FÖRBÄTTRAD PASSAGEEFFEKTIVITET FÖR ÅTERLEKARE MED KUNSKAP OCH TEKNISKA LÖSNINGAR

RAPPORT 2026:1226





VATTENKRAFTENS
MILJÖFORSKNINGSPROGRAM





Energiforsk

Förbättrad passageeffektivitet för återlekare med kunskap och tekniska lösningar

KARIN NILSSON, VELIZARA STOILOVA, GEORGIA MACAULAY, JOHAN LEANDER, LARRY GREENBERG

ISBN 978-91-89917-69-9 | © Energiforsk oktober 2026

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

En central utmaning vid vattenkraftverk är att få nedströmsvandrande fisk att välja säkra passagevägar istället för att följa huvudflödet mot turbinintagen. Att utveckla effektiva metoder för att styra fiskens vägval är därför en viktig fråga för fiskpassageförvaltningen.

I denna rapport redovisas resultat från tre olika studier där metoder att styra fiskars rörelsemönster har utvärderats: 1) Styrning av öringkelt med hjälp av injektorsstrålar i Laxeleratorn i Älvkarleby. 2) Styrning av nedströmsvandrade öringar i Dammån (Jämtland) uppströms en mindre vattenkraftsdamm. 3) Styrning av nedströmsvandrade laxkelt i Klarälven (Värmland) ovanför vattenkraftdammen Edsforsen. Motsvarande rapport har även redovisats till Energimyndigheten.

Studierna har genomförts inom forskningsprojektet ”Förbättrad passageeffektivitet för återlekare med kunskap och tekniska lösningar” finansierat av Energimyndigheten inom utlysningen Hållbar Vattenkraft. Karin Nilsson (Sveriges Lantbruksuniversitet, SLU) har varit projektledare, som tillsammans med Patrik Andreasson (Vattenfall R&D), Larry Greenberg (Karlstad Universitet, KaU), David Aldvén (Vattenfall R&D) och Kjell Leonardsson (SLU) skrev den ursprungliga HåVa-ansökan och tilldelades projektmedlen.

Delstudie 3, Klarälvsstudien, medfinansierades av Energiforsk genom Vattenkraftens miljöforskningsprogram. Larry Greenberg var huvudsökande och projektledare, med Velizara Stoilova (KaU) och Karin Nilsson som medsökande. Finansieringen användes huvudsakligen för inköp av utrustning för akustisk telemetri. Länsstyrelsen i Värmland bidrog med finansiering av bland annat sändare. Fortum gav tillgång till anläggningen och finansierade installation och drift av pumpen. Xylem Water Solutions bidrog med expertis och lånade ut en pump till studien.

Vattenfall R&D har också finansierat en betydande del av projektet genom in-kind-bidrag, vilket inkluderar tillgång till deras experimentanläggning Laxeleratorn (delstudie 1) och installation av pumpar och relaterade kostnader för delstudierna 2 (Dammån) och 3 (Klarälven). De har dessutom bidragit med idéer, teknisk utveckling, projektledning och generell expertis under hela projektets gång. Jämtkraft bidrog till delstudie 2 genom att ge tillgång till sin anläggning.

Europeiska unionens forsknings- och innovationsprogram Horizon 2020 har, inom ramen för Marie Skłodowska-Curie Actions, bidragit till finansiering av doktorandprojektet för Velizara Stoilova, som har varit djupt involverad i projektet.

Ytterligare personer har gjort betydande insatser under projektets gång. Postdoktor Georgia Macaulay (SLU) hade en central roll i delstudierna 2 och 3. Forskaren Johan Leander (SLU) bidrog i stor utsträckning till dessa studier och Daniel Palm (SLU) gjorde viktiga bidrag till studie 1 och Henry Hansen (KaU) spelade en viktig roll för delstudie 3 där han bland annat organiserade och ledde märkning av laxkelt. Gustaf Wendin och Gustav Lundkvist vid Vattenfall R&D

utförde ett omfattande arbete inom delstudierna 2 och 3, och Eric Lillberger med flera gav värdefullt stöd. I respektive kapitel finns en mer detaljerad förteckning över medverkande.

Energiforsks program Vattenkraftens miljöforskningsprogram verkar för att ta fram ett faktabaserat kunskapsunderlag inför beslut om miljöförbättrande åtgärder i vattenkraften. Programmet koordineras av Energiforsk och finansieras av Vattenfall Vattenkraft, Fortum, Sydkraft Hydropower, Statkraft Sverige, Skellefteå Kraft, Holmen Energi, Jämtkraft, Tekniska verken i Linköping, Mälarenergi, Karlstads Energi och Jönköping Energi.

Delprojekt 3 har följts av programmets styrgrupp bestående av Marco Blixt, Arvid Andersson (Fortum), Erik Sparrevik, Lo Persson och Henrik Viklands (Vattenfall), Johan Tielman (Sydkraft Hydropower), Susann Handler och Sara Sjöberg (Jämtkraft), Jakob Bergengren (Tekniska verken i Linköping), Fredrik Ölvebo (Mälarenergi), Anders Bergman (Statkraft) och Sandra Åström (Skellefteå kraft).

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Den omfattande utbyggnaden av vattenkraftsdammar i våra vattendrag har inneburit stora utmaningar för vandrande fisk, med risk för dödlighet och förseningar vid bland annat nedströmsvandring. Kelt är särskilt viktiga i detta sammanhang, eftersom de upplever hög dödlighet vid passage genom turbiner och de kan också spela en avgörande roll för populationens långsiktiga stabilitet som återlekare.

Trots deras betydelse är viktiga aspekter av keltens biologi - särskilt nedströmsvandring - fortfarande dåligt förstådda, och lösningar för att styra dem nedströms är ofta ineffektiva eller kostsamma. Detta understryker behovet av nya tekniska lösningar som kan minska vattenkraftens påverkan på nedströmsvandrande kelt. En möjlig metod är att styra fisken genom att manipulera strömmar i vattendraget.

För att utvärdera förutsättningarna för en sådan metod testade vi om flödesförändringar kunde påverka laxartade fiskars rörelsemönster i tre olika situationer; 1) Styrning av öringkelt med hjälp av injektorsstrålar i det etho-hydrauliska laboratoriet Laxeleratorn i Älvkarleby. 2) Styrning av nedströmsvandrade öringar i Dammån (Jämtland) uppströms en mindre vattenkraftsdamm. 3) Styrning av nedströmsvandrade laxkelt i Klarälven (Värmland) ovanför vattenkraftdammen Edsforsen.

I den första experimentella studien övervakades öringkelten med kameror i laxeleratorn, där injektorsstrålarna slogs på och av. I de andra studierna installerades nedsänkta pumpar för att intermittent förändra flödet, och undersöka om fiskarna kunde styras mot ett specifikt område som potentiellt kunde fungera som flyktväg. Fiskarna övervakades här med akustisk telemetri för att bedöma hur deras beteende och nedströmsrörelser påverkades.

I den första studien i Laxeleratorn påverkade injektorflödet keltens rörelser och verkade styra dem mot motsatt sida av den experimentella strömfåran, jämfört med inflödenas placering. Vi kunde inte exakt fastställa beteenderesponsen och säga med säkerhet i vilken grad fiskarna följde flödet eller undvek jetstrålarna, men vissa indikationer på ett avskräckande beteende noterades.

I den andra studien i Dammån hade det pumpgenererade flödet ingen märkbar effekt på öringarnas rörelser eller beteende. Istället påverkade det totala flödet i ån öringarnas beteendemönster och hur länge de stannade ovanför dammen innan de vandrade nedströms. Vi fann inga bevis för att pumpens jetstråle förändrade öringarnas beteende. Vi drar därför slutsatsen att flödesbaserad styrning var ineffektiv i detta sammanhang, och diskuterar resultatet i relation till vår experimentella design (t.ex. otillräckligt pumpflöde) och öringarnas beteendemönster.

I den tredje studien i Klarälven installerades en nedsänkt pump för att intermittent förändra flödet ovan turbinintaget. Detta för att undersöka om fiskarna kunde styras mot ett specifikt område som potentiellt kunde fungera som flyktväg.

Fiskarna övervakades med akustisk telemetri för att bedöma hur deras beteende och nedströmsrörelser påverkades.

Endast ett fåtal märkta laxkelt passerade pumpområdet när flödet var manipulerat (7 av 38 som detekterades i området under tidsperioden, av 150 märkta), och det fanns ingen signifikant skillnad mellan denna grupp och de kelt som passerade området när pumpen var avstängd när vi analyserade förändringar i simriktning (bäring). Dock uppvisade en del individer rörelsemönster som indikerade en styrning, och i vår visuella analys resulterade hälften av bedömningarna i en signifikant skillnad mellan behandlingar. I tillägg analyserade vi vid vilken position fisken lämnade det område som potentiellt kunde påverkas av pumpen (den s.k. polygonen). Resultaten indikerade att när pumpen var påslagen vägleddes kelten bort från turbinintagen. Våra resultat var dock inte tillräckligt samstämmiga för att vi ska kunna dra helt säkra slutsatser i detta skede, men de indikerar ändå en styrande effekt av det förändrade flödet. Detta motiverar vidare undersökningar och en explicit analys som kopplar enskilda fiskars rörelser till de hydrauliska förhållandena vid varje passage, som tar hänsyn till vattenföring och spilluckornas driftstatus.

Sammanfattningsvis så påvisade vi styrande effekter i den kontrollerade försöksanläggningen och liknande responser i Klarälven vid Edsforsen, medan vi inte kunde påvisa några responser i Dammån. Studierna ger värdefulla insikter i keltens beteende och rörelsemönster och utgör en viktig grund för den fortsatta utvecklingen av flödesbaserade styrmetoder.

Nyckelord

Nedströmspassage, Vandring, Kelt, Beteende, Miljöåtgärder, Vattenkraft, Flöde, Telemetri .

Summary

The widespread construction of hydropower dams in rivers poses major challenges for migrating fish, including mortality risks and delays associated with downstream passage. Repeat spawners are particularly critical in this context, as they experience high mortality when passing through turbines, and play a crucial role in sustaining population dynamics.

Despite their importance, key aspects of their biology—particularly downstream migration—remain poorly understood, and while there are numerous solutions for guiding them downstream, many perform poorly, and are frequently costly. This highlights the need for new technical solutions informed by behavioral studies to mitigate the impacts of barriers on downstream migrants. One proposed solution is to guide fish by manipulating hydraulic conditions.

To evaluate the feasibility of such an approach, we tested if we could modify movement patterns of salmonids by altering flow in three situations; 1) Guidance of brown trout kelts using injector jets in the experimental facility Laxeleratorn in Älvkarleby. 2) Guidance of downstream migrating brown trout in the river Dammån (Jämtland) above a small hydropower dam. 3) Guidance of downstream migrating salmon kelt in the river Klarälven (Värmland), above the hydropower dam Edsforsen. In the first experimental study, the brown trout kelts were monitored with cameras in the artificial stream, where injector jets were turned on and off. In the latter studies, submerged pumps were installed to alter local flow conditions intermittently, again by alternating periods when the pumps were turned on versus off. In this way, we investigated if we could guide the fish towards a specific area - that could potentially provide an escape route. Here the swimming paths of the fish were monitored using acoustic telemetry to assess if and how their behaviour and downstream movements were affected.

In the first study in the Laxelarator, we found that the injector jets affected kelt movement, and "guided them" toward the opposite side of the experimental stream, compared to where the inflows were situated. We could not define the exact behavioural response and confidently say to what extent they were guided by following the flow and to what extent they were deterred by the jet streams, but there were some indications of a deterring effect.

In the second study in the river Dammån, the pump-generated flow had no detectable effect on brown trout movements or behavioural states. Instead, total river discharge strongly influenced how long the trout stayed above the dam before passing downstream. In this case we found no evidence that the flow manipulation altered trout behaviour. We therefore conclude that the flow-based guidance was ineffective in this context, and we discuss this result in relation to our experimental design (e.g. insufficient pump flow) and the inherent behaviour of trout.

In the third study in Klarälven, a submerged pump was installed to alter local flow conditions intermittently, by alternating periods when the pumps were turned on

versus off. In this way, we investigated if we could guide the fish towards a specific area – that could potentially provide an escape route. Here the swimming paths of the fish were monitored using acoustic telemetry to assess if and how their behaviour and downstream movements were affected.

Only a few tagged salmon kelts passed through the pump area when the flow was manipulated (7 of the 38 individuals detected in the area during the study period, out of 150 tagged fish), and no significant difference was found between this group and the kelts that passed the area when the pump was off when analyzing changes in swimming direction using bearing. However, some individuals displayed movement patterns that indicated guidance, and in our visual assessment, half of the evaluations showed a significant difference between treatments. In addition, we analyzed the location at which fish exited the area that could potentially be influenced by the pump (the so-called polygon). The results indicated that when the pump was operating, kelts were guided away from the turbine intakes. Our results were not consistent enough to draw firm conclusions at this stage, but they nevertheless suggest a possible guiding effect of the altered flow. This motivates further investigation and an explicit analysis linking individual fish movements to the hydraulic conditions at each encounter, taking discharge levels and spill gate operation into account.

Overall, we detected guidance effects in the controlled experimental facility, and similar responses in the river environment in Edsforsen, while we were unable to demonstrate any responses in Dammån. The studies provided valuable insights into kelt behaviour and movement patterns, offering important groundwork for future development of flow-based guidance methods

Innehåll

1 Delstudie 1: Beteende hos öringkelt i strömakvarium: effekter av en jetström och potential för nedströmsstyrning 11

1.1 Sammanfattning 11

1.2 Inledning 11

1.3 Genomförande 12

1.3.1 Öringkelt 12

1.3.2 Experimentanläggning och uppställning 12

1.3.3 Mätning av jetstrålen 13

1.3.4 Videoanalys 14

1.3.5 Gruppstorlek 14

1.4 Resultat 15

1.4.1 Jetflöde 15

1.4.2 Keltbeteende 15

1.5 Diskussion 18

1.5.1 Slutsats 20

1.5.2 Etiskt tillstånd 20

1.5.3 Publikation 20

1.5.4 Tack 21

2 Delstudie 2: Manipulation av strömningsförhållanden för test av styrning av nedströmsvandrande öring vid kraftverket i Dammån 22

2.1 Sammanfattning 22

2.2 Inledning 22

2.3 Genomförande 23

2.3.1 Märkning av fisk 24

2.3.2 Pumpdrift 25

2.3.3 Bearbetning av telemetridata 25

2.3.4 Statistik 26

2.3.5 Estimering av beteendetillstånd 26

2.3.6 Tid till passage 27

2.4 Resultat 27

2.4.1 Simriktning vid första mötet med pumpen 27

2.4.2 Beteendetillstånd 28

2.4.3 Tid till passage 31

2.5 Diskussion 32

2.5.1 Avsaknad av en effekt från pumpen 33

2.5.2 Beteende-tillstånd hos öringkelt 34

2.5.3 Fördröjning av vandring 34

2.5.4 Slutsatser 35

2.5.5 Publikation 35

2.5.6 Tack 36

2.5.7 Bilagan för delstudie 2 36

3 Delstudie 3: Styrning av nedströmsvandrande kelt i Klarälven - utvärdering av flödesmanipulation med hjälp av telemetri 37

3.1 Inledning 37

3.2 Genomförande 38

3.2.1 Klarälven och vandrande lax 38

3.2.2 Hydrauliska förhållanden vid Edsforsen 39

3.2.3 Pump och styrande vattenflöde 40

3.2.4 Akustisk telemetri 42

3.3 Märkning av laxkelt 43

3.3.1 Data och analys av bäring 44

3.3.2 Beteendemarkörer 44

3.3.3 Fältmätningar av strömningsförhållanden 45

3.4 Resultat 46

3.4.1 Flödesmätningar 46

3.4.2 Effekt av pumpstrålen på keltens rörelser 46

3.4.3 Resultat från analysen av bäring 49

3.4.4 Visuellt bedömda beteenderesponser på pumpens strömningsplym 51

3.4.5 Analys av position när kelten lämnar polygonen 52

3.4.6 Uppehållstid i området 54

3.5 Diskussion 55

3.5.1 Pump och hydrauliska förhållanden – lyckades vi skapa en stråle? 55

3.5.2 Antal försöksfisk 55

3.5.3 Beteendebaserad respons – lyckades vi styra kelt? 56

3.5.4 Individuell variation 56

3.5.5 Varierande flödesförhållanden 57

3.5.6 Djup 57

3.5.7 Den visuella bedömningsmetoden 58

3.5.8 Slutsats om styrning 58

3.5.9 Uppehållstid och migration 59

3.5.10 Etiskt tillstånd 59

3.5.11 Publikation 59

3.5.12 Tack 59

3.6 Appendix Delstudie 3 61

4 Referenslista 68

1 Delstudie 1: Beteende hos öringkelt i strömakvarium: effekter av en jetström och potential för nedströmsstyrning

Författare: Velizara Stoilova[1], Karin A. Nilsson[2], David Aldvén[3], Larry Greenberg[1]

[1] *Institutionen för Miljö- och Livsvetenskaper, Karlstads universitet, Sverige*
[2]*Institutionen för Vilt, Fisk och Miljö (VFM), Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Umeå, Sverige*
[3] *Vattenfall Research and Development, Älvkarlebylaboratoriet, Älvkarleby, Sverige*

1.1 SAMMANFATTNING

När vi försöker återställa vandringsvägar för fisk i reglerade älvar behöver nedströmsvandrande fisk ofta guidas bort från kraftverkens turbinintag. I denna studie undersökte vi om så kallade injektorflöden – riktade vattenstrålar skapade med pumpar – kan användas för att beteendemässigt leda stora laxfiskar (kelt) under deras nedströmsvandring. I förlängningen skulle detta kunna leda till lösningarna för att styra fisken förbi dammar på ett säkert sätt. Vi testade om ett pumpgenererat injektorflöde kunde påverka simriktningen hos vild nedströmsvandrande öringkelt (Salmo trutta) i ett strömakvarium. Tre behandlingar jämfördes: (1) en kontroll utan injektorflöde, (2) injektorflöde som tillfördes från kanalens yttersida och (3) injektorflöde från kanalens innersida.

Försöken genomfördes med injektorflöden på 115 och 153 L/s, ovanpå en bakgrundsström på 0,5 m/s. Öringarnas simriktning påverkades av injektorflödet, då fiskarna styrdes bort från jetinflödet och följde jetströmmen mot den andra sidan av strömakvariet. Dessa resultat visar att injektorflöden kan vara en lovande metod för att guida nedströmsvandrande kelt, men att ytterligare fältstudier behöver genomföras.

1.2 INLEDNING

Laxfiskar efter lek (så kallade kelt) är ofta både stora och i nedsatt fysisk kondition, vilket gör dem mycket känsliga för skador och de har även en förhöjd dödlighet om de tvingas passera genom turbiner i vattenkraftverk (Nyqvist m.fl., 2016). Laxar som leker under flera år spelar en viktig roll för lax- och öringpopulationer, eftersom de bidrar till ökad genetisk variation och kan stärka beståndens storlek över tid (Simmons m.fl., 2024a).

Därför är det avgörande att utveckla säkra och effektiva passagelösningar som hjälper kelt att ta sig nedströms utan att riskera turbinpassage.

Hydrauliska förhållanden – till exempel strömhastighet, strömriktning och turbulens – har stor betydelse för hur fisk orienterar sig, hur mycket energi den behöver lägga på att simma och hur lätt den hittar sina vandringsvägar (Aleyasin m.fl., 2025; Ben Jebria m.fl., 2023; Coutant & Whitney, 2000; Elings m.fl., 2023). De flesta vandrande fiskarter följer instinktivt huvudströmmen när de rör sig

nedströms (Coutant & Whitney, 2000; Larinier & Travade, 2002). Trots detta har potentialen att medvetet manipulera dessa hydrauliska förhållanden för att leda fisk nedströms mot säkra passager, såsom bypass-intag, ytuppsamlare eller fiskvägar, sällan undersökts (Coutant, 2001; Darland m.fl., 2001; Schwevers & Adam, 2020).

Även om det finns forskning om hur attraktionsflöden kan användas för att hjälpa fisk vid uppströmsvandring (Lindmark & Gustavsson, 2008), har studier om nedströmsvandring främst beskrivit fiskars beteende i naturliga strömningsfält eller nära barriärer som dammar och turbinintag (Nyqvist m.fl., 2016; Simmons m.fl., 2024b). Endast ett fåtal studier har undersökt om konstruerade, riktade flöden kan fungera som beteendestyrning för nedströmsvandrande fisk (Darland m.fl., 2001). Eftersom utvandrande fisk reagerar på vattenflöden, och eftersom attraktionsflöden redan visat sig kunna leda uppströmsvandrande fisk mot fisktrappor (Coutant, 2001), föreslår vi att ett liknande tillvägagångssätt kan vara möjligt för nedströmsvandring.

Mot denna bakgrund antog vi att ett riktat injektorflöde kan användas för att styra nedströmsvandrande fisk. För att testa detta genomförde vi ett experiment för att undersöka laxkelts beteendereaktioner på flödesinjektion i ett strömvattenakvarium, som kallas för Laxeleratorn. Vi förväntade oss att injektorströmmen skulle påverka keltens rörelsemönster och simbeteende.

1.3 GENOMFÖRANDE

1.3.1 Öringkelt

Den 1 maj 2022 fångade fiskare 60 öringkelt som lekt i Dalälven vid Älvkarleby. Fiskarna transporterades omedelbart till SLU:s närliggande avelsanläggning vid samma älv, där de hölls i en utomhustank försörjd med älvvatten. Inför varje försök fångades fem kelt in och transporterades 1 km (cirka 5 minuter) till Vattenfalls forsknings- och utvecklingscenter, i Älvkarleby. Kelten placerades därefter i strömakvariet över natten, och försöket genomfördes nästa dag efter ungefär 14 timmars acklimatisering. Efter varje försök sövdes fiskarna med bensokain och längd och vikt mättes innan de släpptes tillbaka i älven. Denna procedur upprepades för varje försök.

1.3.2 Experimentanläggning och uppställning

Studien genomfördes i ett stort recirkulerande strömakvarium, Laxeleratorn, mellan 3 och 20 maj 2022. Strömakvariet består av två sammanlänkade arenor, vardera 24 m lång, 4 m bred och upp till 2 m djup. De två böjda ändarna bestod av fyra kanaler, separerade från varandra med väggar. Kanalens djup sattes till 1,7 m för att förbättra kamerornas detektionsförmåga. Ett bakgrundsflöde på 0,5 m/s användes. Filtrerat vatten från närliggande Dalälven användes.

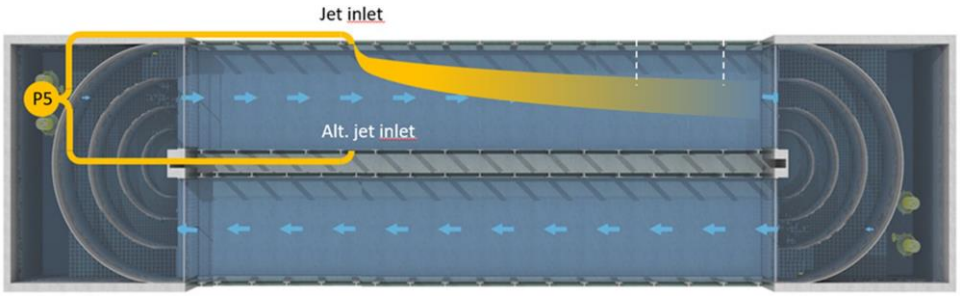
Medeltemperaturen i vattnet hölls densamma som i älvvattnet i tankarna där fiskarna förvarades (11,4 °C ± 1,2 °C). Vi injicerade ett flöde i en av försöksarenorna genom en av de två munstycken (vardera med en öppning på 0,077 m²) monterade på kanalens inner-respektive yttersida, placerade mittemot varandra och ungefär

5 m från den uppströms änden (Figur 1). De två jetsstrålarna var inställda på antingen 300 rpm (QL, lägre = 115 L/s) eller 400 rpm (QH, högre = 153 L/s), med sex försök per inställning.

Totalt användes 29 kameror: 6 kameror gav ett fågelperspektiv över kanalen; 3 undervattenskameror installerades i kanalen; och 20 kameror placerades runt kanalen riktade inåt mot viktiga observationspunkter. Kanalens botten målades vit och fyra spårningslinjer målades i svart för att underlätta bestämningen av simbanor vid videoanalys (Figur 1).

Varje fisk i varje försök utsattes i slumpmässig ordning för alla tre behandlingarna (upprepade mätningar): injektorflöde från arenans yttersida (yttre jet), injektorflöde från arenans innersida (inre jet) eller med injektorflödet avstängt (kontroll). Under varje 60-minutersperiod simmade fiskarna flera varv genom hela kanalen eftersom de två arenorna är sammanlänkade. Detta innebar att fiskarna först simmade genom arenan utan injektorflöde för att nå testarenan.

Kelten exponerades antingen för den lägre eller högre inställningen av jetstrålen. Varje behandling varade i 60 minuter, med 5 minuters omställningstid mellan behandlingarna för att tillåta justeringar, såsom att byta vilken sida som hade injektorflöde.



Figur 1. Experimentell uppställning för injektorförsök med kelt. När en jetstråle var på, var den andra avstängd. Båda jetstrålarna var avstängda under kontrollbehandlingen och ordningen för varje behandling var slumpmässig. Endast en sida användes för själva injektorförsöken och fiskarna simmade genom andra delen av strömrännan och upplevde jetstrålen på nytt.

1.3.3 Mätning av jetstrålen

En Akustisk Doppler Velocimeter (ADV) användes för att karakterisera jetstrålens flödesprofiler genom att mäta tre tvärsnitt över den 4 m breda testarenan. Under punktmätningarna var endast ett jetmunstycke aktivt (i enlighet med studiedesignen), och flödet mättes även när jetstrålen var avstängd. Under mätningarna drevs strömakvariet med de huvudsakliga cirkulationspumparna, vilket gav ett bakgrundsflöde på 0,5 m/s. Jetinställningarna var 300 rpm (Q = 115 L/s) och 400 rpm (Q = 153 L/s).

Mätningar genomfördes vid 0 m, 1 m och 2 m från munstycket. Vid varje sektion uppmättes hastighet i 3 dimensioner i ett rutnät av laterala positioner över kanalens bredd (0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5 och 4,0 m) samt fyra djup: 0,1, 0,6, 1,1 och 1,4 m.

1.3.4 Videoanalys

Av de 29 kamerorna valdes 12 kameravinklar ut för analys baserat på en förhandsgranskning av materialet. Videorna analyserades i BORIS (Behavioural Observation Research Interactive Software) (Friard & Gamba, 2016). Följande beteenden registrerades: lämnar sidokanalen (EC) (Fig. 1); återinträder i sidokanalen (ReC); simmar nedströms (SD); simmar uppströms (SU); gör en U-sväng (stöts bort av jetstrålen när den simmar nedströms och vänder uppströms) (UT); bibehåller position (IP), simmar i jetströmmen (IJ), övrigt (beteenden som inte listas ovan) (O).

Ytterligare deskriptorer användes för varje beteende: gruppstorlek (1–5 fiskar), simdjup (botten, mitten, yta; varje nivå motsvarade en tredjedel av det totala djupet på 1,7 m) och, för EC- och ReC-beteenden, kanalnummer (1–4 från innersta till yttersta kanalen; Fig. 1). För beteenden relaterade till att lämna och återinträda i sidokanalerna (EC och ReC) inkluderades deskriptorn ”kanalnummer”, från 1 (innersta kanalen) till 4 (yttersta kanalen; Fig. 1). För övriga beteenden noterades fiskens position i akvariets bredd (yttre, inre eller mittenområde). Dessutom registrerades spårnummer (1–4) på akvariets botten (Fig. 1). Även om spårnumret registrerades för en mer exakt positionering var det inte möjligt att fastställa det för varje observation. Därför användes klassificering av fiskens positionering som yttre, mittersta eller inre sida. Det totala antalet observationer på dessa positioner under det en timme långa försöket omvandlades sedan till ett viktat medelindex (NWA) (1 för yttre simposition (OSP), 2 för mittenposition (MSP) och 3 för inre position (ISP)) enligt formeln:

$$NWA = (N_x * 1 + N_\gamma * 2 + N_z * 3) / (N_x + N_\gamma + N_z)$$ där x = OSP, y = MSP och z = ISP.

Samma procedur upprepades för djupobservationerna, där 1 motsvarade botten (x), 2 mitten (y) och 3 ytan (z). En mixed ANOVA med upprepade mätningar genomfördes i SPSS (General Linear Model, Repeated Measures) med de viktade medelindexvärdena från alla försök, för att analysera effekten av behandling och jetstyrka på både simväg och djup. Jetbehandling (yttre jet, inre jet, kontroll) var inomindividfaktorn, medan jetstyrka (låg (300 rpm) eller hög (400 rpm)) var mellanindividfaktorn.

1.3.5 Gruppstorlek

För att undersöka om fiskarnas gruppstorlek skilde sig mellan jetbehandlingar eller jetinställningar använde vi först ett Friedman-test i SPSS, en icke-parametrisk metod som lämpar sig för vårt designupplägg med upprepade mätningar (tre jetbehandlingar: yttre jet, inre jet, kontroll). Detta testade övergripande skillnader i gruppstorlek utan antagande om normalfördelning. Därefter använde vi Generalized Linear Mixed Models (GLMM) i SPSS för att mer explicit modellera den upprepade strukturen. Jetbehandling (yttre jet, inre jet, kontroll) inkluderades som inomindividfaktor, medan inställning (låg 300 rpm, hög 400 rpm) inkluderades som mellanindividfaktor. Modellerna gjorde det möjligt att utvärdera både huvudeffekter och interaktioner, samtidigt som korrelationen mellan upprepade mätningar hanterades. Post hoc-parvisa jämförelser

(Bonferroni-korrigerade) genomfördes för att identifiera vilka behandlingar som skilde sig åt.

1.4 RESULTAT

1.4.1 Jetflöde

ADV-mätningarna visade att båda jetinställningarna producerade samma grundläggande mönster: en smal, ytintensiv plym som flödade ut från väggmunstycket och blandades med strömakvariets vatten inom 2–3 m nedströms—dock med en starkare effekt vid 400 rpm (Q = 153 L/s) jämfört med 300 rpm (Q = 115 L/s). Vid jetutloppet och nära strömakvariets vägg (0–0,5 m) producerade pumparna, oavsett inställning, en smal ytintensiv stråle med uttalad vertikal skjuvning inom de övre cirka 0,6 m av vattenpelaren. Vid 300 rpm nådde strålen en topphastighet på cirka 0,69 m/s, och hade liten effekt på flödet vid djup större än 1 m.

