

Bilaga 5.7. Hydraulisk design av lockvatten

Av: Patrik Andreasson, Luleå Tekniska Universitetet och Vattenfall AB

Sammanfattning

Detta avsnitt beskriver de hydrauliska aspekterna på lockvatten. Dessa är normalt underordnade de biologiska men har en stöttande funktion i att tillhandahålla verktyg för att utforma lockvatten med en hög passageeffektivitet och om möjligt på ett energieffektivt sätt. Nedan ges ett fåtal punkter hur lockvatten bör utformas ur hydraulisk synpunkt:

- Ett attraktivt lockvatten måste ha en tillräcklig mäktighet för att locka fisk att gå in i fiskpassagen. Det som avgör ett lockvattens penetration i omgivande vattenvolym är dess momentum: en kombination lockvattnets mängd, hastighet och riktning.
- För att åstadkomma önskvärd hydraulisk funktion hos lockvatten så är den mest pålitliga metoden modellering. Komplexiteten i lockvatten och dess omgivning gör sig bäst i 3D-modellering: matematisk eller fysisk. En viktig förutsättning för ett gott resultat från modellering är att batymetrin (bottentopografin) i vattenområdet är kartlagd.
- I mindre anläggningar kan modellering vara ett alltför kostsamt verktyg. I detta dokument och i en mer teknisk beskrivning (Andreasson, 2019) ges därför några enkla analytiska verktyg för att uppskatta penetrationen av lockvatten med teori för s.k. strålar. Detta kan ge en fingervisning om ungefärlig utbredning och penetration utan arbetet med mer omfattande modellering.
- Hastigheten hos lockvattnet är viktig. Den måste vara tillräcklig för att attrahera fisk men inte så hög att den överstiger målarternas simförmåga. Oavsett utformning av ingången till fiskpassagen skapar lockvatten låghastighetsområden i dess yttre områden då omgivande vatten succesivt blandas in och "eroderar" strålen. Rätt utformad kan även mer svagsimmande arter simma i dessa lockvattenstrålens ytterområden.
- Den dominerande synen är att lockvatten bör ha en riktning som är nära parallell med huvudströmmen. Om möjligt kan det också vara gynnsamt att introducera lockvatten i lugnare vattenområden i direkt närhet till huvudflödet från turbinerna. Även om turbinvattenföringen attraherar mest, blir tydligheten hos ett givet volymflöde lockvatten större i lugnare områden, förutsatt att området avsöks av fisken.
- Ingången till fiskpassagen är en viktig del i den hydrauliska utformningen. Lockvattnet och fiskpassagens flöde bör länkas samman och tillräckliga låghastighetsområden bör tillgodoses om också svagsimmande arter adresseras.

Lockvattnets konkurrens med huvudflödet

Lockvatten skall attrahera vandrande fisk att upptäcka och välja fiskpassagen förbi ett vandringshinder. Då vandring sker såväl uppströms men även tillbaka nedströms har lockvatten betydelse i båda fallen. Lockvattnets konkurrens med attraktionen hos huvudströmmen är central oavsett riktning. Att påverka hur och var lockvattnet introduceras i huvudströmmen är dock fundamentalt olika för upp- och nedströmsvandring:

Uppströmsvandring: här skall lockvattnet konkurrera med relativt höga vattenhastigheter, turbulensnivåer och volymflöden ofta i relativ närhet till turbinutlopp och/eller utskovsflöden. Här är dock frihetsgraderna vid designen av lockvattnet för uppströmsvandring förhållandevis stora. Lockvattnet kan anordnas så att det kan penetrera in i omgivande vattenvolym, t.ex. in i huvudflödet. Lockvattnet kan därmed med rätt hydrauliska egenskaper designas för en funktion relativt långt från mynning (ingången) till fiskpassagen.

