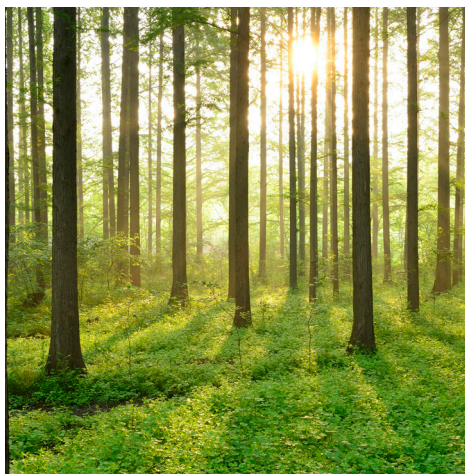


LÅGLUTANDE GALLER OCH BETYDELSEN AV SPALTVIDD FÖR LAXSMOLTPASSAGE

RAPPORT 2020:649



VATTENKRAFT

MILJÖPROGRAM
VATTENKRAFT



Energiforsk

Låglutande galler och betydelsen av spaltvidd för laxsmoltpassage

**NICLAS CARLSSON, DAVID ALDVÉN, DANIEL NYQVIST,
HANS RUND, JESSICA DOLK OCH OLLE CALLES**

ISBN 978-91-7673-649-4 | © Energiforsk februari 2020

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

Förord

Låglutande galler som installeras uppströms vattenkraftverk har visat sig ha en stor potential att leda laxsmolt mot säkrare passage förbi turbiner. Det är viktigt eftersom passage genom turbiner oftast förknippas med en förhöjd risk för skador på fisk.

Den här studien presenterar de första resultaten från avledningseffektivitet för atlantlaxsmolt för låglutande galler i laboratoriemiljö.

Projektet har letts av Olle Calles (Karlstad Universitet) tillsammans med Niclas Carlsson (Karlstad Universitet), Daniel Nyqvist (Karlstads Universitet), Hans Rund (Karlstad Universitet), David Aldvén (Vattenfall R&D) och Jessica Dolk (Sportfiskarna).

Projektet har följts av programmets styrgrupp bestående av Birgitta Adell (Fortum), Erik Sparrevik (Vattenfall), Johan Tielman (Sydkraft Hydropower), Rikard Nilsson (Holmen), Jakob Bergengren (Tekniska Verken i Linköping), Angela Odelberg (Statkraft), Sandra Åström (Skellefteå kraft) och Johan Lind (Mälarenergi).

Rapporten har tagits fram inom Miljöprogram vattenkraft som verkar för ny kunskap och en ökad kompetens om åtgärder inför beslut om investeringar i vattenkraft. Programmet koordinerats av Energiforsk och finansieras av Vattenfall Vattenkraft, Fortum, Sydkraft Hydropower, Statkraft Sverige, Skellefteå Kraft, Holmen Energi, Jämtkraft, Tekniska Verken i Linköping, Mälarenergi, Sollefteåforsens, Karlstads Energi och Jönköping Energi.

Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Låglutande galler installerade uppströms vattenkraftverk har visat en stor potential för att avleda laxfisksmolt mot säkrare passagevägar, vilket är av vikt då passage genom turbiner oftast associeras med förhöjd risk för skador. Denna studie presenterar de första resultaten rörande avledningseffektivitet för atlantlaxsmolt för låglutande galler i laboratoriemiljö.

Nedströmsmigrerande arter, till exempel atlantlax (*Salmo salar*) och europeisk ål (*Anguilla anguilla*) passerar vanligen ett vattenkraftverk genom dess turbiner, spillvägar eller fiskvägar. Dessa passager är oftast associerade med förhöjd skadefrekvens och dödlighet, ofta orsakade av turbinslag eller ökad predation i anslutning till kraftverket. En passageförbättrande åtgärd som visat stor avledningspotential för fisk till säkrare passagevägar är låglutande galler, som kan delas upp i α -galler, som leder fisken i höjddled, och β -galler, som leder fisken i sidled. Vid utvärdering av låglutande galler har det observerats att laxsmolt som fysiskt kan passera gallren inte alltid gör det. Detta indikerar att låglutande galler, förutom att utgöra fysiska avledare, även kan ha inslag av beteendeinducerad avledning. Det finns en utvecklingspotential vad gäller spaltvidd för låglutande galler, vilket är av intresse i och med avvägningen mellan elproduktion och fiskavledning, då kostnader generellt ökar med minskad spaltvidd på intagsgaller.

För att öka kunskapen kring låglutande galler förmåga att avleda laxsmolt utfördes sommaren 2018 en studie i strömrännan "Laxelatorn" (4 m bred, 2 m djup och 24 m lång) med α -galler (30° lutning) där två olika spaltvidder (15 och 30 mm) undersöktes vid en genomsnittlig vattenhastighet på cirka 0,4 m/s. Dessutom genomfördes hydrauliska mätningar och drivgodsöversök där tre olika typer av drivgods (boklöv, tallkottar och plastpåsar) testades för att undersöka α - och β -gallerens driftsegenskaper.

För α -gallren hade båda spaltvidderna en avledande förmåga på 73% för nedströmsmigrerande laxsmolt till intilliggande flyktöppningar och en medianpassagetid mellan 3,3 h (α -15 mm) och 4,4 h (α -30 mm). Generellt fastnade mer drivgods på gallren med 15 mm spaltvidd, plastpåsar undantaget, minst boklöv på α -30 mm och nästan inga tallkottar på gallren med 30 mm spaltvidd. Under försöken med boklöv observerades en markant fallförlust över 15 mm gallren (8–10 cm) medan fallförlusten var marginell för 30 mm gallren.

Resultatet för fiskavledningen stämmer väl överens med i litteraturen tidigare rapporterade resultat för medelavledningseffektiviteten vid nedströmspassage. Den observerade avledningseffektiviteten skiljde sig inte åt mellan de två spaltvidderna visar att låglutande α -galler har en fysisk men även beteendemässigt avledande funktion. Ur en skötsel- och produktionsperspektiv visade resultaten att galler med 30 mm spaltvidd är att föredra framför 15 mm. Underlaget till studien var ytterst begränsat och således bör resultaten inte övertolkas, men det finns ändå en utvecklingspotential för låglutande galler, i synnerhet om denna teknik implementeras vid stora kraftverk.

Summary

Low-sloping racks installed upstream of hydroelectric power plants has been suggested to have high potential for diverting salmon smolt to safer passage routes, which is important as passage through turbines usually is associated with mortality and increased risk of injury. This study presents the first results regarding diversion functionality on Atlantic salmon smolt for low-sloping racks in a laboratory environment.

Downstream migratory species, such as Atlantic salmon (*Salmo salar*) and European eel (*Anguilla anguilla*), typically pass hydroelectric power plants (HEPs) through its turbines, spillways or fishways. These passages are usually associated with increased risk of injury and mortality, often turbine induced or caused by increased predation adjacent to the HEPs. One fish passage solution that's been identified to have high potential to divert fish to safer passage routes is low-sloping racks, which can be divided into α -racks, which guide the fish vertically, and β -racks, which guide the fish sideways. Evaluations of such racks have indicated that, in addition to functioning as a physical barrier, it may also induce behavioral guidance; i.e. smolts that physically could pass the racks do not always do so. Thus, there is potential for development in terms of bar spacing for low-sloping racks, which is of interest because of the trade-off between electricity production and fish diversion, as costs generally increase with a reduced bar spacing on intake racks.

In order to increase the knowledge of the function of low-sloping racks for salmon smolts, a study was conducted in the summer of 2018 in the experimental flume "Laxeleratorn" (4 m wide, 2 m deep and 24 m long). An α -rack (angled 30 ° to the bottom) with two different bar spacings (15 and 30 mm) was evaluated for salmon smolts at an average water velocity in the flume of about 0.4 m/s. In addition, hydraulic measurements and debris tests were conducted for both types of racks (α and β) in which three different types of debris (beech leaves, pine cones and plastic bags) were tested to examine the self-cleaning ability of the racks.

