

Låglutande galler och betydelsen av spaltvidd för passageeffektivitet och beteende hos nedströmsvandrande Europeisk ål (*Anguilla anguilla*)

Low-sloping racks and the importance of bar spacing for passage efficiency and behavior of downstream migrating European eel (*Anguilla anguilla*)

Niclas Carlsson

Fakulteten för hälsa, natur- och teknikvetenskap

Biologi: Ekologi och naturvård

Avancerad nivå, 30 hp

Handledare: Olle Calles

Examinator: Larry Greenberg

Datum: 2019-06-11

Löpnummer: 19:11

Sammanfattning

Sedan 1980-talet har det skett en stor populationsminskning av Europeisk ål (*Anguilla anguilla*), vilket delvis förklaras av utbyggnad av vattendrag i form av dammar och vattenkraftverk. För nedströmsvandrande ål associeras oftast en vattenkraftverkspassage med fördröjning i vandringen samt en hög skaderisk när ålen trycks fast mot intagsgaller eller passerar genom turbiner. En fysisk barriär som visat hög avledningspotential till säkrare passagevägar är låglutande galler, som kan delas upp i α -galler, som leder fisken i höjdlod, och β -galler, som leder fisken i sidled. För att öka kunskapen kring låglutande galler förmåga att avleda Europeisk ål utfördes hösten 2018 en studie med låglutande α - och β -galler (30° lutning) i en strömränna (4 m bred, 2 meter djup och 24 m lång) där två olika spaltvidder (15- och 30 mm) undersöktes vid en vattenhastighet på cirka 0,7 m/s. Samtliga testade låglutande galler hade en avledande förmåga $>80\%$ för nedströmsvandrande Europeisk ål till en intilliggande flyktöppning, en fångsteffektivitet mellan 30-90 % samt en kort passagetid där $>50\%$ av ålarna passerade via flyktöppningarna inom en timme. Resultaten befäster låglutande galler höga avledande funktion på nedströmsvandrande blankål, i synnerhet vid relativt lugna strömförhållanden. Resultaten indikerar dessutom att låglutande galler, förutom att vara en fysisk barriär, fungerar som en beteendeinducerad barriär för ål. Denna beteendeinducerade avledande effekt hos låglutande galler medför en potential till bibehållen passageeffektivitet för ål även för 30 mm spaltvidd, trots att ålen fysiskt kan passera genom gallret, och är av speciellt intresse vid en uppskalning av tekniken vid större vattenkraftverk.

Abstract

Since the 1980s, there has been a steep decline in the population of European eel (*Anguilla anguilla*). The decline can partly be explained by obstructed migration routes in rivers caused by dams and hydroelectric power plants (HEP). For downstream migrating eels, passing HEPs is usually associated with migration delay, as well as high risk of injury and mortality when eels are impinged on the rack or pass through the turbines. Low-sloping racks has been suggested to have high potential for diverting eels mechanically to safer passage routes. These low-sloping racks can either guide fish vertically (α -racks) or laterally (β -racks). In autumn 2018, I

conducted a study using European eel to test the performance of low-sloping α - and β -racks (30 ° angle) with two different bar spacings (15 and 30 mm) in a flume (width=4 m, depth=2m and length=24m) with a water velocity at 0,7 m/s. All tested racks had a fish guidance efficiency (FGE) >80% for guiding downstream migrating eel to an adjacent bypass, a catch efficiency between 30 and 90%. Passage time through the bypass was for > 50 % of the eels < 1 h. The results demonstrate that low-sloping racks has high diverting functionality for downstream migrating eels, in particular at relatively low water velocities. The results also indicate that low-sloping racks, in addition to function as a physical barrier, act as behavioral guidance. This behavioral guidance effect of the low-sloping racks potentially results in high diverting performance also for 30 mm bar spacings, although eels can physically pass through the rack, and are especially of interest when upscaling the technique at bigger facilities.

Inledning

Fragmentering är tillsammans med habitatförlust de största hoten mot både terrester och akvatisk biodiversitet (Andrén, 1994; Marmulla, 2001). I vattendrag är det utbyggnad i form av dammar och vattenkraftverk har lett till ändrade flödesregimer, habitatdegradering och minskad konnektivitet (Ward & Stanford, 1995), vilket har orsakat populationsminskningar och i vissa fall lokala utrotningar av migrerande fiskarter (Jonsson m.fl., 1999; Marmulla, 2001). För den europeiska ålens (*Anguilla anguilla*) del har utbyggnad av vattendrag sannolikt bidragit till den drastiska populationsminskning som skett sedan 1980-talet. Rekryteringen av glasål till Europeiska vattendrag är i dag <10 % och i vissa delar av utbredningsområdet <1% jämfört med medelantal på 60- och 70-talet. Detta har lett till att arten är klassad som akut hotad på Internationella naturvårdsunionen (IUCN) rödlista (Correia m.fl., 2018).

Nedströmsvandrande arter, som ål och laxfisk, passerar i regel ett vattenkraftverk genom dess turbiner, spillvägar eller fiskpassager (Larinier & Travade, 2002). Olika passagevägar innebär olika stora skaderisker men ofta är en kraftverkspassage associerad med både direkt och fördröjd mortalitet samt hög skadefrekvens (Jansen m.fl., 2007; Norrgård m.fl., 2013; Muir m.fl., 2011; Calles m.fl., 2015). Till viss del orsakas mortalitet och skador av passage genom turbiner där fisk kan utsättas för mekaniska slag av turbinblad, skjuvning och tryckskador (Calles m.fl., 2013a). Ålen är, med avseende på turbinpassage, bland de mest sårbara arterna på grund av dess långsmala kroppsform och komplicerade livscykel (Larinier & Travade, 2002). Den direkta dödligheten för ål vid passage genom turbinerna varierar vanligen mellan 10-50 % (Calles m.fl., 2010). Dödligheten varierar dock stort där stora turbiner med låg fallhöjd orsakar cirka 10-20% dödlighet medan mindre turbiner i småskaliga vattenkraftverk vanligen orsakar mer än 50% dödlighet (Larinier, 2008) och i vissa fall upp till 100% (Carr & Whoriskey, 2008; Boubée, Jellyman & Sinclair, 2008). För de ålar som inte dödas direkt vid turbinpassage kan den fördröjda dödligheten på grund av skador vara mellan 12-35% (Hadderingh & Bakker, 1998; Bruijs m.fl., 2003). Dödligheten är även relaterad till kroppslängd där risken att skadas vid turbinpassage ökar med ökad längd (Hadderingh & Bakker, 1998; Calles m.fl., 2010). Förutom turbindödlighet kan ålen skadas eller dö om de trycks fast och fastnar på turbinernas intagsgaller (Winter, Jansen & Bruijs, 2006). Ål uppvisar dessutom ofta en fördröjning i sin nedströmsvandring i anslutning till

vattenkraftverk då många individer tvekar att passera turbinernas intagsgaller (Behrmann-Godel & Eckman, 2003; Durif m.fl., 2002; Brown m.fl., 2009; Pedersen m.fl., 2011) och istället visar ett sökbeteende efter alternativa passagevägar (Brown m.fl., 2009; Haro m.fl., 2000). Detta kan leda till en sämre anpassning till optimala vandringsförhållanden och leda till tillfälligt vandringstopp (Winter, Jansen & Bruijs, 2006)

Det finns således ett behov av åtgärder för att öka vandringsframgången för ål och minska passagetiden för ål i anslutning till vattenkraftverk (Caudill m.fl., 2007). Fokus för åtgärdsarbetet i reglerade vattendrag har dock legat på uppströmspassage, medan mindre uppmärksamhet har riktats mot de problem som uppstår vid nedströmspassage (Arnekleiv, 2007; Calles m.fl., 2013a). De åtgärder som utförts historiskt för att återställa den longitudinella konnektiviteten för ål i utbyggda vattendrag, till exempel fiskpassager, upprätthåller ofta inte en tillräcklig hög passageeffektivitet (Noonan, m.fl., 2012). För att hindra ålen att passera genom passager associerade med hög dödlighet kan olika nedströmspassagelösningar implementeras vars syfte är att avleda ålen till säkrare passager eller fångstenheter. Sådana åtgärder delas generellt in i barriärer som fysiskt avleder fisk och beteendebagriärer som avleder genom att attrahera eller repellerar fisk (Larinier & Travade, 2002), men många tekniker har inslag av båda dessa typer (Calles m.fl., 2013a). Beteendebagriärer som elektriska fält, ljud och ljus har i vissa fall visat potential till god avledande förmåga medan luftbubblor och vattenstrålar inte visat samma resultat (EPRI, 2001). Beteendebagriärer med god funktion har dock hittills inte visat sig vara effektiva under olika förutsättningar i vattendrag, som till exempel vid variationer i turbiditet och vattenhastighet (EPRI, 2001). Fysiska barriärer består av olika typer av galler och skärmar där fisken fysiskt/mechaniskt avleds till en säkrare passageväg. En typ av fysisk barriär som visat hög avledningspotential på ål är låglutande intagsgaller där vinkeln relativt till strömriktningen är $<35^\circ$ och som installeras uppströms kraftverket. Låglutande intagsgaller kan i sin tur delas upp i α -galler, som leder fisken i höjddled mot ytan, och β -galler, som leder fisken i sidled (DWA, 2005).

Alpha (α) - och Beta (β) - galler har installerats på en rad kraftverk men det finns endast ett fåtal utvärderingar av funktionen för nedströmsvandrande blankål. I en studie från Ätran i södra Sverige utvärderades ett låglutande β -galler (30° mot strömriktningen) med horisontella gallerelement där spaltvidden (15 mm) utgör en

fysisk barriär för lokal blankål. Avledningseffektiviteten till flyktvägarna för ål var hög (73%), passagetiden cirka en timme, ålen passerade i regel på första försöket och ingen ål observerades passera genom gallret vidare till turbinerna (Calles m.fl., 2015). Högre upp i Ätrans huvudflöde utvärderades även ett låglutande α -galler (35° mot strömriktningen) där spaltvidden (18 mm) utgjorde en fysisk barriär för merparten av ålarna i studien. Även här var avledningseffektiviteten hög (82%) och i regel krävdes ett fåtal försök innan passage, medan mediantiden från utsättning till passage var cirka tre dagar (Calles m.fl., 2013b). Studier i Gave de Pau med biflöden samt Ariege river i Frankrike där olika typer av låglutande galler (24-30 mot strömriktningen och 20-30 mm spaltvidd) implementerats vid vattenkraftverk visar liknande resultat där det uppnåtts en god konnektivitet för nedströmsvandrande ål (Travade m.fl., 2010, Tomanova ¹).