Nedströmsvandring: nedströms lockvatten behöver oftast inte konkurrera med lika stora hastigheter och turbulensnivåer som vid uppströmsvandring. En ingång till fiskpassagen här innebär dock att lockvattenflödet i huvudsak accelereras i direkt anslutning till ingångens mynning och lockvattnets påverkan (detekterbarhet) längre ut är svår att åstadkomma. Utan guidningsanordningar eller andra attraktionsåtgärder i huvudströmmen så kan därför mynningen vara svår att hitta för vandrande fisk vid låga flöden. Att märkbart avlänsa huvudströmmen mot mynningen bara med hjälp av lockvatten är oftast inte realistiskt, då det kräver en ansenlig andel av det gemensamma volymflödet. Placeringen av mynningen för nedströms vandring är därför viktig. En hög accelerationen i mynningen skapar en tvekan hos fisken att gå in i passagen, se t.ex. Kemp m.fl. (2005) och Kerr & Kemp (2019). Samtidigt kan det vara önskvärt att strömningen i anslutning till mynningen når en sluthastighet som överstiger önskade målarters sprinthatighet, för att undvika att de vänder tillbaka.

Volymflöden för lockvatten

Calles m.fl. (2013) ger en omfattande litteraturgenomgång av olika rekommendationer av volymflöden för lockvatten för uppströmsvandring, med såväl internationella rekommendationer och svenska exempel. I de allra flesta fall anges en procentsats av huvudflödet (ofta uttryckt som turbinvattenföring, slukförmåga eller medelvattenföring MQ). För existerande passager ökar effektiviteten i anlockningen med ökande procentsats, för att teoretiskt vara optimal (men oftast orealistisk) vid 100%. Gränsen för vad som rapporteras vara tillräckligt god anlockning varierar dock kraftigt från enstaka procent till 10-tals procent. Wolter & Schomaker (2019) sammanställde funktionen hos

193 stycken fiskpassager av olika storlek och typ, varav 92 stycken bedömdes vara "fully functional". Underlaget för detta var vetenskapliga publikationer och "grå litteratur", filtrerade med krav på dataunderlag m.m. samt att fiskvägen skulle vara designad att inkludera även svagsimmande arter och yngre individer. Medianflödet för dessa var 5% av MQ men med stor spridning uppåt och nedåt.

Ur ett hydrauliskt perspektiv ter sig lockvattnets rörelsemängd ("*momentum*") vara mer relevant dimensioneringsparameter än en andel av huvudflödet. Rörelsemängden kan ge en fingervisning om lockvattnets inträngning i nedströms vattenområde och även dess penetration in i huvudflödet. Rörelsemängd kan sägas vara en kombination av massflöde, hastighet samt riktning och uttrycka lockvattnets "mäktighet" eller "påverkan" i förhållande till huvudflödet. Calles m.fl. (2013) och de flesta referenser som anger ett volymflöde pekar också på vikten av att utforma lockvattnet så att det tydligt penetrerar och påverkar huvudflödet. Några, t.ex. Lariner (2002) och Armstrong m.fl. (2010) diskuterar också i rörelsemängd snarare än volymflöde. Detta diskuteras här mer i kommande stycken (Penetration och spridning av lockvatten och Hastigheter och turbulens (uppströmsvandring)).

Vad gäller nedströmsvandring har som nämnts styrning av fisken mot passagen stor betydelse för effektiviteten (fysiska eller beteendebarrärer). Volymflödet i några nedströmsstudier sammanfattas i Calles m.fl. (2013) till ca 2–10% av huvudflödet. Haraldstad m.fl. (2018) indikerar 90% passage-effektivitet ungefär mitt i detta intervall för nedströms vandrande smolt. Lariner & Travande (2002) anger 5% av turbinflödet som praxis i Frankrike (2% för lutande avledningsanordningar: "inclined", i Sverige ofta benämnt som låglutande alfa-galler). USFWS (2019) anger att nedströms lockvatten bör vara 5% av turbinernas slukförmåga, dock minst 0,7 m³/s. Det framgår dock inte på vilket underlaget denna rekommendation bygger.