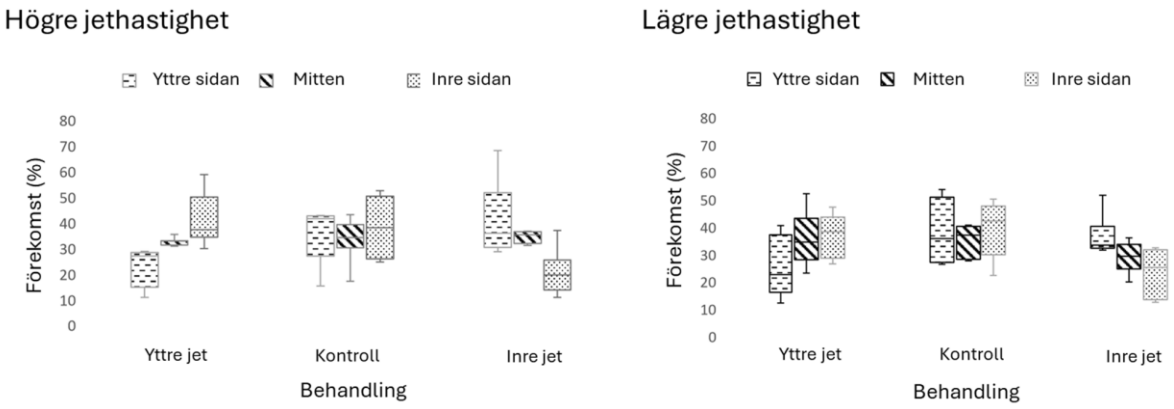
En meter nedströms var jetstrålen fortfarande tydligt synlig som en koncentrerad stråle, med en medelhastighet på cirka 0,65 m/s på mellandjup. Ingen märkbar påverkan observerades på kanalens motsatta sida (3,5–4 m från strålen) eller nära botten, där hastigheterna motsvarade akvariets bakgrundsflöde (0,5 m/s). Vid två meter nedströms hade hastighetsprofilen i stort sett utjämnats och liknade bakgrundsflödet över hela bredden.

Den högre jetinställningen (400 rpm) gav en högre maximal hastighet (0,8 m/s vid utloppet) och följde samma rumsliga mönster men med en starkare övre svans och större intermittens: 1,5 m nedströms nådde hastigheten upp till 0,72 m/s, och vid 3 m nedströms fanns fortfarande något högre hastighet än vid 300 rpm (0,68 vs 0,63 m/s). Ingen av inställningarna förändrade det genomsnittliga bakgrundsflödet — effekten var lokal. Nära ytan och nära väggen sågs en störning som blandades ut inom 2–3 m nedströms och inom 1,5 m från jetväggen, vilket gjorde att motsatta sidan av akvariet och djupare lager i stort sett förblev opåverkade.

1.4.2 Keltbeteende

Nedströmssimning (SD) utgjorde 98,6 % av alla observerade beteenden, följt av uppströmssimning (SU – 0,79 %), simning i jetströmmen (IJ – 0,56 %) och stationär simning (IP – 0,08 %). Inga U-svängar (UT) observerades, och inga beteenden kopplade till kanalernas böjda ändar (EC och ReC), och inte heller några ”andra” beteenden (O). Därför analyserades endast rumsliga positioner (yttre, mitt, inre) för beteendena nedströmssimning, uppströmssimning, jetströmssimning och stationär simning. Dessa analyserades samlat med avseende på simriktning, simdjup och gruppstorlek.

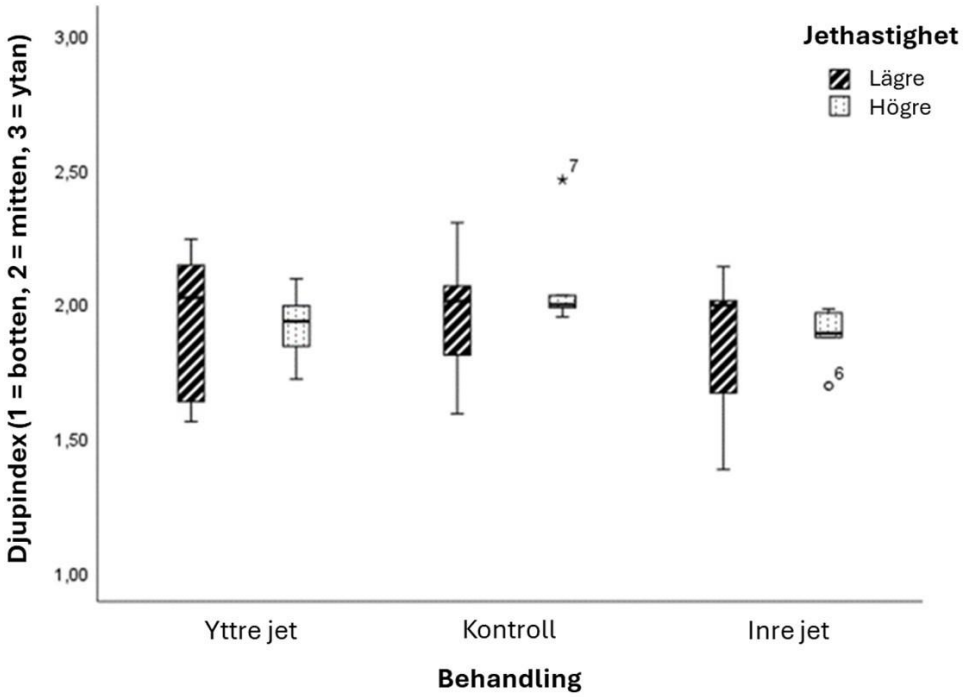
Vi fann att kelten oftare simmade mot mitten och den inre sidan av kanalen när den yttre jetstrålen var på, och oftare mot mitten och den yttre sidan när den inre jetstrålen var på (Figur 2). Repeated measures ANOVA visade att jetbehandlingen (yttre jet, inre jet eller kontroll) hade en signifikant effekt på keltens simriktning (Repeated Measures ANOVA: $F_{2,20} = 6.165$, $p = 0.008$).



Figur 2. Förekomst (%) av de tre olika simvägarna (yttre, mitten, inre sidan) under tre behandlingar (yttre jet, kontroll, inre jet) vid två jetshastigheter: 400 rpm, QH 153 L/s (tv) och 300 rpm, QL 115 L/s (th). Boxplottarna visar medianen (horisontell linje), interkvartilavståndet (låda) samt min- och maxvärden (”morrhår”).

Den observerade effekten drevs främst av en signifikant skillnad mellan behandlingarna med yttre och inre jet (Bonferroni parvisa jämförelser: $p = 0{,}006$), medan inga signifikanta skillnader påträffades mellan någon av jetbehandlingarna och kontrollen (yttre jet vs. kontroll: $p = 0{,}450$; inre jet vs. kontroll: $p = 0{,}348$). Jetinställningen (lägre 300 vs. högre 400 rpm) hade ingen signifikant effekt på simvägen ($F_{1,10} = 0{,}076$, $p = 0{,}788$), och det fanns inte heller någon signifikant interaktion mellan jetbehandling och jetinställning ($F_{1,10} = 0{,}093$, $p = 0{,}767$).

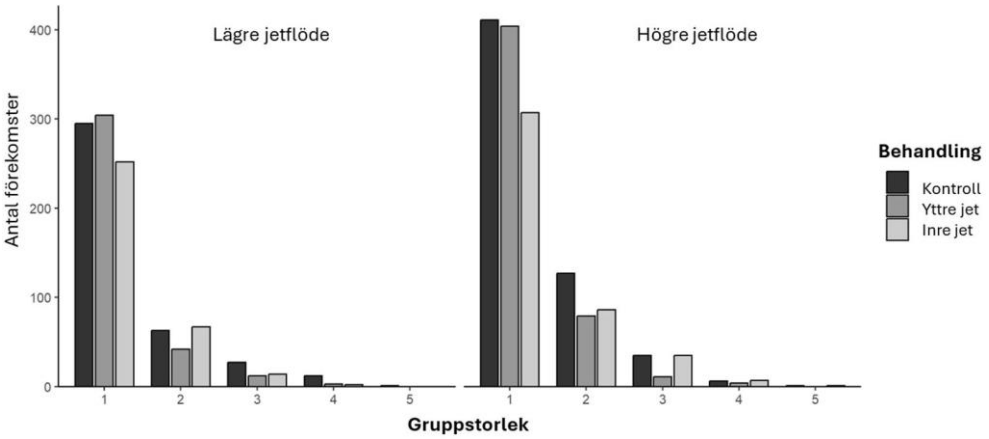
Trots att en betydande andel av simobservationerna saknade djupdata på grund av kamerans placering ovanifrån (52 % saknade djupdata), analyserades de beteendeobservationer som hade djupregistreringar (n = 3332). En repeated measures ANOVA (SPSS, General Linear Model Repeated Measures) testade skillnader i simdjupsindex mellan jetbehandlingarna (yttre jet, kontroll, inre jet) under de två jetinställningarna (lägre vs. högre), efter att Mauchlys test bekräftat sfäricitet ($W = 0{,}954$, $\chi^2_2 = 0{,}428$, $p = 0{,}807$). Det fanns en signifikant huvudeffekt av jetbehandling på simdjup (Pillai’s Trace = 0,597, $F_{2,9} = 6{,}657$, $p = 0{,}017$). Interaktionen mellan jetbehandling och jetinställning var icke-signifikant (Pillai’s Trace = 0,241, $F_{2,9} = 0$, $p = 0{,}289$), vilket indikerar att effekten av jetbehandlingarna på simdjup var konsekvent vid både låg och hög inställning. Parvisa jämförelser (Bonferroni-korrigerade) visade att fiskarna simmade signifikant djupare under inre jet-behandlingen än under kontrollen (medelskillnad = – 0,145 ± 0,04 SE, $p = 0{,}014$). Simdjupet under den yttre jeten jämfört med kontrollen tenderade också att vara större, men inte signifikant (medelskillnad = –0,092 ± 0,033 SE, $p = 0{,}069$). Ingen signifikant skillnad detekterades mellan yttre och inre jet (medelskillnad = 0,053 ± 0,039 SE, $p = 0{,}588$). Överlag observerades kelten i betydligt högre grad i mellanskiktet (85,9 % av observationerna) än nära botten (8,8 %) eller vid ytan (5,3 %).



Figur 3. Djupindex (medelposition i vattenpelaren; 1 = botten, 2 = mitten, 3 = ytan) för kelt som simmar i rännans flöde, under de tre jetbehandlingarna (yttre jet, kontroll, inre jet) vid de två flödesinställningarna (lägre och högre). Boxplotter visar medianen (horisontell linje), interkvartilavståndet (lådor) och felstaplar (min–max inom 1,5 × IQR).

Friedman-testet visade en signifikant effekt av jetbehandling på gruppstorlek (χ^2 = 9586,7, p < 0,001). För att undersöka dessa skillnader närmare anpassades en generaliserad linjär mixad modell (SPSS; GLMM, negativ binomial, log-länk) med jetbehandling och jetinställning som fasta effekter och försök som slumpmässigt intercept. Modellen bekräftade att den yttre jetströmmen signifikant minskade förekomsten av grupper jämfört med kontrollen (estimat = –0,139 ± 0,046 SE, z = –3,03, p = 0,002). Den inre jetströmmen visade också en tendens mot mindre gruppstorlekar, men denna effekt var inte signifikant (estimat = –0,081 ± 0,046 SE, z = –1,76, p = 0,078). Jetinställningen (högre vs. lägre) hade ingen signifikant effekt (estimat = 0,01 ± 0,087 SE, z = 0,12, p = 0,91), och inga signifikanta interaktioner mellan jetbehandling och inställning påträffades: inre jet × inställning (estimat = 0,076 ± 0,06 SE, z = 1,26, p = 0,21) respektive yttre jet × inställning (estimat = 0,035 ± 0,06 SE, z = 0,059, p = 0,56).

Predicerade sannolikheter bekräftade att solitära individer (gruppstorlek 1) var det dominerande mönstret i alla behandlingar, om än med tydliga skillnader: fiskar var ensamma oftast under yttre jet (79,5 %). I jämförelse var parbildning vanligast i kontrollen (22 %), och grupper om tre förekom mest i kontrollen (8 %) (Fig. 4).



Figur 4. Förekomst av öringskelt simmande i olika gruppstorlekar (1–5) observerade under två jetjlöden: högre (400 rpm; Q = 153 L/s) och lägre (300 rpm; Q = 115 L/s), samt under tre jetbehandlingar: yttre jet, kontroll och inre jet.

1.5 DISKUSSION

Sammanfattningsvis visar denna studie att vildfångade öringkelt reagerar på flödesinjektioner genom att ändra sina simbanor i förhållande till sidoplacerade jetströmmar. När en jetström var aktiv förflyttade sig kelten konsekvent bort från den vägg där strålen var placerad: vid yttre jetström simmade de mer mot mitten eller den inre sidan, och vid inre jetström mer mot mitten eller den yttre sidan. Dessutom simmade de djupare när jetströmmarna var påslagna jämfört med när de var avstängda. Det olika jetstyrkorna gav inga mätbara skillnader. Den observerade horisontella riktningsförändring kan – eftersom jetplymen böjer av mot mitten och motsatt sida i rännan – förklaras av tre, inte ömsesidigt uteslutande mekanismer: undvikande av jetutloppet, orientering efter den ström jetflödet skapar, eller en kombination av båda.

Även om keltens simvägar sammanföll med jetplymens riktning (böjd mot mitten och motsatt sida av rännan) gav hydraulikdata inte stöd för denna tolkning, eftersom jetflödet snabbt blandades med bakgrundsflödet. Mot bakgrund av de hydrauliska resultaten är den observerade beteendereaktionen mer förenlig med ett undvikande av jetutloppet. Studien möjliggör därför inte slutsatsen att jetströmmen gav funktionell vägledning, även om den observerade responsen ändå skulle kunna utnyttjas i utformningen av framtida styrsystem.

Att kelten tenderade att förflytta sig bort från jetutloppets sida, där hastigheten var som högst, stämmer överens med tidigare fältstudier där laxkelt undvek höghastighetsflöden genom att inte använda undervattensavledare med höga hastigheter, vilket fördröjde passagen tills spillvägar med lägre hastigheter blev tillgängliga (Arnekleiv et al., 2007; Simmons et al., 2024b). Hubley et al. (2008) visade att atlantlaxkelts migrationshastigheter motsvarade deras simförmåga på omkring 0,5 m/s, vilket indikerar att flöden över denna gräns utlöser undvikande. Hydrauliska data från jeten visade att den lägre inställningen gav en hastighet på 0,69 m/s nära jetutloppet och den högre inställningen omkring 0,8 m/s. Våra resultat överensstämmer därför med ovanstående studier: kelten tycks undvika

väggen där jetutloppet är placerat och simmar dessutom djupare, där påverkan från jetens ytnära flöde är mindre och hastigheterna lägre.

Resultaten baserade på djupindexet visade att jetbehandlingarna, i synnerhet den inre jetströmmen, påverkade post-lek-kelten vertikala positionering, och fick dem att röra sig djupare i vattenpelaren. Dessa beteendemässiga justeringar kan återspegla försök att minimera stress orsakad av hydrodynamiska förhållanden eller att utnyttja lugnare flödesrefuger närmare botten (Enders et al., 2009; Goodwin et al., 2014).

Bland de tre fördefinierade djupzonerna (yta, mitten, botten) befann sig kelten huvudsakligen i mellanskiktet. Detta överensstämmer med tidigare rapporter om att kelt ofta använder medeldjup där turbulensen är måttlig och förutsägbar (Halttunen et al., 2009; Kristensen et al., 2018). Strömakvariets relativt grunda djup (1,7 m) kan ha begränsat den vertikala variationen. Andra studier, inklusive marina spårningar och försök i älvar med bubbelridåer, visar att kelt ofta simmar på 1,8–2 m djup (Halttunen et al., 2009; Leander et al., 2024; Nyqvist et al., 2017a), men dessa värden kan vara specifika för lokala förhållanden.

När det gäller gruppstorlek fann vi att fiskarna huvudsakligen simmade ensamma i alla behandlingar, och denna tendens var tydligare när jetströmmarna var påslagna, särskilt vid den yttre jetströmmen. Eftersom kelt är solitära migranter i det vilda (Halttunen et al., 2009; Thorstad et al., 2010), kan minskningen av gruppstorlek i relation till den yttre jetströmmen spegla en respons på flödesheterogenitet, även om detta behöver undersökas närmare. Den dominerande solitära tendensen överensstämmer med tidigare telemetristudier som visat att salmonider lämnar lekområden vid olika tidpunkter och sällan rör sig nedströms tillsammans efter lek (Bendall et al., 2005; Halttunen et al., 2009; Thorstad et al., 2010). Beslutet att vandra styrs främst av individens kondition och signaler från miljön, snarare än sociala eller kollektiva beteenden – till skillnad mot smoltstadiet, där stimbildning förekommer (Riley et al., 2014).

Den cirkulära rännkonstruktionen gjorde det möjligt att utsätta fiskarna för upprepade jetmöten, vilket gav hög replikering, men den medförde också begränsningar. Upprepade möten med injektorflödet kan ha lett till vägpreferenser och tillvänjning till jetströmmen, vilket kan ha påverkat resultaten (Kerr et al., 2016). Dessutom saknades en faktisk bypass nedströms, vilket begränsade vår möjlighet att fastställa om flödesinjektionen hade kunnat leda till en lyckad passage. Den relativt starka bakgrundsströmmen (0,5 m/s) kan ha begränsat jetflödets räckvidd till ett mycket lokalt område nära jetutloppet, vilket i sin tur begränsade vår förmåga att bedöma jetströmmen som ett fullt fungerande styrverktyg. Trots detta visar de observerade beteenderesponserna att lokala flödesinjektioner påverkade keltens beteende. Detta är lovande och indikerar att denna typ av stimulus bör kunna användas för att styra kelt bort från specifika områden (Luis & Pasternack, 2023), särskilt där fysiska barriärer är opraktiska (Noatch & Suski, 2012).

Denna studie är en av de första som undersöker vildfångade kelt i ett storskalig recirkulerande strömakvarie och bidrar med ny kunskap om kelts beteendereaktioner och känslighet för hydrodynamiska variationer under

kontrollerade förhållanden. Våra observationer överensstämmer med fälttelemetristudier som visar att laxkelt är känsliga för flödessignaler (Arnekleiv et al., 2007; Luis & Pasternack, 2023; Nyqvist et al., 2017a, b; Nyqvist et al., 2016; Simmons et al., 2024a, 2024b), och vi kunde observera en beteendereaktion på flödesinjektionen. Framtida studier bör testa jetstrålar vid olika inställningar och bakgrundsflöden, och i älvmiljö – helst nära vattenkraftverk med möjlighet till nedströmspassage. Denna kunskap kan slutligen bidra till utvecklingen av en metod för att hjälpa nedströmsvandrade fisk i reglerade älvar.

1.5.1 Slutsats

Vår studie visade att vildfångade öringskelt uppvisar riktade beteenderesponser på lokaliserade jetflöden och att deras simvägar förändras på ett sätt som överensstämmer med ett undvikande beteende. Trots vissa begränsningar i strömakvariets utformning och avsaknaden av en bypass ger resultaten experimentellt stöd för att tekniskt genererade flödessignaler kan påverka rörelsemönstret hos nedströmsvandrande kelt. Detta har potentialen att användas i utvecklingen av beteendebaserad guidning av nedströmsvandrande fisk, men vilket kräver ytterligare studier i riktiga vattendrag, där injektorflödet kan optimeras i relation till det omgivande flödet. En framgångsrik utveckling av ett sådant system kan leda till minskad turbindödlighet och förbättrad nedströmspassage, vilket i sin tur kan stödja överlevnaden hos återlekare och därmed bidra till lax- och öringbeståndens överlevnad.

1.5.2 Etiskt tillstånd

Studien genomfördes under etiskt tillstånd 001671, DNR 5.8.18–03390/2019, utfärdat av den regionala djurförsöksetiska nämnden i Göteborg.

1.5.3 Publikation

Detta försök presenteras också i manuskriptet nedan, vilket också ingick i Velizara Stoilovas avhandling (KaU 2025): Behavioural response of brown trout kelts to localised jet flow in a flume: could flow injection be used in downstream guidance?

Velizara Stoilova [a, e*], Karin A. Nilsson b, Patrik Andreasson [b, c], David Aldvén [b, a], Emil Nordström [a], Elisabetta Piva [d], Sophia Schumann [d, f], Gianfranco Santovito [d], Axel Emanuelsson [e], Ann Erlandson a and Larry Greenberg [a]

[a] River Ecology and Management Research Group, RivEM, Department of Environmental and Life Sciences, Karlstad University, Sweden

[b] Department of Wildlife, Fish and Environmental Studies, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Umeå, Sweden

[c] Vattenfall Research and Development, Älvkarleby Laboratory, Älvkarleby, Sweden

[d] University of Padova, Department of Biology, 35131 Padova, Italy

[e] Norconsult AB, Environmental adaptation of hydropower group, Sweden

[f] Institute of Hydrobiology, Technical University Dresden, Germany

Ett experiment med öringsmolt har också utförts i anslutning till detta försök (Schumann et al. 2025). Beteendemässigt föredrog smolten vänstersidan och simmade nära botten, oavsett behandling, och jetströmmen förändrade inte deras simpositioner. Resultaten visade att den inre jetströmmen ökade nivåerna av malondialdehyd och aktiviteten hos antioxidativa enzymer (CAT och GPx), vilket indikerar oxidativ stress, medan andra fysiologiska mått (kortisol, hemoglobin, laktat, AOPP) inte påverkades.

1.5.4 Tack

Författarna vill rikta ett stort tack till all medförfattare på manuset (se ovan), samt Ernie Haglund, Stephanie Müller och Alessandro Truant för deras värdefulla stöd under experimentens uppbyggnad och genomförande. Vi är även mycket tacksamma mot teamet vid Vattenfall Research and Development Centre för deras betydande insatser i att konstruera, justera och driva rännan och den angränsande utrustningen. Studien finansierades av Energimyndigheten (HåVa) till K.A.N, Europeiska unionens forsknings-och innovationsprogram Horizon 2020 inom ramen för Marie Sklodowska-Curie Actions till L.G (bidragsavtal nr 860800) och av in kind-medel från Vattenfall Research & Development.

2 Delstudie 2: Manipulation av strömningsförhållanden för test av styrning av nedströmsvandrande öring vid kraftverket i Dammån

Georgia Macaulay[1, 2], Johan Leander[1], Daniel Palm[1], Karin A. Nilsson[1]

[1]*Institutionen för Vilt, Fisk och Miljö, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Umeå, Sverige*
[2]*The University of Sydney, School of Life and Environmental Sciences, Sydney, Australien*

2.1 SAMMANFATTNING

De flesta fiskvägar vid vattenkraftverk är anpassade för uppströmsvandrade fisk och tar inte hänsyn till utlekt fisk som vandrar nedströms. Utlekt öring, så kallad kelt, som överlever nedströmsvandring kan återkomma för lek senare år och är viktiga för populationens stabilitet. I denna studie testade vi om en undervattenpump kunde skapa ett flöde för att styra öringkelt bort från turbinintaget vid ett vattenkraftverk i Dammån (Jämtland), och vi beskriver öringens beteende under nedströmsvandring med hjälp av akustisk telemetri. Pumpens flöde riktades, bort från turbinintaget perpendikulärt mot huvudflödet, och kördes med 1 timme på/1 timme av under höstens vandringssäsong. Vi såg ingen påverkan av pumpen på fiskarnas beteende. Pumpen - och påverkan den hade på strömingbilden - påverkade inte simriktning hos öringen när den först kom till området ovanför kraftverket. Hidden Markov-modellering visade att pumpen inte heller påverkade beteendemönster, medan flödet i ån gjorde det. Tid på året och flödesförhållanden påverkade även hur länge fisken fördröjdes ovanför dammen. Vår studie betonar vikten av fälttester av beteendebaserade vägledningssystem i verklig skala och ger viktiga insikter i öringens beteende under nedströmsvandring

2.2 INLEDNING

I avsaknad av effektiva lösningar för nedströmsvandring kan kelt tvingas att passera genom turbiner, de kan utsättas för förseningar i vandring, ökade energikostnader, samt ökad risk för skador och hög dödlighet (Baktoft et al., 2020; Bevelhimer et al., 2017; Vikström et al., 2020). Förbättrad nedströmsvandring är därför avgörande för att öka andelen flergångslekande fisk och minska de negativa effekterna på fiskpopulationen.

Fysiska vägledningsstrukturer (t.ex. dammar och galler) kan vara kostsamma, svåra att implementera, och kräver frekvent underhåll på grund av ansamlingen av skräp (OTA, 1995; Leander et al., 2021). Mer kostnadseffektiva system för fiskvägledning eftersöks därför, och här testar vi en ny metod baserad på manipulation av strömningsbilden.

Hos öring (*Salmo trutta*) kan förändringar i vattenhastighet och strömningsriktning utlösa vandringsbeteende. Fiskar använder hydrauliska gradienter för att hitta

passager och följer oftast huvudströmmen (Williams et al., 2012; Coutant & Whitney, 2000). I reglerade vattendrag leder den starkaste strömmen ofta till turbinerna, vilket försvårar förutsättningarna för att leda fisken till skonsamma passager. Då modifikation av kanaler kan vara kostsamt och tidskrävande (Noatch & Suski, 2012), kan manipulation av strömningsbilden vara ett kostnadseffektivt och mindre tidskrävande sätt att styra fisk bort från turbinintag.

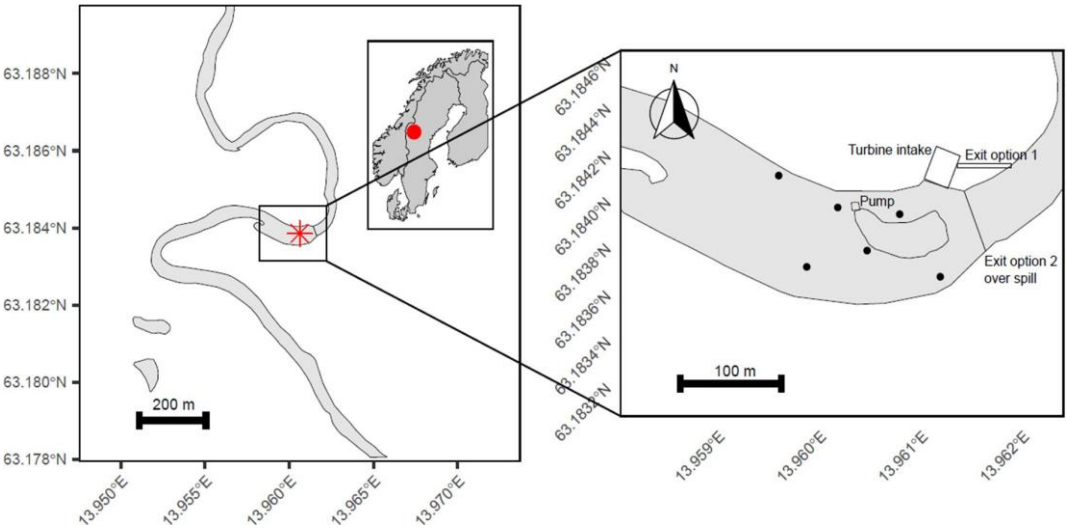
Vi undersöker här en ny metod där en nedsänkt pump används för att skapa en riktad vattenström som kan styra nedströmsvandrande fisk bort från huvudflödet. Syftet är att testa om denna vattenström kan vägleda öringkelt bort från turbinintaget vid Dammån i Jämtland. Öringens rörelser och beteenden följdes med hjälp av akustisk telemetri under 2022–2023 för att bedöma metodens effektivitet. Vi undersökte hur simriktning påverkades vid första tillfället öringen kom till området där pumpen var utplacerad, samt tiden det tog för öringen att passera förbi dammen (passagetid). En Hidden Markov-modell användes för att identifiera och definiera fiskbeteenden och jämföra beteende mellan perioderna när pumpen var av respektive på.

2.3 GENOMFÖRANDE

Studien genomfördes uppströms ett mindre vattenkraftverk i Dammån, Jämtland, Sverige (63°11'02.8"N 13°57'39.9"E). Öringarna märktes vid en fiskfälla placerad vi kraftverket under deras uppströmsvandring, då populationen vandrar från Storsjön mot lekområden i Dammån. Fiskfällan vid kraftverket etablerades 1950 och kontrolleras manuellt två gånger dagligen från 10 juni till slutet av september av Dammåns FVO. Fisk fångad i fällan släpps ut ovanför dammen för att fortsätta vandringen till lekplatser högre uppströms. Isläggning sker vanligen i slutet av november och islossning i april-maj.

Vid nedströmsvandring efter lek har öring i Dammån tre alternativ för att passera kraftverket: (1) passera via en flyktränna som är placerad nära turbinintaget inne i byggnaden (mindre fisk kan passera in i turbinen, men de märkta fiskarna i studien var för stora för att passera genom gallren), (2) passera över själva dammen, eller (3) simma tillbaka uppströms och övervintra i själva Dammån. Detta är den första studien av öringkeltens beteende vid kraftverket i Dammån under nedströmsvandring, och det var tidigare okänt vilket alternativ som var vanligast. Vi riktade pumpflödet bort från turbinintag mot åns södra sida.

Varje år placerades sex HR2 akustiska mottagare (Innovasea, Bedford, Kanada) ut i ett 0,27 hektar stort rutnät ovanför dammen för att kartlägga beteendet i dammen av nedströmsvandrade öringar (figur 1). En ytterligare mottagare placerades cirka 600 m nedströms dammen för att detektera fisk som passerat dammen. Ytterligare lågupplösta mottagare (kan detektera fisk på minutnivå) fanns vid åmynningen och i Storsjön som del av en annan studie. Under 2023 placerades också en mottagare inne i kraftverket strax uppströms gallret vid turbintaget för att detektera vilka fiskar som valde att passera nedströms via kraftverkets flyktränna.



Figur 1 Karta över studieområdet som visar mottagarnas placering (svarta punkter), pumpen och pumpens plyms rumsliga utbredning samt turbinens in- och utlopp för nedströmsvandrande fisk.

2.3.1 Märkning av fisk

Under den tvååriga studien märktes totalt 100 öringar (medellängd ± SD = 57 ± 8,7 cm). 2022 (10–18 augusti, figur 2) märktes 49 fiskar. 2023 (14–15 augusti) märktes 50 fiskar. Alla fiskar försågs med en V9-2x sändare som sänder 180 kHz signal av HR-typ (”högupplösta”, Innovasea, Bedford, Kanada). Under 2023 försågs 20 fiskar med ytterligare en sändare för att samverka med en annan studie. Den extra sändaren (LR ”lågupplöst”, V13-1x 69 kHz Innovasea, Bedford, Kanada) limmades ihop med den med ursprungliga V9-2x sändaren innan de fördes in i fiskarna. Endast fiskar >45 cm märktes, och honor >65 cm undveks. 2022 återvände 38 av 50 fiskar som kelt efter lek (16 märkta med LR sändare, 22 HR) och 2023 återvände 32 av 50 (detta under perioden vi hade mottagarna ute). För denna studie användes endast data från fiskarna märkta med högupplösta sändare.

