



Passageeffektivitet för nedströmsvandrande laxsmolt förbi ett integrerat vattenintag till spill och turbin vid Bruksfors, Rickleån

Kjell Leonardsson¹, Johan Östergren², Gustav Hellström³, Johan Leander³, Eva Bergman⁴

¹Inst. för vilt, fisk och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet, 901 83 Umeå

²Inst. för akvatiska resurser, Sveriges lantbruksuniversitet, 178 93 Drottningholm

³Inst. för ekologi miljö och geovetenskap, Umeå universitet, 901 87 Umeå

⁴Avd. för biologi, Fakulteten för samhälls- och livsvetenskaper, Karlstads universitet, 651 88 Karlstad



Sveriges Lantbruksuniversitet
Institutionen för Vilt, Fisk och Miljö

Rapport 9

Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Wildlife, Fish, and Environmental Studies

Umeå 2016

Denna serie rapporter utges av Institutionen för Vilt, Fisk och Miljö vid Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå med början 2011. Serien publiceras endast elektroniskt på institutionens hemsida www.slu.se/viltfiskmiljo .

This series of Reports is published by the Department of Wildlife, Fish, and Environmental Studies, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, starting in 2011. The reports are only published electronically at the department home page www.slu.se/viltfiskmiljo .

E-post till ansvarig författare
E-mail to responsible author

Kjell.Leonardsson@slu.se

Nyckelord
Key words

Akustisk telemetri, Bruksfors, konnektivitet, laxsmolt, passageeffektivitet, Rickleån, smoltavledning, sonar, vandringsförluster, vattenkraft

Ansvarig utgivare
Legally responsible

Göran Ericsson

Institutionen för Vilt, Fisk och Miljö
Sveriges lantbruksuniversitet
901 83 Umeå

Adress
Address

*Department of Wildlife, Fish, and
Environmental Studies
Swedish University of Agricultural
Sciences
SE-901 83 Umeå
Sweden*

Förord

Denna rapport omfattar undersökningar och resultat från ett projekt som initierats av referensgruppen inom ett projektet Miljövänlig småskalig vattenkraft med representanter från Luleå Tekniska universitet, Fortum, Jämtkraft AB, Kemijoki Oy, Länsstyrelsen Norrbottens län, Länsstyrelsen Västerbottens län, Skellefteå Kraft, Statkraft, Juniper, Vattenfall Vattenkraft AB. Inom projektet har man utvecklat en kraftverksdesign som skall underlätta för nedströmsvandrande fisk som simmar nära ytan, som smolt och kelt, att ta sig nedströms utan att passera via turbinen. Skellefteå Kraft har byggt ett kraftverk i Bruksfors, Robertsfors Kommun, enligt designen som utvecklats inom projektet. Kraftverket togs i drift våren 2015. Denna rapport är en redovisning av det uppdrag SLU fick av referensgruppen, att utvärdera den nya anläggningen i Bruksfors med avseende på passageeffektivitet för nedströmsvandrande smolt under våren 2016.

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	2
Summary	3
1 Bakgrund & frågeställningar	4
2 Material och metoder	5
2.1 Kraftverksanläggningen	5
2.2 Undersökningsområde.....	6
2.3 Omvärldsförhållanden	8
2.3.1 Driftinformation	8
2.3.2 Vattenflöde	9
2.3.3 Vattentemperatur	9
2.4 Laxsmolt	10
2.5 Akustisk telemetri	11
2.6 Passiva märken.....	12
2.7 Ultraljudskamera - SIMSONAR.....	12
2.8 Smoltfälla vid Fäbodforsen	14
2.9 Försöksupställning	14
2.10 Beräkning av passageeffektivitet	15
2.10.1 Observerad passageeffektivitet	15
2.10.2 Förväntad passageeffektivitet	16
3 Resultat	16
3.1 Tid från utsättning till passage	16
3.2 Tid i kammaren	19
3.3 Passageväg	19
3.4 Observerad passageeffektivitet	21
Förväntad passageeffektivitet	24
4. Diskussion	25
5. Slutsatser.....	28
6. Djurförsöksetiskt tillstånd	28
7. Erkännande	28
8. Referenser.....	29

Sammanfattning

Inom projektet Miljöaccepterad småskalig vattenkraft har man utvecklat en konstruktion med ett gemensamt vattenintag till en kammare där en del av vattnet kan ledas rakt nedströms till spillluckorna medan resterande vatten passerar ett galler i botten vidare ned mot turbinen. Syftet med konstruktionen är att underlätta för ytligt vandrande fisk att hitta spillvägen och öka passageeffektiviteten jämfört med traditionella anläggningar där intag till turbiner och spill vanligen är skilda åt. Ett vattenkraftverk som bygger på den principen har byggts av Skellefteå Kraft i Bruksfors, Västerbotten, och kraftverket togs i bruk under våren 2015. Denna rapport redovisar resultaten från den första utvärderingen som gjorts för att utreda anläggningens passageeffektivitet för laxsmolt. Totalt användes 39 akustiskt märkta smolt tillsammans med drygt 200 följevaskar, uppdelat i fyra försöksomgångar, vid utvärderingen som genomfördes under perioden 7 juni till 15 juni. Förutom positionering med hjälp av de akustiska signalerna användes ultraljudskameror (Simsonar) för att undersöka vilken passageväg smolten använde. Två olika spillmängder utvärderades, en med fullt öppna spillluckor (40 cm vattendjup) och en med luckorna öppna till hälften (20 cm vattendjup).

Den beräknade passageeffektiviteten, överlevnaden, för laxsmolten som användes vid utvärderingen blev ca 92-98 %. Trots den höga passageeffektiviteten verkar merparten av smolten ha passerat via turbinerna snarare än via spillluckorna. Den slutsatsen har dragits efter en sammanvägning av resultaten från akustiska telemetri och Simsonar. Det gick inte att fastställa hur stor andel av smolten som passerade via spillluckorna respektive via turbinen. Resultaten från de två spillmängder som användes vid utvärderingen gav likartade resultat.

Enligt den vetenskapliga litteraturen finns två tänkbara orsaker till varför inte alla smolt passerade via spillluckorna. Den första aspekten är kopplad till de förändrade ljusförhållanden, på grund av taket över en stor del av anläggningen, som smolten upplever när de simmar in i anläggningen. Smolt och laxyngel har en tendens att söka sig mot botten när ljuset minskar. Den andra aspekten är kopplad till hastighetsgradienten vid spillluckorna. Smolt vänder ofta uppströms när de upplever en skarp hastighetsgradient. Det finns ytterligare en förklaringsmodell och den skulle i så fall vara att smolten passivt följer strömlinorna i vattnet. Enligt en strömningsmodellering förväntades drygt 40 % av strömningslinorna i den övre halvmeteren av vattenmassan leda till turbinen. Den förklaringen skulle kunna vara bidragande om beteendet att vika av neråt från ytan förstärktes av att ljusinstrålningen plötsligt upphörde när smolten kom in i anläggningen. All smolt dök dock inte omedelbart eftersom smolt observerades vid ytan i området strax uppströms spillluckorna kort tid efter att de frisläpptes ca 30 m uppströms anläggningen. Däremot observerades ingen smolt passera via spillluckorna trots att akustiskt märkta smolt passerade anläggningen under observationsperioden. Den förväntade passageeffektiviteten beräknades till ca 90-96 % under antagandet att smolten passivt följde strömningslinorna. Nästan samtliga smolt passerade anläggningen samma dag som de släpptes. Det innebär att det går att förenkla framtida utvärderingar genom att använda nätstrutar för att fånga upp all fisk som passerar via spillluckorna.

Summary

A hydropower solution with a combined water intake to turbine and spill has been developed within the research project “Environmentally accepted small scale hydropower”. The water enters a chamber and the intake to the turbines is at the bottom of the chamber while the spill gates are located at the surface further downstream in the chamber. The aim with such a construction is to facilitate for fish that migrate downstream near the surface, like smolt and kelt, to find the spillway and thereby increase the passage efficiency compared to in traditional hydropower stations where spill and water intake to the turbines commonly are separated. A hydropower plant based on this design has been installed by Skellefteå Kraft in Rickleån, Västerbotten, and started up during the spring 2015. This report presents the results from the first evaluation of the passage efficiency for downstream migrating salmon smolt in this type of construction. In total, 39 salmon smolt with acoustic tags, together with ca 200 PIT-tagged smolt, were splitted into four groups and released upstream the construction during the period 7 June – 15 June. Besides acoustic telemetry, three underwater ultra sound cameras (Simsonar) were used to investigate if the smolt passed via the turbines or via the sill gates. Two different openings of the spill gates were applied, 20 cm water depth and 40 cm water depth, each replicated twice.

The passage efficiency through the construction was estimated to 92-98 %. Despite high passage efficiency, the conclusion was that a large fraction of the smolts passed via the turbines rather than via the spill gates. The exact proportion of the smolt passing each way could not be established with the methods used.

According to the scientific literature, there are two possible reasons for why not all smolt passed via the spill gates. One reason could be the changing light conditions for the smolt when entering into the chamber. A roof covered the upstream part of the chamber which means that the smolt entered a darker environment when entering the chamber. Smolt has been shown to avoid darker environments or turn towards the bottom. The other aspect is related to the velocity gradient at the spill gates. Several scientific experiments have shown that smolts avoid strong velocity gradients by turning upstream. A third reason could be that the smolt follow the flow passively. According to particle tracking with a CFD model about 40 % of the streamlines from the upper 0.5 m at the surface were predicted to lead to the turbine. That explanation could contribute to the explanation if the diving behaviour of the smolt would be enhanced by the sudden decrease of the light conditions when the smolt entered the chamber. All smolt did not dive immediately since smolt were observed at the surface a few meters upstream the spill gates shortly after the smolt were released ca 27 m upstream the chamber. In contrast, no smolt were observed to pass via the spill gates at that occasion, despite that smolt with acoustic tags passed downstream at the same occasion. The predicted passage efficiency was calculated to ca 90-96 %, based on the assumption that all smolt followed the water passively.

With a few exceptions all smolt passed the hydropower station the same day as they were released. This means that it is possible to simplify future evaluations by using nets to catch and count the smolt that passes via the spill gates.

1 Bakgrund & frågeställningar

I och med vattendirektivets (2000/60/EG) tillkomst ställs nu krav på att den akvatiska miljön skall uppnå god ekologisk status eller potential. En viktig komponent i bedömningen av statusen eller potentialen i sötvattensmiljön är konnektiviteten. För fisk har konnektiviteten försämrats av vattenkraftsutbyggnaden, speciellt för uppströmsvandrande fisk där fiskvägar saknas. För nedströmsvandrande fisk påverkas inte vandringsmöjligheten lika drastiskt i och med att fiskarna kan passera via spill eller via turbinerna. Däremot orsakar fiskpassager via turbinerna en viss dödlighet och omfattningen av dödligheten beror huvudsakligen på fiskens storlek i relation till turbinens storlek, typ av turbin och varvtal (Montén 1985). Generellt har små turbiner höga varvtal (Leonardsson 2012) och kan därmed orsaka hög dödlighet även för små fiskar som smolt.

I syfte att minska passageförlusterna i samband med nedströmsvandring har man testat olika typer av avledningsanordningar, α - och β -galler, samt ledarmar av olika typer (se sammanställning i Calles et al. 2013). α -galler är vertikalt snedställda för att styra fisken mot ytan och β -galler är vertikala men vinklade i vattendragets riktning för att styra fisken till en flyktöppning. Med flyktöppning avses här en öppning i anläggningen som möjliggör nedströmspassage. Öppningen kan vara till en spillväg eller till en fiskväg. Dessa gallertyper är relativt enkla att hantera i små vattendrag men svårare att applicera och underhålla i större vattendrag. Principen för flytande ledarmar är densamma som för β -galler, att styra fisken till en flyktöppning. Ledarmarna är vanligen konstruerade för att släppa förbi stora driftande föremål. De ledarmar som utvärderats för smolt i Sverige är mycket stora anordningar och finns i Sikfors, Piteälven, samt i Norrfors, Umeälven. Effektiviteten för ledarmen i Sikfors (Lundström et al. 2015, Vikström 2016) är betydligt högre än den i Umeälven (Lundqvist et al. 2014) och det är oklart varför effektiviteten inte är hög i båda anläggningarna. Ovanstående typer och varianter av dessa beskrivs i Havs- och Vattenmyndighetens rapport om bästa möjliga teknik för vattenkraft, anordningar för upp- och nedströmspassage av fisk vid vattenanläggningar (Calles et al. 2013). I den rapporten beskrivs även beteendeavledare såsom elektriska barriärer, luftbubblor och ljus/mörker, etc. Det samtliga typer av avledningsanordningar har gemensamt är att de kräver underhåll.