For the α -racks, both bar spacings had a fish guidance efficiency (FGE) of 73% for guiding downstream migrating salmon smolts to an adjacent bypass. The corresponding median passage time was 3.3 h for α -15 mm and 4.4 h for α -30 mm. More beech leaves and pine cones were impinged on the 15 mm rack as compared to the 30 mm rack. The lowest amount of leaves were impinged on the α -30 mm and almost no pine cones were impinged on the 30 mm racks. During the leaf trials, a significant head loss was observed over the 15 mm rack (8-10 cm) while the head loss was marginal for the 30 mm rack.

The result from the fish diversion study corresponds to previously published results in literature. The similar guidance efficiency between the two bar spacings indicate that low-sloping α -racks guide smolts both physically and behaviorally. From a maintenance and production point of view, the results indicates that racks with 30 mm bar spacing are preferred over 15 mm. In spite of a very limited data set, the results show on a potential for further development of low-sloping racks.

Innehåll

1	Bakgrund	7
2	Metod	9
2.1	Studiedesign	9
2.2	Smoltförsök	11
2.3	Drivgodsförsök	11
2.4	Hydrauliska tester	12
2.5	Analys	12
3	Resultat	13
3.1	Smoltförsök	13
3.2	Drivgodsförsök	14
3.3	Hydrauliska tester	17
4	Diskussion	19
5	Referenser	22

1 Bakgrund

Fragmentering är tillsammans med habitatförlust de största hoten mot både terrester och akvatisk biodiversitet (Andrén, 1994; Marmulla, 2001). Utbyggnad i form av dammar och vattenkraftverk har lett till ändrade flödesregimer, habitatdegradering och minskad konnektivitet i vattendrag (Ward & Stanford, 1995), vilket har orsakat populationsminskningar och i vissa fall lokala utrotningar av migrerande fiskarter (Jonsson, m.fl., 1999; Marmulla, 2001). Ett stort antal åtgärder har historiskt utförts för att återställa den longitudinella konnektiviteten i utbyggda vattendrag, till exempel i form av olika typer av fiskvägar, med varierande framgång (Noonan, m.fl., 2012). Fokus för åtgärdsarbetet i reglerade vattendrag har främst lagts på passageproblem för uppströmsvandrande fiskar, medan mindre uppmärksamhet har riktats mot de problem som drabbar de fiskar som vandrar nedströms (Arnekleiv, 2007; Calles m.fl. 2013).

Nedströmsmigrerande arter, till exempel atlantlax (*Salmon salar*) europeisk ål (*Anguilla anguilla*) och öring (*Salmo trutta*) passerar vanligen ett vattenkraftverk genom dess turbiner, spillvägar eller fiskvägar (Larinier, 2008). Dessa passager är oftast associerade med både direkt och fördröjd mortalitet samt en förhöjd skadefrekvens (Norrgård m.fl. 2013; Muir, W, D m.fl., 2011; Calles m.fl. 2015). Till stor del orsakas mortalitet och skador av ökad predation i anslutning till kraftverket samt vid passage genom turbiner där fisk kan utsättas för slag av turbinblad, och skador orsakade av skjuvkrafter och hastiga tryckskillnader (Calles m.fl. 2013). Mortaliteten för juvenila salmonider vid passage genom ett kraftverk varierar mellan olika studier, men en direkt mortalitet kring åtminstone 10 procent är vanlig (Calles m.fl. 2013). Om fisken passerar flera kraftverk i följd kan den kumulativa dödligheten bli betydande och i vissa fall kan en betydande del av smoltproduktionen gå förlorad (Coutant & Whitney. 2000; Norrgård m.fl., 2013). Juvenila salmonider uppvisar även ofta en fördröjning i sin vandring i anslutning till vattenkraftverk och dammar (Norrgård et al. 2013, Aarestrup & Koed 2003), troligtvis delvis orsakad av ett undvikande beteende för snabbt accelererande vatten (Nyqvist m.fl, 2017) och svårigheter att finna rätt väg (Jepsen et al. 1998). Fördröjning kan leda till en missanpassning mellan tidpunkten för vandring och optimala förhållanden för överlevnad och födosök (Marschall m.fl, 2011) och i vissa fall till desmoltifiering (Raymond 1979).

Flera passageförbättrande åtgärder har implementerats vid vattenkraftverk för att underlätta nedströmspassage för laxsmolt (Noonan m.fl. 2012). Syftet har varit att avleda fisken från passagevägar associerade med hög mortalitet och skadefrekvens till säkrare förbipassager eller uppsamlingsanordningar. Avledningen av fisk kan vara beteendeeinducerad (luftbubblor, ljus, ljud och hydraulik) eller fysisk (konventionella och fiskanpassade galler samt ledarmar) men många tekniker har inslag av båda varianter. Många fiskarter, däribland laxsmolt, har visat sig kunna avledas effektivt med till exempel Louvergaller där spaltvidden inte utgör ett fysiskt hinder (Harza, 1992; Scruton m.fl 2008). Här utgör turbulensen i vattnet ett beteendemässigt hinder som fisk i många fall repelleras av (Coutant & Whitney, 2000). Fiskanpassade galler som fysiskt hindrar fisken att passera förekommer i

dag vid flera kraftverk i Europa, men fortfarande är kunskapen bristfällig vad gäller flera aspekter av åtgärdernas design.

I dag finns ett fåtal nedströmspassagelösningar i form av låglutande galler i drift vid små- till medelstora kraftverk, för vilka man påvisat en god avledande funktion för blankål och laxfisksmolt utan en betydande negativ påverkan på drift och säkerhet (Emanuelsson et al., 2017). Låglutande galler delas vanligen upp i α - och β -galler, där α -galler leder fisken mot flyktöppningar belägna vid ytan och β -galler leder fisken mot flyktöppningar belägna vid intagskanalens sida. Dessa lösningar har gemensamt att gallren har en lutning i förhållande till vattnets strömriktning om 30-35°, en spaltvidd om 15-18 mm samt en eller flera flyktöppningar vid gallrets slut. Det är dock inte klarlagt vilken kombination av lutning respektive spaltvidd som ger högst fiskavledande effektivitet och minsta produktionspåverkan. Vad gäller spaltvidden har man vid utvärdering av åtgärderna utöver en god avledande funktion även observerat att fisk som fysiskt kan passera gallren inte alltid gör det. Det finns således en kunskapsbrist och därmed en utvecklingspotential vad gäller spaltvidden för låglutande galler.

Det finns en avvägning mellan elproduktion och fiskavledning där anläggningskostnader, produktionsbortfall och behovet av rensning av intagsgaller ökar med minskad spaltvidd, medan liten spaltvidd är att föredra för fiskavledning. Som redan nämnts kan dock låglutande galler dels leda fisken fysiskt och dels beteendemässigt. Rekommendationerna för spaltvidd på ett låglutande galler varierar i dag mellan 10 och 20 mm, men kunskap om i vilken utsträckning låglutande galler med större spaltvidd kan leda fisk saknas. Denna studie undersöker hur α -galler med två olika spaltvidder, 15 och 30 mm, påverkar ettårig odlad laxsmolt med avseende på passageeffektivitet och passagetid i en strömränna, "Laxeleratorn" i Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby. Hypotesen var att låglutande galler har både en fysisk och en beteendemässig avledande funktion, vilket innebär att även laxar som fysiskt kan passera gallret väljer att inte göra det utan att de i stället visar en preferens för flyktöppningarna. Även tre olika typer av drivgoods testades för att undersöka gallrens självrensande förmåga.