Vid märkningen placerades öringar från fiskfällan i ett 500 L syresatt kar med åvatten (~15,5 °C). Utvalda fiskar bedövades i 25 L åvatten med MS-222 (80 mg/L) i ~3,5 min, under vilken 10–15 fjäll och fenklipp (<0,5 cm^2) samlades in. Fisken placerades sedan i ett vadderat PVC-rör, med gälarna under vatten, för märkning. Ett 2–3 cm långt snitt gjordes i buken och akustiska telemetrisändarna infördes. Snitten syddes ihop med 1–3 suturer. Fiskarna mättes (total- och gaffellängd), instrument steriliserades mellan fiskarna, och individerna överfördes till flytande fisksumpar för återhämtnings i ån i 40–50 min innan de släpptes. Total hanteringstid per fisk var i genomsnitt nio minuter. Vid frisläppandet uppvisade ingen av fiskarna tecken på onormalt beteende och simmade snabbt ut mot djupare vatten.



Figur 2. (a) Dammåns FVO sköter hanteringen av öringen i trappan, (b) kar för fiskar som ska märkas, (c) märkning, (d) sumpar uppströms, och telemetri-mottagare i förgrunden. Foton: Karin Nilsson.

2.3.2 Pumpdrift

Pumpen som användes i denna studie genererade ett flöde på 560 L/s vilket genererade en vattenstråle som riktades mot andra sidan av ån och böjde av nedströms (svart linje figur 1). Pumpen kördes automatiskt, med ett schema med 1 timme på och 1 timme av, under perioden för höstens nedströmsvandring. 2022 var pumpen i drift från 13 oktober till 16 november, och 2023 från 19 september till 7 november. Timvisa data över åns vattenföring (m^3/s), inklusive vatten som passerar genom turbinen och över dammen, tillhandahölls av vattenkraftsföretaget Jämtkraft som driver kraftverket.

2.3.3 Bearbetning av telemetridata

Efter att uppenbart felaktiga positioner (t.ex. registreringar på land) tagits bort filtrerades spåren för de individuella märkta fiskarna ytterligare med hjälp av

maximalt tillåten simhastighet och svängvinklar enligt (Freitas et al., 2008), modifierade av Leander et al. (2020).

2.3.4 Statistik

För att undersöka om flödesplymen som genererades av pumpen kunde vägleda öringarna mot skibordet - eller på annat sätt påverka dess rörelsetrajektorier - analyserade vi om simriktningen ändrades när de kom in i området som var påverkat av pumpens flöde (definierat av plymens storlek, ca 700 m²). Första mötet med ”plymområdet” definierades som minst två på varandra följande detektioner inom den givna arean (svart linje figur 1 och bilaga). Vi beräknade stegvis riktning och medelriktning för varje fisk under fem minuter före och efter första inträdet i det givna området. Stegvisa riktningar (bäring) beräknades med geosphere (Hijmans, 2024) och omvandlades till cirkulära riktningar med circular (Agostinelli & Lund, 2025) i R. För varje grupp beräknade vi också den resulterande medellängden ($\bar{r}$) för att kvantifiera den riktade koncentrationen av bäringar ($\bar{r} = 1$ innebär att alla riktningar är identiska (stark orientering); $\bar{r} = 0$ innebär att riktningarna är jämnt slumpmässigt fördelade). En Mardia-Watson-Wheeler-test (CircStats) användes för att jämföra simriktning mellan fisk som kom in i det givna området när pumpen var på respektive av. Endast fiskar med både spår både före och efter ”inträdet” inkluderades (n = 35; 20 vid pump av, n = 15 vid pump på).

2.3.5 Estimering av beteendetillstånd

Vi använde en Hidden Markov-modell (HMM) för att identifiera beteendetillstånd hos märkta öringar och jämföra dessa mellan behandlingarna (pump på och pump av) för att undersöka pumpens effekt på beteendet. Med paketet bayesmove i R (Cullen & Valle, 2021; R Core Team, 2025) klassificerades fiskrörelser baserat på steglängder och riktningsförändringar (turning angles). Av 54 HR-märkta kelt som detekterades inom det dämda området uppströms skibordet hade 41 spår tillräckligt hög kvalitet för analys.

HMM krävde regelbundna tidsserier, så positioner estimerades var 10:e sekund med ±10 s tolerans. Fiskar med <1000 detektioner exkluderades (8 fiskar), vilket gav 33 individer för slutlig analys. Antalet beteende-tillstånd (behavioural states) bestämdes genom att utvärdera tiden spenderad i varje beteende över alla spårsegment och individer. För varje detektion beräknar paketet bayesmove sannolikheten för varje beteende-tillstånd, och det mest sannolika beteendet anses dominera vid den tidpunkten. Eftersom pumpens schema och flödesdata samlades in timvis, summerades beteendedata till timvisa proportioner för varje fisk och normaliserades så att summan blev 1.

För att undersöka om beteende-tillstånd påverkades av pumpstatus, flöde, kön, fisklängd och tid på dygnet användes en Dirichlet-regression inom ett Bayesiskt ramverk med paketet brms (Bürkner, 2021). Slutmodellen inkluderade pumpstatus (på/av), timvis totalflöde (m³/s), fisklängd, kön samt slumpmässig intercept för fisk-ID. Studieår och tid på dygnet exkluderades då de inte påverkade beteendestater och ökade modellens komplexitet.

2.3.6 Tid till passage

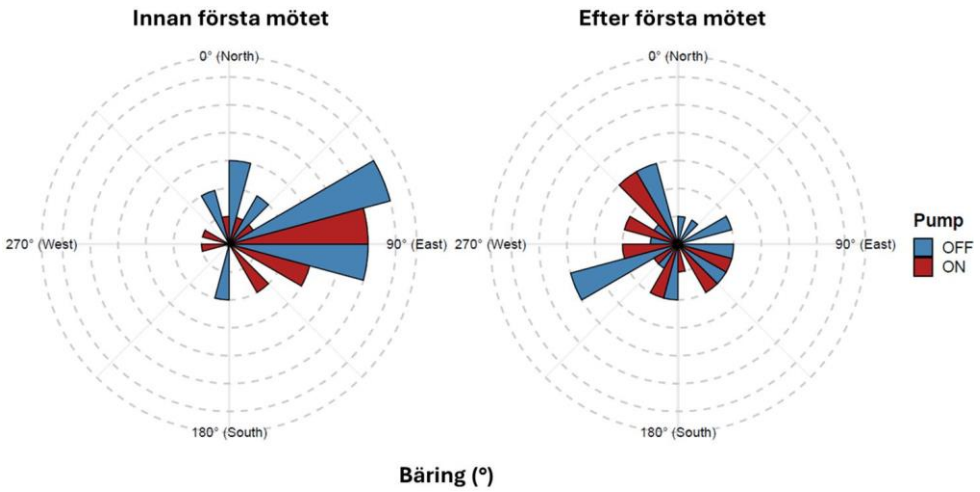
För att förstå hur länge kelten fördröjdes ovanför dammen beräknades tiden till passage (n = 41) som tiden mellan första och sista detektion i studieområdet (timmar).

Sambandet mellan tid till passage och prediktorer (flöde m^3/s, dag för första detektion, kön och total längd) analyserades med generaliserade linjära blandade modeller (glmmTMB) i R. Studieår och fisk-ID inkluderades som slumpmässiga faktorer, och Akaikes kriterium användes för att välja den mest parsimoniska modellen. Modellens residualer och avvikare kontrollerades med DHARMa. Vi testade även om flöde under passagetimmen samverkade med individens första detektion vid dammen - för att påverka tiden till passage. En typ II Wald Chi-square-test (car-paketet) användes för att avgöra signifikansen av flöde, dag för första detektion och deras interaktion. Dessutom undersöktes öringens rumsliga fördelning för att se om de föredrog vissa områden ovanför dammen under fördröjningen av nedströmsvandringen.

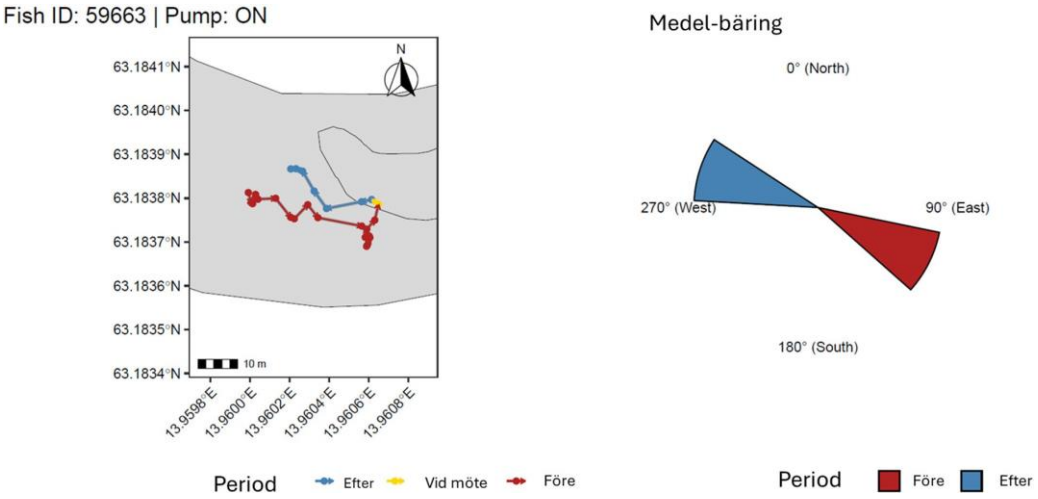
2.4 RESULTAT

2.4.1 Simriktning vid första mötet med pumpen

Det fanns ingen signifikant skillnad i medelsimriktning mellan fisk som först kom in i pumpområdet när den var på eller av, varken före eller efter de kom in i området. Före de kom in i området rörde sig fiskarna mestadels i öst–sydostlig riktning (medelriktning: OFF = 108°, ON = 130°; $\bar{r}$ = 0,55–0,64). Mardia-Watson-Wheeler-test visade ingen signifikant skillnad (W = 0,91, df = 2, p = 0,63). Efter mötet skiftade medelriktningen mot syd–sydväst (OFF = 200°, ON = 222°) med mer spridda riktningar, särskilt vid pump av ($\bar{r}$ = 0,06–0,33), men skillnaden mellan pump på och av var fortfarande inte signifikant (W = 0,91, df = 2, p = 0,64). Exempel på fiskspår visas i figur 4, fullständiga spår och medelriktningar finns i bilaga.



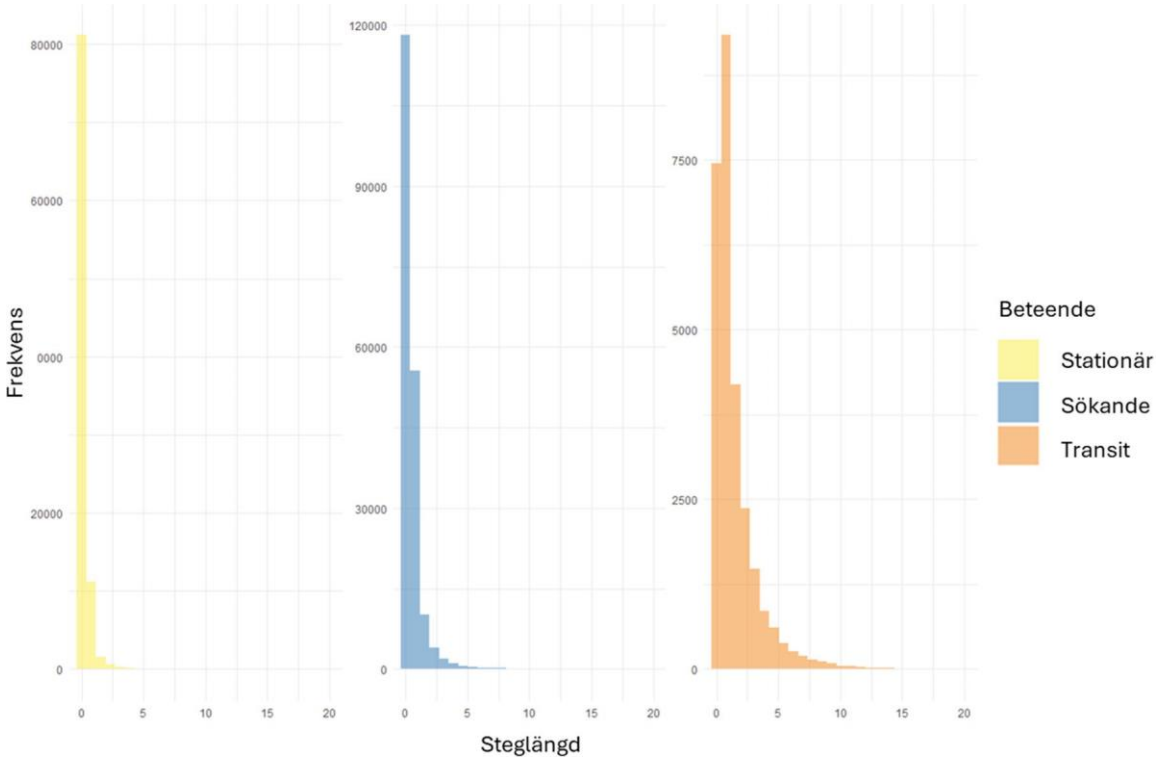
Figur 3: Rosdiagram som visar medelsimriktning (°) hos öringkelt före och efter första mötet med pumpens ström, grupperade efter pumpens status (på/av). Stavarnas längd representerar antalet fiskar. Riktningarna var spridda och skilde sig inte signifikant mellan pumplägen (p > 0,6). Blå staplar visar pump av; röda staplar visar pump på.



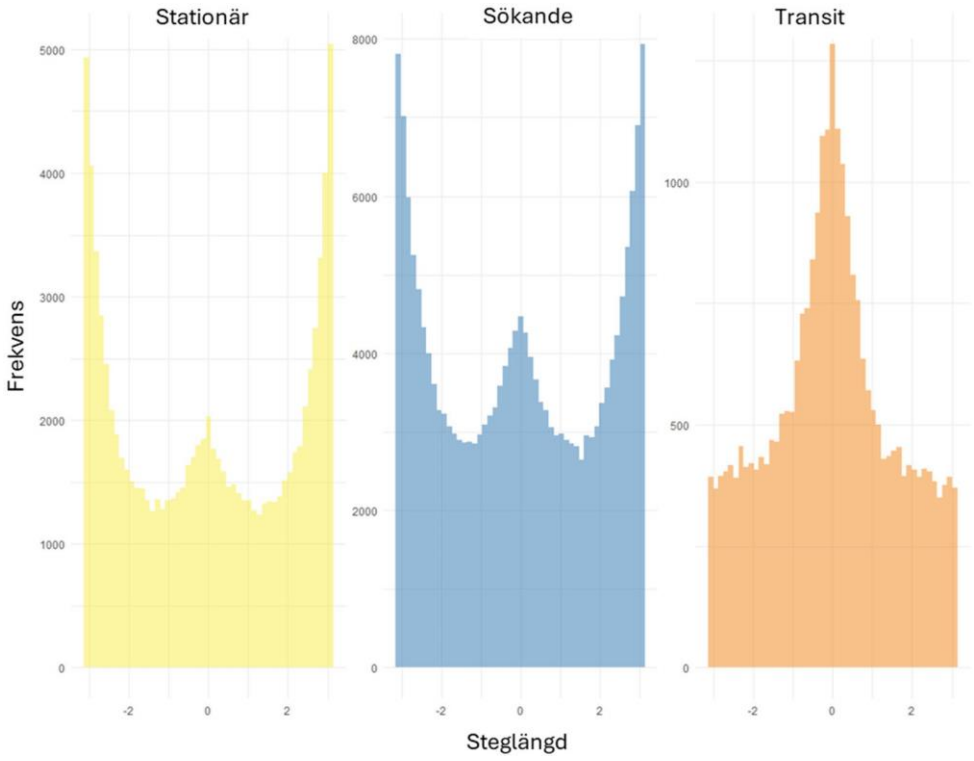
Figur 4: Exempel på ett öringspår före (röda spår) och efter (blå spår) första inträdet i pumpområdet, när pumpen var på, samt den relativa förändringen i medelriktning före (rött) och efter mötet (blått). Denna individ verkar närmast ha ett undvikande beteende.

2.4.2 Beteendetillstånd

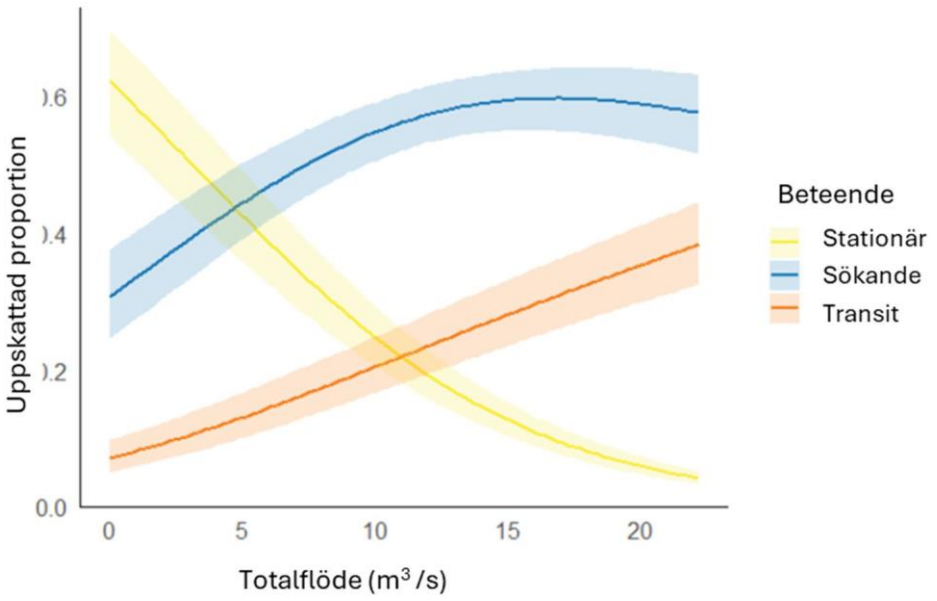
Hidden Markov-modellen identifierade att tre beteendetillstånd stod för 89,7 % av alla observationer från alla individer (n = 33). Beteendetillstånden tolkades biologiskt och definierades som: **Sökande:** korta till medellånga steg (figur 5) och låg uthållighet i riktning (directional persistence) (figur 6). Transit: långa steg (figur 5) med huvudsakligen rak rörelseriktning (låg riktningsförändring) (figur 6). Stationär (Encamped): korta steg (figur 5) med viss riktningsförändring (figur 6).



Figur 5: Histogram över steglängd (m) för varje beteende-tillstånd.



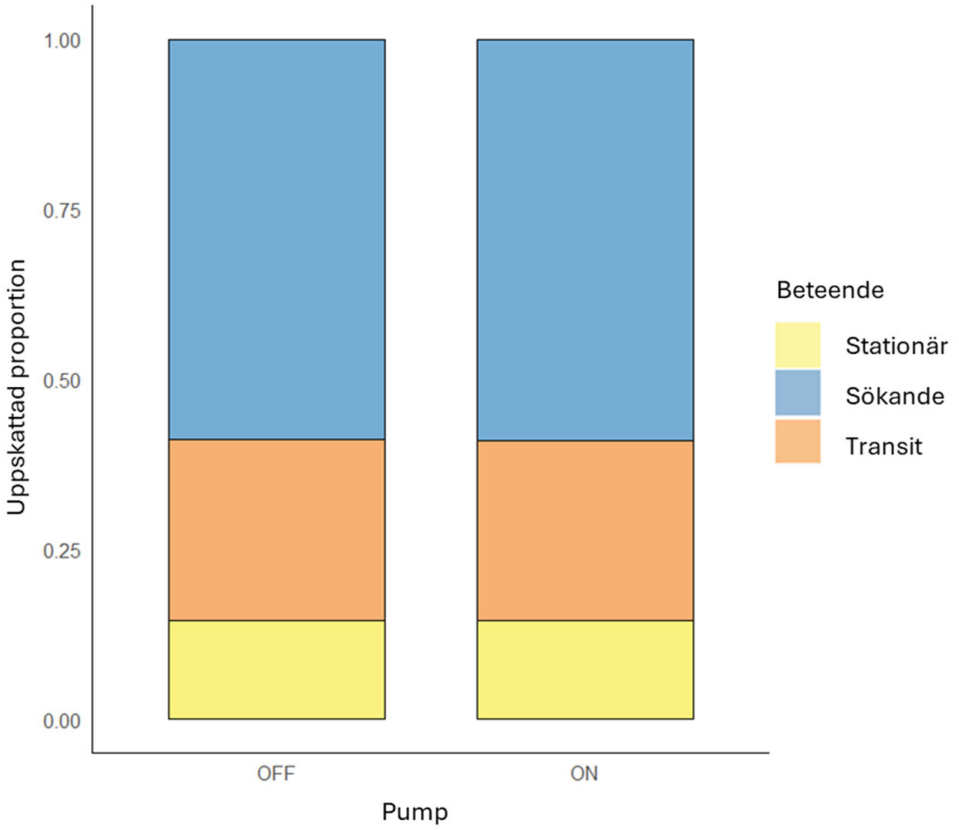
Figur 6: Histogram över riktningsförändring för beteendetillstånden.



Figur 7: Uppskattad andel tid fiskarna spenderade i varje beteende-tillstånd i relation till Dammåns totala vattenföring. Heldragna linjer visar den anpassningen till Dirichlet-regressionsmodellen, som illustrerar sambandet mellan andelar tid (timvisa) i Stationärt (gult), Sökande (blått) och Transit (orange) beteende i förhållande till åns totala vattenföring (m³/s). Transparenta skuggade områden visar 95 % konfidensintervall.

Totalflöde hade en stark och signifikant effekt på beteendetillstånd (figur 7). Ökat flöde var kopplat till en högre andel Transit-beteende (β = 0,05, 95 % CI = [0,03, 0,06]) och en lägre andel Stationärt (Encamped) beteende (β = -0,15, 95 % CI = [-0,17, -0,13]).

Pumpbehandlingen hade däremot ingen signifikant effekt på fördelningen av beteendetillstånd (figur 8). De uppskattade koefficienterna för behandlingen ”pump på” låg nära noll för både Transit (β = -0,01, 95 % CI = [-0,06, 0,05]) och Stationärt beteende (β = 0,00, 95 % CI = [-0,06, 0,06]), vilket indikerar att fiskarnas beteende inte skiljde sig signifikant mellan pump på och pump av (figur 8).



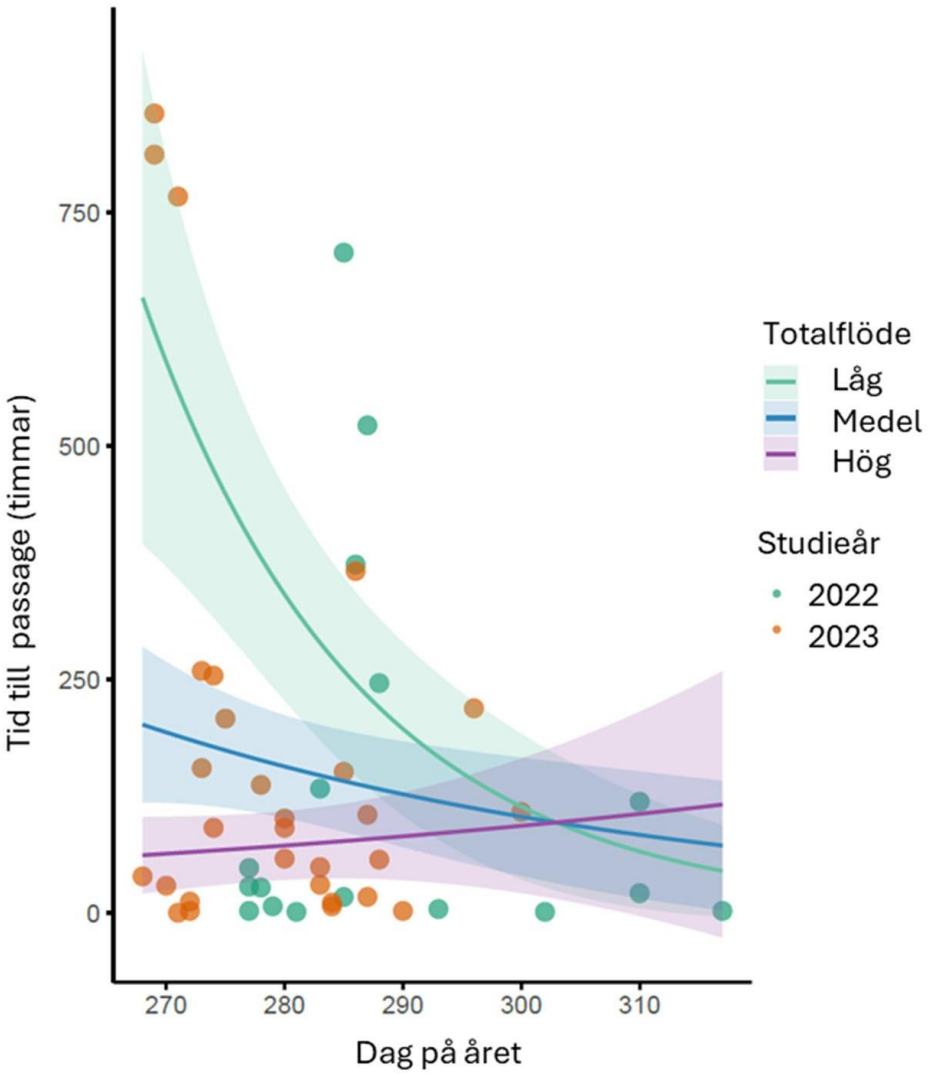
Figur 8: Tidsandel som fiskarna spenderade i olika beteendetillstånd vid de olika behandlingarna (pump av/på).

2.4.3 Tid till passage

Tiden fiskarna spenderade ovanför dammen varierade kraftigt mellan individer, från 9 minuter till ~856 timmar (35 dagar), med en median på 57 timmar (figur 9). Totalflöde vid tidpunkten fisken lämnade dammen genom nedstöms vandring, och interaktionen mellan detta flöde och dagen för första detektion, påverkade tiden till passage signifikant. Ett Wald Chi-square-test visade att både flöde vid passage ($\chi^2 = 31{,}30$, $p < 0{,}001$) och dag för första detektion ($\chi^2 = 6{,}72$, $p = 0{,}009$) hade betydelse, samt interaktionen mellan dessa ($\chi^2 = 12{,}10$, $p < 0{,}001$), vilket innebär att flödets effekt varierar beroende av tid på säsongen.

Fiskens kön och storlek påverkade inte tiden till passage och togs bort från modellen. Högre flöde var generellt kopplat till kortare tid ovanför dammen, men effekten av flöde varierade över säsongen: vid lågt flöde tog passagen längre tid tidigt på säsongen och minskade senare, vid medelflöde var tiden kortare och minskade mindre, och vid högt flöde var tiden kort och ökade något senare på säsongen. Runt dag 300 (slutet av oktober) vände sambandet, där högre flöden gav längre passagetid (figur 9).

Fiskarna visade en rumslig preferens för ett grunt område ovanför dammen med stora stenar där de kunde vila om ingen lämplig passage hittades (figur 10). 2023 detekterades alla kelts i huvudstudieområdet slutligen vid mottagaren i turbinintaget (n = 32).



Figur 9: Interaktion mellan tidpunkten för vandring (dag på året) och tid till vandring (tid spenderad ovan dammen). Punkterna representerar enskilda fiskar, där färg på punkterna anger studieår (2022 eller 2023). Trendlinjer visar modellens prediktioner för tre nivåer av åns totala vattenföring under passagestimmen: Lågt = 1 standardavvikelse under medel; Medel = medelvärde; Högt = 1 standardavvikelse över medel. Skuggade områden visar 95 % konfidensintervall.

2.5 DISKUSSION

I denna studie analyserade vi beteendet hos öringkelt vid mötet med en stor undervattenspump för att undersöka om pumpens flöde kunde användas som beteendebaserad vägledning för nedströmsvandrade fiskar. Resultaten visade att pumpen inte påverkade fiskarnas beteende eller simriktning vid första mötet med strömmen. Hidden Markov-modellering indikerade att pumpens status inte heller påverkade beteendetillståndet över längre tid, medan flöde var en viktig förklarande variabel för både beteende och tid för nedströmspassage. Sökande var det vanligaste beteendet hos öringen. Vid lågt flöde var fiskarna oftast stationära, medan sannolikheten för att befinna sig i sökande eller transit-beteenden ökade med flödet. Tid till passage varierade kraftigt mellan individer, och interaktionen

mellan migrationsstart och flöde visade att högre flöden påverkade tid till passage mindre för sena migranter jämfört med tidiga. Fiskarnas storlek eller kön påverkade varken beteende eller tid till passage. Studien understryker vikten av att genomföra praktiska försök i fält av nya fiskguidningsmetoder vid vattenkraftverk.

2.5.1 Avsaknad av en effekt från pumpen

Pumpen påverkade varken öringens simriktning vid första mötet eller deras beteendetillstånd ovanför dammen. Effektiviteten hos beteendebaserade vägledningsmetoder varierar och påverkas av faktorer som vattentemperatur, stress, fiskstorlek och antal individer (Noatch & Suski, 2012; Tix et al., 2018; Tucker et al., 2019; Parker et al., 2016). I denna studie kan flera faktorer ha bidragit till den uteblivna effekten. Salmonider följer ofta det största flödet vid nedströmsvandring, och pumpens flöde på 0,5 m³/s kan ha varit för svagt i relation till det totala flödet. I vår studie var det inte heller uppenbart att öringen rörde sig med bulkflödet och flera individer rörde sig in i de definierade pumpområden från kanterna (Bilaga). Vissa rörelsemönster indikerar snarare att kelten simmar runt och undersöker området. Det kan också vara så att öring ser en ”vägg under vattnet” – och reagerar på den långt innan de kommit ner till själva dammen. Pumpens schema (1 timme på/1 timme av) kan också ha varit suboptimalt; längre kontinuerligt flöde kan ha gett starkare beteenderespons. Fiskarna kan även ha acklimatiserat sig till det frekventa flödesbytet. Det är möjligt att fiskarna simmat under vattenströmmen som pumpen genererade, men då simdjup inte registrerades så går detta inte att utvärdera. Sammanfattningsvis så lyckades vi inte styra öringkelten i denna studie. Hos vissa individer kan det ha funnits ett undvikande av strömmen eller pumpen (tex öringen i figur 3) det var inget generellt mönster (se Bilaga).