Inom projektet Miljöaccepterad småskalig vattenkraft har man utvecklat en konstruktion med ett gemensamt vattenintag till en kammare där en del av vattnet kan ledas rakt nedströms till spilluckorna medan resterande vatten passerar ett galler i botten vidare ned mot turbinen. Skellefteå Kraft har installerat och tagit en sådan anläggning i drift med uppstart våren 2015 vid Bruksfors i Rickleån. Denna tekniska lösning förväntas ge betydligt bättre möjligheter att avleda ytligt simmande nedströmsvandrande fisk via spill jämfört med i traditionella kraftverk där spill och turbinintag vanligen skiljs åt i horisontalplanet snarare än i vertikalplanet. Den tekniska lösningen är tillämpbar för vattenkraftverk av alla storlekar under förutsättning att turbinintaget finns i eller i nära anslutning till huvudfåran så att spillvattnet enkelt kan ledas vidare förbi på nedströmssidan. En praktisk fördel med denna tekniska lösning är att intagsgallret åtminstone i teorin skall vara självrensande. Turbinen (StreamDiver) är en propellerturbin med fasta blad och har vattensmjörning istället för olja för att skona miljön från eventuella oljeläckage.

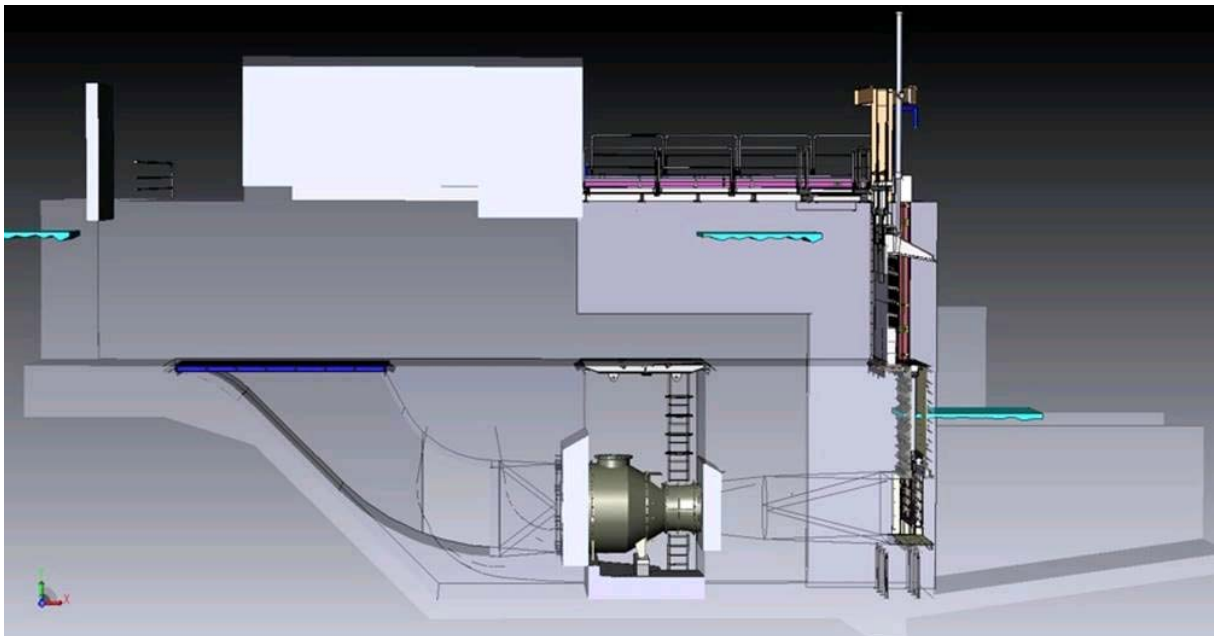
Syftet med detta projekt har varit att utvärdera passageeffektiviteten för nedströmsvandrande laxsmolt genom anläggningen i Bruksfors, Robertsfors. Två olika

spillmängder utvärderades, en med fullt öppna spillluckor och en med luckorna öppna till hälften. Båda alternativen replikerades två gånger. För att vara säkra på att smolten passerade anläggningen som skulle utvärderas stängdes det intilliggande kraftverket och fiskvägen i samband med utvärderingen.

2 Material och metoder

2.1 Kraftverksanläggningen

Anläggningen i Bruksfors är utformad som en avlång kammare, 22 m lång och 5 m bred, med ett vattendjup på ca 3,3 m (Figur 1). Anläggningen har ett 13,5 m långt tak över den första delen, uppströms, av kammaren. Den resterande delen av kammaren ned mot spillluckorna är öppen upptill. I början av kammaren finns ett utlopp i botten som är 4,5 m långt och 3 m brett. Utloppet är täckt med ett galler med 35 mm spaltöppning, med spaltöppningarna i kammarens längdriktning. Kammaren avslutas nedströms med en utskovslucka som kan höjas från botten vid behov av extra spill eller vid rensning av fingallret till turbinintaget. I övre delen av utskovsluckan finns två luckor för ytspill via smoltrännor som leder ut spillet ca 4 m över vattenytan nedströms anläggningen (Figur 2). Spillluckorna har bredden 1,3 m och vattenhöjden vid spillöppningarna ned till smoltrännorna regleras med luckor som justeras med vev oberoende av varandra. Dimensioneringen är gjord för ett vattendjup på ca 40 cm vid spillluckorna när de är fullt öppna. I praktiken är det vattennivån i dammen uppströms kraftverket som avgör det exakta djupet på vattnet som passerar via spillluckorna. Vid utvärderingen testades två olika vattendjup vid spillluckorna, 20 respektive 40 cm. Med fullt öppna spillluckor är mängden vatten via spill ca 1 m³/s och via turbinen 6,2 m³/s.



Figur 1, Tvärsnittsbild av StreamDiver vid Bruksfors i Rickleån.

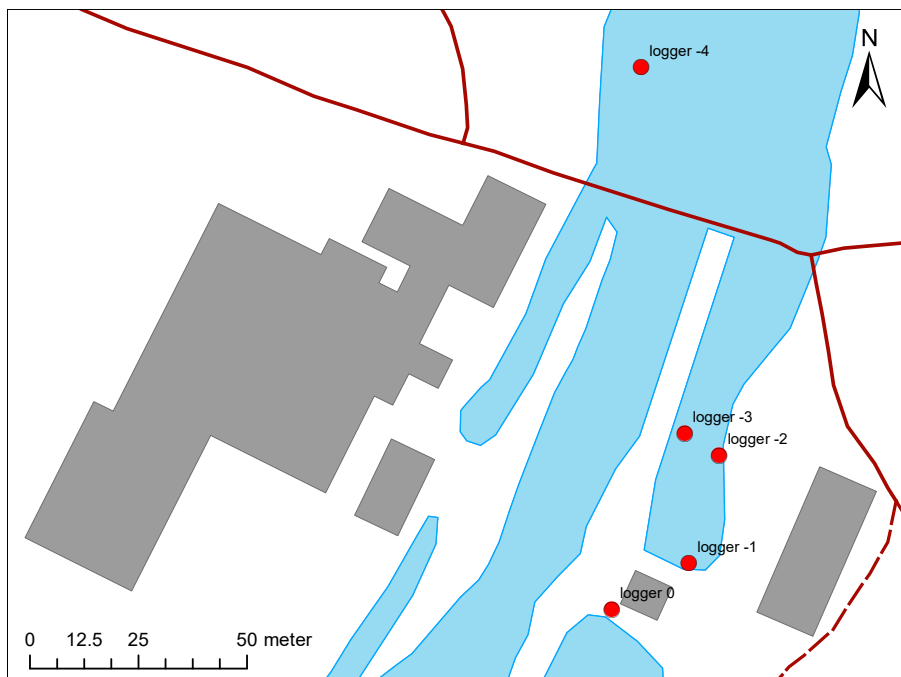
Turbinen är en horisontellt monterad propellerturbin av märket StreamDiver (250 kW), tillverkad av Voith's (Small Hydro competence center Kössler). StreamDiver har tre blad och en diameter på 1,155 m. Vid inloppet i turbinen finns 16 ledskenor. Turbinen har ett varvtal på 375 varv per minut. Turbinen är miljövänlig såtillvida att den har vattensmörjning istället för oljesmörjning. Vid jämförelse med en Kaplan-turbin med samma kapacitet (6.2 m³/s) har denna turbin ungefär samma varvtal, 375 mot 338 varv per minut enligt det samband som räknades fram av Leonardsson (2012).



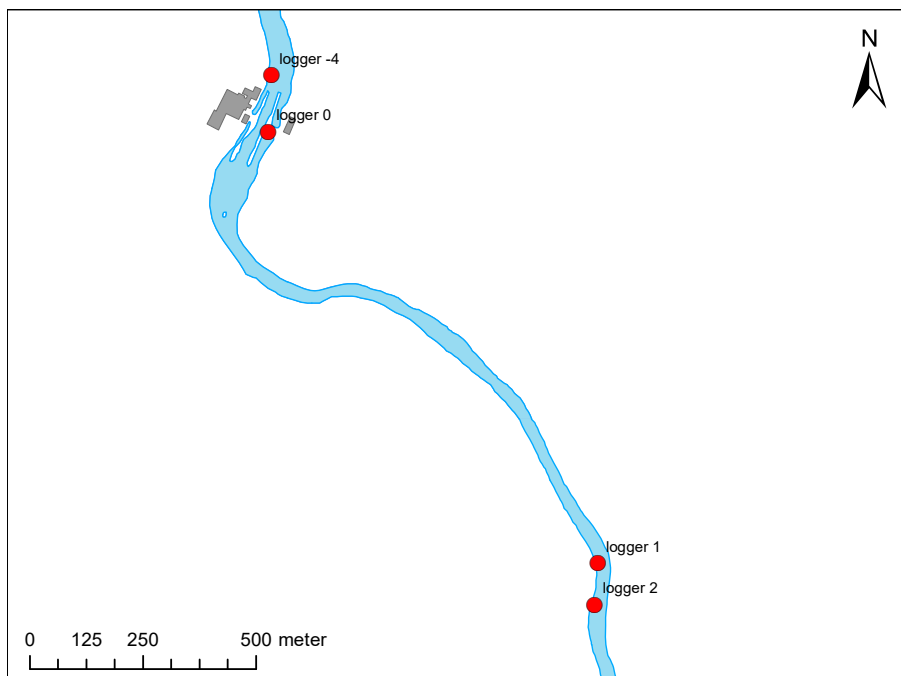
Figur 2. Vattenkraftsanläggningen som bygger på en design som utarbetats inom projektet Miljöaccepterad småskalig vattenkraft möjliggör för ytligt simmande fiskar att passera över intaget till turbinen vidare nedströms i anläggningen med möjlighet att passera nedströms via spilluckorna. Anläggningen på bilden har installerats vid Bruksfors i Rickleån och ägs av Skellefteå Kraft. Foto Evalena Karlsson.

2.2 Undersökningsområde

Kraftverksanläggningen är belägen vid Bruksfors i Rickleån, 64°11'4,6"N, 20°50'54,8"E, Västerbotten. Vattendraget har ett genomsnittligt årsflöde på 16,2 m³/s i det aktuella området. Medelhögvattenföringen är 58,8 m³/s och medellågvattenföringen är 4,25 m³/s enligt flödesstatistik från SMHI för perioden 1981-2010. Fem akustiska loggrar (hydrofoner) placerades i den nedre delen av Bruksfordammen uppströms anläggningen som skulle utvärderas (Figur 3). Två akustiska loggrar placerades ca 1,4 km nedströms kraftverket för att registrera passerande smolt med akustiska märken (Figur 4).



Figur 3. Karta med placering av akustiska loggar i området uppströms kraftverket i Bruksfors, Rickleån. Loggrarna tilldelades ökande nummer nedströms med nummer -4 i dammen och 0 vid spilluckorna. Laxsmolten sattes ut nära logger -2. I anslutning till den loggern placerades även en tryck- och temperaturlogger för registrering av vattenståndsförändringar och vattentemperatur. Strömriktningen är från norr till söder.



Figur 4. Karta med placering av logger nummer 1 och 2 ca 1.4-1.5 km nedströms kraftverket i Bruksfors. Vattnet var mycket lugnflytande från kurvan nedströms kraftverket till området med logger 1 och 2. Registrering på dessa loggar tolkades som framgångsrika passager.

