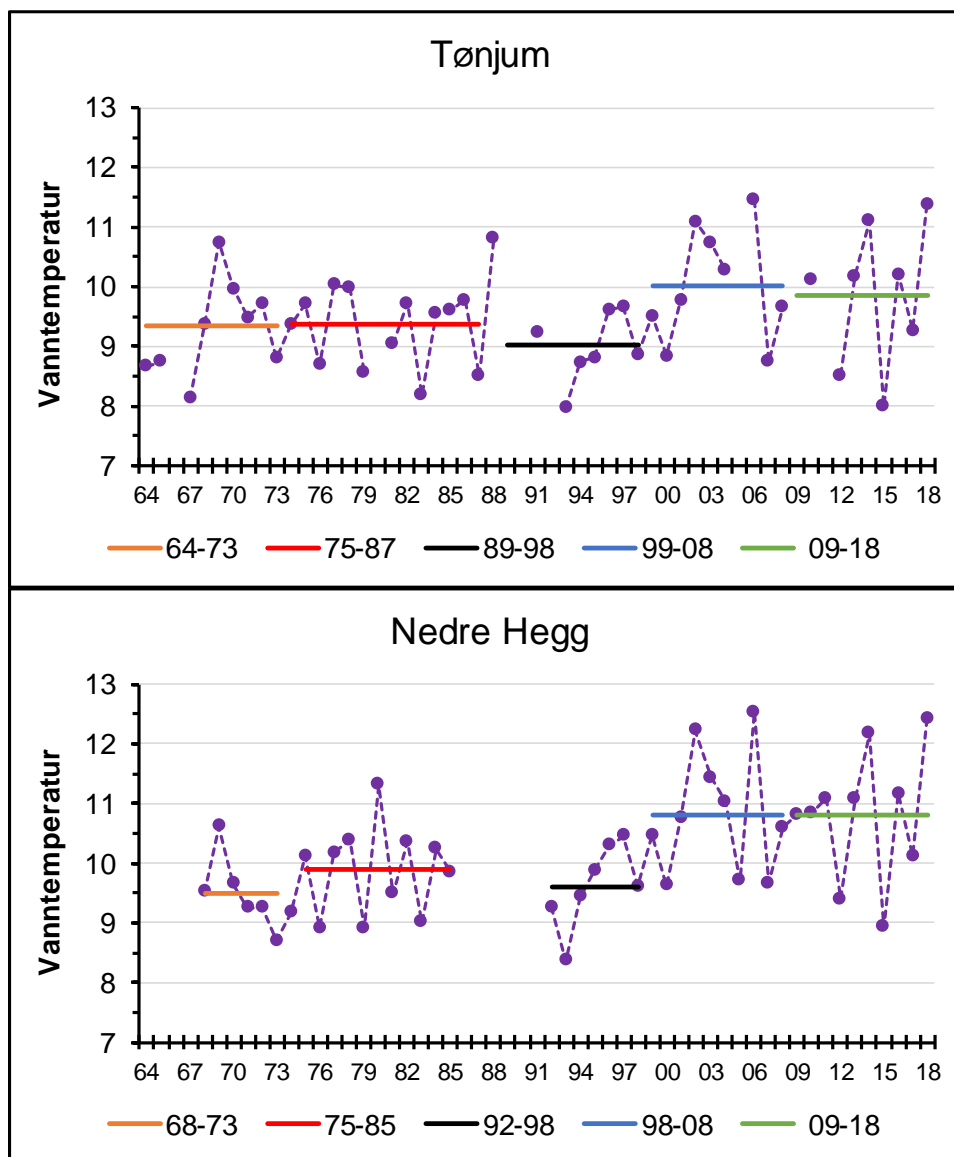
mht. utvikling i vanntemperatur i Lærdalselva over tid, men kan være viktige forklaringsvariabler hvis en ønsker å studere årsaker til mellomårsvariasjon i vanntemperatur i elva.

Diskusjon

Utviklingen i gjennomsnittlig vanntemperatur i juni-september, perioden for vekst av ungfisk, er oppsummert for hele perioden 1964-2018 i **figur 3.7**. Ved Tønjum var gjennomsnittlig sommertemperatur 9,3 °C både før regulering og etter oppstart av Borgund kraftverk. Sommertemperaturen ved dette målepunktet ble altså ikke endret som følge av den første reguleringen. I den første perioden etter at Stuvane kraftverk ble satt i drift falt sommertemperaturen ved Tønjum til 9,0 °C. I de to påfølgende 10-års periodene økte gjennomsnittlig sommertemperatur til henholdsvis 10,0 og 9,9 °C (**figur 3.7**). Gjennomsnittlig sommertemperatur ved Tønjum i den siste 20-års perioden har altså vært høyere enn den var i årene med målinger før regulering og i årene med bare drift i Borgund kraftverk.

Figuren viser også at variasjonen i temperatur mellom år er minst like stor etter oppstart av Stuvane som i de to periodene før, og med betydelige variasjoner mellom år de siste årene. I den første perioden etter oppstart av Stuvane kraftverk (89-98) mangler det komplette sommerdata for tre år (89, 91 og 92) ved Tønjum slik at gjennomsnittlig sommertemperatur i denne perioden er mer usikker enn i de andre periodene.

Ved Nedre Hegg økte gjennomsnittlig sommertemperatur fra 9,5 til 9,9 °C etter oppstart av Borgund kraftverk (**figur 3.7**). Ved denne stasjonen var det færre år med komplette sommerdata fra før regulering enn ved Tønjum. Det er derfor større usikkerhet knyttet til størrelsen av effekten ved Nedre Hegg. I den første perioden etter at Stuvane kraftverk ble satt i drift falt sommertemperaturen ved Nedre Hegg til 9,6 °C. Også i denne perioden mangler det komplette data for sommertemperaturer for flere år (89-91). I de to påfølgende 10-års periodene økte sommertemperaturen ved Nedre Hegg til 10,8 °C (**figur 3.7**).



Figur 3.7. Sommertemperatur gitt som gjennomsnittlig temperatur (°C) i juni-september ved Tønjum og Nedre Hegg i Lærdalselva i perioden 1964-2018. Heltrukne linjer angir gjennomsnittsverdier for ulike tidsperioder: Før regulering (1964-1973), etter oppstart av Borgund kraftverk (1975-1987), og etter oppstart av Stuvane kraftverk (1989-1998, 1999-2008 og 2009-2018). I perioden 1964-1985 var det manuelle målinger av temperatur på morgen og ettermiddag, mens fra og med 1986 er temperaturen registrert med loggere. Manglende datapunkt i ett eller flere år viser at det ikke finnes målinger av vanntemperatur i alle måneder i perioden juni-september.

Etter oppstart av Stuvane kraftverk har gjennomsnittlig sommertemperatur vært 0,9 °C høyere ved Nedre Hegg enn ved Tønjum (sammenlikning basert på 25 år hvor det er komplette målinger på begge stasjoner). I perioden hvor det bare var drift ved Borgund kraftverk (1975-87) var forskjellen i sommertemperatur mellom de to målepunktene 0,4 °C når vi sammenlikner år med komplette sommertemperaturer på begge målepunktene (alle år fra 1975-1985 unntatt 1981). Et grovt anslag på størrelsesordenen av effekten som oppstarten av Stuvane kraftverk hadde på vanntemperaturen kan beregnes ut fra hvor mye temperaturforskjellen mellom Nedre Hegg og Tønjum ble forandret etter at Stuvane kom i drift. En slik beregning tyder på at sommertemperaturen ved Tønjum ble redusert med om lag 0,5 °C etter at Stuvane kraftverk ble startet opp.

Denne beregnede reduksjonen i gjennomsnittstemperatur ved Tønjum er noe større enn den målte nedgangen fra perioden 1975-1987 til 1991-1998, som var på 0,3 °C. Merk at sistnevnte sammenligning er basert på få års data og derfor er et mer usikkert mål på effekten.

Relasjonene mellom lufttemperatur og vanntemperatur (**figur 3.6**) kan benyttes til å estimere vanntemperaturen ved Nedre Hegg og Tønjum i år med manglende data for perioden etter oppstart av Stuvane kraftverk. For perioden 1989-1998 mangler det tre års data på begge stasjonene. Hvis de manglende dataene suppleres med estimerte verdier for de tre årene med manglende observasjoner fører det til svært små endringer i gjennomsnittlig vanntemperatur for juni-september for denne tiårsperioden: 0,02 grader varmere ved Nedre Hegg og 0,07 grader kaldere ved Tønjum. Størrelsen på nedgangen i sommertemperatur ved Nedre Hegg og Tønjum i tiårsperioden etter oppstart av Stuvane kraftverk synes altså ikke å være vesentlig påvirket av at det mangler observasjoner i tre år, men forskjellen mellom Nedre Hegg og Tønjum kan ha vært noe større (ca. 0,1 grader) enn beregnet bare ut fra observerte verdier.

Resultatene tyder altså på at sommertemperaturen ved Nedre Hegg har økt noe etter regulering. Dette er i tråd med forventninger som følge av at vannføringen om sommeren har blitt redusert etter regulering (for eksempel Tvede 2006; Vaskinn 2010). Reduksjonen i vannføring etter regulering har vært størst i juni, men er også betydelig i juli og august (se **vedlegg 2**). Vurdert ut fra forskjeller i vanntemperatur før og etter oppstart av Borgund kraftverk var denne økningen på om lag 0,4 grader for sommerperioden. Vi vil peke på at tidsperioden før regulering er kort og dersom dette var atypiske år mht. vanntemperatur så kan vår sammenlikning gi et feilaktig bilde av temperaturendringene som følge av regulering.