Denna studie är den första som undersöker den vuxna öringens nedströmsvandring på denna plats. 2023 detekterades alla fiskar som detekterades ovan dammen också vid mottagaren i turbinintaget, vilket tyder på att de använde utgångsalternativ 1 och att de inte gick över dammen. Vi kunde inte säkert fastställa vilka passager fiskarna använde 2022. Studien visar att utgång 2 över skibordet fungerar dåligt för öring i Dammån.

Spillet över dammen påverkar troligen hur sannolikt det är att öring använder denna passage. Tidigare studier på regnbågslax (*Oncorhynchus mykiss*) visade att passage via ytvattenspill begränsades av bland annat vattennivå (Ohms et al., 2022), med en lägsta vattennivå på 8,5 cm för passage. Lågt spill över dammen kan ha bidragit till keltens tvekan i denna studie, och framtida studier borde undersöka tröskelvärden för öring samt alternativet att koncentrera detta spill till en kortare sträcka för att därigenom öka djupet.

Att identifiera och förstå sambanden mellan hydrauliska förhållanden, fiskars sensoriska förmågor och individuella beteenden vid passage av vattenkraftshinder är viktigt för att förbättra passageeffektiviteten. Det är också avgörande att testa kunskap som erhållits i kontrollerade experiment i verkliga fältmiljöer för att verifiera resultaten och förbättra fiskpassageprestandan (Silva et al., 2018). Fiskars beteende är komplext, och metoder som försöker manipulera fiskar enbart genom

attraktions- eller undvikandereaktioner kommer sannolikt aldrig att vara helt effektiv (Macaulay et al., 2021).

2.5.2 Beteende-tillstånd hos öringkelt

Tre beteende-tillstånd förklarade 89 % av beteendet hos märkta öringar, baserat på simhastighet och riktningsförändringar från högupplöst telemetri. De identifierade beteende-tillstånd stämmer med biologiskt rimliga rörelsemönster hos migrerande öring vid en vattenkraftbarriär.

Den vanligaste beteende-tillståndet var sökande, som speglar utforskande rörelser medan öringarna var fördröjda av dammen, och sannolikheten för ett sökande beteende ökade vid högre flöde. Transit beteende, dvs snabba och raka rörelser, var mindre vanlig men ökade också vid högre flöde. Stationärt/encamped beteende var minst förekommande och mest sannolikt vid lågt flöde. Resultaten stämmer med studier på kelt av atlantlax, där högre vattenhastighet ökade simhastigheten (Simmons et al., 2024). Tid på dagen påverkade inte beteende-tillståndet, och fiskens storlek eller kön hade heller ingen effekt inom den begränsade storleksintervallet vi hade i denna studie.

Det dominerande sökande beteendet tyder på att kelts letade efter en passagemöjlighet och var ovilliga att simma in i turbinintaget. Tidigare studier har visat att kelt tvekar att dyka djupt för att nå spillway-passager eller mörka områden (Arnekleiv et al., 2007; Lekang & Fjæra, 1995). Upprepade försök att hitta lämpliga utgångar har observerats hos laxkelts vid vattenkraftsanläggningar (Nyqvist et al., 2016; O. Simmons et al., 2024).

Forskning på keltmigration har huvudsakligen fokuserat på anadrom Atlantlax, medan öring, särskilt sötvattenspopulationer, har studerats mindre. För att skydda kelt i reglerade älvar behövs kunskap om deras beteende under nedströmsvandring. Framtida studier kan dra nytta av undervattenskameror, accelerometrar och trycksensorer för att bättre förstå beteende-tillstånd och vertikala rörelser, som dykning under sökbeteende.

2.5.3 Fördröjning av vandring

Tiden till passage varierade kraftigt mellan individer, från minuter till dagar. Fördröjning vid dammar och aktivt sökande efter lämplig passage kan leda till ökad energiförbrukning och minskad överlevnad för kelt (Baktoft et al., 2020) och har kopplats till lägre passageframgång (Nyqvist et al., 2016). Energiförbrukningen beror på keltens längd och har uppmätts till 0,8–10,1 kJ per timme (Baktoft et al., 2020).

Generellt tar det längre tid för öringkelt än för laxkelt att passera samma dammar (Calles et al., 2012).

I denna studie observerades flest fiskar på sydvästra sidan av ån, ett område med stora stenar och låg vattenhastighet, vilket kan vara ett bra område för vila och energibesparing för kelt som inte omedelbart hittar en passage nedströms (O. Simmons et al., 2024).

I vårt system kunde öring passera in i området vi studerade under nedströmsvandring, och sedan åter vända uppströms, vilket också observerades hos fiskar som tillbringade flera hundra timmar ovanför dammen innan de passerade nedströms. Alla fiskar som inkluderades i analysen passerade dock in i det dämda området uppströms dammväggen, vilket visar på deras motivation att vandra nedströms. Att utöka mottagarnätverket uppströms skulle kunna vara fördelaktigt i framtida studier. De fiskar som passerade dammen på under en timme (n=2, båda honor, 50 och 60 cm) kan ha påverkats av tidigare fullbordade lekvandringar. Det har föreslagits att tidigare lekvandring kan påverka keltbeteende hos Atlantlax vid vattenkraftverk (O. Simmons et al., 2024**).** Minst två andra märkta öringar i studien bekräftades som flergångslekare (opublicerad studie), vilket visar att en del av populationen lyckas upprepa lek.

Effekten av åns flöde på tiden öringarna tillbringade ovanför dammen berodde på vilken tid på säsongen det var. Tidiga migranter (före slutet av oktober) tillbringade längre tid uppströms dammen vid låg flöde, medan högre flöden förkortade tiden till passage.

Efter den 27 oktober var lågt flöde förknippat med snabbare passage, vilket kan spegla en skillnad mellan tidiga och sena migranters motivation. Tidiga migranter kan ha uppfattat att de hade tillräckligt med tid att vänta på mer gynnsamma flödesförhållanden. Sena migranter påverkas troligen av förändrade miljöförhållanden, med sjunkande temperaturer och isbildning (Babin et al., 2021) Framtida studier bör inkludera fler miljö- och fysiologiska parametrar för att bättre förstå keltsbeteende.

2.5.4 Slutsatser

Vi fann inga tecken på att undervattenspumpens flödesplym påverkade eller styrde öringkeltens beteende under deras nedströmsvandring. Våra resultat understryker vikten av fälttester av nya fiskledningsmetoder. De potentiella begränsande faktorer som beskrivs här kan ge vägledning för framtida forskning på beteendebaserade metoder med flöde. Resultaten bidrar till ökad förståelse för öringens beteende, vilket är viktigt för att förbättra effektiviteten i nedströmsvandring och öka andelen flergångslekare i öringpopuationer.

2.5.5 Publikation

Vårt arbete har resulterat i ett vetenskapligt arbete där vi det finns mer detaljer om metoder och annat (opublicerat manuskript): ***Behaviour of brown trout kelts encountering a novel flow-based guidance device at a hydropower dam.*** *Preliminär författarlista: Macaulay G[1, 3], Wendin G[2], Leander J[1], Palm D[1], Lillberg E[2], Andreasson P[1, 2], Nilsson KA[1]*

[1] Department of Wildlife, Fish, and Environmental Studies (VFM), Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Umeå, Sweden

[2] Vattenfall Research and Development, Älvkarleby Laboratory, Älvkarleby, Sweden

[3] The University of Sydney, School of Life and Environmental Sciences, Sydney, Australia
Etiskt tillstånd

Studien genomfördes under etiskt tillstånd DNR 5.8.18–17028/2020, utfärdat av den regionala djurförsöksetiska nämnden i Uppsala.

2.5.6 Tack

Vi vill först tacka alla medförfattare på kommande manus (ovan), som inkluderar betydande insatser av Gustav Wendin, Patrik Andreasson och Eric Lillberger på Vattenfall R&D. Vi tackar Susann Handler och Jämtkraft för diverse hjälp och lån av båt och Fiskevårdsområdet vid Dammån för hjälp vid märkningen av fisk och en positiv attityd. Tack till Ingemar Näslund, Anders Dahlén och andra på Länsstyrelsen Jämtland som hjälp till med råd och information. Studien finansierades från Energimyndigheten (till KAN, Hållbar Vattenkraft – HåVa-utlysningen). David Aldvén och Kjell Leonardsson tackas för hjälp med ansökan. Petter Lundberg, Karolina Carlström. Renee van Dorst och Florian Käslin tackas för hjälp med genomförandet av experimentet. Slutligen tackar vi Kathrin Schemann vid Sydney Informatics Hu, University of Sydney, för statistisk konsultation.

2.5.7 Bilagan för delstudie 2

Bilagan för delstudie 2 visar telemetrispår där röd färg indikerar spåret innan fisken kommer in i området som påverkades av pumpen, gul färg indikerar den första positionen inuti området, och blå färg indikerar spåren efter detta. Spåren är ”klippta” för att fånga detta skeende. Till höger visas bäringen – alltså riktningen hos fisken – före och efter att den kommit in i området. Bilagan återfinns längst bak i rapporten.

3 Delstudie 3: Styrning av nedströmsvandrande kelt i Klarälven - utvärdering av flödesmanipulation med hjälp av telemetri

Karin A. Nilsson[1], Velizara Stoilova[2], Georgia Macaulay[1,3], Johan Leander[1], Gustav Lundqvist[4], Anders Andersson[5], Larry Greenberg[2]

[1]*Institutionen för Vilt, Fisk och Miljö, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Umeå, Sverige*
[2] *Institutionen för Miljö- och Livsvetenskaper, Karlstads universitet, Sverige*
[3]*The University of Sydney, School of Life and Environmental Sciences, Sydney, Australien*
[4] *Vattenfall Research and Development, Älvkarlebylaboratoriet, Älvkarleby, Sverige*
[4] *Institutionen för teknikvetenskap och matematik, Luleå Tekniska Universitet, Sverige*

3.1 INLEDNING

Nedströmspassage vid vattenkraftanläggningar utgör fortfarande en av de mest kritiska flaskhalsarna för överlevnaden hos vandrande laxfiskar som lekt (kelt). Passage genom turbiner kan leda till dödlighet som överstiger 70 %, särskilt för stora, energimässigt utarmade individer, vilket gör att en säker nedströmsvandring avgörande för populationens motståndskraft (Coutant & Whitney, 2000; Vikström et al., 2020).

Kelt bidrar i hög grad till den totala reproduktionen och stabiliteten hos laxfiskpopulationer (Halttunen, 2011; Simmons et al., 2024a). Trots en ökande medvetenhet om behovet av att fiskpassager ska fungera åt två håll, ligger effektiva åtgärder för nedströmspassage av kelt fortfarande efter lösningar för uppströmspassage (Nyqvist et al., 2017).

Guidning av nedströmsvandande fiskar förbi dammar med hjälp av signaler såsom ljud, ljus och hydrodynamiska signaler har framträtt som lovande alternativ till fysiska galler, särskilt vid stora vattenkraftstationer där finmaskiga gallerlösningar kan vara tekniskt eller ekonomiskt orimliga (Beck et al., 2020; Noatch & Suski, 2012). Andel nedströmsvandrande fiskar som styrs förbi dammar med hjälp av signaler som påverkar beteende är dock fortfarande begränsad. Forskningen har i stor utsträckning fokuserat på juveniler, medan vuxna fiskar har fått mindre uppmärksamhet, trots deras känslighet för hydrodynamisk stress och höga dödlighet vid turbinpassage (Baktoft et al., 2020).

Hydrauliska signaler har stor inverkan på laxfiskars rörelser och påverkar deras positionering och beteende i närheten av antropogena strukturer i vattendrag (Coutant & Whitney, 2000). Små förändringar i hastighetsgradienter eller turbulens kan avgöra om nedströmsvandrande fisk väljer säkra bypassvägar eller dras mot turbinintag. Kelt undviker ofta områden med höga strömhastigheter och kan vara särskilt mottagliga för hydraulisk manipulation (Baktoft et al., 2020; Nyqvist et al., 2017).

I ett storskaligt laboratorie-experiment visade vi att hydrauliska strålar kan förändra det horisontella och vertikala simbeteendet hos vild öringkelt (Stoilova et al., in prep.). Dessa resultat tyder på att konstruerade hydrauliska signaler kan framkalla förutsägbara responser. Miljöer i kontrollerade rännor kan dock inte fullt ut återskapa de komplexa strömningsmönster, den turbulens och de vattenföringsförhållanden som råder i naturliga vattendrag. Fältbaserad validering är därför nödvändig för att avgöra om pumpgenererade strålar kan fungera som skalbara beteendestyrande verktyg under verkliga driftförhållanden vid vattenkraft.

I denna fältstudie testade vi om en pump installerad uppströms vattenkraftintaget vid Edsforsen (Klarälven) kunde skapa en hydraulisk stimulans tillräckligt stark för att påverka rörelserna hos nedströmsvandrande laxkelt (*Salmo salar*). Genom att injicera ett kontrollerat flöde vinkelrätt mot huvudströmmen i älven avsåg vi att skapa en stråle som kunde leda kelt bort från turbinriktade strömmar mot en möjlig flyktväg. Keltens respons på strålen följdes med hjälp av akustisk telemetri.

3.2 GENOMFÖRANDE

3.2.1 Klarälven och vandrande lax

Klarälven i Värmland är 460 km lång med ett avrinningsområde på 11 850 km² och en medelvattenföring vid mynningen på 162,5 m³/s. Laxpopulationen som finns i Klarälven är en av de få kvarvarande sötvattenslevande populationerna av atlantlax i Europa, och den vandrar mellan älven och Vänern (Hutchings et al. 2019). Populationen har minskat kraftigt till följd av industriell verksamhet, timmerflottning, fiske och utbyggnad av vattenkraft (Piccolo et al., 2011).

Laxen är beroende av ett ”trap and transport”-system som infördes på 1930-talet och som i dag förvaltas av vattenkraftbolaget Fortum. Lekområdena är belägna i den norra delen av älven, inom en cirka 140 km lång fritt strömmande sträcka uppströms vår studieplats, Edsforsen. Eftersom det saknas fungerande fiskvägar för uppströmspassage fångas lekvandrande fisk vid den nedersta dammen i Forshaga och transporteras 88 km uppströms förbi åtta vattenkraftverk. De släpps därefter ut på en plats cirka 20 km uppströms Edsforsen (Nyqvist et al. 2015). Under 2024 – året för vår studie – transporterades endast 287 vuxna laxar uppströms (samt 139 öringar, *Salmo trutta*). Baserat på tidigare arbete av Nyqvist et al. (2015) förväntas cirka 49 % av laxarna överleva leken och därefter påbörja nedströmsvandringen.

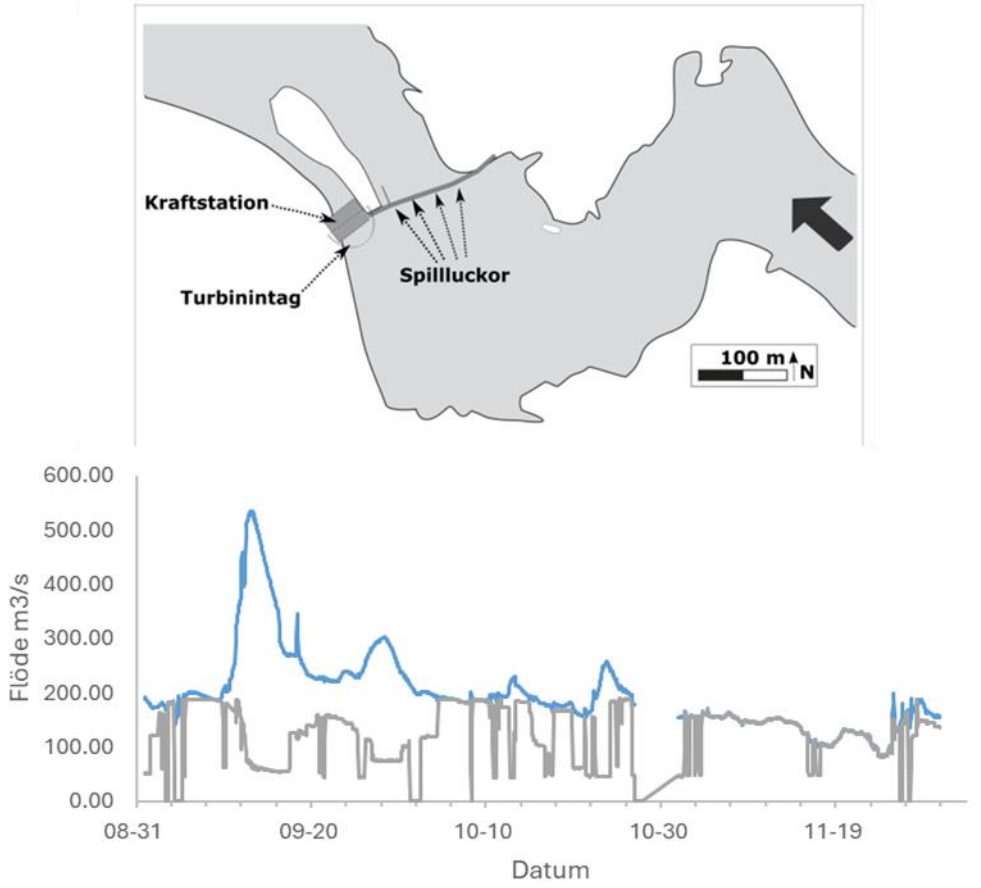
Under nedströmsvandringen mot Vänern måste laxen passera åtta vattenkraftsdammar, vilket medför hög dödlighet för både smolt och kelt. I en studie överlevde endast en av 128 kelt passagen förbi samtliga dammar efter lek (sammanställt för kelt märkta under tre år; Vänerlaxens Fria Gång, 2015). Smoltöverlevnaden har uppskattats till 16 % i en studie och 32 % i en annan (Norrgård et al. 2012; Norrgård et al. 2024).

Edsforsen är den första vattenkraftsdammen som nedströmsvandrande fisk möter. Tidigare studier har undersökt eller föreslagit olika åtgärder, däribland lösningar som nedströms trap-and-transport, där kelten skulle kunna fångas vid Edsforsen

(Greenberg et al. 2015). I denna studie testade vi en strategi att styra kelten mot en flottningslucka med hjälp av en inducerad ström. Detta skulle kunna kombineras med en fällbaserad lösning, även om någon sådan fälla inte fanns på plats under vårt försök.

3.2.2 Hydrauliska förhållanden vid Edsforsen

Vid vattenkraftdammen Edsforsen passerar merparten av vattnet genom turbinintagen (Figur 1a), och stora laxar (kelt) observeras ofta nära intagsgallren, nära ytan. Radiotelemetridata visar också att enskilda fiskar kan närma sig turbinintaget mellan 1 och 17 gånger innan de beslutar sig för att passera genom turbinerna (Greenberg et al. 2015). För att komma vidare nedströms måste fisken passera genom två turbinintag eller genom någon av de sex spilluckor beroende på vilka som är öppna och hur mycket vatten som spills (Fig.1, Greenberg et al 2015). Den första lucka till höger om turbinintagen är en yttappad flottningslucka, vilken bedöms som lämplig för fisken att passera igenom. Luckan har varit öppen under perioder men relativt få fiskar passerar denna väg enligt Greenberg et al (2015). Även de andra luckorna bedöms som goda passager.



Figur 1 a). Karta över området kring Edsforsen kraftverk i Klarälven, som visar turbinintag (2 st.) och spilluckor (6 st.). Bild från figur 6 i Greenberg et al 2015. b) Vattenflöde vid Edsforsen under september-november 2024, totalt flöde (turbiner + spill) i blått och turbiner i grått. Preliminära data från Fortum.

3.2.3 Pump och styrande vattenflöde

Vi ville undersöka om en stråle skapad av en nedsänkt pump kunde styra kelten mot flottningsluckans utlopp (spilluckan längst till vänster i Figur 1a, se även Figur 3). En högkapacitetspump från Xylem (Figur 2), som genererade en strömningsstråle (2 m/s) med ett utflöde på 8–9 m³/s, installerades längs strandkanten (Figur 3), cirka 50 m uppströms vattenkraftstationen. Den resulterande plymen bildade en sammanhållen stråle med hög rörelsemängd som sträckte sig tvärgående över älven i riktning mot flottningsluckan (Figur 3, cirka 45 m).

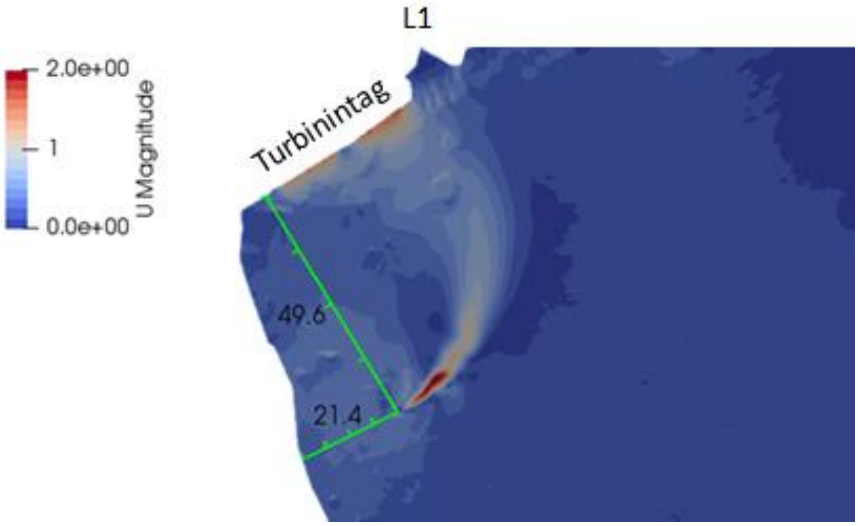


Figur 2. Pumpen och dess konstruktion sedd från utflödessidan (en bild av intagssidan med skyddsgaller finns i Appendix. B). Foto: Velizara Stoilova.

Pumpen kördes intermittent, det vill säga slogs av och på varannan timme, vilket skapade perioder med förändrat flöde och kontrollperioder utan påverkan från pumpen. Detta gjorde det möjligt att utvärdera beteenderesponser på flödesinjektionen. Det tog en viss tid för flödet att stabiliseras efter att pumpen slagits på respektive av. Pumpschemat startade den 17 september och pågick till den 27 november, vilket motsvarar höstens vandringsperiod för kelt. Enligt Nyqvist et al. (2015) inträffar denna period från oktober till början av december (10 oktober–2 december 2011 och 2–24 november 2012). Kelt vandrar även nedströms under våren (Nyqvist et al. 2015).

Pumpen monterades på en förstärkt plattform som förankrades vid strandkanten, med en ram av rostfritt stål för att säkerställa stabilitet vid varierande vattenföring. Pumpen placerades cirka 1,5 meter under vattenytan vid normala flödesförhållanden. Pumpintaget täcktes av ett nät och placerades i en strömkant med låg strömhastighet för att förhindra att skräp sögs in och för att upprätthålla ett jämnt sug. Se Appendix A för ytterligare specifikationer om pumpen.

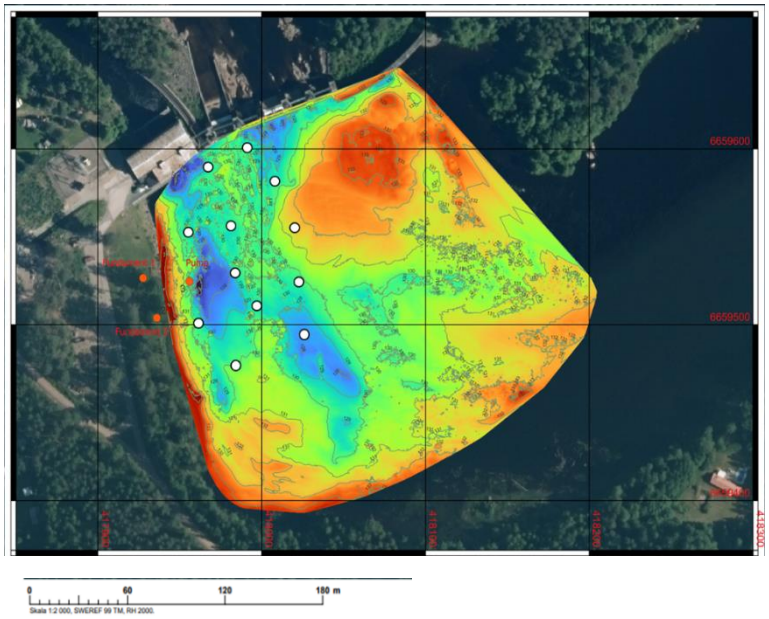
Predikterad förändring av flödet: Vi genomförde hydraulisk modellering för att förutsäga hur strömningsmönstret skulle förändras när Xylem-pumpen var i drift (Figur 3). Exemplet i figuren representerar ett scenario med en vattenföring på 150 m^3/s. I detta fall hade pumpen en tydlig effekt och strålen nådde fram till den första flottningsluckan (Figur 3: L1). Vattenföringen i älven varierar naturligt över tid, och vid högre flöden var pumpens effekt mindre, med en kortare räckvidd för strålen (ej visat). Vid lägre flöden kunde strålen däremot potentiellt styra kelt förbi den första flottningsluckan. Vattenstrålen riktades så att den tydligt avvek från medelströmmen under varierande ström- och djupförhållanden.



Figur 3. Strömningsmönster med pumpen aktiverad, baserat på hydraulisk modellering av Eric Lillberger vid Vattenfall R&D, motsvarande en vattenföring på 150 m³/s och ett vattendjup vid intaget på cirka 7 m (134,9 m ö.h.). Pumpens placering i modellen var 49 m från strandkanten, 1 m under ytan, 2,5 m ovanför botten, riktad 5° uppåt och ungefär vinkelrätt mot huvudströmmen.

3.2.4 Akustisk telemetri

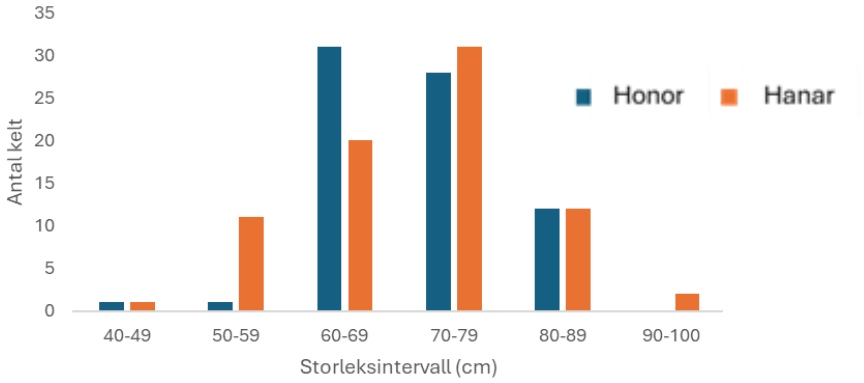
Tolv högupplösta (HR) akustiska mottagare (Innovasea, HR2 High Residency Acoustic Receivers, 180 kHz) installerades runt pumpområdet (5 september 2024) för att fastställa den exakta positionen för passerande kelt (Figur 4). Därutöver placerades lågupplösta mottagare uppströms och nedströms området för att registrera närvaro och lyckad passage (Greenberg et al. 2025). HR-mottagarna togs upp den 26 november 2024 och data laddades ner.



Figur 4. Batymetrisk karta över studieområdet vid Edsforsen där positionerna för de akustiska mottagarna markeras med vita punkter. Pumpens placering och tillhörande fundamentkonstruktioner markeras med röda punkter.

3.3 MÄRKNING AV LAXKELT

Uppströmsvandrande lekfisk (n = 150, TL = 70,71 cm ± 8,85 cm, Figur 5) fångades i fällan vid den första vattenkraftstationen i Klarälven, Forshaga. Fisken mättes och märktes med akustiska sändare (Innovasea, modell V9-180 kHz) som fungerar med både högupplösta mottagare (vilket ger högupplöst data) och lågupplösta mottagare, mellan den 23 augusti och 2 oktober 2024. Fisken sövdes antingen med MS-222 i en koncentration av 70 mg/L eller med bensokain i bad (25 mg/L) för full anestesi. Ett cirka 1,5 cm långt snitt gjordes på fiskens buksida, och efter att den akustiska sändaren förts in slöts såret med två stygn (Figur 6). Efter märkning hölls laxarna i en stor betongbassäng vid kraftstationen tills de transporterades med lastbil cirka 20 km uppströms Edsforsen. Vanligtvis transporterades fisken uppströms två gånger per vecka.



Figur 5. Antal märkt kelt och deras storleks- och könsfördelning.



Figur 6. Märkning av kelt. Foton från Velizara Stoilova.

3.3.1 Data och analys av bäring

Efter att uppenbart felaktiga positioner (t.ex. registreringar på land) tagits bort filtrerades spåren för de individuellt märkta fiskarna ytterligare med hjälp av maximalt tillåten simhastighet och svängvinklar enligt Freitas et al. (2008), modifierat av Leander et al. (2020).

Fiskens bäring beskriver den riktning fisken rör sig i, och medelvärden av bäringar jämfördes före och efter att varje individ passerat in i pumpområdet. Dessa stegvisa bäringar mellan på varandra följande registreringar beräknades med hjälp av paketet geosphere (Hijmans, 2024) (funktion: bearing) i statistikprogrammet R (R Core Team, 2025). Positioner för varje individ valdes ut genom att extrahera positioner fem minuter före tidpunkten för första inträdet i området som var påverkat av pumpen och fem minuter efter, eller fram till dess att fisken nådde dammen (Tabell 1).

3.3.2 Beteendemarkörer

För att ytterligare utvärdera om enskilda fiskar reagerade på strömmen som skapades av pumpen granskades spåren visuellt för förändringar i beteende när fisken för första gången gick in i området som var påverkat av pumpen (polygonen). Sex av författarna bedömde fiskarna var för sig utan att veta om pumpen var på eller av vid tidpunkten då fisken passerade området. Varje spår bedömdes utifrån fyra beteendeindikatorer:

1. Riktningsförändring (Orientational change): En tydlig förändring i simriktning vid eller strax efter inträdet i området definierat av polygonen (måste ske inne i polygonen, inte efter/utanför). Förändringen i simriktning ska vara i ”rätt riktning”, det vill säga inte mot strandkanten, och fisken ska fortfarande röra sig nedströms.

2. Minskad riktningsvariation (Turning reduction): Rörelserna blir rakare och mindre varierande vid inträde i området som påverkas av strömmen (polygonen).

3. Riktningskonsolidering (Directional consolidation): Fortsatt rörelse i en konsekvent nedströms riktning över flera efterföljande positioner inom eller längs polygonens område.

4. Nedströms utträde (Downstream exit): Utträde från området i nedströms riktning. Kelt behöver inte lämna området vid strömningsplymens slut; utträde i sidled är godtagbart (så länge rörelsen inte är ”mer uppströms än nedströms”).