Fältförsök ger emellertid inte lika stor kunskap om finskaliga beteenden och lika högupplöst data som erhålls från kontrollerade labförsök (Rice m.fl., 2009). Amaral m.fl. (2003) testade två olika lutningar (15° och 45°) och spaltvidder (25 och 50 mm) på ett β -galler med vertikala gallerjärn och dess avledande effekt på nedströmsvandrande Amerikansk ål (*Anguilla rostrata*). Studien utfördes i en strömränna (längd=24,4m; bredd= 1,7m; djup=2,1m) där olika vattenhastigheter relevanta för turbinintag (0,3-0,9 m/s) undersöktes. Resultaten indikerade en hög avledningsförmåga med >50 % för båda lutningarna vid samtliga vattenhastigheter, men framförallt för galler med 15° lutning trots att den enda testade spaltvidden vid med denna lutning var 50 mm. Liknande resultat med avseende på avledningseffektivitet fick Russon m.fl. (2010) med ett låglutande β -galler med olika lutningar (15°, 30° och 45° lutning) i en strömränna med liknande dimensioner som i nyss nämnda studie. Ålarna under dessa försök passerade dessutom i regel gallret via flyktöppningen på första försöket. De fåtal studier rörande låglutande galler funktion för nedströmsvandrande ål kan summeras i en hög avledningseffektivitet där ålen utför få passageförsök innan de lyckas passera via flyktöppningarna samt en kort passagetid jämfört med konventionella intagsgaller (Behrmann-Godel & Eckman, 2003; Brown m.fl., 2009; Durif m.fl., 2002; Pedersen m.fl., 2011).

Ål, framförallt blankål, har i labstudier visat sig ha ett avvikande beteende när de stöter på fysiska barriärer jämfört med andra nedströmsvandrande fiskar där

¹ Sylvie Tomanova, IMFT, personlig kommunikation 2019-02-20

åls beteenderespons till barriären först sker vid fysisk kontakt med densamma (EPRI, 2001). Ett ofta observerat beteende vid kontakt med galler är en "krasch" in i gallerstrukturen och därefter ett försök att med kraft tränga igenom gallret, alternativt uppvisande av ett starkt uppströms riktat undflyende beteende (EPRI, 2001; Amaral m.fl., 2003; Russon m.fl., 2010). Behrmann-Godel och Eckman (2003) visade att detta beteende kan vara individspecifikt, då vissa ålar väljer att passera gallret direkt medan andra tvekar till att passera och fördröjs i sin vandring. Dessa ålar utför i regel upprepade försök att passera gallret och kan uppehålla sig uppströms kraftverket i dagar eller veckor innan de passerar, något även observerat i Calles m.fl. (2013b). Beteendestudierna på nedströmsvandrande ål i strömrännor visar på att få ålar trycks fast mot lutande galler (15° - 45° lutning) (Amaral m.fl., 2003; Russon m.fl. 2010), något som oftast är fallet på konventionella intagsgaller där lutningen är högre. Detta trots att vattenhastigheterna under studierna i vissa fall uppgick till över de rekommendationer ($>0,5$ m/s) som de flesta ålar anses kunna frigöra sig från på ett vertikalt galler (DWA, 2005). Travade m.fl. (2010) visade ett förhållande där spaltvidd = $0,028 \cdot \text{totallängd}$ var åls maximala längd för att passera olika spaltvidder. Då en stor andel av ålarna har visat sig avledas av låglutande galler (Amaral m.fl., 2003; Calles m.fl., 2013b; Calles m.fl., 2015; Russon m.fl., 2010), trots att det enligt Travade m.fl. (2010) varit fysiskt möjligt för flera av ålarna i dessa studier att passera igenom gallret, fungerar sannolikt låglutande galler delvis även som en beteendebarrär. Detta indikerar att det kan finnas potential att öka spaltvidden på låglutande galler med bibehållen passageeffektivitet för ål. Avvägningen mellan elproduktion och fiskavledning, där galler med stor spaltvidd är att föredra för elproduktion medan liten spaltvidd är att föredra för fiskavledning, medför även ett behov av att undersöka den avledande effekten på ål för olika spaltvidder.

För att öka kunskapen kring låglutande galler förmåga att avleda Europeisk ål utfördes hösten 2018 en studie med låglutande α - och β -galler (30° lutning) i en strömränna där två olika spaltvidder (15- och 30 mm) testades. Strömrännan var i skala 1:1 motsvarande en intagskanal till ett småskaligt vattenkraftverk och vattenhastigheten var i paritet med hastigheter som kan finnas uppströms kraftverk (0,7 m/s). De spaltvidder som testades var 15 och 30 mm där den tidigare fysiskt utestänger ål >535 mm (samtliga ålar i studien) och den senare fysiskt utestänger ål >1070 mm (ingen ål i studien) (Travade m.fl., 2010). Med bakgrund av tidigare

studier där låglutande galler, förutom att vara en fysisk barriär, sannolikt även fungerat som en beteendebbarriär förmodades det att galler med 30 mm, likt 15 mm, spaltvidd kommer ha en hög avledande effekt på nedströmsvandrande ål. Därmed ställdes hypotesen att låglutande galler har en beteendemässig avledande effekt oavsett spaltvidd (även ålar som fysiskt kan passera ett galler väljer istället att passera via flyktöppningen). Därvid kunde följande prediktioner fastslås: 1) Passageeffektiviteten och passagetiden för ett låglutande galler är oberoende av spaltvidden, 2) Passageeffektiviteten och passagetiden för ett låglutande galler är oberoende av gallertyp.

Metod

Till studien användes ål ($n=80$, medellängd $\pm$ SD= 845 ± 74 mm) som fångats i ryssjor i sydöstra Vänern, Sverige under första delen av oktober månad 2018 av en lokal yrkesfiskare. Fångstverksamheten var en del av Vattenfalls "Trap & Transport"-program. Efter fångsten sumpades ålen i tunnor vid fiskeläget innan de transporterades till Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby den 19 oktober. Transporten pågick under cirka 6 timmar där ålen förvarades i två 800-liters förvaringstankar som var, till cirka två tredjedelar, fyllda med vatten som kontinuerligt syresattes. Vid ankomst fördes alla ålar över till två strömsatta cylinderformade förvaringstankar (cirka $3,5 \text{ m}^3$ vardera) utrustade med kylare, pumpar, syresättare och UV-filter för att hålla god vattenkemi. Förvaringstankarna var dessutom täckta med presenning för att minska störningsmoment och ett flytande "tak" av en halv vägtrumma gjorde det möjligt för ålen att ta skydd. Under tiden ålen förvarades i förvaringstankarna (cirka 3-4 veckor) kontrollerades vattentemperatur (cirka 10° C) och syremättnad (cirka 100%) regelbundet med ett multiinstrument (ProDSS, YSI, USA). Vattenkemiförhållandena var under perioden relativt konstanta men vid ett fåtal tillfällen, som följd av försämrade vattenkemi, skedde mindre vattenutbyten.

Under de två första dagarna (19-20 oktober), cirka två till tre veckor innan ålen användes i försöken, märktes all fisk med 23 mm PIT-tags (Oregon RFID, Portland, USA). Innan märkningen bedövades ålen med Benzocaine ($0,1\text{g/L H}_2\text{O}$) till fisken bedömdes vara i en djup bedövning (Fiskhälsan FH AB, 2007). Medeltiden för ålen i bedövningsvätskan var knappt 17 minuter (min=7, max=37) innan fisken togs upp för märkning. Via ett ventralt skalpellsnitt strax framför analfenan placerades en 23 mm PIT-tag i fiskens bukhåla. För varje PIT-tag antecknades dess unika identifikationsnummer, samt individens totallängd (mm), vikt (g), huvudbredd (mm) och eventuella skador innan den fotograferades. Därefter placerades de åter i förvaringstankarna där regelbundna observationer utfördes för att upptäcka eventuella komplikationer efter märkningen. Hos de totalt 86 märkta ålarna inträffade ingen dödlighet eller uppvisande av något onaturligt beteende under vistelsen i förvaringstankarna. En skadad ål som upptäcktes innan märkning avlivades dock då den ådragit sig skador under transporten eller vid fångsten. Fyra individer tappade sina PIT-tags någon gång efter märkningen och fick märkas igen

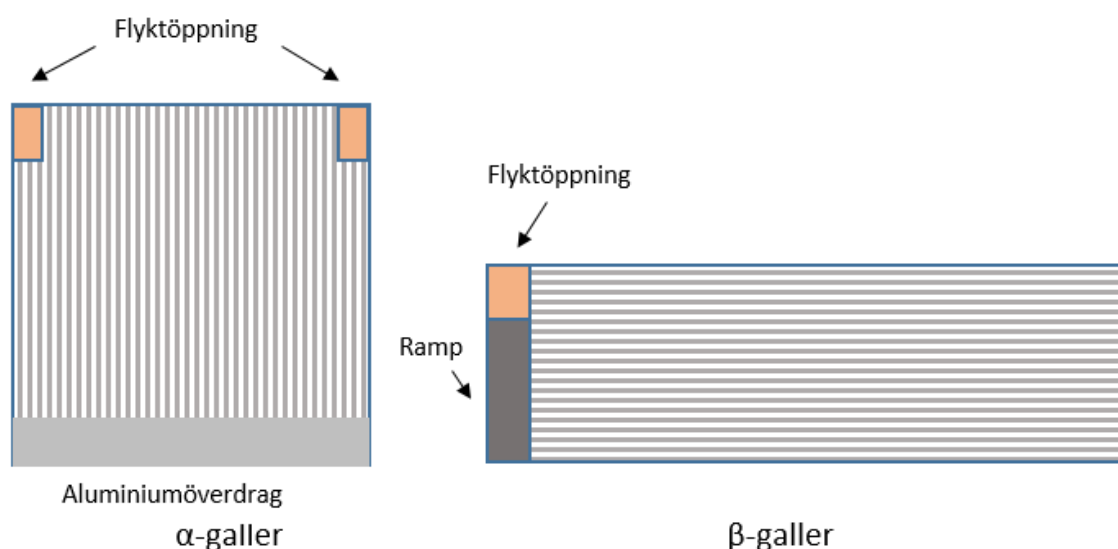
(den 4 och 5 november). En av dessa fyra tappade återigen sin PIT-tag och fick märkas ytterligare en gång (denna ål användes dock inte i några försök).