För att kunna beräkna den naturliga dödligheten hos försökssmolten, orsakad av predation, placerades två loggrar ca 13 km nedströms kraftverket (Figur 5). I samma område fanns en smoltfälla som användes för att skatta produktionen av vild laxsmolt i Rickleån.



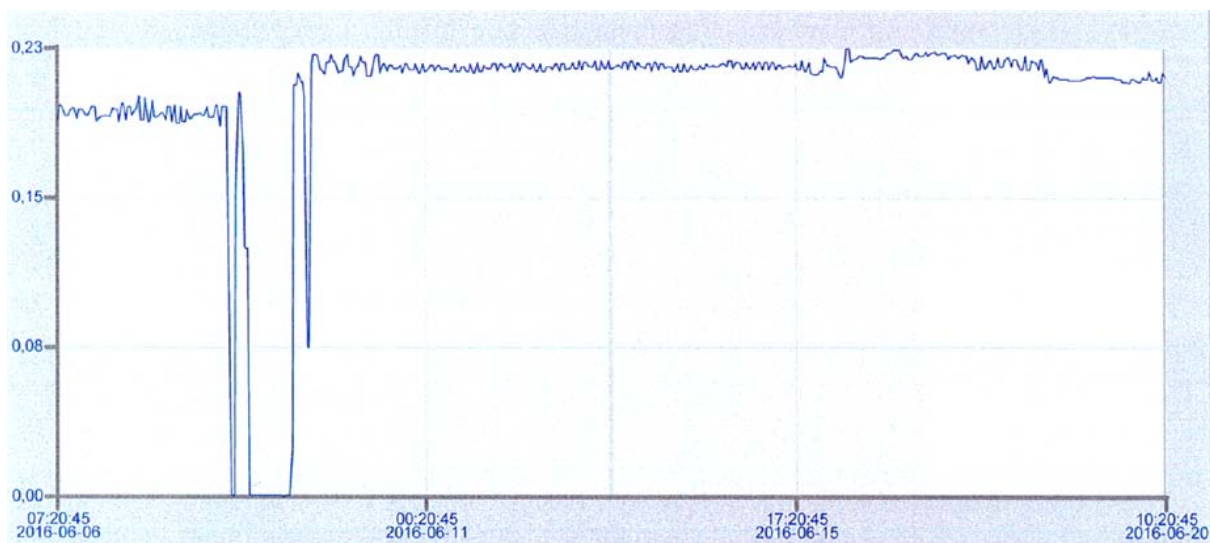
Figur 5. Karta med placering av de mest nedströms belägna loggrarna i Rickleån, nummer 3 och 4, i relation till logger 1 och 2. Logger 3 och 4 var belägna i samma område som smoltfällan.

2.3 Omvärldsförhållanden

2.3.1 Driftinformation

Det anslutande kraftverket (G3) var inte i drift under utvärderingsperioderna och även fisktrappan som finns i anslutning till kraftverket var stängd för nedströmsvandring dessa dagar, utom vid utsättningstillfället den 14 juni då fisktrappan var öppen. En del smolt kan

därför ha passerat nedströms via fisktrappan den dagen, men ingen av smolten med akustiska märken tycks av resultatet att döma ha passerat via fisktrappan. Den 8 juni inträffade ett driftsstopp i StreamDiver till följd av nätstörningar. Ett första stopp skedde ca klockan 11 och varade mellan två och tre timmar (Figur 6). Vattenståndet i dammen steg mellan 5-10 cm under den perioden. I samband med uppstart sjönk vattennivån under drygt en timme med ca 20 cm för att återgå till normal nivå ca 30 minuter senare. Därefter inträffade ett mer långvarigt stopp från klockan 18 till klockan 7 på morgonen den 9 juni. Vattenståndet i dammen påverkades inte nämnvärt av driftstoppet under kvällen-natten. Däremot sjönk vattenståndet tillfälligt med drygt 20 cm i samband med uppstarten klockan 7 den 9 juni. I samband med den sistnämnda nivåsenkningen fanns endast en smolt med akustiskt märke kvar i området och den smolten vandrade inte nedströms i samband med den nivåsenkningen.



Figur 6. Produktionsdiagram (MW) för StreamDiver under försöksperioden juni 2016.

2.3.2 Vattenflöde

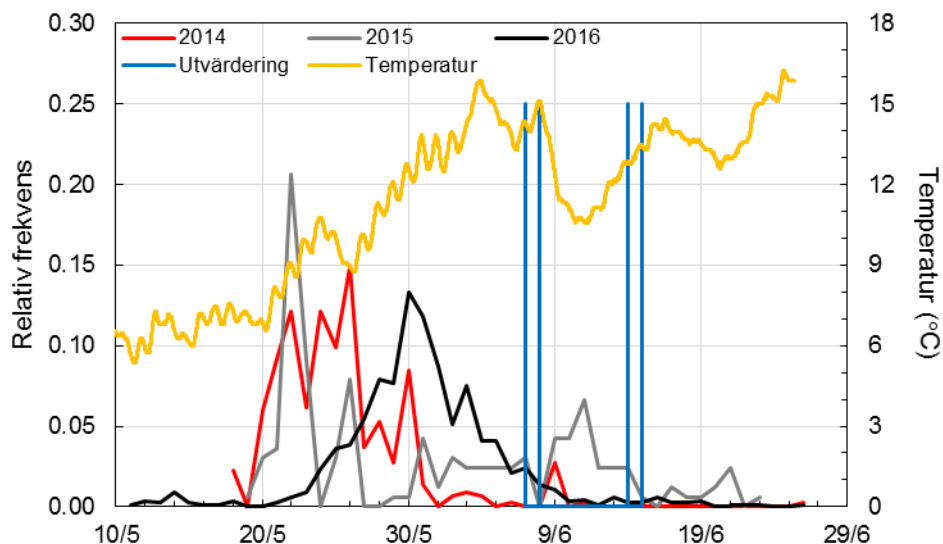
Flödet minskade från första veckans försöksomgång till den andra veckan. Vattenståndet i ån strax nedströms Bruksfors minskade i genomsnitt med 20 cm mellan den 9-10 juni. Medelvattenståndet i dammen var detsamma under för de dygn smolten släpptes. Däremot skilde sig regleringsamplituden i dammen något, med ca 10 cm amplitud den 7-8 juni och ca 5 cm den 14-15 juni.

Flödena i området varierade mellan 20 och 21 m³/s under perioden 7-8 juni och mellan 15 och 16 m³/s under perioden 14-15 juni.

2.3.3 Vattentemperatur

Vattentemperaturen på två meters djup, i kanalen uppströms kraftverket, varierade mellan 14,0 och 15,0 °C den 7 juni (Figur 7). Dagen efter sjönk temperaturen från 14,0 °C vid frisläppandet av smolten till 11,5 °C morgonen efter. Temperaturen fortsatte sjunka till den lägsta temperaturen 10,5 °C vid midnatt den 11 juni. Sedan ökade temperaturen stadigt till 13 °C den 14 juni när den tredje omgången med smolt släpptes. Temperaturen var ca 13,5

°C när smolten sattes ut den 15 juni och steg ytterligare en halv grad till kl 16 och höll sig därefter relativt konstant till dagen efter. Fluktuationerna i temperaturen därefter påverkade inte nedströmpassagen förbi anläggningen eftersom åtminstone smolten med akustiska märken då hade passerat nedströms.



Figur 7. Utsättning av smolten som användes vid utvärderingen gjordes under en period som motsvarar den senare delen av den naturliga vandringen av vild laxsmolt i Rickleån. Data för vild smolt gäller den relativa frekvensen i samband med utvandringen åren 2014-2016, grå, röd och svart kurva. Blå staplar visar vilka dagar den odlade smolten sattes ut uppströms kraftverket i Bruksfors.

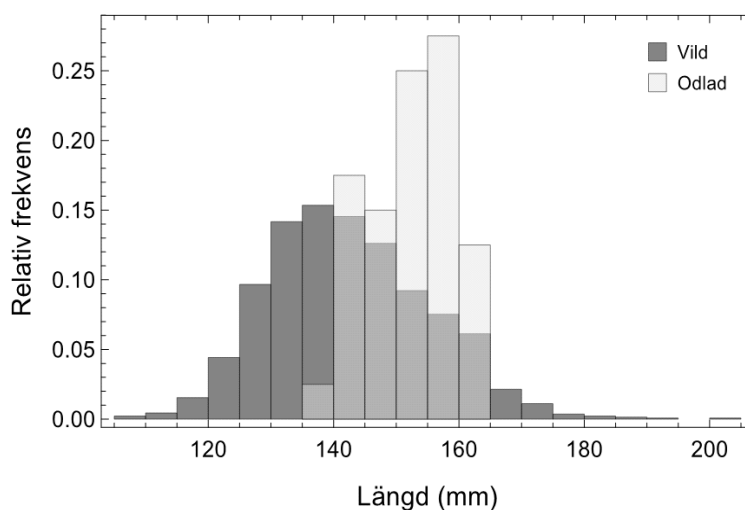
2.4 Laxsmolt

Med tillstånd från Länsstyrelsen i Västerbottens län användes odlad laxsmolt från Statkrafts fiskodling vid Kvistforsen i Skellefteälven i samband med utvärderingen. Den odlade smolten var ettårig och framodlad för att kunna sättas ut kring midsommar. Totalt märktes 286 odlade laxsmolt med PIT märken, varav 40 av dessa också märktes med akustiska sändare. Märkningen gjordes två veckor innan den första utsättningen i Bruksforsdammen.

En fråga man ställer sig när man använder odlad smolt i samband med utvärdering av passageanordningar vid kraftverk är om de beter sig på samma sätt som den vilda smolten. Storleksmässigt var den odlade mycket nära den vilda. De odlade smolten var i genomsnitt ca 15 cm, knappt en cm längre än medelvärdet för den vilda smolten i Rickleån (Figur 8, Tabell 1). De odlade smolten var samtliga inom storleksintervallet för den vilda smolten. Den huvudsakliga indikationen på ett naturligt beteende hos den odlade smolten var att nedströmsvandringen initierades kort tid efter utsättning i kanalen uppströms anläggningen. Flera av de odlade smolten fångades även i smoltfällan ca 13 km nedströms Bruksfors vilket visade att smolten var vandringsbenägna. Den odlade smolten vandrade även nära vattenytan i huvudströmmen och hade samma fångstsannolikhet i smoltfällan som den vilda smolten. Smoltfällan fångar huvudsakligen smolt som simmar i den översta 50 cm av vattenpelaren. Det fångades även vild smolt i fällan under den period som de odlade smolten fångades, vilket innebär att utvärderingen genomfördes inom den naturliga smoltvandringssäsongen, om än under den senare delen (Figur 7).

Tabell 1. Antal och längduppgifter för odlad laxsmolt från Kvistforsens fiskodling, Skellefteälven, som användes vid utvärderingen. Som jämförelse redovisas även längder av vild laxsmolt från Rickleån.

Ursprung	Antal	Medellängd (cm)	Min. längd (cm)	Max. längd (cm)	Standard avvikelse
Akustiska	40	15,1	13,9	16,2	6,7
PIT	246	14,7	13,0	18,9	7,8
Vilda	1355	14,2	10,7	20,2	12,9



Figur 8. Längdfördelning vild laxsmolt från Rickleån (mörkgrå staplar, N=1355) och odlad laxsmolt med akustiska sändare (ljusgrå staplar, N=39) från Kvistforsens fiskodling, Skellefteälven, som användes vid utvärderingen.

2.5 Akustisk telemetri

Akustisk telemetri är en teknik som via ljudsignaler möjliggör detektion och identifiering av sändare som opererats in i fisken. Sändarna var av typen Vemco V5-2H (12,7 x 4,3 x 5,6 mm, 0,38 g i vatten) och opererar på 180 kHz bandet med en power-output på 143 dB. Sändarna skickar 3 sekunder långa, kodade, signaltåg var ~30 sekund, och dessa signaler detekteras, tidstämplas och avkodas av hydrofoner (loggrar) i vattnet (Vemco VR2W 180 kHz). Sändarna placerades i bukhålan på smolten genom ett enkelt kirurgiskt ingrepp, en typ av märkning som ger minimal dödlighet och påverkan på beteende (Liedtke & Rub 2012).