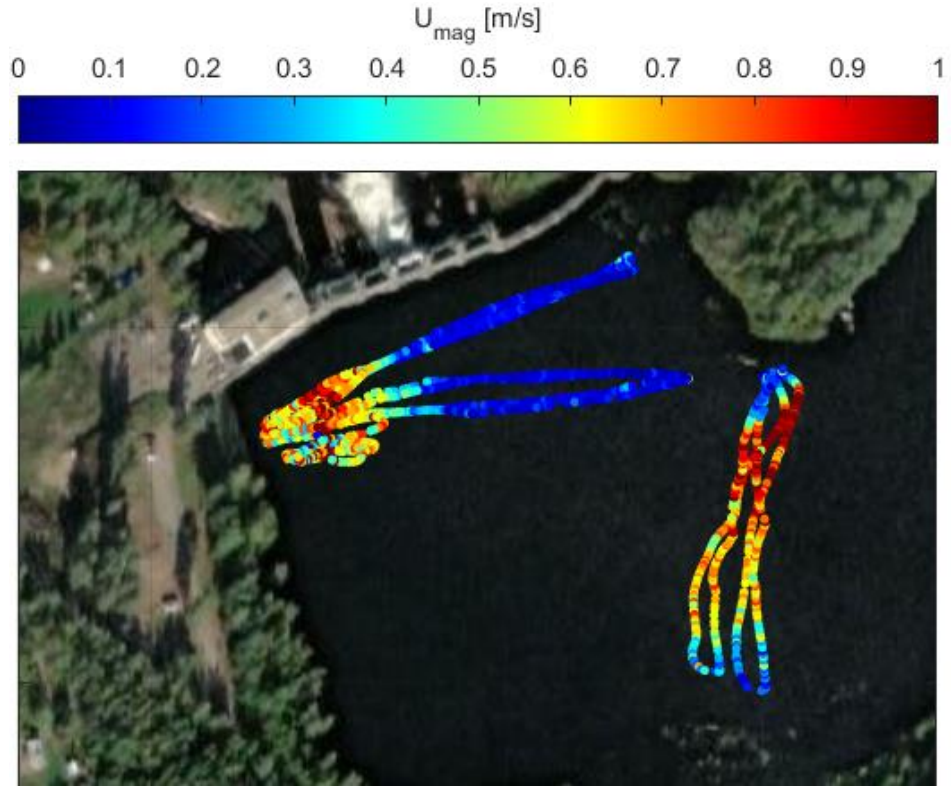
Tillsammans beskriver dessa indikatorer en övergång från oregelbundna eller utforskande rörelser till en mer riktad nedströms rörelse. Liknande indikatorer har använts för att identifiera beteenderesponser på flödesignaler i andra studier (Gurarie et al., 2009, 2017; Liu et al., 2015; Nathan et al., 2008).

De fyra beteendekomponenterna bedömdes separat och tilldelades poängen 1 (ja) eller 0 (nej). Om summan av de fyra poängen var 3 eller högre ansågs fisken ha förändrat sin rörelseriktning i enlighet med en effekt av pumpen och strömstrålen. Sex separata statistiska test (Fishers exakta test, ett per person) användes för att testa behandlingseffekter (dvs jämföra proportioner mellan behandlingar). Varje

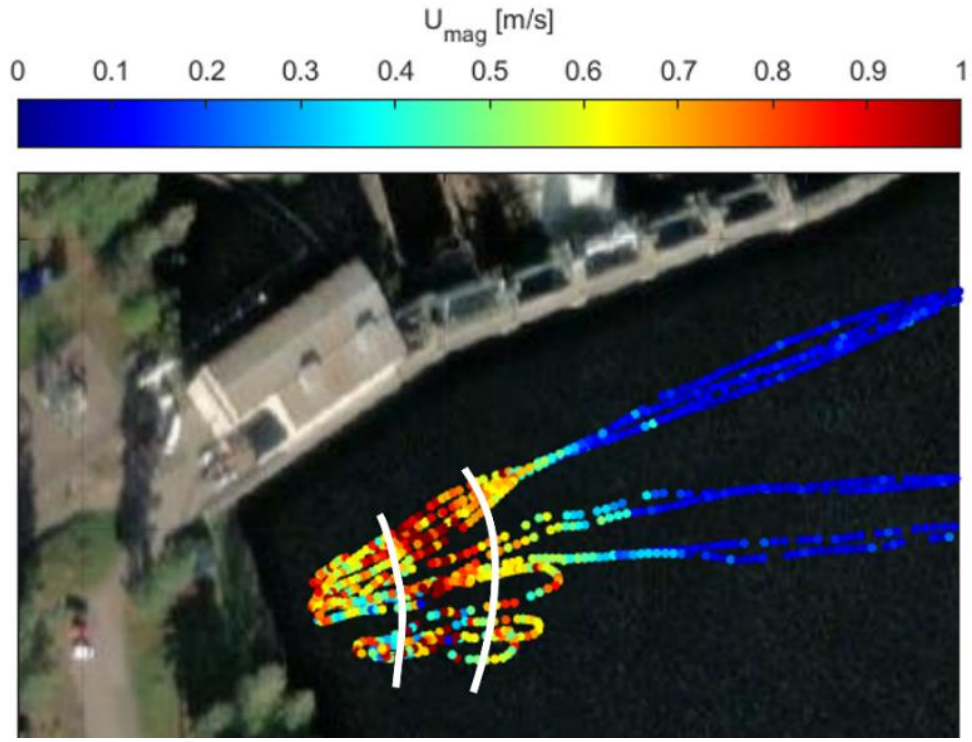
person bedömde de olika kriterierna (1-4) med ja eller nej för varje fisk (detaljerad information finns i Appendix E).

3.3.3 Fältmätningar av strömningsförhållanden

För att validera pumpens och den numeriska strömningsmodellens funktion utfördes fältmätningar av strömningsförhållandena vid ett typiskt produktionsflöde. Mätningarna utfördes med en Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) av modellen RiverPro, monterad på en radiostyrd USV av typen Zboat 1800; båda utvecklade av Teledyne Marine Inc. Flödeshastigheter uppmättes i flera tvärsektioner inom studieområdet för att möjliggöra en direkt jämförelse med hydrauliska modeller (Fig. 3) vid motsvarande flödesförhållanden. Syftet var att säkerställa att CFD-modellen korrekt återger de hydrauliska förhållandena i området, i linje med metodik beskriven av Andersson och Lycksam (2022). Tvärsektioner uppströms och nedströms pumpen kombinerades med en mer detaljerad mätning nära pumpen för att få ett omfattande dataset av uppmätta hastigheter inom området som beskrivs av CFD-modellen (Figur 7). ADCP:n behövde hållas på ett säkert avstånd från både pumpen och vattenkraftintaget, vilket gjorde att viss hastighetsinformation inte kunde registreras. Mätningarna genomfördes den 9 oktober 2024, mellan cirka 09:00 och 11:00 på förmiddagen. Under mättillfället var vattenföringen ungefär 92 m³/s genom den ena turbinen och 93 m³/s genom den andra, medan inget vatten passerade genom några av spilluckorna. En uppskattning av ytstrålens utbredning kan ses i figur 8.



Figur 7. Absolutbelopp av hastigheter nära vattenytan uppmätta med ADCP nära modellens inlopp, utlopp och nedströms pumpen.



Figur 8. Absolutbelopp av hastigheter nära vattenytan uppmätta med ADCP nedströms pumpen med jetstrålens ungefärliga utbredning markerad i vitt. Mätningar gjorda vid 92 m3/s genom ena turbinen och 93 m3/s genom den andra, och inget spill genom någon av luckorna.

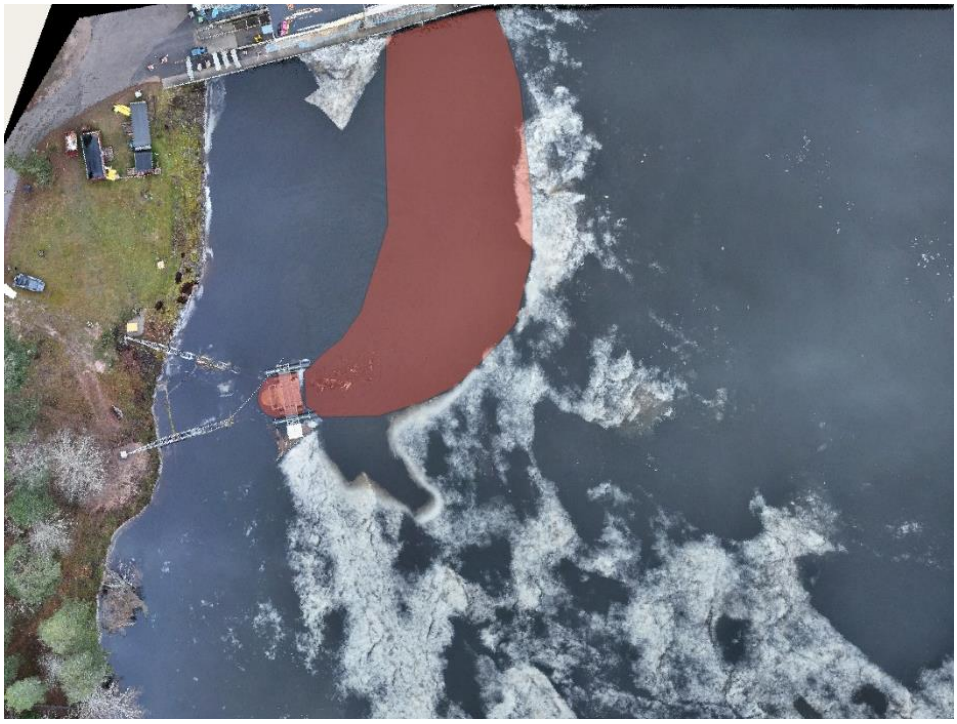
3.4 RESULTAT

3.4.1 Flödesmätningar

Baserat på vår preliminära bedömning – genom att granska figurer och mätningar insamlade under specifika tidsperioder (Figur 3, 7, 8, 9) – uppträdde strömningsplymen som förväntat, med en stråle riktad mot flottningsluckan. De uppmätta strömhastigheterna i området nära pumpen (Figur 7–8) överensstämmer väl med det simulerade strömningsfältet (Figur 3). Detta baseras dock på ögonblicksbilder i tiden. Vi har i denna rapport inte beaktat den fullständiga variationen i vattenföring eller det faktum att olika spilluckor var öppna vid olika tillfällen.

3.4.2 Effekt av pumpstrålen på keltens rörelser

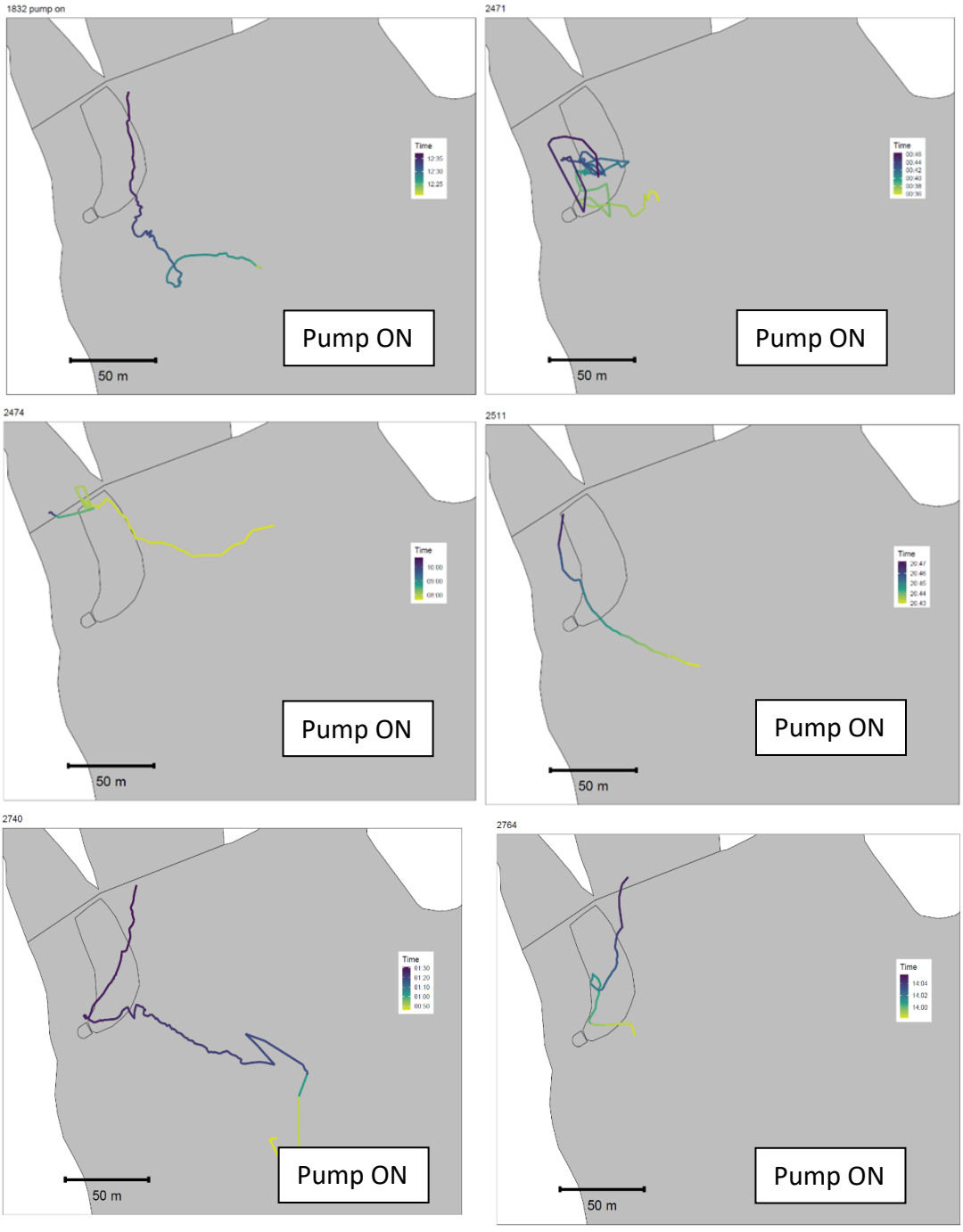
Av totalt 150 märkta laxar nådde 38 Edsforsens vattenkraftverk och 20 gick in i det specifika område som påverkades av pumpen under studieperioden 5 september till 26 november 2024. Pumpens effekt analyserades genom att jämföra rörelsetrajektorier för dessa 20 individuella kelt vid deras första passage genom området. Polygonens utbredning definierades utifrån strömningsplymen som skapades av pumpen, baserat på fotot i Figur 9. Området justerades inte i förhållande till variationer i flöde vid de olika tidpunkter då fiskarna gick in i området. Den yttre kurvans längd i polygonen var 90 m och arean cirka 1 400 m².



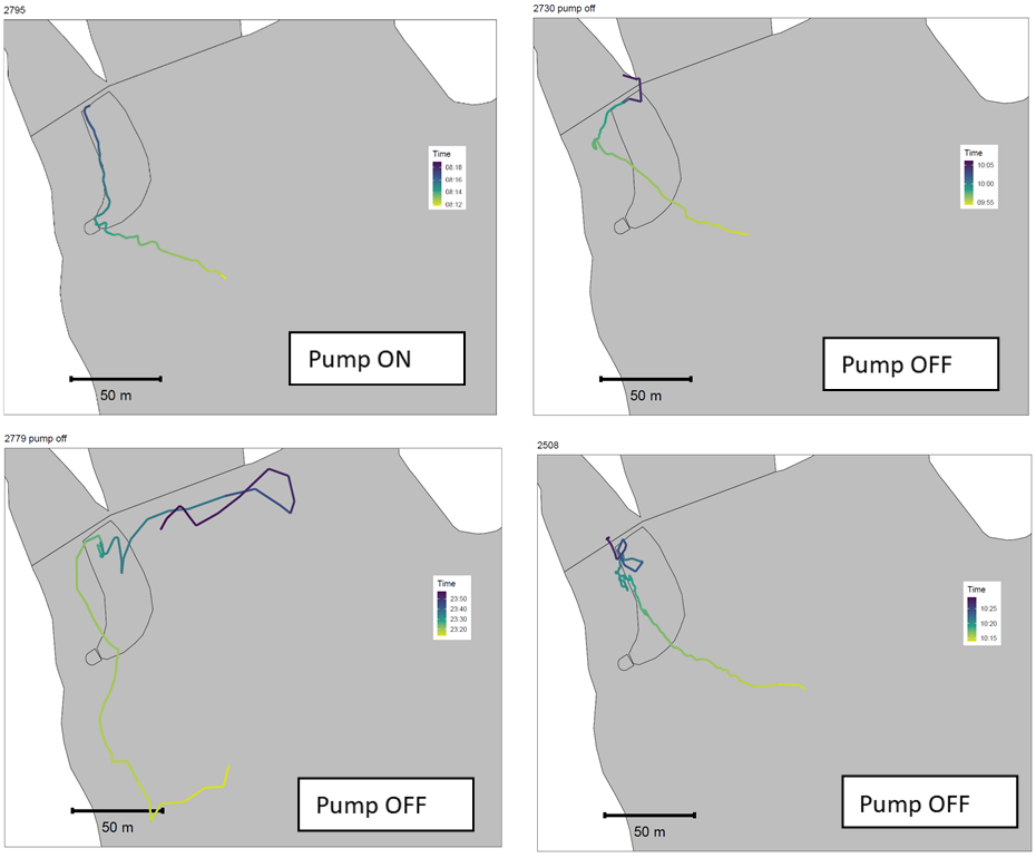
Figur 9. Det område som påverkades av pumpen – definierat av en polygon och baserat på detta foto.

De sju fiskar som gick in i området när pumpen var påslagen inkluderades i analysen som behandlingsfisk. De 13 individer som gick in i samma område när pumpen var avstängd betraktades som kontrollfisk. Behandlingsgruppen inkluderade två fiskar (ind. 2474, 2764) som upplevde en förändring i behandlingsförhållandet, det vill säga att pumpen stängdes av under den valda 10-minutersperioden. Dessa fiskar behölls i behandlingsgruppen, eftersom de exponerades för behandlingen, även om pumpen inte var påslagen under hela 10-minutersintervallet. Det bör också noteras att det tog en viss tid för strömningen att avta efter att pumpen stängts av.

Spår som visar positionerna (vid den första passagen genom pumpområdet) visas för samtliga behandlingsindivider när pumpen var på (sju fiskar) samt för tre kontrollfiskar i Figur 10. Dessa spår är tidsmässigt avgränsade för att visuellt fånga beteendet strax före och efter inträdet i pumpområdet (polygonen). Beroende på antalet positioner och simhastighet varierade den totala tidslängden mellan individer. De återstående tio individernas spår visas i Appendix D.



Figur 10. Fiskspår från tio olika individer med pumpen påslagen (de översta 7) och avstängd (3 nedersta, markerade Pump OFF). Spåren är tidsmässigt avgränsade för att visuellt fånga beteendet strax före och efter inträdet i pumpområdet (polygonen).



Figur 10, forts. Se föregående sida för figurtext.

3.4.3 Resultat från analysen av bäring

Bäringen mellan varje position beräknades och medelvärden räknades ut för perioden före och efter första inträdet i polygonen (Tabell 2). Detta mått representerar den övergripande riktning som varje fisk rörde sig i fem minuter före och fem minuter efter att den gick in i området som påverkades av pumpen (alternativt kortare tid efter inträdet i de fall då spåret förkortats för att kelten nådde fram till dammen). Förändringen i genomsnittlig bäring analyserades med ett Wilcoxon rangsummetest och visade ingen signifikant skillnad mellan behandlingarna (det vill säga ingen skillnad i förändringen i bäring, W = 34, p-värde = 0,39).

Tabell 1. Detaljerad information om de fiskar som passerade pumpområdet, med fisk-ID, antal positioner under de fem minuterna före inträdet, medelbäring före inträdet, antal positioner under de fem minuterna efter inträdet (eller fram till att fisken nådde dammen), medelbäring efter inträdet samt skillnaden i medelbäring före och efter inträdet.

Fisk ID	Behandling	Antal pos. 5 min innan inträde	Medelbäring 5 min innan inträde	Antal pos. 5 min efter inträde	Medelbäring 5 min efter inträde	Skillnad i medelbäring
1832	on	84	-23.56	30	-3.325	20.235
2471	on	11	-87.34	55	23.24	110.58
2474	on	12	-84.92	18	-40.87	44.05
2491	off	11	-57.24	4	-4.063	53.177
2495	off	4	-47.82	2	-27.79	20.03
2506	off	4	-74.93	10	-37	37.93
2508	off	44	-69.084	80	-7.657	61.427
2511	on	21	-62.15	12	-28.952	33.198
2718	off	20	-47.38	7	-85.99	-38.61
2725	off	40	-66.05	24	-15.59	50.46
2730	off	27	-64.971	38	-16.68	48.291
2740	on	83	-27.43	129	-59.02	-31.59
2763	off	25	-78.01	34	-23.94	54.07
2764	on/ close	5	-67.7	48	9.315	77.015
2779	off	17	-23.286	10	-26.6034	-3.3174
2787	off	32	-42.77	20	-57.74	-14.97
2789	off	7	-51.23	7	-45.84	5.39
2790	off	34	-26.344	58	-27.62	-1.276
2793	off	3	-61.33	10	-1.689	59.641
2795	on	39	-66.841	47	-8.201	58.64

3.4.4 Visuellt bedömda beteenderesponser på pumpens strömningsplym

Sex av författarna bedömde fiskspåren. Tre av sex personer gjorde i stort sett samma bedömning, där fem av sju kelt som passerade när pumpen var påslagen ansågs ha svarat på behandlingen (samma fem individer, 71 %), medan ingen av de 13 fiskar som gick in i området när pumpen var avstängd bedömdes som att de reagerade (Tabell E1, Appendix). Denna skillnad i responsfrekvens mellan behandlingarna var signifikant (Fishers exakta test, p = 0,0014, oddskvot oändlig).

Baserat på bedömningen från dessa tre personer skilde sig alltså fiskens beteende mellan perioder när pumpen var i drift och när den inte var det, och majoriteten av behandlingsfiskarna bedömdes som styrda. Bedömningarna från de övriga tre författarna varierade dock mer, och skillnaderna mellan behandlingarna var då inte signifikanta (p = 0,29 / 0,17 / 0,062, oddskvot = 3,8 / 4,1 / 7,3; se Tabell E1 i Appendix för detaljer).

Tre av behandlingsfiskarna (när pumpen var påslagen) bedömdes som styrda i samtliga sex bedömningar (ind. 1832, 2474, 2795), och ytterligare tre behandlingsfiskar bedömdes som styrda av fyra av sex personer (ind. 2740, 2764). Vissa individer som passerade när pumpen var avstängd bedömdes dock som styrda i en del av bedömningarna (Tabell E1, Appendix).

Den behandlingfisk (ind. 2471) som ingen av bedömarna ansåg vara styrd (Figur 10) rörde sig oregelbundet och verkade cirkulera inom området. Den andra individen (ind. 2511, bedömd som styrd av en person) rörde sig tydligt nedströms, men verkade inte reagera förrän den nådde slutet av polygonen (även om flödet också påverkar strömningsplymens form).

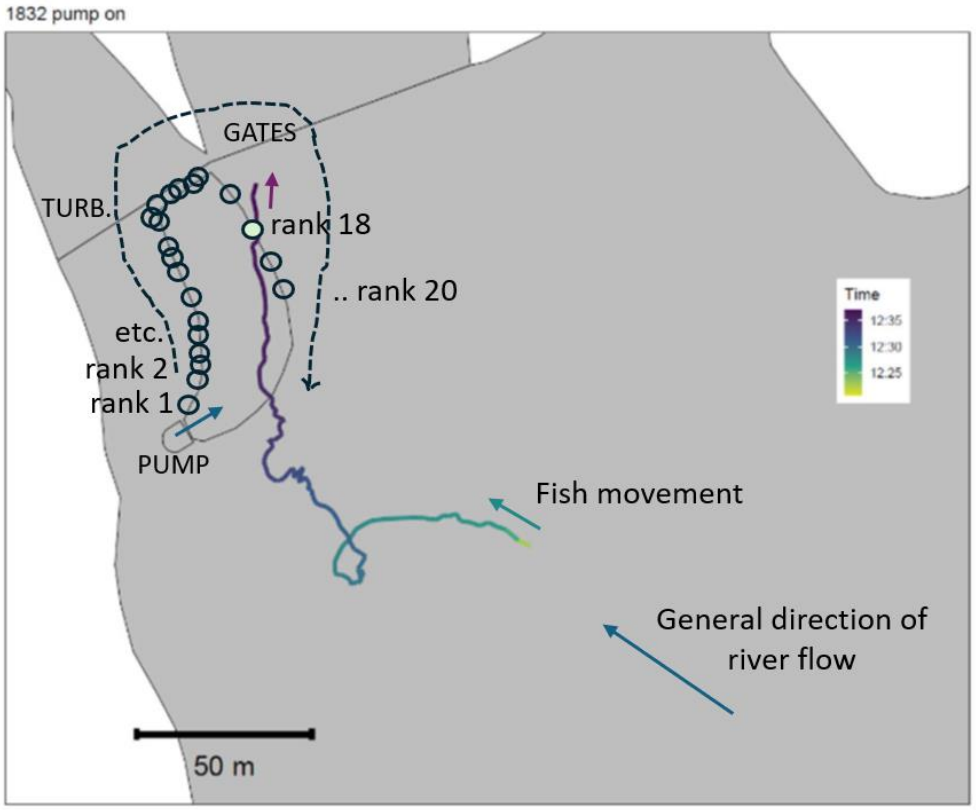
Gällande de fyra beteendeindikatorerna så var riktningsförändring (OC) var ett viktigt och ofta avgörande mått (36 av 120 bedömningar var positiva, Tabell 3, Appendix E). Några av de fiskar som responderade när pumpen var påslagen visade en tydlig förändring i riktning strax efter inträdet i polygonen (Figur 9). Relativt få individer uppvisade minskad riktningsvariation (TR), där simbanan blev rakare och mer konsekvent (22 av 120 bedömningar, Appendix E). De flesta fiskar fortsatte röra sig nedströms efter att ha passerat pumpområdet (Figur 9), och ganska många i en riktning som resulterade i en positiv bedömning av riktningskonsolidering (DC, 58 av 120 bedömningar som ”ja”). En majoritet av fiskarna lämnade området i nedströms riktning (DE, 82 av 120 bedömningar).

Tabell 2. Sammanställning av beteenderesponser vid behandlingarna pump på och pump av. Fiskarnas rörelsetrajektorier bedömdes visuellt utifrån fyra beteendeindikatorer: riktningsförändring vid inträde i polygonen (Orientational change, OC), minskad riktningsvariation (Turning reduction, TR), riktningskonsolidering (Directional consolidation, DC) samt nedströms utträde (Downstream exit, DE), av sex olika personer. Värdena anger andelen fiskar som uppvisade respektive indikator under varje behandling (samtliga bedömningar sammanslagna). Fullständiga resultat för varje individ och varje bedömare återfinns i Tabell E2 i Appendix.

Indikator	Pump ON	Pump OFF
Riktningsförändring vid/efter inträde i plymen (OC)	0,64	0,12
Minskad riktningsvariation (TR)	0,37	0,08
Riktningskonsolidering (DC)	0,69	0,37
Nedströms utträde (DE)	0,81	0,63

3.4.5 Analys av position när kelten lämnar polygonen

Vår målsättning var som sagt att styra kelten bort från turbinintagen och mot en timmerränna. Vi analyserar här hur framgångsrik styrningen av kelten var genom att undersöka vid vilken position de lämnar polygonen. För detta använde vi en analys baserad på i vilken ordning fiskarna lämnar polygonens kant och tilldelade varje fisk en rang från 1 till 20 (Fig. 11, Tabell 3). Detta med det bakomliggande antagandet att en högre rang motsvarar en styrning bort från turbinintagen.



Figur 11. Karta över området ovanför Edsforsen med turbinintag (TURB.), timmerränna (GATES), pumpens placering (PUMP) samt den gråmarkerade polygonen. Spåret visar individ nr 1832 och den rang den tilldelades (rang 18, markerad med fylld cirkel). De tomma cirklarna representerar ungefärliga punkter där övriga fiskar lämnar polygonen – detta för att illustrera hur rangerna tilldelades. Den streckade svarta pilen visar rankningen, där rank 1 är den utgångspunkt som ligger närmast pumpen på vänster sida, följt av rank 2 och så vidare längs polygonens kant.

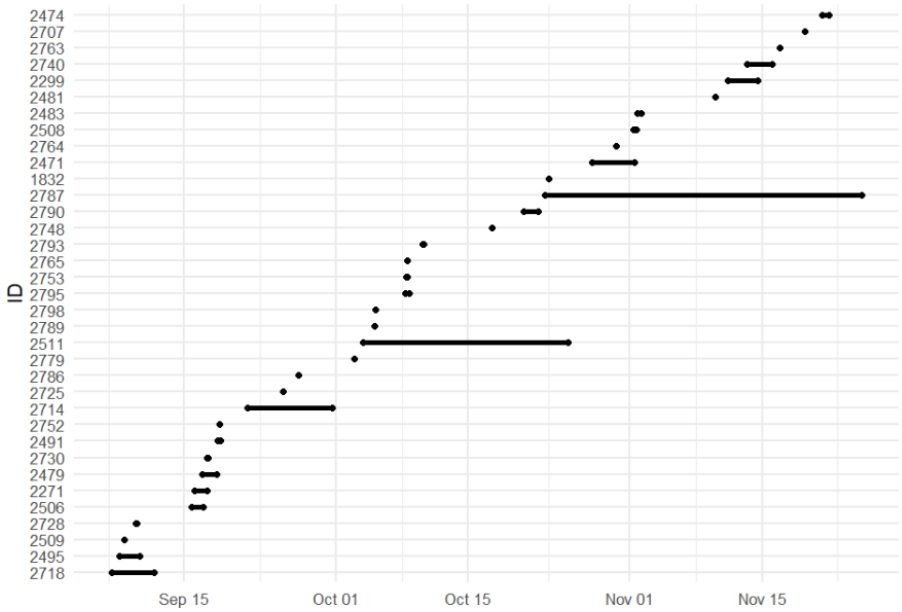
Positionen för fiskar som passerade polygonen när pumpen var påslagen hade högre rank än fiskar som passerade när pumpen var avstängd (Wilcoxons exakta rangsummetest: W = 18, p-värde = 0,0297, Tabell 4). Detta stödjer att det fanns en skillnad i position mellan behandlingarna, och när pumpen var påslagen lämnade fiskarna polygonen längre åt höger längs polygonens kant (se Figur 11), vilket indikerar att pumpen kunde styra kelt bort från turbinintagen.