Studien genomfördes i en 24 meter lång, 4 meter bred och 2 meter djup strömränna, "Laxeleratorn", vid Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby (Figur 2). Försöken i strömrännan bestod av två olika typer av låglutande galler, α -galler och β -galler, där två olika spaltvidder, 15 och 30 mm, testades för respektive gallertyp. Under försöken användes alltså fyra olika behandlingar: α -15 mm, α -30 mm, β -15 mm och β -30 mm. Försöksordningen följde en förutbestämd ordning (Tabell 1) där ett gallerbyte skedde dagligen. α -gallren var 4 meter långa och 4 meter breda (Figur 1) med en 30° vinkel i förhållande till rännans botten. I ytan vid α -gallrets ytterkanter fanns två flyktöppningar vars bredd (0,3 meter) och höjd (0,5 meter) tillsammans gav en sammanlagd area av $0,3 \text{ m}^2$. Respektive öppning ledde vidare till en separat fångstenhet (sump) via en flyktränna med samma dimensioner som flyktöppningarna. På gallrets understa del fanns ett 0,5 meter högt överdrag av aluminium som täckte 2 m^2 och därmed uppgick α -gallrens våta area till $13,7 \text{ m}^2$. β -gallren i sin tur var 6,8 meter långa och 2 meter höga (Figur 1), en våt area av $13,6 \text{ m}^2$, samt en vinkel på 30° i förhållande till strömmens riktning. I gallrets nedströms belägna ände fanns en flyktöppning vars bredd (0,6 meter) och höjd (0,5 meter) gav en sammanlagd area av $0,3 \text{ m}^2$. I anslutning till flyktöppningen, vid gallrets ände, fanns en ramp som ledde fisken från botten upp mot flyktöppningen. Likt vid flyktöppningarna på α -gallren ledde flyktöppningen på β -gallren till en separat fångstenhet (sump). Både α -gallren och β -gallren var konstruerade i aluminium där gallerjärnen var vinklade i samma riktning som huvudströmmen, det vill säga i enlighet med konventionella intagsgaller.

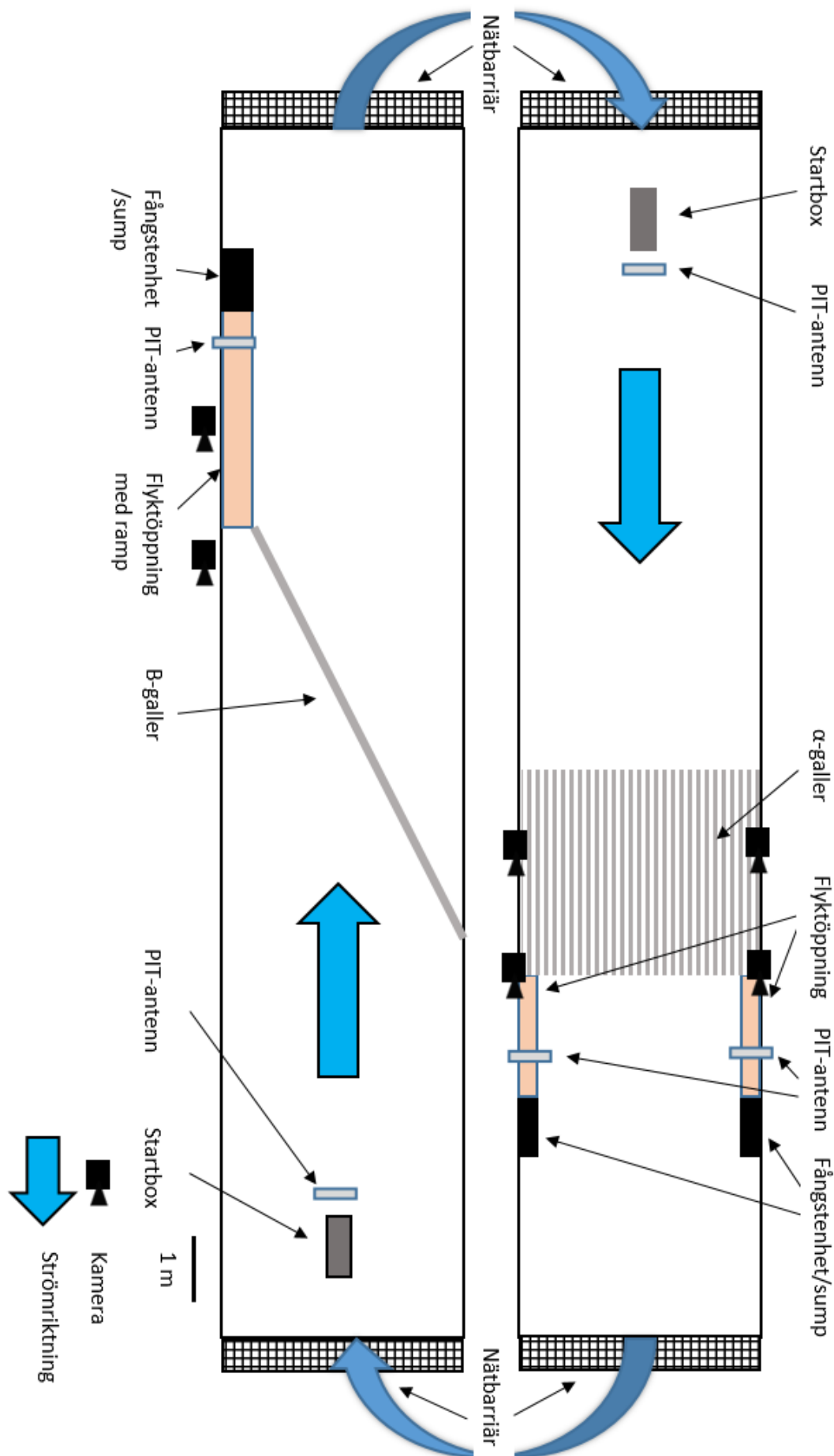
Fem (β) respektive elva (α) meter uppströms gallren, centralt placerad i ytan av strömrännan, var en startbox med en volym om cirka $0,1 \text{ m}^3$ (bredd x höjd x längd: $0,3 \times 0,35 \times 1 \text{ m}$) placerad (Figur 2). Innan försöket sattes fisken in i boxen via ett lågt lutande rör (diameter=110mm) från sidan av strömrännan. Startboxens uppströms belägna ände bestod av en solid vägg som inte släppte igenom vatten vilket skapade lugna ström- och turbullensförhållanden i boxen. Den nedströms belägna änden bestod av en lucka av hålplåt som manuellt kunde öppnas med hjälp av en vajer. Detta möjliggjorde en kontrollerad öppning av startboxen vid försökets start. Cirka en meter uppströms startboxarna och sju meter nedströms respektive galler blockerade två finmaskiga nät vidare spridning av ålen utanför försöksområdet. I de

nedströms belägna näten, i nätets översta och centrala del, fanns en flyktväg med tillhörande fångstenhet vars syfte var att samla in de eventuella ålar som tagit sig igenom gallret.

PIT-tag-antennerna (Oregon RFID, Portland, USA) användes för att detektera fiskens rörelser vid strategiskt valda punkter under försökets gång. Totalt var två antenner aktiva på β -sidan och tre på α -sidan där de placerades vid flyktöppningarna och startboxarna (Figur 2). Vid flyktöppningarna placerades antennerna cirka en meter in i flyktrännan vilket medförde att PIT-tags endast detekterades i antennens direkta närhet (uppskattningsvis $\pm 20\text{cm}$), det vill säga fisken detekterades endast om den simmat in cirka en meter in i flyktöppningen. Vid startboxarna var antennerna placerade cirka 40 centimeter nedströms den öppningsbara luckan. Då PIT-tags som för ögonblicket befann sig inuti boxen inte detekterades av antennerna var ålen tvungen att lämna startboxen för att detekteras. Vid varje detektion hos en PIT-antenn registrerades information om vilken fisk som detekterats samt vid vilken tidpunkt detta inträffat. I anslutning till gallren var även kameror (GoPro Hero 5, GoPro Inc, USA) placerade för att filma ålens beteende i anslutning till gallren och flyktvägarna. På α -gallren täcktes uppskattningsvis åttio procent av gallrets yta (kort siktdjup och låg ljusintensitet medförde att vissa ytor i botten och mitten av gallret inte syntes) av åtta kameror. På β -gallren täcktes flyktöppningen samt flyktrännan av fyra kameror där siktdjupet kombinerat med den låga ljusintensiteten dock medförde sämre täckning jämfört med kamerorna vid α -gallren.



Figur 1. α -galler (t.v.) med två flyktöppningar (bredd=0,3m, höjd=0,5m) och aluminiumöverdrag (bredd=4m, höjd=0,5m) samt β -galler (t.h.) med flyktöppning (bredd=0,6m, höjd=0,5m) med tillhörande ramp vinklat 30° från botten.



Figur 2. Skalenlig skiss över strömrännans försöksupställning med de två försökssektionerna för α -galler (ovan) och β -galler (nedan).