Resultatene viser at vanntemperaturen på senhøsten og vinteren økte ved Tønjum etter at Borgund kraftverk kom i drift. Dette er i tråd med forventninger som følge av at vintervannføringen i elva økte nedstrøms Sjurhaugfoss da kraftverket startet opp (se også **vedlegg 2**). I perioden 74-88 ble vannet fra Borgund kraftverk tilført elva enten ved Sjurhaugfoss eller fra omløpstunellen ved Byrkjo. Vi har ikke oversikt over hvor og når på året de ulike utslippsstedene ble benyttet, men uansett så er det forventet at tilførsel av magasin vann som er varmere enn nedkjølt elvevann vil føre til hevet vanntemperatur på denne tiden av året. Vi kjenner ikke til at det foreligger målinger av vanntemperatur i utløpsvannet fra Borgund kraftverk og vet derfor ikke hvor store forskjeller det er på vanntemperatur i kraftverksvannet og i elvevannet. Borgund kraftverk har en slukeevne på om lag 26 m³/s og ved vanlig produksjon i vinterhalvåret vil dette vannet være en dominerende bidragsyter til elvetemperatur nedstrøms kraftverksutløpet og/eller nedstrøms omløpstunellen ved Byrkjo. Temperaturen om vinteren ved Tønjum synes ikke å ha endret seg vesentlig etter oppstart av Stuvane kraftverk (se **figur 3.3** og **figur 3.4**).

Vi valgte å basere våre analyser av utvikling i vanntemperatur på døgnmiddelverdier og har vist at et gjennomsnitt av manuelle målinger foretatt på morgen og ettermiddag gir et godt uttrykk for døgnmiddelverdi. Hvis vi i stedet hadde beskrevet utviklingen i temperatur ved Tønjum over tid basert på målinger bare om morgenen eller bare om ettermiddagen hadde resultatene blitt omtrent de samme (**vedlegg 3**). Ut fra ettermiddagsmålinger var det imidlertid noe større reduksjon i vanntemperatur om sommeren i den første 10-års perioden etter oppstart av Stuvane kraftverk enn det som kommer fram basert på målinger om morgenen og på beregnede døgnsnittverdier. Dette kan muligens skyldes at variasjonen i temperatur over døgnet har blitt noe mindre ved Tønjum etter at Stuvane kraftverk kom i drift.

Nedstrøms utløpet av kraftverk blir vanntemperaturen ofte redusert om sommeren i elver med tilførsel av magasin vann. Dette skjedde ikke ved målepunktet ved Tønjum etter oppstart av Borgund kraftverk. Tønjum ligger 12 km nedenfor utløpet fra kraftverket og ca. 8,6 km nedstrøms utløpet av omløpstunellen (Saltveit 1989) slik at det kan skje noe oppvarming av vannet på den strekningen hvis de fysiske forholdene ligger til rette for det (se Vaskinn 2010). Tidligere vurderinger av vanntemperatur i vassdraget har pekt på at vanntemperaturen om sommeren sannsynligvis var lavere like nedstrøms utløpet av kraftverket enn ved Tønjum (se Saltveit 1989). Ved undersøkelser i 1980-1986 ble det hvert år registrert at gjennomsnittsstørrelsen på lakseyngelen

var minst i området like nedstrøms omløpstunellen og at lengden økte nedstrøms i elva. Dette er en indikasjon på at ungfiskveksten avtok fra de nedre deler av elva og opp mot omløpstunellen.

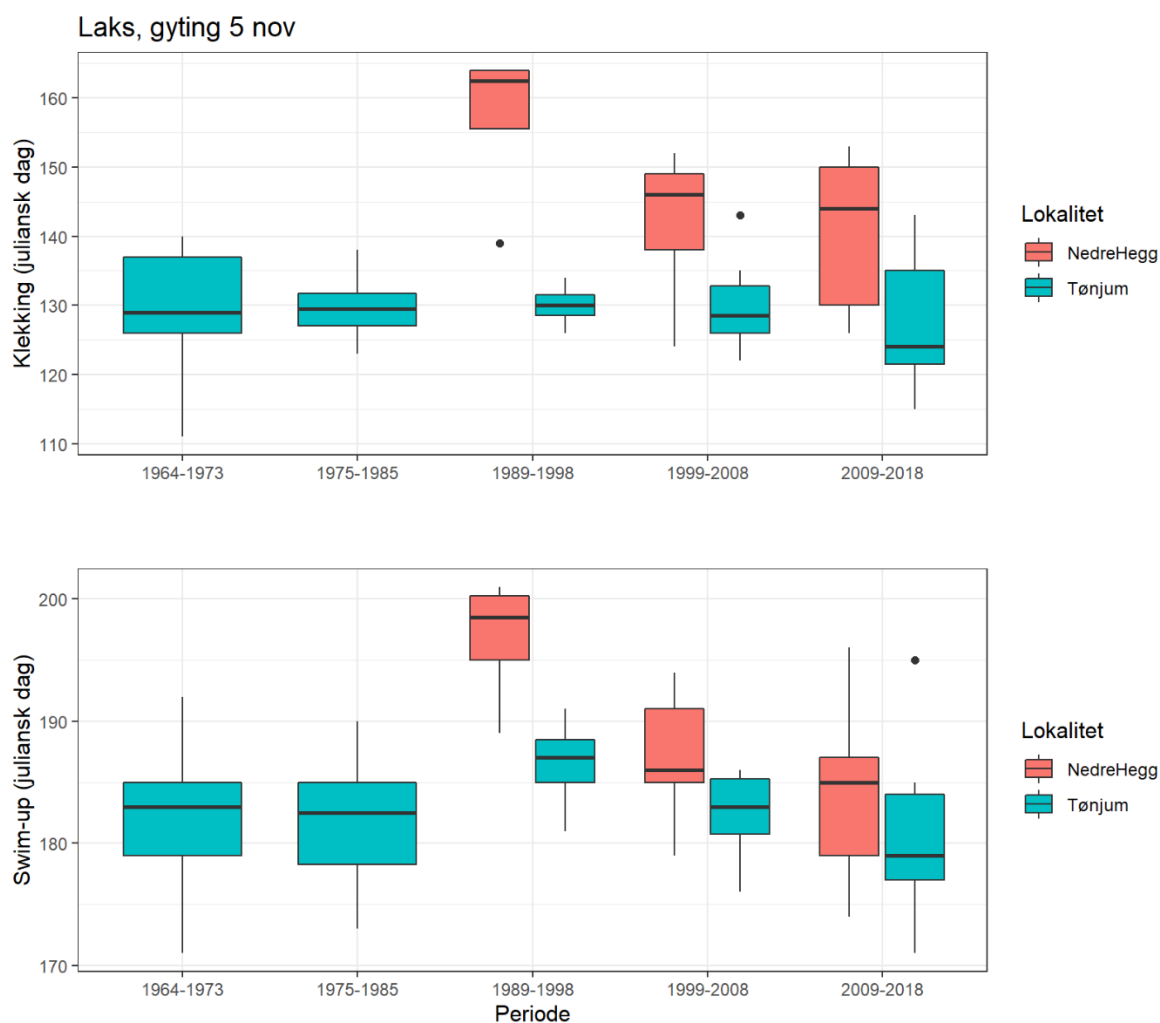
Kraftverksutløpet ble flyttet mye nærmere målepunktet ved Tønjum etter oppstart av Stuvane kraftverk (3 vs. 12 km). Det var derfor å forvente at dette kunne gi en reduksjon i sommertemperatur. En slik reduksjon ble også registrert de første 10-årene etter oppstart av det nye kraftverket. I de to neste 10-års periodene har sommertemperaturen i gjennomsnitt vært høyere ved Tønjum enn den var før regulering. Det har vært en markert økning i lufttemperatur om sommeren i Lærdal i løpet av de siste 20 årene slik at klimatiske forhold synes å være hovedårsaken til at gjennomsnittlig vanntemperatur om sommeren har vært høyere i denne perioden enn i de tidligere periodene både ved Tønjum og ved Nedre Hegg.

Kort sagt førte ikke regulering med oppstart av Borgund kraftverk til nevneverdige endringer i temperaturforholdene om sommeren ved Tønjum. Den ga imidlertid høyere temperaturer ved Nedre Hegg som fikk lavere vannføring om sommeren. Etter oppstart av Stuvane kraftverk var det en nedgang i sommertemperatur ved begge målestasjoner i de første tiårene etter regulering. Etter 2009 økte vanntemperaturene ved begge målepunkter i takt med at lufttemperaturen økte. Samlet sett så synes det altså som om Lærdalselva nå har høyere gjennomsnittstemperaturer enn før regulering ved de to målepunktene. Ved Nedre Hegg er denne økningen delvis forårsaket av reguleringen og delvis av klimatiske endringer. Ved Tønjum er de økte temperaturer over de siste 20 årene antageligvis forårsaket av klimatiske endringer.

Vi presiserer at vi kun har vurdert temperaturforholdene ved to målepunkter i elva. Vanntemperaturen vil imidlertid variere langs elvestrengen avhengig av hvor sidevassdrag kommer inn i elva, samt hva vanntemperaturen og vannføringen er i disse sidevassdragene. For eksempel så forventer vi at temperaturen like nedstrøms kraftverksutløpet er noe lavere enn den er ved Tønjum om sommeren og noe høyere om vinteren.