Tabell 3. Fiskar ordnade efter positionen där de lämnade polygonen (rank), med fisk-ID (ID) och behandling (pump on/off).

rank	ID	pump
1	2725	off
2	2506	off
3	2779	off
4	2495	off
5	2789	off
6	2763	off
7	2511	on
8	2793	off
9	2730	off
10	2471	on
11	2508	off
12	2787	off
13	2795	on
14	2474	on
15	2790	off
16	2718	off
17	2491	off
18	1832	on
19	2764	on/ close
20	2740	on

3.4.6 Uppehållstid i området

Det förekom stor variation i uppehållstiden för de 35 laxar som gick in i området uppströms Edsforsen som vi kunde detektera med våra mottagare (se Figur 4, 12). Den genomsnittliga uppehållstiden var 61,1 timmar, med en standardavvikelse på 160 timmar, vilket till stor del berodde på två individer med mycket lång



Figur 12. Uppehållstid där de svarta linjerna representerar tiden mellan första och sista registrering i området uppströms Edsforsens vattenkraftverk. Fiskens ID visas på y-axeln, ordnade efter datum för första inträdet i området.

3.5 DISKUSSION

3.5.1 Pump och hydrauliska förhållanden – lyckades vi skapa en stråle?

Våra observationer tyder på att pumpen kunde skapa en ström riktad mot flottningsluckan. Fotografier (Figur 9) visar en sammanhållen, strålliknande ström i den riktningen, och uppmätta hastigheter nära pumpen (Figur 7–8) överensstämde i stort med det simulerade strömningsfältet, som visade en liknande pumpinducerad effekt (Figur 3). Sammantaget visar dessa resultat att pumpen påverkade de lokala hydrauliska förhållandena på avsett sätt, med en förändring flödesriktning och vattenhastighet, vilka vi i planering av projektet bedömde kunde skapa stimuli för fisken. Dessa observationer representerar dock förhållanden vid specifika tidpunkter. Variationer i vattenföring, liksom skillnader i vilka spilluckor som var öppna, har sannolikt påverkat strömmens form och varaktighet. I den följande diskussionen tolkas fiskens beteende i relation till det rumsliga område som definierades vid ett tillfälle (polygonen), samtidigt som vi är medvetna om att hela variationen i hydrauliska förhållanden – och dess möjliga inverkan på pumpens styrande effekt – ännu inte har fångats fullt ut.

3.5.2 Antal försöksfisk

Det relativt låga antalet kelt som detekterades i området uppströms Edsforsen efter lek (38 av 150 märkta individer) överensstämmer med tidigare studier. Överlevnaden efter lek uppskattas till omkring 50 % (Nyqvist et al., 2015), och ungefär hälften av dessa kelt vandrar nedströms under hösten, medan den andra hälften vandrar under våren. Detta ger en förväntad höstvandring på cirka 37–38 individer, vilket stämmer väl överens med det observerade antalet kelt som nådde

vattenkraftverket. Av dessa 38 fiskar var det dock endast 20 som gick in i vårt definierade område (polygonen), och endast dessa kunde ha påverkats av strömmen som genererades av pumpens. Nedan diskuterar vi först den möjliga styrande effekten på de 20 fiskarna och därefter uppehållstiden för samtliga 38 fiskar.

3.5.3 Beteendebaserad respons – lyckades vi styra kelt?

Sammantaget fick vi en blandad bedömning av rörelsemönstren med hjälp av beteendemarkörer, där hälften av utvärderingarna visade signifikanta skillnader mellan behandlingarna och den andra hälften visade liknande tendenser och samstämmighet för flera fiskar, men utan statistiskt signifikanta skillnader. Detta kan vara påverkat av det relativt låga antalet fiskar som var med i studien och att endast 7 individer passerade när pumpen var på. Analysen av bäring visade inga signifikanta behandlingseffekter. Samtidigt visade vår analys av positionerna vid vilken fiskarna lämnar polygonen en skillnad mellan behandlingar som kan tyda på en styrande effekt. Ytterligare analyser och granskning behövs, men här tillåter vi oss att diskutera möjligheten av en verkligt styrande effekt och att fiskens beteende skiljer sig mellan perioder när pumpen var i drift och när den inte var det.

När pumpen var i drift uppvisade vissa fiskar som gick in i området tydliga riktningsförändringar, inklusive tydliga svängar strax efter inträdet och en mer riktad nedströms rörelse. Dessa förändringar i simbeteende är mer förenliga med aktiva responser på lokala hydrauliska signaler än med passiv nedströmsdrift (Gurarie et al., 2009; Nathan et al., 2008). Samtidigt kan vi inte avgöra om dessa förändringar i simbeteende representerar en aktiv responser från fisken på lokala hydrauliska signaler eller om de speglar passiva rörelser där fisken tvingas ändra simriktning av den starka strålströmmen.

Det är känt från andra studier att keltens djupanvändning och simbeteende är varierande och känsligt för hydrauliska förhållanden. Simmons et al. (2024b) studerade laxkelt vid en vattenkraftsdamm och visade att simdjup och simhastighet förändras i relation till strömhastighet, turbulens, tid på dygnet och fiskstorlek, vilket indikerar en betydande plasticitet i beteenden. Tillsammans med belägg för att kelt kan dyka som respons på starka strömmar eller hydrodynamiska störningar (Hedger et al. 2009) så stödjer detta att individer som möter strålen kan anpassa sitt simdjup och sitt simbeteende. Detta stödjer tolkningen att kelt som exponerades för den pumpinducerade strålen responderade på den förändrade hydrauliska miljön genom att modifiera sitt simbeteende.

3.5.4 Individuell variation

Alla fiskar verkade inte reagera på den inducerade plymen. Två individer som passerade området när pumpen var påslagen tycktes inte reagera mer än de fiskar som passerade när pumpen var avstängd. Detta kan spegla naturlig variation i individuellt beteende samt skillnader i hur fiskarna upplevde plymen. Sådan variation är vanlig i studier av djurrörelser och kan försvåra upptäckten av effekter på populationsnivå när enbart riktningsmått används, särskilt vid små stickprov

(Gurarie et al., 2017; Liu et al., 2015). Det är också möjligt att dessa fiskar simmade närmare botten, det vill säga djupare, och därmed påverkades mindre av strömmen från pumpen. Vidare kan responserna även ha påverkats av variationer i miljö- eller driftförhållanden vid tidpunkten för mötet med plymen (se nästa stycke 4.5).

3.5.5 Varierande flödesförhållanden

I vattendrag påverkas styrningseffektiviteten starkt av strömhastigheten (Schwevers & Adams, 2020). Som nämnts ovan beror pumpens påverkan och dess styrande effekt sannolikt på den totala vattenföringen vid tidpunkten. I våra modellprediktioner användes en vattenföring på 150 m^3/s. Under stora delar av studieperioden var den totala vattenföringen högre än detta, och betydande spill förekom under den första delen av studieperioden (Figur 1b).

Eftersom variationer i total vattenföring och spill sannolikt påverkade pumpens effekt planerar vi att genomföra en explicit analys där individuella fiskrörelser kopplas till de hydrauliska förhållandena vid varje passage. Fiskens beteende kommer att relateras till de hydrauliska förhållandena vid tidpunkten, inklusive vattenföring och spilluckornas driftstatus. Dessa empiriska resultat kan därefter jämföras med simulerade rörelsetrajektorier baserade på flödesförhållanden med pumpen på och av.

Här kommer ADCP-mätningar att jämföras med modellprediktioner under olika scenarier för att validera den hydrauliska modellen, och ytterligare simuleringar med varierande vattenföring kommer också att genomföras. Detta kommer att bidra till att skapa realistiska strömningsmönster för de olika scenarierna och passagerna. Ytterligare faktorer såsom dygnsrytm och vattentemperatur kan också beaktas, då Simmons et al. (2024b) fann tydliga dygnsvariationer i vertikal position, där kelt generellt befann sig närmare vattenytan nattetid.

3.5.6 Djup

Pumpen placerades på cirka 1,5 meters djup och riktades svagt uppåt för att skapa en stråle i den övre delen av vattenmassan, där vi förväntade oss att kelt skulle vandra. Tidigare studier visar att vandrande laxkelt oftast registreras inom den översta metern av vattenkolumnen, med tillfälliga kortare dyk till cirka 3 m och mer sällsynta djupare dyk (Hubley et al. 2008). Strålen var därför placerad så att den skar igenom den typiska vandringsdjupzonen. Även om det lokala vattendjupet (5–7 m) möjliggjorde passage under strålen är det osannolikt att individer som simmade djupare helt skulle ha undgått att påverkas av den inducerade strömningen. Den avtagande strömhastigheten med djupet kan dock förklara den uteblivna responsen hos två av fiskarna, om de simmade närmare botten (se Nyqvist et al. 2017 som fann indikationer på att kelt kunde använda djup större än 3 m vid Edsforsen). Framtida studier skulle kunna inkludera sändare som även registrerar simdjup.

3.5.7 Den visuella bedömningsmetoden

I vår analys gav vi lika vikt åt de kriterier som beskrev beteenderesponser. Detta kan dock omprövas, och vi bedömer att riktningsförändring (OC) är ett mycket viktigt mått vid utvärdering av responser på strålflödet. Minskad riktningsvariation är sannolikt inte lika robust och kan i högre grad spegla individuella skillnader i simbeteende redan före mötet med strålen.

Vidare kommer vi att försöka identifiera matematiska motsvarigheter till bedömningskriterierna. I denna studie tillämpade vi tidsmässiga och rumsliga avgränsningar för att exkludera data insamlade när fisken reagerade på själva dammen, eftersom dessa rörelser inte är relevanta för att utvärdera pumpens effekt. Denna avgränsning kan dock behöva förbättras för att bättre kunna urskilja förändringar i bäring och koppla dem till vårt mått på riktningsförändring (OC).

Vi kommer därför att se över hur tidsserier segmenteras och hur bäring beräknas, då den nuvarande metoden kan inkludera för mycket information och därmed dölja tydliga riktningsförändringar som framkom i den visuella analysen. Vidare kan minskad riktningsvariation (TR) exempelvis fångas i variationen i bäring, och riktningskonsolidering (DC) kan återspeglas i en sammanhängande nedströms bäring efter mötet med plymen, medan nedströms utträde (DE) kan avspeglas i bäringen vid utträde ur plym-/polygonområdet.

Slutligen kan instruktionerna för hur kriterierna ska bedömas förbättras genom tydligare tröskelvärden och beslutsregler. Generellt kan en kombination av enkla beteendeindikatorer och riktningsanalyser ge en mer fullständig bild av hur fisk interagerar med konstruerade flödesignaler, och fånga responser som inte är uppenbara enbart genom analys av bäring (Cotel & Webb, 2012; Liao, 2007).

3.5.8 Slutsats om styrning

Sammantaget tyder beteenderesultaten på att strömmen som genererades av pumpen kan påverka fiskens rörelser på lokal skala. Våra beteendebedömningar varierade dock, och endast hälften av dem resulterade i signifikanta behandlingseffekter. Bäringsanalysen visade inga signifikanta skillnader, medan analysen av positionen där fiskarna lämnade polygonen stödde en guidande effekt. Ytterligare granskning av data behövs, liksom utveckling av kvantitativa mått och tydligare definierade protokoll för beteendebedömning. Trots osäkerheterna indikerar resultaten att metoden kan påverka fiskens beteende, även om det nuvarande underlaget är inte tillräckligt för att dra säkra slutsatser om dess effektivitet som avledningsåtgärd.

3.5.9 Uppehållstid och migration

Det relativt låga antalet kelt som gick in i området uppströms Edsforsen efter lek – 38 av 150 märkta individer (25 %) – överensstämmer med tidigare studier och med det faktum att lax även vandrar under våren. Av dessa 38 fiskar var det dock endast 20 som gick in i vårt definierade område (polygonen) och därmed kunde ha påverkats av pumpens stråle (diskuterat ovan). Eftersom spåren generellt höll god kvalitet bedömer vi att de övriga 18 fiskarna inte alls gick in i pumpområdet. Vi kunde inte placera mottagarna så nära dammen som önskat på grund av signalstörningar, men trots detta erhölls goda spår även nära dammen. Vi bedömer därför att fisken inte kan ha rört sig längs dammen i området nära pumpen utan att registreras av våra mottagare.

Uppehållstiden för samtliga registrerade fiskar varierade från momentana registreringar (en enda detektion) till 803 timmar, med ett medelvärde på 61 timmar (±160 timmar) och ett medianvärde på 3,0 timmar. Cirka 42 % av laxarna passerade inom den första timmen efter första registrering. Vi kan därmed konstatera att det förekommer migrationsfördröjning, som för vissa fiskar är betydande, även om sannolikheten att i slutändan nå Vänern ändå är mycket låg.

I anslutning till vår studie placerades ytterligare mottagare uppströms för att följa användningen av lekområden (Greenberg et al. 2025). Detta var särskilt relevant med tanke på de omfattande insatser som Länsstyrelsen i Värmland genomfört under senare år för att restaurera lekhabitat. Ett fåtal mottagare placerades även nedströms för att kunna bedöma överlevnaden förbi efterföljande vattenkraftsdammar. Dessa registreringar visade att av de 39 laxar som registrerades vid Edsforsen (inklusive både fallbacks och uppströmsvandrande lekfisk, registrerade av både hög- och lågupplösta mottagare), detekterades endast fem individer längre nedströms vid Skymnäs, och ingen registrerades vid Forshaga (Greenberg et al. 2025). Detta visar återigen den mycket låga överlevnaden vid passage förbi vattenkraftanläggningarna i Klarälven.

3.5.10 Etiskt tillstånd

Studien genomfördes under etiskt tillstånd 001671, DNR 5.8.18–03390/2019, utfärdat av den regionala djurförsöksetiska nämnden i Göteborg.

3.5.11 Publikation

Arbetet kommer att resultera i en vetenskaplig artikel med preliminär titel: “Guiding downstream migrating kelts in Klarälven: Evaluating flow manipulation using telemetry”.

3.5.12 Tack

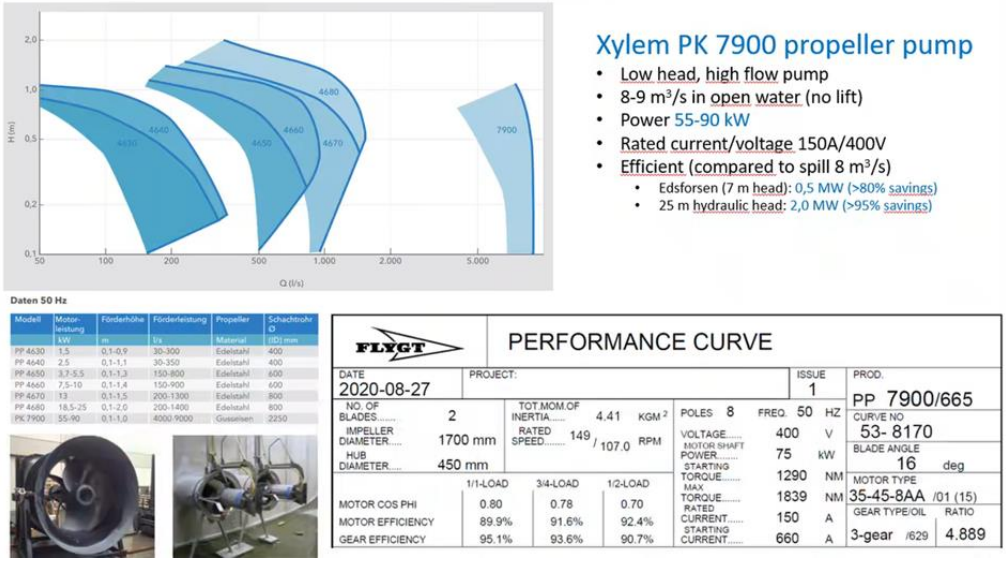
Vi vill rikta tack till Vattenfall R&D som bidrog med betydande insatser till studien genom natura, vilket inkluderar installation av pump, tillhörande kostnader, teknisk utveckling och projektledning. Patrik Andreasson och Gustav Lundqvist var projektledare för Vattenfall, och Gustav Wendin och Eric Lillberg bidrog med värdefulla insatser. Xylem Water Solutions, inklusive Farzad Ferdos, som bidrog med expertkunskap och tillhandahöll pumpen som användes i studien. Fortum,

representerat av Marco Blixt, Hans Bjerhagen med flera, stödde studien genom att ge tillgång till anläggningen samt täcka installations- och driftkostnader för pumpen. Studien medfinansierandes av Energiforsk, genom Vattenkraftens miljöforskningsprogram. Även Länsstyrelsen i Värmland bidrog med finansiering.

Vi vill också rikta ett tack till Johnny Norrgård, Jenny Wanke, Pär Gustafsson och Mattias Epperlein vid Länsstyrelsen i Värmlands län för deras hjälp med fiskmärkningen. Henry Hansen (Karlstads universitet) bidrog också i stor utsträckning till märkningsarbetet.

3.6 APPENDIX DELSTUDIE 3

APPENDIX A: Pumpspecifikationer och bild





Figur A1: Foto av pumpen från intagssidan, med skyddsgaller. Foto: David Aldvén.

Figur B1 (nästa sida): Utsättning av högupplösta akustiska mottagare fästa vid stålpyramider (överst). Efter att pumpen placerats i vattnet användes en båt för att föra pumpen och flotten till den förutbestämda platsen (mitten). Pumpens slutliga position (nederst). Foton: Velizara Stoilova.

APPENDIX B: Foton från installationen av pumpen vid Edsforsen.





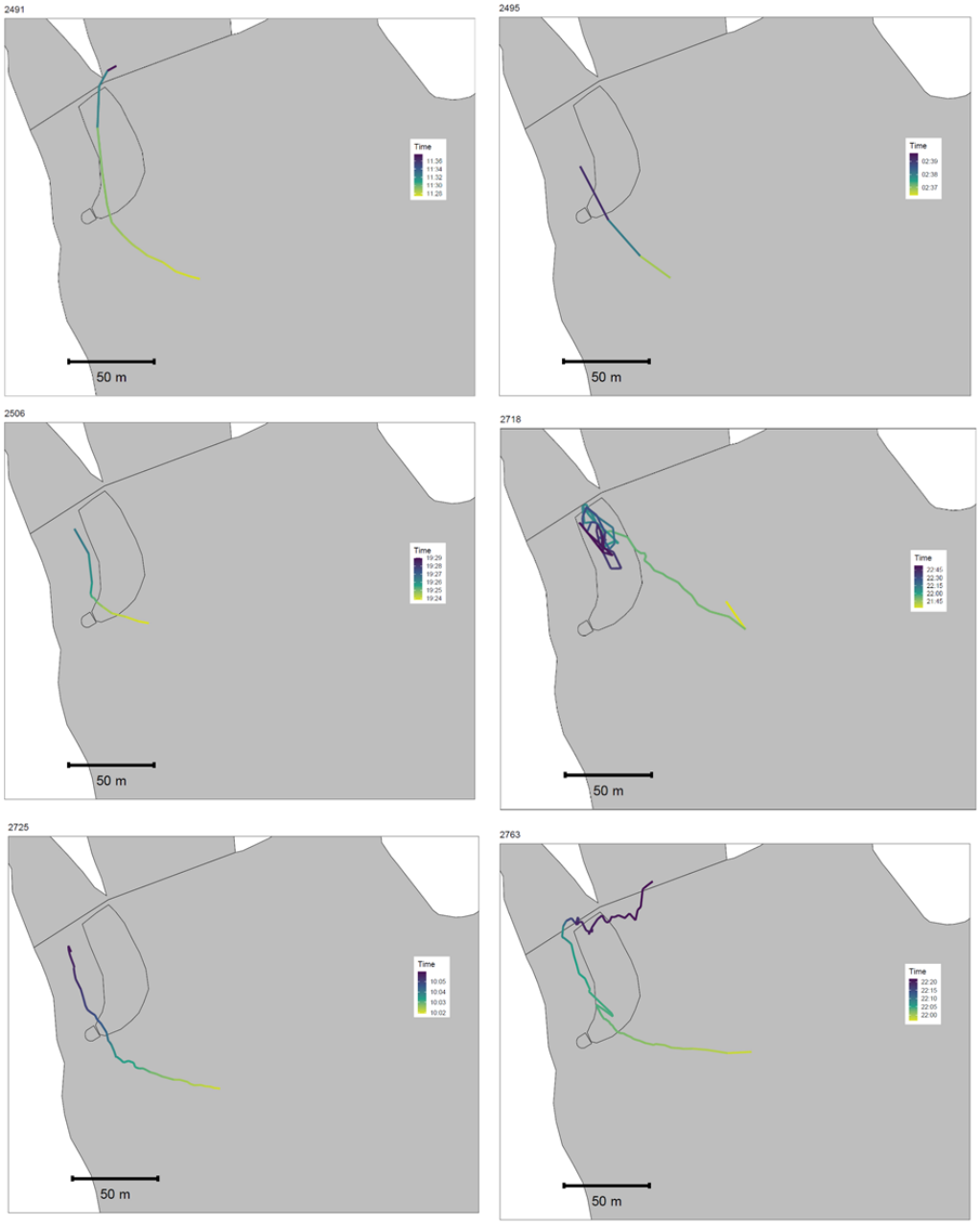


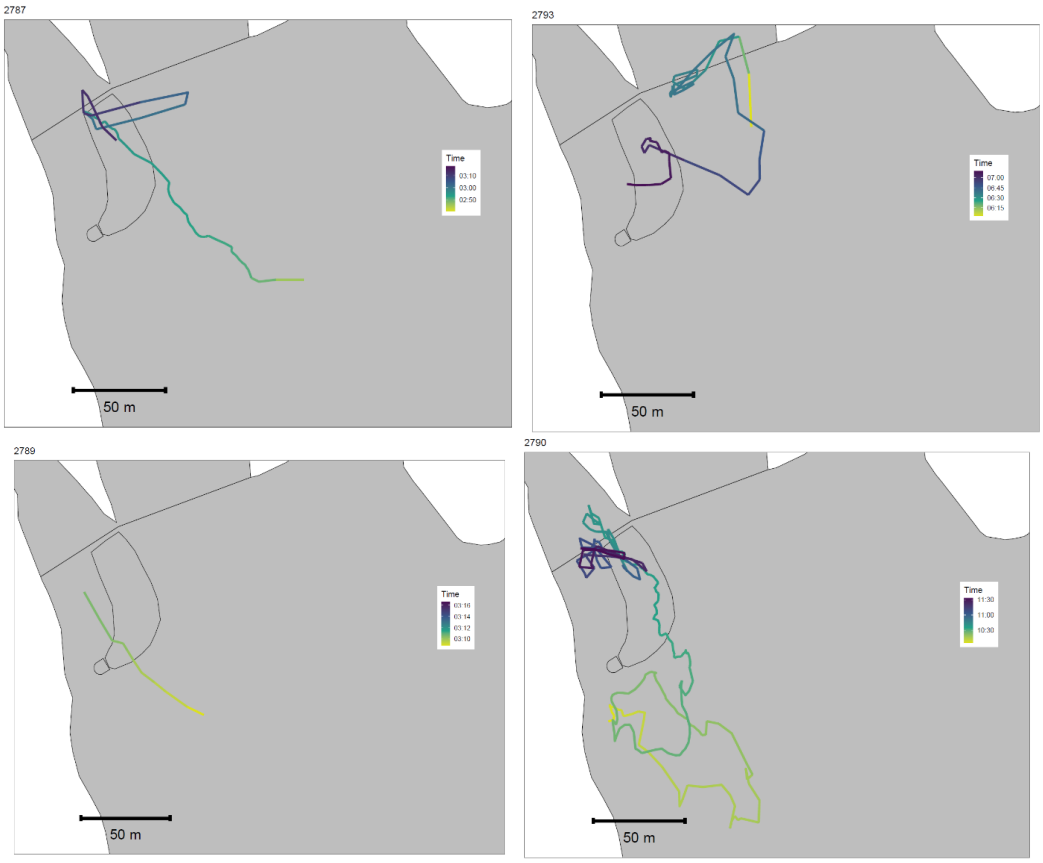
APPENDIX C:

Tabell C1: Vistelsetid med fisk-ID, antal positioner, tidpunkt för första och sista registrering samt tiden mellan första och sista registrering (även kallad passagetid).

ID	# positioner	första	sista	Timmar från första till sista
2509	1	2024-09-08 14:14	2024-09-08 14:14	0
2748	4	2024-10-17 12:36	2024-10-17 12:38	0.03527778
2765	6	2024-10-08 12:35	2024-10-08 12:37	0.03277778
2752	8	2024-09-18 16:58	2024-09-18 17:08	0.16888889
2798	9	2024-10-05 04:40	2024-10-05 04:44	0.05333333
2786	10	2024-09-27 00:10	2024-09-27 00:12	0.02916667
2789	14	2024-10-05 03:08	2024-10-05 03:16	0.12944444
2506	26	2024-09-15 19:23	2024-09-17 00:16	28.8858333
2707	31	2024-11-19 12:44	2024-11-19 12:49	0.09444444
2479	46	2024-09-16 20:26	2024-09-18 09:58	37.5297222
2271	61	2024-09-16 00:54	2024-09-17 09:46	32.8633333
2764	63	2024-10-30 13:58	2024-10-30 14:05	0.12111111
2725	64	2024-09-25 10:01	2024-09-25 10:05	0.06722222
2793	67	2024-10-10 04:49	2024-10-10 07:10	2.33527778
2779	84	2024-10-02 23:13	2024-10-02 23:57	0.72555556
2730	92	2024-09-17 09:54	2024-09-17 10:38	0.74083333
2763	101	2024-11-16 21:56	2024-11-16 22:21	0.42111111
2481	128	2024-11-10 01:02	2024-11-10 01:12	0.16277778
2483	152	2024-11-01 21:00	2024-11-02 05:55	8.91611111
1832	161	2024-10-23 12:20	2024-10-23 12:37	0.27194444
2728	167	2024-09-09 21:17	2024-09-09 23:38	2.35861111
2491	191	2024-09-18 11:27	2024-09-18 18:30	7.05583333
2495	253	2024-09-08 02:36	2024-09-10 06:37	52.0116667
2299	258	2024-11-11 10:00	2024-11-14 13:31	75.5222222
2795	305	2024-10-08 08:11	2024-10-08 17:30	9.30527778
2474	398	2024-11-21 07:40	2024-11-22 02:03	18.3786111
2753	917	2024-10-08 09:45	2024-10-08 12:48	3.03611111
2508	2097	2024-11-01 10:14	2024-11-01 17:28	7.24777778
2740	2771	2024-11-13 11:12	2024-11-16 01:31	62.3041667
2471	4168	2024-10-28 00:35	2024-11-01 12:28	107.881389
2714	5747	2024-09-21 16:40	2024-09-30 14:23	213.704722
2790	8368	2024-10-20 21:30	2024-10-22 08:12	34.6955556
2718	13678	2024-09-07 07:34	2024-09-11 18:16	106.715
2511	55715	2024-10-03 20:43	2024-10-25 13:33	520.833889
2787	117797	2024-10-23 02:40	2024-11-25 12:29	802.82

APPENDIX D – Ytterligare spår från perioder då pumpen var avstängd





Figur D1. Spår för individer som gick in i polygonområdet när pumpen var avstängd. Spåren är tidsmässigt avgränsade för att visuellt fånga beteendet strax före och efter inträdet i pumpområdet. Den visuella bedömningen baserades på dessa figurer.

APPENDIX E – detaljerade resultat från den visuella bedömningen

Table E1. Bedömning av beteende för 20 kelt utförd av 6 av författarna.

ID	pump	JL	KN	VS	LG	GL	GM
1832	ON	1	1	1	1	1	1
2471	ON	0	0	0	0	0	0
2474	ON	1	1	1	1	1	1
2491	OFF	0	0	0	1	1	1
2495	OFF	0	0	0	0	0	0
2506	OFF	0	0	0	0	0	0
2508	OFF	0	0	0	0	0	1
2511	ON	0	0	0	0	1	0
2718	OFF	0	0	0	0	0	0
2725	OFF	0	0	0	0	0	0
2730	OFF	0	0	0	0	0	0
2740	ON	1	1	1	0	0	1
2763	OFF	0	0	0	0	1	0
2764	ON	1	1	1	0	0	1
2779	OFF	0	0	0	0	0	0
2787	OFF	0	0	0	0	0	0
2789	OFF	0	0	0	0	1	0
2790	OFF	0	0	0	1	0	1
2793	OFF	0	0	0	0	0	0
2795	ON	1	1	1	1	1	1
Fishers (p)		0.0014	0.0014	0.0014	0.29	0.17	0.062
Odds ratio		infinite	infinite	infinite	3.8	4.1	7.3

NEDAN: Tabell E2. Fullständiga resultat för varje enskild fisk och varje person som genomförde bedömningen. Översta raden visar initialerna för den person som utförde bedömningen.
OC = Riktningsförändring,
TR = Minskad riktningsvariation,
DC = Riktningskonsolidering (nedströms),
DE = Nedströms utträde,
S = Summa positiva bedömningar,
R = Bedömd som att den svarar (minst 3 beteenden uppfyllda).

Table E2. Full results for each fish individual and each person assessing them. Top row are initials of the person performing the assessment. OC= Orientational change, TR= Turning reduction, DC=Directional consolidation (downstream), DE= Downstream exit, S=Sum of positive assessments, R=Considered responsive (at least 3 behaviours present)

			VS	VS	VS	VS	VS	VS	JL	JL	JL	JL	JL	JL	KN	KN	KN	KN	KN	KN	LG	LG	LG	LG	LG	LG	GM	GM	GM	GM	GM	GM	GL	GL	GL	GL	GL	GL
Pump	Date	ID	OC	TR	DC	DE	S	R	OC	TR	DC	DE	S	R	OC	TR	DC	DE	S	R	OC	TR	DC	DE	S	R	OC	TR	DC	DE	S	R	OC	TR	DC	DE	S	R
ON	23.10.2024	1832	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	4	1
ON	28.10.2024	2471	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ON	21.11.2024	2474	1	1	1	1	4	1	1	0	1	1	3	1	1	0	1	1	3	1	1	0	1	1	3	1	1	0	1	1	3	1	1	0	1	1	3	1
OFF	18.09.2024	2491	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	2	0	0	0	1	1	2	0	1	0	1	1	3	1	1	0	1	1	3	1	1	0	1	1	3	1
OFF	08.09.2024	2495	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	2	0
OFF	15.09.2024	2506	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	1	1	2	0
OFF	01.11.2024	2508	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	1	1	2	0	0	0	1	1	2	0	1	0	1	1	3	1	0	0	1	0	1	0
ON	03.10.2024	2511	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1?	1	1	0	1	0	1	1	3	1
OFF	07.09.2024	2718	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
OFF	25.09.2024	2725	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	2	0
OFF	17.09.2024	2730	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	2	0
ON	16.11.2024	2740	1	1	1	1	4	1	1	0	1	1	3	1	1	1	1	1	4	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	4	1	0	0	1	1	2	0
OFF	16.11.2024	2763	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	3	1
ON	30.10.2024	2764	1	1	1	1	4	1	1	0	1	1	3	1	1	0	1	1	3	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	3	1	0	0	1	1	2	0
OFF	02.10.2024	2779	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	1	0	1	0
OFF	23.10.2024	2787	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0.5	1	1	2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
OFF	05.10.2024	2789	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	4	1
OFF	21.10.2024	2790	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	1	1	2	0	1	1	1	1	4	1	0	1	1	1	3	1	1	0	1	0	2	0
OFF	10.10.2024	2793	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ON	08.10.2024	2795	1	1	1	1	4	1	1	0	1	1	3	1	1	1	1	1	4	1	1	0.5	1	1	3.5	1	1	0	1	1	3	1	1	1	1	1	4	1

4 Referenslista

Agostinelli, C. & Lund, U. (2025). circular: Circular statistics. R package version 0.5-2. https://CRAN.R-project.org/package=circular

Aleyasin, S. S., Kumahor, S., Tachie, M. F., Katopodis, C., & Ghamry, H. (2025). Effects of ramp width variation on the hydraulic conditions of spillway that affect downstream migrating fish. Scientific Reports, 15, 9302.