2 Metod

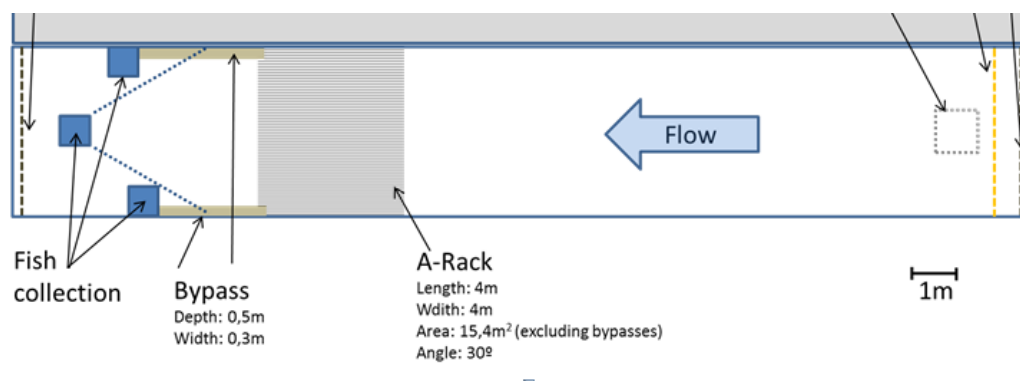
2.1 STUDIEDESIGN

Studien genomfördes i en 24 meter lång, 4 meter bred och 2 meter djup strömränna (Figur 1, Figur 2), vid Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby. Smoltförsöken i strömrännan bestod av två behandlingar i form av låglutande α -galler med olika spaltvidd, 15 respektive 30 millimeter. Båda gallren var 4 meter långa och 4 meter breda med en 30° vinkel i förhållande till rännans botten. Gallren var konstruerade i aluminium där gallerjärnen var vinklade i samma riktning som huvudströmmen, dvs. i enlighet med konventionella intagsgaller. I ytan vid gallrets ytterkanter fanns två flyktöppningar som var 0,3 meter breda och 0,5 meter höga vars sammanlagda area var $0,3 \text{ m}^2$. Respektive öppning ledde vidare till en separat fångstenhet (sump) via en flykträna med samma dimensioner som flyktöppningarna. På gallrets understa del fanns ett 0,5 meter högt överdrag av aluminium som täckte 2 m^2 och gallrens våta area uppgick därmed till $13,7 \text{ m}^2$. Cirka tio meter uppströms gallret, centralt placerad i strömrännan, fanns en sluten acklimatiseringsbox med en volym av cirka $0,1 \text{ m}^3$ (0,3 m bred, 0,35 m hög och 1 m lång) i vilken fisken manuellt placerades via ett rör från sidan av strömrännan. Acklimatiseringsboxens ändar bestod av hålplåt och två manuella öppningar i vardera änden möjliggjorde frisläppning av fisken. I vardera änden av strömrännan blockerade två finmaskiga nät spridning av fisken utanför försöksområdet. I nätet längst nedströms fanns dessutom, i nätets översta del och centralt beläget, en flyktväg med tillhörande fångstenhet vars syfte var att samla in fisk som passerat igenom gallret. För att följa fiskens rörelser placerades två PIT-tag-antennerna i respektive flyktöppning. Antennerna detekterade fisken cirka en halvmeter in i flyktöppningen, det vill säga fisken detekterades endast om den simmat ett stycke in i flyktöppningen i fråga. Vid detektion av en PIT-antenn registrerades information om vilken fisk som detekterats samt vid vilken tidpunkt detta inträffat. Sex kameror placerade utanför plexiglasets riktade mot gallret (tre på vardera sidan) detekterade dessutom fisk som närmade sig gallret och flyktöppningarna.

De hydrauliska testerna och drivgodsförsöken bestod av, förutom de två α gallren, två låglutande β galler (30° vinkel i förhållande till strömriktningen) med spaltvidder på 15 respektive 30 mm. Gallerjärnen var, likt för α gallren, vinklade i samma riktning som huvudströmmen. β gallren var 6,8 meter långa och 2 meter höga vilket gav en våt area av $13,6 \text{ m}^2$. I gallrets nedströms belägna ände fanns en ramp som ledde upp till en flyktöppning vars bredd (0,6 m) och höjd (0,5 m) gav en sammanlagd area på $0,3 \text{ m}^2$. Flyktöppningen ledde, likt vid α gallren, vidare till en separat fångstenhet (sump) via en flykträna med samma dimensioner som flyktöppningen.



Figur 1. Försökupställning för test av passage av laxsmolt av ett låglutande galler med 15 mm spaltvidd. Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby 2018.



Figur 2. Schematisk överblick av försöksupställning för test av passage av laxsmolt av låglutande galler med 15 respektive 30 mm spaltvidd. Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby 2018.

2.2 SMOLTFÖRSÖK

Till studien användes odlad ettårig laxsmolt ($n=52$, medellängd ± 1 SD = $133,1 \pm 11,4$ mm) från Sveriges lantbruksuniversitets Fiskeriförsöksstation i Älvkarleby. Samtliga fiskar var >100 mm och märktes därför med 23 mm PIT-tags (Oregon RFID, Portland, USA) (Rek. Larsen m.fl., 2013) den 30 maj samt 8 juni, cirka 1 månad innan de användes i försöken. I samband med märkningen noterades smoltens PIT-ID, totallängd (mm), vikt (g), höjd (mm) samt att skadeförkomst noterades. Innan försöket förvarades fisken i väl tilltagna (cirka $3,5 \text{ m}^3$) strömsatta cirkulära förvaringstankar i anslutning till Laxelatorn.

För båda spaltvidderna hos α gallren sattes 26 PIT-märkta laxsmolt ut vid samma tidpunkt under eftermiddags/kvällstid den 28 juni (α 15 mm) respektive den 2 juli (α 30 mm). Medellängden ± 1 SD för smolten var $128,9 \pm 11,3$ mm (15 mm) och $137 \pm 10,1$ mm (30 mm) där ett Mann Whitney visade en oavsiktlig skillnad i längddistributionen mellan de två grupperna ($U=203$, $p=0,013$). Efter att smolten tillbringat 15 minuter i aklimatiseringsboxarna öppnades luckan och smolten kunde lämna boxen. Ytvattenhastigheten var cirka 0,4 meter/sekund och vattentemperaturen var $19,7^\circ\text{C}$ under försöket med 15 millimeter spaltvidd och $18,8^\circ\text{C}$ för 30 millimeter spaltvidd. Båda försöken genomfördes under konstanta dagsljusförhållanden och respektive försök avbröts efter 17 timmar.

Fisken kunde passera α -gallret genom någon av flyktöppningarna till respektive fångstenhet eller genom att passera genom gallret. Individer som vid minst ett tillfälle detekterades av någon av de två antennerna i flyktöppningarna, definierades som "lyckad passage", medan individer som inte detekterades av någon antenn i flyktöppningarna definierades som "misslyckad passage". Efter avslutat försök stängdes flödet av, vattennivån sänktes varefter fisken samlades upp med hjälp av håvar och elfiskeutrustning.

2.3 DRIVGODSFÖRSÖK

Försök med drivgods utfördes 19-20 november 2018. Vid försöket testades tre olika sorters drivgods: boklöv, tallkottar och plastpåsar som släpptes ut uppströms de olika gallertyperna (α 15, α 30, β 15, β 30). Mängden drivgods som användes vid

varje försök var 12,5 kg boklöv, 4 kg tallkottar respektive 24 plastpåsar (hundpåse, cirka 5 liter).

Försöket pågick tills drivgodset fastnat och inga omfattande förflyttningar längre observerades. Försökstiden skiljde sig åt mellan drivgodstyper och försöken med boklöv pågick därför 30 min, försöken med tallkottar pågick 20 min och försöken med plastpåsar pågick 10 min. Nätet nedströms gallret rensades kontinuerligt under försökets gång, för att inte påverka vattennivån nedströms gallret. Hastigheten vid drivgodsförsöken var knappt 0,4 m/s.