Nio akustiska loggrar användes för att detektera signaler från de akustiska märkena (Figur 3, Figur 4 och Figur 5). Numreringen av loggrarna valdes för att underlätta utvärderingen av resultaten, -4 längst uppströms, 0 vid spilluckorna i kammaren, och 1-4 placerades nedströms. Fyra loggrar placerades ut uppströms kraftverksanläggningen för att avgöra om smolten passerade via anläggningen. En logger (-4) placerades i dammen uppströms kanalen som leder till anläggningen. Syftet med den loggern var att upptäcka om någon av smolten vände uppströms till dammen där möjlighet till nedströmspassage finns via spill i mittfåran eller via kraftverket (G2) på den västra sidan ån. En av loggrarna (-1) i kanalen var placerad vid den östra stranden nära intaget till kraftverksanläggningen för att få information när smolten passerade in i "kammaren", vilket skulle leda till signalbortfall på logger -1. En logger placerades längst nedströms i kammaren (0) för att med säkerhet fånga

upp information om smolt inne i kammaren, innan nedströmspassage. Ytterligare två loggrar (-2 och -3) placerades på vardera sida i mitten av kanalen för att få säker information om när smolten befann sig i kanalen, oavsett var. Loggrarna nedströms Bruksfors placerades parvis med första paret (nr 1 och 2) 1.4 respektive 1.5 km nedströms och det andra paret (nr 3 och 4) 13 respektive 13,2 km nedströms. Avståndet från de mest nedströmsbelägna loggrarna till havet var ca 2,4 km.

2.6 Passiva märken

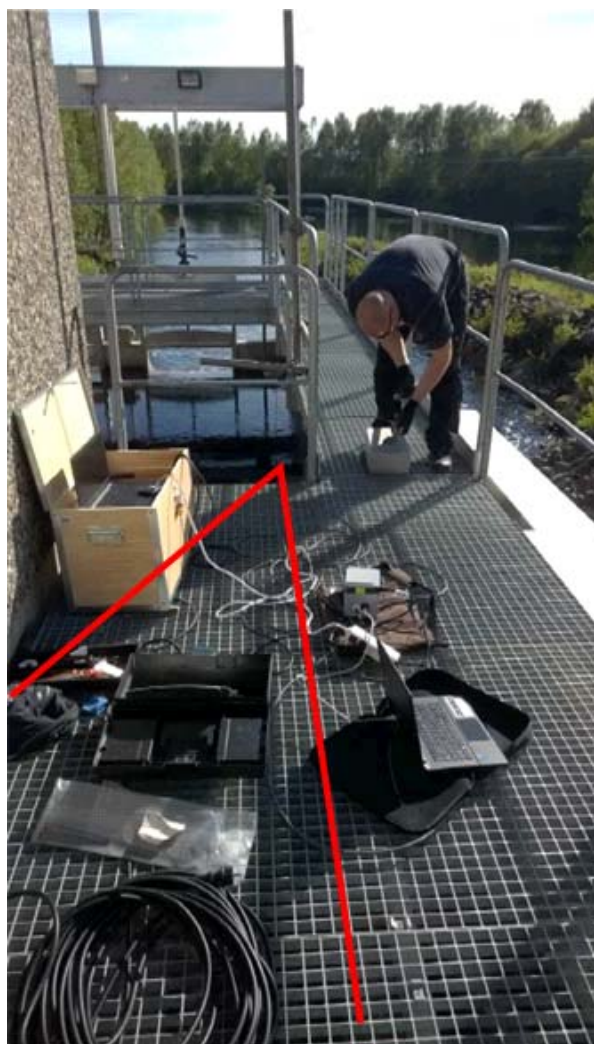
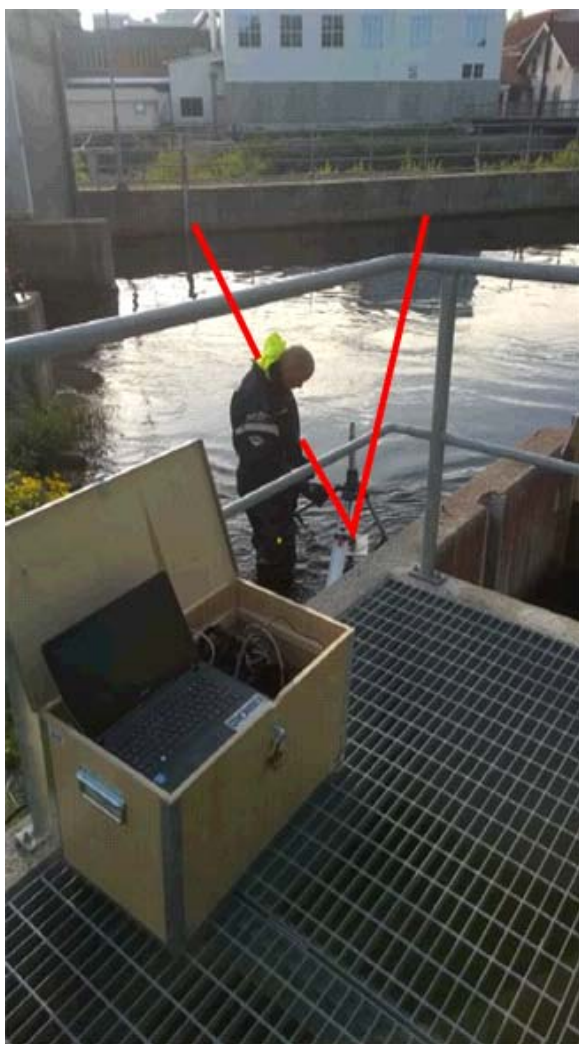
I samband med varje utsättningsomgång med 10 smolt med akustiska sändare sattes 50 PIT-märkta smolt ut som följefiskar för att underlätta stimbeteendet och därmed påskynda initieringen av vandringen. PIT är en förkortning av Passive Integrated Transponder och märkena som användes var av typen FDX 12 mm (BIOMARK, Inc.). PIT-märken sänder märkeskoden i form av en signal endast i samband med en manuell skanning med skannerutrustning, till exempel BIOMARK HPR Plus, eller när de aktiveras av fasta antenner med tillhörande läsare. Skanning efter PIT-märkt smolt gjordes i samband med fångst i smoltfällan, 13 km nedströms Bruksfors.

2.7 Ultraljudskamera - SIMSONAR

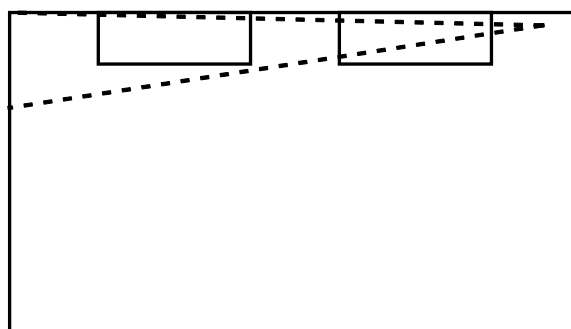
Tre ultraljudskameror (500 kHz-1,2 MHz) i undervattenshus av aluminium användes för att få en hög rumslig och temporal upplösning av hur smolten rörde sig i anslutning till anläggningen under perioden 6 juni till 20 juni. Kamerorna registrerar informationen i två dimensioner med 4-20 bilder per sekund. Varje kamera täcker en distans på ca 40-50 m med en horisontell öppningsvinkel på 29° och 10-14° vertikalt.

Företaget SIMSONAR OY (Oulu, Finland) som tillverkar undervattenskamerorna anlätades för såväl montering, inspelning, som analys av data. I samråd med personalen från SIMSONAR bestämdes var kamerorna skulle placeras för att kunna registrera smolten i samband med passage. En kamera placerades strax uppströms öppningen till anläggningen för att detektera fisk som simmade in i anläggningen (Figur 9). En kamera monterades för att filma vinkelrätt mot spillöppningarna för att registrera fisk som kom fram till och eventuellt passerade nedströms via spillluckorna (Figur 10). Den vertikala öppningsvinkeln innebar att endast den borte (östra) spillluckan kunde övervakas helt. Sannolikheten för en fisk att detekteras vid den närmaste spillluckan var mycket liten på grund av det korta avståndet mellan kameran och luckan. Ytterligare en kamera placerades nära spillluckorna, men med riktning uppströms (Figur 9). Denna kamera vändes 90 grader i syfte att få registreringar på i vilket djupintervall fisken fanns. Det fanns vissa tveksamheter om det skulle gå att detektera fisk som simmar mot kameran eftersom träffbilderna blir mycket liten jämfört med de två andra kamerorna som var monterade för att få sidobilder på fiskarna. Med tanke på att djupinformationen skulle vara mycket värdefull gjordes bedömningen att det var värt att testa. En del fisk torde ändra simriktning en eller flera gånger inne i kammaren vilket skulle öka möjligheten att få detektioner från de djupa fisken fanns.

Analyserna av data från de två kamerorna uppströms smoltluckorna gjordes manuellt för 3-4 timmars inspelning per dag för att justera parametrarna för automatisk detektion. Därefter tillämpades automatisk detektion på samtliga data med manuell komplettering när avvikande resultat upptäcktes. Resultaten kontrollerades av två oberoende personer. Dessutom dubbelkollades slumpmässigt utvalda data manuellt. All inspelning via kameran vid smoltluckorna gjordes manuellt.



Figur 9. Placering av Simsonar UVC vid den östra stranden för registrering av fisk som simmade nedströms mot ingången till anläggningen (vänster bild). En Simsonar UVC placerades inne i kammaren riktad uppströms för att få svar på hur fiskarna simmade inne i kammaren, bland annat vilket djup de befann sig på (höger bild). Foto Pertti Paakkolanvaara.



Figur 10. Placering av den tredje Simsonarutrustningen för registrering av fisk vid den östra spillluckan, till vänster i bild. Foto Pertti Paakkolanvaara. Den högra figuren visar området som skannades av kameran där överkanten av bilden motsvarar vattenytan. Luckan närmast kameran var för nära för att med säkerhet kunna registrera passerande smolt.

2.8 Smoltfälla vid Fäbodforsen

En smoltfälla av typen "Rotary screw traps" (EG Solutions, Oregon, USA, Thedinga et al. 1994) användes vid Fäbodforsen i Rickleån, ca 13 km nedströms Bruksfors, för att skatta produktionen av vild laxsmolt våren 2016 inom ramen för EU:s datainsamlingsprogram (DCF, Data Collection Framework). Driften av smoltfällan sköttes av Sveriges lantbruksuniversitet. I samband med vittjningen av fällan skannades den fångade laxsmolten för förekomst av PIT-märken. Vilda omärkta smolt märktes med PIT-märken och återutsattes ca 300-400 m uppströms för fångst-återfångst försök. Med hjälp av återfångsterna beräknades fällans fångsteffektivitet och med hjälp av denna kan den totala smoltproduktionen uppströms fällan beräknas. Även den odlade smolten som sattes ut i Bruksfors noterades i protokollen och återutsattes uppströms för återfångst för att få säkrare skattning av fångst-sannolikheten. Den genomsnittliga fångstsannolikheten hamnade på ca 20 % (N=102) under perioden 7 juni till 27 juni.



Figur 11. Smoltfälla (Rotary Screw trap) nedströms Fäbodforsen i Rickleån. Fällan är en av de som används av SLU för att skatta smoltproduktionen i vildlaxförande älvar inom ramen för det europeiska datainsamlingsprogrammet (DCF – Data Collection Framework). Foto Bo-Sören Wiklund.

2.9 Försökuppställning

Utvärdering genomfördes med två olika öppningar på spilluckorna, 50 % öppna med ca 20 cm vattendjup (7 och 8 juni) och 100 % öppna med ca 40 cm vattendjup (14 och 15 juni). Anledningen till att öppningen på luckorna inte alternerades mellan dag 1 och dag 2 inom respektive vecka var för att inte riskera att en del av smolten var kvar i området uppströms kraftverket från dag 1 till dag 2. Om smolt från dag 1 hade stannat mer än ett dygn hade de upplevt samma förhållande som dagen innan, vilket underlättar tolkningen av SIMSONAR resultaten eftersom dessa registreringar inte kunde skilja på individer som släpptes dag 1 respektive dag 2.

De akustiska märkena hade en pingfrekvens på i snitt var 30 sekund vilket innebar att fler märken än 10 skulle minska detektionsmöjligheterna på grund av märkeskollisioner. Av den anledningen begränsades antalet akustiskt märkta smolt i varje försöksomgång till 10. För att möjliggöra ett så naturligt beteende som möjligt, med vandring i stim, användes 50 extra smolt (PIT-märkta) som "följefiskar" vid varje smoltsläpp. Vid sista utsättningen var antalet PIT-märkta smolt 83 stycken till följd av att ett antal extra smolt hade märkts i reserv. En av de akustiskt märkta smolten hade avlidit strax innan den sista utsättningen. Antalet akustiskt märkta smolt var därför nio stycken vid den sista utsättningen.