Andersson, A. G., & Lycksam, H. (2022). Hydraulic Modelling of a Regulated River Reach on Different Scales to Evaluate its Inherent Environmental Conditions. In 39th IAHR World Congress, Granada, Spain, June 19-24, 2022 (pp. 4189-4195). International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR).

Arnekleiv, J. V., Kraabøl, M., & Museth, J. (2007). Efforts to aid downstream migrating brown trout (Salmo trutta L.) kelts and smolts passing a hydroelectric dam and a spillway. Hydrobiologia, 582, 5–15.

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 reduced survival? Sustainability, 12, 7341.

Beck, C., Albayrak, I., Meister, J., Peter, A., Selz, O. M., Leuch, C., Vetsch, D. F., & Boes, R.

M. (2020). Swimming behavior of downstream moving fish at innovative curved-bar rack bypass systems for fish protection at water intakes. Water, 12, 3244.

Ben Jebria, N., Carmigniani, R., Drouineau, H., De Oliveira, E., Tétard, S., & Capra, H. (2023). Coupling 3D hydraulic simulation and fish telemetry data to characterise the behaviour of migrating smolts approaching a bypass. Journal of Ecohydraulics, 8, 144–157.

Bendall, B., Moore, A., & Quayle, V. (2005). The post-spawning movements of migratory brown trout Salmo trutta L. Journal of Fish Biology, 67, 809–822.

Cotel, A. J., & Webb, P. W. (2012). The challenge of understanding and quantifying fish responses to turbulence-dominated physical environments. In Natural locomotion in fluids and on surfaces.

Coutant, C. C. (2001). Turbulent attraction flows for guiding juvenile salmonids at dams. American Fisheries Society Symposium, 57–77.

Coutant, C. C., & Whitney, R. R. (2000). Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines: A review. Transactions of the American Fisheries Society, 129, 351–380.

Darland, T. J., Evans, S., Rondorf, D., Rutz, G. L., Feil, D. H., & Adams, N. (2001). Test of concept to improve fish guidance using induced water currents at Cowlitz Falls Dam.

Elings, J., Mawer, R., Bruneel, S., Pauwels, I. S., Pickholtz, E., Pickholtz, R., Coeck, J., Schneider, M., & Goethals, P. (2023). Linking fine-scale behaviour to the hydraulic environment shows behavioural responses in riverine fish. Movement Ecology, 11, 50.

Enders, E. C., Gessel, M. H., Anderson, J. J., & Williams, J. G. (2009). Effects of decelerating and accelerating flows on juvenile salmonid behaviour. Transactions of the American Fisheries Society, 138, 357–364.

Friard, O., & Gamba, M. (2016). BORIS: A free, versatile open-source event-logging software for video/audio coding and live observations. Methods in Ecology and Evolution, 7, 1325–1330.

Goodwin, R. A., Politano, M., Garvin, J. W., Nestler, J. M., Hay, D., Anderson, J. J., Weber,

L. J., Dimperio, E., Smith, D. L., & Timko, M. (2014). Fish navigation of large dams emerges from their modulation of flow field experience. PNAS, 111, 5277–5282.

Greenberg, L, Nyqvist, D, Bergman, E Calles, O. (2015) Förbättrad nedströmspassage för vild lax i Klarälven. Rapport från Karlstad Universitet.

Greeenberg, L, Velizara Stoilova, Karin Nilsson, Johan Leander (2025) Akustisk telemetristudie av lekfiskar i Klarälven 2024-2025 Rapport från Karlstad Universitet till Länsstyrelsen Värmland.

Gurarie, E., Andrews, R. D., & Laidre, K. L. (2009). A novel method for identifying behavioural changes in animal movement data. Ecology Letters, 12, 395–408.

Gurarie, E., Fleming, C. H., Fagan, W. F., Laidre, K. L., Calabrese, J. M., Hernández-Pliego, J., & Ovaskainen, O. (2017). Correlated velocity models as a fundamental unit of animal movement. Movement Ecology, 5, 13.

Halttunen, E. (2011). Staying alive: The survival and importance of Atlantic salmon post-spawners. Doctoral dissertation.

Hedger, R. D., Hatin, D., Dodson, J. J., Martin, F., Fournier, D., Caron, F., & Whoriskey, F. G. (2009). Migration and swimming depth of Atlantic salmon kelts. Marine Ecology Progress Series, 392, 179–192.

Hijmans, R. (2024). geosphere: Spherical trigonometry. R package version 1.5-20.

Hubley, P. B., Amiro, P. G., Gibson, A. J. F., Lacroix, G. L., & Redden, A. M. (2008). Survival and behaviour of migrating Atlantic salmon kelts. ICES Journal of Marine Science, 65, 1626–1634.

Hutchings, J. A., Ardren, W. R., Barlaup, B. T., Bergman, E., Clarke, K. D., Greenberg, L. A., Lake, C., Piironen, J., Sirois, P., Sundt-Hansen, L. E., & Fraser, D. J. (2019). Life-history variability and conservation status of landlocked Atlantic salmon. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 76, 1697–1708.

Kerr, J. R., Manes, C., & Kemp, P. S. (2016). Assessing hydrodynamic space use of brown trout. Journal of Experimental Biology, 219, 3480–3491.

Kristensen, M. L., Righton, D., Del Villar-Guerra, D., Baktoft, H., & Aarestrup, K. (2018). Temperature and depth preferences of adult sea trout. MEPS, 599, 209–224.

Larinier, M., & Travade, F. (2002). Downstream migration: Problems and facilities. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, 364.

Leander, J., Klaminder, J., Jonsson, M., Brodin, T., Leonardsson, K., & Hellström, G. (2020). Evaluating performance of acoustic telemetry systems. Fisheries Research, 230, 105671.

Leander, J., Hellström, G., Nordin, J., Jonsson, M., & Klaminder, J. (2024). Guiding downstream migrating salmonids using bubbles. River Research and Applications, 40, 107–115.

Liao, J. C. (2007). A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. Philosophical Transactions B, 362, 1973–1993.

Lindmark, E., & Gustavsson, L. H. (2008). Field study of an attraction channel as entrance to fishways. River Research and Applications, 24, 564–570.

Liu, X., Xu, N., & Jiang, A. (2015). Tortuosity entropy. Journal of Theoretical Biology, 364, 197–205.

Luis, S. M., & Pasternack, G. B. (2023). Local hydraulics influence habitat selection. Fisheries Research, 261, 106634.

OTA (1995). Fish Passage Technologies: Protection at Hydropower Facilities. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

Macaulay, G., Bui, S., Oppedal, F., & Dempster, T. (2021). Challenges and benefits of applying fish behaviour to improve production and welfare in industrial aquaculture. Reviews in Aquaculture, 13(2), 934–948.

Nathan, R., Getz, W. M., Revilla, E., Holyoak, M., Kadmon, R., Saltz, D., & Smouse, P. E. (2008). A movement ecology paradigm. PNAS, 105, 19052–19059.

Noatch, M. R., & Suski, C. D. (2012). Non-physical barriers to deter fish movements. Environmental Reviews, 20, 71–82.

Norrgård, J. R., Greenberg, L. A., Piccolo, J. J., Schmitz, M., & Bergman, E. (2012). Multiplicative loss of landlocked Atlantic salmon smolts. River Research and Applications.

Norrgård, J. R., Nyqvist, D., Greenberg, L., & Bergman, E. (2024). Downstream migration of landlocked Atlantic salmon smolt in a regulated river. River Research and Applications.

Nyqvist, D., Calles, O., Bergman, E., Hagelin, A., & Greenberg, L. A. (2016). Post-spawning survival and downstream passage of landlocked Atlantic salmon. River Research and Applications, 32, 1008–1017.

Nyqvist, D., Bergman, E., Calles, O., & Greenberg, L. (2017a). Intake approach and dam passage by downstream-migrating Atlantic salmon kelts. River Research and Applications, 33, 697–706.

Nyqvist, D., Nilsson, P. A., Alenäs, I., Elghagen, J., Hebrand, M., Karlsson, S., Kläppe, S., & Calles, O. (2017b). Upstream and downstream passage of migrating adult Atlantic salmon. Ecological Engineering, 102, 331–343.

Piccolo, J. J., Norrgård, J. R., Greenberg, L. A., Schmitz, M., & Bergman, E. (2011). Conservation of landlocked Atlantic salmon in regulated rivers. Fisheries Management and Ecology, 18, 188–200.

R Core Team (2025). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria.

Schwevers, U., & Adams, B. (2020). Fish protection technologies and fish ways for downstream migration. Springer.

Silva, A. T., Lucas, M. C., Castro-Santos, T., Katopodis, C., Baumgartner, L. J., Thiem, J. D., Aarestrup, K., Williams, J. G., & Cooke, S. J. (2018). The future of fish passage science, engineering, and practice. Fish and Fisheries, 19(2), 340–362

Simmons, O. M., Aldvén, D., Forseth, T., Müller, S., Calles, O., Andreasson, P., & Silva, A. T. (2024a). An overview of kelt migration in regulated rivers. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture, 32, 657–678.

Simmons, O. M., Silva, A. T., Forseth, T., Andreasson, P., Müller, S., Calles, O., & Aldvén, D. (2024b). Swimming behaviour of Atlantic salmon kelts. Science of the Total Environment, 922, 171304.

Stoilova, V., Nilsson, K. A., Andreasson, P., Aldvén, D., Nordström, E., Piva, E., Schumann, S., Santovito, G., Emanuelsson, A., Erlandson, A., & Greenberg, L. (in preparation). Behavioural response of brown trout kelts to localized flow injection in a large-scale flume. Manuscript in preparation. (se kapitel1)

Thorstad, E. B., Økland, F., & Finstad, B. (2010). Riverine migration and survival of Atlantic salmon smolts in regulated rivers: A review. Fish and Fisheries, 11(1), 1–32.

Vikström, L., Leonardsson, K., Leander, J., Shry, S., Calles, O., & Hellström, G. (2020). Validation of Francis–Kaplan turbine blade strike models. Sustainability, 12, 6384.

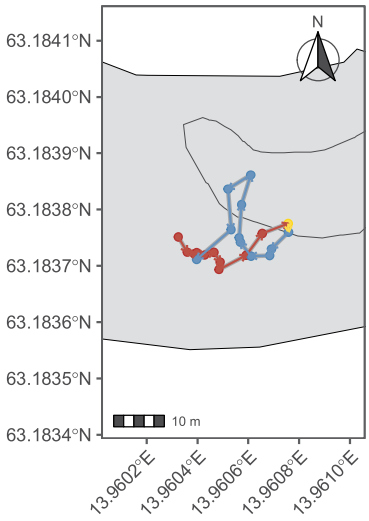
Vänerlaxens fria gång. 2015 Två länder, en älv. Ekologisk status och underlag till åtgärdsprogram för Klarälven, Trysilelva och Femundselva med biflöden. Utgivare: Länsstyrelsen i Värmlands län (publ nr 2015:17) Redaktörer: Hedenskog M, Gustafsson P, Qvenild T (Red.).

5 Bilaga till Delstudie 2 (Dammån) med individuella spår och bäring

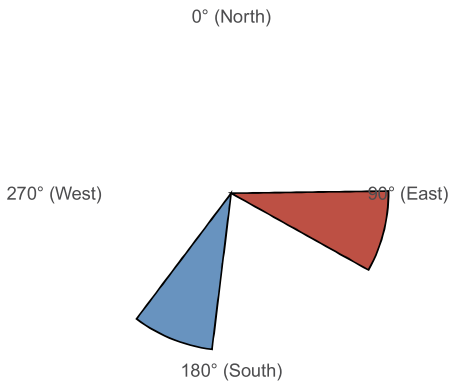
I bilagan visas telemetrispår där röd färg indikerar spåret innan fisken kommer in i området som påverkades av pumpen, gul färg indikerar den första positionen inuti området, och blå färg indikerar spåren efter detta. Spåren är ”klippta” för att fånga detta skeende. Till höger visas bäringen – alltså riktningen hos fisken – före och efter att den kommit in i området.

Bilaga Kapitel 2 (Dammån) med individuella spår och bäring

Fish ID: 59644 | Pump: OFF



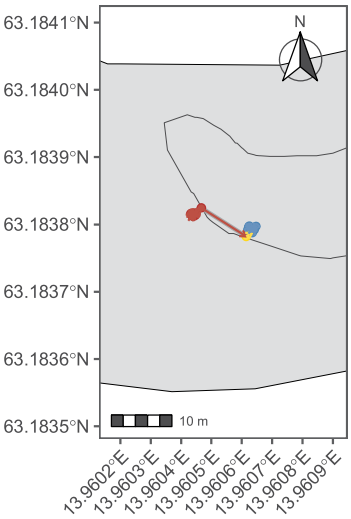
Mean bearing



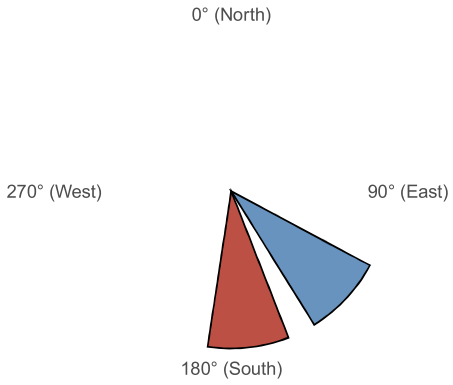
Period relative to first encounter After At encounter Before

Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 59648 | Pump: OFF



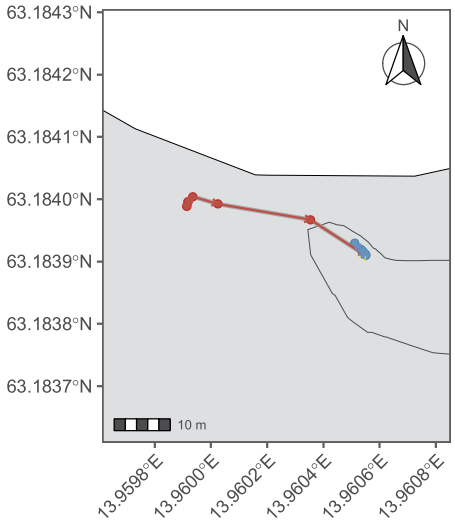
Mean bearing



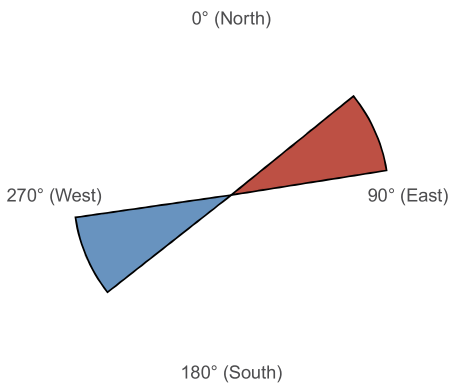
Period relative to first encounter After At encounter Before

Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 59649 | Pump: ON



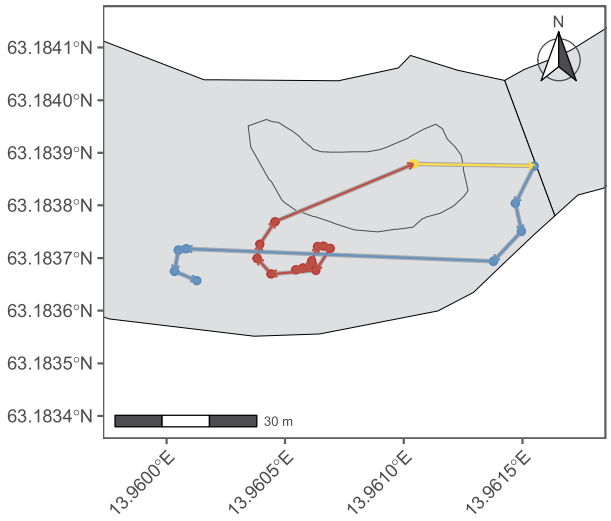
Mean bearing



Period relative to first encounter After At encounter Before

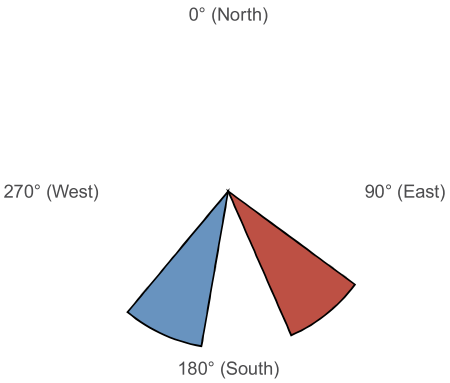
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 59653 | Pump: OFF



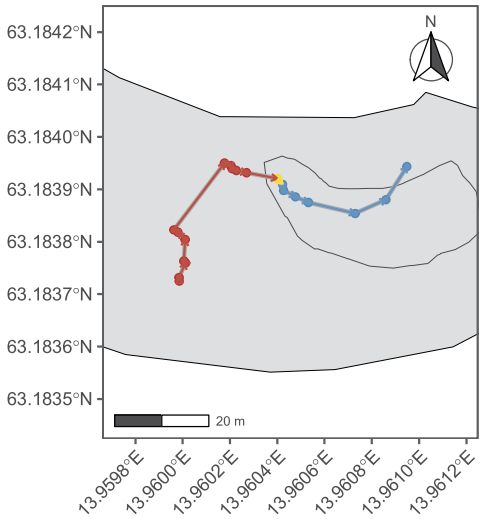
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



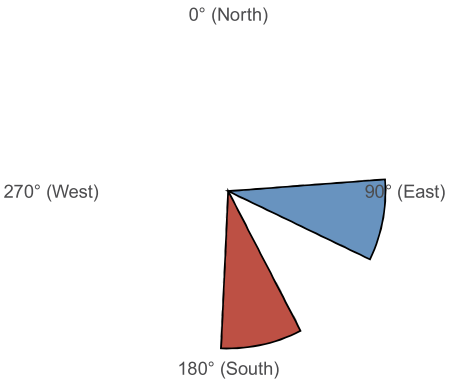
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 59654 | Pump: OFF



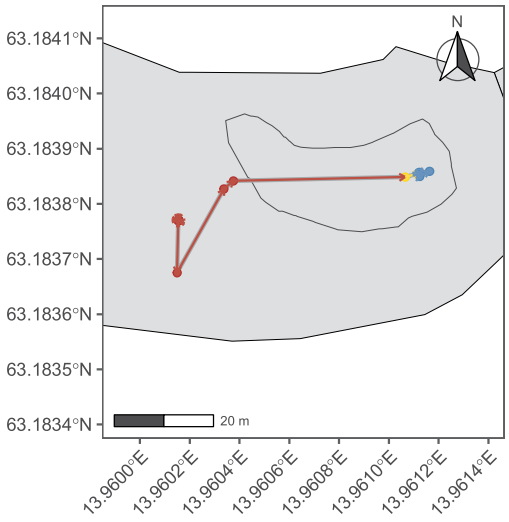
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



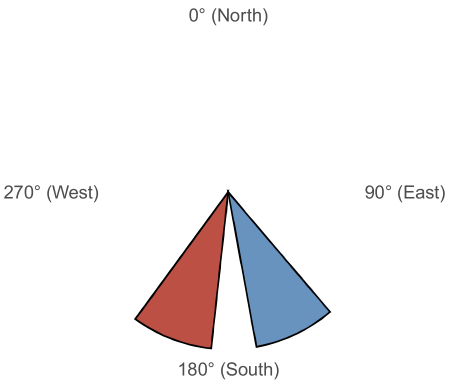
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 59657 | Pump: ON



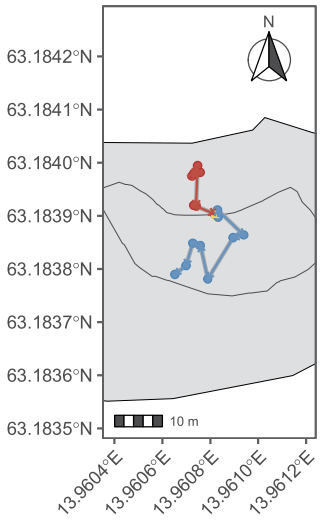
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



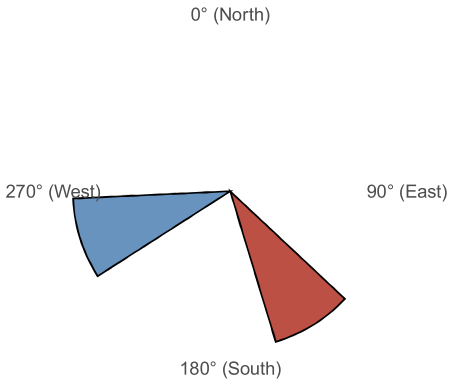
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 59659 | Pump: OFF



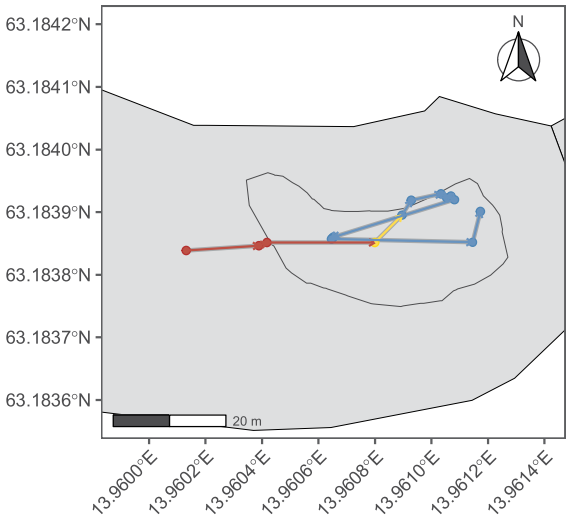
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



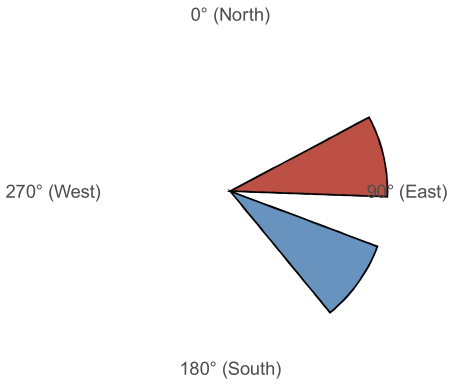
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 59660 | Pump: OFF



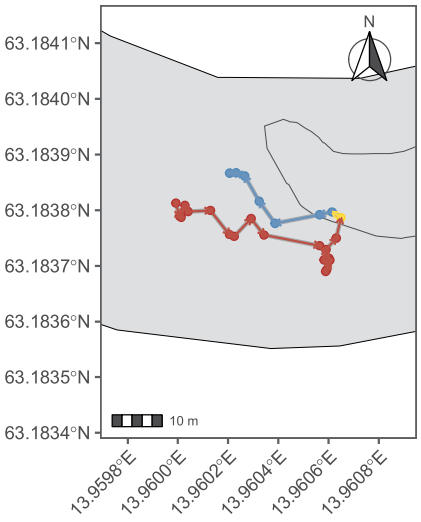
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



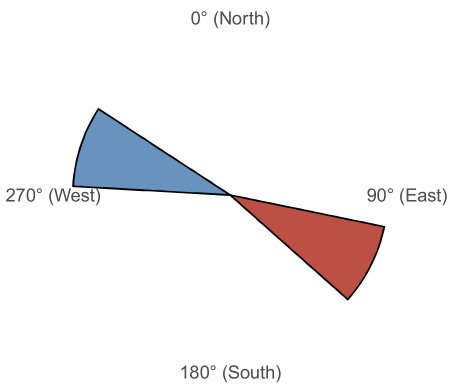
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 59663 | Pump: ON



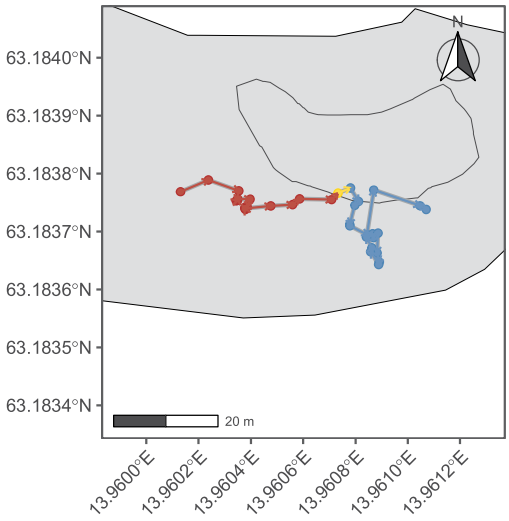
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



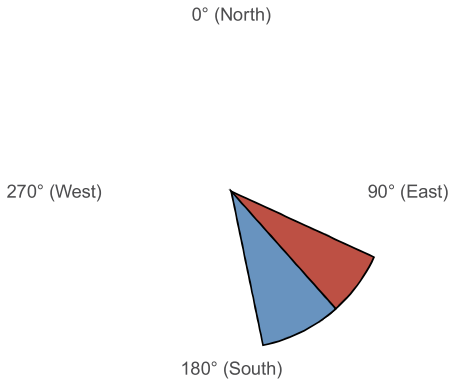
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 59665 | Pump: OFF



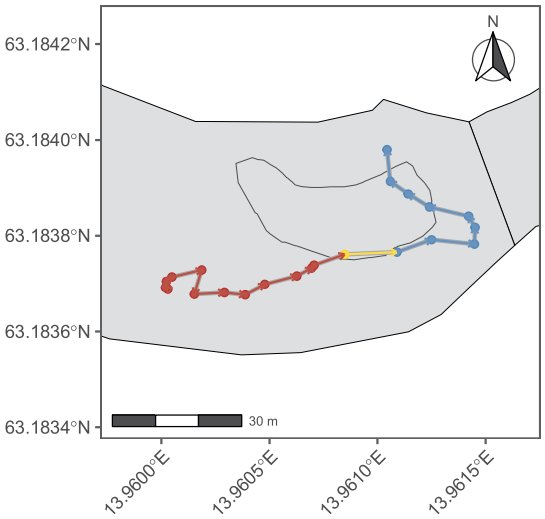
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



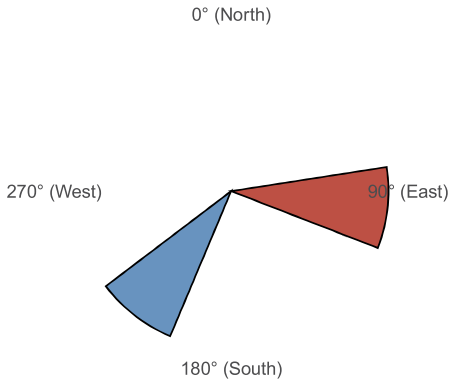
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 59666 | Pump: OFF



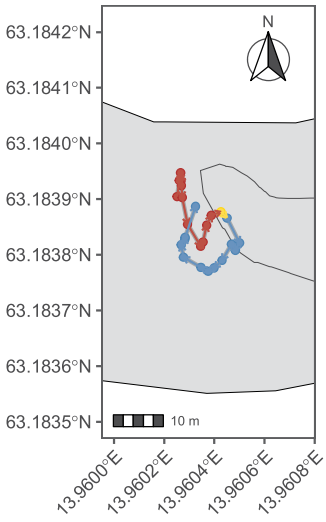
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



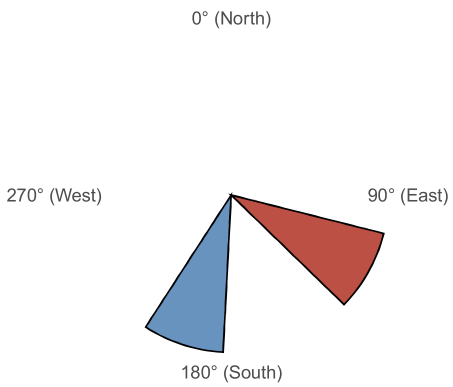
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 59667 | Pump: ON



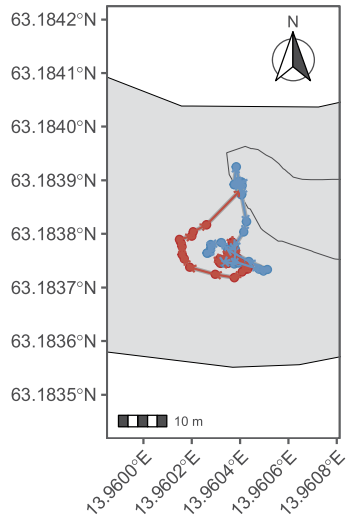
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



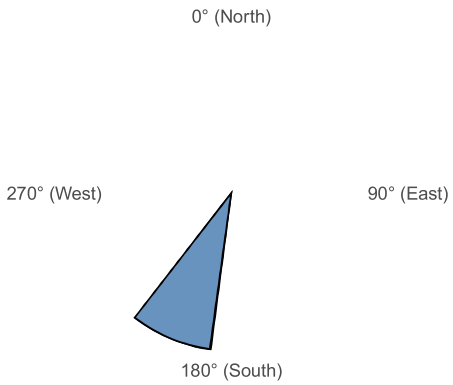
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 59669 | Pump: OFF



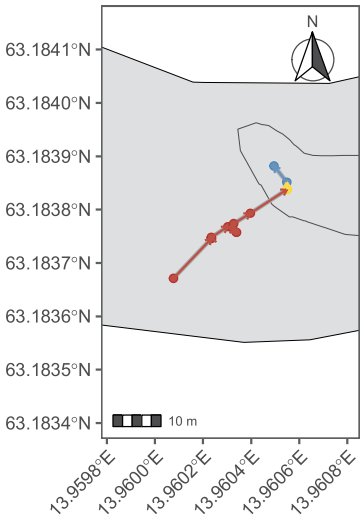
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