Penetration och spridning av lockvatten

Lockvatten bör tillföras med en rörelsemängd (massflöde × hastighet) som har avsedd attraktions-kraft i konkurrens med huvudflödet (oftast turbinvattenföringen). Lockvattnet bör penetrera fram till det område som bedöms lämpligt m.a.p. var fisken uppehåller sig. Det bör vara i anslutning till huvudflödet men områden med de högsta hastigheterna och kraftigaste turbulensen bör normalt undvikas (Armstrong m.fl., 2010). Denna form av rörelsemängdsdesign (som komplement till en procentsats av huvudflödet) torde i många fall vara en mer effektiv metodik ur anlockningssynpunkt, då en tydligare bild av lockvattnets inverkan på nedströmsområdet erhålls.

Den säkraste metoden att designa penetration och spridning är att använda någon form av hydraulisk modellering (matematisk eller fysisk). Detta är dock relativt kostsamt, såväl själva modelleringen som framtagandet av batymetri (undervattensgeometri) och övrigt underlag som erfordras.

Det finns dock en alltför sällan använd designmetod som är enkel och snabb, även om den inte har samma precision som fullskalig modellering. För små

vattendrag kan denna metod vara lämplig att nyttja vid design av lockvatten. Inom liknande tillämpningar i vattendrag (recipienthydraulik t.ex.) har man länge använt ekvationer för s.k. strålar ("Jets"). Med dessa kan skattningar av penetration och spridning av lockvatten göras, utan avancerade förkunskaper eller omfattande modellering. I Andreasson (2019) ges analysverktygen för detta. Figur 45 nedan illustrerar hur lockvattenstrålens rörelse kan predikteras under förenklade strömningsförhållanden med denna metod.

En ofta förekommande åsikt är att lockvatten bör riktas snett in mot och gärna parallellt med huvudflödet. Detta nämns bl.a. i Pavlov (1989), Armstrong m.fl. (2010) och DWA (2014). Den senare pekar också på att lockvattnet bör ansluta "sömlöst" med huvudströmmen. Vinkeln bör vara under 45°, gärna under 30°. En brantare vinkel torde kunna användas om det är ett initialt avstånd med lugnvatten fram till huvudflödet.

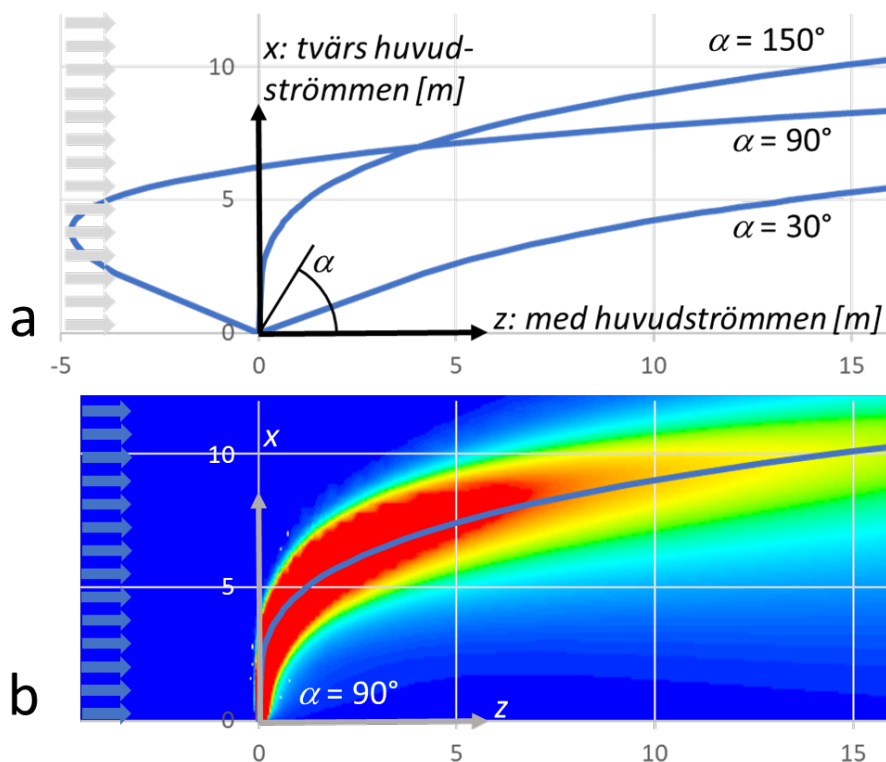
I Figur 45 nedan visas tre olika vinklar: för tydlighets skull med 60° vinkelskillnad mellan dem. Figur 45a visar strömlinjer för strålarnas centrum. "Strömlinjer" är linjer som följer strömmen från den punkt de släpps. Hur hastigheten minskar och spridningen av strålen ökar med strömlinjens längd från mynningen är inte enkelt att skatta med bra precision. Det beror på att strålen deformeras olika vid olika vinklar och är ofta "hästskoformad" med två parallella motroterande huvudstrukturer. Vad kan man säga då? En viss vägledning kan ges av:

- Längden på strömlinjerna (blå i Figur 45a) är en indikation på spridning och hastighetsanpassning till omgivande huvudström. Ju längre sträcka bort från mynningen, desto mer påverkas strålen av inblandning av omgivande vatten. Även om förhållandena inte är de samma för olika vinklar är det ändå en indikation: lång sträcka = stor "uttunning" av lockvattnet.
- I Andreasson (2019) ges exempel på hur spridningen kan skattas för rät vinkel ($\alpha = 90^\circ$) i Figur 45. Det ger en fingervisning om spridningen också för övriga vinklar.
- Även om lockvatten bör ha en riktning parallellt med huvudströmmen så kan större vinklar behövas för att "transportera ut" strålen från ingången till fiskpassagen till avsedd plats för att attrahera fisken.

Vill man ha en mer underbyggd uppskattning av hastigheter och spridning bör man leta i den publicerade litteraturen efter en studie som passar den vinkel och hastighetskvot som söks. Arbetsinsatsen/kostnaden tenderar då att kunna bli i paritet med en enklare modellering, vilket är att föredra i jämförelsen.

I Figur 45b visas en CFD-beräkning (efter Saaidi, 2005) motsvarande strömlinjen för rät vinkel i Figur 45a. Även en så pass avancerad modellerings-teknik som CFD (Computational Fluid Dynamics) uppvisar tydliga skillnader med en verklig lockvattenstråle. CFD modellerar inte turbulenta strukturer utan de parametreras. Därför ser strålen jämn och stabil ut ("sirapslik"). En verklig lockvattenstråle skulle variera kraftigt i tid och rum, med stora och små

strukturer som speglar turbulensen. CFD kan därför betraktas som ett medelvärde av strålens form och rörelse över tiden.



Figur 1. Exempel på lockvatten som mynnar i ett huvudflöde vid olika vinklar α . 1a. De olika blå kurvorna visar skattade strömlinjer för centrum av strålen för tre olika riktningar vid mynningen: 30, 90 och 150 grader från huvudströmmen. I exemplet har lockvattnet hastigheten 2 m/s genom en 1 m² rektangulär ingång till trappan (mynning för strålen). Huvudflödet (i riktning längs z-axeln) har hastigheten 1 m/s. Koordinaterna i x- och y-riktning anger penetration i meter (bearbetad från Andreasson, 2019). 1b. Samma flödesfall som i 1a (rät vinkel: $\alpha = 90^\circ$) men med strömlinjen överlagrat en motsvarande CFD-beräkning (3D-modellering). Röd till blå färg är hastighet från hög till låg. CFD-bilderna efter Saadi (2005).

Att anordna lockvatten i mer läade regioner i närhet av huvudflödet är ofta en effektiv lösning. Ur hydraulisk synpunkt bibehåller strålen sin "tydlighet" i sin omgivning bättre och längre än om den tillförs i huvudströmmen, givet samma volymflöde. För lugnvatten finns mer utvecklad teori som med enkla medel ger information om utvecklingen av hastighetsprofiler, spridning, flödesinblandning, m.m. Teorin för detta finns beskriven i Andreasson (2019).