3.2 Modellert klekkesidspunkt og swim-up

Basert på vanntemperaturseriene fra Tønjum hadde laks som var gytt omtrent midt i gyteperioden (5. november) forventet median klekking rundt 9.-10. mai i de fire første periodene (1964-2008) (**figur 3.8, tabell 3.1**). Til sammenligning var forventet median klekkesidspunkt den siste tiårsperioden (2009-2018) 5-6 dager tidligere. Modellert median tidspunkt for swim-up ved Tønjum lå mellom 28. juni og 6. juli i alle fem tidsperioder, og tidligst i den siste tiårsperioden (2009-2018) (**figur 3.8, tabell 3.1**). Bruk av temperaturdata fra Nedre Hegg i modelleringen ga tidligere forventet median klekking og swim-up for de to siste periodene (1999-2008 og 2009-2018) sammenlignet med perioden 1989-1998 (**figur 3.8 og tabell 3.1**). På grunn av manglende målinger ved Nedre Hegg i perioden 1989-1998 inngikk kun fem år med vanntemperaturdata, mens åtte år med vanntemperaturdata fra Tønjum var inkludert i samme periode.

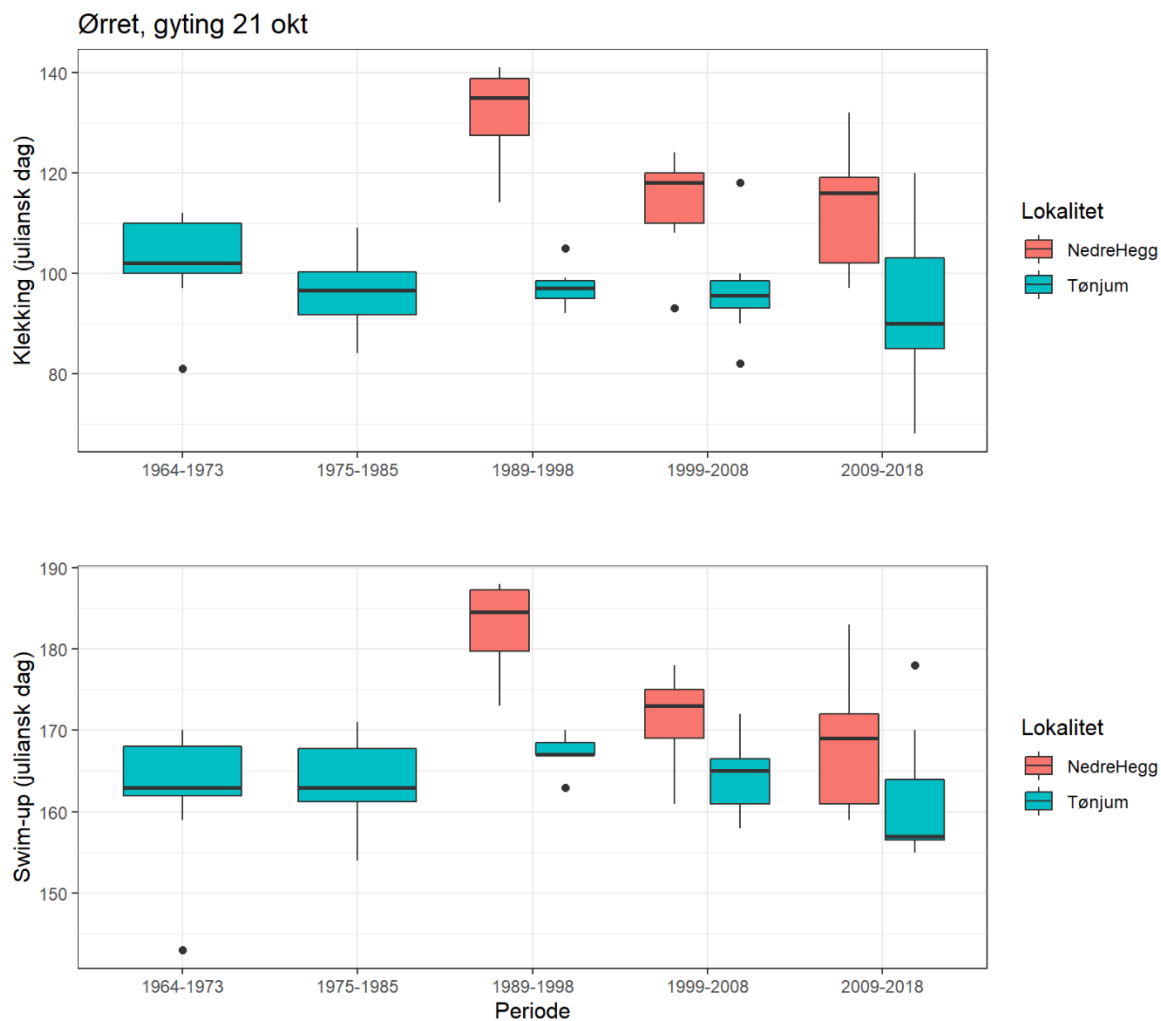


Figur 3.8. Modellert median tidspunkt og for klekking og swim-up av lakseegg gytt 5. november for tre perioder med tilgjengelige vanntemperaturdata fra Nedre Hegg (rød) og fem perioder fra Tønjum (turkis). Juliansk dato 130 = 10. mai, 150 = 30. mai, 170 = 19. juni, 190 = 9. juli. Før 1989 ble vanntemperaturer logget manuelt og etter 1989 ved hjelp av loggere. Vanntemperaturserien for Nedre Hegg over vinterhalvåret er mangelfull fram til logger ble tatt i bruk. Derfor er kun Tønjum representert før 1989. Merk at i perioden 1989-1998 var det kun fem år med gode nok temperaturdata fra Nedre Hegg til å beregne klekkesidspunkt og swim-up, mens det var åtte år med gode temperaturdata for Tønjum.

Tabell 3.1. Median forventet dato for klekking og swim-up (med juliansk dato i parentes) og modellert lengde (cm) etter første (0+), andre (1+) og tredje (2+) vekstsesong for laks gytt midt i gytesesongen (5. november) ved bruk av døgnmiddel vanntemperaturer fra Tønjum og Nedre Hegg. Lengde ved alder er behandlet i kapittel 3.3 **Modellert vekst hos ungfisk.**

	Klekking	Swim-up	Lengde 0+	Lengde 1+	Lengde 2+
Tønjum					
1964-1974	9. mai (129)	1. juli (183)	4,53	6,34	8,19
1975-1985	10. mai (130)	6. juli (187)	4,47	6,32	8,21
1989-1998	10. mai (130)	5. juli (186)	4,36	5,98	7,63
1999-2008	9. mai (129)	1. juli (182)	4,93	7,15	9,45
2009-2018	4. mai (124)	28. juni (179)	4,80	6,91	9,06
Nedre Hegg					
1989-1998	12. juni (163)	17. juli (198)	4,70	7,0	9,33
1999-2008	26. mai (146)	5. juli (186)	5,23	7,98	10,80
2009-2018	24. mai (144)	4. juli (185)	5,12	7,86	10,67

Heller ikke for ørret ble det avdekket store forskjeller i modellert median klekkespunkt og tidspunkt for swim-up mellom de fem periodene ved bruk av vanntemperaturseriene fra Tønjum (**figur 3.9, tabell 3.2**). Klekkespunktet tenderer imidlertid til å ha blitt tidligere utover i tidsserien, og var modellert 12 dager tidligere i de to siste periode (1999-2008 og 2009-2018) sammenlignet med perioden 1964-1974. Modellert swim-up lå omtrent ved 11.-13. juni i de fire første periodene og var 6. juni i tiårsperioden 2009-2018. Både forventet klekking og swim-up er altså litt tidligere i den siste perioden. Ved bruk av temperaturdata fra Nedre Hegg var det større forskjeller i forventet klekkespunkt og swim-up mellom periodene enn ved Tønjum. Ørret hadde 17-19 dager tidligere forventet klekking og 12-16 dager tidligere forventet swim up i de to siste periodene (1999-2008 og 2009-2018) sammenlignet med perioden fra 1989 til 1998 (**figur 3.9, tabell 3.2**). Dette stemmer godt overens med at vanntemperaturene den første tiårsperioden etter at Stuvane kom i drift var kaldere enn periodene før og etter, og at det generelt sett har blitt varmere i løpet av de siste 20 årene.



Figur 3.9. Modellert median tidspunkt og for klekking og swim-up av ørretunger fra gyting i midten av gytesesongen (21. oktober) for vanntemperaturer fra Nedre Hegg (rød) og Tønjum (turkis) i ulike perioder. Juliansk dato 100 = 10. april, 140 = 20. mai, 160 = 9. juni, 180 = 29. juni. Før 1989 ble vanntemperaturene logget manuelt. Temperaturserien for Nedre Hegg over vinterhalvåret er mangelfull fram til loggere ble tatt i bruk. Derfor er kun Tønjum representert før 1989. Merk at i perioden 1989-1998 var det kun fem år med gode nok temperaturdata til å beregne klekkesidspunkt og swim-up fra Nedre Hegg, mens åtte år inngikk for Tønjum i denne perioden.

