www.nina.no

1861

NINA Rapport

Vandringsløsninger for fisk i regulerte vassdrag

Oppsummering av hovedfunn fra forskningsprosjektet SafePass

Torbjørn Forseth & Jon Museth

NINA

Norsk institutt for naturforskning

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.

Vandringsløsninger for fisk i regulerte vassdrag

Oppsummering av hovedfunn fra forskningsprosjektet SafePass

Torbjørn Forseth
Jon Museth

Norsk institutt for naturforskning

Forseth, T. & Museth, J. 2020. Vandringsløsninger for fisk i regulerte vassdrag – oppsummering av resultater fra forskningsprosjektet SafePass. NINA Rapport 1861. Norsk institutt for naturforskning.

Trondheim, september 2020

ISSN: 1504-3312
ISBN: 978-82-426-4629-3

RETTIGHETSHAVER
© Norsk institutt for naturforskning
Publikasjonen kan siteres fritt med kildeangivelse

TILGJENGELIGHET
Åpen

PUBLISERINGSTYPE
Digitalt dokument (pdf)

KVALITETSSIKRET AV
Eva B. Thorstad

ANSVARLIG SIGNATUR
Forskningssjef Ingeborg Palm Helland (sign.)

OPPDRAGSGIVER(E)/BIDRAGSYTER(E)
Norges forskningsråd, Miljødirektoratet, Norges vassdrags- og energidirektorat, Energi Norge og 12 kraftselskap.

OPPDRAGSGIVERS REFERANSE
Norge forskningsråd, 244022

FORSIDEBILDE
Utsetting av merket ål i Ätran © NINA

NØKKELORD
- ørret, laks, ål, harr
- smolt, vinterstøinger, blankål
- mønsterpraksis fiskevandring
- vandringsspor, hydraulisk modellering (CFD), atferdsmodellering
- fisketrapper
- nedvandring

KEY WORDS
Brown trout, Atlantic salmon, European eel, European grayling, smolt, kelts, silver eel, best practice fish migration, migration tracks, hydraulic modelling (CFD), behavior modelling, fishways, downstream migration

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

Forseth, T. & Museth, J. 2020. Vandringsløsninger for fisk i regulerte vassdrag – oppsummering av resultater fra forskningsprosjektet SafePass. NINA Rapport 1861. Norsk institutt for naturforskning.

I denne rapporten oppsummeres viktige resultater fra SafePass, som er det største forskningsprosjektet gjennomført på vandringsløsninger for fisk i Norge. Prosjektet etablerte mønsterpraksisløsninger, som er løsninger som med høy grad av sikkerhet medfører at minst 90 % av fisken passerer av vandringshindrene i live og uskadd

Hovedinnsatsen var rettet mot nedvandring av smolt og vinterstøinger av laks, innlandsørret og blankål For disse artene presenteres det mønsterpraksisløsninger for små og mellomstore kraftverk. For store kraftverk (med slukeevner over 90-100 m^3/s) er mønsterpraksis utfordrende både teknisk, driftsmessig og økonomisk, og prosjektet har gjennomført flere store feltstudier som kombinerer detaljerte vandringsspor og hydraulisk modellering (CFD). Målet var å forstå hvor og hvorfor fisk vandrer som de gjør når de nærmer seg et kraftversinntak. En forklaringsmodell ble utviklet for nedvandring av laksesmolt, og arbeid pågår med de andre artene. Flere viktige atferdsmønster for vinterstøinger av laks og innlandsørret og for blankål blir beskrevet i rapporten.

Vi viste at utprøving av tiltak for nedvandring av laksesmolt i datamodeller som kombinere hydraulisk modellering med kunnskap om vandringsmekanismer (og etter hvert prediktive vandringsmodeller) er et svært viktig verktøy for å unngå kostbare prøve og feile tilnærminger i utviklingen av vandringsløsninger ved store kraftverk. De fleste tiltakene som ble testet hadde sannsynligvis ingen eller negativ effekt på andelen fisk som kunne passere forbi kraftversinntaket, og bare et grindbasert ledegjerde virket lovende. Vi planlegger en fullskala test av et slikt gjerde i 2021.

Trapper for oppvandring av innlandsfisk er en betydelig utfordring i Norge, fordi mange av trappene har blitt bygd etter mal fra laksetrapper (kulpetrapper og dels motstrømstrapper). Vi har i samarbeid med et annet forskningsprosjekt sett både på behovet for trapper for andre arter enn ørret og bidratt med kunnskap for designkriterier for slike trapper. Vi har vist gjennom et praktisk forsøk at det er mulig å bygge om en tradisjonell kulpetrapp til en hybridtrapp (kulp- og spalte) med store steiner i bunnen, som gir vandringsmuligheter for flere arter og fisk av mindre størrelse.

SafePass har styrket de norske fagmiljøene i den internasjonale forskningsarenaen på fiskevandringsløsninger, og arbeidet fortsetter nå i forskningssenteret HydroCen og i nye nasjonale og internasjonale prosjekter, særlig rettet mot vandringsløsninger i store vassdrag og kraftverk.

Torbjørn Forseth, Norsk institutt for naturforskning, Postboks 5685 Torgarden, 7485 Trondheim, torbjorn.forseth@nina.no
Jon Museth, Norsk institutt for naturforskning, Vormstuguvegen 40, 2624 Lillehammer, jon.museth@nina.no

Abstract

Forseth, T. & Museth, J. 2020. Migration solutions for fish in regulated rivers – summary of results from the SafePass research project. NINA Report 1861. Norwegian Institute for Nature Research.

We report the main results from the SafePass project, the largest research effort on fish migration solutions in regulated rivers in Norway so far. The project has established "best practice solutions" – solutions that if installed according to criteria may attain 90 % passage efficiency.

The major efforts were on downstream migration of smolts and kelts of Atlantic salmon and inland brown trout, as well as on silver eels, and "best practice solutions" are presented for downstream migrations past small and medium sized hydropower intakes. These solutions are challenging in terms of technology, operation and costs in large hydropower intakes with flow capacities above 90-100 m^3/s. To address the challenges for large facilities, we have performed several full scale field studies at hydropower intakes where we combine high resolution fish migration tracks and hydraulic modelling (CFD). The aim was to provide knowledge on how and why fish behave as they do when they approach the intake. An explanatory migration model was developed and validated for Atlantic salmon smolts and work is ongoing for the other species and life stages. In the report, several important migration patterns are described for salmon and trout kelts and silver eels, important as criteria for developing migration solutions.

We have also tested an alternative to the resource demanding "trial and error" approach to downstream migration solutions, based on a combination of river reach hydraulic modelling and knowledge on migration mechanisms (or prediction models under development). The model testing rejected several measures, deemed as promising by the involved scientists, and we advocate the use of such modelling for the development of downstream migration solutions in large systems. The only promising solution was a rack-based floating guiding structure. A full scale test of such a system is planned for 2021.

Upstream fishways is a major challenge for inland fish species in Norway, because most fishways have been constructed based on design criteria aimed at Atlantic salmon (mainly pool-and-weir types, but even Denil fishways) and fail at passing many of the relevant species. In cooperation with another research project we have explored both the need for migration solutions for other species than trout and provided design criteria for alterative fishways. In a case study, a pool-and-weir type fishway was reconstructed to a vertical slot hybrid with boulders on the bottom. The number of fish species passing the fishways increased and similar reconstructions may open more upstream migration barriers in the large inland rivers in Norway.

SafePass has strengthened the Norwegian research community within the international research arena on fish migration solutions, and the work continues in the HydroCen research centre and in new national and international projects, with particular focus on migration solutions in rivers with large hydropower installations.

Torbjørn Forseth, Norwegian Institute for Nature Research, P.O. Box 5685 Torgarden, NO-7485 Trondheim, Norway, torbjorn.forseth@nina.no
Jon Museth, Norwegian Institute for Nature Research, Vormstuguvegen 40, NO-2624 Lillehammer, Norway, jon.museth@nina.no

Innhold

Sammendrag **3**

Abstract **4**

Innhold **5**

Forord **6**

1 Bakgrunn **7**

2 Organisering av prosjektet **8**

3 Kunnskapsoppsummering og mønsterpraksis **9**

4 Nedvandringsløsninger – mønsterpraksis for små og mellomstore kraftverk **10**

5 Nedvandringsløsninger for større kraftverk **12**
5.1 Smolt av laks og innlandsørret 13
5.2 Vinterstøinger av laks og innlandsørret 15

6 Oppvandringsløsninger for innlandsfisk **19**

7 Status og veien videre **21**

8 Publikasjonsliste fra prosjektet **22**

9 Referanser **23**

Forord

Denne rapporten gir en oppsummering av viktige resultater fra forskningsprosjektet SafePass, som et kortfattet og foreløpig alternativ til den opprinnelig planlagte håndboka for vandringsløsninger. Både brukergruppa i prosjektet og fagutvalget i arbeidspakke 4 i HydroCen (der SafePass ble tatt inn som assosiert prosjekt) var enige om å ikke prioritere ei håndbok i prosjektets sluttfase, primært fordi arbeidet fortsetter i regi av HydroCen, og nye og viktige resultat vil komme i nye studier.

SafePass har vært finansiert av Norges forskningsråd (prosjekt 244022), Energi Norge og kraftselskapene E-CO Energi, Agder Energi Vannkraft, Sira-Kvina kraftselskap, Eidsiva Energi og GLB, BKK, Statkraft, Lyse Energi, SFE, TrønderEnergi, NTE og Akershus Energi, og av Miljødirektoratet og NVE. Jeg takker alle bidragsyterne. Agder Energi Vannkraft, Eidsiva Energi og TrønderEnergi bidro med betydelig ekstrafinansiering til feltstudiene i henholdsvis Mandalselva, Gudbrandsdalslågen (Hunderfossen) og Orkla. Forskningssenteret HydroCen har også bidratt økonomisk i sluttfasen av prosjektet (NFR prosjekt 257588, og en rekke brukerpartnere). I tillegg til økonomiske bidrag vil jeg takke for gode og nyttige diskusjoner både i prosjektets brukergruppe og i fagutvalget i HydroCen.