Efter avslutat försök noterades mängden drivgods som påträffades på gallret, i flyktöppning (-ar) samt den mängd som passerat gallret.

2.4 HYDRAULISKA TESTER

De hydrauliska testerna utfördes med en Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). Mätningarna utfördes på två djup 0.1m och 1.1m, och vid fem punkter i tvärsnittet för båda gallren. Tryckfallskoefficienten bestäms genom att mäta nivån före och efter gallret och normeras med medelhastigheten 0,33 m/s.

2.5 ANALYS

Avledningseffektivitet (Fish Guiding Efficiency, FGE) för respektive behandling beräknades enligt följande formel:

$$FGE = L / (L+M)$$

där L är antalet fisk som lyckats passera gallret (fisk som har detekterats i någon av flyktvägarna) och M är antalet fisk som misslyckats passera gallret (fisk som endera passerat genom och fångats nedströmsgallret eller stannat uppströms gallret).

Av de fiskar som detekterats flera gånger vid PIT-antennerna räknades de fiskar som hade ett glapp om minst en timme mellan detektioner som upprepade lyckade passager. De fiskar som registrerades kontinuerligt i minst en timme vid någon av antennerna räknades som att de uppehöll sig i en flyktöppning.

Drivgodsförsöket analyserades enligt mängd drivgods som påträffades på gallret, i flyktöppningar respektive nedströms gallret.

3 Resultat

3.1 SMOLTFÖRSÖK

Avledningseffektiviten FGE (Fish guidance efficiency) var lika hög för de två testade spaltvidderna, eftersom 19 av 26 individer detekterades av PIT-antennen i minst en av flyktöppningarna för både 15- och 30 mm spaltvidd (Tabell 1).

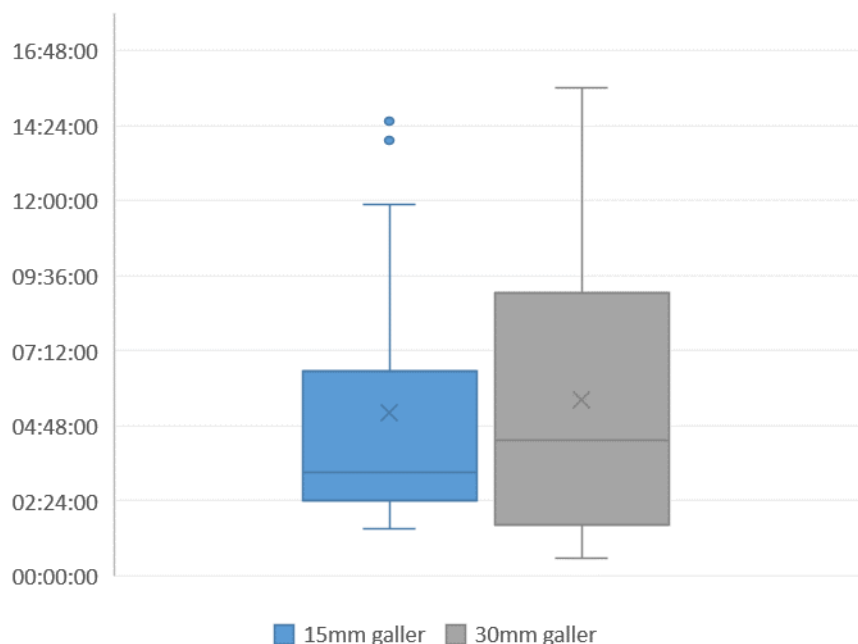
Tabell 1. Avledningseffektivitet (FGE) för laxsmolt vid 17 timmars passageexperiment för α -galler med 15 och 30 millimeters spaltvidd. Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby 2018.

Spaltvidd	Antal försök	Tid (h)	Antal smolt/försök	Totalt antal smolt	Lyckad passage (antal)	Misslyckad passage	FGE (%)
15 mm	1	17	26	26	19	7	73
30 mm	1	17	26	26	19	7	73

Mediantiden för de individer som lyckades passera gallret med 15 millimeter spaltvidd var 3,3 h (min-max= 1,5-14,5 h) och för fiskar som lyckades passera gallret med 30 mm spaltvidd var motsvarande mediantid 4,4 (min-max= 0,6-15,6 h, (Figur 3). Det var dock inte någon signifikant skillnad i tid för lyckad passage mellan 15 och 30 millimeter spaltvidd (Mann-Whitney, $U_{38} = 172$, $p = 0,81$).

Fördelningen av passager skiljde sig något åt mellan de två gallertyperna där fler individer besökte höger flyktöppning (elva individer) än vänster flyktöppning (åtta individer) för gallret med 15 mm spaltvidd. För gallret med 30 mm spaltvidd var fördelningen den omvända, dvs. fler individer besökte vänster flyktöppning (elva individer) än höger flyktöppning (åtta individer). Av de 19 fiskar som detekterats vid en av antennerna i flyktöppningarna för vardera spaltvidd detekterades även sju av dessa fiskar i 15 mm vid den andra antennen någon gång under försöket och motsvarande antal fiskar för gallret med 30 mm spaltvidd var fem individer. Av de fiskar som genomförde en lyckad passage genomförde en majoritet ytterligare minst en till lyckad passage (21 av 38 fiskar). Ungefär en fjärdedel av fiskarna (10/38) uppehöll sig även i någon av flyktöppningarna minst en timme.

Passagetiden skiljde sig inte åt mellan vänster- (median = 3,6 h, min-max=0,6-13,9 h) och höger flyktöppning (median = 4,1 h, min-max = 0,6-15,6 h; Mann-Whitney, $U=154$, $p=0,452$). Passagetiden för respektive flyktöppning för de två spaltvidderna skiljde sig inte heller åt varken för vänster flyktöppning (15 mm: median =2,2h, min-max=1,5-13,9h; 30 mm: median = 5,2 h, min-max = 0,6-13,0) eller höger flyktöppning (15 mm: median = 4,6 h, min-max = 2,4-14,5 h; 30 mm: median = 2,1 h, min-max = 0,7-15,6 h).



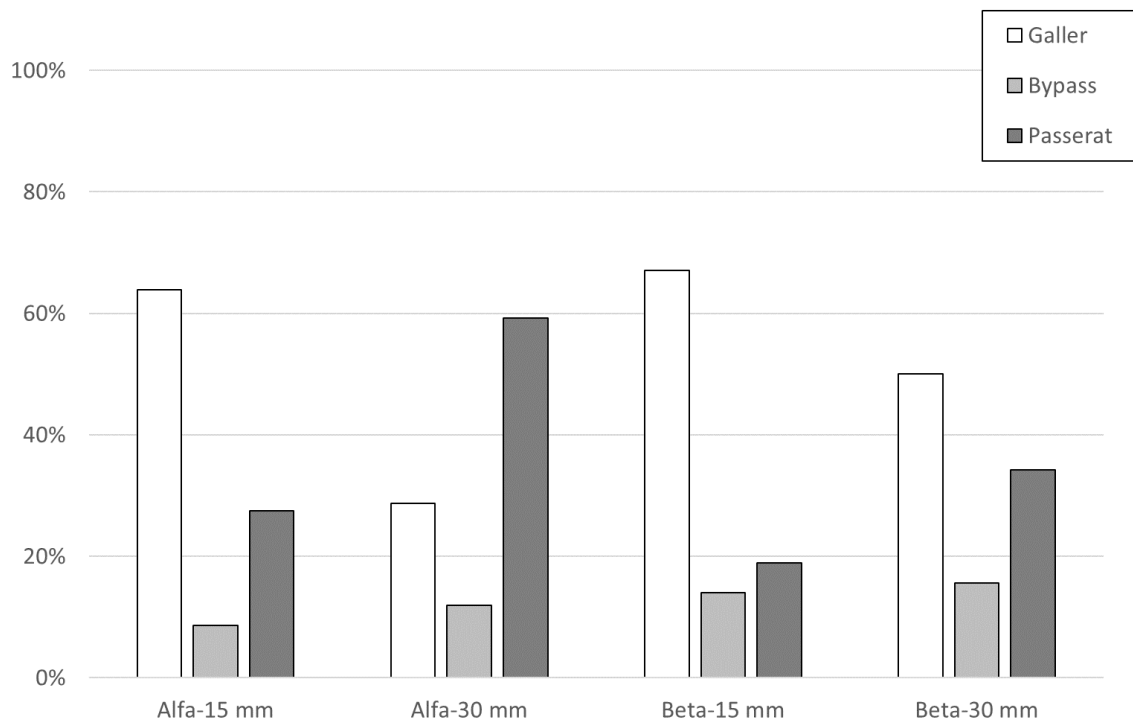
Figur 3. Tid i timmar från försökets start till lyckad passage, definierat som detektion på en av två PIT-antennerna i gallrets flyktöppningar, för passageexperiment på laxsmolt ($n=26+26$). Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby 2018.