Tabell 3.2. Modellert tidspunkt for klekking og swim-up, samt modellert lengde (cm) etter første (0+), andre (1+) og tredje (2+) vekstsesong for ørret gytt i midten av gyteperioden (21. oktober) ved døgnmiddel vanntemperaturer fra Tønjum og Nedre Hegg. Lengde ved alder er behandlet i kapittel 3.3 **Modellert vekst hos ungfisk.**

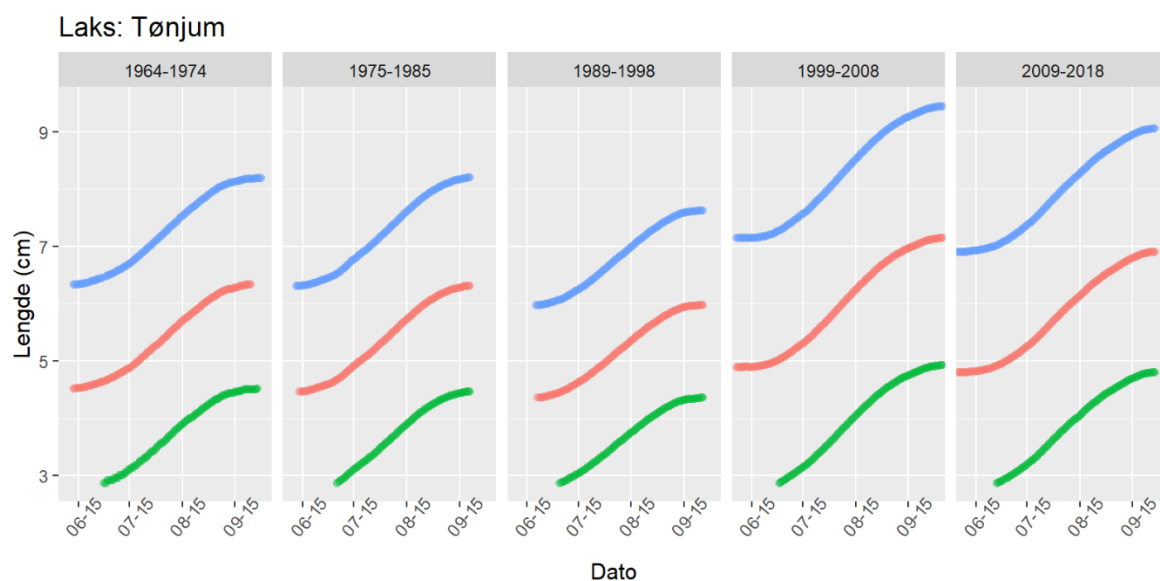
	Klekking	Swim-up	Lengde 0+	Lengde 1+	Lengde 2+
Tønjum					
1964-1974	12. april (102)	11. juni (162)	5,42	8,61	11,88
1975-1985	6. april (96)	12. juni (163)	5,39	8,54	11,77
1989-1998	7. april (97)	16. juni (167)	5,17	8,06	11,01
1999-2008	31. mars (90)	13. juni (164)	5,79	9,39	13,08
2009-2018	31. mars (90)	6. juni (157)	5,75	9,24	12,82
Nedre Hegg					
1989-1998	15. mai (135)	4. juli (185)	5,23	8,45	11,74
1999-2008	28. april (118)	22. juni (173)	5,85	9,71	13,68
2009-2018	26. april (116)	18. juni (169)	5,90	9,82	13,86

At det generelt sett ikke er spesielt store forskjeller mellom periodene i modellert klekkesidspunkt og swim-up for hverken laks eller ørret ved Tønjum eller nedre Hegg, henger sammen med at det ikke har vært spesielt store endringer i vanntemperaturene om vinteren. De modellerte endringene, med generelt sett noe tidligere klekking og swim-up i periodene etter 1999, er i stor grad forårsaket av at det har blitt litt varmere om våren og høsten. Et funn som skiller seg ut er at det var en del senere forventet klekking og swim-up hos både laks og ørret ved Nedre Hegg i den første perioden etter at Stuvane ble satt i drift sammenlignet med de påfølgende periodene. Dette funnet stemmer overens med at vanntemperaturene på Nedre Hegg i 1989-1999 var kaldere sett i forhold til vanntemperaturene i årene etter 1999, enn det som var tilfelle for Tønjum.

3.3 Modellert vekst hos ungfisk

Med utgangspunkt i modellerte tidspunkt for swim-up hos laks og ørret i de fem periodene, brukte vi Ratkowsky-modeller og gjennomsnittlige døgntemperaturer for Tønjum og Nedre Hegg til å beregne forventet vekst hos laksunger og ørretunger.

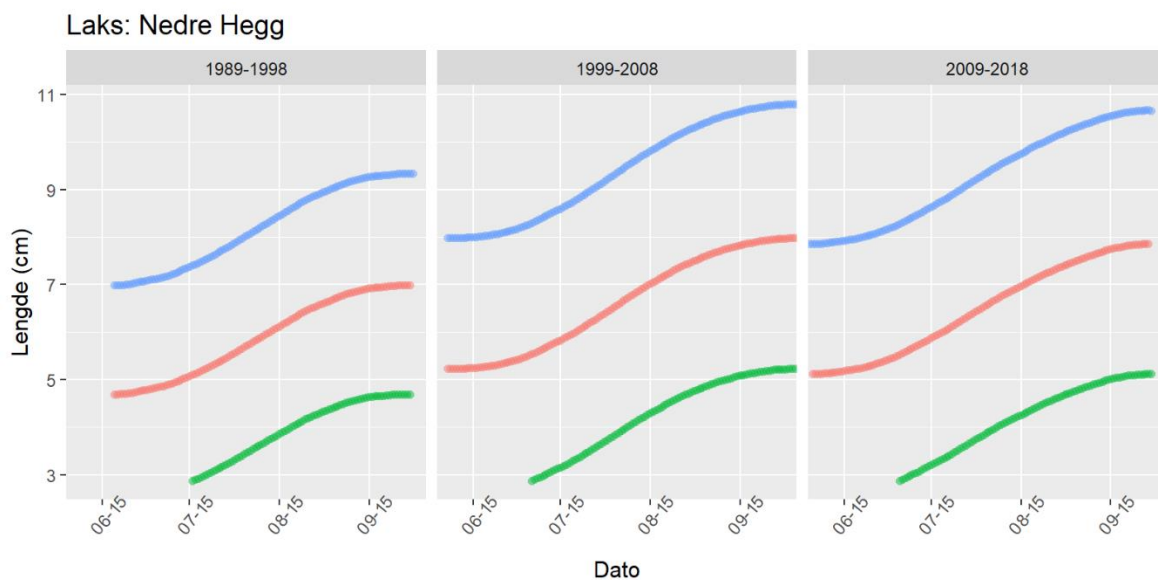
Resulterende modellert størrelse ved alder hos laksunger og ørretunger ligger innenfor størrelsesintervallene som ble funnet hos aldersbestemt ungfisk elfisket i Lærdalselva i 2018 (Fjellstad m.fl. 2019). Forventet størrelse hos årsyngel av laks var 4,4 - 5,2 cm, ettåringer på 6 - 8 cm og toåringer på 7,6 - 10,8 cm. For ørretungene, modellerte vi størrelsen til årsyngel på 5,1 - 5,9 cm, mens ettåringene var 8 - 9,8 cm og toåringene 11 - 13,8 cm.



Figur 3.10. Modellert utvikling i kroppsstørrelse hos årsyngel (grønn), ettårig (rød) og toårig (blå) laks over vekstsesongene for døgngjennomsnitt av vanntemperaturer ved Tønjum i ulike tidsperioder. Forskjeller i modellert tidspunkt for swim-up vises som små forskjeller i oppstartsdato for vekst hos årsyngel. Figurene viser forventet vekstforløp hos laksunger som kom fra gyting i midten av gytetiden (5. november).

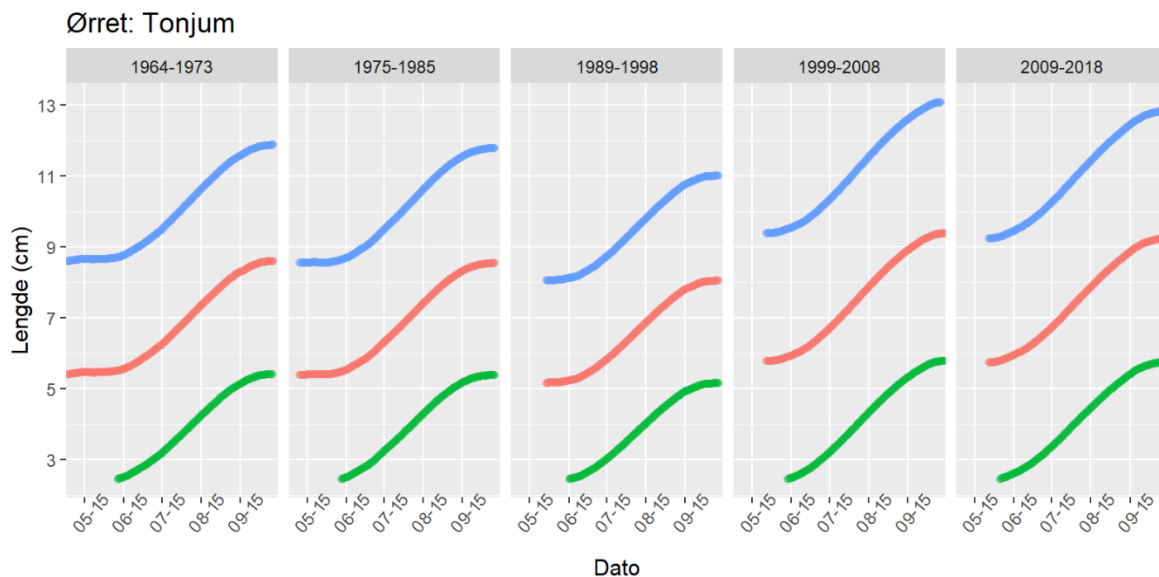
Ut fra temperaturregimet ved Tønjum ble det ikke modellert spesielt store forskjeller i forventet størrelse ved alder hos laksunger før og etter at Borgund kraftverk kom i drift i 1974. For eksempel var forventet kroppsstørrelse hos toårig laks ved slutten av vekstsesongen på ca. 8,2 cm i periodene 1964-1974 og 1975-1985 (**figur 3.10 og tabell 3.1**). I tiårsperioden etter at Stuvane ble satt i drift i 1988 har imidlertid alle aldersklasser av laksunger en mindre forventet kroppsstørrelse ved slutten av vekstsesongen sammenlignet med i periodene før. Eksempelvis hadde en toårig laks en forventet kroppsstørrelse på 7,6 cm i perioden 1989-1998 mot 8,2 cm i den foregående tiårsperioden. Videre hadde laksunger av alle aldre en større forventet størrelse (eksempelvis toåringer med 9,1-9,4 cm) i de to påfølgende periodene (1999-2008 og 2009-2018) sammenlignet med temperaturregimene før elva ble regulert.