Jeg takker også alle forskerne som har bidratt i SafePass, fra NORCE LFI-Bergen, SINTEF Energi, NTNU og NINA, og våre internasjonale partnere i Sverige, Danmark, Frankrike, Østerrike og Canada.

Til slutt vil jeg minnes Hans-Petter Fjeldstad som var sentral i prosjektet, men som dessverre gikk bort i vår – så alt for tidlig. Hans-Petter har virkelig satt spor etter seg i arbeidet med å bedre forholdene for fisk i regulerte vassdrag, og vi er mange i den store gruppa som utgjorde SafePass som savner han.

Trondheim 28. september 2020

Torbjørn Forseth
Prosjektleder

1 Bakgrunn

Prosjektet SafePass “Safe and efficient two-way migration for salmonids and European eel past hydropower structures” ble gjennomført fra tidlig 2015 til august 2019 og representerer et betydelig faglig løft for kunnskapen om vandringsløsninger for fisk i Norge. Bakgrunnen for prosjektet var nye og strengere krav til å sikre toveis vandring av fisk forbi vannkraftinstallasjoner og behovet for å utvikle effektive tiltak samtidig som det tas hensyn til kraftproduksjonen. I Norge har vi vært flinke til å bygge fisketrapper for oppvandring av laks, men mange av trappene i innlandet bygd for andre arter (innlandsørret, harr og andre arter som også vandrer) fungerer dårlig. I tillegg har vi i Norge, som i resten av verden, vært dårlige til å utvikle tiltak for nedvandring av fisk, slik at de unngår å bli skadet eller drept i kraftverksturbinene.

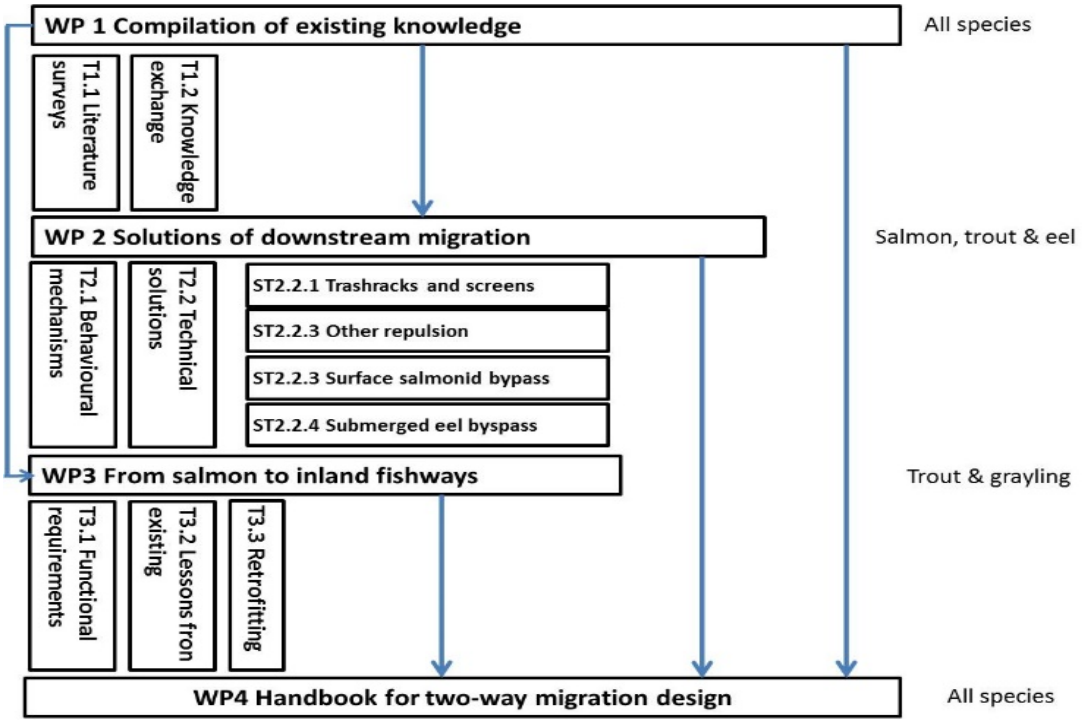
Hovedmålet med prosjektet var å utvikle kunnskap for sikker og effektiv passasje av laks, ørret, harr og ål forbi vannkraftinstallasjoner, som er anvendbare for vannkraftindustrien og forvaltningen. Hovedmålet skulle nås gjennom følgende delmål:

- Sammenstilling og tilpassing av internasjonal kunnskap om toveis vandringsløsninger for de utvalgte artene under norske forhold.
- Fylle viktige kunnskapshull og skaffe generell kunnskap om nedstrøms vandring hos de utvalgte artene ved å kombinere detaljerte atferdsstudier og studier av hydrauliske forhold for å forstå hvordan og hvorfor fisk vandrer som de gjør – som grunnlag for tiltak.
- Teste særlig lovende løsninger for nedstrøms vandring
- Utrede behovet for og design for ombygging av fisketrapper i innlandet

I følge den opprinnelige planen skulle resultatene samles i ei håndbok for toveis vandring, men fordi arbeidet fortsetter i andre prosjekter ble dette sluttproduktet utsatt og de viktigste funnene blir i stedet kortfattet presentert i denne rapporten. Rapporten starter med en kort presentasjon av prosjektets organisering før vi oppsummerer de viktigste funnene fra de ulike arbeidspakkene. Noen av resultatene er allerede publisert i rapportform eller internasjonalt, mens andre funn er å betrakte som foreløpige basert på ufullstendige analyser av noen av studiene. Både forvaltning og vannkraftindustrien har behov for en slik oppsummering av kunnskapsgrunnlaget for tiltak i en rekke vassdrag. Rapporten avsluttes med en betraktning om hvor vi står og veien videre for forskning på vandringsløsninger i Norge.

2 Organisering av prosjektet

I samsvar med delmålene har prosjektet vært organisert i fire arbeidspakker (tre forskningspakker og en formidlingspakke) med tilhørende forskningsoppgaver (**figur 1**). Prosjektet har hatt en stipendiat (disputerte i april 2019) og en post doc. WP1 har vært ledet av SINTEF og utført i samarbeid med NORCE LFI Bergen, NINA og internasjonale partnere og kontakter. WP2 har vært ledet av NINA Trondheim og utført i samarbeid med SINTEF, NTNU, internasjonale partnere (særlig DTU Danmark og Karlstad Universitet) og både stipendiaten og post-doc har hatt dette som arbeidsfelt. WP3 har vært ledet av NINA Lillehammer og utført i samarbeid med NORCE LFI Bergen og SINTEF.



Figur 1. *Organisering av SafePass i ulike arbeidspakker (WP) og forskningsoppgaver (T) og de målartene som inngikk i hver arbeidspakke.*

Prosjektet har hatt en brukergruppe bestående av representanter fra Energi Norge, 12 kraftselskap, Miljødirektoratet og NVE som har hatt årlige møter med diskusjon av resultater og videre progresjon. Prosjektet var i 2015 og 2016 organisert som en del av FME CEDREN (https://www.cedren.no). Fra 2017 har prosjektet vært tilknyttet FME HydroCen (https://www.ntnu.no/hydrocen) under arbeidspakke 4, med felles innsats på temaet. Fagutvalget for arbeidspakke 4 i HydroCen har derfor også fått presentert og diskutert resultater og progresjon fra prosjektet. Tre av brukerpartnere har deltatt med betydelig ekstra finansiering til forskningen ved å gjennomføre konkrete tiltak som har blitt evaluert.

3 Kunnskapsoppsummering og mønsterpraksis

Vitenskapelige publikasjoner, rapporter og grå litteratur (veiledere og rapporten utenom serier) om vandringsløsninger fra hele verden ble samlet i en litteraturdatabase, gjennomgått og vurdert i forhold til relevans for norske forhold (arter og vannkraftsystemet). Gjennomgangen resulterte i en rapport om mønsterpraksis for vandringsløsninger (Fjeldstad mfl. 2018, **figur 2**). Mønsterpraksis er løsninger basert på best tilgjengelige teknologi som kan oppnå 90 % passeringseffektivitet (andel fisk som passerer vandringshindret i live og uskadd) forutsatt at designkriterier, dimensjonering og riktig beliggenhet er overholdt. Flere land har hatt slike standarder og Norge fikk en slik gjennom denne rapporten. Anbefalingene er allerede tatt aktivt i bruk av forvaltning og industri i konkrete utbyggingsprosjekter. Rapporten ble også videreutviklet til en vitenskapelig artikkel (Fjeldstad mfl. 2018b). I tillegg blir vandringsløsningene beskrevet i ei tiltakshåndbok for bedre vannmiljø (Pulg mfl. 2018). Vi henviser til disse rapportene for beskrivelser av mønsterpraksisløsninger for opp- og nedvandring og hjelp til valg av teknisk løsning. I kapitlene under gir vi imidlertid kortfattede beskrivelser av mønsterpraksis for noen av utfordringene, og kommenterer og presiserer ut fra kunnskap fra SafePass og andre nye studier.