Efter transport av smolten till Bruksforsdammen flyttades de över till baljor med syresatt vatten för att återhämta sig. Återhämtningen gick snabbt, ca 10-15 minuter. Därefter sänktes baljorna ned i vattnet så att fisken kunde simma ut. Utsättningen gjordes från den östra stranden ca 27 m uppströms anläggningen. Smolten släpptes vid fyra olika tillfällen, 7 juni kl 11:10-11:15, 8 juni kl 09:40-09:45, 14 juni kl 10:05-10:10, samt den 15 juni kl 09:55-10:00.

2.10 Beräkning av passageeffektivitet

2.10.1 Observerad passageeffektivitet

Passageeffektiviteten är ett mått på hur stor andel av fiskarna som överlever passagen genom anläggningen. Det är två mått som varit av intresse, dels hur stor andel som passerade via spilluckorna och dels hur stor andel av smolten som överlevde passagen. Förhoppningen var att samtliga smolt skulle passera via spilluckorna och att dödligheten skulle bli minimal. En viss dödlighet förväntades till följd av predation nedströms anläggningen. Den del av predationen i området direkt nedströms anläggningen som överstiger predationen i motsvarande områden nedströms i vattendraget räknas in i anläggningens passageeffektivitet. Anledningen är att en dåligt fungerande passage gör den passerande fisken till enkla byten för predatorerna. Ett exempel på detta skulle kunna vara att fisken blir desorienterad under en kortare eller längre period efter passagen. I praktiken går det inte att veta, utan att fånga upp fisken i samband med passage, om en ökad dödlighet beror på dödlighet via anläggningen eller på predation. En fisk som omkommer i samband med passagen kan mycket väl fångas av en predator. För att kunna göra sådana beräkningar behövs referensdata på den naturliga predationen i vattendraget.

Referensdata på predation av odlad smolt räknades fram med hjälp av vandringsförluster mellan de två nedströms liggande loggerområdena, från 1+2 till 3+4. Selområdena bedömdes som de huvudsakliga kärnområdena för predatorer, jämförbara med området mellan kraftverket och loggerområde 1+2. Den sammanlagda sträckan som utgjordes av sel mellan loggrarna 1+2 och 3+4 uppmättes till 8,1 km, av totalt ca 11 km, från ortofoton. Dödligheten (μ) per kilometer beräknades enligt formeln $\mu = -\ln(\text{överlevnad})/8.1$. Med hjälp av en omskrivning av samma formel beräknades den förväntade överlevnaden från kraftverket till logger 1, $\text{överlevnad} = \text{Exp}(-\mu * 1,3)$, där 1,3 km är avståndet från kraftverket till den gräns där den akustiska signalen kunde upptäckas på logger 1. Den observerade passageeffektiviteten genom anläggningen beräknades som observerad passageförlust minus förväntad passageförlust till följd av predation.

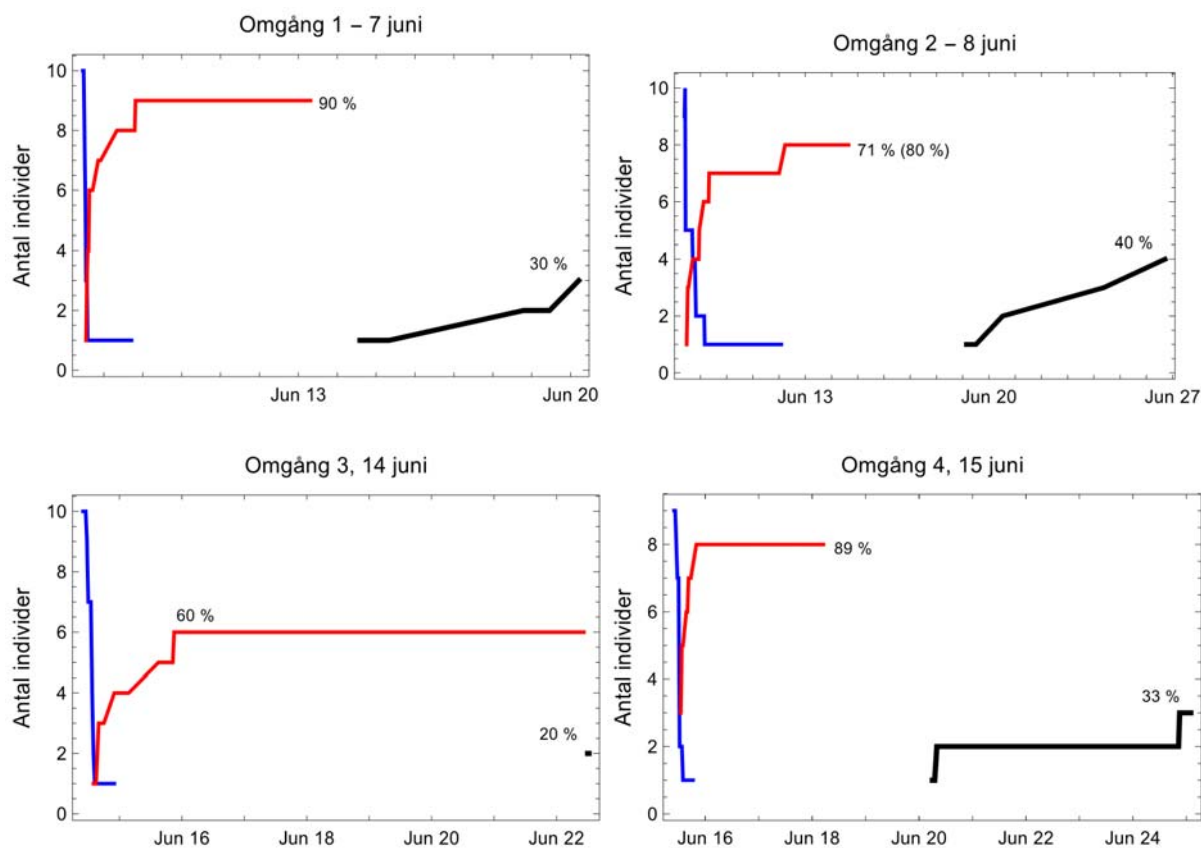
2.10.2 Förväntad passageeffektivitet

Den förväntade passageeffektiviteten beräknades genom att kombinera resultat från strömningsmodellering (CFD) av andel strömningslinjer som ledde till spilluckorna respektive till turbinen med beräkning av överlevnad i samband med turbinpassage med hjälp av matematiska modeller (von Raben 1957, Montén 1985, Leonardsson 2012). Resultat om strömningslinjer från partikelspårning för Bruksforsanläggningen tillhandahölls av Staffan Lundströms forskargrupp vid Luleå Tekniska universitet.

3 Resultat

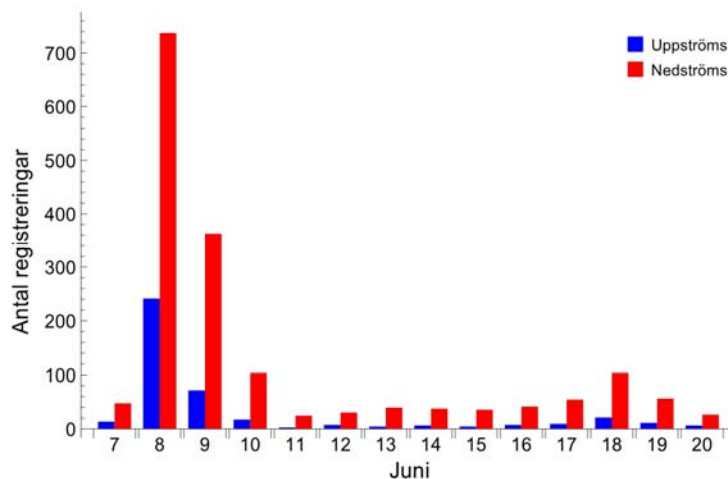
3.1 Tid från utsättning till passage

De akustiskt märkta smolten påbörjade nedströmsvandringen relativt omgående efter utsättningen (Figur 12). Några smolt passerade inom fem minuter efter utsättning medan hälften av smolten stannade längre än 2 timmar i området innan de passerade nedströms. En av smolten stannade betydligt längre än de övriga och passerade efter 3,7 dygn. Denna smolt drog upp medelvärdet som hamnade på 6,2 timmars uppehållstid innan nedströmspassage. Ingen av de akustiskt märkta smolten simmade upp i dammen. Av den anledningen skedde ingen passage via spillet från dammen eller via kraftverket på den andra sidan ån (G2). Trots att några smolt passerade nedströms redan efter några minuter fanns inget tidsberoende i passageöverlevnaden (logistisk regression, $p > 0,05$, $N = 39$), dvs smolt som stannade flera timmar efter utsättning hade samma passageeffektivitet som de smolt som passerade inom 5-10 minuter efter utsättningen. I samband med den första försöksomgången, med spilluckorna öppna till hälften, passerade hälften av smolten anläggningen inom 1,4 timmar. Med fullt öppna spilluckor hade hälften av smolten passerat inom 3,0 timmar. Medianerna var inte signifikant skilda åt (Mann-Whitney, $p = 0,14$, $N = (20, 19)$) vilket även var fallet om man skulle utesluta observationen för den smolt som stannade uppströms i flera dygn. Slutsatsen blir att fullt öppna spilluckor inte ledde till att smolten passerade snabbare än med luckorna öppna till hälften.



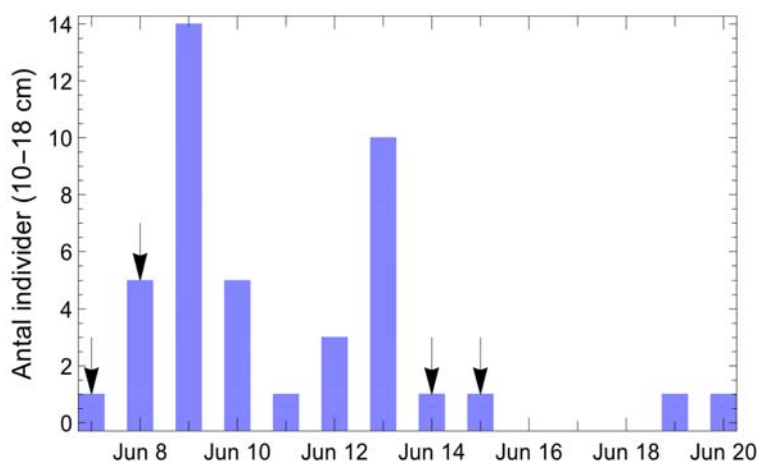
Figur 12. Antal akustiskt märkta smolt uppströms anläggningen (blå linje) samt kumulativ ankomst av akustiskt märkta smolt 1,4 km nedströms anläggningen (röd linje) respektive 13 km nedströms anläggningen (svart linje). Anledningen till att den kumulativa nivån för den röda linjen omgång 2 var att tre av de överlevande individerna passerade anläggningen i samband med ett driftstopp.

Resultaten från Simsonar var svåra att tolka för de registreringar av fisk som gjordes strax uppströms anläggningen. Kameran var uppställd för att kunna registrera merparten av fiskarna som simmade nedströms in i anläggningen. De flesta registreringarna, oberoende av fiskstorlek, gjordes under perioden 8-10 juni och kring den 18 juni. Ingen ökad aktivitet kunde uppmätas under tre av de fyra dagar som smolten släpptes (Figur 13).



Figur 13. Antal fiskar, oavsett storlek, som registrerades som uppströms- respektive nedströmssimmade på Simsonar under försöksperioden. Det märks ingen ökad nedströmsvandringsaktivitet under tre av de fyra dagar (7, 8, 14, 15) när smolten släpptes.