Ved temperaturregimet i Nedre Hegg var modellert størrelse hos laksunger gjennomgående større enn de var ved Tønjum. Den minste modellerte størrelsen for toårige lakseunger ved Nedre Hegg var på 9,2 cm i den første ti-årsperioden etter oppstart av Stuvane. I de to neste ti-årsperiodene var modellert størrelse for Nedre Hegg på henholdsvis 10,8 og 10,7 cm (**figur 3.11**, **tabell 3.2**). De økte vanntemperaturene ved Nedre Hegg etter 1999 synes altså å ha potensiale til å føre til raskere vekst hos laksunger.



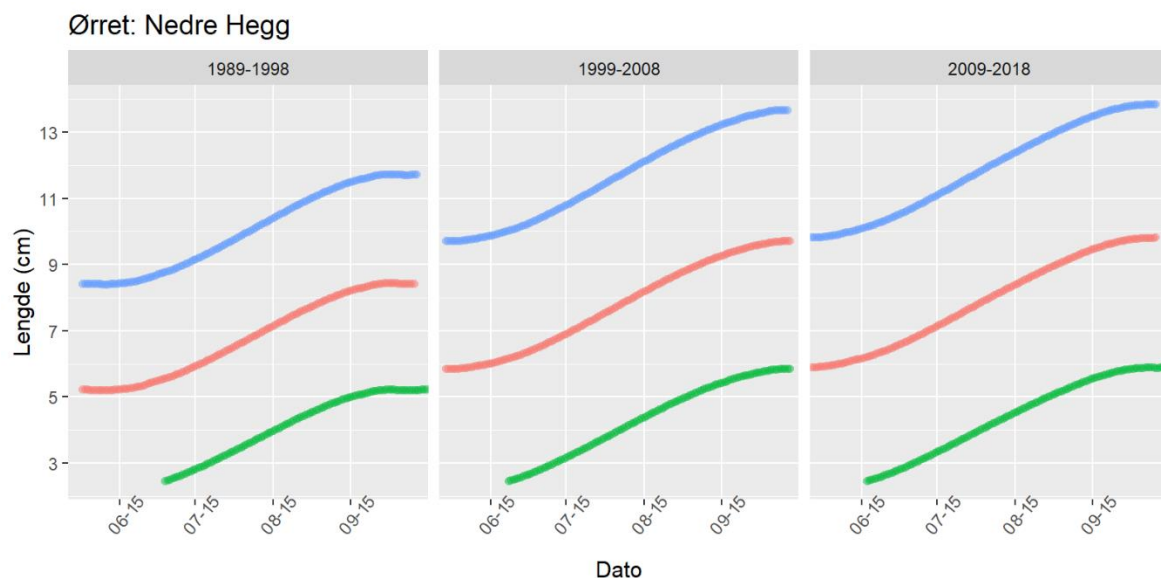
Figur 3.11. Modellert utvikling i kroppsstørrelse hos årsyngel (grønn), ettårig (rød) og toårig (blå) laks over vekstsesongen for døgngjennomsnitt av vanntemperaturer ved Nedre Hegg i ulike tidsperioder. Forskjeller i modellert tidspunkt for swim-up vises som små forskjeller i oppstartsdato for vekst hos årsyngel (x-aksen). Figurene viser forventet vekstforløp hos laksunger som resulterte fra gyting i midten av gytetiden (5. november).

Som forventet siden ungfisk av ørret generelt har raskere vekst enn laks, så hadde alle aldersklasser av ørret større modellerte kroppsstørrelser ved slutten av vekstsesongen enn laks i samme temperaturregime. Med hensyn til vekst over tidsperiodene så framkom samme mønster for ørret som for laks: Det var ubetydelige forskjeller i forventet vekst ved Tønjum i perioden før og etter Borgund kom i drift i 1974 (kroppsstørrelse hos toåringer på 11,9 cm vs. 11,8 cm), en nedgang i forventet vekst i tiårsperioden etter at Stuvane ble satt i drift i 1988 (11 cm lange toåringer) og økt vekst i de to siste periodene (med forventet størrelse på toåringer på 13,8 og 12,8 cm i hhv. 1999-2008 og 2009-2018) (**figur 3.12**).



Figur 3.12. Modellert utvikling i kroppsstørrelse hos årsyngel (grønn), ettårig (rød) og toårig (blå) ørret over vekstsesongene for døgngjennomsnitt av vanntemperaturer ved Tønjum i ulike tidsperioder. Forskjeller i modellert tidspunkt for swim-up vises som små forskjeller i oppstartsdato for vekst hos årsyngel. Figurene viser forventet vekstforløp hos ørretunger fra gyting i midten av gytetiden (21. oktober).

Modellert størrelse ved alder hos ørret i de tre periodene etter at Stuvane ble satt i drift fulgte samme mønster som laksen ved temperaturregimene ved Nedre Hegg (**figur 3.11** og **figur 3.13**). Forventet størrelse av toåring ørret var 11,7 cm i den første perioden (1989) mot 13,7 og 13,9 cm i de to siste periodene (1999-2008 og 2009-2018). Toårig ørret ved Nedre Hegg er også forventet å bli ca. 0,5-1 cm lengre ved slutten av vekstperioden enn ørret med samme alder i tilsvarende perioder ved Stuvane (**tabell 3.2**). Som ved bruk av temperaturdata fra Tønjum, er ørreten ved Nedre Hegg forventet å oppnå større størrelser ved slutten av vekstsesongen enn laks med samme alder.



Figur 3.13. Modellert utvikling i kroppsstørrelse hos årsyngel (grønn), ettårig (rød) og toårig (blå) ørret over vekstsesongen for døgngjennomsnitt av vanntemperaturer ved Nedre Hegg i tre tiårspereioder etter regulering. Forskjeller i modellert tidspunkt for swim-up vises som små forskjeller i oppstartsdato blant årsyngel. Figurene viser forventet vekstforløp hos ørretunger som resulterte fra gyting i midten av gytetiden (21. oktober).

Resultatene fra vekstmodelleringen, hvor det ikke ble avdekket spesielt store endringer i forventet vekst hos hverken laks eller ørret etter igangsetting av Borgund kraftverk i 1974 samsvarer godt med at igangsettingen heller ikke ga store endringer i vanntemperaturer i juni-september ved Tønjum. På samme måte var det ved Tønjum en nedgang i forventet vekst i tiårsperioden etter at Stuvane ble satt i drift hos begge arter. Dette er også som forventet i og med at vanntemperaturene også var lave ved Tønjum i denne perioden. Ved Nedre Hegg ble det også blitt høyere temperatur og høyere forventet vekst hos begge arter etter 1999. Generelt er det også forventet høyere vekst ved Nedre Hegg enn ved Tønjum, som følge av at det generelt sett er høyere vanntemperaturer over sommeren og høsten ved Nedre Hegg. Til sist, så er økningen i forventet vekst hos ørret og laks ved begge målepunkter over de siste 20 årene i tråd med at vanntemperaturen sommer og høst også har gått opp i denne perioden.

3.4 Smoltalder

I følge vår modellering var ikke forventet vekst hos laksunger ved temperaturregimet på Tønjum vesentlig forskjellig i perioden før og etter at Borgund kraftverk ble satt i drift i 1974 (**figur 3.10**). Dermed tyder ikke vekstmodelleringen på at reguleringen ved Borgund kraftverk ga temperaturendringer som førte til nedsatt vekst og vesentlige endringer i smoltalder. Dette resultatet er i tråd med konklusjonene fra Brooks m.fl. (1989), som sammenliknet smoltalder og vekst hos ungfisk av laks i Lærdalselva før og etter oppstart av Borgund kraftverk. Sammenlikningen til Brooks m.fl. (1989) var basert på analyser av skjellprøver fra voksen laks samlet inn i perioden 1969-1984. I dette datasettet varierte smoltalderen fra 2-5 år med en dominans av 3- og 4-årig smolt. Gjennomsnittlig smoltalder varierte fra 3,1 til 3,9 år for ulike årsklasser og de høyeste smoltaldrene ble funnet hos laks som klekket og vokste opp i elva i perioden før regulering (1964-68). Videre var gjennomsnittlig smoltalder i dette datasettet lavere hos laks som vokste opp de første årene etter regulering (1973-75), men økte igjen for laks klekket og oppvokst fra og med 1976. Forfatterne konkluderte med at de ikke fant noen vesentlig effekt på vekst, smoltalder og smoltstørrelse som følge av reguleringen.

I tiårsperioden etter Stuvane kraftverk ble satt i drift i 1988 var det ifølge våre vekstmodelleringer forventet en nedgang i vekst med en reduksjon i kroppslengde hos toårig laks ved slutten av vekstsesongen fra 8,2 til 7,6 cm (**tabell 3.1**). Siden alder ved smoltifisering henger sammen med kroppslengde (Økland m.fl. 1993) så kan dette ha medført en viss økning i smoltalder sammenliknet med perioden før Stuvane ble satt i drift.