SINTEF

2017:00723 - Åpen

Rapport

Sikker toveis fiskevandring forbi vannkraftverk

Kunnskapsoppdatering og mønsterpraksis

Forfattere
Hans-Petter Fjeldstad, Sintef Energi
Ulrich Pulg, LFI, UNI Research Miljø
Torbjørn Forseth, NINA

SINTEF Energi AS
Vannressurser
2018-02-01

Figur 2. *Faksimile av forside til mønsterpraksisrapport.*

4 Nedvandringsløsninger – mønsterpraksis for små og mellomstore kraftverk

Nedvandringsløsninger som hindrer fisk i å vandre inn i kraftverksinntak og gjennom turbinene, og bringer fisken raskt til nedstrøms strekning, er både internasjonalt og nasjonalt den største faglige utfordringen (Silva mfl. 2018). SafePass har derfor hatt størst innsats på dette temaet. Mønsterpraksis er lavvinklede (i forhold til strømretningen) fisketette grinder (som fisken ikke kan passere) med en fluktåpning i nedstrøms ende. Det stilles krav til vinklingen (helst mindre enn 30-40 grader), lysåpningen mellom stavene (tilpasset fiskens bredde), hastigheten mot grinda (slik at fisken ikke klemmes fast mot grinda) og utformingen av fluktåpningen (dimensjon og hydrauliske forhold). Kravene varierer med art og fiskestørrelse og forutsetter at grind og fluktvei kan kobles sammen ved kraftverksinntaket. Lav vinkel mot strømretningen kan oppnås både med en alfa-grind (vinklet fra bunnen og opp) og en loddrett beta-grind som monteres skrått på strømretningen. Valg av alfa- eller betagrind er bare avhengig av inntaksområdets utforming og praktiske hensyn.

I SafePass ble det gjort detaljerte hydrauliske studier av de vanligste formene for mønsterpraksisgrinder. Det ble konkludert at for fisketette grinder er det flere fordeler med horisontale staver, men at også vertikale staver montert parallelt med strømretningen har gode egenskaper. Det har blitt montert noen mønsterpraksisgrinder med horisontale staver i vassdrag i Norden og de ser ut til å være spesielt egnede når det gjelder rensk og falltap. Dersom det ikke er mulig å montere fisketette grinder og man er mer avhengig av grindenes atferdsmessige ledeegenskaper vil imidlertid vertikale staver være overlegne (Albayrak mfl. 2018, 2020; Beck mfl. 2019).

Det presiseres at en slik mønsterpraksisløsning består av en kombinasjon av de tre fysiske elementene – grindas vinkel, lysåpningen og fluktåpningens utforming - og at kravene til hvert element er gjensidig avhengig av hverandre. En ikke-optimal utformet grindløsning stiller for eksempel høyere krav til fluktåpningen (volum og strømningsforhold), mens en godt utformet fluktvei kan lette på kravene til grindas utforming.

For nedvandrende smolt av laks, ørret eller røye er normalkravet at grinda vinkles 30-40 grader eller mindre på strømretningen mot inntaket, at lysåpningen i grinda er 15 mm og at vannhastigheten normalt på grinda bør være lavere enn 0,5 m/s (enda lavere ved større grindvinkel). I noen land er mønsterpraksiskravet 10-12 mm lysåpning (fordi små smolt kan presse seg gjennom 15 mm lysåpning), men i praksis er så små lysåpninger bare nødvendig der grindvinkelen er for stor og/eller at fluktåpningen er dårlig utformet eller plassert. Fluktåpningen skal plasseres i nedre endre av grinda, være minst 1 m bred og 0,4 m dyp (helst dypere, og dyp prioriteres over bredde). Den skal være utformet slik at vannakselerasjonen ikke overskrider 1 m per sekund per løpemeter, men at det oppnås en vannhastighet som overskrider smoltens svømmekapasitet mot enden av inngangen (>8 kroppslengder/s eller ca. 1,2 m/s). Høyere akselerasjon kan skremme smolten og medføre at den avviser fluktåpningen (Enders mfl. 2012). Gunstige strømningsforhold kan oppnås ved en traktformet utforming. En smal spalte som dekker hele dypet har gitt gode resultater og er spesielt aktuelt der også blankål skal passere. En fluktåpning i toppen gir også gode resultater, og nyere studier viser at også blankål vil passere slike åpninger, i like stor grad som i bunnåpninger (Travade mfl. 2010, Calles mfl. 2013, Økland mfl. 2019). Andre studier antyder at bunnåpninger er nødvendig for ål (Gosset mfl. 2005, Marohn mfl. 2014). Våre studier fra Ätran viser at blankål ikke primært vandrer langs bunnen, men også kan vandre midt i vannsøylen, og dette gir støtte for at bunnåpninger ikke alltid er nødvendig.

Kunnskapsgrunnlaget for mønsterpraksis for nedvandring av blankål framstår som dårligere enn for laksefisk. Dette gjelder spesielt vinkling av grind og utforming av fluktåpninger. Det er i flere land i Europa etablert praksis at en fiskesikker grind for blankål bør ha en lysåpning på maksimalt 10 mm for å hindre at de minste fiskene kan passere, og vannhastigheten mot grinda må være under 0,5 m/s. Det imidlertid vist at også 15 mm lysåpning kan gi svært gode resultater dersom

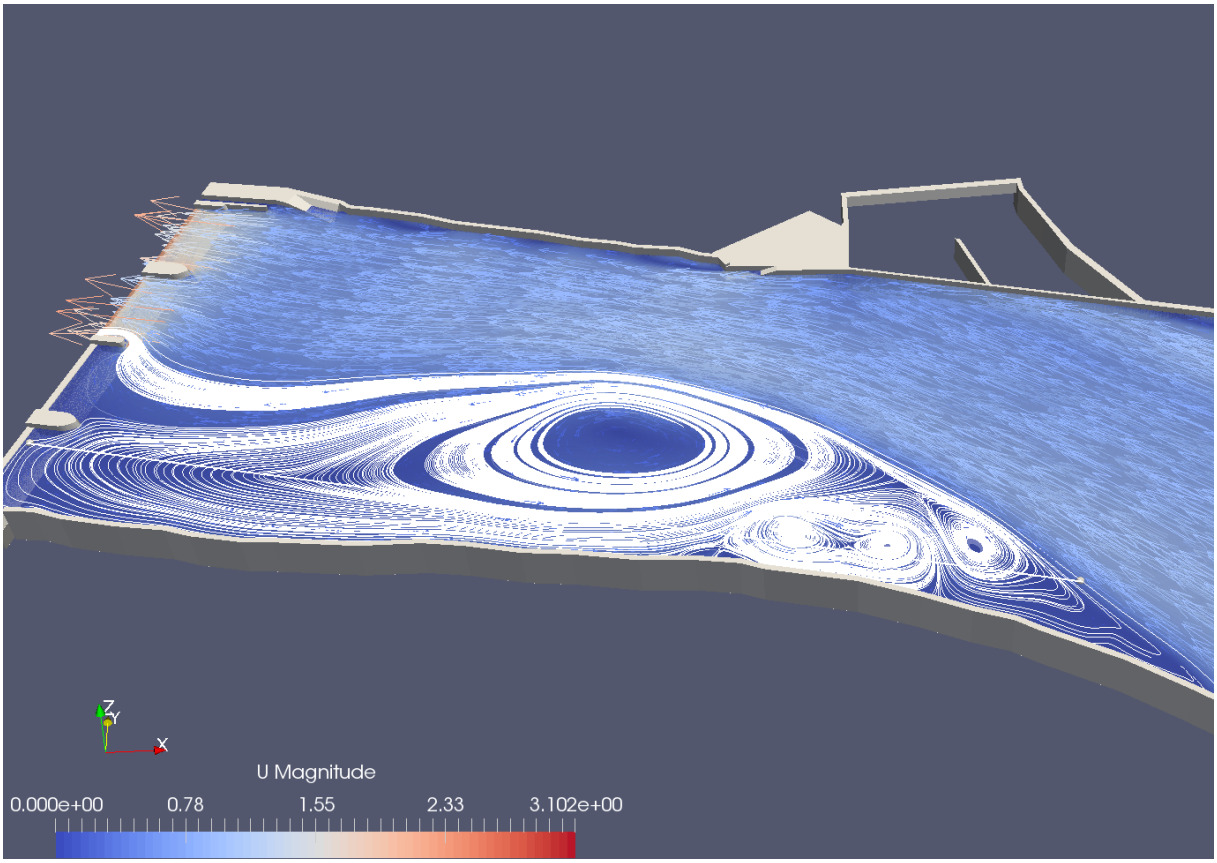
de andre delene av løsningen er godt utformet (Nyquist mfl. 2017). Igjen er det altså kombinasjonene av grindvinkel, lysåpning og fluktvei som er viktig.

For små fisk som skal passere store inntak vil ofte kombinasjonen av krav til vinkling, lysåpning og vannhastighet mot grinda medføre at grindene blir store og både teknisk, driftsmessig og økonomisk utfordrende å montere ved eksisterende inntak. Kunnskapsoppsummeringen og utveksling av kunnskap med internasjonale partnere viser at det i Europa ikke er installert mønsterpraksisløsninger for kraftverksinntak med store slukeevner, og nedvandringsløsninger for kraftverk med slukeevner over 90-100 m^3/s har enten dårlig funksjon eller er ikke installert. Gjennom SafePass er det derfor gjort betydelig innsats for å skaffe kunnskap som grunnlag for tiltak ved store kraftverksinntak.