För de 80 ålar som användes i försöken bestämdes ordningen slumpvis vid infångningen i förvaringstankarna strax innan försöken. Efter varje försök skiftades endera ett α - eller ett β -galler i en förutbestämd ordning och för vardera behandlingen (α/β -galler*15/30 mm spaltvidd) sattes tjugo PIT-tag märkta ålar ut fördelat på fyra tillfällen mellan 30 oktober och 7 november (Tabell 1). Det fanns inte någon skillnad i längd eller vikt mellan de fyra gallergrupperna (one-way ANOVA, $F_{3,76} = 0,789$ och $0,738$, $p = 0,504$ och $0,532$). Vid varje försök sattes fem ålar ut i startboxarna för respektive gallersida. Efter att de fem ålarna tillbringat minst femton minuter i startboxarna öppnades luckorna manuellt och de kunde fritt simma ut i strömrännan. Endast oerfarna fiskar som inte tidigare befunnit sig i strömrännan användes vid försök för den aktuella gallerkonfigurationen. Varje försök påbörjades mellan klockan 19:00 till 20:00 och pågick sedan nattetid under 13,5 timmar under konstanta ljusförhållanden (2-5 lux), motsvarande ljusförhållanden under kvälls- eller nattetid. Vattentemperaturen i strömrännan varierade mellan 8,5-10,2 °C (medeltemperatur $\pm 1SD = 9,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$). Medelflödes hastigheten uppströms gallren vid ytan var under samtliga försök cirka 0,7 m/s för att vid 1,1 meters djup vara cirka 0,2-0,4 m/s. Hydrauliska mätningar kunde konstatera liten eller obefintlig skillnad i medelflödes hastighet vid användning av de olika gallerkonfigurationerna.

Tabell 1. Försökuppställning med gallerkonfigurationer och datum. Försök utfördes samtidigt på båda sidorna av strömrännan (α respektive β) och varje möjlig gallerkombination kombinerades två gånger. Ålarna ($n=80$) sattes ut i grupper om fem fördelat på fyra försök per galler.

Försöksdag	Datum	α-galler Spaltvidd	β-galler Spaltvidd	Antal ålar
1	30 oktober	30	30	5+5
2	31 oktober	15	30	5+5
3	1 november	15	15	5+5
4	2 november	30	15	5+5
5	4 november	30	30	5+5
6	5 november	15	30	5+5
7	6 november	15	15	5+5
8	7 november	30	15	5+5

Under försökets gång kunde ålen: 1) stanna uppströms gallret; 2) passera genom galler; 3) passera genom flyktvägarna, eller kombinationer av dessa. Individer som detekterades vid minst ett tillfälle vid någon av antennerna placerade i flyktöppningarna, alternativt befunnit sig i en fångstenhet vid försökets slut, definierades som "lyckad passage". Individer som inte detekterats vid någon av antennerna i flyktöppningarna eller befunnit sig i någon fångstenhet vid försökets slut definierades som "misslyckad passage". Efter avslutat försök stängdes flödet i strömrännan av och nätbarriärer sänktes ned framför gallren och flyktöppningarna

för att hindra fisken att röra sig igenom gallren eller in/ut genom fångstenheterna. Därefter tändes ljusramperna och fisken fångades in, endera vid tömning av fångstenheterna eller med hjälp av håvar i strömrännan. För varje fisk noterades fångstplats (uppströms/nedströms galler och i fångstenhet) samt eventuella skador.

Avledningseffektiviteten (FGE) för respektive behandling beräknades enligt följande formel:

$$\bullet \quad FGE = L / (L + M)$$

där L är antalet fisk som lyckats passera gallret via flyktöppningarna genom flyktvägarna (fisk som har detekterats i någon av flyktvägarna och/eller fångats i någon av fångstenheterna vid försökets slut) och M är antalet fisk som misslyckats passera gallret (fisk som inte detekterats i någon av flyktvägarna och infångats uppströms eller nedströms gallret vid försökets slut).

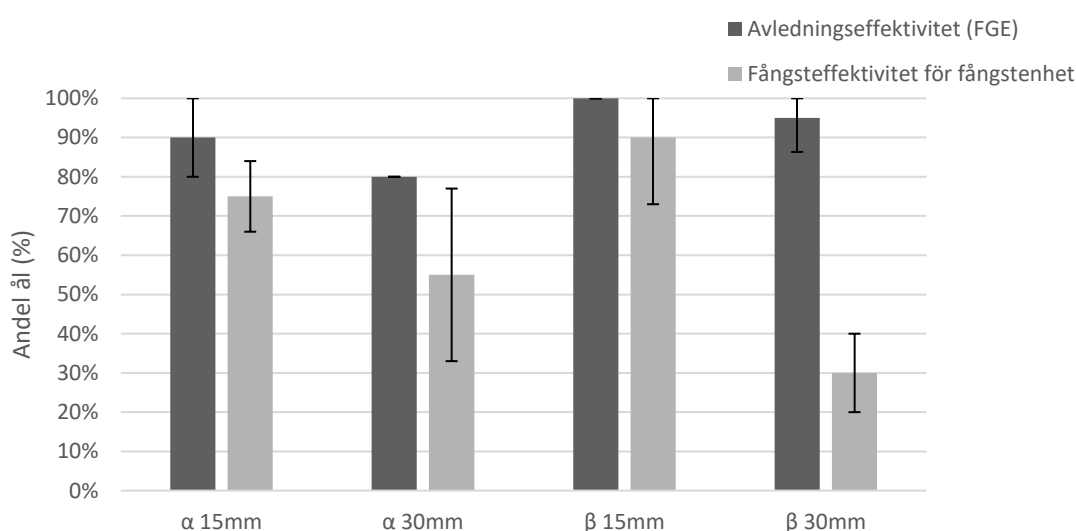
För analys av avledningseffektivitet, passagetid, infångningsplats efter försöket samt antalet detektioner i flyktvägsantennerna användes en Generalised linear mixed model. För avledningseffektivitet användes binomialt distribuerad logit länkfunktion (0 = misslyckad passage, 1 = Lyckad passage). Detsamma gällde för analysen av infångningsplats (fångstplats = uppströms eller nedströms galler samt i fångstenhet). För passagetid (tid från detektion vid startboxantennen till första detektion vid någon av antennerna i flyktvägarna) och för antalet detektioner i flyktvägsantennerna (en detektion räknades endast om minst en minut gått sedan föregående detektion) användes en poisson-distribuerad logit länkfunktion. Gallertyp, spaltvidd och interaktionen mellan gallertyp * spaltvidd användes som "fixed effects" och gruppstillhörighet användes som "random factor" som nestats i interaktionseffekten mellan spaltvidd och gallertyp (Tabell 2). Analyserna utfördes i SPSS (IBM, Armonk, NY) och Microsoft Excel (2016). Videomaterialet från kamerorna analyserades med Adobe Premiere element 15 (2015) där respektive video granskades visuellt. Ålens beteenden sammanställdes kvalitativt och en grov uppskattning gjordes i vilken utsträckning respektive beteende förekom.

Tabell 2. Förklaringsvariabler som användes till generalized linear mixed models för att testa effekterna på passageframgång, passagetid, infångningsplats och antalet detektioner i flyktvägarna. Gruppstillhörighet användes som "random factor" som nestats i interaktionseffekten mellan spaltvidd och gallertyp.

<i>Fixed effects</i>	<i>Mätskala</i>
<i>Galler</i>	α/β
<i>Spaltvidd</i>	15 mm/30 mm
<i>Galler*Spaltvidd</i>	α -15 mm/ α -30 mm/ β -15 mm/ β 30-mm
<i>Random effect</i>	
<i>Grupptillhörighet</i>	1-16

Resultat

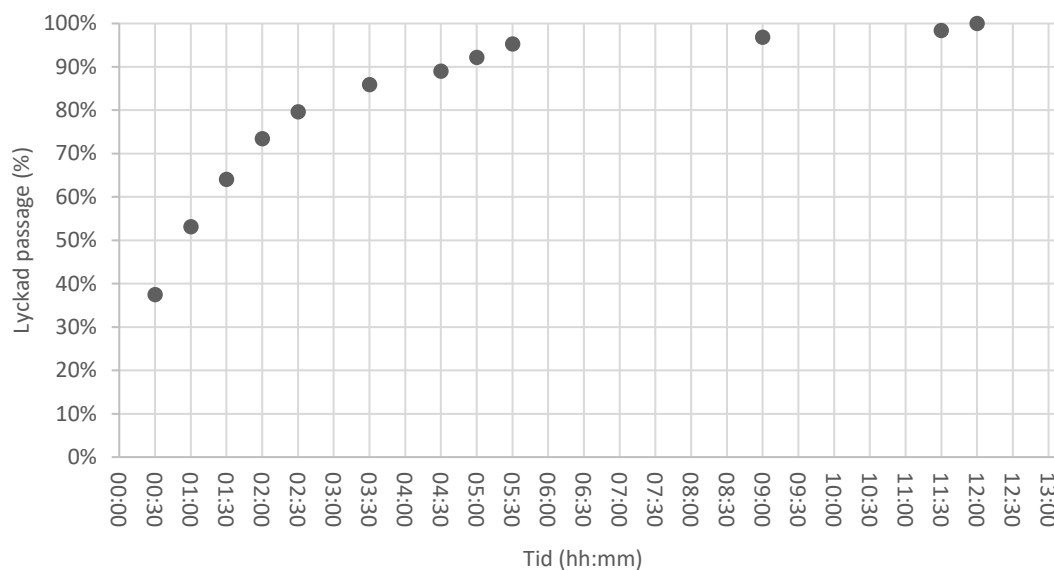
Avledningseffektiviteten (FGE) på Europeisk ål för respektive gallerkonfiguration varierade mellan 80% (SD=0%) (α -30 mm) och 100% (SD=0%) (β -15 mm) (Figur 3) då totalt 73 av 80 ålar passerade genom flyktvägarna (detekterats i någon av flyktvägarna och/eller fångats i någon av fångstenheterna) på de fyra utvärderade gallerkonfigurationerna. Det kunde inte påvisas någon statistisk signifikant skillnad mellan de fyra olika gallerkonfigurationerna med avseende på avledningseffektiviteten (Tabell 3). Av de sju ålarna som inte passerade genom flyktöppningarna återfanns tre nedströms gallret (alla tre i behandlingen med α -30 mm) och fyra uppströms gallret (α -15 mm; n=2, α -30 mm; n=1, β -30 mm; n=1) vid försökets slut. Fångseffektiviteten, det vill säga andelen ål i fångstenheterna vid försökets slut, var konstant lägre än avledningseffektiviteten (FGE) för respektive gallerkonfiguration. Den högsta andelen ål i fångstenheten inträffade vid försök med β -15 mm (90%, SD = 17,3%) och lägsta för β -30 mm (30%, SD = 10%) (Figur 3).