Teori om strålar ska dock inte förväxlas med en fullvärdig design av lockvatten. Den styrs i första hand av fiskens preferenser och beteende. Även ur hydraulisk synpunkt är det många frågor som inte löses med ekvationer för strålar. Exempelvis är förstås utformningen i anslutning till fiskpassagen och dess lokala anlockning något som kräver analys som inte strålteori kan svara på. Låghastighetszoner för mer svagsimmande arter kan behöva beaktas och en nära sömlös övergång från lockvatten till fiskpassage bör anordnas. Ofta tillförs lockvattnet från botten eller sidorna genom s.k. diffusorer ("wall" eller "floor diffusers": USFWS, 2019).

Även för lockvatten vars egenskaper mer liknar ett mynnande biflöde än en stråle, finns en del riktlinjer. I Andreasson (2019) ges ett antal litteraturhänvisningar för sådana fall även om litteraturen på området inte medger en mer generell metodikgenomgång på samma sätt som för turbulenta strålar.

Hastigheter och turbulens (uppströmsvandring)

I lockvattensstrålens centrum kommer initialhastigheten (från passagens mynning) att bibehållas en sträcka nedströms, för att därför sakta "erodera" till omgivningens hastighet. För att lockvattnet över huvud taget skall penetrera ut i ett huvudflöde krävs att lockvattnets initialhastighet är högre än huvudflödets. För läade lugnvattenområden sker penetrationen även vid lägre hastigheter. Valet av hastigheten på lockvattnet bestäms utifrån vilka målarter man har. Vanligt är minst 1 m/s upp till drygt 2 m/s för att passa mer snabbsimmande arter som atlantlax (Armsrong m.fl., 2010). Pavlov (1989) menar att lockvattenflöden alltid måste vara över tröskelhastigheten för att initiera uppströms vandring ("*threshold velocity*": ca 0,1–0,2 m/s för de flesta fiskarter) i mer eller mindre stillastående vatten. Vidare menar han att i ett konkurrerande huvudflöde bör lockvattnet ha en hastighet som överskrider huvudflödet med lika mycket (0,1–0,2 m/s), dock helst ej över den gräns vid vilken fisken börjar drifva med strömmen ("*critical velocity*"). Med rätt utformning kan dock lockvattnet utformas så att lägre hastigheter skapas i lockvattenstrålens perifera delar, t.ex. nära botten. . Ingångens utformning och sättet på vilket lockvattnet tillförs påverkar strålens form speciellt nära mynningen. För svagsimmande arter är det därför en fördel om lockvattnet redan här har låghastighetszoner.

Notera att även en stråle med en centrumhastighet som är hög, har en gradvis avtagande hastighet med avstånd från attraktionsstrålens centrum då omgivande vatten gradvis "eroderar" de yttre delarna och gör den allt bredare samt jämnar ut och sänker hastigheten. Attraktionsvattnets stråle kan därför utformas så att gynnsamma hastigheter skapas mot strålens kanter. Uppströms vandrande fisk är visserligen attraherad av huvudflödet ("*positive rheotaxis*") men väljer ofta att simma i utkanten, en bit från flödets maximala hastighet där förhållandena är gynnsamma för den egna simförmågan (DVWK, 2002). Lindberg m.fl. (2016) visar på att uppströms vandrande lax attraheras av max-hastigheten men väljer ofta att vandra i dess närhet där strömningsmotståndet kan minimeras.