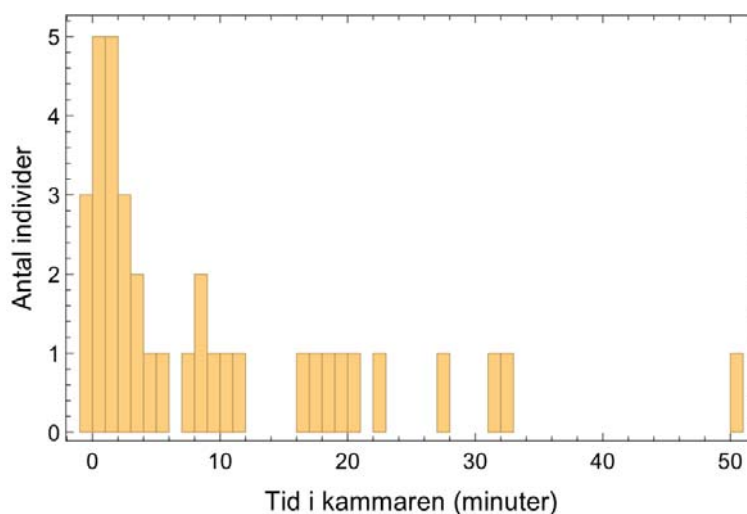
Eftersom hälften av smolten med akustiska märken hade passerat nedströms inom loppet av ett par tre timmar efter utsättning förväntades en betydande mängd registreringar av nedströmsspasserande fisk vid spilluckorna med hjälp av Simsonar de dagar som smolten släpptes. De dagar då mer än enstaka fisk i storleksordningen 10-18 cm registrerades för nedströmsspassage via spilluckorna med hjälp av Simsonar var under perioden 8-10 juni och 12-13 juni (Figur 14). Även om endast den östra spilluckan kunde övervakas med kameran är det osannolikt att smolten nästan uteslutande skulle passerat via den västra spilluckan, utom den 8 juni. Om samtliga smolt skulle passerat via spilluckorna och jämnt fördelat mellan de två luckorna borde det varit ca 30 passager den 7, 8 och 14 juni och ca 46 passager den 15 juni.



Figur 14. Antal passager per dag av fisk i storleksintervallet 10-18 cm via den östra spilluckan enligt tolkningar av Simsonar data. Pilarna visar när smoltutsättningarna gjordes och hälften av smolten passerade nedströms inom 2-3 timmar efter utsättning.

3.2 Tid i kammaren

Samtliga smolt passerade den 22 m långa kammaren inom ca 50 minuter efter att de lämnat området omedelbart uppströms kammaren där de kunde detekteras på loggern vid den östra stranden (logger -1) (Figur 15). Uppehållstiden i kammaren var i genomsnitt ca 10 minuter (N=36) och mediantiden var ca 4 minuter. Den smolt som uppehöll sig längst tid i kammaren stannade 51 minuter innan nedströmspassage. Tre av smolten som släpptes den 8 juni registrerades inte på loggern i kammaren innan nedströmspassage. Dessa smolt kan inte ha passerat via fisktrappan eftersom den var stängd den aktuella dagen. De kom sannolikt in i kammaren från den östra sidan och passerade via turbinen eller via spill inom det tidsintervall på ca 30-90 sekunder som sändarna pingade eftersom logger -1 hade registrerat dessa tre smolt innan passage.



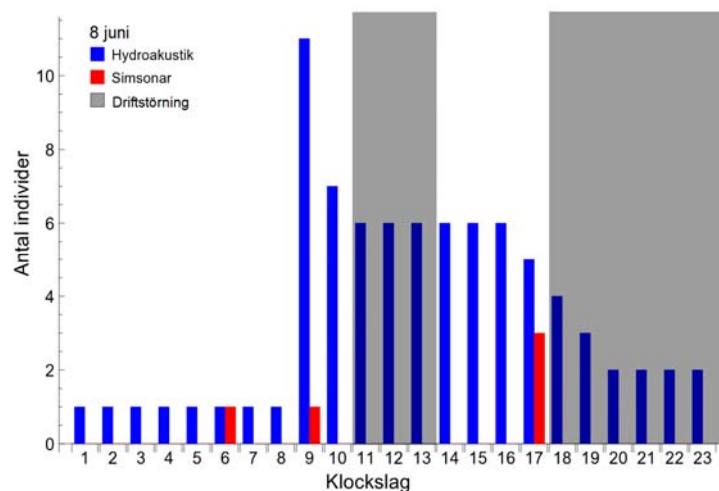
Figur 15. Merparten av laxsmolten tillbringade mindre än 10 minuter i kammaren innan nedströmspassage.

3.3 Passageväg

Under drygt en timme från och med frisläppandet av smolten övervakades utloppet vid spilluckorna visuellt utan att notera några passager. Däremot observerades fisk som sprättade i ytan en bit uppströms spilluckorna strax efter frisläppandet av smolten. Det gick inte att avgöra om det var laxsmolt eller någon annan fiskart, men sprättandet i ytan som började strax efter frisläppandet av smolten antyder att det faktiskt var laxsmolt som observerades. Under den tid den visuella inspektionen gjordes passerade fem smolt anläggningen enligt loggerregistreringarna. Tolkningen blir därför att dessa individer passerade via turbinen.

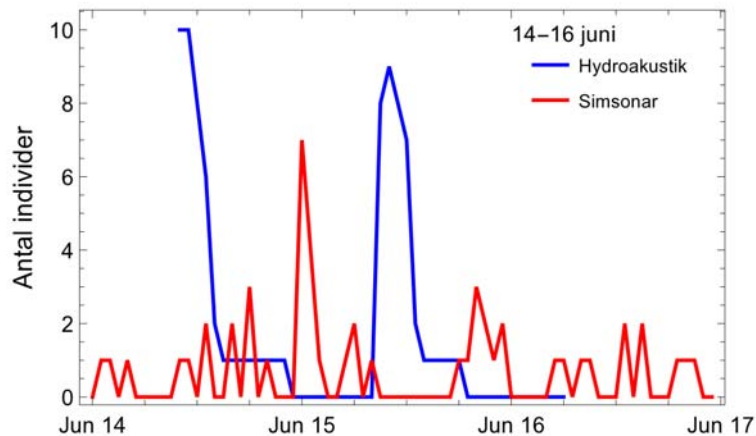
Enligt tolkningen av resultat från Simsonar för fisk i storleksintervallet 14-16 cm skedde en ökning av registreringar vid spilluckorna ca 10-12 timmar efter utsättning. Detta storleksintervall motsvarade storlekarna på den odlade smolten. Enligt registreringarna på de akustiska loggrarna hade ca 80 % av de märkta smolten lämnat området redan inom 5 timmar efter utsättningen. Registreringarna på Simsonar torde därför huvudsakligen bero på förekomst av andra arter i kammaren. Trots ökningen av registreringar av fisk på Simsonar vid spilluckorna 10-12 timmar efter utsättning var det få individer som passerade nedströms via spilluckorna enligt Simsonar (Figur 14).

För att få en tydligare bild av aktiviteten vid spilluckorna gjorde Simsonar en analys med en timmes upplösning för de dagar när smoltutsättningarna gjordes. Samma dag som den första utsättningen gjordes, den 7 juni, fanns inga detektioner på Simsonar. Den 8 juni fanns fem tydliga nedströmpassager registrerade av fisk i storleksintervallet 10-19 cm via Simsonar och fyra av dessa individer passerade samma tidsperioder som akustiskt märkt smolt passerade nedströms (Figur 16). I samband med det mer långvariga driftstoppet mellan klockan 18 på kvällen till klockan 7 morgonen efter passerade två smolt med akustiska märken. Dessa registrerades inte på Simsonar vid spilluckorna, men vid det tillfället var det den enda tillgängliga passagevägen. Dessa smolt bör därför ha passerat via smoltluckorna. Ingen märkt smolt passerade i samband med driftstoppet tidigare på dagen, det tyckts snarare som att nedströmsvandringen avstannade i samband med det driftstoppet (Figur 16).



Figur 16. Jämförelse mellan antal säkra fiskpassager via den östra spilluckan enligt Simsonar och antal smolt med akustiska märken som fanns i området från spilluckan och uppströms enligt de akustiska signalerna den 8 juni då en driftstörning inträffade mellan klockan 11-14 och mellan klockan 18-24.

Under perioden 14-16 juni registrerades fisk i storleksintervallet 10-18 cm vid den östra spilluckan på Simsonarutrustningen, dock utan att kunna avgöra om fisken passerade eller inte. Registreringarna antydde att smolt från utsättningen den 14 juni registrerades vid spilluckorna under eftermiddagen och kvällen (Figur 17). Däremot fanns inte motsvarande aktivitet vid spilluckorna efter att smolten släpptes den 15 juni. Merparten av de akustiskt märkta smolten hade passerat anläggningen när registreringar gjordes på Simsonar under kvällen och dagen efter.



Figur 17. Jämförelse mellan antal registreringar vid den östra spilluckan enligt Simsonar och antal akustiskt märkta smolt som fanns i området från spilluckan och uppströms enligt de akustiska signalerna under perioden 14-16 juni.

Enligt registreringarna på Simsonar-kameran som filmade uppströms i kammaren simmade merparten av fiskarna ytligt och få, <1 %, av fiskarna passerade via turbinerna enligt Simsonar-personalens tolkningar. Det bör dock noteras att det var stora mängder registreringar i den kameran och tolkningen försvårades av ett föremål som tolkades som ett rep som hängde ned i vattnet. Resultatet från den kameran stöder dock tolkningen att smolten uppehöll sig i kammaren en tid innan passage. Eftersom det inte går att särskilja individer med Simsonar kan varje fisk ha gett många registreringar. Dessutom torde tolkningen av fiskpassager via turbinerna med hjälp av denna utrustning vara osäkra eftersom fiskens träffyta i samband med passage kan vara mycket liten.

En sammanvägning av resultaten från Simsonar och den akustiska telemetrin stöder inte tolkningen att merparten av smolten skulle ha passerat via spilluckorna istället för via turbinen, snarare det omvända.

3.4 Observerad passageeffektivitet

Av smolten med akustiska märken som släpptes den 7 juni nådde 90 % området 1,4 km nedströms kraftverket, som valts som gräns för att tolka anländande smolt som levande (Figur 12). Det bedömdes som osannolikt att döda eller skadade smolt skulle kunna ta sig så pass långt i denna mycket lugnflytande del av ån. De smolt som överlevde passagen men var så pass skadade att de senare skulle avlidit hade med stor sannolikt fångats av gäddor innan de nått 1,4 km gränsen. 30 % av de akustiskt märkta smolten från denna omgång nådde loggrarna ca 13 km nedströms Bruksfors (Tabell 2). Detta ger en genomsnittlig vandringsförlust per kilometer från logger 1-2 till 3-4 på ca 13 % om man enbart räknar det effektiva avståndet med selområden som utgör de huvudsakliga gäddhabitatet. Med samma dödlighet i området uppströms logger 1-2 skulle den förväntade förlusten bli ca 16 %, vilket är något högre än vandringsförlusten från dammen till logger 1-2. Det går därför inte att utesluta att samtliga akustiskt märkta smolt överlevde passagen och att den smolt som inte nådde logger 1-2 blev uppäten av en gädda.

Utsättningen den 8 juni resulterade i två förluster av tio om man räknar på samtliga individer (8 av 10 tog sig vidare). Eftersom det uppstod ett driftsproblem i anläggningen i samband med denna försöksgrupp utgår tre individer ur utvärderingsgruppen eftersom dessa passerade anläggningen när turbinen stod stilla. Passageförlusten från dammen till logger 1-2 blev därför 29 % och liksom dagen innan passerade merparten av smolten inom de närmaste timmarna efter frisläppandet. En smolt stannade kvar uppströms i ca fyra dygn innan nedströmspassage. De tre individer som passerade anläggningen under driftstoppet tog sig även ned till logger 1 och 2. Av de 80 % som klarade den första etappen tog sig hälften vidare till logger 3-4. Den genomsnittliga mortaliteten per kilometer för denna grupp blev ca 8 %. Med den nivån på dödligheten blev förväntat bortfall från dammen till logger 1-2 ca 11 %, dvs nästan en tredjedel av det observerade bortfallet.

Eftersom förutsättningarna var likartade för de smolt som släpptes den 7 och 8 juni ger en sammanslagning av resultaten säkrare skattningar. Passageförlusten från dammen till logger 1-2 blev då ca 20 % om man räknar bort de tre individer som passerade under driftstoppet. Med en genomsnittliga dödlighet på ca 10 % per kilometer blev den förväntade "naturliga" förlusten från dammen till logger 1-2 ca 13 %. Den observerade dödligheten på ca 20 % var därför något högre än förväntad.