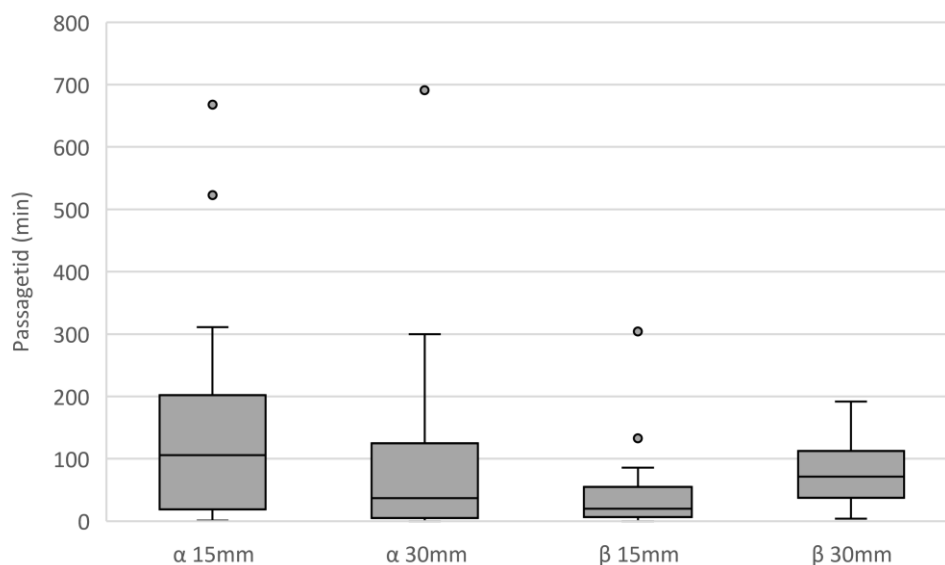
Figur 3. Avledningseffektiviteten (FGE) för Europeisk ål (n=80) för respektive gallerkonfiguration samt fångsteffektivitet för fångstenheten vid försökets slut. Felstaplarna anger ± 1 standardavvikelse baserat på fyra försök per galler med fem ålar i varje försök.

Passagetiden (tiden från när ålen lämnade startboxen till första registrerade passage i en flyktöppning) varierade från under en minut till drygt elva timmar där knappt hälften (37,5%) passerade inom en halvtimme, drygt hälften inom en timme (53,1%) och knappt tre fjärdedelar inom 2 timmar (73,4%) (Figur 4). Passagetiden för respektive gallerkonfiguration var cirka en halvtimme för både β -15 mm (median=20 min, SD=77 min) och α -30 mm (median=37 min, SD=197 min), medan den var drygt

en timme för α -15 mm (median=106 min, SD= 189 min), och β -30 mm (median=71,5 min, SD= 74min) (Figur 5). Det fanns en interaktionseffekt mellan galler och spaltvidd ($F_{1, 60} = 4,37$, $p = 0,041$) på grund av att sannolikheten var högre för en lägre passagetid för ål som passerade β -15 mm jämfört med β -30 mm (Tabell 3). Av de 80 försöksålarna exkluderades 16 ålar i analysen av passagetid då de endera: 1) inte passerat genom flyktvägarna eller; 2) missat att detekterats vid antingen startboxen eller flyktvägarna trots lyckad passage via flyktvägarna.



Figur 4. Passagetid fördelat på varje halvtimme och kumulativ andel ål ($n=64$) som passerat via flyktöppningarna vid försök med samtliga gallerkonfigurationer.

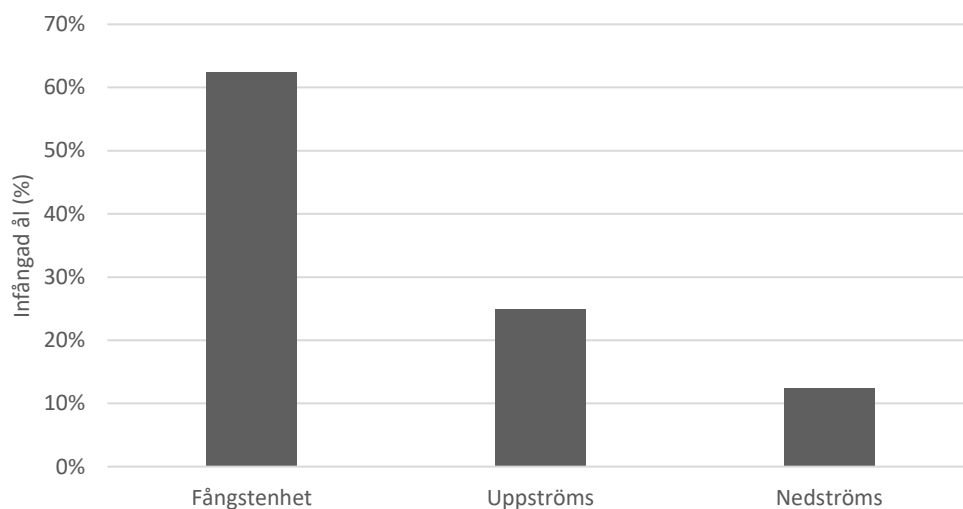


Figur 5. Passagetid för 64 ålar fördelat mellan α -15 mm ($n= 17$), α -30 mm ($n=13$) β -15 mm ($n=16$) och β -30 mm ($n=18$).

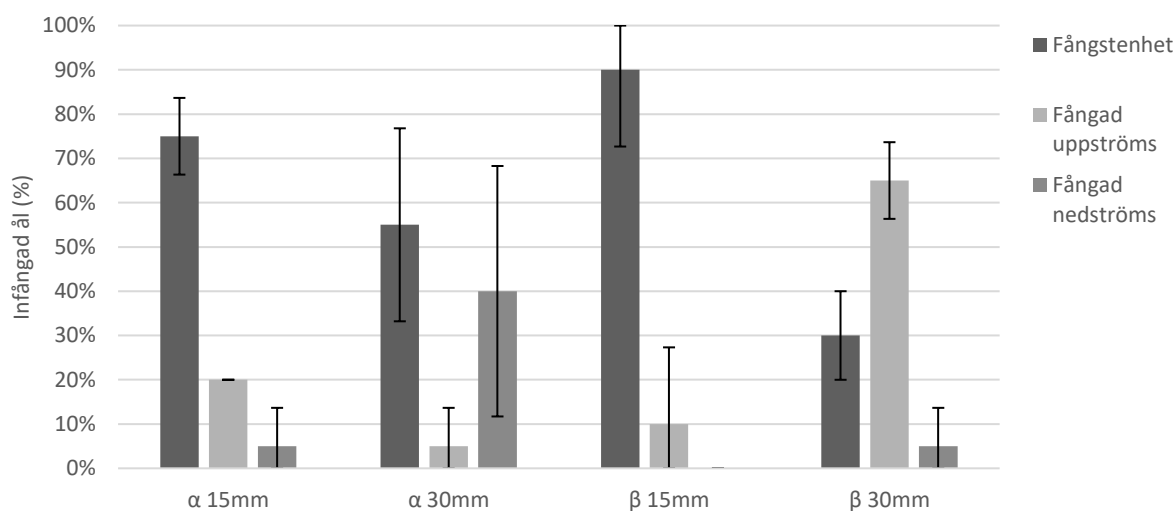
Tabell 3. Effekten av förklaringsvariablerna på avledningseffektivitet (FGE) (binomialt distribuerad logit länkfunktion) och passagetid (poisson-distribuerad logit länkfunktion) i en generalized linear mixed model. Grupp-tillhörighet användes som "random factor" som nestats i interaktionseffekten mellan spaltvidd och gallertyp.

<i>Fixed effects</i>	<i>Avledningseffektivitet (FGE)</i>				<i>Passagetid</i>			
	F	df1	df2	Sig	F	df1	df2	Sig
<i>Corrected model</i>	1,064	3	76	0,369	1,973	3	60	0,128
<i>Gallertyp</i>	2,079	1	76	0,153	1,530	1	60	0,221
<i>Spaltvidd</i>	0,689	1	1	0,409	0,014	1	60	0,908
<i>Galler*Spaltvidd</i>	0,000	1	76	0,992	4,369	1	60	0,041

Vid försökens slut befann sig majoriteten (62,5%) av ålarna i någon av fångstenheterna, följt av uppströms gallret (25%) och nedströms gallret (12,5%) (Figur 6). Fångstenheten var den vanligaste infångningsplatsen för samtliga gallerkonfigurationer, förutom för β -30 mm. Sannolikheten var högre för fler ålar fångade i fångstenheterna efter försök med 15 mm spaltvidd än med 30 mm spaltvidd ($F_{1,76} = 3,383$, $P = 0,001$). En majoritet av ålarna vid β -30 mm (65%) fångades in uppströms gallret. För resterande gallerkonfigurationer varierade antalet infångade ålar uppströms gallret mellan 5-20 % (Figur 7). Det fanns ingen effekt av gallertyp eller spaltvidd på sannolikheten för ål att fångas in uppströms ($F_{1,76} = 3,383$, $P = 0,07$ respektive $F_{1,76} = 1,073$, $P = 0,304$) (Tabell 4). Däremot fanns en interaktionseffekt mellan galler och spaltvidd ($F_{1,76} = 3,71$, $P = 0,004$) på grund av att det var högre sannolikhet för ål att infångas uppströms β -30 mm än för β -15 mm (Tabell 4). Av de totalt 20 ålar fångade uppströms gallret lyckades 80% initialt med sin passage via flyktöppningarna innan de infångades uppströms. Av de totalt 10 fångade ålarna nedströms gallret infångades 8 vid försök med α -30mm, en vardera vid försök med α -15 mm samt β -30 mm och ingen ål infångades nedströms β -15 mm (Figur 7). Det fanns ingen effekt av gallertyp eller spaltvidd på sannolikheten för ål att fångas in nedströms (Tabell 4). Medellängden ± 1 SD på ålarna fångade nedströms gallren var 831 ± 59 mm, vilket var i paritet med medellängd för ål som inte fångats nedströms (846 ± 76 mm). Ålarnas längd hade ingen effekt på sannolikheten för ål att påträffas på någon av fångstplatserna (Tabell 4).