I de to påfølgende periodene (1999-2008 og 2009-2018) økte forventet ungfiskvekst slik at lengde av toårig laks gikk opp til over 9 cm. All vekstmodellering for laks ble gjort kun for ungfisk som var gytt i det vi antar er midten av gyteperioden, og kun med en startstørrelse på 0,2 g. I naturen er det typisk stor spredning i egenskaper som gytetidspunkt, eggstørrelse og vekstrate mellom individer (for eksempel L'Abée-Lund og Hindar 1990; Fleming m.fl. 1996). Vi ville derfor normalt ha forventet til dels stor variasjon i oppnådd lengde ved alder. Dermed indikerer våre resultater at en større andel laksunger ville oppnådd størrelser over 10 cm i de to periodene fra 1999-2018. Siden laksunger i norske elver som regel går ut som smolt ved lengder på 10-20 cm (Thorstad m.fl. 2012) vil vi ut fra temperaturene ved Tønjum forvente at smoltalder hos laks i Lærdalselva kan ha gått ned i løpet av de siste 20 årene. Denne konklusjonen finner støtte i materialet fra NINAs laksedatabase. I denne databasen inngår 360 skjellprøver av voksen laks fra sportsfiske i elva i perioden 2013-2019. I dette materialet varierte smoltalderen fra 2 til 5 år med et gjennomsnitt på 3,3 år og med dominans av 3- og 4-års smolt. Laksen som hadde klekking og swim-up i årene 2008-2011 var mest tallrike i skjellmaterialet, og disse individene vandret ut av elva som smolt i 2010-2014. Laksen i dette materialet hadde altså vokst opp i elva i periode hvor sommertemperaturen gjennomgående har vært høyere ved Tønjum enn hva den var før regulering. For disse fire mest tallrike årsklassene avtok gjennomsnittlig smoltalder fra 3,6 til 3,0 år mellom årsklassen som hadde swim-up i 2008 og årsklassen med swim-up i 2011. Selv om dette materialet er noe begrenset, så er det i tråd med resultatene fra vekstsimuleringene som tyder på at økte temperaturer ved Tønjum i de siste 20-årene kan ha medført en reduksjon i smoltalder sammenliknet med før regulering. Laksen som inngår i dette skjellmaterialet må ha vokst opp nedstrøms Sjurhaugfoss siden laksetrappene var stengt fram til 2018 pga. *Gyrodactylus salaris*, og etter at elva ble friskmeldt ble utplanting av rogn først satt i gang på strekninger ovenfor Sjurhaugfoss i 2018 (Sættem 2020). Det er imidlertid verdt å merke at det ikke er gjennomført eksperimentelle feltstudier i Lærdalselva som bruker PIT-merking av laksunger til å gjøre retrospektive analyser av sammenhenger mellom kroppsstørrelse på senhøsten og sannsynlighet for at fisken skal vandret ut som smolt påfølgende vår. Ut fra slike undersøkelser som har vært gjennomført i Nord-Amerika, varierer disse sammenhengene mellom bestander (Horton m.fl. 2009) og det er derfor usikkerhet knyttet til ved hvilke kroppsstørrelser og alder laks sannsynligvis smoltifiserer i Lærdalselva.

Forventet vekst hos ungfisk av laks var gjennomgående høyere ved Nedre Hegg enn ved Tønjum (**figur 3.11**), og forventet lengde hos toårig laks var eksempelvis 10,7 cm i perioden 2009-2018. Denne forventningen om generelt høyere vekst ved bruk av temperaturdata fra Nedre Hegg sammenlignet med Tønjum (**figur 3.11**) tyder også på at andelen 2-årig smolt i Lærdalselva kan øke når det blir større lakseproduksjon på elvestrekninger ovenfor Sjurhaugfoss. Spesielt de første årene kan en forvente høy overlevelse og vekst siden de første årsklassene som klekker ikke vil møte konkurranse fra eldre laksunger (Anderssen 2002, Skaala m.fl. 2012). Dette forutsetter at øvrige betingelser for vekst, som for eksempel tilgang på næring, ikke er lavere i denne delen av elva. Vi vil også poengtere at vi kun har brukt temperaturdata fra to målestasjoner, som neppe er tilstrekkelig til å representere temperaturforholdene i hele elva. Dermed er våre modellerte vekstrater og vurderinger av smoltalder ikke nødvendigvis like gode tilnærminger for laks i alle strekninger av Lærdalselva.

Bortsett fra at ørret hadde gjennomgående høyere modellert størrelse ved alder enn laksen så var utviklingen over tid i overensstemmelse med den hos laks: Ut fra vanntemperaturene ved Tønjum var det ingen støtte for at reguleringen ifm. Borgund hadde noen effekt. Videre så avtok modellert størrelse hos 2-årig ørret fra nesten 12 cm i perioden før Stuvane kraftverk kom i drift til 11 cm i tiårsperioden etter. Deretter økt den til rundt 13 cm over de siste 20 årene (**tabell 3.2**). Toårige ørretunger er også modellert til å være 0,6-1 cm større ved Nedre Hegg sammenlignet med Tønjum. At den modellerte veksten av ørretunger i Lærdalselva de senere år var høyere enn før regulering samsvarer med funnene til Kristensen m.fl. (2011), som er basert på tilbakeberegning av størrelse ved alder av 453 skjellprøver. For ørret er det likevel utfordrende å gi en nøyaktig vurdering av hvordan eventuelle endringer i vekstrate forventes å påvirke alder ved smoltifisering siden de har mer fleksibel livshistorie enn laks (Klemetsen m.fl. 2003; Nevoux m.fl. 2019). Blant annet så konkluderte Pettersen (2015) ut fra analyser av 464 skjellprøver fra sportsfisket i Lærdalselva fra 1954-2014 med at den statistiske sannsynligheten for at et individ smoltifiserer ved en gitt alder og størrelse har variert over tid. Videre så rapporterer Kristensen m.fl. (2011) at på tross av at ørretungene vokste bedre i Lærdalselva rundt 2010 sammenlignet med før regulering, så økte smoltalderen fra rundt 3 år før regulering til rundt 3,5 etter. Antallet sjørret undersøkt etter regulering var imidlertid relativt lavt (n=43) så det er usikkerhet knyttet til hvor representativt dette materialet er for utviklingen av smoltalder hos sjørret etter regulering.

Gitt kompleksiteten som er knyttet til sammenhengen mellom vekst og smoltalder hos sjørret synes vi at det er for mangelfull kunnskap til at våre vekstanalyser kan brukes til å gjøre en god vurdering av om og eventuelt hvordan smoltalder hos ørret har forandret seg i Lærdalselva over tid.

4 Referanser

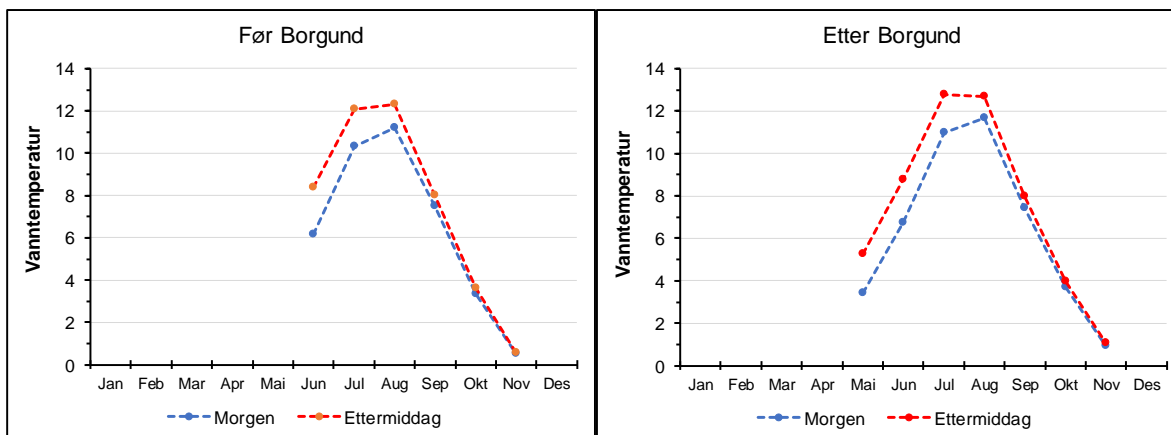
- Andersen, A. L. 2002. Økt vekst og overlevelse hos ensomrig laks (*Salmo salar* L.) og ørret (*Salmo trutta* L.) som følge av eliminering av eldre årsklasser – en analyse av biotiske og abiotiske faktorer før og etter rotenonbehandling av Lærdalselva. Thesis Candidatus scientiarum, Zoologisk institutt, Universitetet i Bergen, april 2002.
- Crisp, D. T. 1981. A Desk Study of the relationship between temperature and hatching time for the eggs of five species of salmonid fishes. *Freshwater Biology* 11: 361-368.
- Crisp, D. T. 1988. Prediction, from temperature, of eyeing, hatching and swim-up times for salmonid embryos. *Freshwater Biology* 19: 41-48.
- Brooks, R. J., Nielsen, P. S. & Saltveit, S. J. 1989. Effect of stream regulation on population parameters of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in the river Lærdalselva, Western Norway. *Regulated Rivers* 4: 347-354.
- Elliott, J. M. & Hurley, M. A. 1997. A functional model for maximum growth of Atlantic salmon parr, *Salmo salar*, from two populations in Northwest England. *Functional Ecology* 11: 592-603.
- Fleming, I. A. 1996. Reproductive strategies of Atlantic salmon: ecology and evolution. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 6: 379-416.
- Fjellstad, H.-P., Gabrielsen, S., Robertsen, G. & Skår, B. 2019. Miljødesign i Lærdalselva. Flaskehalser for produksjon av laks og ørret. Sintef Rapport 2019:00915.
- Forseth, T., Hurley, M. A., Jensen, J. & Elliott, J. M. 2001. Functional models for growth and food consumption of Atlantic salmon parr, *Salmo salar*, from a Norwegian river. *Freshwater Biology* 46: 173-186.
- Forseth, T., Larsson, S., Jensen, A.J., Jonsson, B., Näslund, I. & Berglund, I. 2009. Thermal growth performance of juvenile brown trout *Salmo trutta*: no support for thermal adaptation hypotheses. *Journal of Fish Biology* 74: 133-149.
- Forseth, T. & Harby, A. (red.). 2013. Håndbok for miljødesign i regulerte laksevassdrag. NINA Temahefte 52, 90 s.
- Gabrielsen, S.-E., Barlaup, B. T., Skoglund, H., Gladsø, J. A., Mo, T. A. & Sættem, L. M. 2003. Fiskebiologiske undersøkelser i Lærdalselva høsten 2003 – sammenfatning av ungfisktettheter av laks og aure i perioden 1991-2003. Laboratorium for ferskvannøkologi og innlandsfiske, Universitetet i Bergen, Rapport nr. 128.
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E.J., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J. E. Ø., Sandven, S., Sandø, A. B., Sorteberg, A. & Ådlandsvik, B. (red.). 2015. Klima i Norge 2100. NCCS rapport 2/2015.
- Horton, G. E., Letcher, B. H., Bailey, M. M. & Kinnison, M. T. 2009. Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolt production: the relative importance of survival and body growth. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 66: 471-483.
- Jonsson, B., Forseth, T., Jensen, A. J. & Næsje, T. F. 2001. Thermal performance in juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Functional Ecology* 15: 701-711.
- Klemetsen, A., Amundsen, P. -A., Dempson, J. B., Jonsson, B., Jonsson, N., O'Connel, M. F. & Mortensen, E. 2003. Atlantic salmon *Salmo salar* L., brown trout *Salmo trutta* L. and Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.): a review of aspects of their life histories. *Ecology of Freshwater Fish* 12: 1-59.
- Kristensen, T., Urke, H. A., Haugen, T. O., Rustadbakken, A., Alfredsen, J. A., Rosseland, B. O. 2011. Sjøauren i Lærdalselva; vekstmønster og fjordvandring før og no. NIVA rapport 6122-2011.
- L'Abée-Lund, J. H. & Hindar, K. 1990. Interpopulation variation in reproductive traits of anadromous female brown trout, *Salmo trutta*. *Journal of Fish Biology* 37: 755-763.
- Nevoux, M., Finstad, B., Davidsen, J. G., Finlay, R., Josset, Q., Poole, R., Höjesjö, J., Aarestrup, K., Persson, L., Tolvanen, O. & Jonsson, B. 2019. Environmental influences on life history strategies in partially anadromous brown trout (*Salmo trutta*, Salmonidae). *Fish and Fisheries* 20: 1051-1082.