Resultaten från utsättningen av smolt den 14 juni, 40 cm spillvattennivå, uppvisade betydligt högre förluster från dammen till logger 1-2 jämfört med veckan innan. Passageförlusten från dammen till logger 1-2 var 40 % men liksom tidigare passerade merparten av smolten nedströms inom de närmaste timmarna efter frisläppandet. Samtliga smolt hade passerat nedströms innan nästa dags utsättning. Av de 60 % som klarade den första vandringsstapen tog sig en tredjedel vidare till logger 3-4. Den genomsnittliga mortaliteten per kilometer för denna grupp blev ca 13 %. Med den nivån på dödligheten blev förväntat bortfall från dammen till logger 1-2 ca 16 %, dvs knappt hälften av det observerade bortfallet.

Den sista smoltutsättningen resulterade i lägre förluster från dammen till logger 1-2 jämfört med dagen innan. Passageförlusten från dammen till logger 1-2 var ca 11 % och även denna gång passerade merparten av smolten nedströms inom de närmaste timmarna efter frisläppandet. Samtliga smolt hade passerat nedströms innan nästa dag. Av de 89 % som klarade den första vandringsstapen tog sig ca 37 % vidare till logger 3-4. Den genomsnittliga mortaliteten per kilometer för denna grupp blev ca 11 % vilket ger ett förväntat bortfall från dammen till logger 1-2 på ca 15 %, dvs några procent högre än observerat bortfall.

Tabell 2. Sammanställning av resultat från den akustiska telemetrin i form av antal individer (N) med registreringar i de olika loggerområdena, samt vandringsförluster och beräkning av den naturliga dödligheten. Passageförlusten beräknades som (100-andel₁₊₂)-beräknad predationsförlust.

Spillnivå (cm)	Datum	N ₀	N ₁₂	Andel ₁₂ (%)	N ₃₄	Andel ₃₊₄ (%)	Förluster från omr 12 till 34 (%)	Dödlighet per km selområden (8.1 km)	Beräknad predationsförlust (%)	Passageförlust (%)
20	2016-06-07	10	9	90%	3	30%	67%	0,136	16%	-6%
20	2016-06-08	7 (10)	5 (8)	71%	4	40%	50%	0,086	11%	18%
20, medel		8,5	7	82%	3.5	35%	59%	0,110	13%	4%
40	2016-06-14	10	6	60%	2	20%	67%	0,136	16%	24%
40	2016-06-15	9	8	89%	3	33%	63%	0,121	15%	-3%
40, medel		9,5	7	74%	2.5	26%	64%	0,127	15%	11%
Totalt				78%		31%	61%	0,117	14%	8%

En sammanslagning av resultaten för de smolt som släpptes den 14 och 15 juni resulterade i en genomsnittlig passageförlust från dammen till logger 1-2 på 26 % och med en genomsnittlig dödlighet på ca 12 % per kilometer blev den förväntade "naturliga" förlusten från dammen till logger 1-2 ca 15 %. En viss dödlighet i samband med passagen via turbinen kan därför inte uteslutas. Om man slår samman resultaten från samtliga fyra utsättningar blir den beräknade passageförlusten genom kraftverket 8 %.

I ovanstående beräkningar av dödlighet till följd av predation gjordes ingen justering för att en eventuell predatormättnad skulle varit större i området uppströms logger 1-2 till följd av att det fanns minst 60 alternativa smolt för gäddor och abborrar att välja bland i samband med varje utsättningsomgång. Risken för en enskild smolt att bli fångad av en rovfisk ökar med minskande antal fiskar i gruppen, dvs dödligheten förväntas öka nedströms. Anledningen till att man förväntar sig en sådan effekt är att antalet smolt som konsumeras av rovfiskar, och fiskätande fåglar, torde vara ungefär detsamma per kilometer. Eftersom antalet smolt minskar samtidigt som konsumtionen är densamma per kilometer ju längre ned i vattendraget man kommer blir konsekvensen att dödligheten uttryckt i procent ökar. En grov jämförelse i predationsrisk med hjälp av registreringar på loggrarna 1 och 2 jämfört med 3 och 4 kan göras om man antar att de smoltregistreringar som blev kvar i dessa områden i mer än en vecka berodde på gäddpredation. Avstånden mellan logger 1 och 2 respektive mellan logger 3 och 4 var ungefär desamma och samtliga av dessa loggrar var belägna i typiska gäddhabitat. Vid logger 1 och 2 var det två av 31 akustiskt märkta smolt som inte tog sig vidare, vilket ger en dödlighet på ca 6,4 % inom den sträcka på ca 400 m som täcktes av loggrarna. Omräknat till dödlighet per kilometer blir det ca 17 %. Vid logger 3 och 4 blev en av 12 akustiskt märkta smolt kvar, vilket ger en dödlighet på ca 8,3 %, vilket omräknat till dödlighet per km blir ca 17 %. Dessa beräkningar antyder inte att det skulle vara någon påtaglig skillnad mellan området 1,4-1,5 km nedströms Bruksfors jämfört med området som låg ca 13 km nedströms. Noterbart är att dessa resultat tyder på en högre dödlighet än de genomsnittliga värdena som uppmättes för den längre sträckan mellan de två loggerområdena. Resultaten från dessa beräkningar är förknippade med stor osäkerhet eftersom få individer har kunnat följas upp. Eftersom andelen smolt som försvann mellan kraftverket och logger 1+2 översteg 20 % samtidigt som den förväntade predationsförlusten inte hamnade över 20 % blir slutsatsen att en viss dödlighet orsakades av skador i samband med turbinpassagen, men att passagedödligheten snarare hamnade kring 2-8 % än kring 20 %.

Förväntad passageeffektivitet

StreamDiver är en horisontell propellerturbin med tre fasta turbinblad med en diameter på 1,155 m. Turbinen har 16 fasta ledskenor och ett varvtal på 375 varv per minut. Med dessa egenskaper förväntas smolt i storleksintervallet 10-20 cm ha passageförluster i storleksordningen 10-30 % (10 cm; 7-15 %, 15 cm; 11-22 %, 20 cm; 15-31 %) till följd av direkta träffar av turbinbladen. Eftersom smolten som användes i försöken var mellan 14 och 16 cm blir den förväntade förlusten ca 10-23 %. Förväntad passageöverlevnad via turbinen för smolten i försöken skulle därmed hamna på mellan 77 och 90 %. Merparten av smolten vandrar nära ytan, mellan 0 och 0,5 m, vilket framgår av den höga effektiviteten i smoltfällan som endast fångar ytligt simmande smolt. Även tolkningen av Simsonardata från kammaren tyder på att de flesta fiskar fanns nära ytan. Om smolten har följt strömlinjerna i kammaren skulle man förvänta sig 100 % överlevnad för de smolt som passerade via spilluckorna

(förväntad andel ca 57 %, Tabell 3) och 77-90 % överlevnad för resterande smolt. En sammanvägning av förväntat utfall för båda passagevägarna utifrån andelen strömlinjer som ledde till turbinen respektive spilluckorna ger ca 90-96 % passageöverlevnad. En viss nedjustering kan behövas av dessa värden på grund av att ledskenorna kan orsaka skada på fisken, vilket inte tas hänsyn till för Kaplan-turbiner i de matematiska modellerna som enbart baseras på turbinbladsträffar (von Raben 1957, Montén 1985, Leonardsson 2012).

Tabell 3. Förväntad andel smolt som tar sig till spilluckorna respektive turbinen med antagandet att de följer vattenströmningen passivt. Förväntad andel smolt till spilluckorna beräknades från andelen strömlinjer som inte slutade via turbinintaget. Sammanställningen av strömlinjer från CFD-modellering av anläggningen i Bruksfors har tillhandahållits av Staffan Lundströms forskargrupp, Luleå Tekniska universitet.

Djup (m)	Andel strömlinjer, CFD-modellering (%)		Förväntad andel smolt till spilluckorna
	Spilluckor	Turbin	
0,0-0,5	51	43	57
0,5-1,0	31	65	45
1,0-2,0	20	86	14

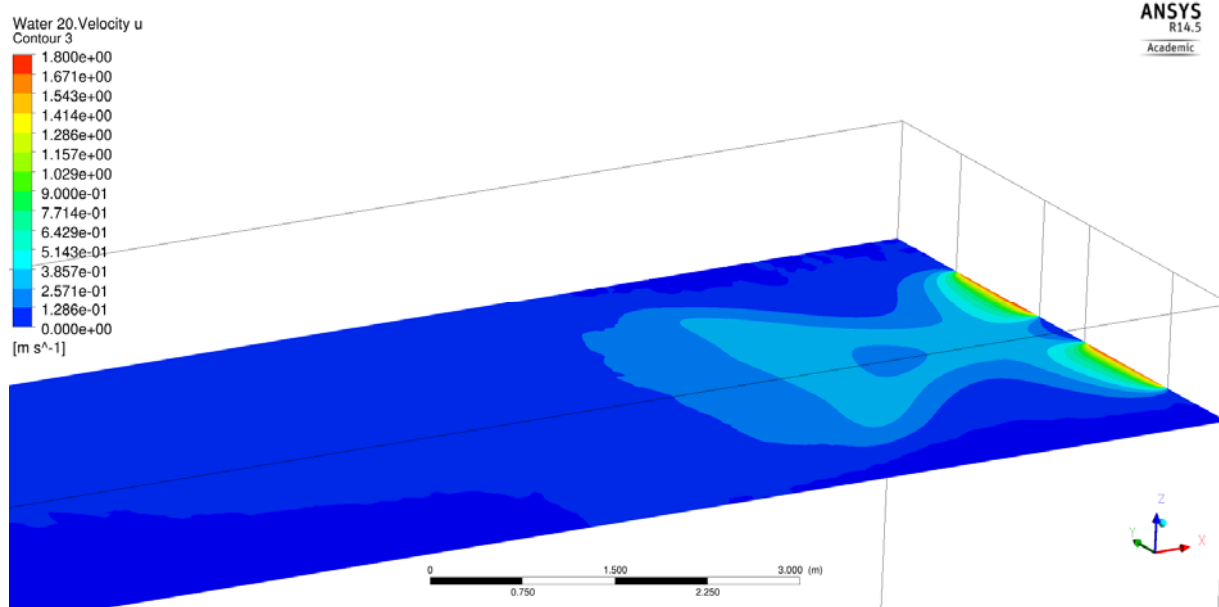
4. Diskussion

Den beräknade passageeffektiviteten, överlevnaden, för laxsmolten som användes vid utvärderingen blev ca 92-98 % genom anläggningen i Bruksfors. Trots den höga passageeffektiviteten verkar merparten av smolten ha passerat via turbinerna snarare än via spilluckorna. Den slutsatsen har dragits efter en sammanvägning av resultaten från akustiska telemetri och Simsonar. Det gick inte att fastställa med hjälp av SIMSONAR hur stor andel av smolten som passerade via spilluckorna respektive via turbinen. Om merparten av smolten faktiskt passerade via spilluckorna måste merparten passerat via luckan närmast kameran, vilket är osannolikt, eller så passerade en del smolt via spilluckorna utan att registreras på SIMSONAR. Resultaten från de två spillmängder som användes vid utvärderingen gav likartade resultat och om det var någon tendens till skillnader var det snarare att passageeffektiviteten var högre vid den lägre spillmängden. Skillnaderna var dock inom felmarginalen.

Passageeffektiviteten var något lägre än man skulle förvänta sig om samtliga smolt hade passerat via spilluckorna. Däremot stämmer effektiviteten med den förväntade, 90-96 %, om smolten passivt följt strömlinjerna i anläggningen. Enligt strömlinjerna skulle man förvänta sig att mer än hälften av smolten passerade via spilluckorna. Registreringarna på Simsonar vid spilluckorna tyder inte på att en så pass stor andel skulle ha passerat den vägen. Slutsatsen blir därför att en stor del av smolten passerade via turbinen och att den horisontella turbinlösningen ger något högre överlevnad än den beräknade överlevnaden med modellerna som utgår från en vertikal turbin. En andra slutsats är att om laxsmolt helt skall hindras att passera via turbinen bör intagsgallrets spaltvidd inte vara mer än 10-12 mm (Calles et al. 2013), att jämföras med de 35 mm öppningar som används vid anläggningen Bruksfors. Om ett finare galler skulle hindra smolten från att passera via turbinen finns

riskerna att smolten sugts fast mot gallret och omkommer. Inför en lösning med finare galler bör man göra beräkningar av strömhastigheter i anslutning till gallret för att fastställa att smolten inte riskerar att fastna på gallret.