5 Nedvandringsløsninger for større kraftverk

Tekniske, driftsmessige og økonomiske hensyn tilsier i praksis at en oppskalering av mønsterpraksis for små- og mellomstore kraftverk til store anlegg er utfordrende, og at slike anlegg som oftest er uten sikre nedvandringsløsninger eller har løsninger som fungerer dårligere enn kravene i mønsterpraksis. For å bidra med et kunnskapsgrunnlag for løsninger i store anlegg har SafePass gjennomført en rekke studier med mål om å forstå hvordan nedvandrende laks, ørret og ål oppfører seg når de svømmer mot et kraftverksinntak og mekanismene som ligger bak rutevalget. Dette er generisk kunnskap som kan brukes til å utvikle mer generell tiltaksmetodikk. Kunnskapen ble framskaffet ved å kombinere detaljstudier av fiskens atferd (vandringsspor) med oppmåling og modellering av hydrauliske forhold.

Vi har skaffet vandringsspor av svært god kvalitet for laksemolt ved Laudal kraftverk i Mandalselva, for laksesmolt og utgytte laks (vinterstøinger) ved Svorkmo kraftverk i Orkla, for smolt og utgytt innlandsørret forbi Hunderfossen kraftverk og for ål i Ätran i Sverige. For å få til dette utviklet vi ny metodikk for 2D og 3D sporing av fisk (Baktoft mfl. 2017). For alle lokalitetene har det blitt satt opp detaljerte hydrauliske modeller som gjorde at vi kunne ta ut en rekke hydrauliske parametere for hver posisjon til fiskene (**figur 3**). Det viste seg å være faglig svært krevende å analysere koblingen mellom atferd og hydrauliske variable (flere hundretusen fiskeposisjoner og hydrauliske verdier fra hver studie) og det gjenstår derfor arbeid med data fra både Hunderfossen og Ätran. Også kjøringen av hydrauliske modeller på en så stor skala (elveavsnitt) har vært krevende. Vi har etablert samarbeid med anerkjente fagfolk internasjonalt for å kunne utnytte dataseriene på best mulig måte. Nedenfor gjennomgår vi noen av de funnene vi har gjort som er av direkte relevans for arbeidet med nedvandringsløsninger forbi større kraftverk.



***Figur 3**. Eksempel på en hydraulisk (CFD) simulering fra Bjørsetdammen i Orkla. Fargeskalaen angir vannhastigheter (U Magnitude) mens vektorene angir strømretningen. I nederste halvdel av illustrasjonen sees et resirkuleringsområde som endres kontinuerlig og modellen fanger opp denne dynamikken. Figuren er produsert av Marcell Szabo-Meszaros som var stipendiat i prosjektet.*

5.1 Smolt av laks og innlandsørret

Basert på vandringsspor fra 76 smolt (**figur 4**) og hydrauliske data fra en CFD-modell (Computational Fluid Dynamics modeling) foran inntaket til Laudal kraftverk i Manflåvann i Mandalselva har vi utviklet forklaringsmodeller for både fiskens svømmehastighet og retningsavvik fra strømretningen (Silva mfl 2020). Modellen viser at smoltens atferd er påvirket av en rekke hydrauliske egenskaper (som strømningsvektorer og turbulensegenskaper) og samspillet mellom disse. Forklaringsmodellen for svømmeretning relativt til strømretningen forklarte mye av atferden. Denne modellen ble deretter testet mot vandringssporene fra 91 smolt (**figur 4**) og hydrauliske CFD data fra inntaket til Svorkmo kraftverk i Bjørsetdammen i Orkla. Det var godt samsvar mellom predikert og observert svømmeretning og modellen ser ut til å ha fanget opp generelle sammenhenger mellom smoltatferd og hydrauliske forhold. Det arbeides nå med å omforme disse forklaringsmodellene til prediktive modeller. Målet er at man skal kunne forutsi vandringsruta til smolt ut fra hvor den kommer inn i studieområdet og strømningsforholdene foran kraftversinntaket. Som vi skal vise nedenfor kan en slik modell brukes til modellmessig testing av ulike tiltakstyper som skal hindre at smolt vandrer inn i kraftverk.

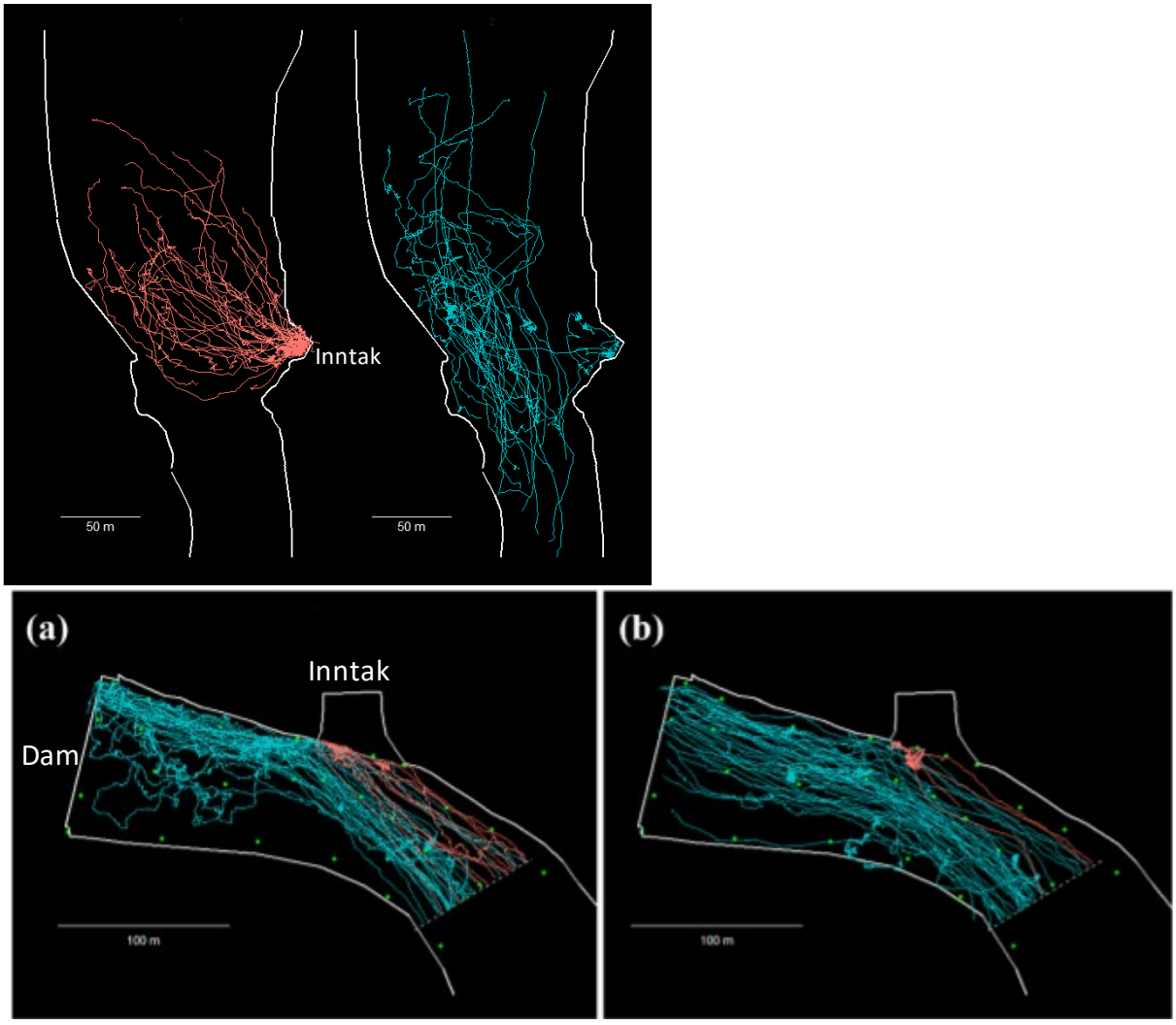
Av praktisk betydning for nedvandringstiltak for laksesmolt kan vi allerede trekke ut noen generelle funn fra de to studiene. Et viktig funn var at skjebnen til smolten var avhengig av hvor den kom inn i studieområdet (Szabo-Meszaros mfl. 2019, Silva mfl 2020). Fisk som kom inn på samme side som kraftversinntaket hadde mye høyere sannsynlighet for å vandre inn i kraftversinntaket enn fisk som kom inn på motsatt side, der vannstrømmen førte de forbi (se **figur 4**). Dette mønstret oppstår fordi fisken i henhold til våre analyser i høy grad følger vannstrømmen når hastigheten er større enn 0,4-0,5 m/s. På vannhastigheter under 0,2-0,3 m/s kan smolten fritt avvike fra strømretningen og atferden var mer uforutsigbar. På vannhastigheter over ca. 0,7 m/s, og spesielt i kombinasjon med høy turbulens, vil fisken svømme mot strømmen for å unngå ugunstige hydrauliske forhold. Den vil da svømme med hastigheter som overskrider dens langvarige svømmekapasitet og den vil raskt bli sliten. Disse funnene innebærer at fiskens vandringsvei i høy grad kan forutsies ut fra hvor den kommer inn i området og vannstrømmens hastighet og retning inn mot kraftversinntaket og eventuelle alternative vandringsveier (f. eks. luker). Dette innebærer også at styrte vannslipp forbi kraftverk kan redusere andelen smolt som vandrer inn betydelig, slik som er vist i forsøk ved Laudal (se Forseth mfl. 2020 for en oppsummering). Også ved Bjørsetdammen i Orkla viste analysene at utvandringsveien var påvirket av vannføringen inn i kraftverket og antall åpne luker – det vil si hvor mye vann som slippes forbi (Szabo-Meszaros mfl. 2019).