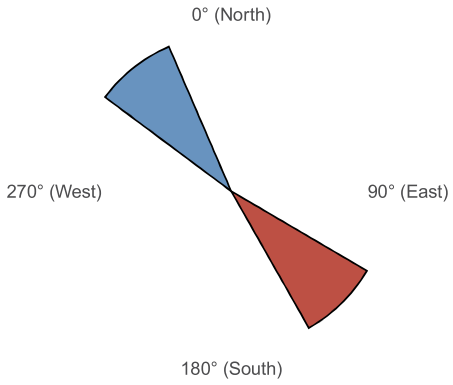
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64297 | Pump: ON



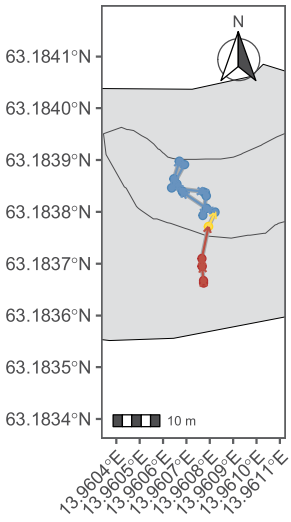
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



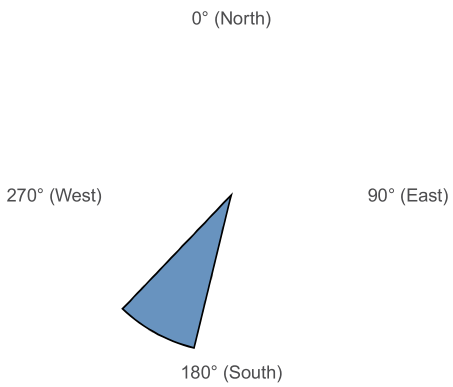
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64300 | Pump: OFF



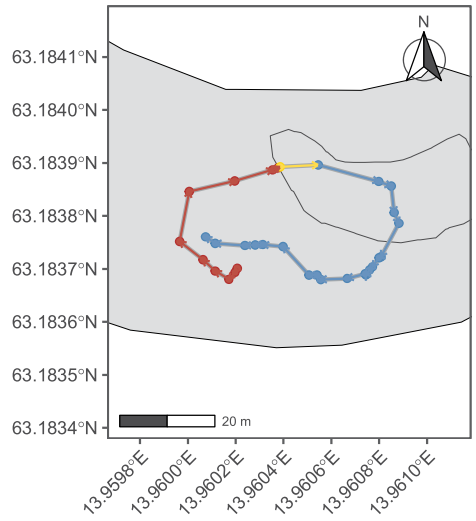
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



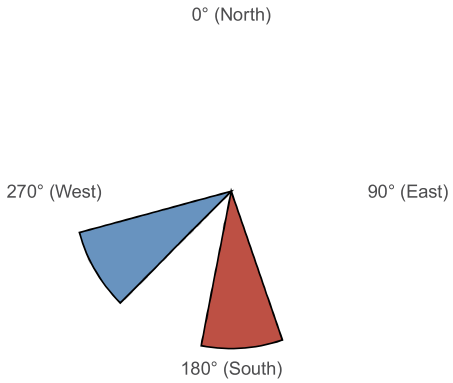
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64301 | Pump: OFF



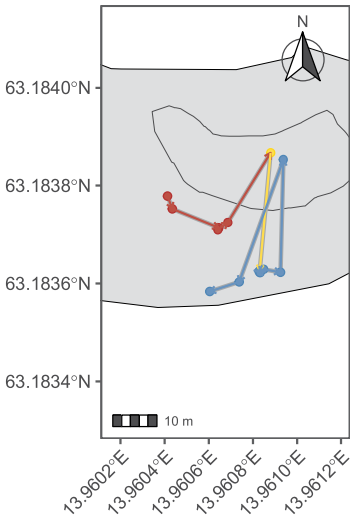
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



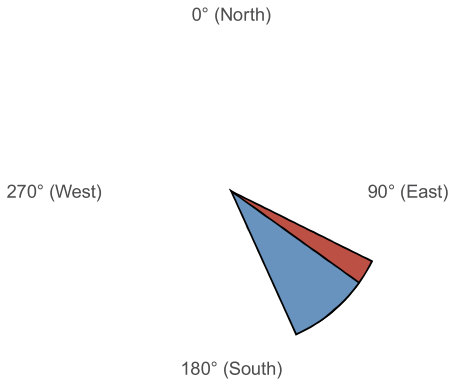
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64302 | Pump: ON



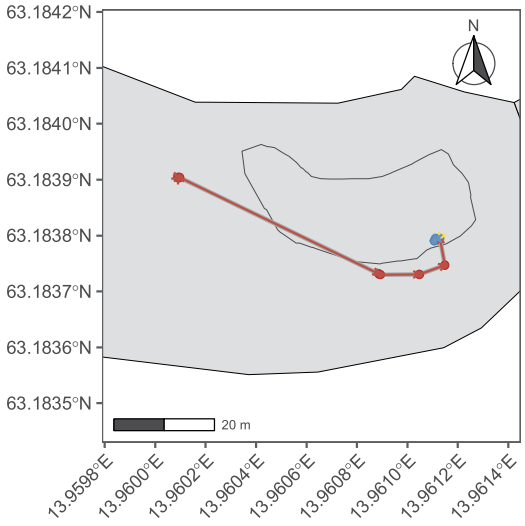
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



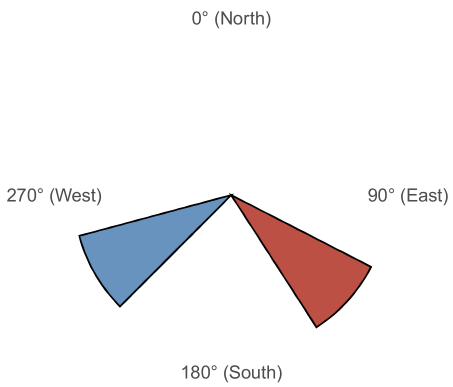
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64307 | Pump: ON



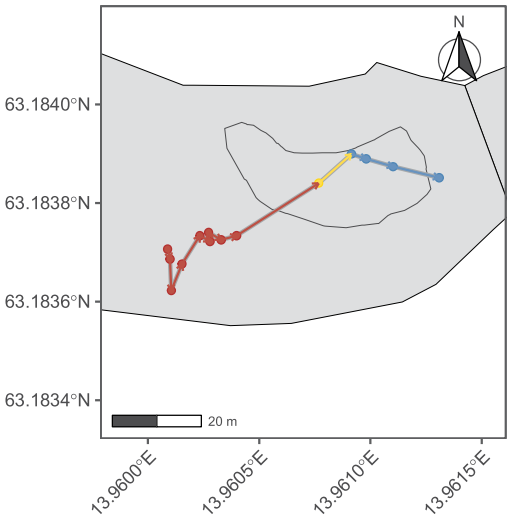
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



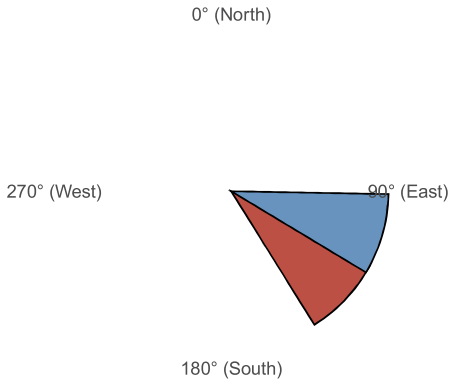
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64308 | Pump: ON



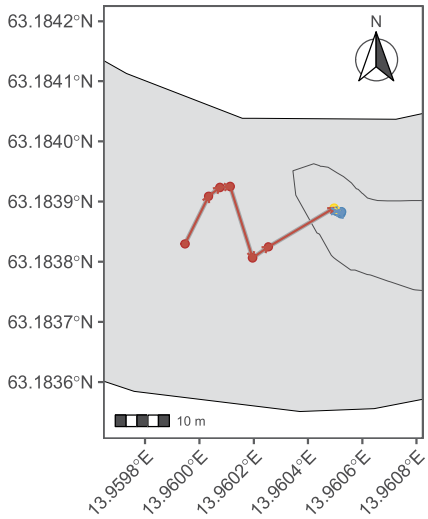
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



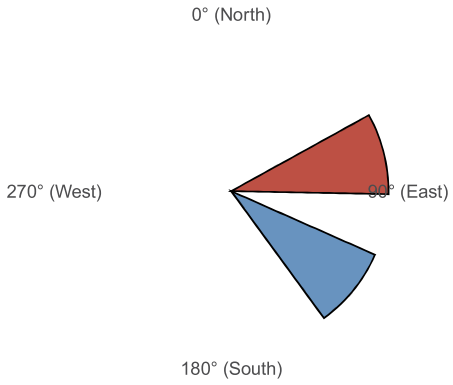
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64309 | Pump: OFF



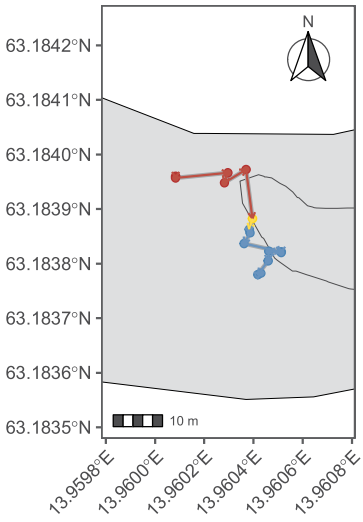
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



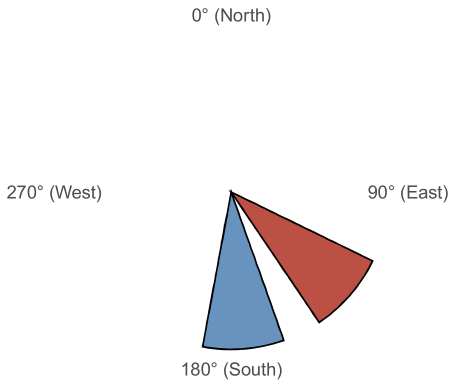
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64315 | Pump: ON



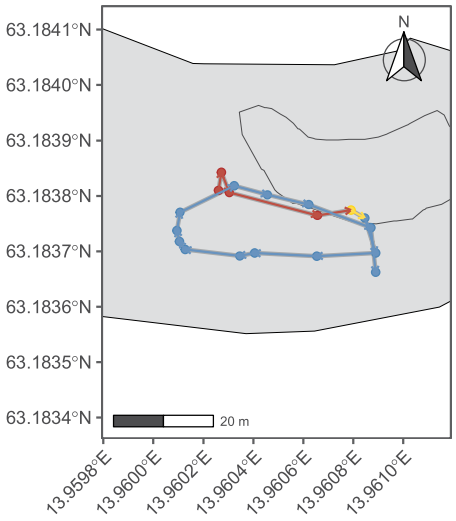
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



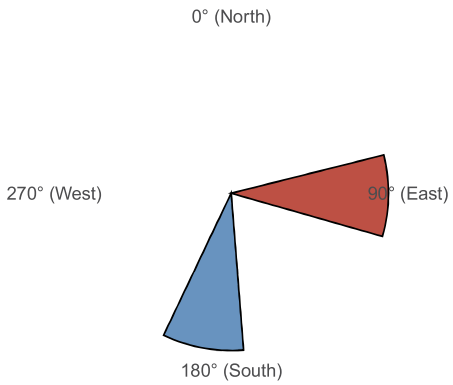
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64317 | Pump: ON



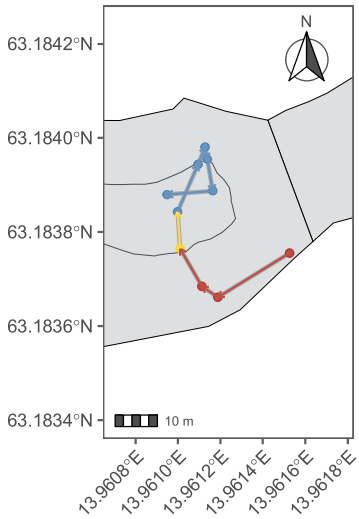
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



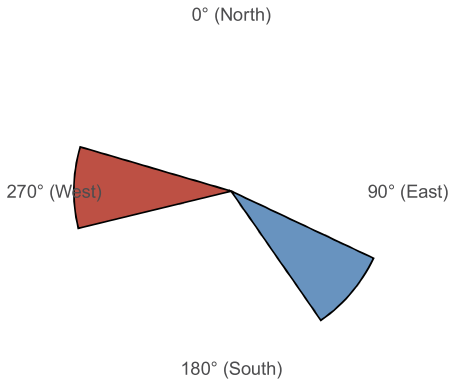
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64318 | Pump: ON



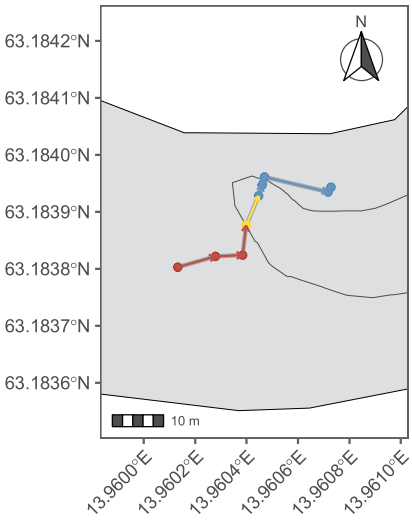
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



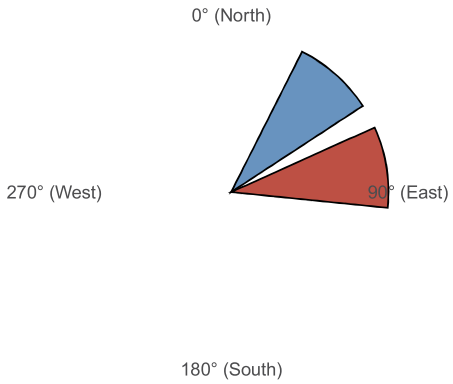
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64321 | Pump: OFF



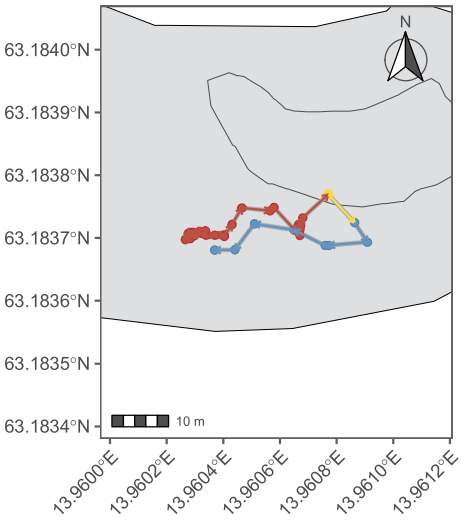
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



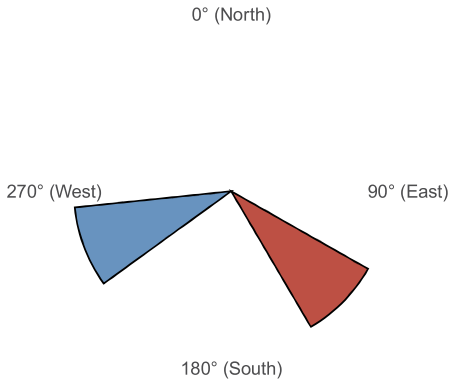
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64324 | Pump: ON



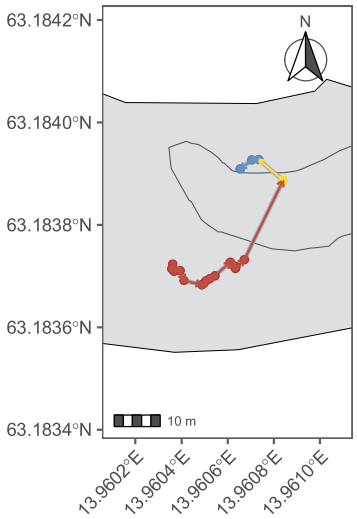
Period relative to first encounter — After — At encounter — Before

Mean bearing



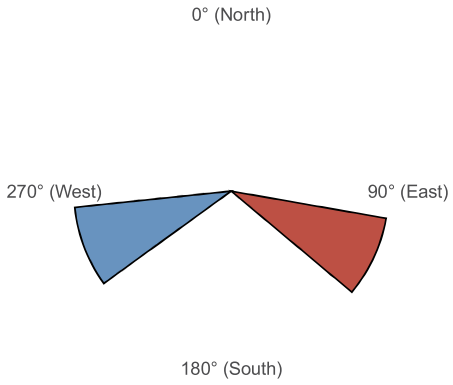
Period relative to first encounter — Before — After

Fish ID: 64329 | Pump: OFF



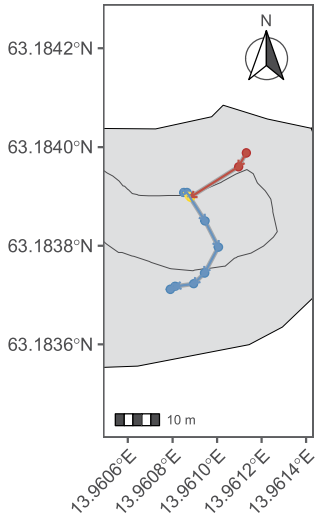
Period relative to first encounter — After — At encounter — Before

Mean bearing



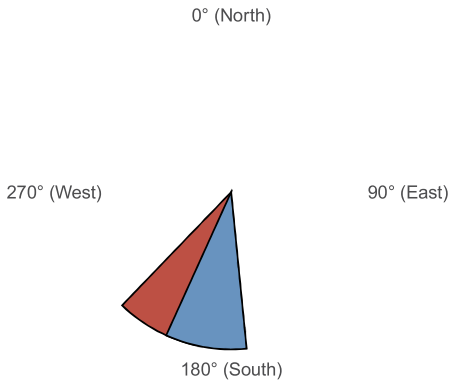
Period relative to first encounter — Before — After

Fish ID: 64330 | Pump: OFF



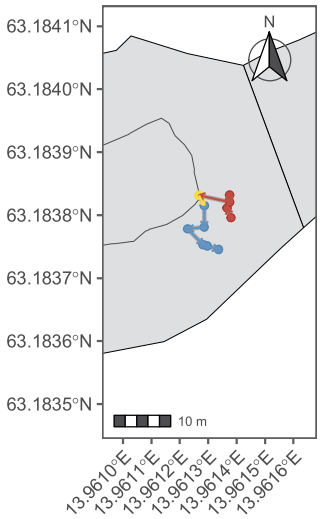
Period relative to first encounter — After — At encounter — Before

Mean bearing



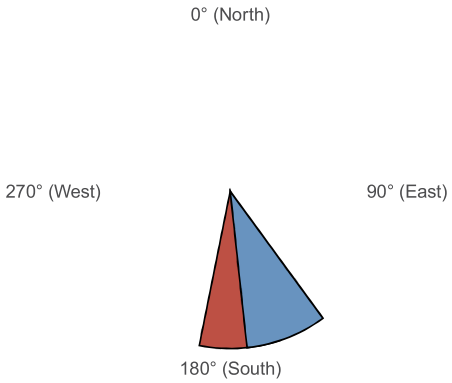
Period relative to first encounter — Before — After

Fish ID: 64332 | Pump: ON



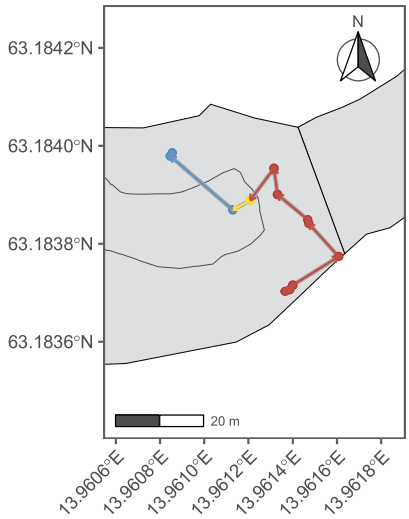
Period relative to first encounter — After — At encounter — Before

Mean bearing



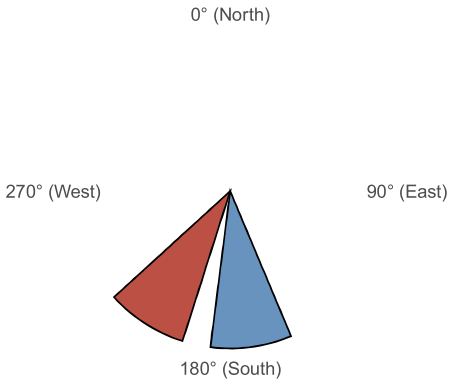
Period relative to first encounter — Before — After

Fish ID: 64333 | Pump: OFF



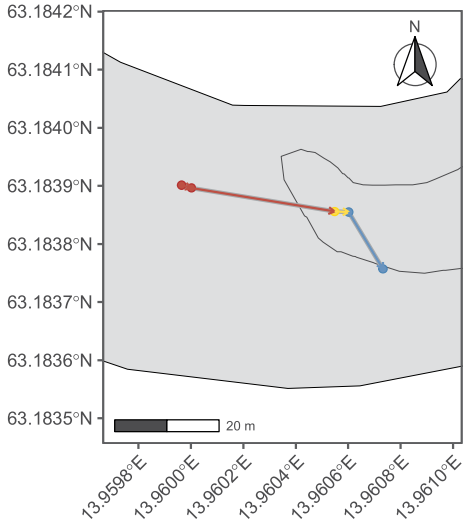
Period relative to first encounter — After — At encounter — Before

Mean bearing



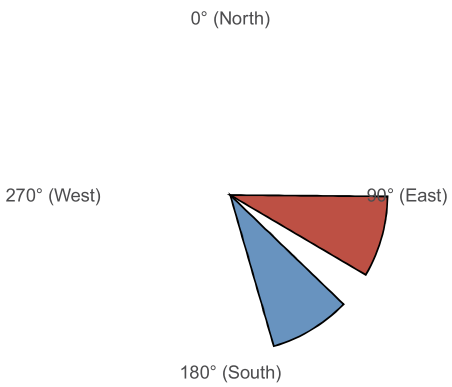
Period relative to first encounter — Before — After

Fish ID: 64367 | Pump: OFF



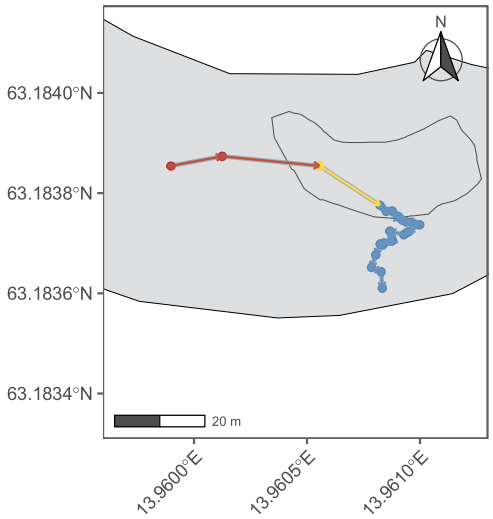
Period relative to first encounter — After — At encounter — Before

Mean bearing

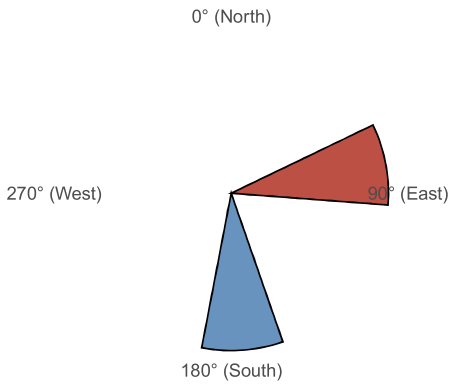


Period relative to first encounter — Before — After

Fish ID: 64368 | Pump: ON



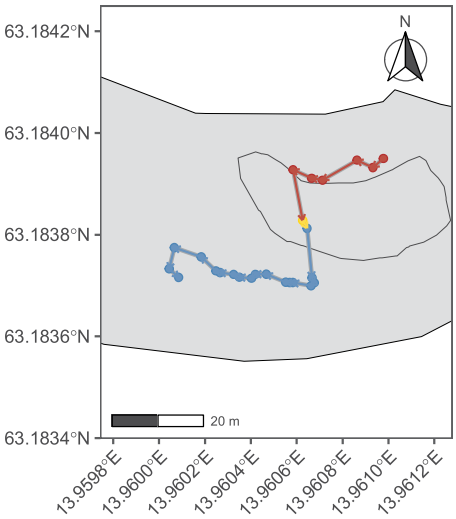
Mean bearing



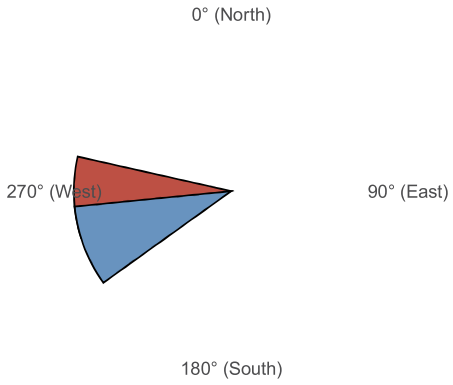
Period relative to first encounter After At encounter Before

Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64372 | Pump: ON



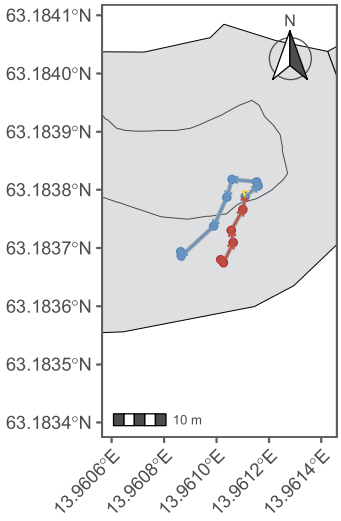
Mean bearing



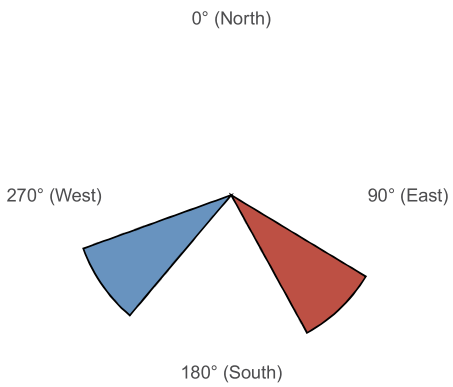
Period relative to first encounter After At encounter Before

Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64373 | Pump: OFF



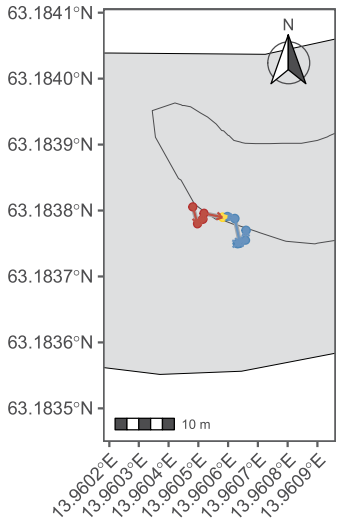
Mean bearing



Period relative to first encounter After At encounter Before

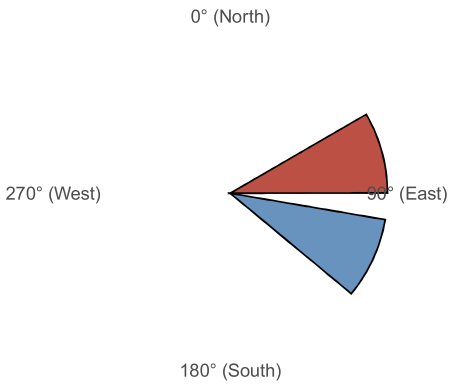
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64375 | Pump: OFF



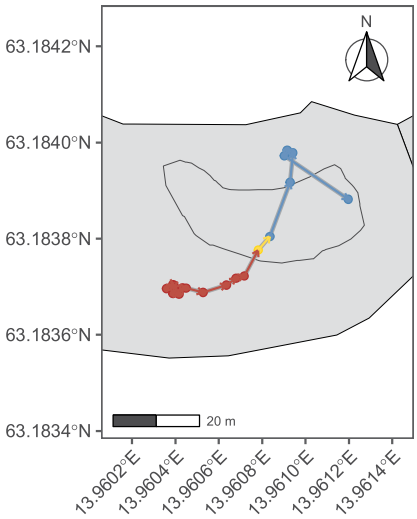
Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



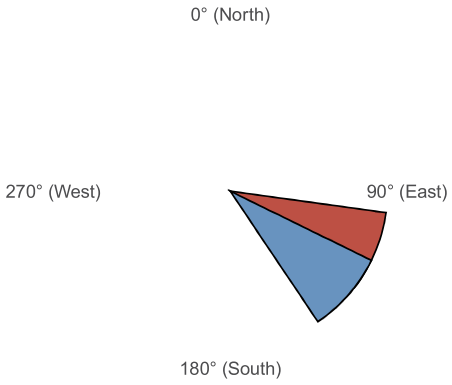
Period relative to first encounter Before After

Fish ID: 64376 | Pump: OFF



Period relative to first encounter After At encounter Before

Mean bearing



Period relative to first encounter Before After

FÖRBÄTTRAD PASSAGEEFFEKTIVITET FÖR ÅTERLEKARE MED KUNSKAP OCH TEKNISKA LÖSNINGAR

Utbyggnaden av vattenkraft har skapat stora hinder för vandrande fisk. En central utmaning vid vattenkraftverk är att få nedströmsvandrande fisk att välja säkra passagevägar istället för att följa huvudflödet mot turbinintagen. Att utveckla effektiva metoder för att styra fiskens vägval är därför en viktig fråga för fiskpassageförvaltningen. I denna rapport redovisas resultat från tre studier där olika metoder för att påverka fiskars rörelsemönster har utvärderats.

I den första experimentella delstudien i Laxeleratorn påverkade injektorflödet keltens rörelser och tycktes i viss mån kunna styra dem. Beteenderesponsen kunde dock inte fastställas entydigt, även om resultaten gav indikationer på att jetstrålar kan ha en avskräckande effekt.

I den andra delstudien påverkade det pumpgenererade flödet i ån öringarnas beteendemönster och hur länge de stannade ovanför dammen innan de vandrade nedströms. Däremot kunde inga tydliga belägg för att pumpens jetstråle förändrade öringarnas beteende påvisas.

Den tredje delstudien visade att individer av kelt uppvisade rörelsemönster som tyder på att deras beteende påverkades av den pumpgenererade förändringen i strömningen, även om effekten inte var helt entydig.

Sammantaget visar resultaten att flödesmanipulation kan ha potential att påverka fiskars rörelser vid vattenkraftverk, men också att effekterna varierar mellan studier och behöver undersökas vidare. Kunskapen är viktig för utvecklingen av nya, flexibla metoder som kan förbättra förutsättningarna för säker fiskpassage – en central fråga för att förena vattenkraftsproduktion med biologisk hänsyn i ett hållbart energisystem.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi.
Läs mer på energiforsk.se.

Energiforsk