Figur 6. Andel av samtliga försöksålar (n=80) infångade efter försök i fångstenheten , uppströms galler samt nedströms galler.

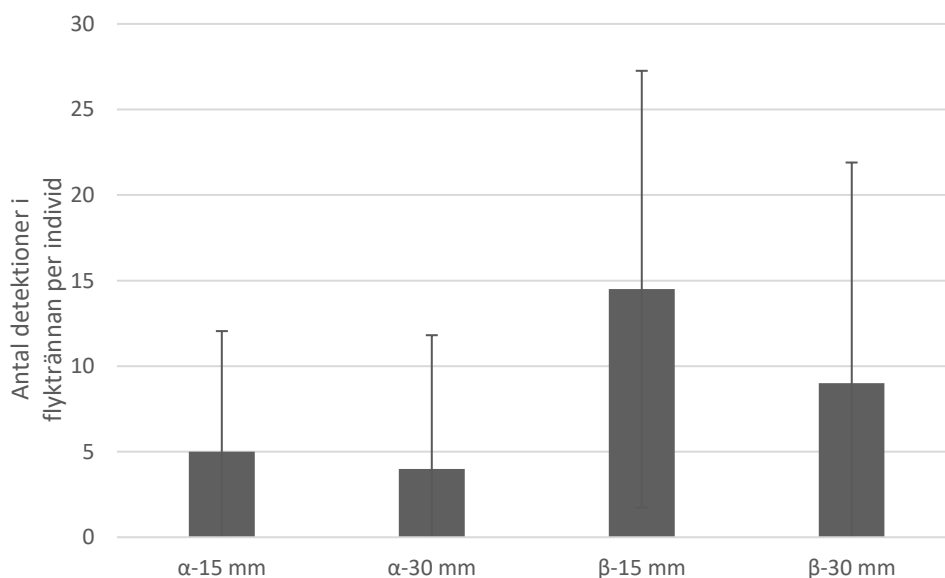


Figur 7. Andel ål (n=80) infångade efter försök i fångstenheten, uppströms galler samt nedströms galler för respektive gallerkonfiguration. Felstaplarna anger ± 1 standardavvikelse baserat på fyra försök per galler med fem ålar i varje försök

Tabell 4. Effekten av förklaringsvariablerna på fångstplats efter försöket för samtliga ålar i en generalized linear mixed model med binomialt distribuerad logit länkfunktion. Grupptillhörighet användes som "random factor" som nestats i interaktionseffekten mellan galler och spaltvidd.

Fixed effects	Fångstenhet				Fångad uppströms				Fångad nedströms			
	F	df1	df2	Sig.	F	df1	df2	Sig.	F	df1	df2	Sig.
Corrected model	3,616	4	75	0,009	4,499	4	75	0,003	1,412	4	75	0,238
Gallertyp	0,003	1	75	0,956	3,353	1	75	0,071	,000	1	75	0,991
Spaltvidd	12,419	1	75	0,001	1,073	1	75	0,304	,000	1	75	0,991
Galler*Spaltvidd	3,908	1	75	0,052	8,809	1	75	0,004	,000	1	75	0,993
Längd	0,511	1	75	0,477	0,081	1	75	0,777	,462	1	75	0,499

Av de åttio försöksålarna detekterades en majoritet (77,5%) fler än en gång av antennerna i flyktrännorna under försökets gång. Resterande ålar detekterades endera noll (11,3%) eller en gång (11,3%). Flest antal detektioner skedde under försök med β -15 mm (median $\pm$ 1SD = 14,5 $\pm$ 12,8) och β -30 mm (9,0 $\pm$ 12,9) och minst i α -15 mm (5,0 $\pm$ 7,1) och α -30 mm (4,0 $\pm$ 7,8; Figur 8). En generalized linear mixed model med poisson-distribuerad logit länkfunktion visade att sannolikheten var högre för fler detektioner under försök med β -galler än med α -galler ($F_{1,75} = 3,981$, $P = 0,05$) där även längden hade betydelse ($F_{1,75} = 16,691$, $P < 0,001$) (Tabell 5). Flera ålar observerades simma uppströms i flyktrännorna utan synbar ansträngning. Två av ålarna som infångades i fångstenheten efter försök med β -15 mm detekterades inte någon gång i antennerna i flyktöppningarna, varvid de konstaterades lyckats med sin passage via flyktöppningarna utan att registreras.



Figur 8. Antalet detektioner ($\pm$ 1 standardavvikelse) per individ i flyktrännan för samtliga ålar fördelat på respektive gallerkonfiguration.

Tabell 5. Effekten av förklaringsvariablerna på antalet detektioner i flyktvägsantennerna för samtliga ålar i en generalized linear mixed model med poisson-distribuerad logit länkfunktion. Gruppstillhörighet användes som "random factor" som nestats i interaktionseffekten mellan galler och spaltvidd.

Samtliga ålar (n=80)				
Fixed effects	F	df1	df2	Sig.
Corrected model	5,894	4	75	0,000
Gallertyp	3,981	1	75	0,050
Spaltvidd	2,657	1	75	0,107
Galler*Spaltvidd	,579	1	75	0,449
Längd	16,691	1	75	0,000

Kamerorna vid α -gallren täckte in cirka 80% av gallrets yta och flera ålobserverationer gjordes under försöken. I regel närmade sig ålen gallret längs botten

varefter ålens beteenderespons först skedde efter fysisk kontakt med detsamma. Ett antal ålar observerades närma sig gallret högre upp i vattenmassan med en hastighet som var ungefär lika stor som vattenhastigheten. Även här skedde ålens beteenderespons först vid fysisk kontakt (oftast "kraschandes" in i konstruktionen) med gallret. Några vanliga beteenden vid α -gallren var: 1) flykt, i regel genom att simma uppströms; 2) ålen följde gallret, i regel med strömmens riktning; 3) ålen "greppade" tag med stjärtfenan i tvärgående konstruktioner i gallret. Vid passage via flyktöppningarna följde vanligen ålen gallret i strömmens riktning och visade ingen, eller liten, synbar ansträngning med att simma. En del av de ålar som följde gallret, i vissa fall ända upp till ytan, uppvisade en flyktrespons med viss fördröjning men endast ett fåtal ålar observerades vara i kontakt med gallret >5 sekunder. Ett fåtal ålar observerades passera igenom gallret, samtliga vid α -30 mm, med endera stjärtfenan eller huvudet först. Flera av de ålar som passerat via flyktöppningarna observerades återvända uppströms gallret simmandes utan synbar ansträngning. Kamerorna vid β -gallren täckte, till skillnad mot kamerorna vid α -gallren, endast flyktöppningen och flyktrännan. Därför kunde inget beteende i anslutning till gallret observeras för β -gallren. Kameran vid flyktrännan kunde dock, likt för α -gallren, observera passerande ål på väg nedströms och precis som för α -gallren kunde flera ålar som passerat via flyktöppningarna observeras simmandes uppströms i flyktrännorna igen. Efter avslutat försök noterades skador och/eller avvikande beteende på ett fåtal ålar varvid 4 ålar avlivades. Resterande ålar uppvisade efter avslutat försök inget avvikande beteende fram till återutsättning.

Diskussion

Innevarande studie befäster resultat från tidigare fältstudier som visat att låglutande galler i intagskanaler vid vattenkraftverk har en stor potential att via flyktöppningar effektivt avleda ål till säkrare passagevägar och därmed förbättra den longitudinella konnektiviteten i vattendrag (Calles m.fl., 2013b; Calles m.fl., 2015; Travade m.fl., 2010). Samtliga testade låglutande galler (30° lutning) hade en avledande förmåga >80% för nedströmsvandrande Europeisk ål till en intilliggande flyktöppning. β -gallren hade en något högre avledande effekt än α -galler, där i synnerhet β -15 mm utmärkte sig med högst avledningseffektivitet (100%) och lägst passagetid (20 minuter) av de testade gallren. Samtidigt tyder den likartade avledningseffektiviteten för ål mellan de två testade spaltvidderna, samt de låga antal ålar som påträffades nedströms gallren, att låglutande galler har både en mekanisk och en beteendeinducerad avledande förmåga.

Avledningseffektiviteten för de fyra testade gallerkonfigurationerna varierade mellan 80-100% där högst medeleffektivitet observerades för β -gallren (FGE: β -15 mm= 100%, β -30 mm= 95%) och lägst för α -gallren (FGE: α -15 mm= 90%, α -30 mm= 80%). Avledningseffektiviteten var högre eller i paritet med både liknande fältstudier (Calles m.fl., 2015; Calles m.fl., 2013b) och studier utförda i relativt sett små strömrännor (Amaral m.fl., 2003; Russon m.fl. 2010), vilket ytterligare indikerar låglutande gallers höga potential att avleda ål. Trots den lite högre avledningseffektiviteten för galler med 15 mm spaltvidd än för 30 mm var inte skillnaden signifikant, vilket i detta försök indikerade en likartad avledningseffektivitet för ål mellan de två spaltvidderna. Detta styrker hypotesen att låglutande galler, förutom att vara en fysisk barriär, dessutom fungerar som en beteendebbarriär då samtliga ålar under försöken fysiskt kunde passera igenom gallren med 30 mm spaltvidd (Travade m.fl., 2010). Skillnaden i avledningseffektivitet var större mellan de två gallertyperna än mellan de två spaltvidderna, där fler ålar passerade via flyktöppningarna vid β -gallren än vid α -gallren. Resultaten indikerar således att båda gallertyperna (α/β) och spaltvidderna (15/30 mm) har en potential för hög avledningseffektivitet för ål.