Kamerorna vid gallret visade att samtliga smolt som registrerats av kamerorna närmade sig gallret simmandes med huvudet mot strömriktningen (s.k. positiv rheotaxis), oftast i omedelbar närhet av strömrännans väggar. Smolten anlände vanligen till gallret i anslutning till botten och följde därifrån gallret mot ytan och flyktöppningarna. I anslutning till flyktöppningarna höll fiskarna vanligen en position i strömmen, endast med småskaliga förflyttningar. Dessa positioner hölls oftast utmed strömrännans väggar och gallret snett nedströms eller intill en flyktöppning. Vid passagen av en flyktöppning släppte fisken sig alltid nedströms, fortfarande simmandes med huvudet mot strömriktningen, utan att vidröra gallret. Passage observerades vanligen efter att fisken bibehållit sin position i anslutning till flyktöppningen från allt mellan några minuter till någon timme men det förekom även observationer av fisk som utan uppehåll följde strömmen, undvek gallret och passerade in i flyktöppningen. Merparten av de fiskar som detekterades av en PIT-antenn och/eller av videokamerorna observerades återvända uppströms igen efter detektion och fångades således inte av flyktöppningarnas fångstenheter. Endast 1 av de totalt 38 individer (2,6 %) som genomförde vad som betecknades som en "lyckad passage" återfanns i en av fångstenheterna vid försökets slut. Ingen fisk observerades passera genom något av de två gallren.

3.2 DRIVGODSFÖRSÖK

Boklöven fördelade sig relativt jämnt i vattenmassan och cirka 2/3 av dem påträffades på gallren med 15 mm spaltvidd, medan ungefär hälften påträffades på β -30 och knappt 1/3 på α -30 (Figur 4). Det fanns en tendens till att mängden löv som påträffades i flyktöppningarna var något högre för β - (14-16 %) än för α -

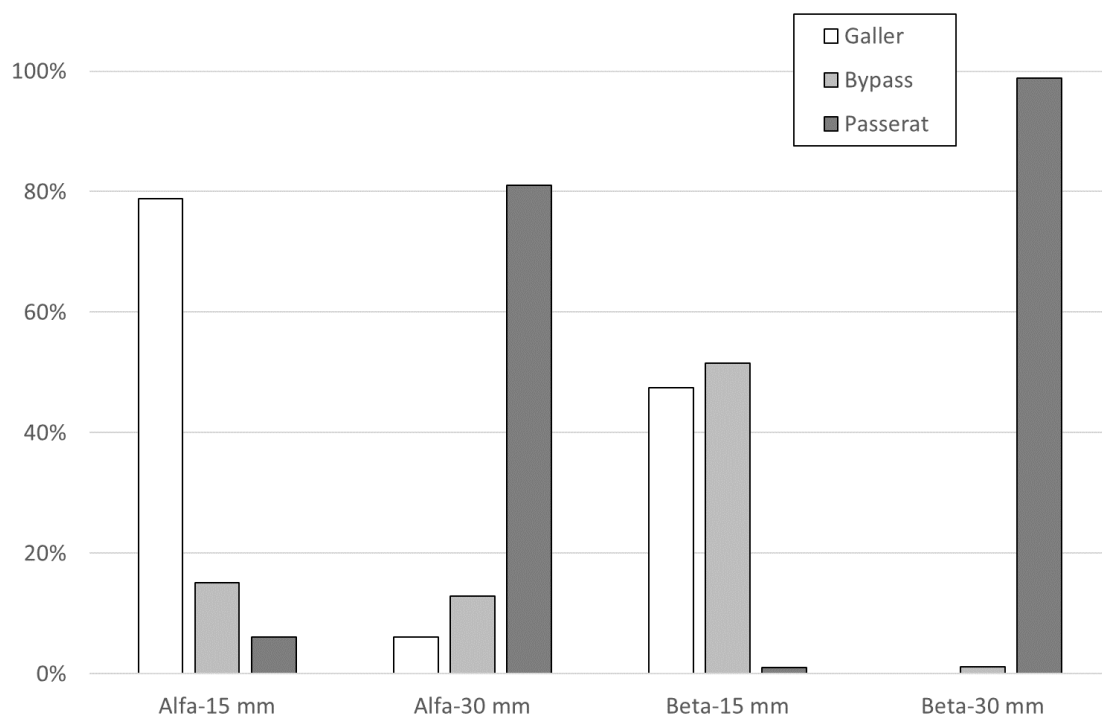
gallret (9-12 %. Störst mängd löv passerade genom α -30 (59 %) medan mängden passerade löv var snarlik för övriga galler (19-34 %).



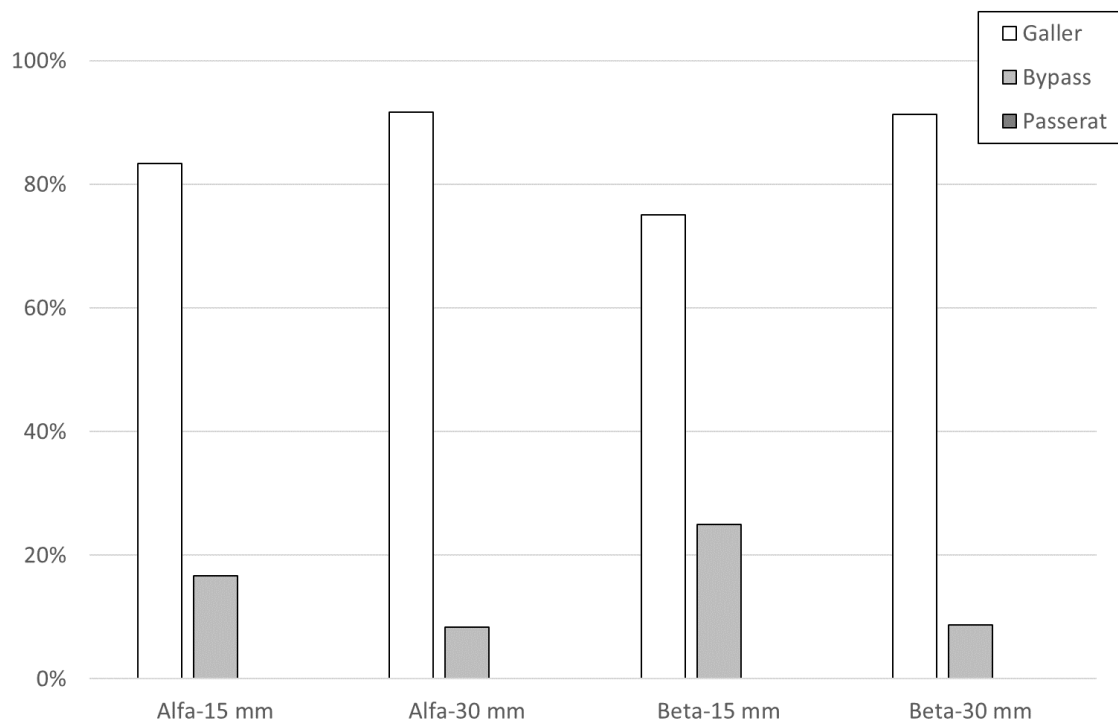
Figur 4. Fördelningen av boklöv efter drivgodsförsök för låglutande α - och β -galler med 15 respektive 30 mm spaltvidd. Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby 2018.