- Pettersen, O. N. 2015. Growth and smolting in anadromous brown trout (*Salmo trutta*) from Lærdalselva: Responses to hydropower and *Gyrodactylus salaris*. Master thesis, Norwegian University for Life Sciences, Ås, Norway.
- Ratkowsky, D. A., Lowry, R. K., McKekin, T. A., Stokes, A. N. & Chandler, R. E. 1983. Model for bacterial culture growth rate throughout the entire biokinetic temperature range. *Journal of Bacteriology* 154: 1222-126.
- Skaala, Ø., Glover, K. A., Barlaup, B. T., Svåsand, T., Besnier, F., Hanse, M. H. & Borgstrøm, F. 2012. Performance of farmed, hybrid, and wild Atlantic salmon (*Salmo salar*) families in a natural river environment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 69: 1994-2006.
- Saltveit, S. J. 1986. Skjønn Borgund kraftverk. Del II. Lengdefordeling, vekst og tetthet hos laks og ørretunger i Lærdalselva, Sogn og Fjordane i perioden 1980 til 1986. Laboratorium for ferskvannsekologi og innlandsfiske [LFI], Zoologisk museum, Universitetet i Oslo, Rapport 91.
- Saltveit, S. J. 1989. Skjønn Borgund kraftverk. En vurdering av naturlig rekruttering ovenfor Sjurhaugfoss i Lærdalselva, Sogn og Fjordane. Laboratorium for ferskvannsekologi og innlandsfiske [LFI], Zoologisk museum, Universitetet i Oslo, Rapport 118.
- Skoglund, H., Einum, S., Forseth, T. & Barlaup, B. T. 2012. The penalty for arriving late in emerging salmonid juveniles: differences between species correspond to their interspecific competitive ability. *Functional Ecology* 26: 104-111.
- Sættem, L. M. 2020. Ungfisk av laks og ørret i Lærdalselva over mer enn 50 år. Lærdal kommune i Vestland. Ferskvannsbilogen, Rapport nr. 58.
- Thorstad, E. B., Whoriskey, F. G., Rikardsen, A. H. & Aarestrup, K. 2011. Aquatic nomads: the life and migrations of the Atlantic salmon. In *Atlantic Salmon Ecology* (Aas, Ø., Einum, S., Klemetsen, A. & Skurdal, J. eds), pp. 1–32. Oxford: Wiley- Blackwell.
- Tvede, A. M. 2006. Vanntemperatur og isforhold. S: 27-34, i: Saltveit, S.J. (red). Økologiske forhold i vassdrag – konsekvenser av vannføringsendringer. En sammenstilling av dagens kunnskap. Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.
- Vaskinn, K. A. 2010. Temperaturforhold i elver og innsjøer. Tiltak for regulering av temperatur. Simuleringsmodeller. Rapport miljøbasert vannføring 2010-3. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Økland, F., Jonsson, B., Jensen, A. J. & Hansen, L. P. 1993. Is there a threshold size regulating seaward migration of brown trout and Atlantic salmon? *Journal of Fish Biology* 42: 541-550.
- Weatherley, A. H. 1972. Growth and ecology of fish populations. London; Academic Press.

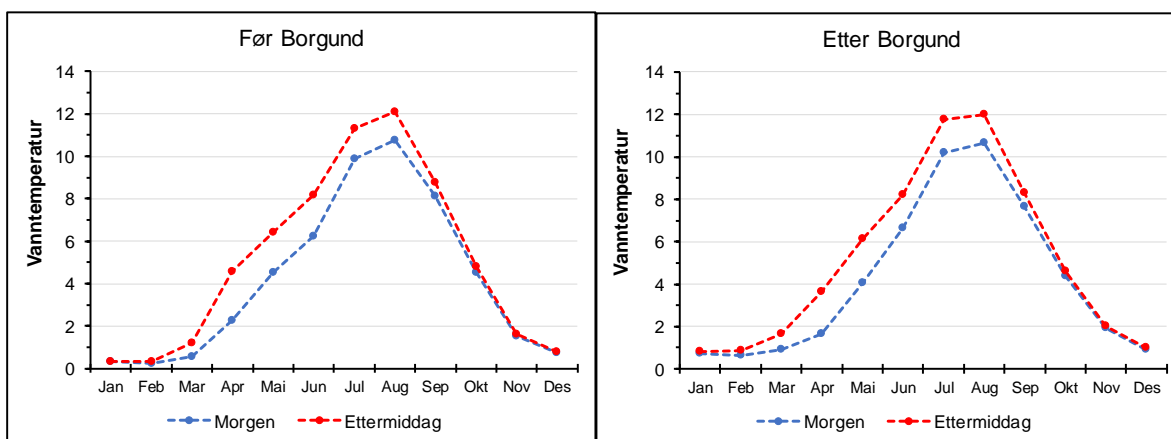
5 Vedlegg

Vedlegg 1. Sammenlikning av vanntemperaturer målt morgen og ettermiddag i perioden før og etter oppstart av Borgund kraftverk.

Figur 1.a. Forskjell i vanntemperatur (°C, månedsmiddelverdier) gjennom året for manuelle målinger foretatt på morgen og ettermiddag ved Nedre Hegg i Lærdalselva i perioden før regulering (1968-1973) og etter oppstart av Borgund kraftverk (1975-1985). Data fra NVE.



Figur 1.b. Forskjell i vanntemperatur (°C, månedsmiddelverdier) gjennom året for manuelle målinger foretatt på morgen og ettermiddag ved Tønjum i Lærdalselva i perioden før regulering (1965-1973) og etter oppstart av Borgund kraftverk (1975-1985). Data fra NVE.