En hög avledningseffektivitet resulterar inte automatiskt i en lika hög fångsteffektivitet i de fall gallrets flyktrännor mynnar i en fångstenhet (Calles m.fl., 2013b). Medelfångsteffektiviteten (andel ål som fångats in i fångstenheterna vid försökens slut) i innevarande studie för de fyra testade gallerkonfigurationerna

varierade mellan 30-90% och var, för respektive gallerkonfiguration, lägre än avledningseffektiviteten. Detta förklaras av de observationer av ål som, efter att initialt lyckats med sin passage via flyktöppningen, simmade uppströms i flyktrännorna igen. Liknande beteende, där ålen kan tveka och söka alternativa vägar förbi hinder, har även observerats i fältstudier (Brown m.fl., 2009; Behrmann-Godel och Eckman, 2003). Fångsteffektiviteten var >75% för de ålar som användes i försöken med galler med 15 mm spaltvidd vilket är i paritet med jämförbara fältstudier (Calles m.fl., 2013b). Den betydligt lägre fångsteffektiviteten för galler med 30 mm spaltvidd (<55%) är svårförklarad, eftersom fällornas utformning var densamma för samtliga studerade galler, och skillnaden mellan de två spaltvidderna kräver mer högupplöst data över ålens beteende i strömrännan för att förklaras närmare. Då ålar visar ett sökbeteende efter alternativa vägar förbi hinder (Brown m.fl., 2009; Behrmann-Godel och Eckman, 2003) kan det inte uteslutas att fångsteffektiviteten förändras över tid, framförallt om ålarna är kapabla att simma uppströms. Vattenhastigheten i flyktrännorna var sannolikt i paritet med medelflödeshastigheten i ytan, vilket motsvarade cirka 0,7 m/s, vilket är betydligt lägre än de >2 m/s som ålar observerats simma mot uppströms i labstudier (Russon & Kemp, 2011). En ökning av vattenhastigheten i flyktrännorna skulle sannolikt resultera i en förbättrad fångsteffektivitet i fångstenheterna då färre ålar skulle bli kapabla att simma uppströms igen. Enligt Calles m.fl. (2013a) allmänna rekommendation kring utformning av flyktrännor bör vattenhastigheten i flyktrännan gradvis accelereras, till en s.k. fångsthastighet uppnås, för att undvika turbulens och vattenmängden i densamma bör bestå till 2-10% av vattendragets flöde.

Avlednings- och fångsteffektivitet är inte de enda viktiga aspekterna att ta i beaktande när det gäller ett gillers avledande förmåga då till exempel passagetid är ett annat viktigt mått på dess funktion (Roscoe & Hinch, 2010). Passagetiden för samtliga testade gallerkonfigurationer var kort, >50% passerade via flyktöppningarna inom en timme, vilket är i paritet med jämförbara fältstudier (Calles m.fl., 2015; Calles m.fl., 2013b). Trots att en viss skillnad i passagetid noterades mellan gallerkonfigurationerna, fanns inga signifikanta skillnader mellan de testade gallertyperna eller spaltvidderna. Däremot visade interaktionseffekten att passagetiden var lägre för ål som passerade β -15 mm jämfört med β -30 mm, och ålarna passerade således β -galler med 15 mm spaltvidd på kortast tid. Detta är i linje

med resultaten i Calles m.fl. (2015) som visade att ett β -galler med liknande egenskaper (30° lutning, 15 mm spaltvidd), som implementerats ovan ett vattenkraftverk, resulterade i en låg passagetid för nedströmsvandrande ål, vilket ytterligare indikerar denna konfigurations höga potential för låg passagetid. Då flera studier visat att ål i stor utsträckning uppvisar en tvekan vid passage av konventionella intagsgaller, och därmed försenas i sin nedströmsvandring (Behrmann-Godel & Eckman, 2003; Brown m.fl., 2009; Durif m.fl., 2002; Pedersen m.fl., 2011) kan sannolikt en implementering av låglutande intagsgaller, i synnerhet β -15 mm, minska tiden ålen spenderar i anslutning till kraftverket. Detta är av vikt då den totala vandringstiden för ålen därmed blir kortare och den riskerar inte i lika hög grad en sämre anpassning till optimala vandringsförhållanden eller ett vandringsstopp (Winter, Jansen & Bruijs, 2006).

Kamerorna vid α -gallren visade, likt andra studier (EPRI, 2001; Amaral m.fl., 2003; Russon m.fl., 2010), att ålens beteenderespons på gallret inträffade först efter fysisk kontakt med detsamma. De beteenderesponser som observerades vid kontakt med α -gallren var att ålen antingen: 1) flydde från gallret, i regel genom att simma uppströms; eller 2) följde gallret, i regel med strömmens riktning. En del av de ålar som simmade längs med gallret efter en första kontakt, i vissa fall ända upp till ytan, uppvisade en flyktrespons med viss fördröjning. Trots att vattenhastigheten vid α -gallret var i paritet med rekommenderade maxhastigheten vid fysiska barriärer (DWA, 2005), då ål har svårigheter att fly uppströms, observerades ingen ål fastklämd mot gallren. Detta indikerar att ål kan undfly högre hastigheter vid låglutande galler jämfört med vertikala galler, vilket observerats även i tidigare labstudier på låglutande galler (Russon m.f., 2010). De ålar som lokaliserade flyktöppningarna i α -gallret närmade sig i regel gallret längs med strömrännans sidor, och avledningseffektiviteten kan under studien delvis varit beroende på var ålen närmade sig gallret, något som noterats i tidigare studier av just α -galler (EPRI, 2001). Efter att de passerat via flyktöppningarna kunde ålarna sedan, till synes utan ansträngning, simma uppströms i flyktrännorna igen, vilket inte var oväntat eftersom liknande beteende observerats även vid högre vattenhastigheter (Amaral m.fl., 2003; Russon & Kemp, 2011). Detta noterades i högre utsträckning under försök med β -galler jämfört med α -galler samt för långa ålar jämfört med korta, det senare möjligtvis förklarat av kroppslängdens betydelse för simkapaciteten (Videler, 1993). Vilket beteende hos ålen som orsakade denna skillnad mellan gallertyperna blev

under studien inte klarlagt. En möjlig förklaring kan vara en effektivare avledning vid β -gallren än vid α -gallren och/eller β -flyktöppningens design som, med en intilliggande ramp med vägledande funktion för bottenorienterade arter (Calles m.fl., 2013a), resulterade i fler passager via flyktöppningarna. Även en potentiell variation i hydrauliken mellan flyktöppningarna på α - respektive β -gallren samt flyktrännornas olika dimensioner är möjliga förklaringar till den observerade skillnaden.

Om Travade m.fl. (2010) etablerade samband för förhållandet mellan ålens längd och passerbarhet av olika spaltvidder appliceras på ålarna i vårt försök var samtliga ålar för stora för att passera genom gallren med 15 mm spaltvidd medan samtliga ålar fysiskt kunde passera gallren med 30 mm spaltvidd. Denna passerbarhet illustrerades av att en majoritet av ålarna (8 av 10) infångades nedströms α -30 mm och dessutom detekterades merparten av dem upprepade gånger i flyktöppningarna. Detta indikerar att flera av de ålar påträffade nedströms gallret först lyckats med sin passage via flyktöppningarna för att sedan simma ut ur densamma och genom gallret. Trots att observationer inte kunde ske längs med hela gallret, och att det därmed råder en osäkerhet kring ålens beteende vid detsamma, indikerar detta, i kombination med att endast ett fåtal ålar påträffade nedströms gallret, en preferens för flyktöppningarna och låglutande gallerfunktion som beteendebarrär. Ett liknande mönster med upprepade passager via flyktöppningarna noterades för de ålar som infångades uppströms gallren vid försökens slut. Interaktionseffekten där fler ålar påträffades uppströms β -30 mm än β -15 mm är svårförklarad men då ålar visar ett sökbeteende efter alternativa vägar förbi hinder (Brown m.fl., 2009; Behrmann-Godel och Eckman, 2003) kan det inte uteslutas att våra resultat med avseende på infångningsplats förändrades över tid och att slumpens inverkan på var ålen befann sig vid försökens slut kan ha haft stor betydelse.

Nuvarande studiedesign gav inte högupplöst och individspecifik data, förutom vid de tillfällen de registreras i PIT-antennerna, vilket är något som bör utvecklas för att noggrannare följa individers beteende i anslutning till gallren. Detta skulle medföra en möjlighet till en fördjupad utvärdering av de olika gallertyperna och spaltvidderna samt ytterligare studera samband mellan gallerutformning, hydraulik och ålens beteende. Funktionen hos PIT-antennerna under studiens gång varierade, sannolikt beroende på störningar inducerade av pumparna i "Laxelatorn", vilket medförde att några individer som via kamerorna observerades passera antennerna i

flyktöppningarna eller startboxarna utan att detekteras av PIT-antennerna. Detta resulterade i att några individer uteslöts ur analysen av passagetid på grund av brist på data och att passagetiden för några individer kan ha överskattats. Vidare bör förbättringsåtgärder av gallren beaktas då det vid α -30 mm observerades flera ålar som ”greppade” tag i tvärgående balkar i gallerkonstruktionen och i anslutning till dessa till synes försökte passera genom gallret. Dessutom bör ett täckande överdrag vid ytan övervägas då några ålar observerades följa gallret upp till ytan och därefter försöka passera igenom detsamma.