Turbulens kan såväl verka attraherande som repellerande. Turbulens i ett vattendrag brukar beskrivas med en längd och hastighetsskala för de mest energirika virvlarna, även om de förekommer i många storlekar och varierande intensitet. Man kan grovt uppskatta dessa turbulensparametrar med en typisk längdskala (ca $0,3 \times$ djupet) respektive en typisk hastighet (i lockvatten uppskattningvis ca $0,03\text{--}0,04 \times$ medelhastigheten). Turbulens undviks normalt av fisk om turbulensens längdskala är i paritet med dess längd, och dess

hastighetsskala är högre än vad fisken kan bemästra (se t.ex. Cotel & Webb, 2015).

För fiskpassager används ibland begreppet "Energy Dissipation Factor" (EDF) eller "Power density". Det är ett begrepp som anger den turbulenta energiomsättningen [W/m^3] och relateras ibland till kriterier och rekommendationer för olika fiskarter. Hydrauliskt kan samma energiomsättning skattas för lockvatten utifrån ovan nämnda typiska turbulenta storheter. I normalfallet ter sig storleken på energiomsättningen dock betydligt lägre i nedströmsområdet från turbinerna (enstaka till tiotal W/m^3), än vad som rekommenderas för de flesta tekniska fiskvägar. Istället är det troligt att det är medelströmmens hastighet och vorticitet ("rotation") som påverkar simförmågan mest. Även om omsättningen av energi (EDF) är mindre än t.ex. i en kammartappa är det kinetiska energiinnehållet förhållandevis stort (typiskt 1–4 kJ/m^3) i strömningsfältet en bit nedströms turbinutloppet. Dessa värden är också ungefär representativa för ett lockvatten en bit från fiskpassagens ingång.

Höga hastigheter hos lockvattnet kan snabbt bromsa in om vattenytan närmar sig s.k. kritiska eller superkritiska förhållanden, då kraftig våg- och virvelbildning och t.o.m. vattensprång i form av "virvelvalsar" kan utbildas. Risken för detta är större om lockvattnet tillförs nära eller vinklas upp mot vattenytan. Ur attraktionssynpunkt är det dock möjligen inte en nackdel, då associerad luftinblandning och ljud tros anses verka lockande på fisk. En ökad inbromsning kan också ske om höga hastigheter tillförs nära botten.

Lockvattentillgång, dammsäkerhet m.m.

För att uppnå en god anlockning till en fiskväg är i de flesta fall en tillräcklig mängd lockvatten avgörande. Vanligtvis leds lockvattnet från uppströms - dammen via en tub alternativt ränna för att sammanstråla i fiskvägens första steg (ingången). Lockvattnet behöver ha ett betydligt större flöde än det som rinner i fiskvägen. Under vissa förhållanden kan det därför vara svårt att i en befintlig konstruktion skapa plats för att leda fram lockvattnet. Tillgången av lockvatten kan också vara begränsad av annan orsak. Den rörelseenergi som lockvatten innehåller är i de allra flesta fall mycket liten i förhållande till den lägesenergi som samma mängd vatten har i dammen uppströms. Ett fåtal procent av den tillgängliga energin återstår i det slutliga lockvattnet. Det kan därför under vissa förhållanden finnas anledning att överväga om lockvatten helt eller till delar kan alstras på annat sätt eller tas tillvara för energiproduktion.

Ett alternativ som under gynnsamma förhållanden kan fungera, är om lockvattnet kan alstras med pumpar, som matas med vatten från nedströms dammen. Med hjälp av s.k. ejektorer kan vattnet från pumparna användas för att öka lockvattenflödet motsvarande flera gånger pumpens flöde. Utformningen av hur lockvattnet tillförs påverkar hur effektivt detta kan göras. En motsvarande funktion kan i vissa fall åstadkommas genom att pumparna

flöde ersätts med vatten som tillförs via en mindre tub från uppströms - dammen. Även på detta sätt kan merparten av vattnet tas från vattenområden nedströms dammen, som accelereras upp med hjälp av det energirika vattnet från uppströms magasin. Även minikraftverk har använts för att bättre nyttja överskottsenergin i lockvatten, t.ex. i Frankrike men även i Sverige (Stornorrfors). Oavsett lösning måste biologiska aspekter alltid vägas in för att inte försämra effektiviteten i passagen.