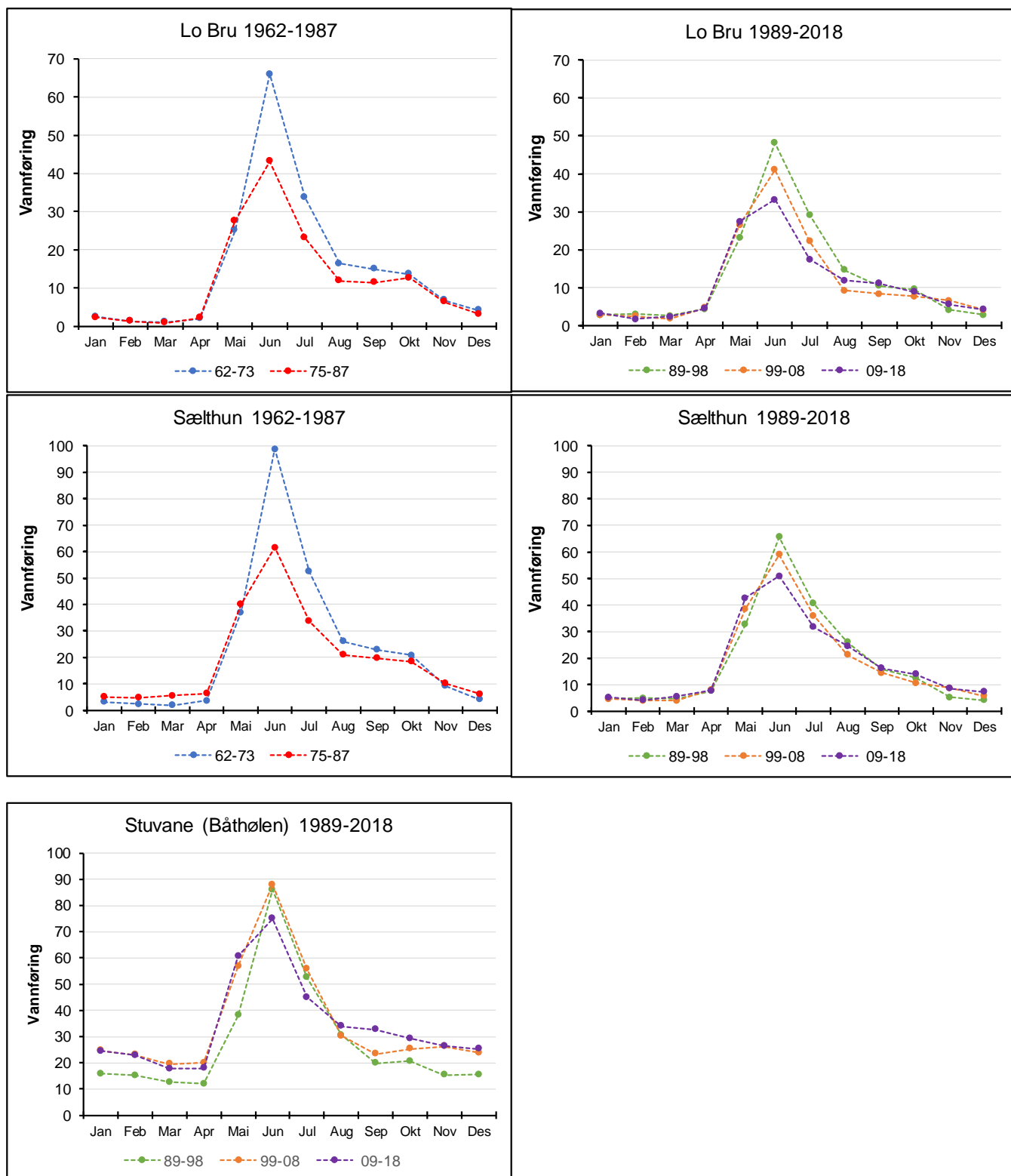


Vedlegg 2. Vannføring.

Som en støtte for vurderingene av endringer i vanntemperatur i Lærdalsvassdraget har vi også gjort en enkel analyse av endringene i vannføring på de strekningene hvor det foreligger temperaturmålinger. Analysene er også her basert på gjennomsnittlige månedsmiddelverdier summert over tidsperioder fordi vi er interessert i om det er vesentlige forandringer mellom tidsperioder og ikke i variasjon mellom enkeltår.

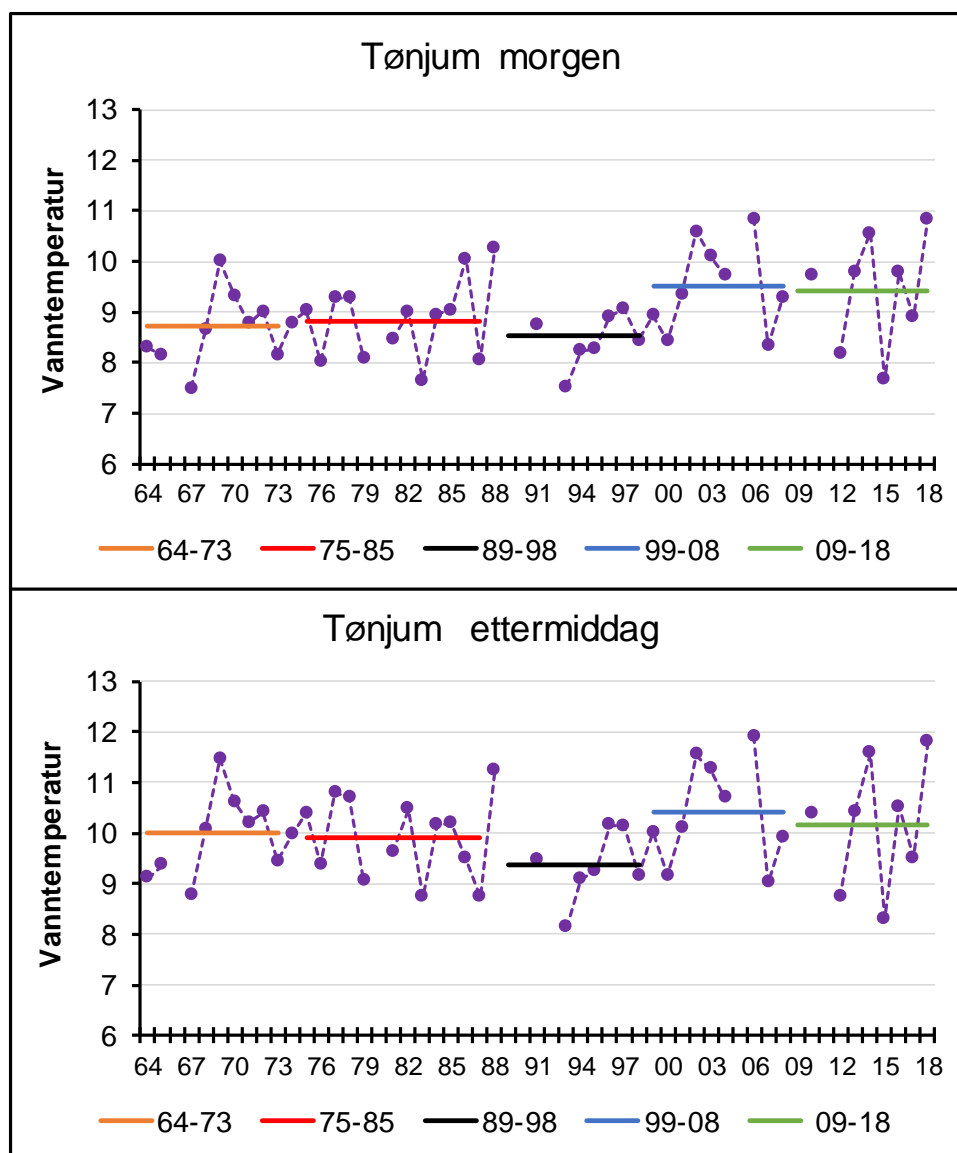
Ved analysene av vannføring i vassdraget benyttet vi dataserier fra databasen Hydag i Hydra II som gir døgnmiddelverdier for vannføring som er korrigert for eventuelle feil som følge av islegging (oppstuvning av vannstand) om vinteren (isreduserte data). Vi benyttet data fra følgende tre vannmerker: Lo bru (stasjonsnummer: 73.1.0, UTM 33: 112711Ø, 6790644N), Sælthun (stasjonsnummer: 73.4.0, UTM 33: 106435Ø, 6790578N) og Stuvane/Båthølen (stasjonsnummer: 73.2.0, UTM 33: 101938Ø, 6790186N). Ved Lo Bru har vannføringen vært målt i lang tid. Ved Sælthun foreligger målinger fra 1962 og ved Stuvane (Båthølen) fra 1987.

Figur. Gjennomsnittlig månedsmiddel vannføring (m^3/s) ved vannmerkene Lo Bru, Sælthun og Stuvane i Lærdalselva i ulike tidsperioder før og etter regulering av elva. Data fra NVE.



Vedlegg 3. Utvikling i vanntemperatur over tid ved Tønjum basert på målinger tatt morgen og ettermiddag.

Figur. Sommertemperatur (°C) ved Tønjum i Lærdalselva gitt som gjennomsnitt i juni-september i perioden 1964-2018. Heltrukne linjer angir gjennomsnittsverdier for ulike tidsperioder: Før regulering (1964-1973), etter oppstart av Borgund kraftverk (1975-1987), og etter oppstart av Stuvane kraftverk (1989-1998, 1999-2008 og 2009-2018). I perioden 1964-1985 var det manuelle målinger av temperatur på morgen og ettermiddag, mens fra og med 1986 er temperaturen registrert med loggere. I disse årene har vi brukt gjennomsnittet av loggerte vanntemperaturer morgen (kl. 06-09) og ettermiddag (kl. 18-21) for å angi temperaturene. Manglende datapunkt i ett eller flere år viser at det ikke finnes målinger av vanntemperatur i alle måneder i perioden juni-september.



Norsk institutt for naturforskning, NINA, er en uavhengig stiftelse som forsker på natur og samspillet natur–samfunn.

NINA ble etablert i 1988. Hovedkontoret er i Trondheim, med avdelingskontorer i Tromsø, Lillehammer, Bergen og Oslo. I tillegg driver NINA Sæterfjellet avlsstasjon for fjellrev på Oppdal, og forskningsstasjonen for vill laksefisk på Ims i Rogaland.

NINAs virksomhet omfatter både forskning og utredning, miljøovervåking, rådgivning og evaluering. NINA har stor bredde i kompetanse og erfaring med både naturvitere og samfunnsvitere i staben. Vi har kunnskap om artene, naturtypene, samfunnets bruk av naturen og sammenhenger med de store drivkreftene i naturen.

ISSN:1504-3312
ISBN: 978-82-426-4636-1

Norsk institutt for naturforskning

NINA Hovedkontor

Postadresse: Postboks 5685 Torgarden, 7485 Trondheim

Besøks-/leveringsadresse: Høgskoleringen 9, 7034 Trondheim

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

E-post: firmapost@nina.no

Organisasjonsnummer 9500 37 687

<http://www.nina.no>



Samarbeid og kunnskap for framtidens miljøløsninger