Innevarande studie är en av få labstudier där låglutande intagsgallers funktion på nedströmsvandrande ål undersökts, i synnerhet i en strömränna med skala 1:1 mot en intagskanal till ett småskaligt vattenkraftverk. Resultaten, samt resultat från tidigare fältstudier (Calles m.fl., 2015; Calles m.fl., 2013b) och labstudier (Amaral m.fl., 2003; Russon m.fl., 2010), befäster låglutande gallers höga avledande funktion på nedströmsvandrande ål. Resultaten indikerar att låglutande galler, förutom att vara en fysisk barriär, fungerar som en beteendeinducerad barriär för ål, vilket medför en potential till att i intagskanaler implementera låglutande galler med en spaltvidd som ålen fysiskt kan passera. Denna potential kan i synnerhet utnyttjas vid en uppskalning av tekniken vid större vattenkraftverk där det, jämfört med ett småskaligt vattenkraftverk, blir en större materialkostnad och andra tekniska utmaningar vid implementering och drift. Innevarande studie utfördes med vattenhastigheter kring 0,7 m/s, något som är i det lägre spannet av vad som vanligen förekommer i turbiners intagskanaler (Amaral m.fl., 2003). Vattenhastigheten kan påverka ålars förmåga att frigöra sig från låglutande galler efter att fysiskt kommit i kontakt med det, något som observerats för såväl konventionella (DWA, 2005), som låglutande galler (Russon m.fl., 2010). En ökad vattenhastighet kan således innebära en potentiellt förändrad funktion av gallren med en ökad skaderisk och en minskning i avledningseffektiviteten och är något som bör undersökas i vidare studier. Vår studie demonstrerar, liksom Calles m.fl. (2013b), dessutom att en hög avledningseffektivitet inte automatiskt resulterar i en lika hög fångsteffektivitet i fångstenheten, vilket har betydelse i de fall där ålen fångas in i fångstenheter för vidare transport nedströms (Trap & Transport). Ålens beteende, där flera individer simmade uppströms igen att passerat gallret via flyktöppningarna, indikerar betydelsen av en design av flyktöppningar och fångstenheter som hindrar ålen att simma uppströms. En möjlig lösning kan vara att gradvis accelerera flödet i

flyktöppningar och flyktrännor upp till fångsthastigheten för att på så sätt hindra ålen att simma uppströms igen (Calles m.fl., 2013), vilket bör vara föremål för vidare studier.

Finansiärer och erkännanden

Studien i "Laxelatorn" var finansierad av Vattenfall AB samt från försäljning av Bra miljövalsel, vars utdelning har godkänts av Svenska Naturskyddsföreningen. Först och främst vill jag tacka min handledare Olle Calles för ett mycket lärorikt och utvecklande handledarskap och det stora stödet under arbetets gång. Även stort tack till David Aldvén som bidragit stort med goda idéer och gedigen kunskap samt övrig berörd personal på Vattenfall Research & Developement AB i Älvkarlebylaboratoriet som bland annat mätt hydraulik, skiftat galler mellan försök och tillverkat nödvändiga komponenter till försöksdesignen. Johan Watz och Anders Nilsson på Karlstads respektive Lunds universitet till att ha bidragit stort kring försöksuppställning samt dataanalys. Jessica Dolk och Phillip Eriksson för ihärdigt labarbete. Denna studie utfördes med ett etiskt godkännande av djurförsök från Göteborgs djuretiska nämnd (Dnr: 5.8.18-06780/2018).

Referenser

- Amaral, S., Winchell, F., McMahon, B. & Dixon, D. (2003). Evaluation of Angled Bar Racks and Louvers for Guiding Silver Phase American Eels. *American Fisheries Society Symposium*, 33, 367-376.
- 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.
- 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.
- Behrmann-Godel, J. & Eckman, R. (2003). A preliminary telemetry study of the migration of silver European eel (*Anguilla anguilla* L.) in the River Mosel, Germany. *Ecology of Freshwater Fish*, 12, 196-202.
- Boubée J., Jellyman D. & Sinclair C. (2008). Eel protection measures within the Manapouri hydroelectric power scheme, South Island, New Zealand. *Hydrobiologia*, 609, 71-82.
- Bruijns, M.C.M., Polman, H.J.G., Van Aerssen, G.H.F.M., Hadderingh, R.H., Winter, H.V., Deerenberg, C., ... Kessels, N. (2003). Management of silver eel: Human impact on downstream migrating eel in the river Meuse. *EU-Report Contract*, Q5RS-2000-31141.
- Bruijns, M & Durif, C. (2009). Silver eel migration and behavior. *Spawning Migration of the European Eel*, 4, 65-95.
- Brown, L., Haro, A. & Castro-Satnos, T. (2009). Three-Dimensional Movement of Silver-Phase American Eels in the Forebay of a Small Hydroelectric Facility. *American Fisheries Society Symposium*, 58, 277-291.
- Calles, O., Olsson, I.C., Comoglio, C., Kemp, P.S., Blunden, L., Schmitz, M. & Greenberg, L. A. (2010). Size-dependent mortality of migratory silver eels at a hydropower plant, and implications for escapement to the sea, *Freshwater Biology*, 55, 2167-2180.
- Calles, O., Degerman, E., Wickström, H., Christiansson, J., Gustafsson, S. & Näslund I. (2013a). 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*, 39 (6). 114 sidor.
- Calles, O., Karlsson, S., Vezza, P., Comoglio, C. & Tielman, J (2013b). Success of a low-sloping rack for improving downstream passage of silver eels at a hydroelectric plant. *Freshwater Biology*, 58, 2168-2179.
- 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. Naturresurs rinnande vatten, Karlstads universitet. 36 sidor.
- Carr, J. W. & Whoriskey, F. G. (2008). Migration of silver American eels past a hydroelectric dam and through a coastal zone. *Fisheries Management and Ecology*, 15(5-6), 393-400.
- Caudill, C.C., Daigle, W.R., Keefer, M.L., Boggs, C.T., Jepson, M.A., Burke, B.J., Zabel, R.W., Bjornn, T.C., & Peery, C.A. (2007). Slow dam passage in adult Columbia River salmonids associated with unsuccessful migration: delayed negative effects of passage obstacles or condition-dependent mortality? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 64(7): 979-995
- Correia, M. J., Costa, J. L., Antunes, C., De Leo, G., and Domingos, I. (2018). The decline in recruitment of the European eel: new insights from a 40- year-long time-series in the Minho estuary (Portugal). *ICES Journal of Marine Science*, 75, 1975-1983.
- Durif, C., Elie, P., Gosset, C., Rives, J. & Travade, F. 2002. Behavioural study of downstream migrating eels by radio-telemetry at a small hydroelectric power plant. *American Fisheries Society Symposium XX*, 16, 65-79.
- DWA (2005). DWA Topics. Fish Protection Technologies and Downstream Fishways. Dimensioning, Design, Effectiveness Inspection. *Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall*. 228 sidor
- EPRI (Electric Power Research Institute) (2001). Review and documentation of research and technologies on passage and protection of downstream migrating catadromous eels at hydroelectric facilities. Prepared by Versar, Inc., EPRI report TR-1000730, Palo Alto, California. 270 sidor.
- Fiskhälsan FH AB (2007). Bedövning av fisk (Kurs i märkningsteknik för fisk). Älvkarleby.

- Hadderingh, R. H. and Bakker, H. D. (1998). Fish mortality due to passage through hydroelectric power stations on the Meuse and Vecht rivers. *Fish Migration and Fish Bypasses*, 315–328.
- Haro, A., Castro-Santos, T. & Boubée, J. (2000). Behavior and passage of silver-phase American eels, *Anguilla rostrata* (LeSueur), at a small hydroelectric facility. *Dana*, 12, 33–42.
- Jansen, H. M., Winter, H. V., Bruijs, M. C. M. & Polman, H. J. G. (2007). Just go with the flow? Route selection and mortality during downstream migration of silver eels in relation to river discharge. *ICES Journal of Marine Science*, 64, 1437–1443.
- Larinier, M. & Travade, F. (2002). Downstream Migration: Problems and Facilities. *Bull. Fr. Pêche Piscic*, 364, 181–207.
- Larinier, M. (2008). Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France. *Hydrobiologia*, 609, 97–108.
- Jonsson, B., Waples, R. & Friedland, K. (1999). Extinction considerations for diadromous fishes. *ICES Journal of Marine Science. Journal du Conseil*, 56, 405–409.
- 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.
- Noonan, M. J., Grant, J. W. & Jackson, C. D. (2012). A quantitative 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.
- Rice, S. P., Lancaster, J. & Kemp, P. (2009). Experimentation at the interface of fluvial geomorphology, stream ecology and hydraulic engineering and the development of an effective interdisciplinary river science. *Earth Surface Processes and Landforms Early view*; doi: 10.1002/esp.1838.
- Pedersen, M. I., Jepsen, N., Aarestrup, K., Koed, A., Pedersen, S. & Okland, F. (2011). Loss of European silver eel passing a hydropower station. *J. Appl. Ichthyol*, 27, 1–5.
- Roscoe, D. W. & Hinch, S. G. (2010). Effectiveness monitoring of fish passage facilities: historical trends, geographic patterns and future directions. *FISH and FISHERIES*, 11 (2), 12–33.
- Russon, I. J., Kemp, P. S. & Calles, O. (2010). Response of downstream migrating adult European eels (*Anguilla Anguilla*) to bar racks under experimental conditions. *Ecology of freshwater fish*, 2, 197–205.
- Russon, I. J. & Kemp, P. S. (2011). Experimental quantification of the swimming performance and behaviour of spawning run river lamprey *Lampetra fluviatilis* and European eel *Anguilla Anguilla*. *Journal of Fish Biology*, 78, 1965–1975.
- Travade F., Larinier M., Subra S., Gomes P. & De-Oliveira E. (2010). Behavior and passage of European silver eels (*Anguilla anguilla*) at a small hydropower plant during their downstream migration. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 398, 01.
- Ward J. V. & Stanford J. A. (1995). Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation. *Regulated Rivers: Research & Management*, 11, 105–119.
- Videler, J. J. (1993). Fish Swimming. London. Chapman & Hall. 226 sidor.
- Winter, H. V., Jansen, H. M. & Bruijs, M. C. M. (2006). Assessing the impact of hydropower and fisheries on downstream migrating eel, *Anguilla anguilla*, by telemetry in the river Meuse. *Ecology of freshwater fish*, 15, 221–228.