Et annet viktig funn var at laksesmolt fulgte nedadgående (vertikale) vannstrømmer, for eksempel inn i et dykket kraftverksinntak (slik det er ved Laudal) eller gjennom en dykket slisse (slik det er i Bjørsetdammen). Dette innebærer at dykkede inntak eller tiltak i øvre vannlag som skaper en nedadgående strøm i liten grad vil kunne hindre innvandring i kraftverk. Selv om det gjenstår en del analyser av data fra studiene i Hunderfossen, er det et tydelig mønster at også smolt av innlandsørret følger den dykkende strømmen ned i kraftversinntaket. Her dykket smolten ned så vidt langt unna kraftverksinntaket at tiltak i øvre vannlag nær inntaket ikke vil ha særlig effekt.

Både laksesmolt og smolt av innlandsørret brukte kort tid fra de ankom inntaksområdet og til de hadde passert, enten inn i kraftverket eller gjennom luker i dammene (strekninger på 400-500 m). De brukte sjelden tid til å lete etter alternative vandringsveier, og når de hadde kommet inn i en strøm som førte dem mot for eksempel kraftversinntaket svømte de raskt inn. Dette innebærer at tiltak må gi tydelig vandringssignal og settes inn før smolten har kommet inn i en rask strøm mot kraftverket.

Denne generelle kunnskapen om smoltatferd ble benyttet i en studie der vi brukte den hydrauliske modellen for inntaksområdet ved Bjørsetdammen til å teste en rekke manøvreringsmessige og fysiske tiltak i en datamodell (Szabo-Meszaros mfl. 2019). Når man har satt opp en batymetrisk terrengmodell (med kraftversinstallasjonene) og en hydraulisk modell for et inntaksområde er det relativt enkelt å endre vannslipp, områdets utforming (som elvens bredde) eller å sette inn

strømstyrere eller ledegjerder i modellen. Basert på prosjektgruppas kompetanse foreslo vi en rekke tiltak som ble vurdert som lovende for å redusere innvandringen av smolt i kraftverket. Dette var tiltak som innbar endringer i luke for vannslipp, utvidelse av elvetverrsnittet, strømstyrende fyllinger, og tettet og permeable (grinder) ledegjerder. Tiltakene ble testet ved både lav og høy vannføring i elva. De ulike tiltakene ble vurdert både kostnadsmessig og driftsmessig, men viktigst – om de sannsynligvis ville redusere andelen smolt som går inn i kraftverket. I effektevalueringen brukte vi kunnskapen om smoltatferd og hydrauliske forhold beskrevet ovenfor. Av alle de foreslåtte tiltakene var det bare en flyende ledegrind som leder fisken fra kraftverksida av elva mot den andre elvebredden og inn i en strøm mot luka som var lovende. Interessant nok ble også tiltaket med et tett flytende ledegjerde forkastet som effektivt tiltak. Årsaken var at et slikt gjerde setter opp en nedadgående vannstrøm som smolten kan følge, dykke under og fortsette ned mot den dykkede inntaksslissa foran kraftversinntaket (som merkestudien vår viste at smolten også raskt dykker ned til og passerer). Til forskjell gir ikke et ledegjerde med grind samme nedadgående vannstrømmer, og det er større sannsynlighet for at smolten vil følge grinda (der det også skapes en parallellstrøm langs grinda) og ledes over i den alternative strømmen som går mot luka. Modelltesten ga også viktig informasjon om *hvor* et slikt tiltak mest effektivt kan settes inn.



Figur 4. *Vandingsspor for smolt som vandret inn i kraftverkene (i rødt) eller forbi (turkis) ved inntaket til Laudal kraftverk i Manflåvann, Mandalselva (øvre figur) og ved inntaket til Svorkmo kraftverk i Bjørsetdammen, Orkla (nedre figurer), når enten ei luke (a) eller to eller flere luker var åpne (b). Lukene åpnes i rekkefølge fra øverst i bildet. Merk mønsteret med at fisk som kommer inn på samme side som inntakene oftere går inn enn de som kommer inn på motsatt side. Figurene er lagd av internasjonal partner Henrik Baktoft, DTU Aqua, Danmark.*

Denne relativt enkle modelløvelsen i en datamaskin gjorde altså at en rekke på forhånd lovende tiltak kunne forkastes - en prosess som kunne tatt år om tiltakene skulle vært utprøvd i full skala. CFD modellen som vi benyttet var arbeidskrevende å sette opp og krevde stor datakraft for å kjøre. I nye prosjekter i regi av HydroCen arbeides det nå med hvordan modellene kan forenkles slik at de kan kjøres på ordinære PCer, uten at den nødvendige detaljeringen går tapt. I tillegg vil en ferdig utviklet prediksjonsmodell for smoltatferd (se ovenfor) kunne styrke denne tilnærmingen ytterligere, både for å kunne forutsi hvor mye smolt som vandrer inn i kraftverket og hvorfor. Vi oppmuntrer til bruk av en slik modellmessig utprøving i alle tilfeller der det er utfordrende å finne gode tiltak for nedvandring, slik at man i større grad unngår «prøve, feile og justere» tilnærmingen som har dominert tiltaksutviklingen i mange år.

Arbeidet med ledegjerder med grinder for å sikre nedvandrende fisk fortsetter nå i regi av HydroCen med en fullskala test i Mandalselva våren 2021, og i nye prosjektinitiativ fra forskergruppa i SafePass og internasjonale samarbeidspartnere.

5.2 Vinterstøinger av laks og innlandsørret

Studiene i Bjørsetdammen i Orkla og Hunderfossen i Gudbrandsdalslågen ga mye ny kunnskap om atferd til henholdsvis vinterstøinger av laks og innlandsørret. Atferden til de to artene var lik. Selv om det gjenstår arbeid med å koble vandringssporene (48 for laks og 47 for ørret) og hydrauliske forhold, er det viktige funn som kan trekkes fram og som er til nytte for vurderinger av tiltak. Disse funnene presenteres her.

Vinterstøingene av både laks og ørret hadde generelt lange oppholdstider ved dammene, og svømte til dels svært lange distanser (opp til 100 km) mens de søkte rundt i kraftverksområdet. Dette gjaldt både fisk som ble fanget og merket i dammen og fisk som ble merket lengre oppstrøms og som hadde startet sin nedstrømsvandring før de ankom kraftverksdammene. I begge lokalitetene hadde støingene muligheter til å vandre videre. Lengden og kompleksiteten på vandringssporene gjør at det vil være lite interessant å analysere sammenhenger mellom bevegelsene og hydrauliske forhold for alle posisjonene, slik det ble gjort for smolt. I stedet fokuserer vi i pågående analyser på hydrailske forhold der fisken aksepterer eller avviser alternative fluktruter (se nedenfor).

I Orkla er lysåpningen i varegrinda foran kraftversinntaket 5 cm og vinterstøingene var for store til å kunne passere. Her var det imidlertid alternative vandringsveier forbi i et minstevannføringsslipp på 4 m^3/s, gjennom et dykket rør og ei fisketrapp (2 m^3/s i hver) i dammen. Etter 1. mai blir en av lukene i dammen åpnet for å slippe en minstevannføring på 20 m^3/s. Nesten alle vinterstøingene vandret gjennom luka etter at den ble åpnet, mens bare to passerte før luka ble åpnet, trolig gjennom trappa. I Hunderfossen er lysåpningen i varegrinda 10 cm og det meste av vinterstøingene kan passere denne. Sju av 47 støinger passerte helt sikkert grinda, mens det for seks støinger var usikkert om de passerte grinda eller gikk ned en nærliggende isluke. Den vanligste nedvandrigsveien var gjennom en av de fem flomlukene som var åpne under utvandringen. Tidligere studier av nedvandrende støing ved Hunderfossen har vist at en større andel støing (30-50%) passerte varegrinda (Kraabøl mfl. 2013, 2015). Dette skyldes høyst sannsynlig andre vannføringsforhold disse åra, og man må derfor påregne at det kan være store årlige variasjoner i andelen støinger som går inn i kraftverket. I begge lokalitetene bidro dammen og kraftversinntaket til betydelige forsinkelser i nedvandringen.