Man bör också alltid beakta dammsäkerhetsfrågor i ett projekteringskedje, t.ex. att lockvattnet i sig kan skapa skadliga vibrationer och laster på konstruktioner eller orsaka lokal erosion som kan försvaga vitala delar i fördämning eller bottenfundament. Detta gäller förstås också i hög grad själva passagen men berörs inte ytterligare i detta avsnitt.

Referenser

Andreasson, P., 2019, *Teori om strålar – för vägledning vid utformning av Lockvatten*, Forskningsrapport, Luleå University of Technology. Länk: <http://ltu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1376164&dswid=-2933>

Armstrong, G.S., M.W. Aprahamian, G.A. Fewings, P.J. Gough, N.A. Reader & P.V. Varallo, 2010, *Environment Agency Fish Pass Manual: Guidance Notes On The Legislation, Selection and Approval of Fish Passes In England and Wales*, Document – GEHO 0910 BTBP-E-E, Environment Agency, Bristol, U.K.

Calles, O., E. Degerman, H. Wickström, J. Christiansson, S. Gustafsson & I. Näslund, 2013, *Anordningar för upp- och nedströmspassage av fisk vid vattenanläggningar - Underlag till vägledning om lämpliga försiktighetsmått och bästa möjliga teknik för vattenkraft*, Rapport 2013:14, Havs- och vattenmyndigheten.

Aline J. Cotel A.J. & P.W. Webb, 2015, *Living in a Turbulent World—A New Conceptual Framework for the Interactions of Fish and Eddies*, Integrative and Comparative Biology, **55**(4):662–672.

DVWK, 2002, *Fish passes – Design, dimensions and monitoring*, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK): översatt av Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), FAO, Rome.

DWA, 2014, *Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung*, DWA Regelwerk, Merkblatt DWA-M 509, Hennef, Germany.

Haraldstad, T., E. Höglund, F. Kroglund, T.O. Haugen & T. Forseth, 2018, *Common mechanisms for guidance efficiency of descending Atlantic salmon smolts in small and large hydroelectric power plants*, River Research and Application, **34**(9):1179-1185.

Kemp, P.S., M.H. Gessel & J.G. Williams, 2005, *Fine-scale behavioral responses of Pacific salmonid smolts as they encounter divergence and*

acceleration of flow, Transactions of the American Fisheries Society, **134**(2):390-398.

Kerr, J.R. & P.S. Kemp, 2019, *Masking a fish's detection of environmental stimuli: application to improving downstream migration at river infrastructure*, Journal of Fish Biology, **95**(1):228-237.

Larinier, M., 2002, *Location of fishways*. In: Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. Bulletin français de la pêche et de la pisciculture, 364:39-53.

Larinier, M. & F. Travade, 2002, *Downstream Migration: Problems and Facilities*, In: Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. Bulletin français de la pêche et de la pisciculture, 364:181-207.

Lindberg, D.-E., K. Leonardsson & H. Lundqvist, 2016, *Path Selection of Atlantic Salmon (Salmo Salar) Migrating Through a Fishway*, River Research and Applications, **32**(4): 795–803.

Pavlov, D.S., 1989, *Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR*, bearbetad och översatt av Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO Fisheries Technical Paper, No. 308, Rome.

Saadi, S., 2005, *Validation of semi-empirical correlations and CFD for air jet penetration in crossflow*, Vattenfall Utveckling AB, Rapport, U 05:99, Älvkarleby.

Towler B., K. Mulligan & A. Haro, 2015, *Derivation and application of the energy dissipation factor in the design of fishways*, Ecological Engineering, **83**:208-217.

USFWS, 2019. *Fish Passage Engineering Design Criteria*, USFWS (U.S. Fish and Wildlife Service), Northeast Region R5, Hadley, Massachusetts.

Wolter, C. & C. Schomaker, 2019, *Fish passes design discharge requirements for successful operation*, River Research and Applications, early view, p. 1-5.