Förutsättningarna för smolten att ta sig till spillluckorna var initialt goda eftersom de simmar ytligt och även om det finns en vertikal strömningskomponent kan smolten välja att stanna i ytskiktet. Två aspekter som skulle kunna få smolten att dyka när de kommer in i anläggningen är (1) att de blir skrämda, eller (2) att som en reaktion av en förändring av ljusförhållandet som uppstår i och med taket över anläggningen. En annan egenskap i anläggningen som skulle kunna få smolten att tveka inför en passage via spillluckorna är hastighetsgradienten nära spillluckorna (Figur 18). Det faktum att det helt plötsligt under nedströmsvandringen dyker upp ett fysiskt hinder med en liten flyktöppning, oavsett vattenaccelerationen, skulle också kunna vara en orsak till att smolten tvekar innan passage.



Figur 18. Hastighetskonturer från CFD-modellering av anläggningen i Bruksfors. Vattenhastigheten är relativt jämn i den övre delen av vattenmassan i en stor del av kammaren men ökar kraftigt nära spillöppningarna. CFD-modelleringen har gjorts av Staffan Lundströms forskargrupp vid Luleå tekniska universitet.

Ett flertal studier har visat att acceleration av vattnet påverkar smoltens nedströmsvandring, vanligen genom att smolten undviker områden med kraftig acceleration. Enders et al. (2009) undersökte undvikandebeteendet (flyktresponser) hos aktivt vandrande Chinook smolt (*Oncorhynchus tshawytscha*) under kontrollerade experiment med låg, medel och hög acceleration av strömhastigheten. Strömhastigheten när flyktresponser inträffade varierade mellan behandlingarna medan hastighetsgradienten var relativt konstant. Hastighetsgradienten (VG) mättes som differensen mellan hastigheten vid nosen och stjärtfenan, dividerat med fiskens längd. Mer än hälften av individerna reagerade innan VG nådde 1,0 cm/s per cm. För öringsmolt har VG för flyktresponser observerats i intervallet 0,2-0,4 cm/s per cm (Vowles et al. 2012). Vowles och Kemp (2012) visade också att öringsmolt var mer känsliga för hastighetsgradienter när det var ljust jämfört med när det var mörkt, dvs undvikanderesponser inträffade längre från området med kraftig acceleration

när det var ljusst. En liknande respons har påvisats för nedströmsvandrande Chinook smolt (Vowles et al. 2014). Undvikanderesponsen i dessa experiment ledde inte nödvändigtvis till att fiskarna stannade kvar uppströms, snarare att nedströmsvandringen blev fördröjd. Hastighetsgradienten vid spilluckorna på anläggningen i Bruksfors är troligtvis över den nivå som gör att smolten tvekar att fortsätta nedströmsvandringen. En viss fördröjning bör därför förväntas och om smolten under den tiden söker efter andra passagevägar ökar risken för att passagen sker via turbinen. Avståndet från spilluckorna till vattenintaget till turbinen är ca 20 m vilket innebär att vattnets strömhastighet ökar relativt långsamt mot turbinintaget. Smolten behöver därför inte uppleva en påtaglig acceleration på väg mot intaget till turbinen. När hastigheten är tillräckligt hög, ca 4-10 ggr fiskens längd per sekund, finns ingen återvändo (point of no return) för smolten eftersom den då inte längre klarar att simma mot strömmen.

För att åtgärda problemet med den skarpa hastighetsgradienten vid spilluckorna skulle man behöva ändra i konstruktionen för att sprida ut accelerationen över en längre sträcka vid spilluckorna. Ett alternativ skulle möjligen vara att störa hastighetsgradienten genom att skapa turbulens strax uppströms luckorna och på så vis försvåra för att upptäcka hastighetsgradienten. Coutant (1998) lanserade idén om att använda sig av turbulens för att locka fisk att passera dammar. Även om turbulensen inte lockar smolten skulle den troligen försvåra upptäckt av kritiska hastighetsgradients med en positiv effekt på passageeffektiviteten som följd. En liknelse överförd till ett av våra mänskliga sinnen, hörseln, vore att det är svårt att uppfatta ett brandlarm om lokalen samtidigt uppfylls av högljudd musik med höga frekvenser. Turbulensens inverkan på smoltens möjlighet att upptäcka hastighetsgradients behöver dock behöva testas experimentellt innan man tillämpar det vid vattenkraftsanläggningar. Sådana försök har påbörjats av Kerr (2015), dock ännu utan entydiga resultat.

Vad gäller ljusets betydelse visade Fields (1966), från undersökningar av laxvandring i Columbiafloden, McNay dam, att signifikant fler nedströmsvandrande smolt passerade genom upplysta flyktöppningar än genom icke upplysta. Flyktöppningar som belystes med 200 W lampor hade störst positiv effekt medan en starkare belysning, 1000 W, hade en negativ inverkan. I ett försök att avleda öringsmolt från inloppet till turbinerna vid kraftverket i Övre Finsjö, Emån, täckte Greenberg et al. (2012) området i anslutning till intaget med en mörk ogenomskinlig presenning. Presenningen var utplacerad ca 50 % av tiden under smoltvandringen med resultatet att 31 % av smolten undvek intaget till turbinen under den "mörklagda" perioden medan samtliga smolt passerade via turbinen när presenningen inte fanns på plats. Den miljö som smolten upplevde i samband med det försöket påminner om anläggningen i Bruksfors, där smolten kommer in i en mörkare miljö när de simmar in i kammaren. Det innebär inte att smolten nödvändigtvis dyker ned mot botten när de kommer in i den mörkare miljön, snarare att de skulle tveka att simma in i anläggningen. Erfarenheten från fiskodlingsmiljön, i kompensationsodling, är dock att laxungar söker sig ner mot botten när det blir mörkt (Kenneth Carlsson, Statkraft, pers. kommunikation). Det kan därför inte uteslutas att taket över anläggningen i Bruksfors gör att smolten vänder nedåt i vattenmassan och kommer då i kontakt med allt fler strömningslinjer som leder till turbinen. Med hjälp av belysning i taket på kammaren skulle man möjligen öka sannolikheten att smolten fortsätter nära ytan genom anläggningen fram till spilluckorna.

Förutom den höga passageeffektiviteten fanns ytterligare ett positivt resultat från utvärderingen. Nästan samtliga smolt passerade anläggningen samma dag som de släpptes. Det innebär att det går att förenkla framtida utvärderingar avsevärt genom att använda nätstrutar för att fånga upp all fisk som passerar via spilluckorna. Den huvudsakliga kostnaden för framtida utvärderingar skulle då utgöras av kostnaden för nätstrutarna och smolten, samt några dagars arbetstid för att genomföra och sammanställa resultaten från försöken.

5. Slutsatser

Den beräknade passageeffektiviteten, överlevnaden, för laxsmolten som användes vid utvärderingen blev ca 92-98 % genom anläggningen i Bruksfors. Trots den höga passageeffektiviteten verkar merparten av smolten ha passerat via turbinerna snarare än via spilluckorna. Den slutsatsen har dragits efter en sammanvägning av resultaten från akustiska telemetri och Simsonar. Det gick inte att fastställa hur stor andel av smolten som passerade via spilluckorna respektive via turbinen. Resultaten från de två spillmängder som användes vid utvärderingen gav likartade resultat och om det var någon tendens till skillnader var det snarare att passageeffektiviteten var högre vid den lägre spillmängden. Skillnaderna var dock inom felmarginalen.

Nästan alla smolt passerade nedströms samma dag som utsättningen gjordes. Det skulle därför vara möjligt att förenkla och förbilliga framtida utvärderingar av denna typ av anläggning genom att montera en nätstrut på varje spillucka och fånga upp smolten som passerar via spilluckorna.

6. Djurförsöksetiskt tillstånd

Projektet genomfördes i samarbete med Akvatiska Resurser, SLU, med etiskt tillstånd: Diarienummer C 16/14, Märkning av laxfisk och ål med PIT-, Carlin-, Dart-, Streamer- och Radiomärken inom det nationella programmet för datainsamling enligt internationella datainsamlingsdirektiv.

7. Erkännande

Vi vill tacka de som hjälpt till med märkning, transport och utsättning av laxsmolten. Bo-Sören Viklund har sett till att den tekniska utrustningen fungerat och funnits på plats i samband med utvärderingen. Bo-Sören och Erik Andersson har även skött smoltfällan och skannat fångad fisk för PIT-märken. Linda Vikström och Matti Erikoinen skötte fisktransporterna mellan Kvistforsens odling och Bruksfordsdammen. Ett tack riktas även till Anton på Kvistforsens fiskodling som såg till att vi enkelt kunde märka och förvara smolten innan transport.

8. Referenser

- Calles, O., E. Degerman, H. Wickström, J. Christiansson, S. Gustafsson och I. Näslund. 2013. Anordningar för upp- och nedströmspassage av fisk vid vattenanläggningar. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2013:14.
- Countant, C.C. 1998. Turbulent attraction flows for juvenile salmonids passage at dams. Oak Ridge National Laboratory. Environmental Sciences Division, Publication no. 4798. ORNL/TM/-13608. Oak Ridge, Tennessee.
- Enders, E.C., M. H. Gessel, and J. G. Williams. 2009. Development of successful fish passage structures for downstream migrants requires knowledge of their behavioural response to accelerating flow. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 66: 2109–2117.
- Fields, P.E. 1966. Final report on migrant salmon light guiding studies (contract # D.A.-45-108 Civeng-63-29) at Columbia River dams. College of Fisheries, Univ of Washington. U.S. Army Corps of Eng. 31 pp.
- Greenberg, L., O. Calles, J. Andersson, T. Engqvist. 2012. Effect of trash diverters and overhead cover on downstream migrating brown trout smolts. *Ecological Engineering*, 48: 25– 29.
- Kerr, J.R. 2015. Quantification of new methods, behaviour and hydrodynamics for improving fish passage at anthropogenic barriers. University of Southampton, Faculty of Engineering and the Environment, Civil, Maritime and Environmental Engineering and Science. PhD Thesis.
- Leonardsson, K. 2012. Modellverktyg för beräkning av ålförluster vid vattenkraftverk. Elforsk rapport, 12-36. (In Swedish, 84 pp.).
- Lundqvist, H., K. Leonardsson, U. Carlsson, S. Larsson, J. Nilsson, J. Östergren, L. Karlsson, P. Rivinoja, I. Serrano, D. Palm, J. Ferguson. 2010. Monitoring Juvenile Atlantic salmon and sea trout in the river Sävarån, northern Sweden. Chapter 20. In; C. Hurford, M. Schneider & I. Cowx (eds.), *Conservation Monitoring in Freshwater Habitats*, 2009, Springer. Printed in the Netherlands.
- Lundqvist, H., K. Leonardsson, D.-E. Lindberg, S. Westbergh, Å. Forssén och J.G.E. Hellström. 2014. Laxens nedströmsvandring mot fiskavledare till Stornorrfors fisktrappa i Umeälvens nedre del. Rapport 2014:1, Institutionen för vilt, fisk och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå.
- Liedtke, T., Rub, M., 2012. Techniques for telemetry transmitter attachment and evaluation of transmitter effects on fish performance. In: *Telemetry Techniques: A User Guide for Fisheries Research*, pp. 45–87.
- Lundström, T. S., M. Brynjell-Rahkola, A-L Ljung, J. G. I. Hellström, T. M. Green. 2015. Evaluation of Guiding Device for Downstream Fish Migration with in-Field Particle Tracking Velocimetry and CFD. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 8: 579- 589.
- Montén, E. 1985. Fish and Turbines: Fish Injuries during Passage through Power Station Turbines. Vattenfall, Stockholm, Sweden.
- von Raben, K. 1957. Zur Frage der Beschädigung von Fischen durch Turbinen. *Die Wasserwirtschaft*, 4: 97–100.
- Thedinga J.F., Murphy M.L, Johnson S.W., Lorentz J.M. & Koski K.V. 1994. Determination of salmonid smolt yield with rotary-screw traps in the Situk River, Alaska, to predict effects of glacial flooding. *North American Journal of Fisheries Management* 14, 837-851.
- Vikström, L. 2016. Effectiveness of a fish-guiding device for downstream migrating smolts of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in the River Piteälven, northern Sweden.

Examensarbete i ämnet biologi, 2016:10. Institutionen för vilt, fisk och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå.

Vowles, A.S., and P.S. Kemp. 2012. Effects of light on the behaviour of brown trout (*Salmo trutta*) encountering accelerating flow: Application to downstream fish passage. *Ecological Engineering* 47: 247– 253.

Vowles, A.S., J. J. Anderson, M.H. Gessel, J.G. Williams, and P.S. Kemp. 2014. Effects of avoidance behaviour on downstream fish passage through areas of accelerating flow when light and dark. *Animal Behaviour*, 92: 101-109.