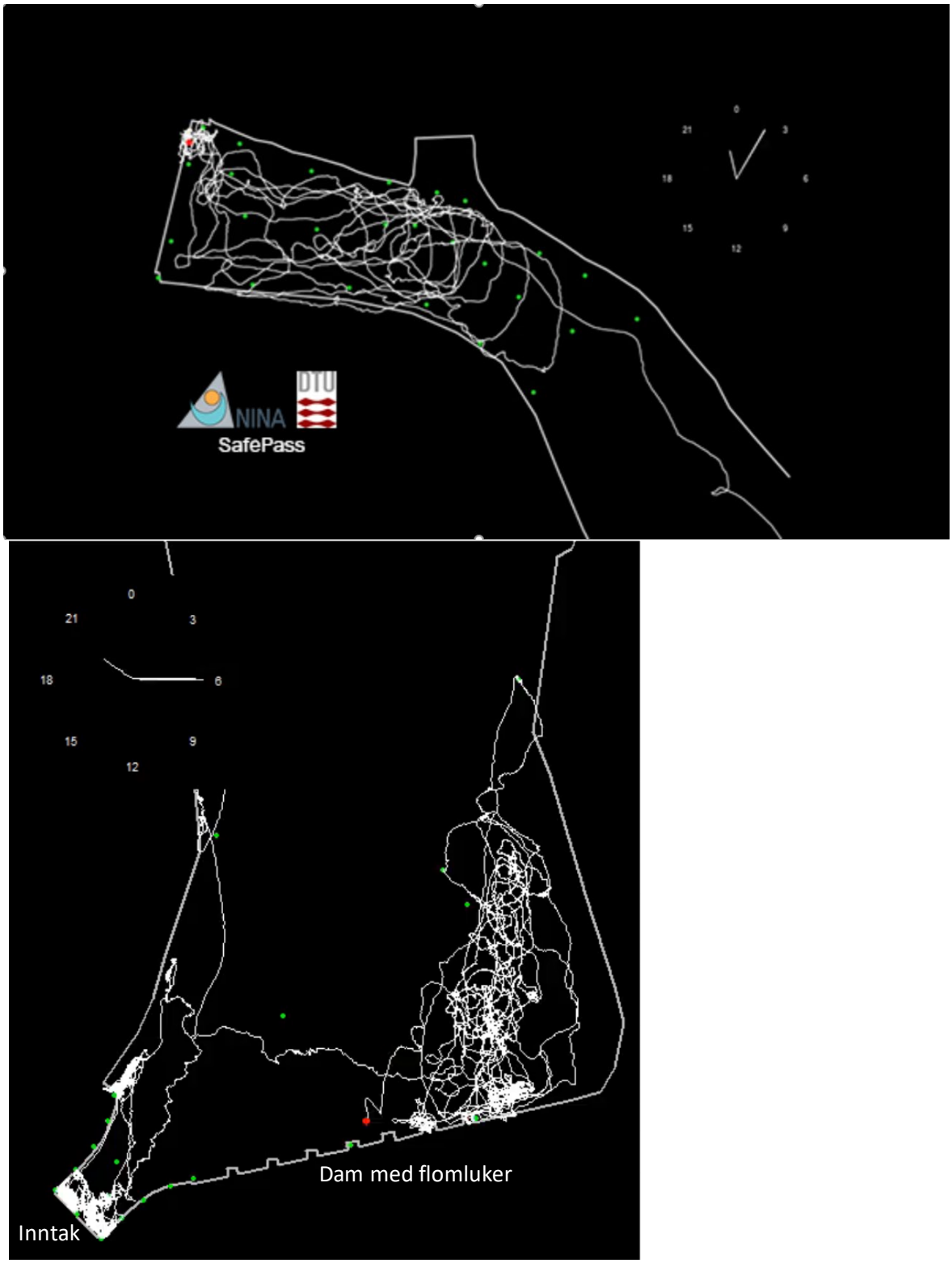
Den lange oppholdstiden og de omfattende bevegelsene rundt i magasinene kan være ugunstig for vinterstøingenes overlevelse. Vi har gjennomført en analyse av de energetiske kostnadene ved forsinkelsen og de lange svømmedistansene for laksestøingene i Bjørsedammen (Baktoft mfl. 2020). Energiforbruket utgjorde 4-5 % av gjenværende kroppsenergi, men fordi støingene allerede har mistet svært mye av sin kroppsenergi gjennom vandring fra beiteområdene i havet, oppvandring i elva, gyting og overvintring (typisk 50 % tap), kan en slik tilleggsbelastning bidra til redusert overlevelse og redusere mulighetene til å delta i en ny gyting. Slike forsinkelser er derfor uheldige, og spesielt for ørret som normalt gyter mange ganger. De fleste laksene gyter

bare en gang, men flergangsgytere kan være viktige for bestandene, særlig når overlevelsen fram til første gyting er lav (Halttunen 2011).

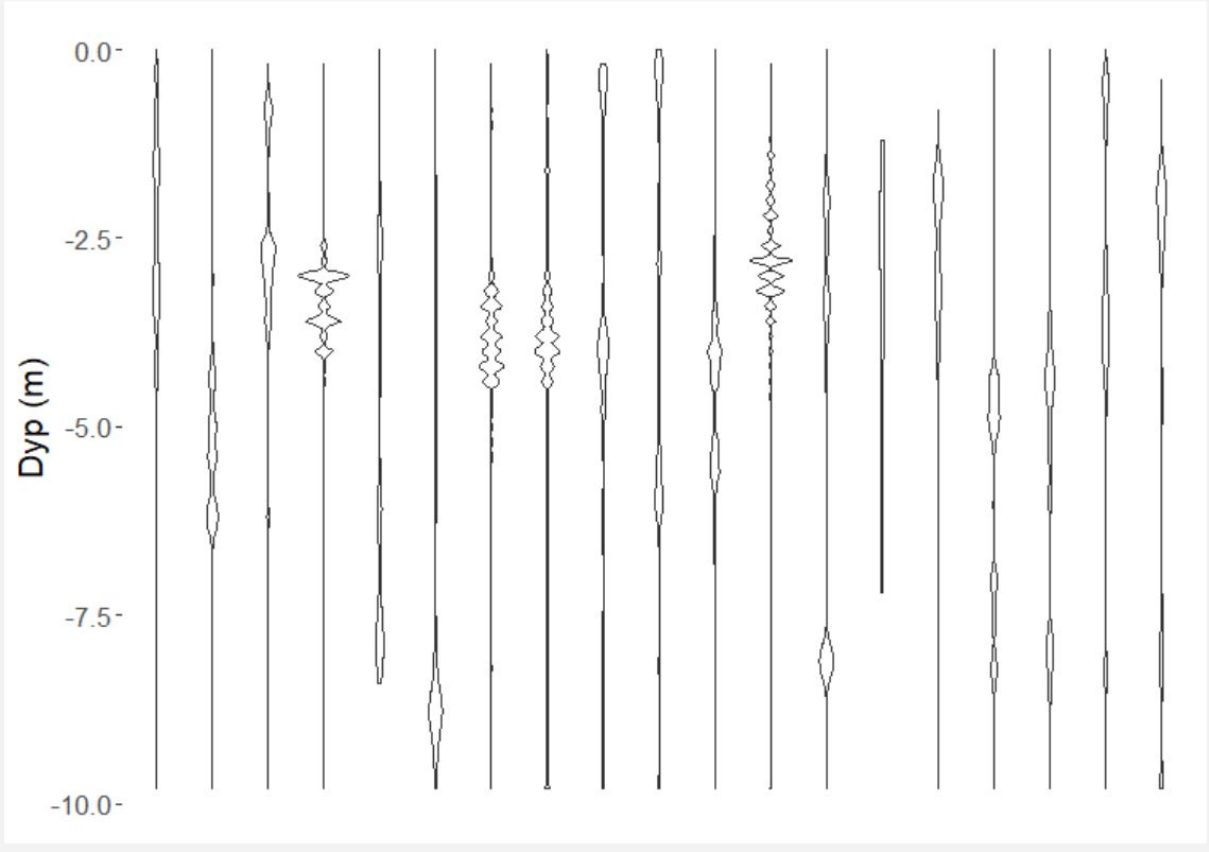
Hva er så årsaken til den lange oppholdstiden ved dammene? Støingene viste klar søkeatferd og besøkte gjentatte ganger de mulige nedvandringsveiene (se **figur 5** for en illustrasjon). I Bjørsetdammen var oppholdstida foran varegrinda relativt kort og mange fisk passerte ikke den foranliggende og dykkede slissa i hele tatt. I Hunderfossen observerte vi intens utforskning av hele grindarealet, både grunt og dypt, uten at mange av dem passerte gjennom. Dette tyder på at selv ei varegrind med lysåpninger på 10 cm har en klar atferdsmessig funksjon og begrenser innvandringen. Lignende funn er også gjort for vinterstøinger av laks ved inntaket til Laudal kraftverk i Mandalselva der få støinger passerer grinda, selv om mange av de kan komme seg gjennom (Forseth mfl. 2020). Når nok vann slippes i luka i reguleringsdammen 500 m lengre nede finner støingene raskt denne alternative nedvandringsveien. Det ser altså ut til at vinterstøinger helst ikke vil passere varegrinder, selv om de fysisk kan komme seg gjennom.

Ved begge lokalitetene oppsøkte vinterstøingene også de andre mulige vandringsveiene forbi kraftverket. I Bjørsetdammen var det svært få fisk som gikk ned trappa og under minstevannslipp på 4 m^3/s, men de fleste vandret raskt videre når vannslippene økte gjennom lukene med overløp. I Hunderfossen så vi også betydelig søk og opphold i nærheten av flomlukene med vannslipp. Flomlukene i Hunderfossen åpnes nedenfra og vannet tappes fra 2-4 meters dyp. Selv ved svært store samlede vannslipp utenom kraftverket var det støinger som nølte lenge før de dykket og passerte gjennom lukene. Et sentralt tema i videre analyser av vandringssporene blir derfor å forstå hvorfor støingene avviser eller er motvillige til å passere ulike lukeordninger. Vi leter for tiden etter hydrauliske egenskaper som karakteriserer de områdene der fisken avviser vandringsveien (for eksempel for stor akselerasjon, Enders mfl. 2012). En viktig foreløpig konklusjon som kan trekkes fra studiene i Bjørsetdammen og Hunderfossen sett sammen, som også er i samsvar med andre studier, er at vinterstøinger foretrekker overflatetapping over dykkede luker. Dersom slike luker er tilgjengelige kan de se ut som relativt moderate slipp kan gi stor nedvandring, fordi de andre vandringsveiene aktivt velges bort.

Et siste viktig funn fra Hunderfossen var at støingene brukte hele vanndypet. De var relativt sjeldent nær overflata, ofte på mellom 2-5 m dyp og ikke sjelden helt ned mot bunnen (**figur 6**). Dette viser at man være forsiktig med å tolke atferden til vinterstøinger som ofte sees nær overflata ved kraftversinntak. Det meste av støingene kan befinne seg så dypt at de ikke kan sees (om det er så dypt). Bjørsetdammen er relativt grunn (1,5-2,5 m), og vi har ikke dybdeinformasjon for laksestøingene i denne dammen.