Det var stor skillnad i vilken utsträckning tallkottarna påträffades på de olika gallertyperna, där majoriteten av kottarna fastnade på α -15 jämfört med knappt hälften av kottarna på β -15 (Figur 5). Endast en liten andel kottar påträffades på 30-mm-gallren. Mängden kottar som påträffades i flyktöppningarna var oberoende av spaltvidd för α -gallren, medan cirka hälften av kottarna påträffades i flyktöppningen för β -15 och endast ett fåtal kottar för β -30.

Inga plastpåsar passerade någon gallertyp, utan påträffades i huvudsak på gallren (Figur 6). För båda gallertyperna fanns en tendens till att plastpåsarna i större utsträckning påträffades i flyktöppningarna för spaltvidden 15 mm än för 30 mm.



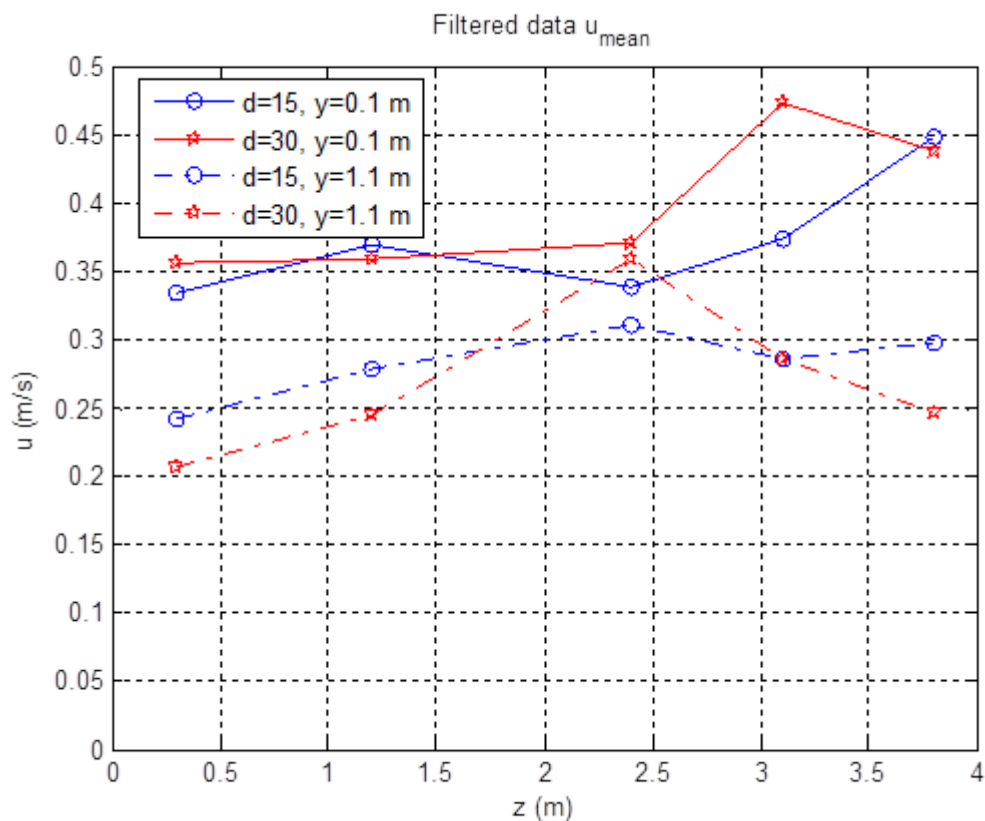
Figur 5. Fördelningen av tallkottar efter drivgodsförsök för låglutande α - och β -galler med 15 respektive 30 mm spaltvidd. Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby 2018.



Figur 6. Fördelningen av plastpåsar efter drivgodsförsök för låglutande α - och β -galler med 15 respektive 30 mm spaltvidd. Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby 2018.

3.3 HYDRAULISKA TESTER

Nära ytan är medelhastigheten i tvärsnittet 0,37 m/s för 15 mm spaltvidd och 0,39 m/s för 30 mm spaltvidd (Figur 7). Mitt i vattenvolymen är medelhastigheten 0,28 m/s och 0,27 m/s. Alla dessa variationer är inom mätnoggrannheten så slutsatsen är att spaltvidden på gallret inte påverkar strömningshastigheten då tryckfallet över gallret är en mindre del av det totala tryckfallet i hela rännan.

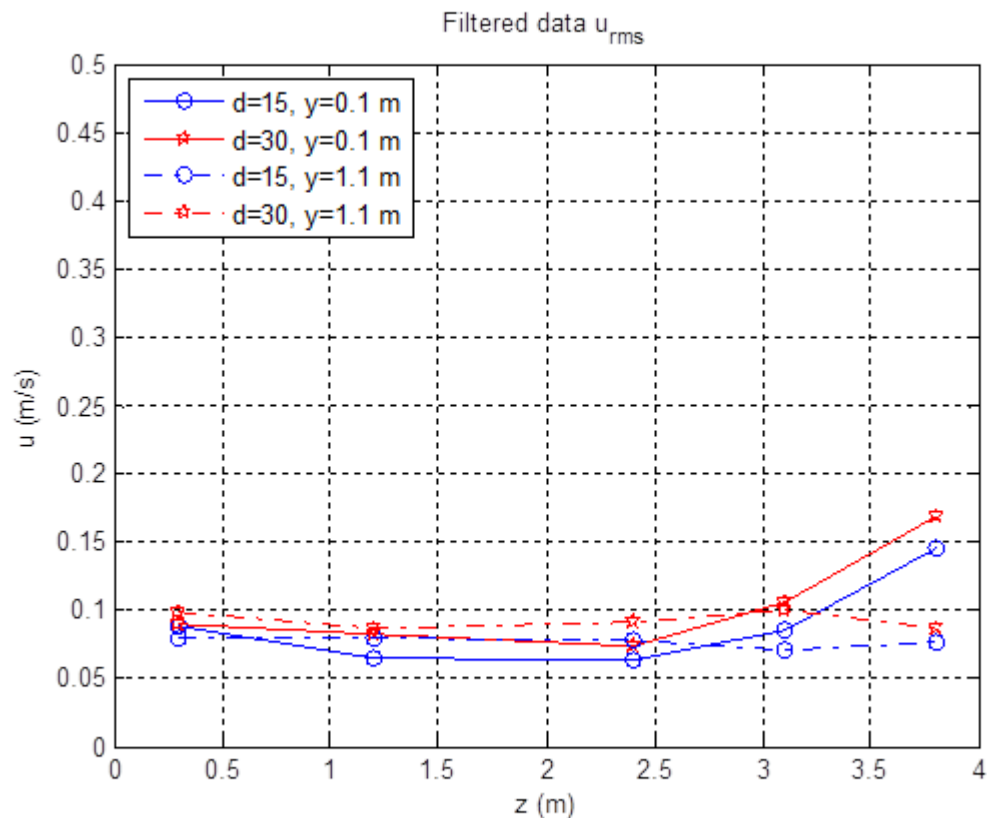


Figur 7: Hastigheten i strömningsriktningen i ett tvärsnitt uppströms gallret från rännans innersida ($z=0$) till yttersida ($z=4$) för två djup ($y=0.1$ m och $y=1.1$ m). Blå linje representerar 15 mm alfa-galler och röd linje 30 mm alfa-galler

Flödet i rännan är turbulent och fluktuerande och varierar signifikant i en enskild punkt över tid vilket syns i de relativt höga RMS-hastigheterna (Root Mean Squared) för fluktuationen kring medelvärdet (Figur 8). Dock är det totala volymflödet över tvärsnittet relativt konstant men till följd av rännans stora dimensioner sker kontinuerligt en omlagring av hastigheter i tvärsnittet och det går heller inte att utesluta att storskaliga virvelfenomen vid ejektorerna skapar variationer i hastighetsfältet långt nedströms. Bakom gallret ökar de turbulenta fluktuationerna 15% för samtliga gallerkonfigurationer till följd av gallergeometrin med fyrkantsprofiler.