Figur 5. *Eksempler på vandringsspor for en vinterstøing av laks ved inntaket til Svorkmo kraftverk i Bjørsetdammen, Orkla (øvre figur) og for en vinterstøing av innlandsørret ved Hunderfossen i Gudbrandsdalslågen. Rødt punkt er siste registrerte posisjon for hver fisk. Vinterstøingen i Orkla ankom etter at luka var åpnet og vandret relativt raskt videre ned den åpne luka. Sporet for ørreten i Hunderfossen er fra de siste 23 timene av oppholdet i magasinet før den vandret ut gjennom en av flomlukene. Den hadde svømt over 11 km på de 23 timene. Figurene er lagd av Henrik Baktoft, DTU Aqua, Danmark.*



Figur 6. *Dybdefordeling for 18 vinterstøinger av innlandsørret ved Hunderfossen. Utposingene på strekene angir dyp der støingene oppholdt seg mest. Figuren er lagd av Karl Øystein Gjelland, NINA.*

6 Oppvandringsløsninger for innlandsfisk

I samarbeid med NFR prosjektet RIVERCONN har vi skaffet grunnleggende kunnskap om vandringsmønstre for viktige innlandsfiskarter og betydning av frie vandringsveier (van Leeuwen mfl 2016, 2017, 2018). Vi har også gjort laboratorieforsøk hvor vi har studert svømmekapasitet til ørret og harr på lave temperaturer (Taugbøl mfl 2018). Disse studiene ga viktig kunnskap om designkriterier for velfungerende fisketrapper for innlandsfisk, og ikke minst for betydningen av frie vandringsveier i elver med flere fiskearter. Mens ørret har vært prioritert art i vandringsløsninger i innlandvassdrag ser vi også at en art som harr både har sesongvandringer mellom områder for oppvekst, overvintring og gyting og livstidsvandringer som sikrer at hele vassdraget utnyttes. Drift av yngel er en viktig drivkraft for vandringer til harr og drift til egnede oppvekstområder nedstrøms gyteområder etterfølges av oppstrøms vandringer til ungfisk og gytefisk som kan pågå over flere år. Reduksjon eller stopp i drift av harryngel, for eksempel ved etablering av store inntaksmagasin, kan derfor indirekte få store konsekvenser for omfanget av harrvandringer. Brudd i habitatsammenheng på grunn av vannkraftinstallasjoner kan derfor bidra til redusert produktivitet og langsiktig levedyktighet hos harr, og trolig også en rekke andre arter som vandrer i de store og små innlandsvassdragene i Norge.

I samarbeid med Eidsiva Energi har SafePass brukt kompetansen i prosjektet til å bygge om ei dårlig fungerende fisketrapp i midtre deler av Glomma (ved Høyegga inntaksdam). En tradisjonell kulpetrapp med relativt høye sprang ble ombygget til en hybridtrapp med spalter helt ned til bunnen, og bunnen ble dekket med stor naturstein for å skape et hydraulisk mer variert miljø og nye vandringskorridorer (**figur 7**). Følgeforskning i årene etter har dokument en markant økning i oppvandringen av nøkkelarter som ørret og harr, i tillegg til at helt nye arter som sik, gjedde og lake tok i bruk trappa (Holter mfl. 2020). Prosjektet åpnet vandringveier for fisk som har vært mer eller mindre lukket i mange tiår. Et viktig funn i denne studien var også at forholdene for oppvandring i eksisterende kulpetrapper kan forbedres ved å optimalisere vannføringen i fisketrappa og det bør gjøres ved flere kulpetrapper i innlandsvassdrag.

***Figur 7**. I 2016 ble den klassiske kulpetrappa ved Høyegga bygd om til en modifisert spaltetrapp. I overgangen mellom samtlige 22 kulper ble det sagd ut 30 cm brede spalter helt ned til bunnen av trappa. Alle kulper i trappa ble fylt med grov stein. Beregninger viste at energitettheten i alle kulpene ble betydelig redusert etter ombygging. Oppgangen av harr og ørret økte etter ombygging, men mest oppsiktsvekkende var økningen av oppgangen av sik, i tillegg til at lake og gjedde ble observert i trappa for første gang siden 1986. Studien avdekket også betydelig utfordringer med å evaluere fisketrapper i store elvesystemer med partielle vandringssystemer (Holter mfl. 2020).*

Tilnærmingen og løsningen som ble utviklet for trappa i Høyegga bør være relevant for en rekke vannkraftdammer i innlandet. De viktigste prinsippene for å lykkes med ombygging av fisketrapper for ulike arter av innlandsfisk er å tilby ulike vandringveier i trappa gjennom større variasjon

i hydrauliske forhold (vannhastigheter og turbulens). I Høyegga ble dette gjort ved å kombinere utsparingen i kulpetrappa med en spalte som gikk helt ned til bunnen av kulpen og ved å legge ut store steiner der særlig små fisk og arter med lav svømmekapasitet kan passere mellom steinene eller ta pauser bak. Etter ombyggingen ved Høyegga var det mulig for fisken å svømme gjennom fisketrappa og hopping fra kulp til kulp var unødvendig. Når vi ser på hvor mange arter som faktisk vandrer i de store innlandvassdragene, er det opplagt at mange av kulpetrappene ikke kan passeres av all fisk som vil vandre. Hvor mange av disse som kan ombygges er ikke kjent, og må vurderes for hvert tilfelle. I noen tilfeller er trappetrase for kort (og antall kulper for få) i forhold til høydeforskjellen og lengden må utvides. Det finnes også noen motstrømstrapper (Denil) i innlandsvassdrag som ikke er egnet for annet enn større ørret. Siden disse tar ut mye høyde på en kort strekning må disse erstattes av lengre trapper av annen type. Erfaringene fra både studiene i SafePass og i andre land tilsier at varianter av spaltetrapper gir mye bedre resultater for andre arter enn ørret og for mindre fisk (se oppsummering i Pulg mfl. 2018 og i mønsterpraksisrapport – Fjeldstad, Pulg & Forseth 2018).

7 Status og veien videre

SafePass har i samsvar med ambisjonene styrket de norske forskningsinstitusjonenes posisjon i det internasjonale forskningsmiljøet på vandringsløsninger. Vi er etterspurt som bidragsytere på internasjonale kunnskapsoppdateringer, på konferanser og som framtidige partnere på nye prosjekter. Vi har etablert godt samarbeid med sterke forskningsmiljø i Norden, Europa og Nord-Amerika, og har konkret utviklet et bilateralt prosjekt med Sveits og et nytt større NFR-prosjekt med sterke internasjonale partnere. Det arbeides også mer langsiktig mot utvikling av et større Europeisk prosjekt om utvandringsløsninger i store vassdrag. Vi har så langt produsert 15 vitenskapelige artikler fra prosjektet (pluss en rapport), samarbeidende prosjekt og gjennom andre initiativ. Ytterligere seks er underveis eller planlagt (se nedenfor).

Prosjektet har levert resultater med direkte effekter for både forvaltningspraksis og for industrien. Vi har etablert mønsterpraksis for opp- og nedvandringsløsninger i regulerte elver som benyttes i forvaltning og industri. Mønsterpraksis for nedvandringsløsninger er allerede brukt i tre vassdrag (Palmafossen i Vossovassdraget, Rafoss i Kvina og Tolga kraftverk i Glomma). Arbeidet med løsninger i store vassdrag der dagens mønsterpraksis er teknisk, driftsmessig eller økonomisk utfordrende fortsetter i HydroCen, og allerede nå er det løsninger som har kommet langt i utviklingen. Vi har utviklet metodikk for modellmessig utprøving av tiltak, noe som kan gi betydelige innsparinger i utviklingen av lokale tiltak.

Arbeidet med nedvandringsløsninger, der de faglige utfordringene er størst, fortsetter i regi av HydroCen og nye prosjekter, særlig knyttet mot løsninger i store anlegg. Både i Norge, Sverige og i de større vannkraftnasjonene i Europa er nedvandringsløsninger i store vannkraftanlegg fortsatt en betydelig teknisk og økonomisk utfordring. I 2021 planlegger vi en fullskala test av en innovativ flytende ledegjerdeløsning som utvikles i samarbeid med forskere fra Sveits. Dette blir den første testen av et slikt system noensinne, og om vi lykkes kan tiltaket få stor betydning internasjonalt.

Fordi analyser av de store datasettene fra feltforsøkene har vært så utfordrende og tidkrevende vil vi fortsette analysene i regi av HydroCen. Vi arbeider med eller har konkret planlagt flere manuskript for internasjonal publisering i løpet av 2020 og 2021:

- Towards a general etho-hydraulic model for downstream migrating Atlantic salmon smolts.
- Downstream eel migration through spillways.
- Behavior and swimming depth of downstream migrating silver eels past a hydropower dam.
- Links between hydraulics and silver eels swimming behavior.
- Effects of LED lights on smolt behavior.
- An etho-hydraulic prediction model for downstream migrating Atlantic salmon smolt.

Den aktive formidling fra prosjektet vil fortsette i regi av HydroCen og kommunikasjonsressursene i senteret. Dette inkluderer mulighetene til å publisere ei håndbok når tiden er moden.

8 Publikasjonsliste fra prosjektet

Baktoft, H., Gjelland, K.Ø., Szabo-Meszaros, M., Silva, A.T., Riha, M., Økland, F., Alfredsen, K. & Forseth, T. 2020. Can energy depletion of wild Atlantic salmon kelts negotiating hydropower facilities lead to excess mortality? Sustainability, 12 (18).

Holter, T.H, Myrvold, K.M., Pulg, U. & Museth, J. 2020. Evaluating a fishway reconstruction amidst fluctuating abundance. River research and Application. https://doi.org/10.1002/rra.3688

Silva, A.T., Bærum, K.M., Hedger, R.D., Baktoft, H., Fjeldstad, H-P., Gjelland, K.Ø., Økland, F. & Forseth, T. 2020. The effects of hydrodynamics on the three-dimensional downstream migratory movement of Atlantic salmon. Science of the Total Environment 705, 135773.

Szabo-Meszaros, M., Forseth, T., Baktoft, H., Fjeldstad, H-Å., Silva, A.T., Gjelland, K.Ø., Økland, F., Uglem, I. & Alfredsen, K. 2019 Modelling mitigation measures for smolt migration at dammed river sections. Ecohydrology 12(7).

Fjeldstad, H-P., Pulg, U. & Forseth, T. 2018. Safe two-way migration for salmonids and eel past hydropower structures in Europe: a review and recommendations for best-practice solutions. Marine and Freshwater Research 69: 1834-1847.

Fjeldstad, H-P., Pulg, U. & Forseth, T. 2018. Sikker toveis fiskevandring forbi vannkraftverk: kunnskapsoppdatering og mønsterpraksis. SINTEF Rapport 2017:00723. SINTEF Energi AS.

Fuentes-Perez, J.F., Silva, A.T., Tuhtan, J.A., García-Vega, A., Carbonell-Baeza, R., Musall, M. & Kruusmaa, M. 2018. 3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways. Environmental Modelling & Software 99: 156-169.

Silva, A.T., Lucas, M.C., Castro-Santos, T., Katopodis, C., Baumgartner, L.J., Thiem, J.D., Aarestrup, K., Pompeu, P.S., O'Brien, G.C.O., Braun, D.C., Burnett, N.J., Zhu, D.Z., Fjeldstad, H-P., Forseth, T., Rajaratnam, N., Williams, J.G. & Cooke, S.J. 2018. The future of fish passage science, engineering, and practice. Fish and Fisheries 19: 340-362.

Szabo-Meszaros, M., Navaratnam, C.U., Aberle, J., Silva, A.T., Forseth, T., Calles, O., Fjeldstad, H-P. & Alfredsen, K. 2018. Experimental hydraulics on fish-friendly trash-racks: an ecological approach. Ecological Engineering: The Journal of Ecotechnolog, 113: 11-20.

Taugbøl, A., Olstad, K., Bærum, K.M. & Museth, J. 2018. Swimming performance of brown trout and grayling show species- specific responses to changes in temperature. Ecology of Freshwater Fish 28: 241-246.

Baktoft, H., Gjelland, K.Ø., Økland, F. & Thygesen, U.H. 2017. Positioning of aquatic animals based on time-of-arrival and random walk models using YAPS (Yet Another Positioning Solver). Scientific Reports 7, 14294.

van Leeuwen, C., Dokk, T., Haugen, T.O., Kiffney, P.M. & Museth, J. 2017. Small larvae in large rivers: observations on downstream movement of European grayling *Thymallus thymallus* during early life stages. Journal of Fish Biology 90: 2412-2424.

Wilkes, M.A., Enders, E.C., Silva, A.T., Acreman, M. & Maddock, I. 2017. Position choice and swimming costs of juvenile Atlantic salmon *Salmo salar* in turbulent flow. Journal of Ecohydraulics 2: 16-27.

Amaral, S.D., Branco, P., Silva, A.T., Katopodis, C., Viseu, T., Ferreira, M.T., Pinheiro, A.N. & Santos, J.M. 2016. Upstream passage of potamodromous cyprinids over small weirs: the influence of key-hydraulic parameters. Journal of Ecohydraulics 1: 79-89.

van Leeuwen, C., Museth, J., Sandlund, O.T., Qvenild, T. & Vøllestad, L.A. 2016. Mismatch between fishway operation and timing of fish movements: A risk for cascading effects in partial migration systems. Ecology and Evolution 6: 2414-2425.

Wilkes, M.A., Neverman, A.J., Casas-Mulet, R., Bustos, A.A., McCluskey, A.H., Ouellet, V., Vanzo, D. Franklin, P.A. & Silva, A.T. 2016. Early careers on ecohydraulics: challenges, opportunities and future directions. Journal of Ecohydraulics, 1: 102-107.

9 Referanser

Albayrak, I., Kriewitz, C.R., Hager, W.H., Boes, R.M. 2018. An experimental investigation on louvres and angled bar racks. Journal of Hydraulic Research, 56(1): 59-75- DOI: 10.1080/00221686.2017.1289265.

Albayrak, I., Boes, R.M., Kriewitz, C.R., Peter, A., Tullis, B.P. 2020. Fish guidance structures: hydraulic performance and fish guidance efficiencies. Journal of Ecohydraulics, DOI: 10.1080/24705357.2019.1677181

Baktoft, H., Gjelland, K.Ø., Økland, F. & Thygesen, U.H. 2017. Positioning of aquatic animals based on time-of-arrival and random walk models using YAPS (Yet Another Positioning Solver). Scientific Reports 7, 14294.

Beck, C., Meister, J., Fuchs, H., Albayrak, I. & Boes, R.M. 2019. Comment on "Experimental hydraulics on fish-friendly trash-racks: An ecological approach" (M. Szabo-Meszaros, CU Navaratnam, J. Aberle, AT Silva, T. Forseth, O. Calles, H.-P. Fjeldstad, K. Alfredsen, Ecol. Eng., 113, 2018, 11-20). Ecological Engineering 130: 196-197.

Calles, O., Olsson, I.C., Comoglio, C., Kemå, P.S., Blunden, L., Schitz, M., & Greenberg, L.A. 2010. Size-dependent mortality of migratory silver eels at a hydropower plant and implications for escapement to the sea. Freshwater Biology 55: 2167-2180.

Enders, E. C., Gessel, M.H., Anderson, J.J., & Williams J.G. 2012. Effects of decelerating and accelerating flows on juvenile salmonid behaviour. Transactions of the American Fisheries Society 14: 357-364

Fjeldstad, H-P. Pulg, U. & Forseth, T. 2018. Sikker toveis fiskevandring forbi vannkraftverk : kunnskapsoppdatering og mønsterpraksis. SINTEF Rapport 2017:00723. SINTEF Energi AS 2018.

Fjeldstad, H-P., Pulg, U. & Forseth, T. 2018b. Safe two-way migration for salmonids and eel past hydropower structures in Europe – a review and recommendation for best practice solutions. Marine & Freshwater Research 69: 1834-1847.

Forseth, T., Fjeldstad, H-P., Gabrielsen, S.E., Skår, B., Lamberg, A., Hedger, R.D., Kvingedal, E. & Havn, T.B. 2020. Miljødesign Mandalselva. Samlet tiltaksplan og oppsummering. NINA rapport 1691. Norsk institutt for naturforskning.

Gosset, C., Travade, F., Durif, C., Rives, J. & Elie, P. 2005. Tests of two types of bypass for downstream migration of eels at a small hydroelectric power plant. River Research and Applications 21: 1095-1105.

Halttunen, E. 2011. Staying alive - The survival and importance of Atlantic salmon post-spawners, University of Tromsø, 2011.

Kraabøl, M., Museth, J., Johnsen, S.I., Skurdal, J., Dokk, J.G. 2013. Telemetristudier av nedvandrende smolt og utgytt Hunderørret forbi Hunderfossen kraftverk i Gudbrandsdalslågen i 2011 og 2012. NINA Rapport 940. 41 s.

Kraabøl, M., Dervo, B.K., Museth, J. 2015. Nedvandringsveier og effekter av vannslipp på vinterstøing og smolt av Hunderørret forbi Hunderfossen kraftverk i Gudbrandsdalslågen. NINA Rapport 1187. 36 s.

Marohn, L., Prigge, E. & Hanel, R. 2014. Escapement success of silver eels from a German river system is low when compared to management-based estimates. Freshwater Biology 59: 64-72.

Pulg, U., Barlaup, B.T., Skoglund, H., Velle, G., Gabrielsen, S-E., Stranzl, S., Olsen, E.E., Lehman, B.G., Viers, T., Skår, B., Nordmann, E., Fjeldstad, H-P. & Kroglund, F. 2018. Tiltakshåndbok for bedre fysisk vannmiljø: God praksis ved miljøforbedrende tiltak i elver og bekker. NORCE LFI rapport 297. NORCE Bergen.

Silva, A.T., Bærum, K.M., Hedger, R.D., Baktoft, H., Fjeldstad, H-P., Gjelland, K.Ø., Økland, F. & Forseth, T. 2020. The effects of hydrodynamics on the three-dimensional downstream migratory movement of Atlantic salmon. Science of the Total Environment 705.

Szabo-Meszaros, M., Forseth, T., Baktoft, H., Fjeldstad, H-P., Silva, A.T, Gjelland, K.Ø., Økland, F., Uglem, I. & Alfredsen, K. 2019. Modelling mitigation measures for smolt migration at dammed river sections. Ecohydrology 12.

Travade, F., Larinier, M., Subra, S., Gomes, P. & De-Olivera, E. 2010. Behaviour and passage of European solver eels (*Angullia angullia*) at s small hydropower plant during their downstream migration. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems 398: 1-19.

Økland, F., Havn, T.B., Thorstad, E.B., Heermann, L., Sæter, S.A., Tambets, M., Teichert, M.A.K. & Borcherding, J. 2019. Mortality of downstream migrating European eel at power stations can be low when turbine mortality is eliminated by protective measures and safe bypass routes are available. International Review of Hydrobiology 104: 68-79.

www.nina.no

1861

NINA Rapport

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: 978-82-426-4629-3

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

NINA

Samarbeid og kunnskap for framtidas miljøløsninger