Genom flyktöppningarna i gallret med 15 mm spaltvidd sker en acceleration av flödet med 10% för den högra (sett i strömningsriktningen) öppningen medans det

sker en deceleration med 10% i den vänstra flyktvägen till följd av den sneda hastighetsprofilen i rännan. För 30 mm spaltvidd sker en deceleration i båda flyktvägarna på 10% respektive 15%. Flödet genom flyktvägarna drivs i detta experiment enbart med tryckfallet över gallret varför de olika spaltvidderna medför olika flöde genom flyktvägen beroende på spaltvidd.



Figur 8: Fluktuationer i hastighetsfältet, rms-värdet, i ett tvärsnitt uppströms gallret från rännans innersida ($z=0$) till ytersida ($z=4$) för två djup ($y=0.1$ m och $y=1.1$ m). Blå linje representerar 15 mm alfa-galler och röd linje 30 mm alfa-galler

Tryckfallet för 15 mm spaltvidd är $C_d=0,61$ och för 30 mm är $C_d=0,25$ vilket stämmer relativt väl med handboksberäkningar för rektangulära gallerprofiler.

4 Diskussion

Avledningseffektiviteten för laxsmolt vid en vattenhastighet på 0,4 m/s var 73 % för låglutande α -galler, både för 15- och 30 mm spaltvidd, där 19 av 26 fiskar lyckades med sin passage under de 17 timmar försöken pågick. Resultatet är jämförbart med den i litteraturen rapporterade medelavledningseffektiviteten för nedströmpassagelösningar om 68,5 % (Noonan m.fl. 2012). Det faktum att avledningseffektiviteten var densamma för de båda spaltvidderna tyder på att låglutande galler har både en fysisk och en beteendemässigt avledande funktion. Om försöken pågått under en längre tid skulle avledningseffektiviteten sannolikt stiga ytterligare då det bland de fiskar som misslyckats med sin passage finns de som inte påbörjat sin nedströmsvandring efter utsättning i strömrännan. Fältstudier på avledning av laxsmolt visar att tid från utsättning till passage i vissa fall tar betydligt längre tid än de 17 h som den aktuella studien pågick (Nyqvist m.fl., 2018). Variationen i nyss nämnda studie var dock stor och vissa fiskar kunde ta flera dagar på sig innan de påbörjade sin nedströmsvandring och passerade kraftverket. För att i större utsträckning kunna kartlägga beteendet hos de individer som misslyckats passera gallret, bör kartläggningen av fiskens rörelser förbättras för att kartlägga i vilken utsträckning fisk passerat genom gallret, eller försökt passera gallret, under försöket.

Tid från utsättning till att fisken vandrade in i flyktöppningarna varierade stort mellan de individuella smolten, vilket stämmer överens med nedströmpassagestudier utförda i fält (Nyqvist m.fl., 2018). För 15 mm spaltvidd passerade den sista smolten efter 14,5 h och för 30 mm efter 15,6 h. Detta indikerar att avledningseffektiviteten sannolikt blivit högre än de observerade om studierna tillåtit fortsätta under en längre tid än 17 h. Om avledningseffektiviteten ökar vid en förlängd försökstid innebär det även att de genomsnittliga passagetiderna för grupperna ökar. Fisken visade dock inte på några signifikanta tidsmässiga skillnader för lyckad passage mellan 15- och 30 millimeter spaltvidd och inte heller mellan de två olika flyktöppningarna. Vår studie indikerade således en likartad funktion för de två spaltvidderna och de två flyktöppningarna, trots att underlaget var ytterst begränsat.

Kamerorna vid gallret visade att fisken närmade sig gallret och flyktöppningarna med huvudet mot strömriktningen (sk. positiv rheotaxis). Fisken avleddes av gallret från botten upp mot ytan utan att vidröra gallret, oftast nära strömrännans väggar. Majoriteten av den observerade fisken uppehöll sig i anslutning till flyktöppningarna en tid innan passage medan ett mindre antal följde strömmen och simmade in i flyktöppningarna utan uppehåll. Ingen skillnad i beteende kunde observeras mellan de båda spaltvidderna och ingen fisk observerades passera igenom gallret vilket kan peka på att den beteendemässiga funktionen under rådande förhållanden hos α -gallren är hög, men man bör ta i beaktande att antalet var begränsat och att studierna endast genomfördes vid ett tillfälle.

En hög andel av studiefiskarna passerade flyktöppningarna flera gånger, uppehöll sig en längre tid vid flyktöppningarna och endast en fisk fångades i flyktöppningens fångstanordning. En möjlig förklaring var att vattenhastigheten vid flyktöppningarna var för låg, eftersom man eftersträvar en vattenhastighet i

flyktöppningen som inte tillåter ett sådant beteende. Detta berodde främst på att det inte var möjligt att genomföra testerna vid en genomsnittlig vattenhastighet om 1,0 m/s, men kan även bero på en suboptimal design av flyktöppningarna. Mätningar i flyktöppningarna vid 30 mm gallret visade på att vattenhastigheten var lägre i flyktöppningarna än i rännan uppströms gallret, vilket inte följer de tumregler för funktionella avledare (NMFS, 2011). Dessutom var dessa vattenhastigheter betydligt lägre än hastigheten för både långvarig simhastighet och sprinthastighet för laxsmolt i liknande temperatur (Booth et.al 1997). För att minska tiden fiskarna spenderar i anslutning till flyktöppningarna och hindra fisk att simma tillbaka uppströms bör vattenhastigheten ökas i strömrännan och flyktöppningarna. För att detta ska vara möjligt kommer förbättringsåtgärder i strömrännan vara nödvändiga.

Avledningseffekten för låglutande α -galler i laboratoriemiljö visade sig vara relativt hög jämfört med många andra nedströmspassagelösningar (Noonan m.fl., 2012) och fisken passerade gallret in i flyktöppningarna efter en kort fördröjning. Detta är de första resultaten rörande avledningseffektivitet för låglutande α -galler och laxsmolt i laboratoriemiljö som producerats, i synnerhet i en ränna av dimensioner som tillåter tester under förhållanden som är jämförbara med ett litet fullskaligt kraftverk. Trots det begränsade underlaget visar resultatet att avledningseffektiviteten inte är så tätt förknippat med gallrets spaltvidd som man tidigare trott. För att få tydligare resultat på att så är fallet, krävs utökade studier och helst då under förhållanden som är mer representativa för ett småskaligt kraftverk i full drift, bl.a. en vattenhastighet om cirka 1 m/s och med en vattenhastighet i flyktöppningarna som är i storleksordningen 20 % högre. Ytterligare studier som undersöker hur vattenhastighet och temperatur påverkar avledningseffektivitet och passagetid bör göras för att efterlikna olika förutsättningar kring intagskanaler vid vattenkraftverk. Även studier med vild laxsmolt bör övervägas om möjligheten finns, eftersom det observerats stora skillnader i beteende och vandring mellan laxsmolt av odlad respektive vilt ursprung.

Generellt så fastnade mer drivgods på 15 mm gallren med undantaget plastpåsar där det fanns en tendens att fler påsar fastnade på 30 mm gallret. Vid försöken med boklöv observerades en markant fallförlust över 15 mm gallren (upp till 8-10 cm) medan fallförlusten var marginell för 30 mm gallren. Ur en skötsel och produktionssynpunkt visar resultaten att 30 mm gallren är att föredra framför 15 mm gallren, men resultaten hade varit mer relevanta om försöken inkluderat någon form av gallerrensning.

De hydrauliska testerna visade att hastigheten var något högre längs rännans yttersida vilket är en effekt av att vattnet vänder 180 grader i rännans ändar, vilket skapar en något skev strömningshastighet över tvärsnittet. Denna skevhet var mest uttalad nära ytan och skillnaderna avtog på större djup. Hastigheterna kan justeras genom att styra pumparna som driver vattnet i rännan individuellt, men det har inte gjorts vid dessa försök. Mätningarna visade att strömningshastigheten inte påverkas av spaltvidden, men att spaltvidden påverkar hastigheten i flyktvägarna på så sätt att 30 mm gav en lägre hastighet i flyktöppningarna jämfört med 15 mm. Tryckfallet över gallren var som väntat högre (ca 60%) för 15 mm än för 30 mm vilket gör att 30 mm gallret är att föredra ur produktionssynpunkt.

Sammantaget indikerade de hydrauliska mätningarna och drivgodsförsöken att mer drivgods, föga förvånande, fastnar på gallren med 15 mm spaltvidd än gallren med 30 mm spaltvidd. Försöken inkluderade inte någon rensning av gallren, men den högre igensättningen på 15 mm gallren orsakade en högre fallförlust än för gallren med 30 mm spaltvidd. Dessutom visade smoltförsöken en likartad avledande förmåga på nedströmsvandrande laxsmolt mellan de olika spaltvidderna för α -galler. Resultaten grundar sig dock endast på en utsättning per galler och bör tolkas med stor försiktighet. Resultaten talar dock för att ytterligare studier bör utföras där en större mängd smolt, fler replikat och beta-galler bör inkluderas i experimenten. Information om hur andra arter avleds, hur hastighet och flyktöppningarnas utformning påverkar avledningsförmågan är också något som behöver utredas vidare.

5 Referenser

Arnekleiv, J. (2007). Efforts to aid downstream migrating brown trout (*Salmo trutta* L.) kelts and smolts passing a hydroelectric dam and a spillway. *Hydrobiologia*. 582 (1). 1573-5117

Andrén, H. (1994). Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscape with different proportions of suitable habitat: a review. *Oikos*. 71, 355-366.

Booth, R, K., Bombardier, E, B., McKinley, R, S., Scruton, D, A & Goosney, R, F. (1997). Swimming Performance of post spawning adult (kelts) and juvenile (smolts) Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Canadian Manuscript report of fisheries and aquatic sciences*. Nr 2406. 24 sidor.

Calles, O, Degerman, E, Wickström, H, Christiansson, J, Gustafsson, S & Näslund I., (2013). Anordningar för upp -och nedströmspassage av fisk vid vattenanläggningar. Underlag till vägledning om lämpliga försiktighetsmått och bästa möjliga teknik för vattenkraft. *Havs-och vattenmyndighetens rapport 2013:14* ISBN:978-91-87025-39-6.

Calles O, Christiansson J, Kläppe S, Alenäs I, Karlsson S, Nyqvist D, Hebrand M. (2015). Slutrapport Hertingprojektet – Förstudie och uppföljning av åtgärder för förbättrad fiskpassage 2007-2015. Rapport, *Naturresurs rinnande vatten, Karlstads universitet*. 34 sidor.

Emanuelsson A, Christensen P, Mikaelsson F, Böjer M, Göransson F, Östberg J, Öhrfeldt U, Hemfrid-Schwartz Y, Noré P, Calles O. 2017. Fysiska avledare för uppsamling av blankål vid vattenkraftverk - Tekniska utmaningar och kostnadseffektiviseringar. *Energiforsk rapport*. 2017:458. 62 sidor.

Haro, A., Odeh, M., Noreika, J., & Castro-Santos, T. (1998). Effect of water acceleration on downstream migratory behavior and passage of Atlantic salmon smolts and juvenile American shad at surface bypasses. *Transactions of the American Fisheries Society*. 127, 118-127.

Jonsson, B., Waples, R., & Friedland, K. (1999). Extinction considerations for diadromous fishes. *ICES Journal of Marine Science. Journal du Conseil*. 56, 405-409.

Kemp P.S., Gessel M.H. & Williams J.G. (2005). Fine-scale behavioral responses of Pacific salmonid smolts as they encounter divergence and acceleration of flow. *Transactions of the American Fisheries Society*. 134, 390-398.

Larsen, M, H, Thorn, A, n, Skov, C, Aarestrup, K, (2013). Effects of passive integrated transponder tags on survival and growth of juvenile Atlantic salmon *Salmo salar*. *Animal Biotelemetry*. 1:19.

Marschall, E. A., Mather, M. E., Parrish, D. L., Allison, G. W., & McMenemy, J. R. (2011). Migration delays caused by anthropogenic barriers: Modeling dams, temperature, and success of migrating salmon smolts. *Ecological Applications*. 21(8), 3014-3031.

- Marmulla, G. (2001). Dams, fish and fisheries: Opportunities, challenges and conflict resolution. Rome, Italy: Food & Agriculture Org. 166 sidor.
- Muir, W. D., Smith, S. G., Williams, J. G., & Sandford, B. P. (2001). Survival of juvenile salmonids passing through bypass systems, turbines, and spillways with and without flow deflectors at Snake River dams. *North American Journal of Fisheries Management*. 21, 135–146.
- NMFS (2011). Anadromous salmonid passage facility design. National Marine Fisheries Service Northwest Region, 140 pages.
- Noonan, M. J., Grant, J. W., Jackson, C. D. (2012). A quantative assessment of fish passage efficiency. *Fish and Fisheries*. 13, 450-463.
- Norrgård, J. R., Greenberg, L. A., Piccolo, J. J., Schmitz, M., Bergman, E., (2013). Multiplicative loss of landlocked Atlantic salmon *Salmo salar* L. smolts during downstream migration through multiple dams. *River Research and Applications*. 29, 1306–1317
- Nyqvist, D., Greenberg, L., Goerig, E., Calles, O., Bergman, E., Arden, R. W., Castro-Santos, T. (2017). Migratory delay leads to reduced passage succes of Atlantic salmon smolts at a hydroelectric dam. *Ecology of Freshwater fish*. 26 (4), 707-718.
- Nyqvist D, Elghagen J, Heiss M, Calles O. 2018. An angled rack with a bypass and a nature-like fishway pass Atlantic salmon smolts downstream at a hydropower dam. *Marine and Freshwater Research*. Early online. 11 sidor.
- Svensson B.S., (2000). Hydropower and instream flow requirements for fish in Sweden. *Fisheries Management and Ecology*. 7, 145–155
- Ward JV, Stanford JA. (1995). Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation. *Regulated Rivers: Research & Management*. 11, 105–119

LÅGLUTANDE GALLER OCH BETYDELSEN AV SPALTVIDD FÖR LAXSMOLTPASSAGE

Låglutande galler som installeras uppströms vattenkraftverk visar sig ha en stor potential att avleda laxfisksmolt mot säkrare passagevägar.

De här forskningsresultaten är viktiga eftersom passage genom turbiner oftast förknippas med en förhöjd risk för skador på fisken. Resultaten visar också att effekten är oberoende av spaltvidden. Galler med 30 millimeters spaltvidd fungerar lika bra som de med 15 millimeters mellanrum, och är därför bättre ur ett skötsel- och produktionsperspektiv.

Forskarna har även gjort hydrauliska mätningar och försök med drivgods. Tre olika typer av drivgods har testats – boklöv, tallkottar och plastpåsar – för att undersöka driftegenskaperna för de två olika spaltvidderna i gallret.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk